Etude de la rétention d'eau et de la consolidation des sols dans un cadre thermo-hydro-mécanique

Simon Salager

▶ **To cite this version:**

Simon Salager. Etude de la rétention d'eau et de la consolidation des sols dans un cadre thermo-hydro-mécanique. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Montpellier 2, sciences et techniques du Languedoc, 2007. Français. NNT : . tel-00567000

HAL Id: tel-00567000

https://theses.hal.science/tel-00567000

Submitted on 17 Feb 2011

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.

ACADEMIE DE MONTPELLIER

UNIVERSITE MONTPELLIER 2

— SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC —

THÈSE

Présentée à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc
pour obtenir le diplôme de DOCTORAT

Spécialité
Mécanique et Génie Civil

Ecole Doctorale
Information, Structures et Systèmes

ETUDE DE LA RETENTION D'EAU ET DE LA CONSOLIDATION DE SOLS DANS UN CADRE THERMO-HYDRO-MECANIQUE

par

Simon SALAGER

Date de soutenance : mardi 03 juillet 2007 à 10h

Yu-Jun CUI	Ecole Nationale des Ponts et Chaussées - Paris	Président
Lyesse LALOUI	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne	Rapporteur
Jean-Claude VERBRUGGE	Université Libre de Bruxelles	Rapporteur
Tomasz HUECKEL	Duke University - Durham	Examinateur
Christian SAIX	Université Montpellier 2	Directeur de Thèse
Moulay Saïd EL YOUSSOUFI	Université Montpellier 2	Co-Directeur de Thèse

ACADEMIE DE MONTPELLIER

UNIVERSITE MONTPELLIER 2

— SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC —

THÈSE

Présentée à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc
pour obtenir le diplôme de DOCTORAT

Spécialité
Mécanique et Génie Civil

Ecole Doctorale
Information, Structures et Systèmes

ETUDE DE LA RETENTION D'EAU ET DE LA CONSOLIDATION DE SOLS DANS UN CADRE THERMO-HYDRO-MECANIQUE

par

Simon SALAGER

Date de soutenance : mardi 03 juillet 2007 à 10h

Yu-Jun CUI	Ecole Nationale des Ponts et Chaussées - Paris	Président
Lyesse LALOUI	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne	Rapporteur
Jean-Claude VERBRUGGE	Université Libre de Bruxelles	Rapporteur
Tomasz HUECKEL	Duke University - Durham	Examinateur
Christian SAIX	Université Montpellier 2	Directeur de Thèse
Moulay Saïd EL YOUSSOUFI	Université Montpellier 2	Co-Directeur de Thèse

Remerciements

Cette thèse a été réalisée au sein de l'équipe Couplages en Milieux Hétérogènes du Laboratoire de Mécanique et Génie Civil de l'Université Montpellier 2. Ce fut avec plaisir que j'aie travaillé dans cette structure appréciant particulièrement l'ambiance chaleureuse qui y règne ainsi que le dynamisme et la rigueur scientifique que les différents membres du laboratoire ont su instaurer.

Je tiens tout d'abord à remercier René Motro et Pierre Alart pour m'avoir accueilli dans le laboratoire qu'ils ont dirigé successivement. J'en profite ici pour féliciter les différentes personnes qui ont participé et qui participent à la direction du laboratoire pour l'organisation qu'ils ont su établir et qui reste pour moi un exemple. J'ai notamment apprécié l'implication de tous les acteurs du laboratoire dans les choix qui sont faits par la direction.

En acceptant de présider le jury de soutenance, Yu-Jun Cui m'a fait un honneur auquel je suis très sensible. Je tiens à lui exprimer ici ma gratitude.

Je remercie très sincèrement Lyesse Laloui et Jean-Claude Verbrugge, qui ont accepté d'être rapporteurs de ce travail, pour leur lecture attentive du manuscrit. J'ai été également très sensible à la présence de Tomasz Hueckel qui a bien voulu participer à ce jury en qualité d'examinateur.

Mes remerciements vont ensuite à mes deux directeurs de thèse. Tout d'abord Christian Saix dont la rigueur, la pédagogie ainsi que ses larges compétences scientifiques, notamment sur le plan expérimental, sont reconnues de tous. Puis Saïd El Yousoufi, travailleur insatiable et scientifique de qualité, qui a mis toute sa rigueur, ses talents d'encadrant et son dynamisme, au service de la réalisation de ce travail. Je voudrais leur dire combien j'ai apprécié leur disponibilité, leur enthousiasme et leur bienveillance pendant ces années de thèse. Tous deux m'ont beaucoup appris et je ne mesure que maintenant, après avoir pris un peu de recul, la distance parcourue.

Je tiens à remercier tous les gens qui, d'une manière ou d'une autre, ont participé à ce travail et notamment, sans être exhaustif : l'équipe du LMS de l'EPFL, pariculièrement Lyesse Laloui et Bertrand François, notre collaboration a été riche et fructueuse ; Jean-Claude Bénet pour toutes ces discussions thermodynamiciennes ; François Ouedraogo pour ces longues soirées de réflexion.

Je tiens à remercier ensuite toutes les personnes avec qui j'ai partagé ce statut de thésard ; en premier lieu mes voisins de bureau, Anne Laure Lozano pour ses conseils administratifs et

François Ouedraogo pour les discussions interminables sur la géopolitique ; mes anciens voisins de bureau, Fabien Soulié et Vincent Richefeu pour m'avoir accueilli et conseillé à mon entrée en thèse ; Stephane Moreau pour les journées aventures ; Nicolas Angellier pour les soirées Carnon ; Charles Voivret pour les entre midi et deux escalade ; Emilien Azema pour les rendez-vous du jeudi ; Thibaut Weller pour les discussions du 5ème degré ; sans oublier Marine Bagnéris, Bruno Bertel, Félix Latourte, Etienne Malachanne ; et bien sûr Philippe Aubert pour de ne pas avoir pris le poste ATER qui lui revenait, qu'il ne s'en fasse pas il a été bien utilisé.

Je remercie globalement tous les membres du laboratoire pour leur accueil chaleureux et plus précisément : Reine Bonnet, René Motro, Jean-Yves Delenne et Jean-Claude Bénet pour tous ces repas partagés ; Fabien Cherblanc et Dominique Ambard, leur agrégation en mécanique m'a été utile ; André Chrysochoos pour le service après vente ; Patrick Cañadas pour les cinés Patou ; Olivier Arnould, Sandrine Bardet, Thierry Laurent, Olivier Maisonneuve et Bertrand Watrisse pour les enseignements réalisés ensemble ; les membres de la halle mécatronique pour leur aide dans la résolution des innombrables problèmes expérimentaux auxquels il a fallu faire face, merci donc à Gérard Dénaeyer, Yves El Kaïm puis à Gilles Camp et Alain Clary pour les vendredis de la halle.

Je terminerais par un grand bravo à Jennifer Gasparoux pour la conception complexe qu'elle a réalisée ces derniers mois avec même un peu d'avance sur le planning ; le cahier des charges est parfaitement respecté.

Table des matières

Introduction générale **15**

I Comportement hydrique des sols. Effets des déformations et de la température. **19**

1 Cadre général de l'étude **23**
1.1 Contexte et motivations 23
1.2 Quelques aspects généraux 24
1.2.1 Mécanismes de rétention d'eau 24
La capillarité 25
Les forces d'adsorption 27
1.2.2 Les différents domaines hydriques 28
1.2.3 Représentation schématique de l'espace poral 29
1.2.4 Courbe de rétention 30
Définitions et allure générale 30
Le phénomène d'hystérésis 31
1.2.5 Isotherme de sorption 32
1.3 Synthèse bibliographique 33
1.3.1 Couplages hydro-mécaniques 33
Effet de la succion sur les variations de volumes 34
Effet de la compacité sur les paramètres de la courbe de rétention 35
Modélisation des courbes de rétention pour différentes compacités 37
1.3.2 Influence de la température sur la rétention d'eau 37
Incidence des bulles d'air occluses 38
Incidence des ponts liquides isolés 39
Augmentation de la teneur en solutés 39
Variation de l'angle de mouillage 40
1.4 Axes de recherche 40

2 Relations d'état thermo-hydro-mécanique **41**
2.1 Choix des variables d'état 41
2.2 Écriture du modèle 42
2.2.1 Différentielle de la succion par rapport aux variables θ, T, e 42
2.2.2 Différentielle de la succion par rapport aux variables w, T, e 44
2.2.3 Différentielle de la succion par rapport aux variables S_r, T, e 44
2.2.4 Comparaison des trois développements 45

2.3 Analyse de quelques cas simples . . . 47
2.3.1 Cas généraux . . . 47
2.3.2 Cas particuliers . . . 47
Milieux indéformables . . . 47
Milieux déformables . . . 48
2.4 Cas du chemin de drainage de milieux déformables . . . 49

3 Matériaux et protocoles expérimentaux 53
3.1 Matériaux de l'étude . . . 53
3.1.1 Le sable limoneux argileux . . . 53
Granulométrie . . . 53
Essai Proctor normalisé . . . 54
Analyse minéralogique . . . 56
3.1.2 La céramique à base de terre cuite . . . 56
Caractéristiques générales et procédé de fabrication . . . 56
Caractéristiques des échantillons . . . 56
Porosimétrie . . . 57
3.2 Protocoles expérimentaux . . . 59
3.2.1 La plaque de pression . . . 59
3.2.2 Le banc de sorption . . . 61
3.2.3 Mesure des variables teneur en eau et indice des vides . . . 62
3.2.4 Protocole de fabrication des échantillons . . . 63
3.2.5 Modèle d'ajustement pour la courbe de rétention . . . 64
3.2.6 Modèle d'ajustement pour l'isotherme de sorption . . . 65

4 Prise en compte de la déformation 69
4.1 Programme expérimental . . . 69
4.2 Chemin de chargement hydrique . . . 71
4.2.1 Description d'un chemin de chargement hydrique . . . 71
4.2.2 Projection dans un plan e =constante . . . 73
4.2.3 Projection dans un plan w =constante . . . 77
4.2.4 Projection dans un plan s =constante . . . 80
4.2.5 Etude du domaine hygroscopique . . . 80
4.2.6 Équations du chemin de chargement hydrique . . . 83
4.3 Surface caractéristique du sable limoneux argileux . . . 84

5 Effet de la température 95
5.1 Effet de la température sur le comportement hydrique dans les domaines funiculaire et pendulaire . . . 96
5.1.1 Modèle de comportement thermo-hydrique . . . 96
5.1.2 Application du modèle aux différents matériaux de notre étude . . . 100
Cas de la céramique en terre cuite . . . 100
Cas du sable limoneux argileux . . . 101
Application du modèle à des données de la littérature . . . 104
5.2 Effet de la température sur l'isotherme de sorption . . . 108

6 Application à la détermination de la perméabilité des sols non saturés 117
6.1 Cas général . . . 118
6.2 Cas des chemins de chargement hydrique . . . 122

II Comportement mécanique des sols. Effets de la température et de la succion. 129

7 Cadre général de l'étude 133
7.1 Contexte et motivations . . . 133
7.2 Généralités sur le comportement mécanique des sols . . . 134
7.2.1 Notion de contrainte effective . . . 134
7.2.2 Variables utilisées pour caractériser les états de contrainte et de déformation . . . 136
7.2.3 Déformation volumique des sols . . . 138
7.2.4 Critère de plasticité - Surface de charge . . . 139
7.3 Synthèse bibliographique . . . 139
7.3.1 Consolidation thermique et effet de la température sur le comportement mécanique . . . 139
Consolidation thermique . . . 139
Effet de la température sur les indices de gonflement et de compression . 141
Effet de la température sur la contrainte de préconsolidation . . . 142
7.3.2 Effet de la succion sur le comportement mécanique des sols . . . 145
Effet de la succion sur les indices de gonflement et de compression . . . 145
Effet de la succion sur la contrainte de préconsolidation et sur la surface de charge . . . 147

8 Matériau, dispositifs expérimentaux et méthodes 149
8.1 Matériau de l'étude : le limon de Sion . . . 149
8.1.1 Granulométrie . . . 149
8.1.2 Analyse minéralogique . . . 149
8.1.3 Caractérisation hydrique . . . 150
8.2 La cellule d'essai isotrope thermique . . . 151
8.2.1 Historique . . . 151
8.2.2 Description générale . . . 152
8.2.3 Système de régulation de la contrainte isotrope . . . 152
8.2.4 Système de régulation de la succion . . . 153
8.2.5 Système de mesure et de régulation de la température . . . 154
8.2.6 Dispositif de mesure des échanges d'eau . . . 155
8.2.7 Dispositif de mesure des déplacements . . . 156
8.2.8 Acquisition . . . 158
8.3 Essais préliminaires de caractérisation . . . 159
8.3.1 Essais de compactage . . . 159
8.3.2 Essais de fluage . . . 160
8.3.3 Conclusion . . . 160
8.4 Protocole et programme expérimentaux . . . 161
8.4.1 Protocole de fabrication des échantillons . . . 161

8.4.2 Programme expérimental 162

9 Étude expérimentale **165**
9.1 Résultats des essais 165
9.1.1 Comportement hydrique 165
9.1.2 Chargement thermique 167
9.1.3 Consolidation mécanique 168
9.1.4 Mise en évidence de l'effet de la succion 169
9.1.5 Mise en évidence de l'effet de la température 169
9.2 Indice de gonflement et de compression 172
9.3 Contrainte de préconsolidation 177
9.3.1 Cas des essais isotropes 177
9.3.2 Comparaison avec les essais œdométriques réalisés par l'équipe du LMS de l'EPFL 178
9.3.3 Fonctions d'approximation de la contrainte de préconsolidation 181

Conclusion générale **189**

Nomenclature

Symboles latins

a	Coefficient directeur de la fonction (4.20)	[/]
C_c	Coefficient de courbure (partie I)	[/]
C_c	Indice de compression associé au plan $\log(p) - e$ (partie II)	[/]
C_s	Indice de glonflement associé au plan $\log(p) - e$	[/]
C_u	Coefficient d'uniformité	[/]
D	Diamètre de pores	[m]
D_{10}	Ouvertures de tamis laissant passer 10% en poids des tamisats cumulés	[m]
D_{30}	Ouvertures de tamis laissant passer 30% en poids des tamisats cumulés	[m]
D_{60}	Ouvertures de tamis laissant passer 60% en poids des tamisats cumulés	[m]
e	Indice des vides	[/]
e_0	Indice des vides initial	[/]
f	Fonction de la surface caractéristique	
$F_{capillaire}$	Force capillaire entre deux grains	[N]
F_e	$= (\partial s/\partial w)_{e,w}$	[Pa]
F_T	$= (\partial s/\partial T)_{w,e}$	[Pa.K^{-1}]
$F_{T\beta}$	$= F_w \times w \times (\beta_e - \beta_s)$	[Pa.K^{-1}]
$F_{T\sigma}$	$= \frac{s}{\sigma_s} \times \frac{d\sigma_s}{dT}$	[Pa.K^{-1}]
$F_{T\phi}$	$= -s \times \tan\phi \times \frac{d\phi}{dT}$	[Pa.K^{-1}]
F_w	$= (\partial s/\partial w)_{T,e}$	[Pa]
g	Accélération de la pesanteur	[m.s^{-2}]
G_s	Densité d'un sol	[/]
h	Hauteur d'ascension capillaire	[m]
H_l	Chaleur de condensation	[J.mol^{-1}]
H_m	Chaleur de sorption de la monocouche	[J.mol^{-1}]
H_n	Chaleur de sorption de la multicouche	[J.mol^{-1}]
HR	Humidité relative	[/]
I_P	Indice de plasticité	[/]
k_0	$= \sigma_r/\sigma_v$ et constante de Jacky	[/]
k_e	Fonction relative à l'effet de e sur la perméabilité	[/]
k_r	Coefficient relatif de perméabilité	[/]
k_T	Fonction relative à l'effet de T sur la perméabilité	[/]

k_w	Fonction relative à l'effet de l'état de saturation sur la perméabilité	[/]
K_{ns}	Perméabilité en non saturé	[m.s^{-1}]
K_{sat}	Perméabilité en saturé	[m.s^{-1}]
m	Exposant des modèles de Van Genuchten (1980) et Fredlund et Xing (1994)	[/]
m_e	Masse d'eau	[kg]
m_h	Masse de sol humide	[kg]
m_{h+ker}	Masse humide de sol imbibé dans de kerdane	[kg]
m_s	Masse de sol sec	[kg]
M	Pente de la droite d'état critique	[/]
M_e	Masse molaire de l'eau	[g.mol^{-1}]
n	Exposant des modèles de Van Genuchten (1980) et Fredlund et Xing (1994)	[/]
OCR	Degré de surconsolidation	[/]
p	Contrainte nette moyenne	[Pa]
p_c	Contrainte nette moyenne de préconsolidation	[Pa]
p_e^*	Pression de la phase de l'eau	[Pa]
p_g^*	Pression de la phase gazeuse	[Pa]
p_m^*	Pression de mercure	[Pa]
q	Contrainte déviatorique	[Pa]
r, r'	Rayon d'un tube capilaire ou rayon de pores équivalent	[m]
$r\,(z)$	Rayon de l'échantillon (cellule d'essais isotrope) à l'ordonnée z	[m]
r_e	Rayon équivalent de l'échantillon (cellule d'essais isotrope)	[m]
r_{mes}	Rayon mesuré de l'échantillon (cellule d'essais isotrope)	[m]
r_0	Rayon initial de l'échantillon (cellule d'essais isotrope)	[m]
R	Constante des gaz parfaits	[J.mol^{-1}.K^{-1}]
R_1, R_2	Rayons de courbure d'un interface eau-air	[m]
R_c	Rayon de courbure d'un interface sphérique eau-air	[m]
s	Succion	[Pa]
s_a	Succion d'entrée d'air	[Pa]
s_i	Succion correspondant au point d'inflexion de la courbe de rétention	[Pa]
s_p	Succion pour laquelle la droite de pente φ coupe l'axe des abscisses	[Pa]
s_r	Succion correspondant à la teneur en eau résiduelle	[Pa]
S_r	Degré de saturation	[/]
S_{tot}	Surface totale de la phase solide	[m^2]
S_{sp}	Suface spécifique de la phase solide	[m^2.kg^{-1}]
T	Température	[K]
T_0, T_{ref}	Température de référence	[K]
T_{amb}	Température ambiante	[K]
V	Volume	[m^3]
V_e	Volume d'eau	[m^3]
V_g	Volume de la phase gazeuse	[m^3]
V_{ker}	Volume de kerdane	[m^3]
V_s	Volume de la phase solide	[m^3]

V_v	Volume des vides	[m^3]
V_{tot}	Volume total	[m^3]
w	Teneur en eau massique	[/]
w_i	Teneur en eau correspondant au point d'inflexion de la courbe de rétention	[/]
w_{int}	Teneur en eau d'intersection de la fonction (4.25)	[/]
w_L	Limite de liquidité	[/]
w_p	Limite de plasticité	[/]
w_r	Teneur en eau résiduelle	[/]
w_{sat}	Teneur en eau de saturation	[/]
y_0	Rayon de gorge d'un pont capillaire	[m]

Symboles grecs

β_e	Coefficient de dilatation thermique de l'eau	[K^{-1}]
β_s	Coefficient de dilatation thermique de la phase solide	[K^{-1}]
χ	Coefficient de la parabole $f(HR)$ (Equation (3.19))	[/]
δ	Angle de frottement interne du sol	[rad]
δ_{ij}	Symbole de Kronecker	
$\underline{\underline{\epsilon}}$	Tenseur des déformations linéarisé	
ϵ_{vol}	Déformation volumique	[/]
ϵ_r	Déformation radiale	[/]
ϵ_v	Déformation verticale	[/]
ϕ	Angle de mouillage associé à l'eau	[rad]
ϕ_m	Angle de mouillage associé au mercure	[rad]
φ	Pente de la partie linéaire de la courbe de rétention	[/]
γ^{ls}	Tension interfaciale liquide-solide	[$N.m^{-1}$]
γ^{gs}	Tension interfaciale gaz-solide	[$N.m^{-1}$]
γ^{lg}	Tension interfaciale liquide-gaz	[$N.m^{-1}$]
γ_s	Paramètre relatif à l'effet de la succion sur σ_c	[/]
γ_T	Paramètre relatif à l'effet de la température sur σ_c	[/]
Γ_s	Poid volumique	[$kN.m^{-3}$]
η	Coefficient de la parabole $f(HR)$ (Equation (3.19)) (partie I)	[/]
η	$= q/p$ (partie II)	[/]
κ	Indice de glonflement associé au plan $\ln(p) - e$	[/]
λ	Indice de compression associé au plan $\ln(p) - e$	[/]
μ_e	Viscosité dynamique de l'eau	[$Pa.s^{-1}$]
ν	Coefficient de poisson	[/]
ν_e	Viscosité cinématique de l'eau	[$m^2.s^{-1}$]
θ	Teneur en eau volumique	[/]
ρ_e^*	Masse volumique spécifique de l'eau	[$kg.m^{-3}$]
ρ_s^*	Masse volumique spécifique de la phase solide	[$kg.m^{-3}$]
ρ_s	Masse volumique apparente sèche	[$kg.m^{-3}$]
ρ_{ker^*}	Masse volumique spécifique du kerdane	[$kg.m^{-3}$]

$\underline{\underline{\sigma}}$	Tenseur des contraintes	
σ_c	Contrainte nette de préconsolidation	[Pa]
σ_{ij}	Composante i, j du tenseur contrainte totale	[Pa]
σ'_{ij}	Composante i, j du tenseur de contrainte effective	[Pa]
σ_{iso}	Contrainte nette isotrope	[Pa]
σ_m	Tension superficielle du mercure	[N.m^{-1}]
σ_{max}	Contrainte nette maximale subie par le sol	[Pa]
σ_{net}	Contrainte nette	[Pa]
σ_r	Contrainte nette radiale	[Pa]
σ_s	Tension superficielle	[N.m^{-1}]
σ_v	Contrainte nette verticale	[Pa]
ω	Teneur en eau volumique	[/]
ζ	Coefficient de la parabole $f(HR)$ (Equation (3.19))	[/]

Introduction générale

L'étude des couplages multiphysiques entre les phénomènes thermiques, hydriques et mécaniques dans les sols partiellement saturés, constitue un axe de recherche des plus dynamiques en géomécanique. L'importance de cet axe de recherche est justifiée par les nombreuses applications liées au domaine environnemental. En effet, il est nécessaire pour ce type d'applications de pouvoir prédire le comportement des sols soumis à des sollicitations complexes en température, succion et contrainte. Parmi les applications les plus concernées par ces aspects, on peut citer :

- La gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue pour laquelle des études de faisabilité du stockage en formations géologiques profondes ont été entreprise par de nombreux pays (Canada, États-unis, France, Japon, Suisse, Suède (Tang (2005))). Le forage de galeries, puis, l'entreposage de colis à caractère hautement exothermique, dans une formation géologique stable et saturée en eau depuis des millions d'années, provoque un déséquilibre thermo-hydro-mécanique de la formation. Ce déséquilibre induit des transferts d'eau et des déformations, conséquences des effets couplés de la température, de la pression des phases fluides et des contraintes mécaniques. L'évaluation de la faisabilité de tels stockages nécessite donc une connaissance approfondie des couplages thermo-hydro-mécaniques dont les sols peuvent faire l'objet. A propos de ce thème, on peut consulter les travaux de Escoffier (2002), Olchitsky (2002) ou Tang (2005).
- Les géostructures énergétiques souterraines qui regroupent différentes structures de génie civil comme les réservoirs de chaleur en sous-sol (Saix (1987)), les pieux échangeurs utilisés pour la climatisation des bâtiments (Laloui et al. (2003)), ou encore les aménagements souterrains mis en place pour l'exploitation de la géothermie (Rabemanana et al. (2003)). Dans chacun de ces cas, comme dans celui du stockage de déchets radioactifs en formations géologiques profondes, les phénomènes qui se développent sont de nature thermo-hydro-mécanique. Leur modélisation nécessite la maîtrise des couplages multiphysiques induits dans le milieu.

Plusieurs modèles de comportement des sols ont été développés par différentes équipes de recherche (par exemple : Nova et Hueckel (1981), Mouratidis et Magnan (1983), Alonso et al. (1990) et, Laloui et Nuth (2005) et Laloui et al. (2005)). Sur les aspects purement mécaniques de ces modèles, on note une certaine convergence de vues. Par contre, les aspects hydriques, thermiques et les couplages associés, font encore l'objet d'investigations expérimentales dont les résultats sont attendus par la communauté scientifique. C'est dans ce cadre que s'inscrit le travail présenté dans ce mémoire. Il porte sur l'étude des deux phénomènes de rétention et de consolidation des sols partiellement saturés. Compte tenu des objectifs cités plus haut, cette étude est évidemment réalisée dans un cadre thermo-hydro-mécanique.

Ce mémoire est organisé en deux parties consacrées respectivement à "l'effet de la déformation et de la température sur le comportement hydrique" et à "l'effet de la température et de la succion sur le comportement mécanique" de sols non saturés.

La première partie, structurée en six chapitres, concerne le comportement hydrique des sols. On s'attache à analyser plus particulièrement deux volets : *l'effet de la déformation sur le comportement hydrique* et *l'effet de la température sur le comportement hydrique.*

Concernant *l'effet de la déformation sur le comportement hydrique*, les idées directrices de ce volet s'attachent à :

- montrer la pertinence du concept de surface caractéristique d'un sol par opposition à la courbe de rétention dont la portée s'avère limitée dans le cas de milieux très déformables,
- illustrer ce concept dans le cas d'un sable limoneux argileux par la réalisation de l'ensemble des expérimentations nécessaires à la construction de cette surface,
- montrer que cette surface contient et généralise la notion de courbe de rétention et va au delà en représentant d'autres types de chemins de chargement.

La mise en œuvre de ce volet de la recherche s'appuie sur le développement d'une relation d'état thermo-hydro-mécanique présentée dans le chapitre 2. Cette relation permet de relier les variations de la succion aux variations de l'indice des vides, de la teneur en eau et de la température. Dans le cas isotherme, cette relation d'état suggère d'envisager l'étude de la rétention d'eau dans les sols en prenant en compte l'effet de la déformation. Un telle approche de la rétention conduit à proposer une extension de la notion de courbe de rétention vers une surface caractéristiques qui représente indépendamment les changements de volume d'eau et de volume total. Pour l'illustration de cette démarche, un programme expérimental a été élaboré sur la base d'essais de désaturation d'un sable limoneux argileux (chapitre 3). Ces essais couvrent l'ensemble des états hydriques pour différents états de compacité initiale et donnent accès à plus de 240 triplets (indice des vides, teneur en eau, succion). Ces résultats constituent le support de la construction de la surface d'état (chapitre 4).

Concernant *l'effet de la température sur le comportement hydrique*, les idées directrices de ce volet s'attachent à :

- clarifier l'effet de la température sur les propriétés de rétention d'un sol,
- proposer une construction des courbes de rétention à une température quelconque à partir d'une courbe de rétention à une température donnée.

L'effet de la température a été analysé à travers l'influence de la variation de température dans la relation d'état présentée dans le chapitre 2. Les coefficients de cette relation ont été explicités en utilisant les caractéristiques physiques des constituants. On aboutit à un modèle qui permet, à partir d'une courbe de rétention mesurée à une température donnée, de prédire la courbe de rétention à n'importe quelle autre température. Ce modèle a été validé sur un matériau indéformable (céramique) et sur un matériau déformable (sable limoneux argileux). Il a ensuite été appliqué, avec succès, à d'autres matériaux de la littérature (chapitre 5).

La partie I se termine par une application à la détermination de la perméabilité des sols non saturés en tenant compte de la déformation et de la température (chapitre 6).

La deuxième partie de ce mémoire, structurée en trois chapitres, concerne l'effet de la température et de la succion sur le comportement mécanique des sols. Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un programme de collaboration entre le Laboratoire de Mécanique des Sols (LMS) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) et le Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC) de l'Université Montpellier 2 (UM2).

L'effet de la température et de la succion est examiné à partir d'essais de consolidation mécanique du limon de Sion (Suisse). Ces essais sont réalisés à différents niveaux de température et de succion en configurations isotrope (LMGC) et œdométrique (LMS). On s'intéresse en particulier à l'influence de la température et de la succion sur les indices de gonflement

et de compression et sur la contrainte de préconsolidation. L'ensemble des résultats (LMS et LMGC) concernant la contrainte de préconsolidation permet de proposer une relation donnant cette contrainte en fonction de la température et de la succion.

Première partie

Comportement hydrique des sols. Effets des déformations et de la température.

Introduction

Cette partie est consacrée à l'étude du comportement hydrique des sols en s'intéressant, d'une part à certains couplages hydro-mécaniques (effet de la succion sur l'indice des vides et influence de la compacité sur le comportement hydrique), et d'autre part à l'effet de la température sur la capacité de rétention du milieu.

Dans le chapitre 1, on s'attache dans un premier temps à rappeler quelques notions de base. On présente ensuite une synthèse des résultats bibliographiques qui concernent notre domaine d'étude.

Le chapitre 2 présente le développement d'un modèle qui permet d'exprimer les variations de succion en fonction des variations de teneur en eau, d'indice des vides et de température. Ce modèle est ensuite décliné en plusieurs cas particuliers. Une de ces déclinaisons montre l'existence, dans l'espace *succion - teneur en eau - indice des vides*, d'une surface représentant tous les états que peut prendre le sol. Cette surface sera appelée surface caractéristique. Une autre déclinaison aboutit à une relation exprimant la variation de la teneur en eau induite par une variation de température.

Le chapitre 3 présente les principales caractéristiques des matériaux utilisés pour l'étude expérimentale (une céramique en terre cuite et un sol, le sable limoneux argileux). On détaille ensuite les protocoles expérimentaux mis en œuvre comprenant les dispositifs expérimentaux (plaque de pression et banc de sorption), ainsi que les méthodes de préparation des échantillons et de mesure des différentes variables.

Dans le chapitre 4, on s'attache à mettre en évidence expérimentalement certains couplages hydro-mécaniques dans le cas du sable limoneux argileux. Pour cinq séries d'échantillons, fabriqués à cinq indices des vides différents, on a imposé des chemins de drainage de l'état saturé à l'état sec. Une modélisation de ces chemins, dans l'espace *succion - teneur en eau - indice des vides*, est proposée. On développe ensuite une méthode de caractérisation et de modélisation de la surface caractéristique.

Le chapitre 5 est dédié à l'étude expérimentale et théorique de l'effet de la température sur le comportement hydrique. Les courbes de rétention et les isothermes de sorption d'une céramique à base de terre cuite et d'un sable limoneux argileux ont été établis à partir de mesures réalisées à 20 et 60 °C. La relation prédictive obtenue dans le chapitre 2 permet, à partir de la donnée de la surface caractéristique ou de la courbe de rétention à une température T_0, de déterminer la surface caractéristique ou la courbe de rétention à toute autre température T. Les résultats expérimentaux et théoriques sont comparés pour la céramique et le sable limoneux argileux ainsi que pour deux autres matériaux de la littérature.

Enfin, le chapitre 6 est consacré à la détermination du coefficient relatif de perméabilité à partir de la courbe de rétention. Il s'agit d'une application qui repose sur une méthode proposée dans la littérature pour calculer le coefficient relatif de perméabilité en fonction de

la succion. Avec ce même type de méthode, en considérant les résultats des chapitres 4 et 5, on détermine le coefficient relatif de perméabilité à partir de la surface de caractéristique en fonction de la succion, de l'indice des vides et de la température. On propose enfin une surface donnant, pour une température fixée, la perméabilité du sable limoneux argileux en fonction de l'indice des vides et de la succion.

Chapitre 1

Cadre général de l'étude

Ce chapitre est une introduction à l'étude du comportement hydrique des milieux poreux et en particulier des sols. Il présente le contexte et les motivations des recherches abordées dans ce mémoire. On s'attache ensuite à rappeler quelques notions utilisées dans la suite de ce mémoire. Enfin, une synthèse des résultats bibliographiques concernant ce domaine de recherche sera détaillée avant d'introduire les différents axes abordés dans cette partie.

1.1 Contexte et motivations

Le comportement hydrique d'un milieu poreux, et plus particulièrement d'un sol, est mis en évidence par les chemins de drainage ou d'imbibition. Expérimentalement, on obtient ce type de chemins en imposant à la phase liquide, une suite de potentiels énergétiques croissants ou décroissants ; le matériau n'étant soumis à aucune contrainte extérieure. Ce chargement ou déchargement hydrique (croissance ou décroissance du potentiel énergétique) induit des variations de volumes concernant particulièrement la phase liquide mais aussi la phase solide.

Classiquement, en mécanique des sols, deux variables d'état sont utilisées pour traduire le potentiel énergétique de la phase liquide : la succion s (différence de pression entre la phase gazeuse et la phase liquide) ou l'humidité relative de la phase gazeuse HR (rapport entre la pression de vapeur d'eau dans la phase gazeuse et la pression de vapeur saturante). Une discussion sur le domaine de validité de ces variables sera présentée dans l'annexe 9.3.3. De même, l'état de saturation du milieu peut être quantifié par les variables d'état, degré de saturation S_r (rapport entre le volume d'eau et le volume de vide) ou teneur en eau qui peut être soit volumique θ (rapport entre le volume d'eau et le volume total) soit massique w (rapport entre la masse d'eau et la masse sèche).

La relation qui lie le potentiel énergétique de la phase liquide à l'état de saturation du milieu est présentée, soit en terme de courbe de rétention d'eau ($S_r(s)$, $\theta(s)$, $w(s)$) lorsque l'on considère tous les états hydriques de la saturation à l'état sec, soit en terme d'isotherme de sorption ($S_r(HR)$, $\theta(HR)$, $w(HR)$) lorsque l'on ne s'intéresse qu'aux chargements hydriques les plus élevés. Ces courbes caractérisent la capacité de rétention de la phase solide sur la phase liquide et leurs allures dépend en particulier de la porosité, de la granulométrie, de la tortuosité du réseau poreux et de la nature minéralogique de la phase solide.

Les agronomes se sont intéressés les premiers à la relation entre le potentiel énergétique de la phase liquide et l'état de saturation des sols, avec comme objectif principal, de quantifier

le stress hydrique auquel sont soumises les plantes.

Lorsque les géotechniciens ont commencé à étudier la non saturation, ils ont utilisé les outils développés précédemment pour lesquels ils ont approfondi l'aspect théorique. Ils ont ainsi fait passer la courbe de rétention et l'isotherme de sorption du statut de relations à celui de lois de comportement, créant un cadre conceptuel permettant d'appréhender le comportement hydrique des milieux poreux non saturés.

Durant ces dernières décennies, le champ d'application de ces outils s'est encore élargi. Des auteurs ont notamment développé des méthodes permettant, à partir de ces courbes, d'accéder à des caractéristiques intrinsèques du milieu (coefficient relatif de perméabilité, coefficients de diffusion) ou encore à des caractéristiques de résistance au cisaillement.

Néanmoins, du fait de ses nombreuses applications, notamment dans le domaine géo-environnemental, ce champ de recherche reste très dynamique et de nombreux axes sont encore à développer. On se propose ici d'aborder les deux aspects suivants :

- La prise en compte de la déformation dans l'analyse du comportement hydrique d'un sol. Ce point inclut à la fois l'influence du potentiel énergétique de la phase liquide sur les variations de volumes et l'influence de la compacité sur la capacité de rétention du milieu.
- L'effet de la température sur la capacité de rétention de milieux poreux.

1.2 Quelques aspects généraux

Les sols non saturés peuvent être décrits comme des milieux poreux triphasiques. Dans le cas général, la phase solide est constituée d'un empilement de grains (sables et limons) mélangés avec une fraction argileuse. La phase liquide est considérée comme constituée uniquement d'eau pure. La phase gazeuse comporte deux constituants : l'air sec et la vapeur d'eau.

Compte tenu de cette complexité structurale, les mécanismes qui régissent le comportement hydrique de ces milieux et qui sont à l'origine des couplages thermo-hydro-mécaniques sont eux aussi complexes. De ce fait, la définition et la représentation de certaines notions liées à ces mécanismes peuvent être sujet à quelques variations suivant la sensibilité du lecteur. Afin d'éviter de possibles confusions, on se propose, dans ce chapitre, de reprendre quelques-unes de ces notions qui concernent en particulier la structure solide des sols et la nature de l'eau dans l'espace poral. On décrira les forces qui lient l'eau au squelette solide, les différents états hydriques que peut prendre le milieu et la représentation schématique que l'on peut faire de la structure d'un sol non saturé. On présentera ensuite les deux outils de caractérisation hydrique utilisés : la courbe de rétention et l'isotherme de sorption.

1.2.1 Mécanismes de rétention d'eau

Dans un milieu poreux, et en particulier dans un sol, la phase liquide est liée à la phase solide par des forces d'hydratation. Ces forces sont de plusieurs natures et l'importance de chacune varie suivant l'état hydrique du milieu. Pour de fortes teneurs en eau, c'est la capillarité qui a un rôle prépondérant dans la rétention d'eau alors que pour les états les plus secs, ce sont les forces d'adsorption. On présente ici une description de ces deux types de mécanismes et de leurs influences sur le comportement du milieu.

La capillarité

La tension superficielle, ou énergie de surface, est une tension qui existe à la surface de séparation de deux milieux. On considère ici le cas classique dans les sols de l'interface eau-air. C'est cette tension qui explique les phénomènes de capillarité.

Dans l'eau, les molécules exercent entre elles des forces d'attraction ou de répulsion : forces de Van der Waals (attraction) et forces électrostatiques (attraction ou répulsion). Chaque molécule d'eau située au sein du milieu va être soumise à un ensemble de forces de même nature exercées dans toutes les directions par les molécules voisines (figure 1.1-**a**). Par contre, une molécule d'eau située à l'interface eau-air va être soumise à des actions différentes : actions dues au liquide et actions dues au gaz (figure 1.1-**b**). Du fait de la faible densité du gaz (la densité de l'air à la pression atmosphérique est d'environ $1,2 \times 10^{-3}$ à 20°C) par rapport au liquide (la densité de l'eau est d'environ 1 à 20°C), les forces exercées par l'air sont plus faibles que celles exercées par l'eau. Une molécule d'eau en équilibre à la surface est donc également soumise à un ensemble de forces tangentes à cette surface libre. C'est cette attraction qui engendre la tension superficielle que l'on notera σ_s (voir figure 1.1). L'intensité de cette tension dépend de la nature des deux milieux qui se trouvent de part et d'autre de l'interface, mais elle dépend également des paramètres qui influent sur les forces d'interaction moléculaire, notamment la température.

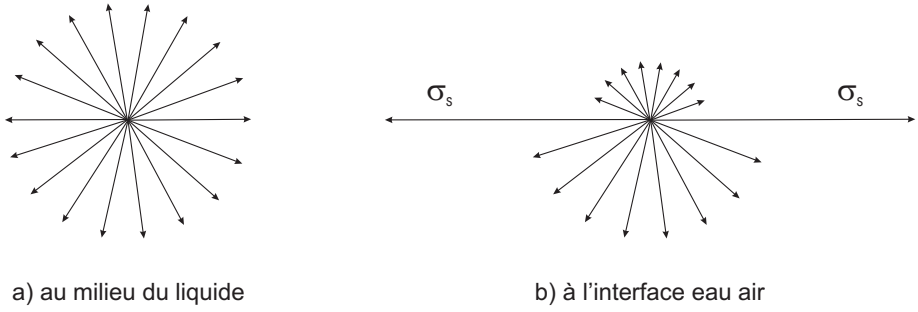

FIG. 1.1 – Forces d'interaction agissant sur une molécule d'eau.

L'interface eau-air qui se trouve sous tension s'apparente à une membrane élastique. C'est cette membrane qui permet d'expliquer, entre autres, la forme des gouttes et des bulles. Dans le cas d'une goutte, le saut de pression existant entre les phases liquide et gazeuse est régi par la loi de Laplace. Cette loi relie la différence de pression entre la phase gazeuse p_g^* et la phase liquide p_e^* à la tension superficielle du liquide σ_s et aux rayons de courbure de l'interface R_1 et R_2 :

$$p_g^* - p_e^* = \sigma_s \times \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \tag{1.1}$$

Si on considère un ménisque d'eau supposé sphérique dans un tube capillaire, les rayons de courbure sont égaux ($R_1 = R_2 = R_c$) (figure 1.2) et l'équation (1.1) prend une forme simplifiée pour donner la loi de Jurin-Laplace :

$$p_g^* - p_e^* = \frac{2 \times \sigma_s}{R_c} = \frac{2 \times \sigma_s \times \cos\phi}{r} \tag{1.2}$$

où r est le rayon du tube capillaire et ϕ l'angle de mouillage.

La succion s étant définie comme la différence de pression entre phase gazeuse et phase liquide, on peut écrire :

$$s = p_g^* - p_e^* = \frac{2 \times \sigma_s}{R_c} = \frac{2 \times \sigma_s \times \cos\phi}{r} \tag{1.3}$$

Dans le cas d'un sol, la phase liquide est mouillante par rapport à la phase solide. Les forces d'adhésion du liquide à la paroi solide sont plus importantes que les forces de cohésion entre les molécules, ce qui explique le phénomène d'ascension capillaire (Figure 1.2).

Dans ce cas, en écrivant l'équilibre entre les forces capillaires et l'action de la gravité sur le liquide dans le tube, on obtient la loi de Jurin :

$$h = \frac{2 \times \sigma_s}{\rho_e^* \times g \times R_c} = \frac{2 \times \sigma_s \times \cos\phi}{\rho_e^* \times g \times r} \tag{1.4}$$

où h est la hauteur d'ascension capillaire, ρ_e^* la masse volumique spécifique de l'eau et g l'accélération de la pesanteur.

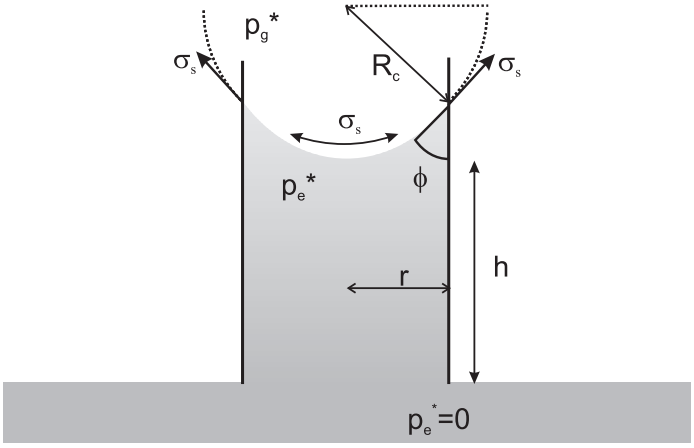

FIG. 1.2 – Illustration du phénomène d'ascension capillaire.

Dans les sols, la capillarité induit deux phénomènes majeurs :

- Le premier que l'on vient de présenter est hydrique. La capacité de rétention d'eau de la phase solide sur la phase liquide résulte en partie de la capillarité. Elle est régie par la loi de Jurin-Laplace.
- Le second est mécanique. La capillarité génère des forces de cohésion inter-granulaire. Ces forces dépendent de la quantité de liquide présente dans le milieu et de ses propriétés.

Pour schématiser ce dernier phénomène, prenons le cas de deux grains, parfaitement sphériques, reliés par un pont capillaire (figure 1.3). Le pont liquide a une forme toroïdale de diabolo. La force $F_{capillaire}$ générée par le pont liquide est la somme de la force due à la dépression dans le pont liquide et des forces dues à la tension superficielle (Soulié (2005)) :

$$F_{capillaire} = 2 \times \pi \times y_0 \times \sigma_s + \pi \times y_0^2 \times \Delta p_{pres} \tag{1.5}$$

où Δp_{pres} est la différence de pression entre l'air et l'eau (on peut parler de succion si cette différence de pression est homogène dans tout le milieu) et y_0 le rayon de gorge (rayon qui correspond à la plus petite section du pont capillaire).

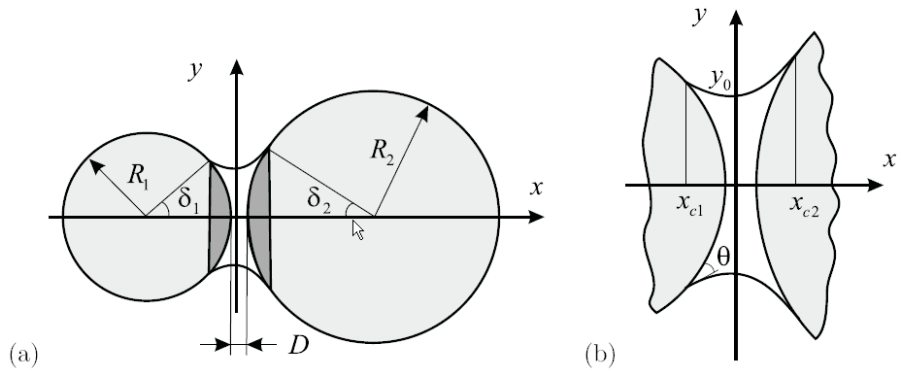

FIG. 1.3 – Pont capillaire entre deux grains sphériques.

L'intensité de chacune de ces forces est très faible, mais prises dans leur ensemble, ces forces modifient de façon importante le comportement macroscopique des sols. On peut prendre comme exemple le sable qui sec n'a aucune cohésion alors que mouillé, il devient "plastique". Les forces capillaires peuvent donc être à l'origine de couplages hydro-mécaniques importants dans les sols.

Les forces d'adsorption

Toutes les surfaces, et notamment celle de la phase solide dans les sols, sont constituées d'atomes n'ayant pas toutes leurs liaisons chimiques satisfaites. Ces surfaces ont donc tendance à combler ce manque en captant des atomes et des molécules (notamment des molécules d'eau). C'est le phénomène d'adsorption. Il faut imaginer l'adsorption de façon dynamique (Figure 1.4) : une molécule d'eau venant de la phase gazeuse heurte la surface du squelette solide et est captée par son champ attractif. Cette molécule peut ensuite quitter la surface du solide et retourner dans la phase gazeuse sous l'effet de l'agitation thermique. L'échange est permanent entre molécules adsorbées et molécules de la phase gazeuse. A l'équilibre le bilan de ces échanges est nul.

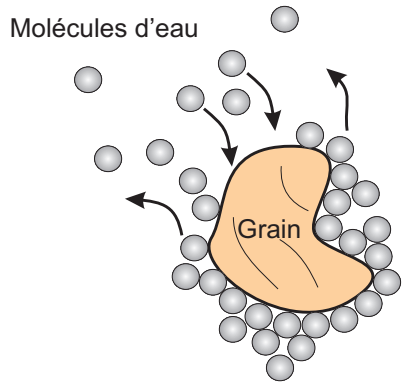

FIG. 1.4 – Schématisation de l'agitation des molécules d'eau adsorbées.

Dans les processus qui conduisent à l'adsorption d'une molécule d'eau sur la phase solide, on distingue :

- L'adsorption physique ou physisorption. Elle met en jeu des liaisons faibles et conserve l'identité des molécules adsorbées. Elle est en général réversible et on peut la comparer au dépôt de buée sur une paroi froide. Les forces de physisorption sont de trois types : les forces de Van Der Waals, les forces polaires résultant de la présence de charges électriques et les forces de liaisons hydrogènes dues au groupement hydroxyle. L'équilibre est obtenu lorsque les vitesses d'évaporation et de condensation sont égales. L'adsorption physique est donc favorisée par une baisse de la température.
- L'adsorption chimique ou chimisorption. Elle met en jeu des énergies de liaison importantes et conduit à la rupture de liaisons intra-moléculaires. L'adsorption chimique s'accompagne d'une profonde modification de la répartition des charges électroniques des molécules adsorbées. Les forces mises en jeu sont du même type que celles qui sont impliquées lors de la formation des liaisons chimiques. Ce processus qui conduit à des modifications irréversibles ne sera pas pris en compte dans ce travail.

La surface des minéraux constituant les sols est très variée. On peut cependant distinguer trois familles de situation (Van Damme (2002)) :

1. Les surfaces formées d'atomes d'oxygène (O).
2. Les surfaces formées de groupes hydroxyle (OH).
3. Les surfaces chargées (Li^+, Na^+, Ca^+ et Mg^{++} pour les plus fréquents).

L'énergie d'interaction entre la phase solide et l'eau va être conditionnée par la nature de la surface. Si elle est de la famille 1 ou 2, l'énergie d'interaction d'une molécule d'eau avec la surface va être de l'ordre de 10^{-20} J. Si la surface est chargée, cette énergie peut être jusqu'à 50 fois plus grande suivant la nature du cation.

Les sables et les limons sont en grande partie formés de quartz (SiO_2) car ils proviennent souvent de la décomposition du granite par érosion. On trouve également dans leur composition de nombreux autres minéraux tels que la calcite ($CaCO_3$) ou les différents feldspaths ($KAlSi_30_8$, $NaAlSi_30_8$, $CaAl_2Si_20_8$...). Tous ces composés appartiennent aux familles 1 et 2 ; ils ont des surfaces initialement oxygénées qui se sont plus ou moins hydroxylées par altération.

Pour les argiles, la complexité de leur structure rend leur classification plus difficile. Les kaolinites ont des surfaces de la famille 2, les smectites et les illites ont des surfaces associant des atomes d'oxygène et des cations (familles 1 et 2). Enfin, les chlorites présentent à la fois les trois situations.

La capacité de rétention d'eau par adsorption va donc dépendre de la nature du matériau. Le second paramètre important est la surface spécifique du milieu car la quantité adsorbée peut être considérée comme proportionnelle à la surface de contact entre les deux phases.

1.2.2 Les différents domaines hydriques

Le long d'un chemin d'imbibition, l'état hydrique du sol varie. On peut définir trois domaines, plus ou moins distincts suivant la nature du sol (Ruiz (1998)) (figure 1.5) :

- Le domaine hygroscopique (**1**). L'eau se trouve sous forme adsorbée autour des grains. La phase liquide est discontinue alors que la phase gazeuse est continue. La pression de vapeur d'eau de la phase gazeuse n'est pas égale à la pression de vapeur saturante. Les échanges d'eau se font par changement de phase et par filtration de la vapeur.

– Le domaine pendulaire (**2**). La continuité des phases gazeuse et liquide n'est pas assurée. L'eau forme des ponts liquides entre les grains. La filtration en phase gazeuse reste possible pour les états les plus secs. Lorsque la teneur en eau augmente, la fraction continue de la phase gazeuse diminue ce qui réduit la part de la filtration gazeuse dans les transferts. La filtration de la phase gazeuse n'est plus possible lorsque cette phase n'existe que sous forme de poches occluses. On observe le phénomène inverse dans le cas de la filtration en phase liquide. La part de la filtration liquide dans les transferts est maximale pour les teneurs en eau les plus élevées et diminue avec la désaturation du milieu. La phase gazeuse est quasiment saturée en vapeur d'eau ; il y a donc peu de changement de phase. C'est dans ce domaine que le phénomène d'hystérésis (différence entre les chemins de drainage et d'imbibition) est le plus marqué.
– Le domaine funiculaire (**3**). La phase liquide est continue et la phase gazeuse se trouve sous forme de bulles occluses. Les transferts d'eau se font par filtration liquide. La phase gazeuse est complètement saturée en vapeur d'eau ; il n'y a donc plus de changement de phase. Le schéma (**4**) est un cas particulier de ce domaine, il représente l'état saturé dans lequel la phase gazeuse a entièrement disparu.

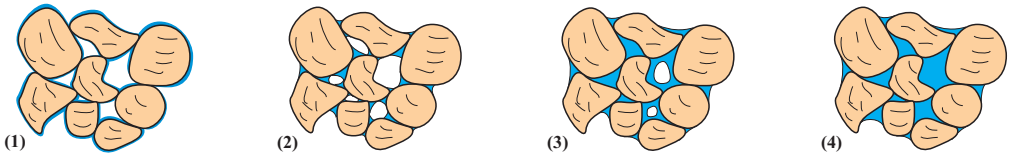

FIG. 1.5 – Schématisation des différents états hydriques d'un sol : **1** état hygroscopique, **2** état pendulaire, **3** état funiculaire, **4** saturation.

1.2.3 Représentation schématique de l'espace poral

L'empilement de grains de formes, de tailles et de natures différentes, mélangés à des éléments argileux, forme le squelette solide. Avec de telles hétérogénéités de constituants dans cet agencement, le réseau de pores est forcément très tortueux. Il est souvent nécessaire de se représenter cette réalité complexe par des modèles aussi simples que possible.

En fait, la représentation schématique de l'espace poral et de la phase liquide dépend du domaine hydrique considéré :

– Dans le domaine funiculaire, l'espace poral est considéré comme un réseau de tubes capillaires cylindriques de tous diamètres. A une succion donnée, on fait correspondre par la loi de Jurin-Laplace un diamètre de pores D. On considère que tous les pores de diamètre supérieur à D sont vides et que les autres sont pleins. Avec l'augmentation de la succion, ce sont des pores de plus en plus fins qui se désaturent. Ce modèle est parfois appelé réseau de tubes capillaires (en anglais : *bundle of cylindrical capillaries*).
– Dans le domaine pendulaire, cette représentation n'est plus adéquate. La phase liquide se trouve alors sous forme de ponts liquides entre les grains ou entre les amas de plaquettes d'argile. La loi de Jurin-Laplace relie ici la succion au rayon des ponts liquides.
– Dans le domaine hygroscopique, l'eau est adsorbée autour des grains et les agrégats de plaquettes d'argile commencent à se désaturer.

1.2.4 Courbe de rétention

La courbe de rétention d'eau d'un milieu poreux est un outil conceptuel permettant d'appréhender son comportement hydrique sur toute l'étendue de la gamme de succions qui est généralement prise entre 0 kPa (état saturé) et 1×10^6 kPa (état supposé sec). On réserve dans ce mémoire l'appellation courbe caractéristique sol-eau aux cas où l'indice des vides est maintenu constant. Cette courbe caractérise la capacité de rétention de la phase solide sur la phase liquide pour une température T constante et un indice des vides e supposé constant. Elle exprime, soit la teneur en eau massique ou volumique, soit le degré de saturation, en fonction de la succion. L'échelle de l'axe des abscisses (succions) est généralement considérée en coordonnées logarithmiques de base 10.

On peut noter ici que si l'indice des vides est supposé constant, l'utilisation de la teneur en eau ou du degré de saturation est équivalente (ces deux variables sont proportionnelles). Dans le cas contraire, ni la teneur en eau seule, ni le degré de saturation seul ne peuvent décrire complètement l'état du milieu. La connaissance d'une grandeur supplémentaire caractérisant le changement de volume total, l'indice des vides par exemple, doit compléter le jeu de variables d'état.

Cette courbe a fait l'objet de nombreuses études dans les dernières décennies. Les articles de Lee Barbour (1998) et de Bachmann et van der Ploeg (2002) font l'état de l'art sur cette thématique. Les principaux résultats concernent différents points :

- La fonction d'ajustement mathématique des points expérimentaux (Gardner (1958), Brooks et Corey (1964), Van Genuchten (1980), Fredlund et Xing (1994)).
- La prédiction de son allure à partir des caractéristiques physiques du sol, notamment à partir de sa courbe granulométrique (Gimenez et al. (1997), Fredlund et al. (2002), Chertkov (2003)).
- L'application à la détermination, du coefficient relatif de perméabilité (Fredlund et al. (1994), Fleureau et Taibi (1995), Jamin (2003)).
- L'application à l'analyse de la résistance au cisaillement (Fredlund et al. (1995)).
- La modélisation de l'hystérésis entre les chemins de drainage et d'imbibition (Saix (1987), Pham et al. (2005)).
- La prise en compte des couplages hydro-mécaniques (Salager et al. (2007), Sugii et al. (2002)).
- L'influence de la température (Tang (2005), Salager et al. (2006)).

Définitions et allure générale

La figure 1.6-**a** montre les allures classiques de courbes de rétention pour différents types de sol. La teneur en eau de saturation w_{sat} est inversement proportionnelle à la compacité. Les argiles, que l'on trouve souvent dans un état lâche, ont donc une teneur en eau de saturation bien plus élevée que celle des sols plus grenus (limons, sables).

La succion d'entrée d'air s_a (figure 1.6-**b**) est la succion à partir de laquelle le sol commence à se désaturer. On peut la relier par la loi de Jurin à un rayon moyen de pores qui correspond aux rayons des pores les plus grands du milieu. De ce fait, les sols de granularité plus fine (argiles), donc de porosimétrie plus fine, ont des succions d'entrée d'air plus élevées que les sols plus grossiers (limons, sables).
Enfin, si dans les domaines funiculaire et pendulaire, l'allure de la courbe de rétention est, d'après la théorie capillaire, étroitement liée à la porosimétrie du milieu, la rétention d'eau

dans le domaine hygroscopique résulte de l'adsorption des molécules d'eau sur la surface de la phase solide. Du fait de la surface spécifique élevée et de l'importante capacité d'adsorption des plaquettes, le domaine hygroscopique est prépondérant dans le cas des argiles.

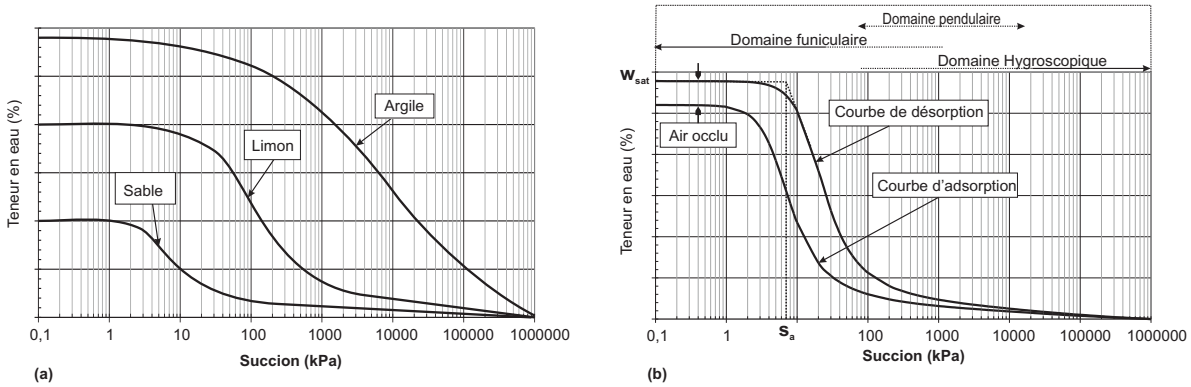

FIG. 1.6 – Courbes de rétention pour différents types de sols **a** et description générale de cette courbe **b**.

Le phénomène d'hystérésis

Si on détermine expérimentalement les courbes de rétention d'un même matériau en désorption et en adsorption, on met en évidence que les chemins de drainage et d'imbibition ne sont pas confondus (figure 1.6-**b**). Il n'existe donc pas, dans le cas général, de relation biunivoque entre la succion et sa variable conjuguée (la teneur en eau par exemple).
La figure 1.7 illustre les trois mécanismes auxquels on attribue classiquement ce phénomène d'hystérésis (Delage et Cui (2000)) :

(**a**) Des pores de diamètres différents sont connectés en parallèle : pour le même chargement hydrique, lors du drainage, le pore de faible diamètre va rester saturé alors qu'il est vide à l'imbibition.

(**b**) Des pores de différents diamètres sont connectés en série : du fait de la variation de rayon, pour atteindre le même niveau de succion, il faut nécessairement que la hauteur h soit plus importante en drainage.

(**c**) L'angle de contact en imbibition est plus important qu'en drainage.

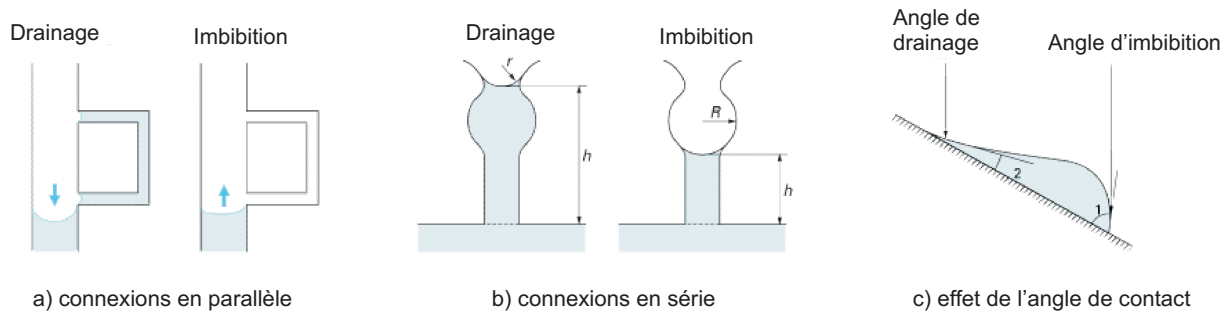

FIG. 1.7 – Mécanismes entraînant le phénomène d'hystérésis (Delage et Cui (2000)).

Afin de limiter les paramètres de notre étude, on fait le choix de n'étudier que les chemins de drainage à partir d'un état saturé. Le phénomène d'hystérésis n'entre donc pas en jeu dans cette étude.

1.2.5 Isotherme de sorption

L'isotherme de sorption est un outil qui permet également de caractériser le comportement hydrique des milieux poreux, mais contrairement à la courbe de rétention, il met en évidence le domaine hygroscopique. Il exprime la teneur en eau du milieu en fonction de l'humidité relative de la phase gazeuse HR, à température constante et à indice des vides supposé constant. Comme dans le cas de la courbe de rétention, si les variations de volumes dues au chargement hydrique ne sont pas négligeables, cette représentation n'est plus suffisante pour définir l'état du milieu. Elle doit être associée à une courbe représentant le tassement hydrique, par exemple $e(HR)$.

La figure 1.8 présente les trois principaux types d'isotherme de sorption que l'on peut rencontrer suivant les caractéristiques du matériau étudié :

- La figure 1.8-**a** présente l'isotherme de Langmuir. L'adsorption de molécules ne se fait que sur une couche.
- La figure 1.8-**b** présente l'isotherme caractérisé par une énergie d'adsorption égale ou inférieure à l'énergie de liquéfaction du gaz (ex. Azote adsorbé sur de la glace). L'adsorption se fait dès les faibles teneurs en eau sous forme capillaire.
- La figure 1.8-**c** présente l'isotherme le plus répandu, qui correspond au cas des sols. L'arrangement des molécules d'eau sur la surface de la phase solide est illustré par la figure 1.9. On peut décomposer cet isotherme en fonction de l'arrangement des molécules d'eau en trois zones :
  1. Adsorption d'une monocouche comme dans le cas de l'isotherme de Langmuir. L'adsorption des molécules d'eau se fait progressivement jusqu'à constituer une couche monomoléculaire tout autour de la phase solide.
  2. Adsorption multicouche. Après recouvrement total du milieu par une couche de molécules d'eau, l'adsorption continue pour former plusieurs couches de molécules d'eau sur la phase solide.
  3. Eau capillaire. L'épaisseur de la pellicule d'eau est suffisante pour commencer à créer des ponts capillaires.

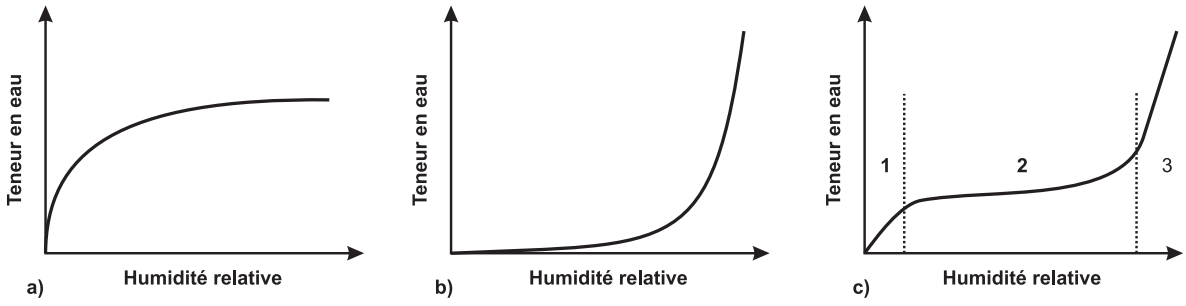

FIG. 1.8 – Différents types d'isotherme de sorption.

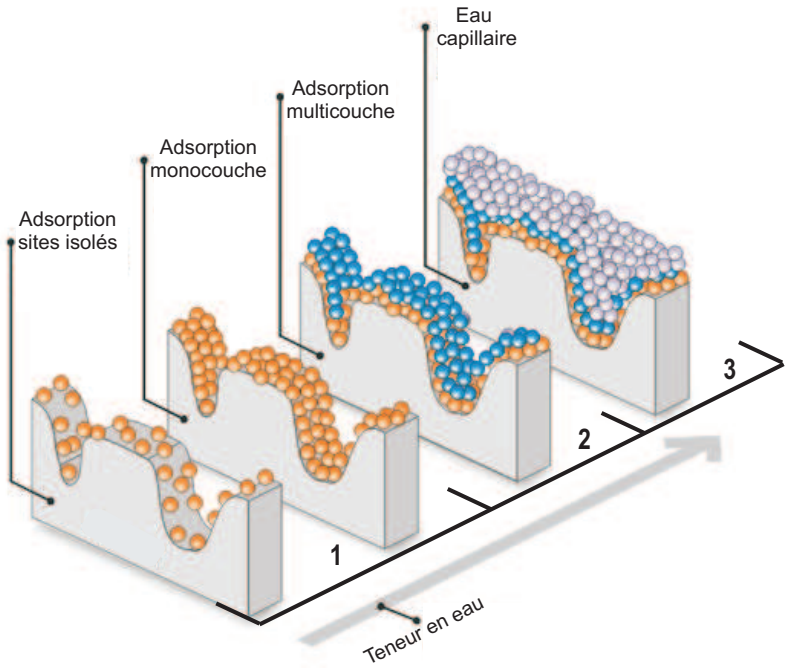

FIG. 1.9 – Schématisation du processus d'adsorption de molécules d'eau sur la surface d'un solide (Bakrania et Anderson).

1.3 Synthèse bibliographique

Cette section est consacrée à la synthèse bibliographique des éléments concernant la partie I. Elle est décomposée en deux volets. Le premier s'intéresse aux couplages hydro-mécaniques : les effets de la succion sur le volume d'eau d'une part et sur la déformation du squelette solide d'autre part, et l'incidence de la compacité sur le comportement hydrique des sols. Le second concerne les effets de la température sur la rétention d'eau dans les milieux poreux.

1.3.1 Couplages hydro-mécaniques

Les déformations, dans un sol non saturé, sont dues à des contraintes que l'on peut décomposer en deux types. Celles du premier type sont la conséquence du chargement mécanique extérieur et sont transmises par le squelette solide. Celles du second type résultent d'efforts internes à la structure engendrés par les tensions capillaires entre les grains. De la même façon, on peut attribuer les variations de teneur en eau d'un sol à deux types d'action : l'action des contraintes qui déforme le squelette solide, modifiant ainsi le réseau poreux, et par conséquent, ses propriétés de rétention ; et l'action de la variation des pressions au niveau des ménisques capillaires qui modifie l'équilibre hydrique et induit des transferts de la phase liquide.

L'importance de ces couplages hydro-mécaniques, notamment dans le cas des argiles a amené les chercheurs, d'une part à quantifier l'effet de la succion sur les variations de volume (Delage et al. (1998), Romero (1999), Olchitsky (2002), Fleureau et al. (2002)), et d'autre part à prendre en compte dans leurs études l'influence de la compacité sur la courbe de rétention

(Vanapalli et al. (1999a), Watabe et al. (2000), Fleureau et al. (2002), Miller et al. (2002), Zhou et Yu (2004)).

Effet de la succion sur les variations de volumes

Dans la plupart des cas, les chemins de drainage et d'imbibition sont présentés dans un seul plan, soit dans le plan *succion - teneur en eau* $(s - w)$, soit dans le plan *succion - degré de saturation* $(s - S_r)$ masquant implicitement les déformations du squelette solide induites par le chargement hydrique.

Biarez et al. (1988) ont réalisé une étude expérimentale s'intéressant simultanément aux variations de volume total et de teneur en eau. Ils établissent les chemins de chargement hydrique d'une Kaolinite, d'une marne remaniée et du limon de Sterrebeek. La figure 1.10 présente les résultats obtenus pour ce dernier matériau. Ils peuvent être considérés comme des résultats types.

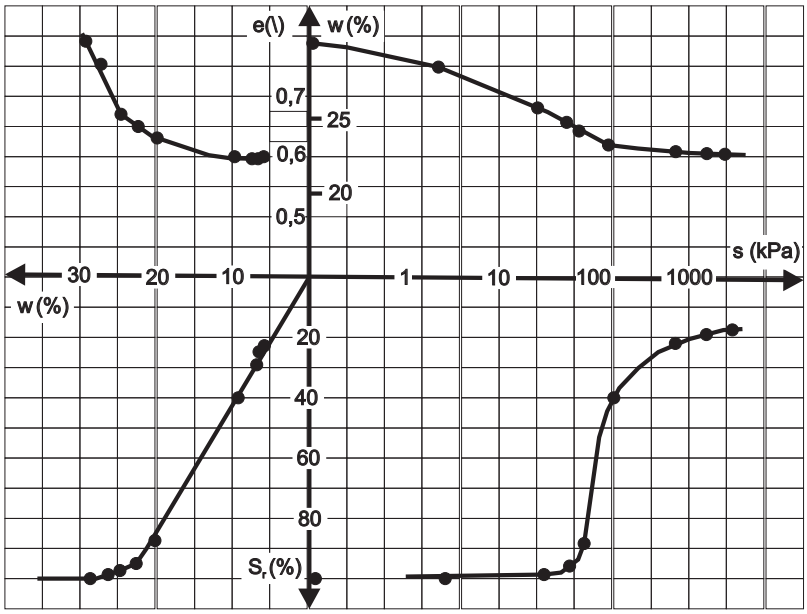

FIG. 1.10 – Chemin hydrique du limon de Sterrebeek dans les plans w-s, S_r-s, S_r-w, e-w (Biarez et al. (1988)).

Dans les plans $s-w$ et $s-S_r$, on retrouve bien la forme classique des courbes de rétention. Cette forme traduit un faible variation du degré de saturation pour les faibles valeurs de la succion, une augmentation importante de la désaturation pour les valeurs moyennes de la succion et enfin, une stabilisation aux fortes valeurs de la succion.

La courbe dans le plan $w - e$ donne la relation entre une variable qui est liée aux aspects hydriques et une variable qui est liée aux aspects volumiques. Ce type de graphique sera décrit de façon détaillée, dans le cas d'un matériau de notre étude dans le chapitre 4.2.1.

Depuis les années 90, de nombreux matériaux ont fait l'objet de caractérisation complète du comportement hydrique (Romero (1999), Olchitsky (2002), Verbrugge et Fleureau (2002), Fleureau et al. (2002)). Dans le cas d'argiles gonflantes, il a été observé une réponse quasi-réversible en teneur en eau et en indice des vides à des cycles de chargement en succion, en

ne considérant pas les états limites (Delage et al. (1998), Tripathy et al. (2002), Olchitsky (2002)). Ces résultats amènent à penser que pour ce type d'argile, le comportement hydrique peut être considéré comme élastique. Mais dans le cas général, on observe un comportement irréversible pour les faibles succions et à partir d'une succion limite, le comportement devient élastique (ex. les résultats expérimentaux présentés par Verbrugge et Fleureau (2002) sur le limon de Jossigny). Ce type de décomposition dépend beaucoup du matériau considéré mais aussi des conditions initiales, notamment de l'histoire mécanique du milieu.

Effet de la compacité sur les paramètres de la courbe de rétention

Il existe de nombreuses fonctions utilisées pour l'ajustement mathématique des courbes de rétention (Gardner (1958), Brooks et Corey (1964), Van Genuchten (1980), Fredlund et Xing (1994) et Kosugi (1994)). Leurs paramètres sont liés, de façon plus ou moins directe suivant les modèles, à trois caractéristiques de la courbe : la succion d'entrée d'air s_a, la pente de la partie linéaire de forte désaturation φ et la teneur en eau résiduelle w_r.

Plusieurs études (Kawaï et al. (2000), Romero et Vaunat (2000), Karube et Kawaï (2001), Zhou et Yu (2004)) ont montré que le paramètre de la courbe de rétention le plus sensible à l'indice des vides initial est la succion d'entrée d'air. Un chargement en succion appliqué à un sol non saturé engendre une migration d'une partie de la phase liquide. A partir de la succion d'entrée d'air, le processus de drainage devient plus rapide, cette transition dans le comportement hydrique reflète un niveau de tension capillaire limite pour le sol. Cette limite varie en sens inverse par rapport à la taille des pores et varie donc inversement par rapport à l'indice des vides. C'est pourquoi on peut admettre que la succion d'entrée d'air diminue si l'indice des vides augmente (Karube et Kawaï (2001)). La figure 1.11 présente les résultats obtenus par Kawaï et al. (2000) sur une argile sableuse.

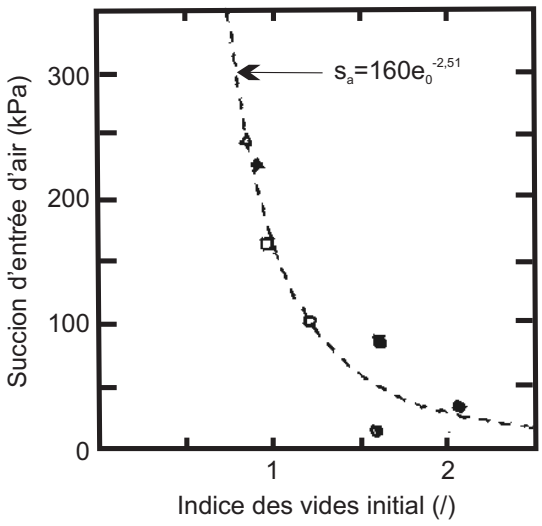

FIG. 1.11 – Influence de l'indice des vides initial sur la succion d'entrée d'air dans le cas d'une argile sableuse (Kawaï et al. (2000)).

Ils modélisent l'évolution de ce paramètre de la courbe de rétention par une loi en puissance

de la forme :

$$s_a = Ae_0^{-B} \tag{1.6}$$

où e_0 est l'indice des vides initial, A et B sont les paramètres du modèle. Les travaux expérimentaux de Romero et Vaunat (2000) et de Karube et Kawaï (2001) confirment la validité de la modélisation décrite par l'équation (1.6).

Les résultats bibliographiques concernant l'évolution de la pente φ de la courbe de rétention en fonction de la compacité ne sont pas unanimes. Ce paramètre est considéré comme constant par rapport à l'indice des vides initial pour Romero et Vaunat (2000), diminue légèrement quand la compacité augmente pour Miller et al. (2002) ou peut être relié à la succion d'entrée d'air par la relation $\varphi = 0,5+0,05\times s_a$ pour Karube et Kawaï (2001) sur une argile faiblement plastique.

La teneur en eau ou le degré de saturation résiduel sont les valeurs à partir desquelles la phase liquide n'est plus continue dans le milieu. Al-Mukhtar et al. (1999) ont déterminé les courbes de rétention de deux séries d'échantillons préparés à partir d'une argile de type smectite, la Na-laponite, compactée à 1 et à 10 MPa. La Na-laponite a des limites d'Atterberg très élevées : une limite de liquidité de 1050% et une limite de plasticité de 250% ; sa surface spécifique est de 373 $m^2.g^{-1}$. Sur la figure 1.12, on constate qu'en dessous d'une humidité relative de 98%, les courbes de rétention sont similaires. La fin des courbes, et donc la limite de continuité de la phase liquide, ne sont pas affectées par la compacité. De même, Romero et Vaunat (2000) et Karube et Kawaï (2001) estiment que, dans une première approche, on peut considérer ce paramètre comme constant quelles que soient les conditions initiales.

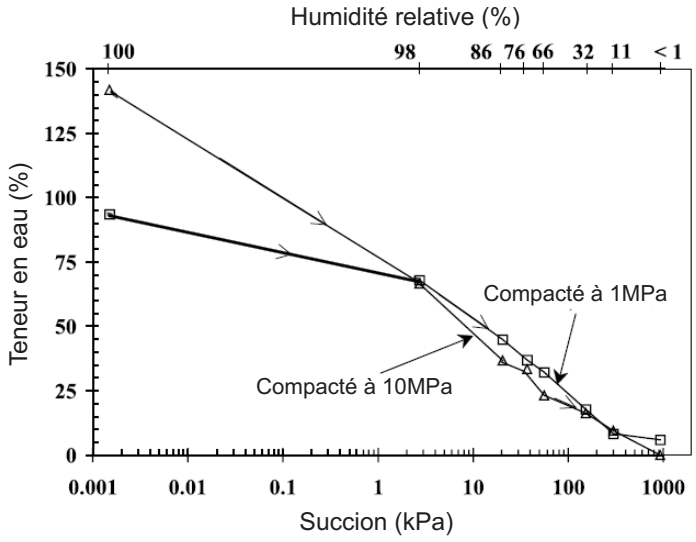

FIG. 1.12 – Courbes de rétention d'une Na-laponite compactée à 1 et 10 MPa (Al-Mukhtar et al. (1999)).

Pour Romero et Vaunat (2000), sur la courbe de rétention d'un milieu argileux composé d'agrégats, on peut délimiter deux zones : la zone correspondant à la porosité inter-agrégats et celle correspondant à la porosité intra-agrégats. Dans la première, correspondant aux faibles succions, l'effet des couplages hydro-mécaniques est très important alors que dans la seconde, correspondant aux pour les fortes succions, la courbe de rétention est indépendante des aspects

mécaniques et notamment de l'indice des vides. Dans cette dernière zone, les paramètres de la courbe de rétention sont liés à la surface spécifique. Ce point est confirmé par les essais expérimentaux menés par Vanapalli et al. (1999a) qui montrent, sur un sable argileux, que la courbe de rétention est indépendante de l'histoire mécanique pour les fortes succions.

Modélisation des courbes de rétention pour différentes compacités

Connaissant l'influence de l'indice des vides initial sur les paramètres de la courbe de rétention, il est possible de prédire les courbes de rétention d'un sol en fonction de sa compacité. En ne faisant pas de distinction entre l'influence des déformations élastiques et plastiques, et en négligeant les phénomènes d'hystérésis, Gallipoli et al. (2003) posent comme hypothèse qu'il existe une relation unique entre le degré de saturation S_r, la succion s et le volume spécifique ι :

$$S_r = S_r(s, \iota) \tag{1.7}$$

Les auteurs appliquent l'équation (1.7) aux résultats expérimentaux obtenus par Sivakumar (1993) sur une argile compactée, le kaolin de Speswhite (sa limite de liquidité est de 64% et sa limite de plasticité de 32%). La forme explicite de l'équation (1.7) utilisée est une forme dérivée de l'équation de Van Genuchten (1980) qui fait intervenir, en plus de la succion, la variable volume spécifique :

$$S_r = \left(\frac{1}{1 + \left(\vartheta \times (\iota - 1)^{\psi} \times s \right)^{n}} \right)^{m} \tag{1.8}$$

où m, n, ϑ et ψ sont les paramètres du modèle. Les valeurs obtenues dans le cas du kaolin de Speswhite sont : $m = 0,036$, $n = 3,75$, $\vartheta = 0,027$ et $\psi = 8,43$. Ce modèle permet donc, moyennant la détermination des quatre paramètres, de prédire le chemin de chargement hydrique d'un sol uniquement dans le plan $s - S_r$. Cette modélisation a été utilisée par Tarantino et Tombolato (2005) sur le même sol mais avec d'autres compacités et a donné de bons résultats.
Sugii et al. (2002) établissent le même type de modèle dans le cas du limon de la rivière Nagara (Japon). Dans ce cas, l'équation exprime la succion en fonction du degré de saturation et de l'indice des vides sous la forme :

$$\log(s) = 3,09 + \left(-4,91 + \frac{1}{0,24} \times \ln\left(\frac{100 - S_r}{S_r} \right) \right) \times (e - 0,5) \tag{1.9}$$

Cette modélisation s'appuie sur le fait que dans le plan $e - s$, les points de même degré de saturation forment des droites qui se rejoignent toutes en un point de convergence. Cet aspect semble singulier et nécessiterait une vérification sur d'autres types de sol.

1.3.2 Influence de la température sur la rétention d'eau

L'hydrologue F.H. King (King (1892)) est le premier à constater une influence significative de la température sur la capacité de rétention des sols. Mais il faut attendre les années cinquante pour rencontrer des études spécifiques à ce sujet. Gardner (1954) place des tensiomètres dans des échantillons de sable, de marne sableuse et de sol organique. Il mesure ensuite les variations de succion engendrées par une augmentation de température. Il constate que la

succion diminue linéairement avec la température entre 0 et 50 °C et que cette variation est de plus réversible.

Philip et de Vries (1957) ont publié un article qui fait encore référence où ils interprètent le phénomène observé par Gardner en l'associant à la variation de la tension superficielle de la phase liquide. Sur cette base, ils ont proposé un modèle s'appuyant sur la loi de Young-Laplace. En prenant l'hypothèse d'un angle de mouillage nul, la succion peut s'exprimer sous la forme :

$$s = \frac{2\sigma_s}{r} \tag{1.10}$$

En dérivant chacun des termes par rapport à la température, il vient :

$$\frac{1}{s}\frac{ds}{dT} = \frac{1}{\sigma_s}\frac{d\sigma_s}{dT} \tag{1.11}$$

Enfin, ils approchent le terme en tension superficielle par $-2,1 \times 10^{-3}$ ($^{\circ}C^{-1}$). Ce qui donne :

$$\frac{1}{s}\frac{ds}{dT} = -2,1 \times 10^{-3}(^{\circ}C^{-1}) \tag{1.12}$$

Le modèle décrit par l'équation (1.11) donne la variation de succion induite par une variation de température à teneur en eau constante. De nombreux auteurs (Constantz (1991), Nimmo et Miller (1986), Olchitsky (2002), Tang (2005)) ont utilisé ce modèle prédictif en partant de l'équation (1.11) et en utilisant des modélisations plus ou moins fines pour décrire la sensibilité de la tension superficielle à la température. Ces études montrent que les résultats obtenus théoriquement sous-estiment l'effet de la température car la variation de tension superficielle de l'eau ne suffit pas pour expliquer le phénomène.
Plusieurs recherches en physique des sols ont été consacrées à l'identification des autres phénomènes pouvant être responsables de l'effet de la température sur la variation de la succion : effet des bulles d'air occluses, effet des ponts liquides discontinus, augmentation de la teneur en solutés dans les milieux organiques et plus récemment variation de l'angle de mouillage. Chacun de ces phénomènes va être présenté séparément dans les paragraphes suivants.

Incidence des bulles d'air occluses

Pour les faibles niveaux de succion, la phase liquide est continue dans le milieu et la phase gazeuse est présente sous forme de bulles occluses. Un raisonnement simple amène à penser qu'une augmentation de température engendre une augmentation du volume des bulles occluses et donc, en conditions drainées, une possible diminution de la teneur en eau (Chahal (1965)). Peck (1960) a développé un modèle thermo-hydrique prenant en compte ce phénomène en plus de la variation de tension superficielle. Hopmans et Dane (1986) ont mesuré expérimentalement l'évolution du volume d'air occlus en fonction de la succion pour deux températures différentes (15 et 35°C). La figure 1.13 présente les résultats obtenus pour les deux types de milieux étudiés : marne sableuse et billes de verre. Dans les deux cas, on observe que le volume d'air occlus à 15°C est nettement supérieur à celui à 35°C contrairement aux prédictions de Chahal (1965) et Peck (1960). D'après les auteurs de cette étude, l'effet de la dilatation des bulles d'air occluses serait compensé, et même dépassé, par l'augmentation de solubilité de l'air dans la phase liquide. Hopmans et Dane (1986) concluent que dans une modélisation du comportement thermo-hydrique, on peut négliger ce phénomène par rapport à la variation de tension superficielle.

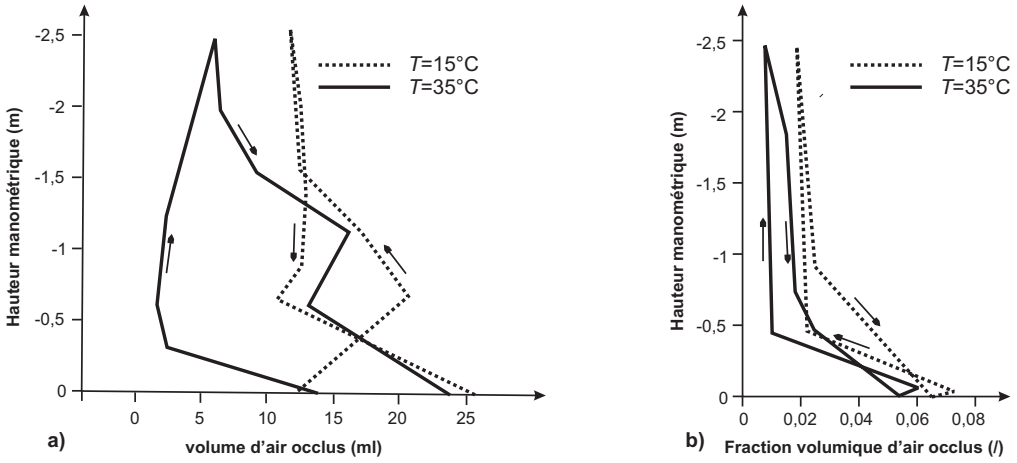

FIG. 1.13 – Évolution du volume d'air occlus en fonction du chargement hydrique pour 15 et 35°C. a) cas de billes de verre b) cas d'une marne sableuse, Hopmans et Dane (1986).

Incidence des ponts liquides isolés

Lorsque la désaturation du milieu est assez forte, la phase liquide peut exister sous deux formes : sous forme continue dans un réseau de pores interconnectés et sous forme d'amas isolés. Liu et Dane (1993) évoquent le fait qu'au niveau de ces amas, le saut de pression de part et d'autre du ménisque n'est pas le même que dans le reste de la phase liquide. Ils développent un modèle prenant en compte ces deux types de comportement. La limitation de ce type de modèle est liée à l'impossibilité de connaître, pour chaque niveau de succion, quelle fraction de la phase liquide est présente sous forme d'amas et quel est le saut de pression correspondant à chacun de ces amas.

Augmentation de la teneur en solutés

Dans ce mémoire, on considère la phase liquide composée d'eau pure. Par ailleurs, on utilisera uniquement de l'eau distillée afin de limiter le nombre de phénomènes physiques mis en jeu. Néanmoins, pour être plus complet, il faut évoquer l'incidence des différents solutés que peut contenir la phase liquide.

Dans le cas naturel, les solutés peuvent être de nature organique ou inorganique. Leur concentration dans la phase liquide est de l'ordre de $0,01$ mol.kg^{-1}. La température peut avoir un effet important sur la solubilité de certains de ces produits. Il a été montré que la solubilité d'acide gras peut augmenter d'un facteur 2 à 3 entre 0 et 60 °C (Singleton (1960) cité par Nimmo et Miller (1986)). La tension superficielle de la phase liquide diminue linéairement avec l'augmentation de la concentration en acide gras. Cette diminution qui peut aller jusqu'à 30%, réduit la capacité de rétention capillaire de la phase solide. En conséquence, à un niveau de succion donnée, la teneur en eau du milieu diminue.

Variation de l'angle de mouillage

Le cosinus de l'angle de mouillage à une interface solide, liquide, gaz est déterminé par l'équation :

$$\cos\phi = \frac{\gamma^{ls} - \gamma^{gs}}{\gamma^{lg}} \tag{1.13}$$

où γ^{ls}, γ^{gs} et γ^{lg} sont respectivement les tensions interfaciales liquide-solide, gaz-solide et liquide-gaz. Pour avoir un angle de mouillage nul, il faut que les tensions interfaciales liquide-solide et gaz-solide soient égales.

Les angles de mouillage dans les sols sont difficiles à mesurer de façon directe. Néanmoins, Bachmann et al. (2002) estiment, avec une précision de 5 °, que pour les sols mouillants (sables, limons et a fortiori argiles hydrophiles), l'angle de mouillage est inférieur à 5 °. Par contre, dans le cas de sols organiques, plus hydrophobes, il peut atteindre 45 °.

Il existe quelques études, peu nombreuses, sur les variations de l'angle de mouillage avec la température (She et Sleep (1998), Bachmann et al. (2002), Bachmann et van der Ploeg (2002)). Ces études ont montré que l'angle de mouillage a tendance à diminuer avec l'augmentation de la température. Bachmann et van der Ploeg (2002) modélisent cette variation de façon linéaire avec une pente variant entre -0,03 K^{-1} et 0,26 K^{-1}. Ces valeurs sont en bon accord avec les résultats déjà obtenus par She et Sleep (1998).

1.4 Axes de recherche

Les paragraphes 1.1 à 1.3 ont permis de présenter le contexte et les motivations, quelques aspects généraux et une synthèse bibliographique qui concernent cette partie I.

Cette partie propose une étude du comportement hydrique de sols avec, dans un premier temps, la prise en compte des déformations, et dans un deuxième temps, la prise en compte des effets de la température.

Concernant le premier axe, la synthèse bibliographique a montré un certain nombre de résultats concernant d'une part, les effets de la succion sur les variations de teneur en eau et de volume, et d'autre part, l'influence des conditions initiales sur le comportement hydrique pour différents types de sol. On se propose d'enrichir ce domaine au travers d'une caractérisation hydrique complète d'un sol qui permet de proposer :

- une modélisation des chemins de chargement hydrique dans l'espace *succion - indice des vides - teneur en eau*,
- une extension de la courbe de rétention, parfois dite caractéristique, à une surface caractéristique dont on donnera une modélisation pour le sol étudié.

Concernant le deuxième axe, la plupart des modélisations proposées dans la littérature se focalisent sur l'effet de la température sur la succion et, de ce fait, ne tient pas compte de la déformation des sols. Une campagne expérimentale est menée sur deux matériaux, une céramique et un sable limoneux argileux, à deux températures différentes afin de déterminer leurs courbes de rétention et leurs isothermes de sorption. Un modèle thermo-hydrique, développé dans le chapitre 2, ainsi qu'un modèle emprunté à la littérature permettent, à partir de données déterminées à certaines températures, de prédire les deux courbes pour n'importe quelle autre température. Le modèle développé dans ce mémoire est aussi testé avec succès sur d'autres données expérimentales provenant de la littérature.

Chapitre 2

Relations d'état thermo-hydro-mécanique

Ce chapitre est consacré à l'étude d'une loi d'état thermo-hydro-mécanique. Cette loi met en relation les variations de succion, de teneur en eau, de température et d'indice des vides. L'expression générale de cette loi sera ensuite déclinée en plusieurs formes correspondant à des cas particuliers où certaines variables sont maintenues constantes. Une de ces formes conduit à montrer l'existence , dans l'espace *succion - teneur en eau - indice des vides* et pour une température donnée, d'une surface caractéristique qui représente les états que peut prendre le milieu (on étudie ce concept dans le chapitre 4). Une autre forme conduit à un modèle de comportement thermo-hydrique reliant les variations de teneur en eau aux variations de température (ce modèle est utilisé dans le chapitre 5). Enfin, on analyse le cas particulier des chemins de chargement hydrique.

2.1 Choix des variables d'état

L'état d'un milieu continu peut être défini, en chaque point, par le tenseur de déformation qui lui est associé. Si on se place dans l'hypothèse des petites perturbations, on utilise le tenseur des déformations linéarisé noté $\underline{\underline{\epsilon}}$.
Classiquement, en mécanique des milieux poreux, plusieurs hypothèses simplificatrices sont faites :

- Le milieu est isotrope. Les directions de déformation n'influent donc pas sur le changement de volume.
- La phase solide est incompressible. Cette hypothèse est justifiée par le fait que d'un point de vue macroscopique, l'effet de la déformation des grains est négligeable devant la déformation du squelette.
- On s'intéresse uniquement aux déformations volumiques. Seule une information macroscopique qui rend compte du changement de volume total est nécessaire pour la caractérisation de l'état de déformation volumique du milieu. Dans ce mémoire, comme le plus souvent en mécanique des sols, on utilise la variable indice des vides e. Elle peut être reliée au tenseur des déformations par la relation : $\Delta e = -(1 + e_0) \times \mathrm{tr}(\underline{\underline{\epsilon}})$.

Lorsqu'on considère des états non saturés, une variable doit être ajoutée afin de quantifier le volume d'eau. Classiquement, on utilise soit la teneur en eau massique w, soit la teneur en

eau volumique θ, soit le degré de saturation S_r.

En ce qui concerne les aspects thermiques, la variable d'état nécessaire à la caractérisation du milieu est définie par le second principe de la thermodynamique, c'est la température T.

D'après les points précédents, l'état thermo-hydro-mécanique d'un milieu poreux, comme par exemple un sol partiellement saturé, peut être décrit à l'aide de l'un des trois jeux de variables d'état indépendantes suivants :

- la teneur en eau volumique θ, la température T et l'indice des vides e,
- la teneur en eau massique w, la température T et l'indice des vides e,
- le degré de saturation S_r, la température T et l'indice des vides e.

L'écriture du modèle qui suit s'appuie sur les différentes expressions de la différentielle de la succion par rapport aux trois variables de chacun des jeux proposés ci-dessus. Le modèle final sera exprimé en fonction du jeu de variables d'état indépendantes le plus approprié ou jeu de variables le plus accessible par la mesure à savoir : w, T, e.
On ne considère ici que des chargements hydriques en drainage, ce qui permet de s'affranchir des phénomènes d'hystérésis.

2.2 Écriture du modèle

2.2.1 Différentielle de la succion par rapport aux variables θ, T, e

La différentielle de la succion par rapport au jeu de variables θ, T, e s'écrit :

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial \theta}\right)_{T,e} d\theta + \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_{\theta,e} dT + \left(\frac{\partial s}{\partial e}\right)_{\theta,T} de \tag{2.1}$$

On peut exprimer la teneur en eau volumique θ en fonction des masses volumiques spécifiques des phases solide ρ_s^* et liquide ρ_e^*, de la teneur en eau massique w et de l'indice des vides e comme suit :

$$\theta = \frac{\rho_s^* \times w}{\rho_e^* \times (1+e)} \tag{2.2}$$

La variation infinitésimale de la teneur en eau volumique $d\theta$ s'écrit :

$$d\theta = \frac{\rho_s^*}{\rho_e^* \times (1+e)} \times dw - \frac{\rho_s^* \times w}{\rho_e^* \times (1+e)^2} \times de + \frac{w}{\rho_e^* \times (1+e)} \times d\rho_s^* - \frac{\rho_s^* \times w}{(\rho_e^*)^2 \times (1+e)} \times d\rho_e^* \tag{2.3}$$

En introduisant les coefficients de dilatation thermique de l'eau β_e $\left(\beta_e = -\frac{1}{\rho_e^*} \times \frac{d\rho_e^*}{dT}\right)$ et de la phase solide β_s $\left(\beta_s = -\frac{1}{\rho_s^*} \times \frac{d\rho_s^*}{dT}\right)$, on peut exprimer la variation infinitésimale $d\theta$ sous la forme :

$$d\theta = \frac{\rho_s^*}{\rho_e^* \times (1+e)} dw + \frac{\rho_s^* \times w}{\rho_e^* \times (1+e)} (\beta_e - \beta_s) dT - \frac{\rho_s^* \times w}{\rho_e^* \times (1+e)^2} de \tag{2.4}$$

La relation (2.4) montre que la variation infinitésimale de la teneur en eau volumique ($\theta = \frac{V_e}{V_{tot}}$) peut être due :

- à une variation infinitésimale de la teneur en eau massique (si la masse d'eau varie, le volume d'eau varie),

– à une variation infinitésimale de la température (si la température varie le volume d'eau varie, par dilatation/contraction),
– à une variation infinitésimale de l'indice des vides (si l'indice des vides varie, le volume total varie).

L'équation (2.2) conduit également à la relation :

$$\left(\frac{\partial s}{\partial \theta}\right)_{T,e} = \frac{\rho_e^* \times (1+e)}{\rho_s^*} \left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_{T,e} \tag{2.5}$$

On ne considère ici que les états hydriques des domaines pendulaire et funiculaire. Dans ces domaines, l'eau étant dans un état capillaire au sein du milieu, on utilise classiquement la loi de Jurin (2.6). Elle relie la succion s à la tension superficielle de l'eau σ_s, au rayon moyen des pores r et à l'angle de mouillage ϕ.

$$s = \frac{2 \times \sigma_s \times \cos\phi}{r} \tag{2.6}$$

A partir de (2.6), on détermine l'expression de la dérivée de la succion par rapport à la température :

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_{\theta,e} = \frac{s}{\sigma_s} \times \left(\frac{\partial \sigma_s}{\partial T}\right)_{\theta,e} - s \times \tan\phi \times \left(\frac{\partial \phi}{\partial T}\right)_{\theta,e} - \frac{s}{r} \times \left(\frac{\partial r}{\partial T}\right)_{\theta,e} \tag{2.7}$$

La tension superficielle de l'eau pure ne dépend, à priori, que de la température. On pose donc :

$$\left(\frac{\partial \sigma_s}{\partial T}\right)_{\theta,e} = \frac{d\sigma_s}{dT} \tag{2.8}$$

L'angle de mouillage dépend d'un certain nombre de paramètres : état de la surface solide, température, sens d'évolution de l'état hydrique (humidification ou séchage)... Le manque d'information disponible dans la littérature sur ce paramètre amène, dans un premier temps, à supposer que l'angle de mouillage, comme la tension superficielle de l'eau, ne dépend que de la température. On pose donc :

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial T}\right)_{\theta,e} = \frac{d\phi}{dT} \tag{2.9}$$

Le dernier terme de l'équation (2.7) est la variation du rayon moyen des pores correspondant à la succion s, due à la température. La teneur en eau volumique et l'indice des vides étant ici maintenus constants, ce terme est nul.

Finalement l'équation (2.7) se simplifie sous la forme :

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_{\theta,e} = \frac{s}{\sigma_s} \times \frac{d\sigma_s}{dT} - s \times \tan\phi \times \frac{d\phi}{dT} \tag{2.10}$$

En introduisant les équations (2.3), (2.5) et (2.10) dans l'équation (2.1), on obtient l'écriture finale de la différentielle de la succion :

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_{T,e} dw + \left(\left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_{T,e} w \times (\beta_e - \beta_s) + \frac{s}{\sigma_s} \times \frac{d\sigma_s}{dT} - s \times \tan\phi \times \frac{d\phi}{dT}\right) dT + \left(\left(\frac{\partial s}{\partial e}\right)_{\theta,T} - \left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_{T,e} \frac{w}{(1+e)}\right) de \tag{2.11}$$

2.2.2 Différentielle de la succion par rapport aux variables w, T, e

Le développement de la différentielle de la succion par rapport au jeu de variables w, T, e s'écrit :

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_{T,e} dw + \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_{w,e} dT + \left(\frac{\partial s}{\partial e}\right)_{w,T} de \tag{2.12}$$

Les différentes dérivées partielles qui apparaissent dans l'équation (2.12) sont des fonctions d'état qui seront notées par la suite :

$$F_w = \left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_{T,e} \tag{2.13}$$

$$F_T = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_{w,e} \tag{2.14}$$

$$F_e = \left(\frac{\partial s}{\partial e}\right)_{T,w} \tag{2.15}$$

La dérivée partielle de la succion par rapport à la température, à teneur en eau et indice des vides constants, peut être développée à partir de la loi de Jurin (2.6) comme dans le cas précédent.

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_{w,e} = \frac{s}{\sigma_s} \times \frac{d\sigma_s}{dT} - s \times \tan\phi \times \frac{d\phi}{dT} - \frac{s}{r}\left(\frac{\partial r}{\partial T}\right)_{w,e} \tag{2.16}$$

Dans l'équation (2.16), la tension superficielle et l'angle de mouillage sont supposés ne dépendre que de la température. Le dernier terme correspond à la dérivée du rayon moyen du pore considéré par rapport à la température, la teneur en eau massique et l'indice des vides étant par ailleurs constants. Il ne s'agit donc pas d'une variation de rayon physique mais d'une variation du rayon moyen des pores qui apparaît dans la loi de Jurin. Ce terme n'est pas nul. Une augmentation de température induit par exemple une dilatation de la phase liquide (on se trouve à teneur en eau massique constante). Cette dilatation "oblige à mobiliser" des rayons de pores plus grand r'. La variation de rayon peut s'écrire :

$$dr = r' - r = \left(\frac{\partial r}{\partial T}\right)_{w,e} dT \tag{2.17}$$

En introduisant le résultat de l'équation (2.16) dans l'équation (2.12), on obtient

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_{T,e} dw + \left(\frac{s}{\sigma_s} \times \frac{d\sigma_s}{dT} - s \times \tan\phi \times \frac{d\phi}{dT} - \frac{s}{r}\left(\frac{\partial r}{\partial T}\right)_{w,e}\right) dT + \left(\frac{\partial s}{\partial e}\right)_{w,T} de \tag{2.18}$$

2.2.3 Différentielle de la succion par rapport aux variables S_r, T, e

La différentielle de la succion par rapport au jeu de variables S_r, T, e s'écrit :

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial S_r}\right)_{T,e} dS_r + \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_{S_r,e} dT + \left(\frac{\partial s}{\partial e}\right)_{S_r,T} de \tag{2.19}$$

Le degré de saturation peut être exprimé en fonction des masses volumiques spécifiques des phases solide et liquide, de la teneur en eau massique et de l'indice des vides par la relation suivante :

$$S_r = \frac{\rho_s^* \times w}{\rho_e^* \times e} \tag{2.20}$$

La variation infinitésimale du degré de saturation déduite de la relation (2.20) s'écrit :

$$dS_r = \frac{\rho_s^* \times w}{\rho_e^* \times e} \times (\beta_e - \beta_s) \times dT + \frac{\rho_s^*}{\rho_e^* \times e} \times dw + \frac{\rho_s^* \times w}{\rho_e^* \times e^2} \times de \tag{2.21}$$

Par ailleurs l'équation (2.20) conduit également à la relation :

$$\left(\frac{\partial s}{\partial S_r}\right)_{T,e} = \left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_{T,e} \frac{\rho_e^* \times e}{\rho_s^*} \tag{2.22}$$

Se placer à degré de saturation et indice des vides constants est équivalent à se placer à teneur en eau massique et indice des vides constants. Il vient l'égalité suivante :

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_{S_r,e} = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_{w,e} \tag{2.23}$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_{S_r,e} = \frac{s}{\sigma_s} \times \frac{d\sigma_s}{dT} - s \times \tan\phi \times \frac{d\phi}{dT} - \frac{s}{r}\left(\frac{\partial r}{\partial T}\right)_{w,e} \tag{2.24}$$

En introduisant les relations (2.21), (2.22) et (2.24) dans la relation (2.19) on obtient une troisième expression de la différentielle de la succion sous la forme :

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_{T,e} dw + \left(\frac{s}{\sigma_s} \times \frac{d\sigma_s}{dT} - s \times \tan\phi \times \frac{d\phi}{dT} - \frac{s}{r}\left(\frac{\partial r}{\partial T}\right)_{w,e}\right) dT + \\ + \left(\left(\frac{\partial s}{\partial e}\right)_{S_r,T} - \left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_{T,e} \frac{w}{e}\right) de \tag{2.25}$$

2.2.4 Comparaison des trois développements

On peut réécrire les deux équations finales, obtenues par chacun des développements précédents (équation (2.11) et équation (2.18)), en introduisant la notation simplifiée des fonctions d'état (équations (2.13), (2.14) et (2.15)). On obtient les trois expressions suivantes :

$$ds = F_w \times dw + \left(F_w \times w \times (\beta_e - \beta_s) + \frac{s}{\sigma_s} \times \frac{d\sigma_s}{dT} - s \times \tan\phi \times \frac{d\phi}{dT}\right) dT \\ + \left(\left(\frac{\partial s}{\partial e}\right)_{T,\theta} - F_w \times \frac{w}{(1+e)}\right) de \tag{2.26}$$

$$ds = F_w \times dw + \left(\frac{s}{\sigma_s} \times \frac{d\sigma_s}{dT} - s \times \tan\phi \times \frac{d\phi}{dT} - \frac{s}{r}\left(\frac{\partial r}{\partial T}\right)_{w,e}\right) dT + F_e \times de \tag{2.27}$$

$$ds = F_w \times dw + \left(\frac{s}{\sigma_s} \times \frac{d\sigma_s}{dT} - s \times \tan\phi \times \frac{d\phi}{dT} - \frac{s}{r} \left(\frac{\partial r}{\partial T} \right)_{w,e} \right) dT + \\ + \left(\left(\frac{\partial s}{\partial e} \right)_{S_r,T} - F_w \times \frac{w}{e} \right) de \quad (2.28)$$

L'identification entre ces trois équations permet d'expliciter les différentes fonctions d'état F_w, F_T et F_e.

1.
$$F_w = \left(\frac{\partial s}{\partial w} \right)_{T,e} \quad (2.29)$$

F_w est la fonction traduisant la variation de succion due à la variation de teneur en eau à température et indice des vides constants. Pour un milieu indéformable, ou dont on peut négliger la déformation, ce terme est l'inverse de la pente de la courbe de rétention. Cette fonction est négative puisqu'un accroissement de teneur en eau induit une diminution de la succion.

2.
$$F_T = \left(F_w \times w \times (\beta_e - \beta_s) + \frac{s}{\sigma_s} \times \frac{d\sigma_s}{dT} - s \times \tan\phi \times \frac{d\phi}{dT} \right) \quad (2.30)$$
$$= \left(\frac{s}{\sigma_s} \times \frac{d\sigma_s}{dT} - s \times \tan\phi \times \frac{d\phi}{dT} - \frac{s}{r} \left(\frac{\partial r}{\partial T} \right)_{w,e} \right) \quad (2.31)$$

On peut déduire des équations (2.30) et (2.31) une relation qui lie les coefficients de dilatation thermique de l'eau et de la phase solide au rayon de ménisque ainsi qu'à ses variations avec la température.

$$-\frac{s}{r} \left(\frac{\partial r}{\partial T} \right)_{w,e} = F_w \times w \times (\beta_e - \beta_s) \quad (2.32)$$

Cette équation confirme l'interprétation physique des termes de l'équation (2.16). La variation du rayon moyen des pores considéré dans l'écriture de la loi de Jurin, pour une succion donnée, est due à la dilatation de l'eau, qui apparaît comme un terme de contribution positive, et à la dilatation des grains solides, qui apparaît comme un terme de contribution négative. Rappelons que la fonction F_w est négative.

On définit aussi à partir de l'équation (2.30) trois fonctions :
- $F_{T\beta} = F_w \times w \times (\beta_e - \beta_s)$
  qui est la fonction traduisant la variation de succion due à la dilatation des phases liquide et solide à teneur en eau et indice des vides constants,
- $F_{T\sigma} = \frac{s}{\sigma_s} \times \frac{d\sigma_s}{dT}$
  qui est la fonction traduisant la variation de succion due à la variation de tension superficielle à teneur en eau et indice des vides constants,
- $F_{T\phi} = -s \times \tan\phi \times \frac{d\phi}{dT}$
  qui est la fonction traduisant la variation de succion due à la variation de l'angle de mouillage à teneur en eau et indice des vides constants.

3.

$$F_e = \left(\left(\frac{\partial s}{\partial e} \right)_{\theta,T} - F_w \times \frac{w}{(1+e)} \right) = \left(\frac{\partial s}{\partial e} \right)_{T,w} = \left(\left(\frac{\partial s}{\partial e} \right)_{S_r,T} - F_w \times \frac{w}{e} \right) \quad (2.33)$$

F_e est la fonction traduisant la variation de succion due à la variation de l'indice des vides à température et teneur en eau constantes.

Compte tenu que l'accès aux dérivées partielles $\left(\frac{\partial r}{\partial T}\right)_{w,e}$ et $\left(\frac{\partial s}{\partial e}\right)_{\theta,T}$ apparaît difficile, on conserve finalement pour l'expression de la différentielle de la succion l'écriture suivante :

$$ds = F_w \times dw + \left(F_w \times w \times (\beta_e - \beta_s) + \frac{s}{\sigma_s} \times \frac{d\sigma_s}{dT} - s \times \tan\phi \times \frac{d\phi}{dT} \right) dT + F_e \times de \quad (2.34)$$

2.3 Analyse de quelques cas simples

2.3.1 Cas généraux

L'analyse de quelques cas simples à l'aide de la relation (2.34) nécessite au préalable la connaissance du signe des trois fonctions F_w, F_T et F_e.

Compte tenu de l'allure des courbes caractéristiques, la fonction F_w est négative. La dérivée de la tension superficielle par rapport à la température étant négative, la fonction F_T est négative. Pour déterminer le sens de variation de la fonction F_e, on peut se baser sur un modèle physique constitué de deux grains reliés par un ménisque d'eau. Cette fonction est déterminée à teneur en eau et température constantes. Le volume d'eau du ménisque est donc constant. Si on écarte les grains pour augmenter l'indice des vides, le ménisque se creuse entraînant la diminution de son rayon de courbure, et par la loi de Jurin, une augmentation de la succion. La fonction F_e est donc positive.

Le tableau 2.1 résume les six cas où deux des quatre variables s, T, w et e sont maintenues constantes.

2.3.2 Cas particuliers

Milieux indéformables

Si on considère des milieux indéformables, l'indice des vides est constant. La relation (2.34) se simplifie comme suit :

$$ds = F_w \times dw + F_T \times dT \quad (2.35)$$

– A température constante :
En fixant la température, on trouve une relation entre les variations de succion et celles de teneur eau.

$$ds = F_w \times dw \quad (2.36)$$

$$F_w = \left(\frac{\partial s}{\partial w} \right)_{e,T} = \left(\frac{\partial s}{\partial w} \right)_T \quad (2.37)$$

Cette relation découle de la courbe de rétention classique. A une température T_0, la fonction F_w est l'inverse de la pente de cette courbe.

$$F_w(s, T_0) = \left(\frac{\partial s}{\partial w} \right)_{T_0} \quad (2.38)$$

Cas 1 : e et T constants	$ds = F_w \times dw$	$dw > 0 \Rightarrow ds < 0$	Résultat classique de la courbe caractéristique
Cas 2 : w et T constants	$ds = F_e \times de$	$de > 0 \Rightarrow ds > 0$	Indice des vide et succion augmentent simultanément
Cas 3 : e et w constants	$ds = F_T \times dT$	$dT > 0 \Rightarrow ds < 0$	Température et succion varient en sens inverse
Cas 4 : s et T constants	$F_w \times dw + F_e \times de = 0$	$de > 0 \Rightarrow dw > 0$	Indice des vides et teneur en eau augmentent simultanément
Cas 5 : e et s constants	$F_w \times dw + F_T \times dT = 0$	$dT > 0 \Rightarrow dw < 0$	Température et teneur en eau varient en sens inverse
Cas 6 : w et s constants	$F_e \times de + F_T \times dT = 0$	$de > 0 \Rightarrow dT > 0$	Indice des vides et température augmentent simultanément

TAB. 2.1 – Analyse de quelques cas simples.

– A succion constante :
En fixant la succion, on trouve une relation qui exprime les variations de teneur en eau en fonction des variations de température. Elle permet de calculer pour chaque succion s la variation de teneur en eau induite par le chargement thermique.

$$dw = -\frac{F_T}{F_w} dT \tag{2.39}$$

Si les fonctions F_T et F_w sont connues, cette relation conduit à déterminer, à partir de la donnée de la courbe de rétention à une température T_0, cette même courbe pour n'importe quelle température. Les fonctions F_T et F_w étant toutes deux négatives, la relation (2.39) montre qu'un accroissement de température induit une diminution de la teneur en eau.
La relation (2.39) est utilisée dans le chapitre 5 pour prédire l'effet de la température sur les courbes de rétention.

Milieux déformables

Si on considère des milieux déformables, la relation (2.34) est inchangée :

$$ds = F_w \times dw + F_T \times dT + F_e \times de \tag{2.40}$$

– A température constante :
En fixant la température, on trouve l'équation (2.41). Elle montre qu'à une température T_0, il existe une fonction f qui relie les variations de succion, de teneur en eau et d'indice des vides $f(s, w, e) = 0$ (on peut aussi définir une fonction $w(s, e)$ telle que $f(s, w, e) = w - w(s, e) = 0$). Cette fonction peut être représentée par une surface dans l'espace défini par les trois variables. Cette surface, qui retranscrit la capacité de rétention du milieu pour chaque valeur d'indice des vides, sera appelée surface caractéristique. Ce

concept de surface caractéristique est plus précisément discuté dans le chapitre 4.

$$ds = F_w \times dw + F_e \times de \tag{2.41}$$

– A succion et indice des vides constants :
En fixant la succion et l'indice des vides, on retrouve l'équation (2.39) qui relie les variations de teneur en eau aux variations de température. Dans le cas des milieux déformables, cette relation traduit l'effet de la température sur la surface caractéristique.

$$dw = -\frac{F_T}{F_w} \times dT \tag{2.42}$$

Cette relation permet de calculer pour chaque couple *succion - indice des vides*, la variation de teneur en eau induite par le chargement thermique. Pour le couple *succion - indice des vides*, la fonction f qui définit la surface caractéristique permet de calculer la teneur en eau correspondante. Les fonctions F_T et F_w s'écrivent :

$$F_w = \left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_{T,e} \tag{2.43}$$

$$F_T = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_{w,e} \tag{2.44}$$

En supposant les fonctions F_T et F_w connues, la relation conduit à déterminer, à partir de la donnée de la surface caractéristique à une température T_0, cette même surface pour n'importe quelle température. Les fonctions F_T et F_w étant toutes deux négatives, un accroissement de température induit, pour un couple (s,e) donné, une diminution de la teneur en eau.
La relation (2.39) est utilisée dans le chapitre 5 pour prédire l'effet de la température sur la surface caractéristique d'un sol.

2.4 Cas du chemin de drainage de milieux déformables

Si on se place dans le cas particulier d'un chemin de chargement hydrique à partir d'un état saturé, sa représentation dans l'espace $s - w - e$ est une courbe. Sur ce chemin, la description de l'état du milieu nécessite toujours la connaissance des trois variables s, w et e, mais leurs variations sont liées. Un chemin de drainage est un mode particulier de déplacement sur la surface caractéristique car les déformations sont envisagées à contrainte extérieure nulle. Il peut être défini par une équation paramétrique composée de deux fonctions, la première reliant la teneur en eau à la succion $w = g(s)$ et la seconde l'indice des vides à la succion $e = h(s)$

Le long d'un chemin de drainage, l'état thermo-hydrique d'un milieu poreux peut être décrit avec l'un des trois jeux de variables suivants :
– e et T,
– w et T,
– S_r et T.
On propose donc trois développements de la différentielle de la succion différents :

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial e}\right)_T \times de + \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_e \times dT \tag{2.45}$$

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_T \times dw + \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_w \times dT \tag{2.46}$$

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial S_r}\right)_T \times dS_r + \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_{S_r} \times dT \tag{2.47}$$

Les différentes dérivées qui interviennent dans les équations précédentes ne doivent pas être confondues avec celles définies dans la section 2.2.2 car ici, seule la température est maintenue constante.
Par la suite, seule la relation (2.46) est utilisée, car elle fait intervenir les variables les plus accessibles à la mesure.

- A température constante :
  En se plaçant à température constante, la relation (2.46) devient :

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_T \times dw \tag{2.48}$$

  Dans cette relation $\left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_T$ est la pente de la courbe de rétention obtenue à la température T mais $\left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_T \neq F_w$ car cette dérivée ne se calcule pas à indice des vides constant. Au contraire, une variation de succion induit une variation de teneur en eau et simultanément une variation d'indice des vides.
- A succion constante :
  Se placer à succion constante conduit à réécrire l'équation (2.46) comme suit :

$$dw = -\frac{\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_w}{\left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_T} \times dT \tag{2.49}$$

  Si on suppose négligeable l'effet de la température sur l'indice des vides par rapport à l'effet de la succion sur cette même variable, se placer à succion constante implique que l'on se place à indice des vides constant, ce qui conduit à poser :

$$\left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_T = \left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_{T,e} = F_w \tag{2.50}$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_w = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_{w,e} = F_T \tag{2.51}$$

  En faisant cette dernière hypothèse, la relation (2.39) est valable dans le cas d'un chemin de drainage.

$$dw = -\frac{F_T}{F_w} dT \tag{2.52}$$

  Pour chaque valeur de succion s considérée les fonctions $g(s)$ et $h(s)$ font correspondre un couple *teneur en eau - indice des vides* (w, e). Les fonctions F_T et F_w doivent être calculées en ce point de l'espace $s - w - e$, à partir de la fonction $f(s, w, e) = 0$ de la surface caractéristique.

$$F_w = \left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_{T,e=h(s)} \tag{2.53}$$

$$F_T = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_{w=g(s),e=h(s)}$$

Conclusion

Les équations développées dans ce chapitre ont permis de mettre en évidence de nombreuses relations entre les variations des différentes variables utilisées pour caractériser l'état des sols non saturés.
On retiendra notamment les fonctions liées à la surface caractéristique et au chemin de chargement hydrique qui seront reprise, dans le cas du sol de cette étude, dans le chapitre 4.
Les différents développements de ce chapitre ont également abouti à un modèle thermo-hydrique qui sera utilisé pour prédire la surface caractéristique et la courbe de rétention à différentes températures de plusieurs matériaux dans le chapitre 5.

Chapitre 3

Matériaux et protocoles expérimentaux

Dans ce chapitre, on présente en premier lieu les principales caractéristiques des deux matériaux étudiés. On décrit ensuite les deux dispositifs expérimentaux utilisés pour imposer des chargements thermo-hydriques, puis les protocoles de mesure de la teneur en eau et de l'indice des vides. Enfin, on présente le protocole de fabrication des échantillons et les outils de caractérisation hydrique.

3.1 Matériaux de l'étude

L'étude expérimentale du comportement hydrique porte sur deux matériaux différents qui ont été choisis en fonction de leurs propriétés mécaniques :

- Le sable limoneux argileux, sol de référence au laboratoire dont les déformations seront prises en compte dans l'étude de son comportement hydrique.
- La céramique en terre cuite est indéformable sous des chargements hydriques. Elle est utilisée comme matériau modèle car elle n'est pas le siège de couplage hydro-mécanique.

3.1.1 Le sable limoneux argileux

Le sable limoneux argileux est un sol prélevé sur les bords d'une rivière de l'Hérault (le Lez), à Saint Gely du Fesc (France), dont on ne conserve que la fraction qui passe au tamis de 2 mm (figure 3.1). Les études menées précédemment sur ce sol au Laboratoire de Mécanique et Génie Civil ont permis de déterminer un certain nombre de ses caractéristiques qu'on rappelle brièvement.

Granulométrie

La distribution des particules solides en fonction de leurs diamètres équivalents moyens, est représentée par la courbe granulométrique en coordonnées semi-logarithmiques (figure 3.2). La granulométrie est notamment une des bases de la classification des sols. Deux paramètres tirés de la courbe granulométrique permettent de définir le sol : le coefficient d'uniformité $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \approx 85$ et celui de courbure $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \approx 7,35$. D_{10}, D_{30}, et D_{60} sont respectivement, les ouvertures de tamis laissant passer 10, 30, et 60% en poids des tamisats cumulés. Le coefficient

FIG. 3.1 – Photographies du sable limoneux argileux avant et après tamisage à 2 mm.

de courbure C_c étant supérieure à 2, la granulométrie du sable limoneux argileux est dite étalée. Les limites de consistance ou limites d'Atterberg sont les autres bases principales de la classification des sols (tableau 3.1). Elles sont obtenues par des essais standards. La limite de plasticité w_P est la limite entre l'état solide du sol et son état plastique. La limite de liquidité w_L est la limite entre l'état plastique et l'état liquide du sol, pour lequel il s'écoule sous son propre poids. La différence entre ces deux limites est l'indice de plasticité I_P ($I_P = w_L - w_P$). La masse volumique spécifique de la phase solide est de 2650 kg.m^{-3} d'où une densité G_s égale à 2,65.
La classification USCS du sable limoneux argileux est SC-CL et sa classification selon la nomenclature GTR est de type A1.

Limites d'Atterberg		
w_L	w_P	I_P
25%	14,5%	10,5%

TAB. 3.1 – Limites d'Atterberg du sable limoneux argileux.

Essai Proctor normalisé

La teneur en eau d'un sol est un variable d'état fondamentale pour son comportement. Il est nécessaire de pouvoir situer la teneur en eau du sol par rapport, soit aux limites d'Atterberg, soit à la teneur en eau optimale de compactage. La caractérisation des conditions optimales à mettre en œuvre pour réaliser un bon compactage, et en particulier la définition de la teneur en eau correspondante, est réalisée au moyen de l'essai Proctor. L'expérience montre que lorsque l'on compacte un sol suivant un processus normalisé, à différentes teneurs en eau, on obtient un matériau dont la masse volumique apparente sèche varie. La figure 3.3 représente l'évolution de la masse volumique apparente sèche en fonction de la teneur en eau pour différents essais de compactage menés de manière identique (en particulier à énergie de compactage identique). On obtient une courbe présentant une masse volumique apparente sèche maximale pour une teneur en eau optimale voisine de 14% pour le sable limoneux argileux.

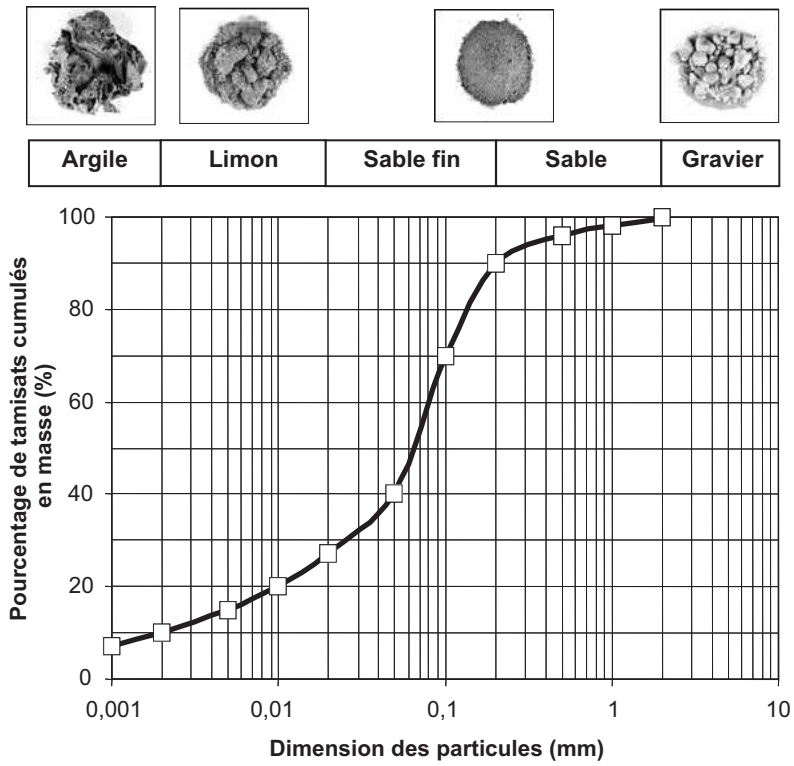

FIG. 3.2 – Courbe granulométrique du sable limoneux argileux (Jamin (2003)).

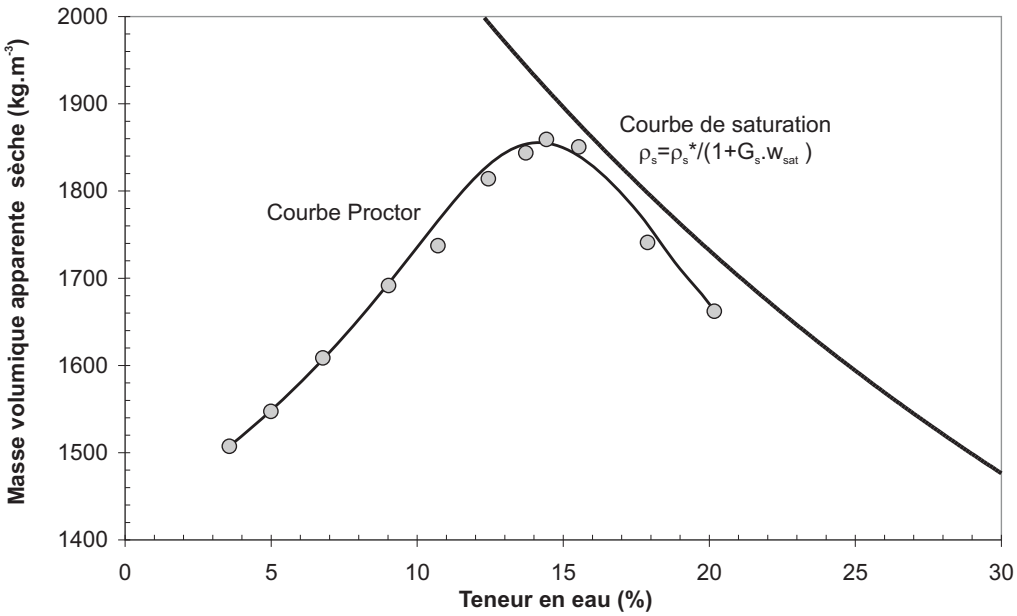

FIG. 3.3 – Courbe de compactage de l'essai Proctor du sable limoneux argileux (Jamin (2003)).

Analyse minéralogique

Une analyse minéralogique du sable limoneux argileux a été effectuée par spectrométrie infrarouge. Le sable limoneux argileux est constitué principalement de calcite (50%) et de quartz (40%). La fraction argileuse représente 10% de l'ensemble des minéraux ; elle est essentiellement constituée de smectite, chlorite et phyllite. La proportion d'argile est faible dans le sable limoneux argileux, cependant il convient de rappeler que ce sont les particules argileuses qui sont actives d'un point de vue physico-chimique.

3.1.2 La céramique à base de terre cuite

La céramique à base de terre cuite utilisée est produite par la société *Saverdun Terre Cuite*. Elle est utilisée pour la fabrication de matériaux de construction. Plusieurs études réalisées au sein du laboratoire ont permis de la caractériser partiellement (Py et al. (2003), Huon et al. (2007)).

Caractéristiques générales et procédé de fabrication

Les terres argileuses constituent la matière de base pour la fabrication de cette céramique en terre cuite. Elles sont utilisées avec des additifs (sable et calcaire pour les plus importants) destinés à améliorer ses caractéristiques de fabrication, ses caractéristiques fonctionnelles et son aspect de produit fini. Sa fabrication comporte quatre phases avant l'obtention du produit fini :

- La préparation : mélange des différents constituants
- Le façonnage : obtention de la géométrie désirée par extrusion de la pâte
- Le séchage : élimination de la quasi totalité de l'eau
- La cuisson

Caractéristiques des échantillons

Les échantillons sont des parallélépipèdes rectangles usinés dans la masse. Leurs côtes et le sens d'extrusion sont indiqués sur la figure 3.4.

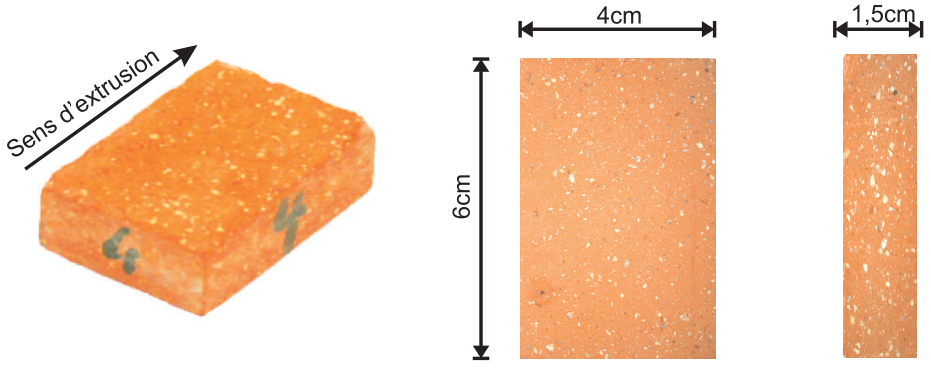

FIG. 3.4 – Dimensions et sens d'extrusion des échantillons de céramique.

Dans le cas d'une utilisation avec la plaque de pression, afin de rendre optimal le contact entre l'échantillon et le dispositif expérimental, les faces inférieures de chaque parallélépipède

sont polies.
La tableau 3.2 présente la masse sèche et la masse d'eau à saturation (la teneur en eau de saturation est de 16,9%) des huit échantillons utilisés pour les essais expérimentaux. Lorsqu'ils ne sont pas utilisés dans l'appareil de mesure, ils sont conservés immergés dans de l'eau distillée, sous vide, afin d'assurer leur saturation.

Echantillon	**Masse sèche (g)**	**Masse d'eau à saturation (g)**
1	76,46	89,40
2	77,58	90,71
3	75,05	87,75
4	72,61	84,90
5	76,65	89,62
6	77,26	90,33
7	77,13	90,18
8	75,72	88,53
Moyenne	76,06	88,93
Ecart type	1,62	1,90

TAB. 3.2 – Caractéristiques des huit échantillons de céramique utilisés.

Porosimétrie

Les propriétés hydriques d'un milieu poreux dépendent en grande partie du volume total des pores, de leur distribution en taille et de leur connectivité. La porosimétrie est donc un outil analytique essentiel dans la caractérisation des milieux poreux. On utilise ici la méthode d'intrusion au mercure qui permet la détermination du volume et de la distribution en taille des pores d'un échantillon ainsi que le calcul d'autres caractéristiques liées à la géométrie du milieu. Cette technique est adaptée pour l'étude de tout matériau dont la taille des pores est comprise entre 0,003 et 360 μm.

La pénétration du mercure dans l'échantillon à analyser se fait en immergeant ce dernier dans le liquide et en augmentant la pression du mercure. La taille du pore pénétré est inversement proportionnelle à la pression appliquée. Le mercure est un liquide idéal car il ne mouille pas la plupart des matériaux (son angle de mouillage se situe entre 110 et 160°) et ne réagit pas avec ceux-ci. Le volume des pores est déterminé à partir du volume de pénétration du mercure. Le diamètre des pores D est calculé en utilisant la loi de Jurin-Laplace :

$$D = \frac{-4\sigma_m \cos\phi_m}{p_m^*} \tag{3.1}$$

avec : σ_m la tension superficielle du mercure (0,485 N.m^{-1}), p_m^* la pression de mercure et ϕ_m l'angle de mouillage associé au mercure.

Les résultats de l'analyse sont résumés dans le tableau 3.3. La masse volumique apparente, égale à la masse de l'échantillon divisée par son volume apparent, est déduite du volume de mercure nécessaire pour remplir la cellule de mesure à basse pression, c'est-à-dire avant que le métal ne pénètre dans les pores. La distribution en taille des pores est représentée sur la figure 3.5 par la dérivée logarithmique de l'intrusion cumulative du volume V de mercure ($dV/d\,(logD)$) en fonction du diamètre D des pores.

Volume d'intrusion	0,1694 ml.g^{-1}
Aire des pores	3,422 m^2.g^{-1}
Diamètre moyen des pores	0,7745 μ m
Masse volumique apparente	1870 kg.m^{-3}
Masse volumique spécifique	2738 kg.m^{-3}
Porosité	31,69%

TAB. 3.3 – Caractéristiques de la céramique obtenues par la méthode d'intrusion de mercure.

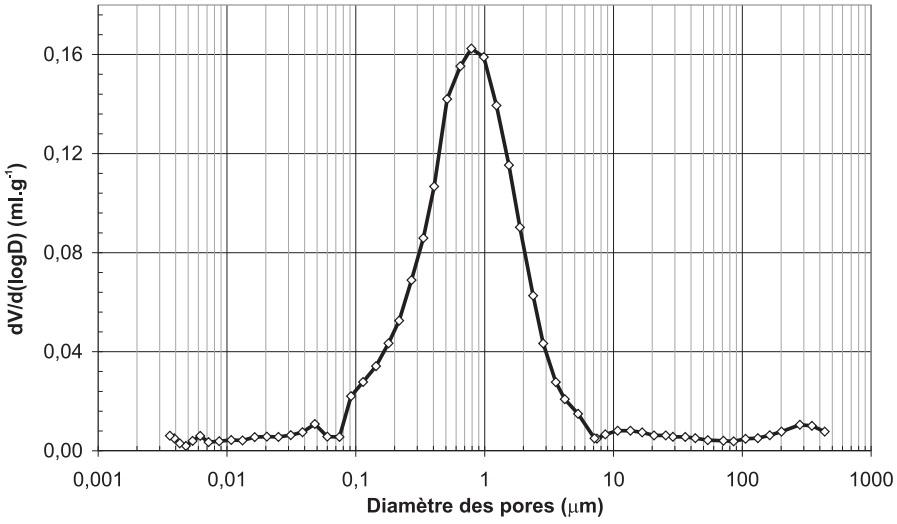

FIG. 3.5 – Porosimétrie de la céramique ; dérivée logarithmique de l'intrusion cumulative du volume V de mercure $(dV/d\,(logD))$ en fonction du diamètre D des pores.

La porosimétrie au mercure permet également d'atteindre le volume cumulé de mercure entrant dans les pores à chaque incrément de pression (Figure 3.6,**a**). Chaque incrément de pression peut être relié, par la loi de Jurin-Laplace, au rayon de pore correspondant pour obtenir le graphe de la figure 3.6, **b**. Sur ce dernier graphe, prenons un point de volume cumulé V_i correspondant à un diamètre de pore D_i. Ce point signifie que les pores de diamètre supérieur à D_i représentent un volume V_i au sein de l'échantillon. Si on suppose que le milieu peut être décrit par le modèle du réseau de tubes capillaires décrit dans le paragraphe 1.2.3, on peut déterminer à partir du graphe de la figure 3.6, **b** la courbe de rétention de la céramique. Son tracé est donné sur la figure 3.7.

Cette courbe n'est qu'une approximation de la véritable courbe de rétention du milieu puisque les hypothèses du modèle du réseau de tubes capillaires sont simplificatrices et ne tiennent notamment pas compte de l'eau adsorbée.

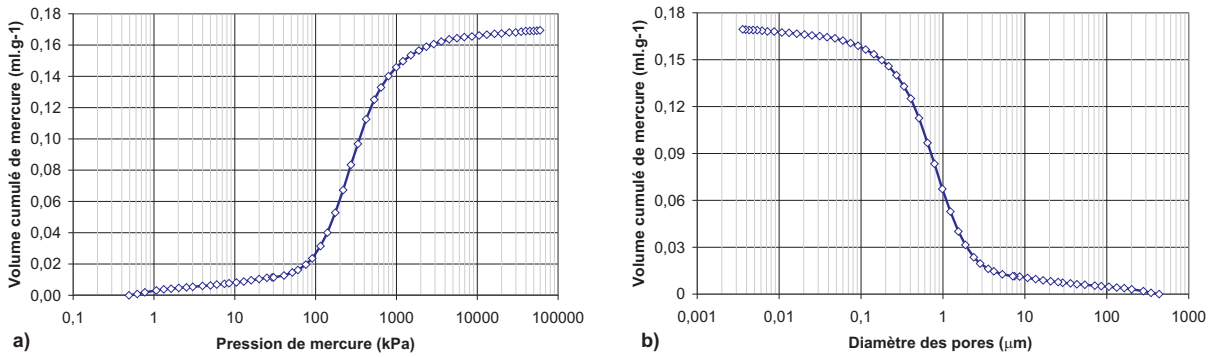

FIG. 3.6 – Porosimétrie de la céramique ; Volume cumulé de mercure en fonction, de la pression de mercure **a**, du diamètre moyen des pores remplis **b**.

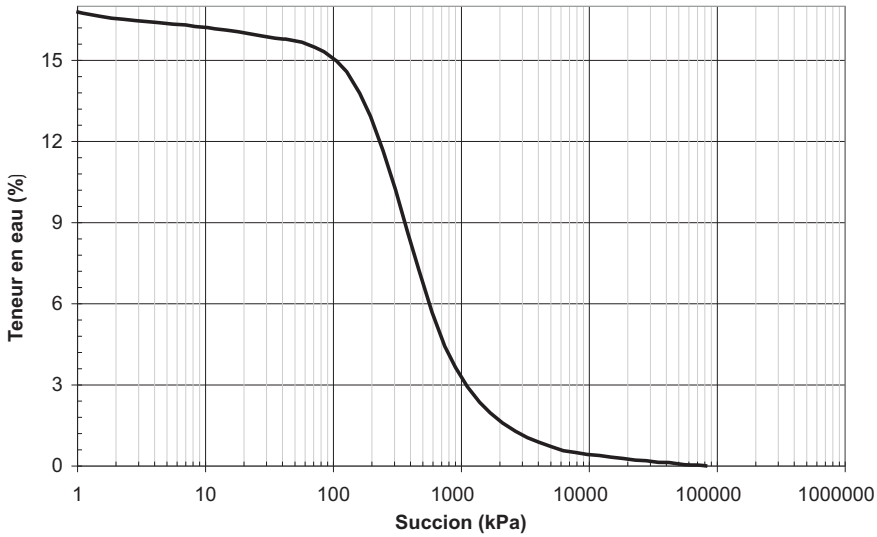

FIG. 3.7 – Courbe de rétention de la céramique obtenue à partir de sa porosimétrie.

3.2 Protocoles expérimentaux

3.2.1 La plaque de pression

Lorsque le milieu se trouve dans le domaine funiculaire, domaine hydrique dans lequel la phase liquide est continue, le dispositif d'application de la succion utilisé est du type plaque de pression. Il permet d'imposer la succion par deux méthodes différentes : soit par surpression d'air, soit par tensiométrie. Ainsi, une large gamme de succions est couverte (de 0 à 500 kPa) tout en gardant, dans le cas des faibles succions, une bonne précision. Son schéma de principe est illustré par la figure 3.8.

L'échantillon se trouve dans une cellule hermétique en acier inoxydable. Il est placé sur une céramique poreuse à haute pression d'entrée d'air saturée d'eau qui assure la continuité

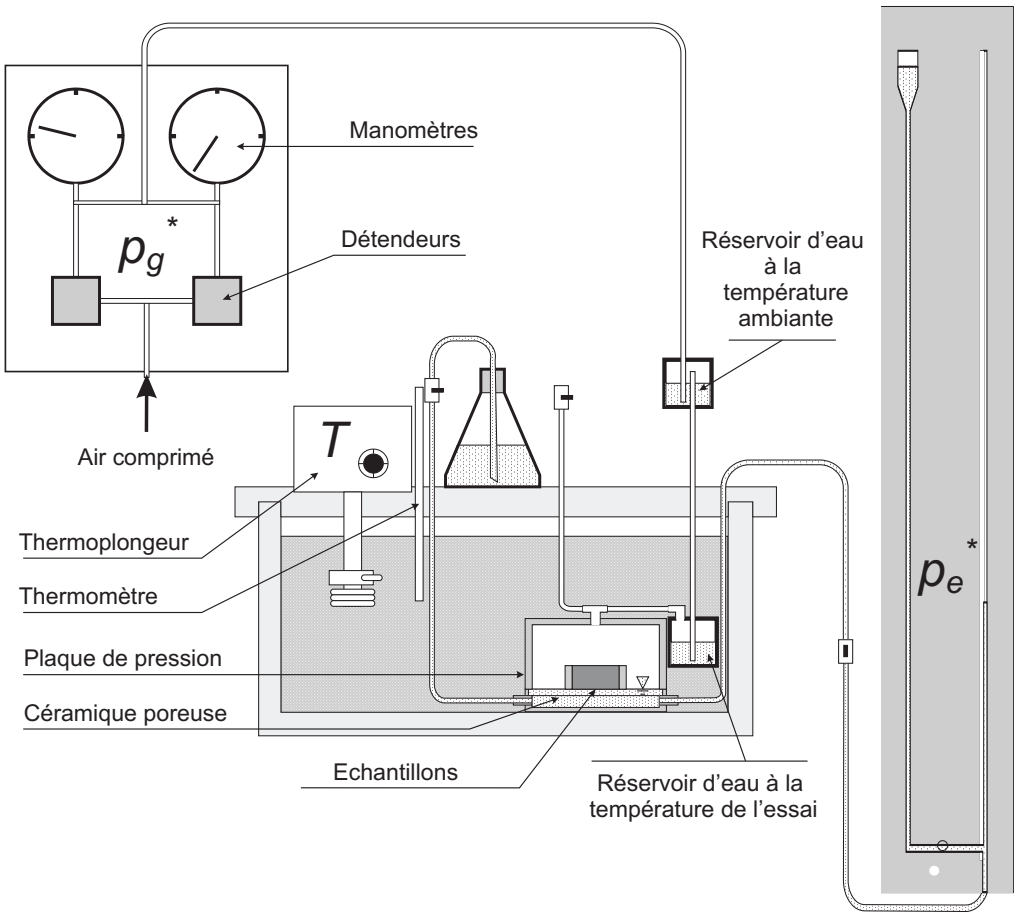

FIG. 3.8 – Schéma de principe de la plaque de pression et de l'environnement de mesure.

de la phase liquide entre l'échantillon et le circuit hydraulique.

Un circuit pneumatique, composé de détendeurs pour ajuster la pression et de manomètres pour la contrôler, régule la pression de la phase gazeuse de la cellule d'essai. Deux circuits pneumatiques de plages de fonctionnement différentes (de 0 à 50 kPa pour le premier et de 0 à 500 kPa pour le second) sont mis en parallèle pour conserver une bonne précision quelle que soit la valeur de pression imposée (la précision est de 1 kPa pour le premier et de 5 kPa pour le second). Un compresseur fournit un air propre et sec. Avant d'arriver à la cellule d'essai, l'air barbote dans deux réservoirs d'eau, l'un à la température ambiante et l'autre à la température de l'essai, afin de se charger en vapeur d'eau. A la sortie du circuit, l'air est très proche de la saturation en vapeur d'eau ($HR \approx 100\%$) ; les changements de phase dans la cellule sont ainsi extrêmement limités.

Le dispositif de mesure et de régulation de la pression de la phase liquide est assuré par un panneau équipé d'une burette graduée avec une précision de $0,1$ cm. La hauteur de ce panneau est réglable à ± 1 m autour du niveau de l'échantillon. Ce dispositif permet d'imposer des pressions d'eau allant de -10 kPa à 10 kPa avec une incertitude d'environ $0,01$ kPa.

La cellule est immergée dans un bain thermostaté. La régulation de la température est réalisée au moyen d'un thermoplongeur composé d'un corps de chauffe d'une puissance de 2000 W et d'une pompe refoulante (15 $l.min^{-1}$ de débit) pour homogénéiser la température du bain. Le calorifugeage est assuré par une couche de polystyrène extrudé. Le contrôle de la température se fait au moyen d'un thermomètre à alcool. L'incertitude sur la valeur de la température imposée est inférieure à $0,5$ °C.

3.2.2 Le banc de sorption

Dans le domaine hygroscopique, domaine hydrique dans lequel la phase gazeuse est continue, le dispositif utilisé pour l'application de la succion est le banc de sorption dont le schéma de principe est présenté sur la figure 3.9. Ce dispositif permet d'appliquer la succion par la méthode des solutions salines saturées.

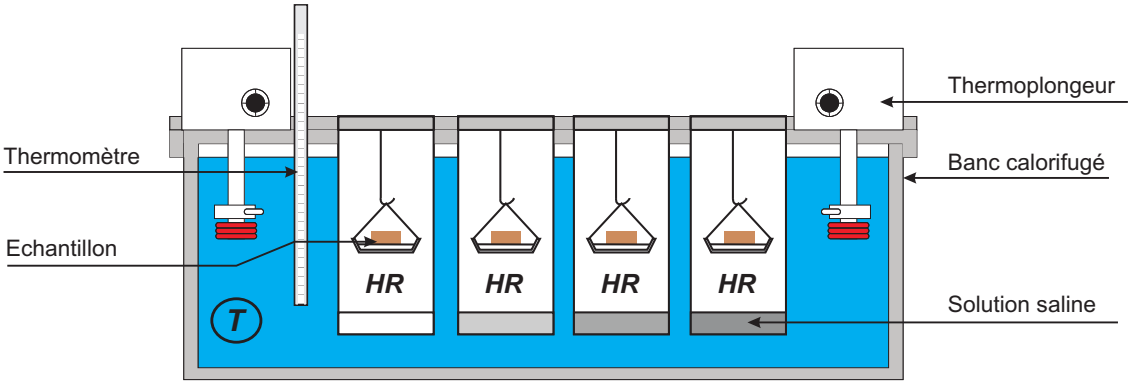

FIG. 3.9 – Schéma de principe du banc de sorption ; le banc contient deux rangées de quatre dessiccateurs.

Chaque échantillon est disposé dans un petit panier en grillage métallique. Chaque panier est suspendu dans un dessiccateur, enceinte hermétique au fond de laquelle la solution saline saturée régule l'humidité relative de l'air. Les sels utilisés permettent d'obtenir des ambiances dont l'humidité relative est comprise entre 6 et 97% (tableau 3.4). Le banc de sorption est composé de huit dessiccateurs correspondant à différentes humidités relatives. En une seule expérimentation, on peut donc déterminer huit points de la courbe de rétention ou de l'isotherme de sorption.

Les dessiccateurs sont plongés dans un bain thermostaté permettant ainsi des essais par série de huit échantillons à des températures variant de 20 à 60 °C. La température du bain est régulée par deux thermoplongeurs. La puissance totale est de 4000 W et le débit de refoulement est de 30 $l.min^{-1}$. Les incertitudes absolues sont estimées à moins de 1% pour l'humidité relative et moins de $0,5$ °C pour la température.

Lorsqu'un liquide pur est en équilibre avec sa vapeur, les flux de matière sont nuls. On peut donc supposer dans notre cas l'égalité des potentiels chimiques de l'eau sous formes liquide et vapeur. De cette égalité, et en supposant que la vapeur d'eau suit la loi des gaz parfaits, on peut déduire la loi de Kelvin qui permet de relier à chaque humidité relative (donc chaque

Température	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Hydroxide de potassium	9	7	6	6	6
Chlorure de lithium	12	12	11	11	10
Chlorure de magnésium	33	33	32	31	30
Carbonate de potassium	44	43	42	-	36
Nitrate de magnésium	55	52	49	46	43
Chlorure de sodium	76	75	75	76	76
Chlorure de potassium	86	85	82	81	80
Sulfate de potassium	97	96	96	96	96

TAB. 3.4 – Solutions salines utilisées dans le banc de sorption avec leurs humidités relatives correspondantes pour différentes températures.

sel) une succion correspondante :

$$s = -\frac{\rho_e^* RT}{M_e} \ln(HR) \tag{3.2}$$

où R est la constante des gaz parfaits et la M_e la masse molaire de l'eau.

3.2.3 Mesure des variables teneur en eau et indice des vides

Pour les deux expérimentations, plaque de pression et banc de sorption, la teneur en eau w et l'indice des vides e des échantillons sont mesurés à l'équilibre hydrique.
La teneur en eau est définie comme le rapport entre la masse d'eau m_e et la masse de sol sec m_s ($w = m_e/m_s$). Quant à l'indice des vides, il est égal au volume des vides V_v (somme du volume de phase gazeuse V_g et du volume d'eau V_e) divisé par le volume de sol sec V_s ($e = V_v/V_s = (V_e + V_g)/V_s$).
Les méthodes de mesure employées sont destructives. Elles n'utilisent comme appareil de mesure que des balances de précision. Les différentes étapes du processus de mesure sont synthétisées ici en quatre points :

1. A l'ouverture de la plaque de pression ou du dessiccateur, on pèse la masse humide m_h de chacun des échantillons. Cette étape, surtout pour les essais en température, doit se faire le plus rapidement possible pour limiter les pertes d'eau par changement de phase. La masse humide s'écrit :
$$m_h = V_s\rho_s^* + V_e\rho_e^* \tag{3.3}$$

2. On plonge ensuite les échantillons dans du kerdane (pétrole désaromatisé) pendant deux heures afin que les gros pores se saturent. Puis, après avoir épongé l'excédent de kerdane à l'aide d'un papier absorbant, on pèse la masse de l'échantillon m_{h+ker}. Si l'on note V_{ker} le volume de kerdane contenu dans l'échantillon et ρ_{ker}^* sa masse volumique, on peut écrire :
$$m_{h+ker} = V_s\rho_s^* + V_e\rho_e^* + V_{ker}\rho_{ker}^* \tag{3.4}$$

3. On pèse ensuite les échantillons immergés dans le kerdane. D'après le principe de la poussée d'Archimède, en notant g l'accélération de la pesanteur, le poids p_i d'un volume

V_i d'un solide de masse volumique ρ_i^* plongé dans un liquide de masse volumique ρ_j^* s'écrit :

$$p_i = gV_i(\rho_i^* - \rho_j^*) \tag{3.5}$$

Si l'on applique ce principe à notre cas on peut écrire la masse de l'échantillon immergé m_{imm} sous la forme :

$$m_{imm} = V_s\left(\rho_s^* - \rho_{ker}^*\right) + V_e\left(\rho_e^* - \rho_{ker}^*\right) + V_{ker}\left(\rho_{ker}^* - \rho_{ker}^*\right) + V_g\left(-\rho_{ker}^*\right) \tag{3.6}$$

$$m_{imm} = V_s\left(\rho_s^* - \rho_{ker}^*\right) + V_e\left(\rho_e^* - \rho_{ker}^*\right) - V_g\rho_{ker}^* \tag{3.7}$$

On peut enfin déterminer le volume de l'échantillon V_{tot} par la différence entre la masse mesurée dans l'air et dans le kerdane :

$$m_h - m_{imm} = V_s\rho_{ker}^* + V_e\rho_{ker}^* + V_{ker}\rho_{ker}^* + V_g\rho_{ker}^* = V_{tot}\rho_{ker}^* \tag{3.8}$$

4. Après 24 heures dans une étuve régulée à 105°C, on a atteint un état que l'on considère comme sec puisque la masse de l'échantillon ne varie plus et on pèse la masse sèche de l'échantillon. On peut déterminer la teneur en eau w et l'indice des vides e comme suit :

$$w = \frac{m_h - m_s}{m_s} \tag{3.9}$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_{tot} - V_s}{V_s} = \frac{V_{tot} - \frac{m_s}{\rho_s^*}}{\frac{m_s}{\rho_s^*}} \tag{3.10}$$

Compte tenu de l'incertitude des balances utilisées (incertitude $\pm 0,001$ g), l'incertitude dans les mesures est très faible. Par contre ce protocole est long et nécessite des manipulations d'échantillons parfois fragiles, il peut y avoir des pertes de masse humide. L'étape la plus délicate est d'absorber l'excédent de kerdane car elle est difficilement "standardisable". Pour pallier toutes ces sources d'imprécision, chaque donnée retenue est la moyenne de trois valeurs expérimentales.

3.2.4 Protocole de fabrication des échantillons

Les échantillons sont préparés à partir de sol sec (sol stocké pendant plusieurs jour dans une étuve dont la température est régulée à 105 °C puis placé dans un récipient étanche pendant 24 h à la température ambiante pour faire diminuer sa température). Le sol est ensuite intimement mélangé avec la quantité d'eau nécessaire à la fabrication des échantillons puis placé dans des récipients étanches pendant au moins 48 h pour que la répartition de la phase liquide du mélange soit homogène.
A partir de ce mélange, chaque échantillon est compacté statiquement en une seule couche dans un moule cylindrique de diamètre 30 mm et de hauteur 10 mm (soit un volume total $V_{tot} = 7,07$ cm^3) pour atteindre l'indice des vides de fabrication e^f voulu.
En notant par un exposant f toutes les variables relatives à l'état de fabrication, on peut écrire :

$$e^f = \frac{V_v^f}{V_s^f} = \frac{V_{tot} - V_s^f}{V_s^f} = \frac{\rho_s^* V_{tot} - m_s^f}{m_s^f} \tag{3.11}$$

Connaissant la teneur en eau du mélange, la masse sèche peut s'exprimer en fonction de la masse humide :

$$m_s^f = m_h^f - m_e^f = m_h^f - w m_s^f = \frac{m_h^f}{1+w} \tag{3.12}$$

Finalement, on obtient l'expression de la masse humide à introduire dans le moule en fonction de l'indice des vides de fabrication voulu :

$$m_h^f = \frac{V_{tot}\rho_s^*(1+w)}{e^f+1} \tag{3.13}$$

Connaissant la teneur en eau du mélange, en fixant la masse humide de fabrication (masse humide introduite dans le moule avant le compactage) on fixe l'indice des vides de l'échantillon à la fin de l'étape de compactage. Cet indice des vides ainsi que la teneur en eau du mélange définissent l'état de fabrication.
Les échantillons sont ensuite placés sur la céramique poreuse de la plaque de pression pour être amenés à saturation par imbibition pendant 2 h. Les conditions initiales sont déterminées à la fin de l'imbibition par la mesure de l'indice des vides et de la teneur en eau. Le degré de saturation de tous les échantillons est proche de 100%.

3.2.5 Modèle d'ajustement pour la courbe de rétention

Depuis la relation développée par Gardner (1958), de nombreux auteurs se sont attachés à améliorer la fonction d'ajustement mathématique de la courbe de rétention d'eau. Les différentes approches empiriques successives sont basées sur des fonctions en loi de puissance et en exponentielle. Parmi les principaux résultats, on peut citer Brooks et Corey (1964), Farrell et Larson (1972), Van Genuchten (1980) et Assouline et al. (1998).

On utilise ici la fonction proposée par Fredlund et Xing (1994) car elle permet de bonnes approximations de la courbe de rétention sur toute l'étendue de la plage de succions même dans le domaine hygroscopique. Son écriture mathématique est une forme intégrale de la fonction de répartition des pores du milieu et s'écrit :

$$w = \left(1 - \frac{\ln\left(1+\frac{s}{s_r}\right)}{\ln\left(1+\frac{10^6}{s_r}\right)}\right) \times \frac{w_{sat}}{\left(\ln\left(\exp(1)+\left(\frac{s}{s_i}\right)^n\right)\right)^m} \tag{3.14}$$

La teneur en eau de saturation étant supposée connue, cette fonction nécessite la détermination de quatre paramètres :

1. s_r qui est la succion correspondant à la teneur en eau résiduelle w_r (valeur à partir de laquelle la phase liquide est supposée ne plus être continue).
2. s_i qui est la succion au point d'inflexion de la courbe de rétention correspondant à la teneur en eau w_i.
3. m qui est le paramètre permettant de contrôler la pente de la courbe dans la zone des fortes succions. On peut le déterminer à partir de s_r, w_{sat}, s_i, φ (pente de la partie linéaire de la courbe) et s_p (succion pour laquelle la droite de pente φ coupe l'axe des abscisses). m est alors donné par la relation :

$$m = 3,67 \times \ln\left(\frac{w_{sat} \times \left(1 - \frac{\ln\left(1+\frac{s_i}{s_r}\right)}{\ln\left(1+\frac{10^6}{s_r}\right)}\right)}{\varphi \times \ln\left(\frac{s_p}{s_i}\right)}\right) \tag{3.15}$$

avec φ défini par :

$$\varphi = \frac{w_i}{\ln\left(\frac{s_p}{s_i}\right)} \tag{3.16}$$

4. n, qui est le paramètre permettant de contrôler, dans la partie des faibles succions, la pente de la courbe. Ce paramètre est déterminé à partir de m, s_r, w_{sat}, s_i et φ par la relation :

$$n = 3,72 \times \frac{1,31^{m+1}}{m\left(1 - \frac{\ln\left(1+\frac{s_i}{s_r}\right)}{\ln\left(1+\frac{10^6}{s_r}\right)}\right)} \times \left(\frac{\varphi}{w_{sat}} - \frac{s_i}{1,31^m \times (s_i + s_r) \times \ln\left(1 + \frac{10^6}{s_r}\right)}\right) \tag{3.17}$$

Finalement, la détermination de ces paramètres nécessite la mesure de quatre valeurs s_r, s_i, s_p et φ. Ces valeurs peuvent être mesurées directement sur le graphe des résultats expérimentaux ; la figure 3.10 en illustre la méthode.

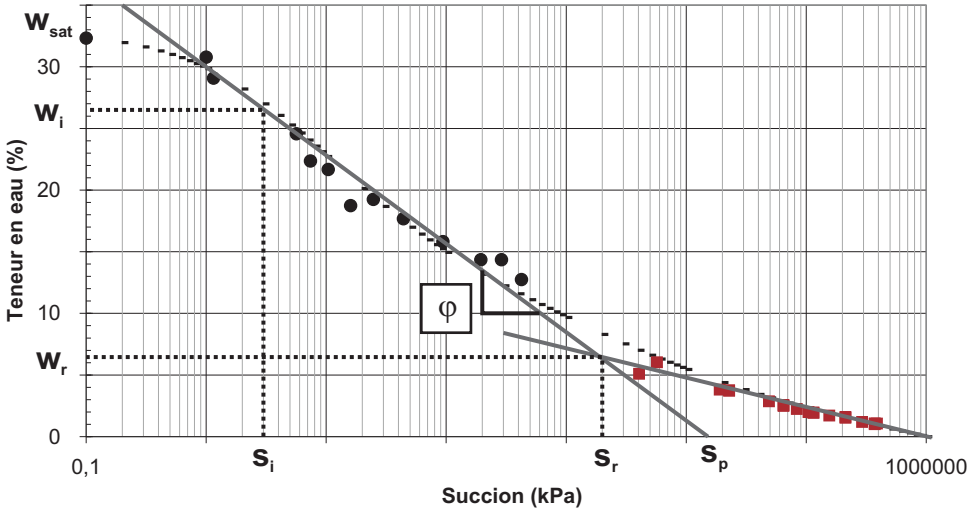

FIG. 3.10 – Paramètres de la fonction d'ajustement de la courbe de rétention.

Dans la plupart des études de la littérature, la détermination des paramètres de la courbe de rétention se fait sans prêter attention au fait que l'indice des vides n'est pas forcément constant tout au long du chemin de drainage.

3.2.6 Modèle d'ajustement pour l'isotherme de sorption

On trouve dans la littérature de nombreux modèles permettant l'ajustement des isothermes de sorption (Kumar et Mishra (2006)), comme le modèle de Langmuir (Langmuir (1918)) ou le modèle BET (Brunauer et al. (1938)), pour ne citer que deux des plus connus.
On utilise pour cette étude le modèle de GAB qu'ont chacun développé dans les années 50 Guggenheim, Anderson et de Boer (Van Den Berg (1984)). Le choix de ce modèle s'appuie sur plusieurs raisons :

- Il rend compte des différents processus de physisorption.
- Sa forme mathématique est simple et nécessite la détermination de peu de paramètres.

– Il a prouvé sa pertinence dans l'agroalimentaire pour une large gamme de milieux, il est adapté au sol (Mihoubi (2004)) et permet une approximation des isothermes sur une gamme d'humidités relatives allant de 0 à 90%.
– Et surtout, ces paramètres peuvent être reliés à la température absolue par des fonctions d'Arrhenius (Moreira et al. (2002)). De ce fait, ce modèle retranscrit une loi de comportement thermo-hydrique.

Son équation prend la forme :

$$w = \frac{w_m \times C \times K \times HR}{(1 - K \times HR)\,(1 - K \times HR + C \times K \times HR)} \tag{3.18}$$

où w_m est la teneur en eau massique lorsque toute la surface de la phase solide est occupée par une couche d'eau d'une molécule d'épaisseur, C et K sont des constantes qui rendent compte des énergies d'interaction entre la première et les autres molécules d'un même site d'adsorption.

Timmermann et al. (2001) propose une méthode de détermination de ces paramètres en transformant l'équation (3.18) en une équation du second degré comme suit :

$$\frac{HR}{w} = \left[\frac{C-1}{w_m \times C}K\right] HR^2 + \left[\frac{C-2}{w_m \times C}\right] HR + \frac{1}{w_m \times C \times K} \Leftrightarrow f(HR) = \chi \times HR^2 + \eta \times HR + \zeta \tag{3.19}$$

En traçant la parabole $f(HR)$ ajustant au mieux les points expérimentaux on détermine les coefficients χ, η et ζ. En notant Δ le déterminant du polynôme du second degré obtenu, les paramètres du modèle de GAB sont alors déterminés par les relations :

$$w_m = \Delta^{-0,5} \tag{3.20}$$

$$C = \frac{2 \times \Delta^{0,5}}{\Delta^{0,5} - \eta} \tag{3.21}$$

$$K = \frac{\Delta^{0,5} - \eta}{2 \times \zeta} \tag{3.22}$$

Ces paramètres peuvent reliés à la température par des fonctions d'Arrhenius comme suit (Moreira et al. (2002)) :

$$w_m = v_m \times \exp\left(\frac{H}{R \times T}\right) \tag{3.23}$$

$$C = c \times \exp\left(\frac{H_m - H_n}{R \times T}\right) \tag{3.24}$$

$$K = k \times \exp\left(\frac{H_l - H_n}{R \times T}\right) \tag{3.25}$$

Où v_m, H, c et k sont des paramètres d'ajustement ; H_m, H_n et H_l sont respectivement la chaleur de sorption de la monocouche, la chaleur de sorption de la multicouche, la chaleur de condensation ; R est la constante des gaz parfaits et T est la température absolue. On simplifira cette écriture en posant :

$$h_C = H_m - H_n \tag{3.26}$$

$$h_K = H_l - H_n \tag{3.27}$$

Le modèle thermo-hydrique ainsi obtenu comporte six paramètres : v_m, c, k, H, h_C et h_K. Leur détermination nécessite la donnée de deux isothermes obtenus à deux températures différentes.

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les matériaux, les dispositifs expérimentaux et les méthodes qui seront utilisés pour obtenir les résultats expérimentaux présentés dans les chapitres 4, 5 et 6.

Chapitre 4

Prise en compte de la déformation

L'étude bibliographique réalisée au chapitre 1 montre que la courbe de rétention n'est pas une courbe caractéristique du milieu car elle dépend de sa compacité (d'où le choix ici de la dénomination de "courbe de rétention" d'eau au lieu de "courbe caractéristique sol-eau"). De plus, la succion agissant à la fois sur la teneur en eau et sur l'indice des vides, la caractérisation complète du comportement hydrique du sol nécessite une représentation et une modélisation tridimensionnelles, par exemple dans l'espace *indice des vides - succion - teneur en eau* $(e-s-w)$ ou dans l'espace *indice des vides - succion - degré de saturation* $(e-s-S_r)$. Dans cet objectif, on propose ici une étude expérimentale sur le sable limoneux argileux dans laquelle on mesure les triplets (e, s, w) lors de la désaturation d'échantillons à la température ambiante T_{amb}. Les chemins de chargement hydrique sont établis pour cinq états initiaux différents caractérisés par leur indice des vides et donc leur teneur en eau de saturation.

Les résultats expérimentaux conduisent à des équations paramétriques des chemins de chargement hydrique exprimant la teneur en eau d'une part, et l'indice des vides d'autre part, en fonction de la succion et de l'indice des vides initial (qui traduit l'état de compaction initial). La comparaison avec des données expérimentales de la littérature et la confrontation aux interprétations physiques des phénomènes observés conduisent à généraliser une partie de ces résultats. Enfin, on propose la modélisation d'une surface dans l'espace *indice des vides - succion - teneur en eau* qui représente tous les triplets (e, s, w) que peut prendre le sol à l'intérieur des plages d'étude des trois variables sous chargement hydrique monotone. Cette surface est appelée "surface caractéristique". Elle constitue une généralisation de la courbe de rétention classique et peut être considérée comme un outil permettant d'appréhender le comportement hydrique des sols en tenant compte des couplages hydro-mécaniques.

4.1 Programme expérimental

Le programme expérimental est établi en visant les objectifs suivants :
- Montrer expérimentalement la pertinence du concept de surface caractéristique.
- Illustrer une méthode de construction complète de cette surface dans le cas d'un sol donné (le sable limoneux argileux). Cette étape passe par l'établissement des équations paramétriques des chemins de chargement hydrique de ce sol en tenant compte de l'indice des vides. Pour élargir le domaine de validité de cette modélisation , il faut qu'elle s'appuie sur des résultats expérimentaux couvrant une gamme d'indices des vides la plus large possible.

L'étude expérimentale a porté sur cinq séries d'échantillons compactés à cinq masses volumiques sèches apparentes différentes (tableau 4.1). Pour l'état le plus lâche les échantillons ont été compactés pour atteindre une masse volumique apparente sèche ρ_s de 1350 kg.m^{-3}, soit un indice des vides de $0,96$. En dessous de cet indice des vides, la taille des macro pores ne garantit plus la bonne homogénéité de l'échantillon. Pour que la différence de compacités soit bien marquée entre les séries tout en gardant une certaine continuité dans les résultats, on a choisi d'augmenter de 150 kg.m^{-3} la masse volumique apparente sèche d'une série à l'autre. Les échantillons de la série la plus dense ont été compactés pour atteindre une masse volumique apparente sèche de 1950 kg.m^{-3}. Au-dessus de cette valeur, l'effort nécessaire au compactage est trop important et est susceptible de briser les grains. La teneur en eau de fabrication a été de 18% pour les trois séries de plus faibles densités. Cela correspond au côté humide de l'optimum Proctor. Pour les deux autres séries, cette teneur en eau est trop élevée pour réaliser un "bon" compactage. Pour ces séries, le compactage a donc été réalisé à des teneurs en eau plus faibles, respectivement 14 et 12%. Ces teneurs en eau ont été choisies pour que l'état de fabrication s'éloigne le moins possible de la teneur en eau correspondant à l'optimum Proctor.

	État de fabrication			État initial		
Série	$e(/)$	ρ_s (kg.m^{-3})	$w(\%)$	$e(/)$	ρ_s (kg.m^{-3})	$w_{sat}(\%)$
1	0,96	1350	18	1,01	1319	38,1
2	0,77	1500	18	0,86	1427	32,3
3	0,61	1650	18	0,68	1575	25,7
4	0,47	1800	14	0,55	1708	21
5	0,36	1950	12	0,44	1845	16,5

TAB. 4.1 – États de fabrication et états initiaux des cinq séries d'échantillons.

Comme on l'a vu dans la section 3.2.4, pour atteindre leur état initial, les échantillons sont saturés par imbibition pendant deux heures sur une céramique reliée à un réservoir d'eau. A la fin de ce processus, les caractéristiques mesurées définissent les états initiaux des échantillons. La figure 4.1 représente les états initiaux et les états de fabrication de chacune des séries par rapport à la courbe de saturation et à la courbe Proctor. Les caractéristiques initiales et de fabrication des échantillons des cinq séries sont résumées dans le tableau 4.1.

Les échantillons sont ensuite utilisés soit sur la plaque de pression soit dans le banc de sorption, afin de les soumettre à une succion. Pour chacune des séries, une moyenne de 16 à 18 succions ont été imposées pour déterminer les chemins de chargement hydrique.

A l'équilibre, la teneur en eau et l'indice des vides des échantillons ont été mesurés. Le nombre de triplets (s, w, e) disponibles est de plus de 80. Chacune de ces mesures est une moyenne obtenue sur trois échantillons. L'étude expérimentale porte donc sur un total de plus de 240 échantillons.

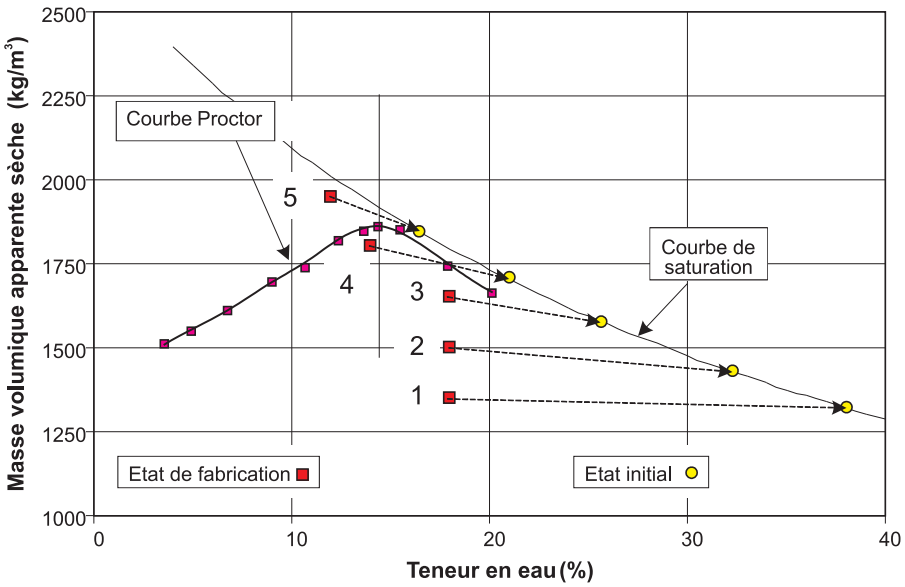

FIG. 4.1 – États de fabrication et états initiaux des échantillons de sol.

4.2 Chemin de chargement hydrique

4.2.1 Description d'un chemin de chargement hydrique

L'application de la succion induit des couplages hydro-mécaniques et se traduit sur le sol par une variation de la teneur en eau massique et de l'indice des vides (Fleureau et al. (2002),Verbrugge et Fleureau (2002)). Pour la description complète des chemins de chargement hydrique, on doit se placer soit dans plusieurs plans de projection (figure 4.2), soit dans une représentation tridimensionnelle (figure 4.3)(Biarez et al. (1988), Salager et al. (2007)).

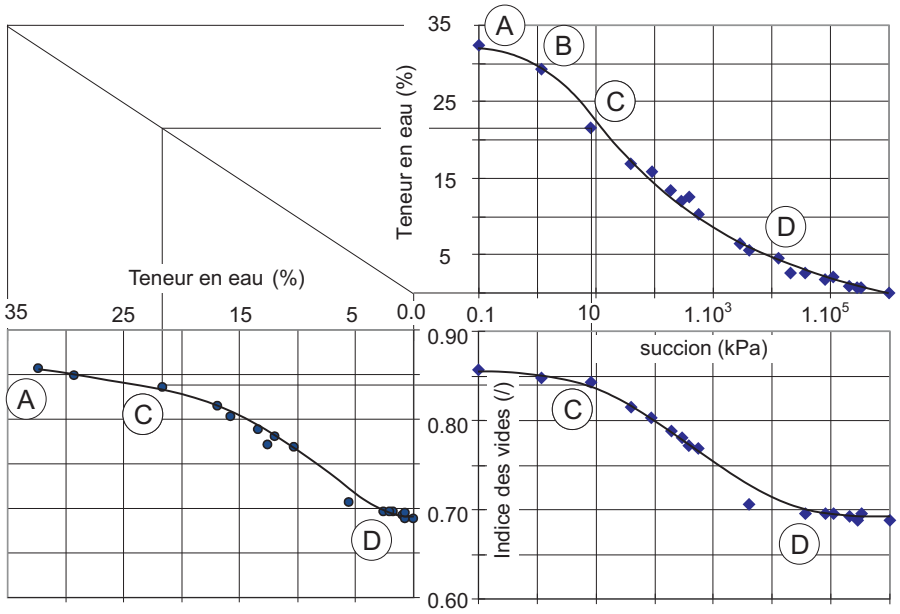

FIG. 4.2 – Différents plans de projection du chemin de chargement hydrique de la série $n°2$.

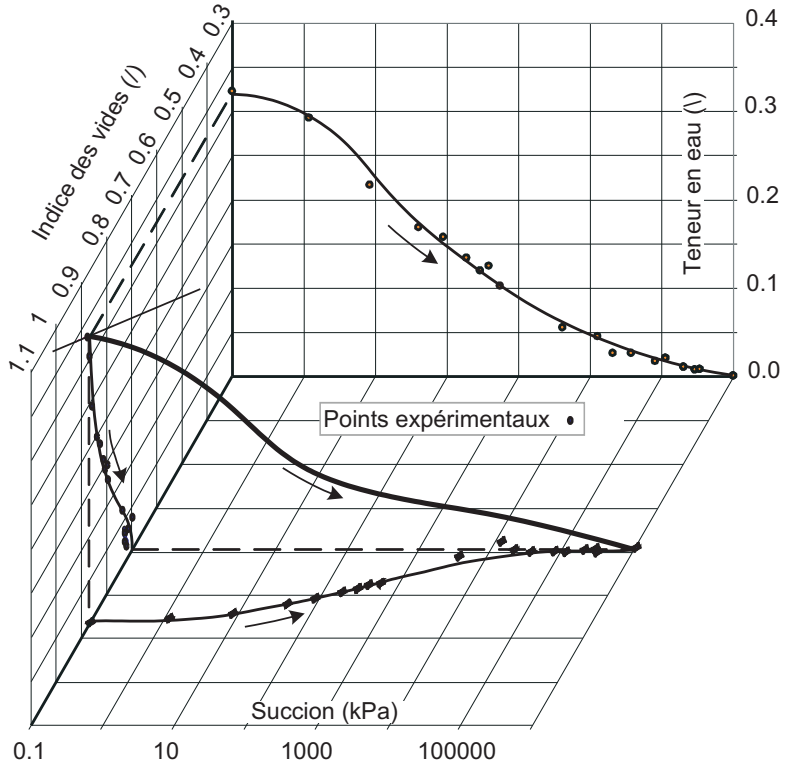

FIG. 4.3 – Chemin de chargement hydrique de la série $n°2$ tracé dans l'espace $w - e - s$.

La figure 4.2 donne, à titre d'exemple, les résultats obtenus pour la série $n°2$. Il est a noter que l'on se trouve ici dans le cas où le sol est sur-consolidé. Le comportement hydrique du sol diffère donc de celui présenté à la figure 1.10 de la section 1.3 qui correspond à des sols

qui sont initialement sous forme de boue. La figure 4.2 présente les projections du chemin hydro-mécanique sur les plans :

- plan e = constante, qui donne la courbe *teneur en eau - succion* (l'axe des succions est représenté en coordonnées logarithmiques), habituellement appelée courbe de rétention d'eau.
- plan w = constante, qui donne la courbe *indice des vides - succion*, habituellement appelée courbe de tassement hydrique.
- plan s = constante, qui donne la courbe *indice des vides - teneur en eau.*

Sur ces chemins de drainage on observe les comportements suivants :

- De la saturation (A) à la succion d'entrée d'air (B), le milieu se désature faiblement. La variation de l'indice des vides est très faible. Pour des succions plus élevées on entre dans le domaine de forte désaturation du milieu.
- A partir du point (C), l'augmentation de la succion induit d'importantes variations de l'indice des vides. L'évolution de la teneur en eau en fonction de l'indice des vides est plus fortement décroissante.
- Le point (D) correspond à l'entrée dans le domaine hygroscopique dans lequel les variations de la teneur en eau sont faibles et l'indice des vides reste quasi constant.

Il faut noter que les résultats présentés par la figure 4.2 correspondent à des échantillons compatés, c'est pourquoi ils différent de ceux présentés par la figure 1.10 qui correspondent à des échantillons dont les états initiaux sont vierges de toute histoire mécanique.

4.2.2 Projection dans un plan e =constante

La figure 4.4 présente dans le plan de projection e =constante les points obtenus pour les cinq séries d'échantillons. Ces points permettent de construire les courbes de rétention d'eau du sable limoneux argileux compacté à différents indices des vides initiaux. Dans chaque cas, pour les faibles succions (inférieures à quelques kPa), les variations de teneur en eau sont peu importantes et pour les succions moyennes (comprises entre quelques kPa et environ 3000 kPa), on se trouve dans une partie linéaire de forte désaturation.

La figure 4.4 met en évidence l'augmentation de la succion d'entrée d'air avec la diminution de l'indice des vides initial. Ce résultat est confirmé par les travaux de plusieurs auteurs (Huang et al. (1998), Vanapalli et al. (1999b), Kawaï et al. (2000), Verbrugge et Fleureau (2002)).

Pour les fortes valeurs de succion, on n'observe pas de couplage hydro-mécanique significatif ; les points expérimentaux de chacune des séries sont pratiquement confondus. En fait, l'influence de l'indice des vides initial n'est plus visible au-delà d'une succion de l'ordre de 100 à 200 kPa.

Lorsque l'on applique un chargement mécanique, ici lors du compactage statique à la fabrication des échantillons, on modifie le réseau poreux du sol. Les grands pores sont écrasés facilement alors que les pores de faibles dimensions nécessiteraient des efforts plus importants pour être réduits. Il y a d'ailleurs une partie des pores, les plus fins, qui ne peuvent être réduits que si l'on applique des efforts assez importants pour briser certains grains (Fredlund et Pham (2007)). Le compactage affecte donc la partie des faibles succions de la courbe de rétention d'eau alors que pour les fortes succions, la courbe de rétention d'eau peut être considérée comme unique (Delage et Graham (1995)).

On a vu que la détermination des paramètres de la fonction d'ajustement des courbes de rétention, dont on rappelle ici l'équation (équation (4.1)), nécessite la mesure de quatre valeurs

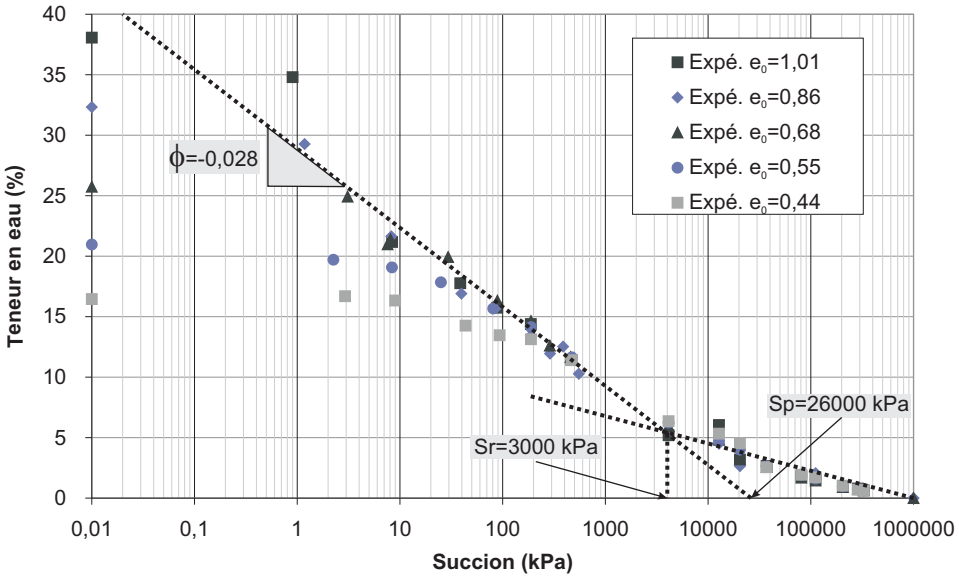

FIG. 4.4 – Points expérimentaux et paramètres de la modélisation des chemins de chargement hydrique des cinq séries projetés dans un plan e =cte.

φ, s_r, s_p et s_i. La méthode de mesure de ces paramètres a été présentée dans la section 3.2.5 (figure 3.10).

$$w(s) = \left(1 - \frac{\ln\left(1+\frac{s}{s_r}\right)}{\ln\left(1+\frac{10^6}{s_r}\right)}\right) \times \frac{w_{sat}}{\left(\ln\left(\exp(1)+\left(\frac{s}{s_i}\right)^n\right)\right)^m} \tag{4.1}$$

La figure 4.4 montre les points expérimentaux obtenus pour les différentes séries. A partir de ces résultats, il est possible d'étudier l'influence de l'indice des vides initial sur les paramètres de l'équation (4.1).

– w_{sat}
La teneur en eau de saturation peut être reliée à l'indice des vides initial par la relation :

$$w_{sat} = \frac{e_0}{G_s} \tag{4.2}$$

où G_s est la densité de la phase solide qui vaut 2,65 pour le sable limoneux argileux.

– φ, s_r et s_p
On remarque sur la figure 4.4 que ces trois paramètres sont indépendants de l'indice des vides initial. C'est une conséquence directe du fait qu'à partir d'une succion d'environ 100 à 200 kPa, les points expérimentaux des différentes séries sont quasiment confondus.

– s_i
La figure 4.5 met en évidence la diminution de la succion d'inflexion avec la diminution de l'indice des vides initial. L'évolution de ce paramètre est liée à celle de la succion d'entrée d'air s_a. Miller et al. (2002) ont d'ailleurs montré sur quatre sols différents qu'il y a proportionnalité entre ces deux variables. On utilise l'équation (1.6) présentée dans

la section 1.3.1 qui a montré sa capacité à décrire l'évolution de s_a en fonction de e_o (Kawaï et al. (2000), Romero et Vaunat (2000), Karube et Kawaï (2001)) pour modéliser l'évolution de s_i en fonction de e_o. Cette équation prend la forme :

$$s_i = A \times e_0^{-B} \tag{4.3}$$

où A et B sont les paramètres du modèle qui dépendent du matériau.

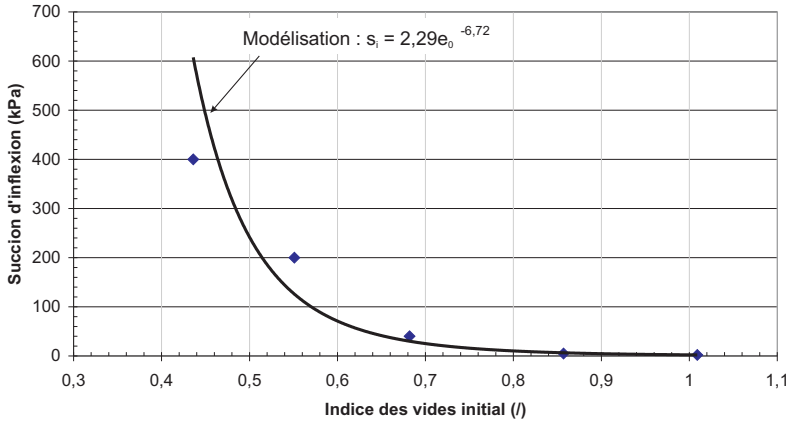

FIG. 4.5 – Évolution de la succion d'inflexion en fonction de l'indice des vides initial.

Finalement, l'équation (4.1) modifiée, qui exprime la teneur en eau du milieu comme une fonction de la succion et de l'indice des vides initial, prend la forme :

$$w(s,e_0) = \left(1 - \frac{\ln\left(1+\frac{s}{3000}\right)}{\ln\left(1+\frac{10^6}{3000}\right)}\right) \times \frac{\frac{e_0}{G_s}}{\left(\ln\left(\exp(1) + \left(\frac{s}{2{,}29e_0^{-6{,}72}}\right)^{n(e_0)}\right)\right)^{m(e_0)}} \tag{4.4}$$

L'expression des exposants n et m est donnée par les équations (4.5) et (4.6).

$$m(e_0) = 3{,}67 \times \ln\left(\frac{\frac{e_0}{G_s} \times \left(1 - \frac{\ln\left(1+\frac{2{,}29e_0^{-6{,}72}}{3000}\right)}{\ln\left(1+\frac{10^6}{3000}\right)}\right)}{-0{,}028 \times \ln\left(\frac{26000}{2{,}29e_0^{-6{,}72}}\right)}\right) \tag{4.5}$$

$$n(e_0) = 3{,}72 \times \frac{1{,}31^{m+1}}{m\left(1 - \frac{\ln\left(1+\frac{2{,}29e_0^{-6{,}72}}{3000}\right)}{\ln\left(1+\frac{10^6}{3000}\right)}\right)} \times \left(\frac{-0{,}028}{\frac{e_0}{G_s}} - \frac{2{,}29e_0^{-6{,}72}}{1{,}31^m \times \left(2{,}29e_0^{-6{,}72} + 3000\right) \times \ln\left(1+\frac{10^6}{3000}\right)}\right) \tag{4.6}$$

La figure 4.6 présente les courbes de rétention obtenues au moyen de l'équation (4.4) et les valeurs des paramètres estimées directement à partir du graphe 4.4. Les valeurs de ces paramètres sont données dans le tableau 4.2.

Pour les faibles succions, les courbes correspondant aux indices des vides les plus élevés, notamment pour la série d'indice des vides initial $1,01$, sous-estiment l'effet de la succion sur la teneur en eau. Pour les succions moyennes, l'ajustement est bon pour toutes les séries. Par contre, la modélisation n'est pas très satisfaisante dans le domaine hygroscopique car les courbes ne sont pas confondues.

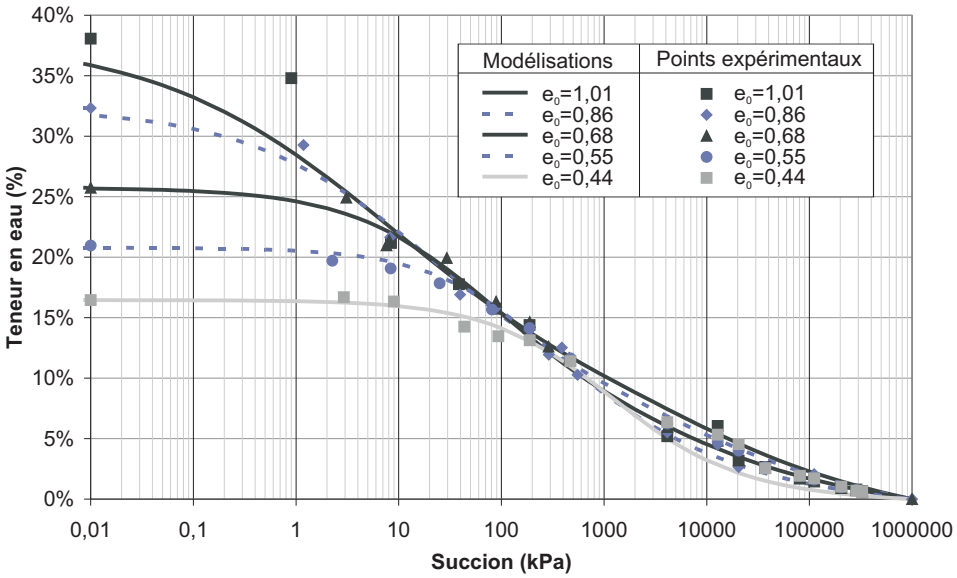

FIG. 4.6 – Modélisation des projections des chemins de chargement hydrique et points expérimentaux dans un plan e =cte en utilisant les paramètres directement estimés à partir la figure 4.4.

Paramètre	Valeur mesurée
φ (/)	$-0,028$
s_p (kPa)	26000
s_r (kPa)	3000
w_{sat}(/)	$\frac{e_0}{2,65}$
s_i (kPa)	$2,29 \times e_0^{(-6,72)}$

TAB. 4.2 – Paramètres de l'ajustement de $w(s, e_0)$ (équation (4.1)) déterminés directement à partir des résultats expérimentaux.

Les valeurs mesurées directement sur le graphique ne donnant pas un résultat satisfaisant, les valeurs des paramètres de la modélisation ont été optimisées afin que les courbes correspondent mieux aux résultats expérimentaux. Le tableau 4.3 donne les valeurs optimisées de ces paramètres.

La figure 4.7 donne le graphe des courbes de rétention pour les différentes séries. La modélisation est améliorée. Pour les faibles succions, les courbes correspondant aux indices

des vides initiaux élevés sont en meilleur accord avec les résultats expérimentaux. Pour les états de fortes succions, les courbes de rétention des cinq séries sont quasi confondues.

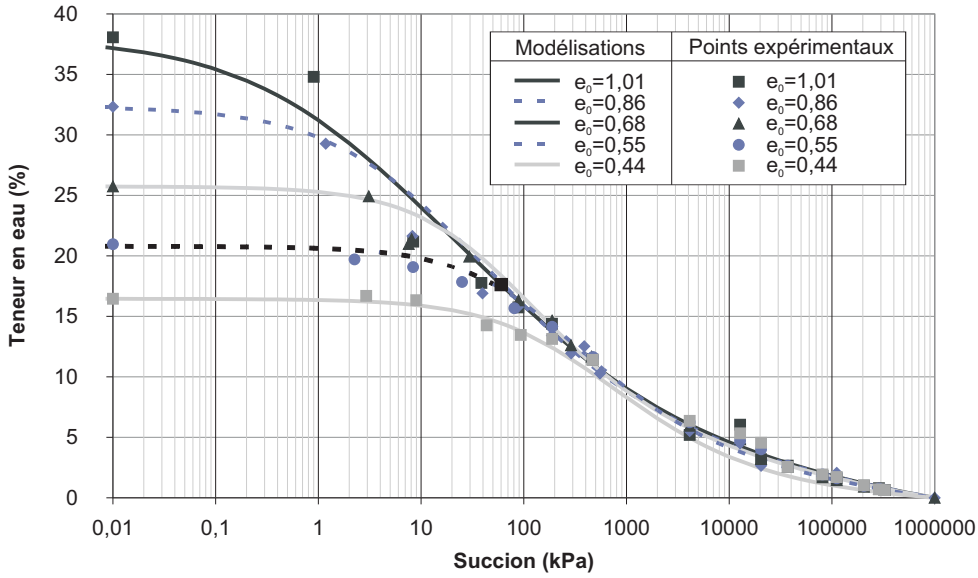

FIG. 4.7 – Modélisation des projections des chemins de chargement hydrique et points expérimentaux dans le plan e =cte en utilisant les paramètres optimisés.

Au bilan de cette section, on peut retenir la modélisation de la projection des chemins de chargement hydrique dans un plan e =constante qui fait intervenir cinq paramètres φ, s_r, s_p, A et B. Théoriquement, pour leur détermination, seules deux séries de résultats expérimentaux correspondant à deux indices des vides différents suffisent, mais une bonne modélisation du paramètre s_i peut en nécessiter plus.

Paramètres	Valeurs ajustées
φ (/)	$-0,03$
s_p (kPa)	35000
s_r (kPa)	100
w_{sat} (/)	$\frac{e_0}{2,65}$
s_i (kPa)	$2,29 \times e_0^{(-6,72)}$

TAB. 4.3 – Paramètres de l'ajustement de $w(s, e_0)$ dont les valeurs ont été optimisées.

4.2.3 Projection dans un plan w =constante

Si on trace, pour différentes valeurs de succion, l'évolution de l'indice des vides en fonction de l'indice des vides initial (figure 4.8), on constate qu'il y a proportionnalité entre les deux termes. Pour une succion nulle, le coefficient de proportionnalité est naturellement égal à 1 (état initial de chaque essai). Puis il diminue avec l'augmentation de la succion à laquelle on se place, pour se stabiliser vers une succion de 10000 kPa à une valeur d'environ 0,79. Afin de faciliter la lecture de la figure 4.8, seules les courbes correspondant à quelques valeurs de succion sont représentées. Les droites correspondant aux valeurs 10000 kPa, 100000 kPa, 1000000

kPa étant confondues, c'est la courbe correspondant à la succion la plus élevée qui a été retenue.

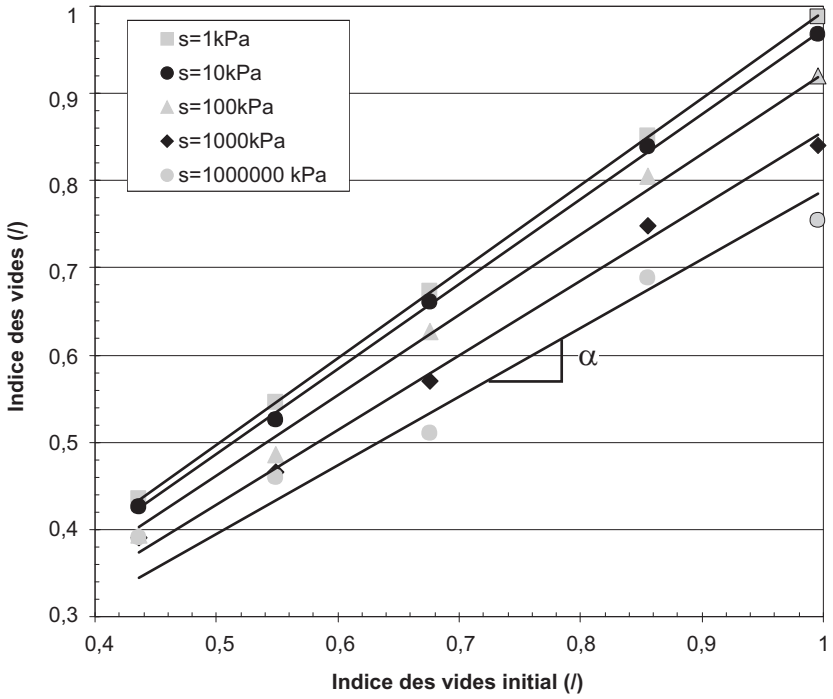

FIG. 4.8 – Variation de l'indice des vides en fonction de l'indice des vides initial pour différentes succions.

La proportionnalité observée ici, entre l'indice des vides et l'indice des vides initial, n'est valable que dans le cas de chemins de chargement hydrique et n'aurait plus de sens hors de ce contexte.

Si on note α le coefficient de proportionnalité, l'équation qui relie l'indice des vides à l'indice des vides initial paramétrée par la succion prend la forme :

$$e(s, e_0) = \alpha(s) \times e_0 \tag{4.7}$$

Succion (kPa)	Coefficient α
0	1
1	0,99
10	0,98
100	0,92
1000	0,86
10000	0,81
100000	0,80
1000000	0,79

TAB. 4.4 – Valeurs du coefficient α pour différentes succions.

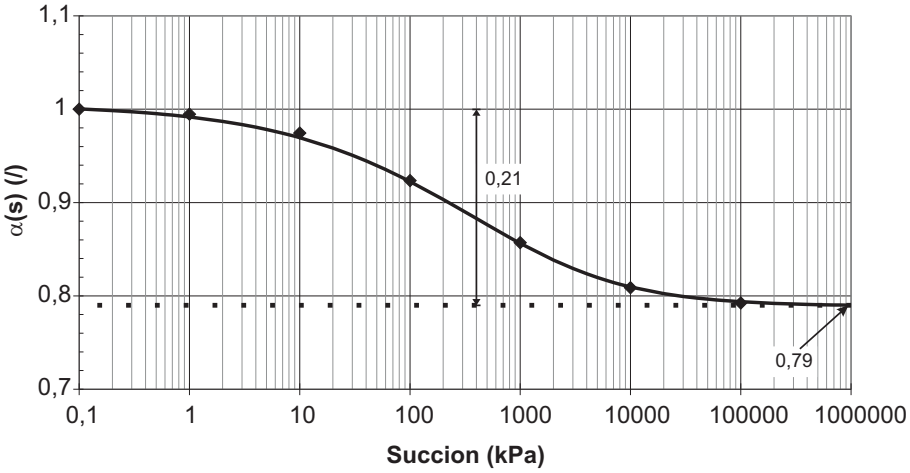

FIG. 4.9 – Modélisation de l'évolution de la pente α en fonction de la succion.

Le tableau 4.4 donne les valeurs de α pour différentes valeurs de la succion. La figure 4.9 montre l'évolution de α en fonction de la succion. Les similitudes entre l'allure de ce graphe et celle d'une courbe de rétention nous amène à utiliser une fonction de la forme de la relation (3.14) pour l'ajustement de cette courbe. Cette relation s'écrit :

$$\alpha(s) = 0,79 + \left(1 - \frac{\ln\left(1+\frac{s}{1000}\right)}{\ln\left(1+\frac{10^6}{1000}\right)}\right) \frac{0,21}{\left(\ln\left(\exp(1)+\left(\frac{s}{400}\right)^{0,466}\right)^{2,896}\right)} \quad (4.8)$$

Avec (4.9)

$$\alpha(0) = 1 \quad (4.10)$$

$$\alpha(1000000) = 0,79 \quad (4.11)$$

Les équations (4.7) et (4.8) permettent une expression explicite des variations de l'indice des vides courant en fonction de la succion et de l'indice des vides initial qui s'écrit :

$$e(s,e_0) = \left(0,79 + \left(1 - \frac{\ln\left(1+\frac{s}{1000}\right)}{\ln\left(1+\frac{10^6}{1000}\right)}\right) \frac{0,21}{\left(\ln\left(\exp(1)+\left(\frac{s}{400}\right)^{0,466}\right)^{2,896}\right)}\right) \times e_0 \quad (4.12)$$

La figure 4.10 représente les tracés des modélisations des projections dans un plan w =constante des chemins de chargement hydrique définis par l'équation (4.12) pour toutes les séries d'essais. On peut noter que le modèle sous-estime l'effet de la succion sur l'indice des vides pour la courbe correspondant à la série d'indice des vides initial le plus élevé tandis qu'elle sur-estime cet effet pour celles correspondant aux deux indices des vides initiaux les plus faibles. Cette approximation vient de la modélisation linéaire de la relation entre indice des vides courant et indice des vides initial. Cependant, on peut globalement admettre que la modélisation donne des résultats assez satisfaisants.

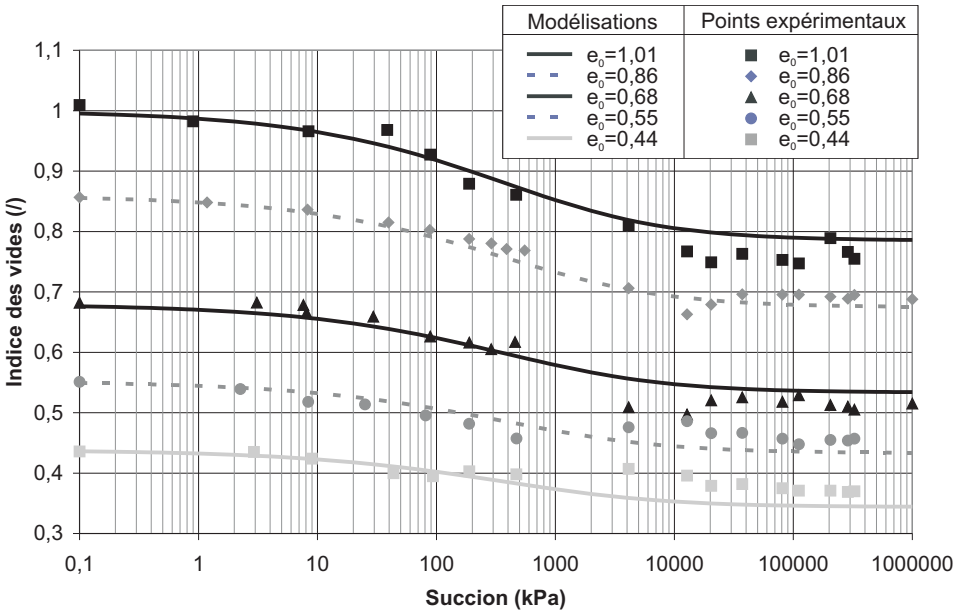

FIG. 4.10 – Modélisation des projections des chemins de chargement hydrique et points expérimentaux dans un plan w =cte.

4.2.4 Projection dans un plan s =constante

La figure 4.11 présente les points expérimentaux des chemins de chargement hydrique des cinq séries projetés dans un plan s =constante. Les points se trouvent en dessous de la droite de saturation d'équation $w = \frac{e}{G_s}$. On observe le même sens d'évolution pour chacune des séries, une augmentation de l'indice des vides entraîne une augmentation de teneur en eau. Dans ce plan de représentation, on ne propose pas de modélisation. Les courbe en continu ne sont qu'un lissage des points expérimentaux.

4.2.5 Etude du domaine hygroscopique

La figure 4.12 présente les points expérimentaux obtenus dans le domaine hygroscopique exprimant l'évolution de l'indice des vides en fonction de l'humidité relative pour les différentes séries d'échantillons. Ce graphique met en évidence que le chargement hydrique a un effet négligeable sur l'indice des vides.

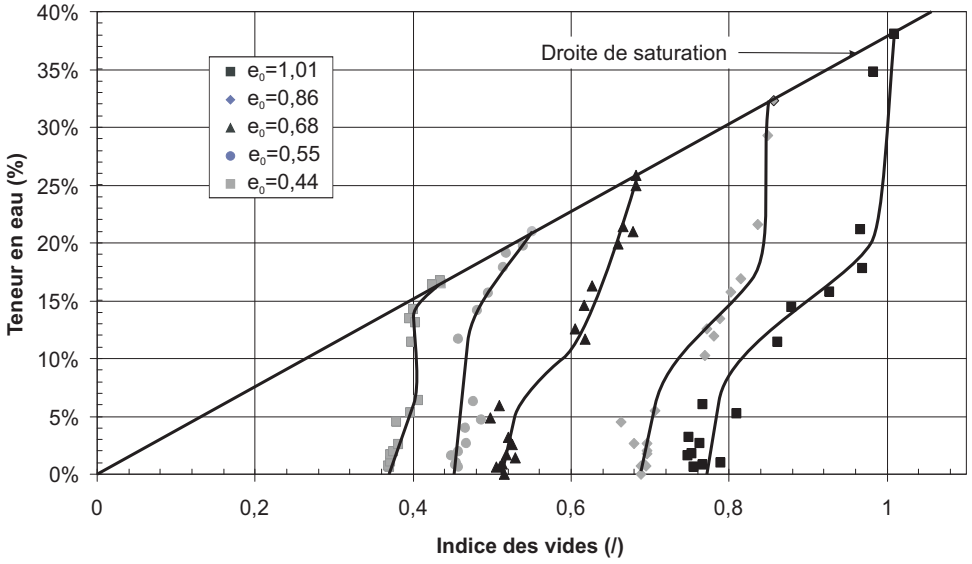

FIG. 4.11 – Points expérimentaux des chemins de chargement hydrique projetés dans un plan s =cte.

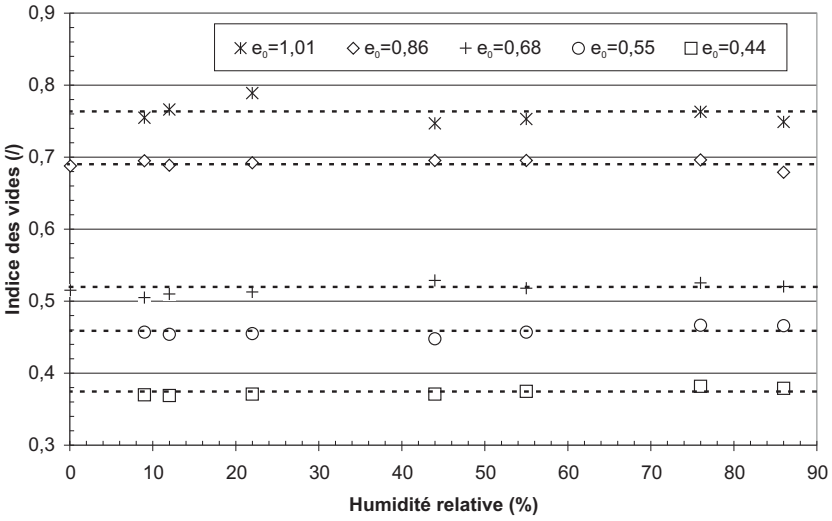

FIG. 4.12 – Evolution de l'indice des vides en fonction de l'humidité relative pour les 5 séries d'essais.

Dans les domaines funiculaire et pendulaire, la rétention d'eau est régie par la capillarité. Cette dernière exerce des forces attractives entre les grains qui tendent à les rapprocher. Ce phénomène local induit à l'échelle macroscopique des changements de volume. Ici, l'eau est sous forme adsorbée autour des grains ; les forces d'attraction capillaire n'existent plus. De plus, la désaturation du milieu augmente la compacité du milieu et de ce fait augmente la stabilité du squelette solide.

Dans le cas naturel, la phase liquide est constituée d'eau et de nombreux solutés. Lorsqu'on

sèche le milieu, la phase liquide devient saturée en soluté qui se dépose sur la surface solide. C'est le phénomène de cimentation. Dans ce cas, les ponts solides entre les grains, créés par le dépôt de soluté, vont rigidifier l'ensemble du squelette. Le phénomène d'invariance de l'indice des vides, dans le domaine hygroscopique, est alors encore plus marqué. La figure 4.13 présente l'isotherme de sorption du sable limoneux argileux dans le cas des 5 séries d'échantillons. On remarque que l'indice des vides n'a pas d'influence sur le comportement hydrique du milieu. Les forces de rétention étant de nature physico-sorptive, la quantité d'eau adsorbée ne dépend pas de la porosimétrie du milieu mais de sa surface spécifique et de sa nature. Sa nature reste ici bien sûr inchangée.

La surface spécifique S_{sp} est définie comme la surface totale de la phase solide S_{tot} (somme

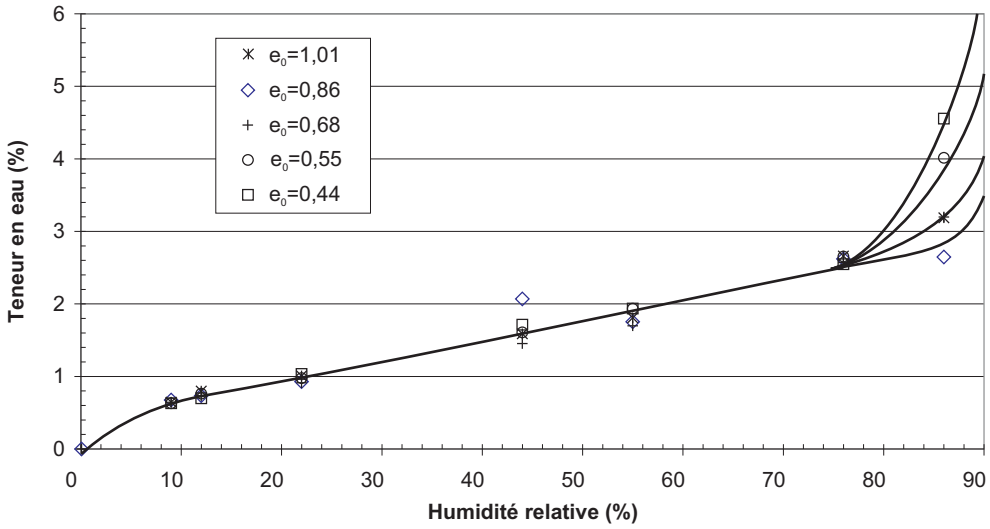

FIG. 4.13 – Isothermes de désorption du sable limoneux argileux pour les 5 indices des vides initiaux.

des surfaces de chacune des particules qui la composent) divisée par la masse sèche. Cette variable est une caractéristique intrinsèque du milieu, et est donc indépendante de l'indice des vides, sous l'hypothèse qu'on considère toute la surface des grains (même les surfaces de contact avec les autres grains) comme sites d'adsorption pour plusieurs couches de molécules d'eau. On peut écrire :

$$m_s = \frac{S_{sp}}{S_{tot}} \tag{4.13}$$

On peut définir une fonction $k(HR)$ exprimant le nombre de couches de molécules d'eau adsorbées sur la surface des grains d'un milieu en fonction de l'humidité relative. La fonction $k(HR)$ peut être définie par la donnée d'un isotherme de sorption. En faisant intervenir cette nouvelle fonction, la masse d'eau contenue dans le milieu s'écrit :

$$m_e = k(HR) \times S_{tot} \tag{4.14}$$

D'après les équations (4.14) et (4.13), on peut exprimer la teneur en eau de la façon suivante :

$$w = \frac{m_e}{m_s} = k(HR) \times S_{sp} \tag{4.15}$$

Dans le domaine hygroscopique, la teneur en eau d'équilibre n'est fonction que de $k(HR)$ et de S_{sp} qui ne sont dépendants que de la nature du milieu. L'isotherme peut donc être considéré comme invariant devant l'indice des vides.

4.2.6 Équations du chemin de chargement hydrique

On a présenté, dans les précédentes sections, les équations paramétriques des chemins de chargement hydrique du sable limoneux argileux dans l'espace $e - s - w$. Ces équations expriment la teneur en eau et l'indice des vides en fonction de la succion et de l'indice des vides initial :

$$w(s, e_0) = \left(1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{s}{s_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{s_r}\right)}\right) \times \frac{\frac{e_0}{G_s}}{\left(\ln\left(\exp(1) + \left(\frac{s}{2{,}29 e_0^{-6{,}72}}\right)^{n(e_0)}\right)\right)^{m(e_0)}} \tag{4.16}$$

Les expressions des exposants $m(e_0)$ et $n(e_0)$ sont données par les équations (4.5) et (4.6).

$$e(s, e_0) = \left(0{,}79 + \left(1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{s}{1000}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{1000}\right)}\right) \frac{0{,}21}{\left(\ln\left(\exp(1) + \left(\frac{s}{400}\right)^{0{,}466}\right)^{2{,}896}\right)}\right) \times e_0 \tag{4.17}$$

La modélisation retranscrite par l'équation (4.16) est basée sur des considérations peu restrictives :

- La pente φ ainsi que la succion d'intersection avec l'axe des abscisses s_p de la partie linéaire de la courbe de rétention ne dépendent pas de la compacité. En fait, cette droite correspond à la courbe de rétention de l'état vierge (Fleureau et al. (2002)).
- Le comportement hydrique dans le domaine hygroscopique ne dépend pas de la compacité. Ce point pourrait être mis en défaut dans le cas des sols fortement argileux car la capillarité affecte le comportement du milieu même pour des succions élevées.
- Le point d'inflexion varie en fonction puissance par rapport à l'indice des vides initial. Ce modèle d'évolution est en accord avec plusieurs résultats bibliographiques (Kawaï et al. (2000), Huang et al. (1998)).

Théoriquement, la détermination des paramètres nécessite seulement la connaissance de deux courbes de rétention mesurées pour deux indices des vides initiaux différents.
La modélisation retranscrite par l'équation (4.17) est fondée pour sa part sur une seule mais forte hypothèse : à succion constante il y a proportionnalité entre indice des vides et indice des vides initial. La généralisation de ce résultat doit passer par une campagne expérimentale importante sur d'autres types de sol. Le calcul des paramètres de l'équation (4.17) nécessite la donnée d'une seule courbe de tassement hydrique.

Dans ce mémoire, il a été choisi de quantifier les volumes d'eau par la variable teneur en eau massique mais d'autres variables peuvent être utilisées comme le degré de saturation ou la teneur en eau volumique. Les relations entre ces différentes variables sont :

$$S_r = \frac{G_s \times w}{e} \tag{4.18}$$

$$\theta = \frac{w}{G_s \times (1 + e)} \tag{4.19}$$

Ces relations permettent d'exprimer, à partir des équations (4.16) et (4.17), le degré de saturation ou la teneur en eau volumique en fonction de la succion et de l'indice des vides initial. La figure 4.14 représente un exemple de résultats obtenus pour la variable degré de saturation. On observe qu'à succion constante le degré de saturation augmente avec la diminution de

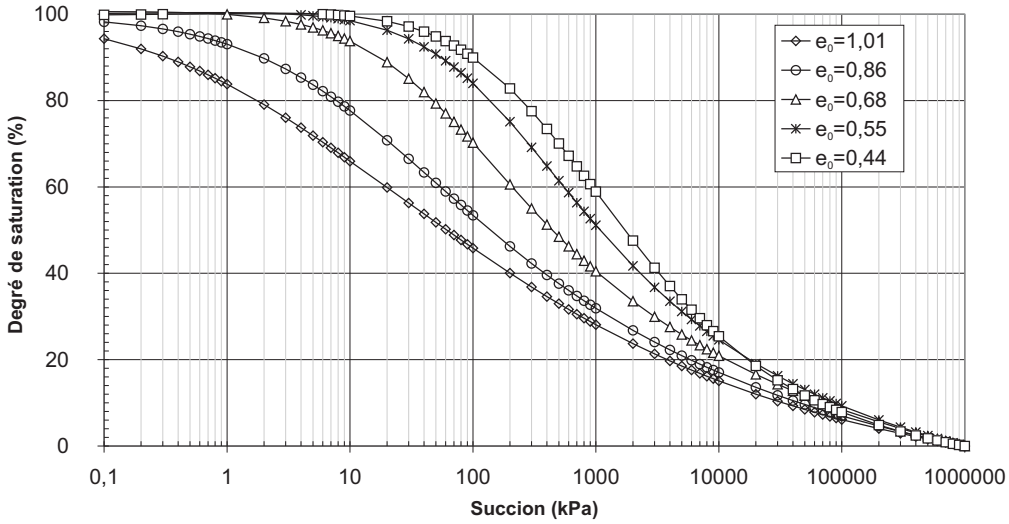

FIG. 4.14 – Modélisation de l'évolution du degré de saturation en fonction de la succion.

l'indice des vides initial. On remarque aussi, comme pour les courbes $w(s, e_0)$, que la succion d'inflexion diminue avec l'indice des vides initial mais ici les courbes ne se confondent pas hormis proche de la saturation et pour les états les plus secs.

Ce type de représentation du comportement hydrique exprimant le degré de saturation en fonction de la succion est souvent utilisé pour caractériser les milieux poreux car il prend en compte, implicitement, les variations de teneur en eau et d'indice des vides. Mais cette courbe n'étant pas unique (elle dépend de la valeur de l'indice des vides initial), le degré de saturation n'est pas suffisant pour rendre compte de toute la généralité du comportement et pour caractériser complètement l'état hydrique du milieu poreux.

4.3 Surface caractéristique du sable limoneux argileux

On a montré dans le chapitre 2 que si l'on ne considère que des variations de succion monotones, il existe, pour une température T_0, une relation entre les variables succion, teneur en eau et indice des vides. Cette relation peut s'écrire $f(s, w, e) = 0$ et sa représentation est une surface dans l'espace défini par les trois variables.

Si on trace les chemins de chargement hydrique du sable limoneux argileux pour un grand nombre d'indices des vides initiaux, les courbes obtenues vont permettre de générer cette surface. Cette surface constitue un outil pour décrire le comportement hydrique du milieu en tenant compte des couplages hydro-mécaniques. Cette surface est nommée "surface caractéristique".

On propose ici une méthode de modélisation de cette surface. A partir des équations (4.16) et (4.17), on détermine pour chaque valeur de s_j, 5 couples $(w_j^{e_0}, e_j^{e_0})$ correspondant aux 5 indices des vides initiaux des différentes séries. Ces points décrivent l'évolution de la teneur en eau en fonction de l'indice des vides, à succion constante. La figure 4.15 présente les résultats obtenus.

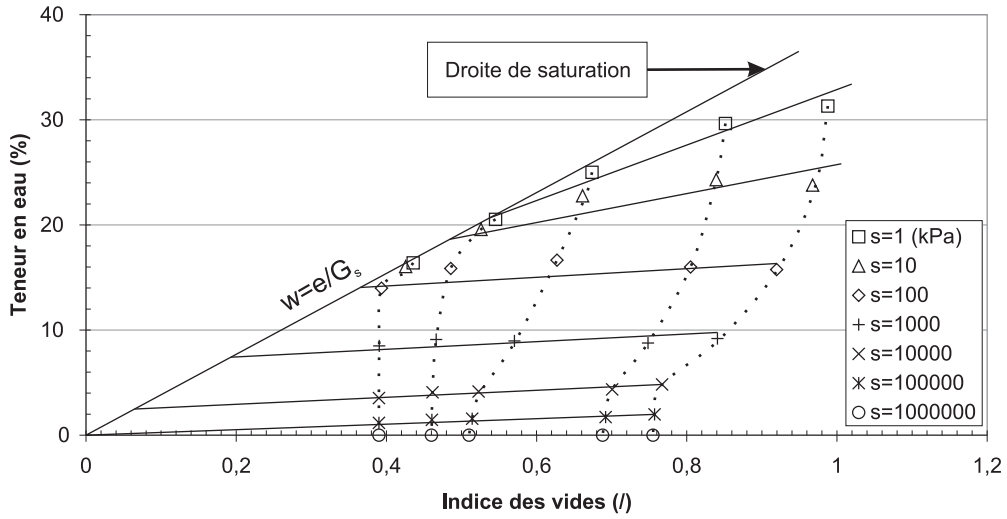

FIG. 4.15 – Évolution de la teneur en eau en fonction de l'indice des vides, à succion constante.

La droite de saturation d'équation $w_{sat} = e/G_s$ délimite la zone admissible des couples (w, e). En-dessous de cette droite, et pour chaque succion $s = 1, 10, ..., 1000000$ kPa, on peut modéliser l'évolution de la teneur en eau en fonction de l'indice des vides par des droites. On peut écrire la relation entre la teneur en eau et l'indice des vides sous la forme :

$$w = a \times e + b \tag{4.20}$$

où a, le coefficient directeur de la droite et b, son ordonnée à l'origine, sont des fonctions de la succion.
Si on se place au point d'intersection entre la droite de saturation et la droite définie par l'équation (4.20) de coordonnées w_{int} et e_{int}, on peut écrire :

$$w_{int} = a \times e_{int} + b \tag{4.21}$$

De plus :

$$w_{int} = \frac{e_{int}}{G_s} \tag{4.22}$$

Il vient :

$$w_{int} = a \times w_{int} \times G_s + b \tag{4.23}$$

D'où :

$$b = w_{int} \times (1 - a \times G_s) \tag{4.24}$$

On peut finalement réécrire l'équation (4.20) comme suit :

$$w = a \times e + w_{int}(1 - G_s \times a) \tag{4.25}$$

Afin de définir complètement l'expression de la teneur en eau, il faut tenir compte du fait qu'au dessus de la droite de saturation, les couples (w, e) ne sont plus admissibles. L'expression de la teneur en eau est finalement définie par le système :

$$w = \begin{cases} a \times e + w_{int}\,(1 - G_s \times a) & \text{si} \quad a \times e + w_{int}\,(1 - G_s \times a) \leq \frac{e}{G_s} \\ w_{sat} = \frac{e}{G_s} & \text{si} \quad a \times e + w_{int}\,(1 - G_s \times a) \geq \frac{e}{G_s} \end{cases} \tag{4.26}$$

La figure 4.15 met en évidence que le coefficient directeur a ainsi que la teneur en eau d'intersection w_{int} diminuent avec la succion. Le tableau 4.5 donne les valeurs de ces paramètres pour les neuf succions utilisées. Afin de tracer ces valeurs en coordonnées logarithmiques, on a considéré que la droite de saturation correspondait à une succion de 0,01 kPa (succion faible mais non nulle).

Succion s (kPa)	a (/)	w_{int}(%)
0,01 (saturation)	0,3774	-
0,1	0,377	19.8
1	0,274	19,8
10	0,141	18,6
100	0,024	15,1
1000	0,008	8,6
10000	0,027	2,8
100000	0,019	0,6
1000000	0,000	0

TAB. 4.5 – Valeurs des paramètres a et w_{int} pour différentes succions.

Les figures 4.16 et 4.17 donnent l'évolution des paramètres a et w_{int} en fonction de la succion.

Pour des états proches de la saturation, $a(s)$, le coefficient directeur des droites $w(e)$ est égal au coefficient directeur de la droite de saturation $1/G_s \approx 1/2,65 \approx 0,377$. Lorsque l'on considère des valeurs de succion plus importantes, cette pente diminue rapidement. A partir de 1000 kPa, on observe de légères variations non monotones qui ne seront pas prises en compte par le modèle.

Pour les faibles succions, la teneur en eau d'intersection w_{int} reste constante et égale à $0,198$. Cela se traduit graphiquement sur la figure 4.15 par des droites qui concourent toutes en un même point. A partir d'une succion d'environ 10 kPa, $w_{int}(s)$ diminue.

Les courbes obtenues pour les deux paramètres, en fonction de la succion, ont l'allure d'une courbe de rétention : pour les faibles succions, l'évolution est lente ; elle est rapide pour les succions moyennes et elle redevient lente, voire quasiment inexistante dans le cas de $a(s)$, pour les fortes succions. Pour la modélisation de ces résultats, on utilise donc l'équation (3.14). Le tableau 4.6 donne les valeurs des paramètres des deux fonctions. On note que le paramètre φ, qui représente la pente de la partie linéaire des fortes variations de teneur en eau est identique pour les deux fonctions.

A partir des valeurs données par le tableau 4.6, on définit les expressions mathématiques des paramètres $a(s)$ et $w_{int}(s)$ sous la forme :

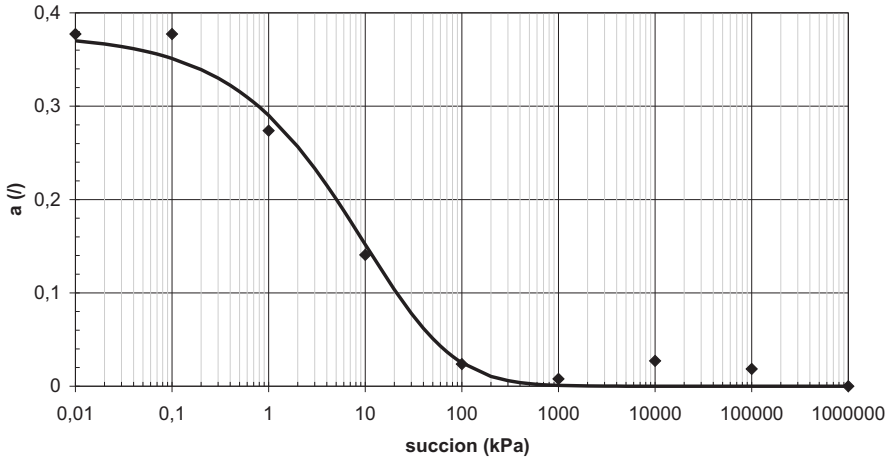

FIG. 4.16 – Évolution du coefficient directeur $a(s)$ en fonction de la succion.

Paramètre	$a(s)$	$w_{int}(s)$
Equivalent w_{sat}	$1/G_s \approx 0,3774$	$0,198$
φ	$-0,035$	$-0,035$
s_p	200	10000
s_r	1000	2000
s_i	80	180
n	$0,57$	$0,92$
m	9	$1,25$

TAB. 4.6 – Paramètres des fonctions de modélisation de $a(s)$ et $w_{int}(s)$.

$$a(s) = \left(1 - \frac{\ln\left(1+\frac{s}{1000}\right)}{\ln\left(1+\frac{10^6}{1000}\right)}\right) \times \frac{0,3774}{\left(\ln\left(\exp(1) + \left(\frac{s}{80}\right)^{0,57}\right)\right)^9} \tag{4.27}$$

$$w_{int}(s) = \left(1 - \frac{\ln\left(1+\frac{s}{2000}\right)}{\ln\left(1+\frac{10^6}{2000}\right)}\right) \times \frac{0,198}{\left(\ln\left(\exp(1) + \left(\frac{s}{180}\right)^{0,92}\right)\right)^{1,25}} \tag{4.28}$$

A partir des équations (4.27) et (4.28), on peut donner l'expression explicite de l'équation (4.25), donnant la teneur en eau en fonction de la succion et de l'indice des vides à la

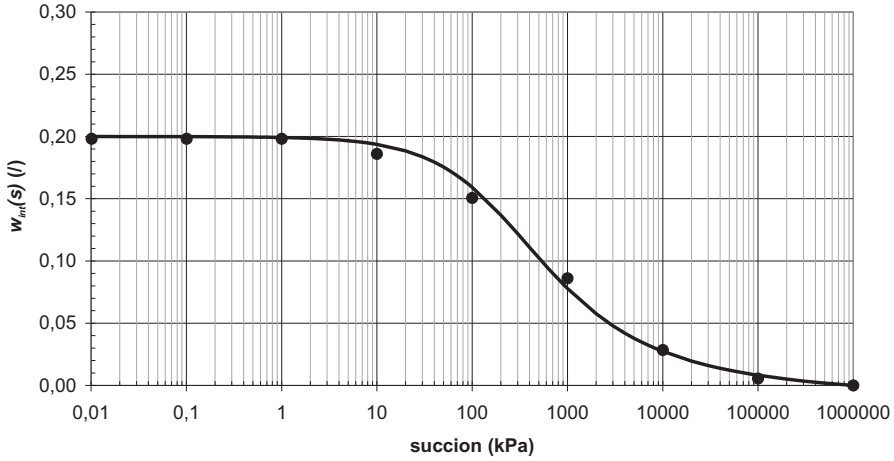

FIG. 4.17 – Évolution de la teneur en eau d'intersection $w_{int}(s)$ en fonction de la succion.

température ambiante T_{amb} lorsqu'on se trouve en dessous de la droite de saturation :

$$w(e,s) = \left(1 - \frac{\ln\left(1+\frac{s}{1000}\right)}{\ln\left(1+\frac{10^6}{1000}\right)}\right) \times \frac{0,3774}{\left(\ln\left(\exp(1)+\left(\frac{s}{80}\right)^{0,57}\right)\right)^9} \times e + \left(1 - \frac{\ln\left(1+\frac{s}{2000}\right)}{\ln\left(1+\frac{10^6}{2000}\right)}\right) \times \frac{0,198}{\left(\ln\left(\exp(1)+\left(\frac{s}{180}\right)^{0,92}\right)\right)^{1,25}} \times \left(1 + G_s \times \left(1 - \frac{\ln\left(1+\frac{s}{1000}\right)}{\ln\left(1+\frac{10^6}{1000}\right)}\right) \times \frac{0,3774}{\left(\ln\left(\exp(1)+\left(\frac{s}{80}\right)^{0,57}\right)\right)^9}\right) \quad (4.29)$$

En intégrant cette expression explicite (équation (4.29)) dans le système défini par l'équation (4.26), on obtient l'équation de la surface caractéristique du sable limoneux argileux. La figure 4.18 représente cette surface.

La surface caractéristique du sable limoneux argileux peut être décomposée en trois zones :
- Une zone de saturation. La succion est non nulle mais la porosimétrie du matériau étant fine, le chargement hydrique imposé ne permet pas de désaturer le milieu. Plus l'indice des vides est faible plus la succion d'entrée d'air est élevée.
- Une zone de dépendance vis-à-vis de l'indice des vides. Elle correspond à des succions inférieures à 100 kPa et des indices des vides supérieurs à 0,4.
- Une zone d'indépendance vis-à-vis de l'indice des vides. Elle correspond aux succions supérieures à 100 kPa.

Le système (4.26) et l'équation (4.29) permettent de définir la fonction f décrivant la surface à laquelle appartiennent tous les triplets (s, w, e) qui caractérisent les états du milieu. L'équation de cette surface peut facilement être déduite de l'équation (4.29) exprimée sous la forme $f(s, w, e) = 0$. On retrouve ici la fonction f évoquée dans le chapitre 2.
L'équation (2.41) que l'on rappelle ici peut être écrite à partir de cette fonction à la tempéra-

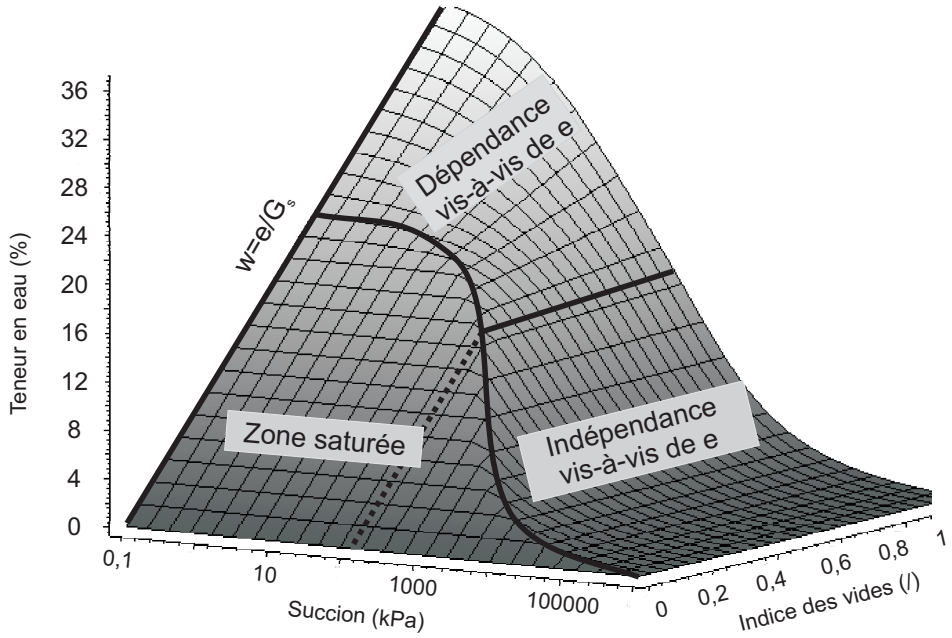

FIG. 4.18 – Surface caractéristique du sable limoneux argileux.

ture T_{amb}.

$$ds = F_w \times dw + F_e \times de \tag{4.30}$$

A partir de l'équation de la surface caractéristique, on peut découpler les variations des trois variables w, e et s.

A indice des vides constant, la relation (4.30) devient :

$$ds = F_w \times dw \quad \text{avec} \quad F_w = \left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_{e,T} \tag{4.31}$$

La fonction F_w est l'inverse de la pente de la courbe caractéristique d'indice des vides e ($w = w(s, e = \text{cte})$).

La figure 4.19 représente les courbes caractéristiques du sable limoneux argileux, pour plusieurs indices des vides constants et à la température ambiante, déterminées à partir de la fonction f.

Pour les indices des vides élevés, la désaturation du milieu se produit dès les faibles valeurs de succion et plus l'indice des vides diminue plus la succion d'entrée d'air augmente. Notamment pour la courbe à $e = 0,4$, le système (4.26) induit un passage brusque de l'état saturé à la désaturation se traduisant graphiquement par un changement net de pente que l'on ne retrouverait probablement pas dans un cas réel.

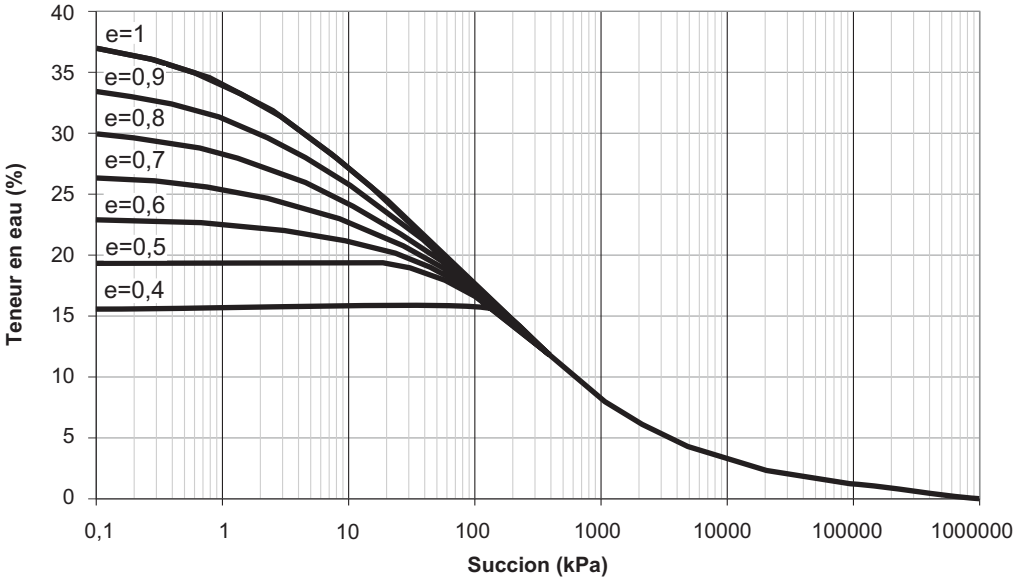

FIG. 4.19 – Évolution de la teneur en eau en fonction de la succion pour différents indices des vides constants.

La fonction f permet également d'expliciter la fonction F_w sous la forme :

$$F_w(w,s,e) = \frac{1}{\frac{\partial a(s)}{\partial s} \times (e - w_{int}(s) \times G_s) + \frac{\partial w_{int}(s)}{\partial s} \times (1 - a(s) \times G_s)} \tag{4.32}$$

La figure 4.20 donne l'évolution de F_w en fonction de la succion pour plusieurs indices des vides à la température T_{amb}.
F_w est une fonction négative sur toute la gamme de succions. Elle vaut 0 pour une succion nulle, mais cela ne peut être représenté en coordonnées logarithmiques. Plus l'indice des vides est faible, plus la fonction décroît rapidement.

A teneur en eau constante, la relation (4.30) devient :

$$ds = F_e \times de \quad \text{avec} \quad F_e = \left(\frac{\partial s}{\partial e}\right)_{w,T} \tag{4.33}$$

La fonction F_e est l'inverse de la pente de la fonction $e = e(s, w = \text{cte})$. La figure 4.21 représente les courbes $e = e(s, w = \text{cte})$ pour plusieurs teneurs en eau tirées de la fonction f. Le comportement général décrit par ce graphe est que, pour une teneur en eau constante, une augmentation de succion provoque une augmentation de l'indice des vides, ce qui confirme les conclusions avancées dans le chapitre 2. On peut noter que c'est le comportement inverse que l'on observe dans le cas d'essais drainés ($w \neq$ constante). Comme pour le graphe de la figure 4.19, certains tracés présentent des changements brusques de pente qui sont dus au système (4.26). Les tracés correspondant à des teneurs en eau de 5 et 10% montrent la capacité du modèle à représenter des états extrêmes, mais qui n'ont pas réellement de sens physique.

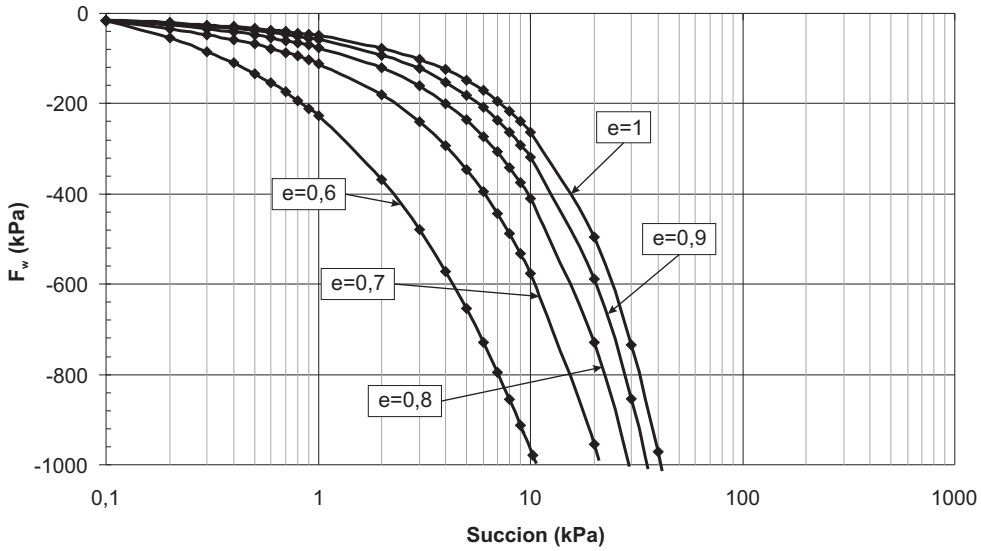

FIG. 4.20 – Évolution de F_w en fonction de la succion pour plusieurs indices des vides.

La fonction f permet également d'expliciter la fonction F_e sous la forme :

$$F_e(w,s,e) = \frac{-a(s)}{\frac{\partial a(s)}{\partial s} \times \left(\frac{w}{a(s)} - \frac{w_{int}(s)}{a(s)}\right) + \frac{\partial w_{int}(s)}{\partial s}\left(1 - a(s) \times G_s\right)} \tag{4.34}$$

La figure 4.22 donne l'évolution de F_e en fonction de la succion pour plusieurs teneurs en eau à la température T_{amb}.
F_e est une fonction non monotone. Comme on l'a vu pour la figure 4.21, seuls les tracés correspondant à des valeurs de teneurs en eau assez élevées ont un sens physique, c'est pourquoi on s'est limité à des valeurs supérieures à 16%.

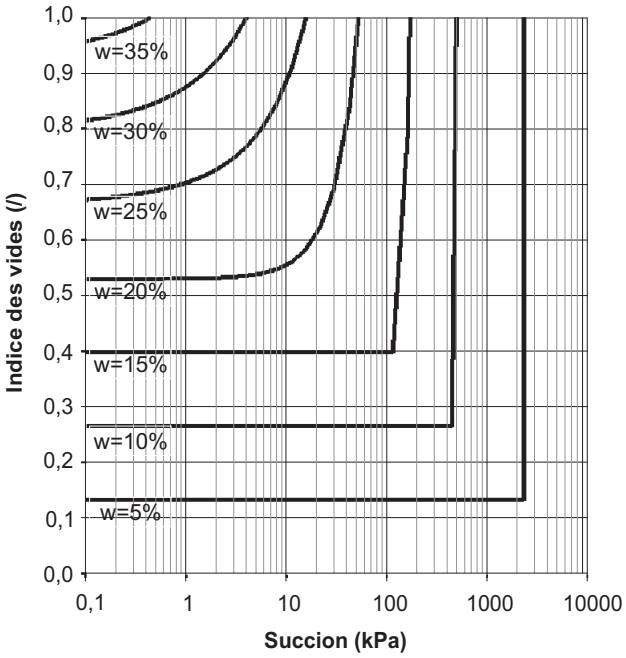

FIG. 4.21 – Évolution de l'indice des vides en fonction de la succion pour différentes teneurs en eau.

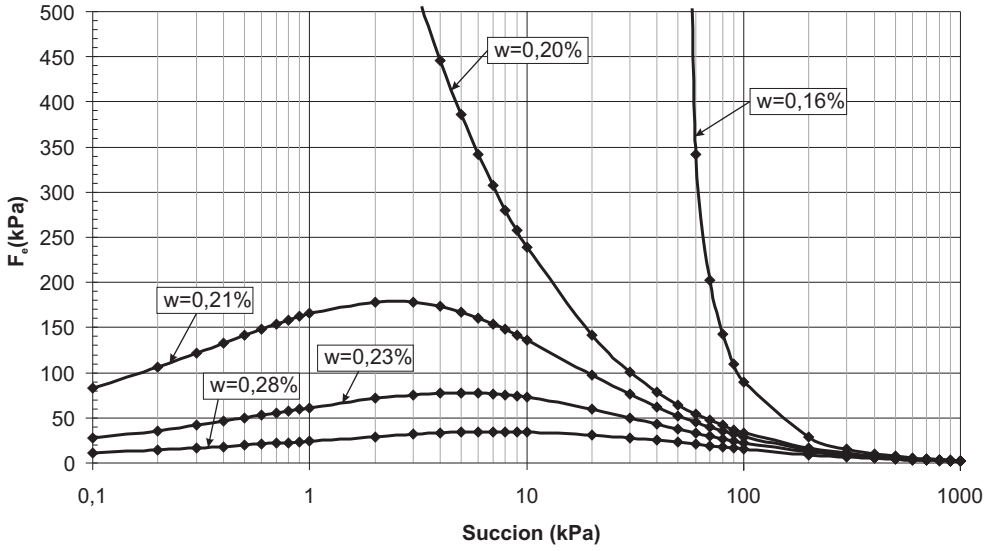

FIG. 4.22 – Évolution de F_e en fonction de la succion pour plusieurs indices des vides.

A succion constante, la relation (4.30) devient :

$$F_w \times dw + F_e \times de = 0 \tag{4.35}$$

Elle peut s'écrire :

$$\frac{dw}{de} = -\frac{F_e}{F_w} \tag{4.36}$$

D'après la relation (4.20), la dérivée de la teneur en eau par rapport à l'indice des vides est égale à $a(s)$. Ce résultat est retrouvé si on développe le rapport $-F_e/F_w$, avec les équations (4.32) et (4.34).

Conclusion

Ce chapitre a permis de montrer expérimentalement la pertinence du concept de surface caractéristique. On a présenté une méthode d'approche de son expression analytique qui a été illustrée dans le cas du sable limoneux argileux. Cette méthode nécessite la détermination expérimentale des chemins de chargement hydrique correspondant à différents états de compaction initiaux (cinq en ce qui concerne l'application au sable limoneux argileux). A partir de ces données, on a pu établir les équations paramétriques des chemins de chargement hydrique. En confrontant les résultats de cette étude à ceux de la littérature, on a montré qu'une partie des conclusions faites ici était généralisable à d'autres sols.

Chapitre 5

Effet de la température

Dans de nombreuses problématiques liées au génie environnemental, il est nécessaire de prendre en compte l'effet de la température sur le comportement hydrique des milieux poreux. Parmi ces problématiques, on peut citer le stockage de chaleur (Bénet et al. (1985), Saix (1987)), les géostructures énergétiques (Laloui et al. (2003)) ou encore le stockage de déchets radioactifs (Romero et al. (2001), Olchitsky (2002), Tang (2005)). Dans chacun de ces cas, le milieu est soumis à un chargement thermo-hydrique dont il convient de maîtriser les effets en vue d'une bonne prédiction de l'évolution du site sur le plan thermo-hydro-mécanique (Salager et al. (2006)).

Un des premiers résultats concernant l'étude de la capacité de rétention d'eau des sols à différentes températures est celui de Gardner (Gardner (1954)) qui a montré, à travers une série d'expériences réalisées sur différents types de sols grenus, qu'à degré de saturation constant, la succion diminue en fonction de la température. Philip et de Vries (1957)) sont les premiers à proposer un modèle prédictif de ce phénomène en prenant en compte les variations de la tension superficielle. Depuis, plusieurs travaux scientifiques se sont consacrés à l'identification des autres phénomènes physiques susceptibles d'expliquer l'effet de la température sur la courbe de rétention d'eau : augmentation de la teneur en solutés dans les milieux organiques (Nimmo et Miller (1986)), et dernièrement l'effet de l'angle de mouillage (She et Sleep (1998), Bachmann et al. (2002)).

Parallèlement, quelques études motivées par des problématiques liées à l'industrie agro-alimentaire ont été développées pour examiner l'influence de la température sur l'activité de l'eau pour certains produits alimentaires frais (Iglesias et Bueno (1999), Moreira et al. (2002), Kumar et Mishra (2006)). En effet, la vitesse de détérioration des aliments étant étroitement liée à l'activité de l'eau, la connaissance des isothermes de sorption, quelle que soit la température de stockage, est une indication essentielle qui permet en partie de prévoir la stabilité de l'aliment, tant au niveau enzymatique que physico-chimique.

L'objectif de ce chapitre est l'étude de l'influence de la température sur le comportement hydrique des sols, en allant de la saturation aux états les plus secs. A succion constante, l'écart de teneur en eau observé pour deux températures différentes est dû en grande partie à l'effet de la température sur les forces de rétention. Ces forces ne sont pas de même nature suivant que la phase liquide est sous forme adsorbée ou capillaire. Il est donc intéressant de faire une analyse du phénomène à deux niveaux. Dans le premier niveau, on abordera le problème dans les domaines pendulaire et funiculaire où la rétention d'eau est régie par la loi de Young-Laplace et dans le second niveau, on s'intéressera au domaine hygroscopique.

A partir des mesures expérimentales obtenues à des températures données, deux modélisations adaptées aux domaines hydriques considérés permettent de prédire la surface caractéristique ou la courbe de rétention et l'isotherme de sorption pour d'autres températures. On réduit ainsi considérablement le nombre d'essais expérimentaux nécessaires pour obtenir la caractérisation hydrique d'un sol à plusieurs températures. La pertinence des modélisations est validée expérimentalement dans les cas des courbes de rétention de la céramique en terre cuite et du sable limoneux argileux. Dans les domaines funiculaire et pendulaire, l'application du modèle à d'autres résultats de la littérature (Romero et al. (2001), Imbert et al. (2005)) montre sa capacité à couvrir une large gamme de matériaux.

5.1 Effet de la température sur le comportement hydrique dans les domaines funiculaire et pendulaire

5.1.1 Modèle de comportement thermo-hydrique

L'influence de la température sur le comportement hydrique d'un milieu poreux est due, en particulier, à la dilatation thermique des phases solide et liquide ainsi qu'aux variations de la tension superficielle du liquide et de l'angle de mouillage (Bachmann et van der Ploeg (2002)). Le modèle thermo-hydro-mécanique général présenté dans le chapitre 2 prend en compte tous ces phénomènes physiques. On en rappelle ici l'écriture :

$$ds = F_w \times dw + F_T \times dT + F_e \times de \tag{5.1}$$

où $F_w = \left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_{T,e}$, $F_T = \left(F_w \times w \times (\beta_e - \beta_s) + \frac{s}{\sigma_s} \times \frac{d\sigma_s}{dT} - s \times \tan\phi \times \frac{d\phi}{dT}\right)$ et $F_e = \left(\frac{\partial s}{\partial e}\right)_{w,T}$

Du fait de la complexité de la composition minéralogique des sols, la variation en fonction de la température de la masse volumique spécifique de la phase solide est difficile à déterminer. Par contre, il est établi que cette variation est généralement bien plus faible que celle de la phase liquide et peut donc être négligée.

Par ailleurs, il existe peu de résultats bibliographiques concernant l'angle de mouillage et sa dépendance à la température (voir chapitre 2). Néanmoins, Bachmann et al. (2000) ont montré dans le cas de différents sols sableux que l'angle de mouillage était inférieur à 5°. Dans les sciences du sol, il est d'ailleurs classique de considérer cet angle comme nul du fait de la forte mouillabilité de la phase solide à l'eau. Ces mêmes auteurs ont mesuré à l'aide d'un goniomètre la variation de l'angle de mouillage en fonction de la température et les valeurs trouvées sont faibles.

En raison du manque de données concernant ce phénomène, on considère, dans la modélisation, comme nul le produit de deux quantités qu'on sait très faibles, à savoir la tangente et la dérivée en fonction de la température de l'angle de mouillage.

Toutes ces considérations conduisent à une expression simplifiée de la fonction F_T sous la forme :

$$F_T = \left(F_w \times w \times \beta_e + \frac{s}{\sigma_s} \times \frac{d\sigma_s}{dT}\right) \tag{5.2}$$

On a vu dans le chapitre 2 que l'équation (2.39) permet de calculer l'effet de la température sur la surface caractéristique ou sur les courbes de rétention. On rappelle ici cette relation :

$$dw = -\frac{F_T}{F_w} dT$$

En explicitant la fonction F_T, cette relation devient :

$$dw = -\left(w \times \beta_e + \frac{s}{F_w \times \sigma_s} \times \frac{d\sigma_s}{dT} \right) dT \tag{5.3}$$

L'équation (5.3) relie les variations de teneur en eau aux variations de température à une succion donnée. Cette équation est utilisée pour calculer l'influence de la température sur la surface caractéristique et sur la courbe de rétention pour les matériaux de notre étude. Ce modèle nécessite la connaissance d'une seule fonction, F_w.

Dans le cas général, F_w dépend de la succion, de la température et de l'indice des vides. Mais expérimentalement, on note que les courbes de rétention obtenues à différentes températures (que ces courbes soient déterminées à indice des vides constant ou pas) sont quasiment parallèles, leurs pentes sont donc quasiment identiques. Ce constat consolide l'hypothèse que la fonction F_w est indépendante de la température.

L'effet de la température sur la teneur en eau peut être décomposé en deux sous-effets : celui dû à la dilatation de la phase liquide et celui dû à un second terme qui prend en compte la variation de tension superficielle. Cette décomposition est mise en évidence en réécrivant l'équation (5.3) comme suit :

$$dw = -w \times \beta_e \times dT - \frac{s}{F_w \times \sigma_s} \times \frac{d\sigma_s}{dT} \times dT \tag{5.4}$$

Le coefficient de dilatation de l'eau et la tension superficielle ont fait l'objet d'études spécifiques. Plusieurs expressions de leurs variations en fonction de la température sont proposées dans la littérature. Dans ce mémoire, compte tenu de la gamme de températures étudiées (de 20 à 80 °C) et de la précision recherchée, les fonctions suivantes sont choisies pour estimer ces deux caractéristiques à différentes températures :

$$\beta_e(T) = -4,20 \times 10^{-8} \times T^2 + 1,17 \times 10^{-5} \times T - 1,87 \times 10^{-5} \tag{5.5}$$

$$\sigma_s(T) = -2,73 \times 10^{-7} \times T^2 - 1,40 \times 10^{-4} \times T + 7,56 \times 10^{-2} \tag{5.6}$$

Dans les deux expressions, l'unité de la température est le °C.
A partir de l'équation (5.6), on détermine l'expression de la dérivée par rapport à la température de la tension superficielle :

$$\frac{d\sigma_s(T)}{dT} = -5,46 \times 10^{-7} \times T - 1,40 \times 10^{-4} \tag{5.7}$$

Pour établir le schéma de calcul du modèle thermo-hydrique traduit par l'équation (5.4), trois cas sont envisagés :

– Cas de la courbe de rétention d'un milieu indéformable.
– Cas de la surface caractéristique d'un milieu déformable.
– Cas de la courbe de rétention d'un milieu déformable.

Pour chacun des cas, le calcul se fait de façon incrémentale à l'aide de l'équation (5.4). Il est détaillé dans ce qui suit.

– Cas de la courbe de rétention d'un milieu indéformable :
Le fait que le milieu soit indéformable implique que l'indice des vides est constant au cours de la désaturation. Dans ce cas, le principe du calcul est le suivant :

* On suppose connue la courbe de rétention du milieu à une température T_{ref} et on cherche à déterminer cette même courbe à une autre température T_f. Pour la discrétisation, la variation totale de température $\Delta T = T_f - T_{ref}$ est divisée en $N-1$ intervalles. L'indice j est affecté à la température (T_j) et on a $T_1 = T_{ref}$ et $T_N = T_f$

* La succion est indicée par k et on prend un pas de 1/20 de décade pour réaliser le calcul. Sur la courbe de rétention prise comme référence (correspondant à une température T_{ref}), à chaque valeur de succion s_k correspond une pente $F_w(s_k, T_{ref})$. Comme la fonction F_w est supposée indépendante de la température $F_w(s_k, T_{ref}) = F_w(s_k)$.

* Pour chaque valeur de succion s_k, le schéma de calcul de l'équation (5.4) s'écrit :

$$w(s_k, T_{j+1}) - w(s_k, T_j) = -\left[w(s_k, T_j) \times \beta_e(T_j)\right] \times \left[T_{j+1} - T_j\right] - \left[\frac{s_k}{F_w(s_k) \times \sigma_s(T_j)} \times \frac{d\sigma_s(T_j)}{dT}\right] \times \left[T_{j+1} - T_j\right] \quad (5.8)$$

Connaissant $w(s_k, T_j)$, cette équation permet de calculer $w(s_k, T_{j+1})$. En faisant ce calcul pour un grand nombre de succions, on détermine, à partir de la courbe de rétention à la température T_j, la courbe de rétention à la température T_{j+1}. En établissant le calcul de $j = 1$ à $j = N$, on obtient, à partir de la courbe de rétention de référence, la courbe de rétention à la température souhaitée.

– Cas de la surface caractéristique d'un milieu déformable :
Pour la surface caractéristique, la teneur en eau dépend de la succion et de l'indice des vides. Le principe du calcul comprend les étapes suivantes :

* On garde la même méthode de discrétisation que dans le cas précédent mais en plus, l'indice des vides est indicée par h et on prend un pas de 0,01 pour l'indice des vides.

* On suppose connue la surface caractéristique à une température T_{ref} et on cherche à déterminer cette même surface à une autre température T_f.

* Sur la surface caractéristique prise comme référence, à chaque couple (s_k, e_h) correspond une fonction $F_w(s_k, e_h, T_{ref})$. Cette fonction est supposée indépendante de la température donc $F_w(s_k, e_h, T_{ref}) = F_w(s_k, e_h)$.

* Le calcul de la variation de teneur en eau induite par la variation de température se fait en se plaçant à succion et indice des vides constants. Le schéma de calcul de

l'équation (5.4) s'écrit :

$$w(s_k, e_h, T_{j+1}) - w(s_k, e_h, T_j) = -\left[w(s_k, e_h, T_j) \times \beta_e(T_j)\right] \times \left[T_{j+1} - T_j\right] - \left[\frac{s_k}{F_w(s_k, e_h) \times \sigma_s(T_j)} \times \frac{d\sigma_s(T_j)}{dT}\right] \times \left[T_{j+1} - T_j\right] \quad (5.9)$$

Connaissant $w(s_k, e_h, T_j)$, cette équation permet de calculer $w(s_k, e_h, T_{j+1})$. En faisant ce calcul pour tous les s_k et les e_h on détermine à partir de la surface caractéristique à la température T_j, la surface caractéristique à la température T_{j+1}. En établissant le calcul de $j = 1$ à $j = N$, on obtient, à partir de la surface caractéristique de référence, la surface caractéristique à la température souhaitée.

– Cas de la courbe de rétention d'un milieu déformable :
Si l'on considère la courbe de rétention d'un milieu déformable à un indice des vides initial défini, la teneur en eau et l'indice des vides sont des variables liées à la succion. A une succion s_k correspond une teneur en eau $w_k = g(s_k, e_0)$ et un indice des vides $e_k = h(s_k, e_0)$. Les fonctions g et h ont été déterminées dans le cas du sable limoneux argileux dans la sous section 4.2.6.
En toute rigueur, la fonction h dépend à la fois de la succion et de la température. Dans notre cas, une augmentation de température n'induit pas de réarrangement granulaire significatif et la variation de l'indice des vides qui en résulte est seulement l'expression de la dilatation de la phase solide. L'effet de la température sur l'indice des vides est donc très faible et il sera négligé devant celui de la succion. La fonction h est considérée dans la suite comme indépendante de la température.
Déterminer l'effet de la température sur la courbe de rétention revient à déterminer l'effet de la température sur la fonction g.
Le schéma de calcul de l'équation (5.4) peut s'écrire :

* On garde toujours la même méthode de discrétisation.
* On suppose connues les fonctions g et h ainsi que la surface caractéristique correspondant à une température T_{ref} et on cherche à déterminer la fonction g à une autre température T_f.
* Sur la courbe de rétention prise comme référence, à chaque succion s_k correspond une fonction $F_w(s_k, e_k, T_{ref})$. Cette fonction est supposée indépendante de la température et e_k est lié à s_k, donc $F_w(s_k, e_k, T_{ref}) = F_w(s_k, h(s_k))$. F_w doit être calculée à partir de la surface de rétention.
* Le calcul de la variation de teneur en eau induite par la variation de température se fait en se plaçant à succion constante. Le schéma de calcul de l'équation (5.4) s'écrit :

$$w(s_k, T_{j+1}) - w(s_k, T_j) = -\left[w(s_k, T_j) \times \beta_e(T_j)\right] \times \left[T_{j+1} - T_j\right] - \left[\frac{s_k}{F_w(s_k, h(s_k)) \times \sigma_s(T_j)} \times \frac{d\sigma_s(T_j)}{dT}\right] \times \left[T_{j+1} - T_j\right] \quad (5.10)$$

Connaissant $w(s_k, T_j)$, l'équation précédente permet de calculer $w(s_k, T_{j+1})$. De même que précédemment, en faisant varier les indices k et j on détermine, à partir des fonctions g et h ainsi que de la surface caractéristique connues à la température T_{ref}, la fonction g qui représente la courbe de rétention à la température souhaitée.

5.1.2 Application du modèle aux différents matériaux de notre étude

Cas de la céramique en terre cuite

La céramique en terre cuite utilisée dans cette étude est un matériau que l'on peut considérer comme indéformable au cours d'un chargement hydrique ($e = \text{cte} = 0,46$). On utilise donc le schéma de calcul décrit par l'équation (5.8). Le paramètre du modèle thermo-hydrique, la fonction F_w, qui apparaît dans l'équation (5.3), est l'inverse de la pente de la courbe de rétention obtenue à la température de référence.

On a déterminé expérimentalement les courbes de rétention de la céramique aux températures de 20 et 60°C au moyen de la plaque de pression. La courbe de rétention obtenue à 20°C est prise comme référence. La fonction F_w, est donc calculée à partir de cette courbe. En intégrant F_w dans le schéma de calcul incrémental décrit par l'équation (5.8), on détermine la courbe de rétention à 60°C.

La figure 5.1 montre les courbes de rétention obtenues pour la céramique en terre cuite. Les courbes grises représentent les ajustements mathématiques des courbes de rétention mesurées expérimentalement. La charte graphique est : trait plein pour les résultats à 20°C et traits discontinus pour les résultats à 60°C. Le trait continu noir représente la courbe de rétention à 60°C calculée à partir du modèle. Malgré un petit écart au niveau du changement de pente de la courbe, on observe une bonne adéquation entre résultats expérimentaux et théoriques. On peut considérer que ces résultats valident notre modélisation dans le cas d'un milieu non déformable.

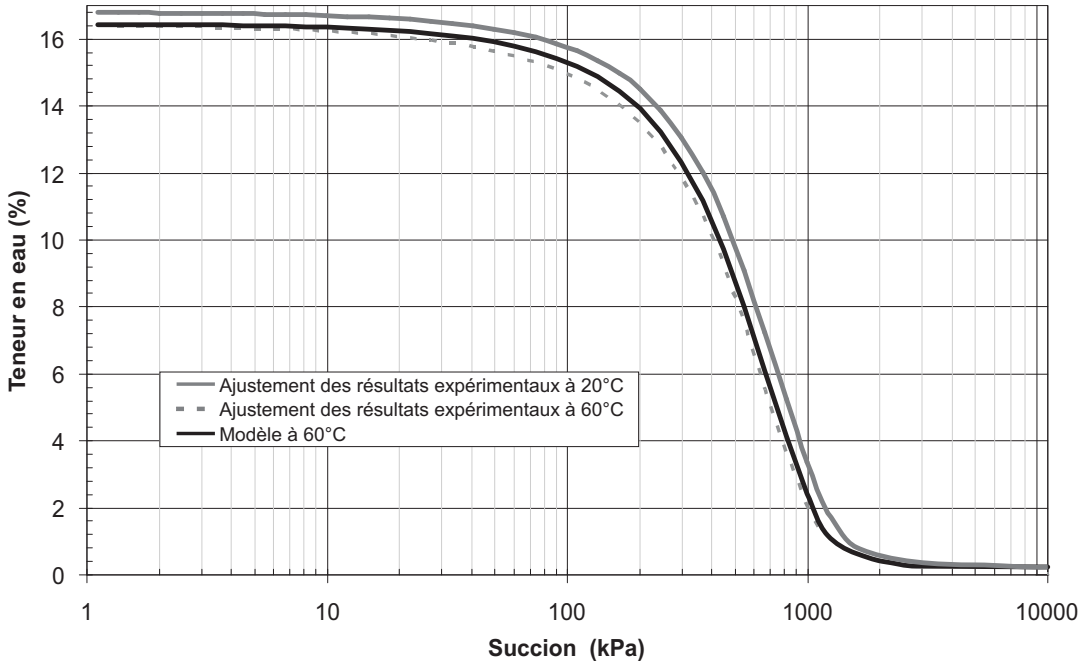

FIG. 5.1 – Effet de la température sur la courbe de rétention de la céramique.

La figure 5.2 compare l'influence des deux termes du modèle définis par l'équation (5.4), pour une augmentation de température de 40°C.

L'effet du premier terme de l'équation (5.4), qui tient compte de la dilatation thermique de la phase liquide, est proportionnel à la teneur en eau. Sa valeur est donc importante pour les états proches de la saturation et diminue fortement pour les succions comprises entre 100 et 1000 kPa.

L'effet du second terme de l'équation (5.4), qui tient compte de la diminution de la tension superficielle, est fonction du rapport s/F_w. Ce rapport est faible pour les faibles succions et maximal lorsque la pente de la courbe de rétention est forte ; l'effet de la tension superficielle suit donc la même tendance.

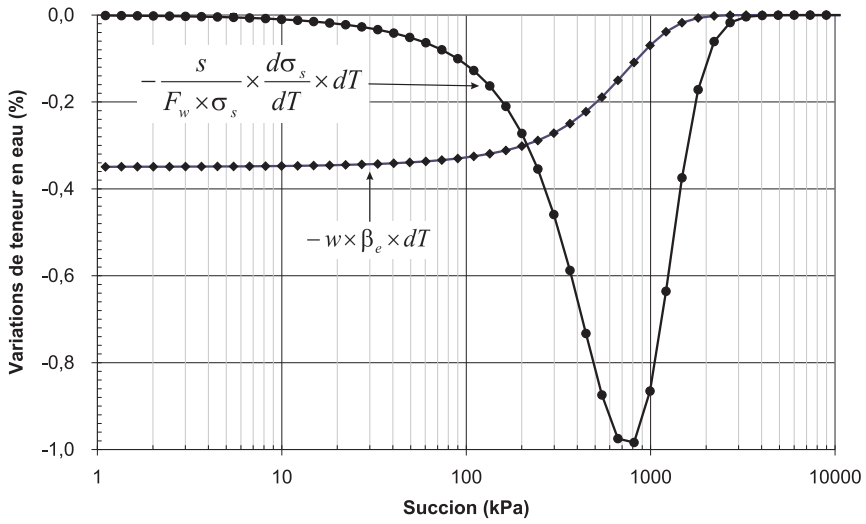

FIG. 5.2 – Contribution des deux termes du modèle pour une variation totale de température de 40°C.

Cas du sable limoneux argileux

Pour le sable limoneux argileux, on a étudié l'effet de la température sur la surface caractéristique et sur une courbe de rétention. Cette courbe a été établie avec un indice des vides initial de 0,86, ce qui correspond, dans le chapitre 4, à la série $n°2$.

Effet de la température sur la surface caractéristique

Les résultats obtenus sur la céramique montrent qu'une augmentation de température de 40°C induit une diminution de teneur en eau de l'ordre de 1%. On peut s'attendre au même ordre de grandeur dans le cas du sable limoneux argileux. Dans l'espace *succion - teneur en eau - indice des vides*, les surfaces caractéristiques correspondant à la température ambiante et à la température de 60°C vont être très proches. Ce type de représentation ne serait donc pas très lisible.

Pour illustrer l'effet de la température sur la surface caractéristique, on a donc choisi de se placer à plusieurs indices des vides constants et d'analyser l'effet de la température sur les courbes caractéristiques dans les plans *succion - teneur en eau*.

A partir de l'équation (4.29), on détermine les courbes caractéristiques correspondant aux indices des vides 0,6, 0,8 et 1, à la température ambiante (22°C). On utilise ensuite le schéma de calcul décrit par l'équation (5.9) pour prédire ces courbes à 60°C. La fonction F_w est calculée au moyen de l'équation (4.32).

La figure 5.3 illustre les résultats obtenus. Les courbes en trait continu noir représentent les courbes caractéristiques à 22°C et les courbes en gris celles à 60°C. La diminution de teneur en eau induite par l'augmentation de température est inférieure dans l'ensemble à 2%. Plus l'indice des vides est faible et plus la variation de teneur en eau est faible. A partir d'une succion de 100 kPa, les courbes caractéristiques déterminées à la température ambiante se rejoignent. Le même phénomène est observé à 60°C.

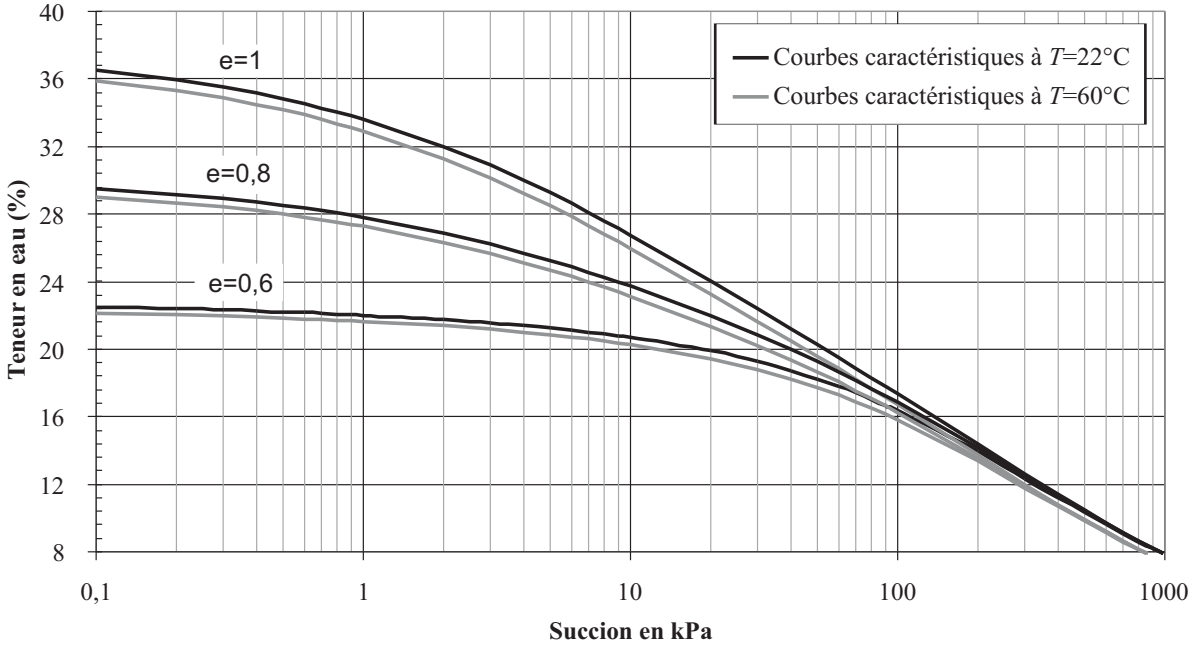

FIG. 5.3 – Effet de la température sur les courbes caractéristiques du sable limoneux argileux pour trois valeurs d'indice des vides.

Effet de la température sur la courbe de rétention

Comme pour la céramique, deux séries d'essais ont été réalisés au moyen de la plaque de pression afin de déterminer les courbes de rétention à 20 et 60°C du sable limoneux argileux. Les échantillons sont compactés à un indice des vides initial égal à $0,86$.

Ce sol étant déformable sous chargement hydrique, les couplages hydro-mécaniques doivent donc être pris en compte. L'indice des vides initial étant fixé, la modélisation des chemins de chargement hydrique présentée dans le chapitre 4 (équations (4.16) et (4.17)) permet de calculer, pour chaque succion, la teneur en eau et l'indice des vides à la température ambiante. On a vu que l'on négligeait l'effet de la température sur l'indice des vides. Pour l'état initial de compaction étudié, les équations paramétriques du chemin de chargement hydrique s'écrivent :

$$w = g(s, T) \tag{5.11}$$

$$e = h(s) \tag{5.12}$$

Les fonctions $g(s, T_{ref})$ et $h(s)$ sont connues.

On utilise le schéma de calcul défini par l'équation (5.10) pour prédire l'effet de la température sur la teneur en eau et établir ainsi la courbe de rétention du milieu à différentes températures. Dans cette version du modèle thermo-hydrique, la fonction F_w doit être déterminée en tenant compte de la variation de l'indice des vides.

A la température de référence prise égale à 22°C, pour chaque succion s, les fonctions (4.16) et (4.17) permettent de décrire complètement l'état du milieu (w, e). Autour de chacun de ces états, les variations de succion peuvent être déduites de l'équation (4.29) qui modélise la surface caractéristique à la température de référence, ce qui permet donc de calculer la fonction $F_w(w, e)$.

La figure 5.4 montre les courbes de rétention obtenues pour le sable limoneux argileux. La charte graphique est la même que pour la céramique. Pour les faibles valeurs de succion, le modèle sur-estime l'effet de la température. Par contre, pour tout le reste de la gamme de succions, on voit que le modèle permet une bonne prédiction de la courbe de rétention à 60°C. On peut considérer que ces résultats valident notre modèle dans le cas des milieux déformables.

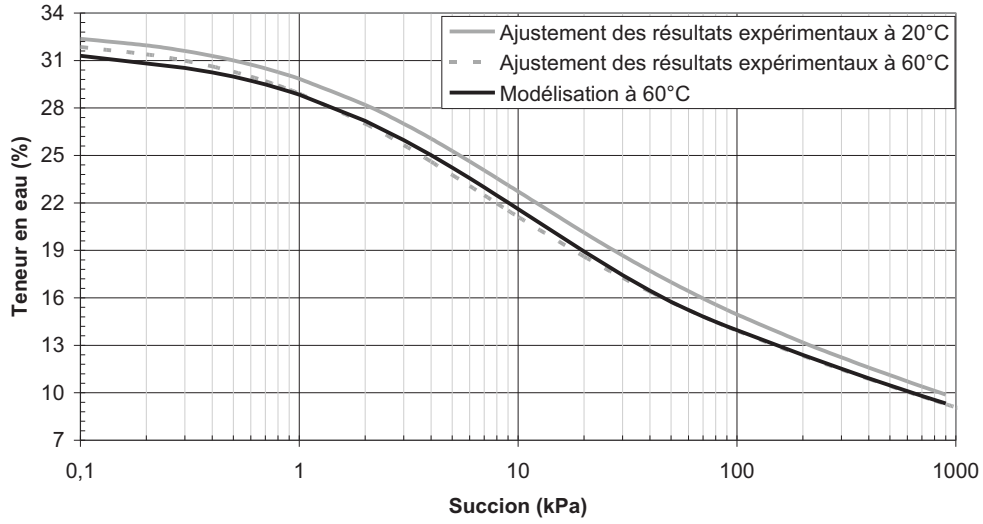

FIG. 5.4 – Effet de la température sur une courbe de rétention du sable limoneux argileux.

La figure 5.5 permet de comparer les effets des deux termes du modèle définis par l'équation (5.4) pour une variation de température de 40°C. Comme dans le cas de la céramique, on constate que les effets du premier terme, rendant compte de la dilatation de la phase liquide, sont importants pour les faibles teneurs en eau, puis diminuent fortement avec la désaturation du milieu. Les effets du second terme, rendant compte de la diminution de la tension superficielle, sont prépondérants pour la plage de succions qui correspond à la zone de forte désaturation du milieu.

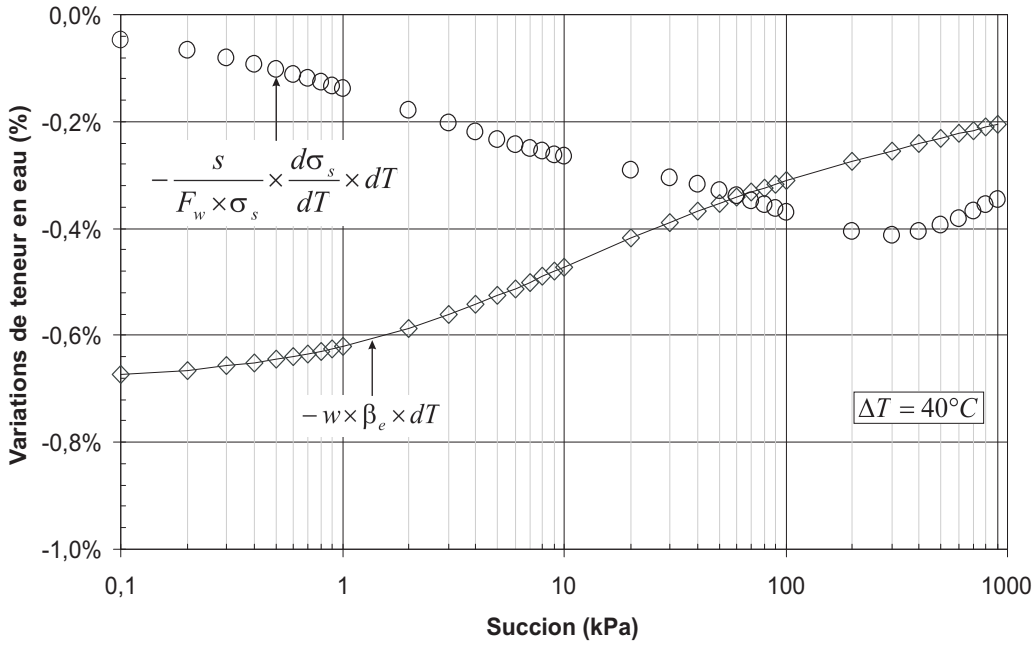

FIG. 5.5 – Contribution des deux termes du modèle pour une variation totale de température de 40°C.

Application du modèle à des données de la littérature

Pour compléter la validation du modèle thermo-hydrique utilisé précédemment, celui-ci a été appliqué à des données de la littérature. Les mesures expérimentales utilisées proviennent de Olchitsky (2002) et Romero (1999)) et portent respectivement sur deux matériaux : l'argile FoCa et l'argile de Boom.

Le modèle traduit par la relation (5.3) nécessite la détermination de la fonction F_w. Pour les milieux déformables, la détermination expérimentale de cette fonction tout au long d'un chemin hydro-mécanique n'est pas aisée. Comme on l'a vu dans le cas du sable limoneux argileux, cette détermination s'appuie sur la donnée des équations paramétriques des chemins de chargement hydrique et de la surface caractéristique. Les données bibliographiques consultées dans la littérature ne permettent pas d'extraire ces deux outils.

Dans une première approche, la fonction F_w est calculée directement comme l'inverse de la pente de la courbe de rétention obtenue à la température de référence comme dans le cas des milieux indéformables. La pertinence de ce choix sera discutée à la fin de cette section.

L'argile FoCa :

L'argile FoCa est une argile sédimentaire du Bassin Parisien. Elle est extraite d'un site entre les deux villages de Fourgues et de Cahaignes, d'où elle tire son nom. Sa fraction argileuse qui représente 85% de la phase solide est composée pour 80% d'un interstratifié comprenant 50% de smectite, 50% de kaolinite et 5% de kaolinite libre. La fraction minérale non argileuse contient principalement du quartz, de la géothite, de l'hématite, de la calcite et du gypse. Sa limite de liquidité est 112%, sa limite de plasticité 50% et sa masse volumique spécifique

2675 kg.m^{-3}. Cette argile est un matériau de référence au sein du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et a fait l'objet de nombreuses études (Olchitsky (2002), Imbert et al. (2005)).

E. Olchitsky a déterminé les courbes de rétention de ce sol à 20 et 80°C. Les échantillons ont été fabriqués à partir d'une poudre d'argile par compactage statique. La teneur en eau de fabrication est comprise entre $12,4$ et $12,6\%$ et la pression de compactage est égale à 50 MPa.

Les mesures expérimentales ont été approchées par les fonctions suivantes :

– Pour 20°C

$$w = -0,048 \ln(s+1) + 0,345 \tag{5.13}$$

– Pour 80°C

$$w = -0,048 \ln(s+1) + 0,325 \tag{5.14}$$

La succion est exprimée ici en MPa.

On peut noter une première remarque sur les fonctions d'ajustement mathématique choisies. La pente est la même à 20 et à 80°C, ce qui est en accord avec l'hypothèse faite dans le modèle, à savoir que le fonction F_w ne dépend pas de la température. Les équations (5.13) et (5.14) montrent également qu'une élévation de température de 60°C induit une diminution de la teneur en eau d'environ 2% quelle que soit, dans le domaine considéré ici, la valeur de la succion.

La figure 5.6 présente les résultats obtenus en appliquant notre modèle au cas de l'argile FoCa. La courbe expérimentale obtenue à 20°C est prise comme référence pour déterminer la fonction F_w. En utilisant le calcul décrit dans la relation (5.3), on prédit la courbe de rétention à 80°C. La charte graphique est la même que pour les autres matériaux. La comparaison entre la courbe continue noire et la courbe en traits interrompus montre qu'il y a une très bonne adéquation entre résultats expérimentaux et théoriques. On peut conclure, dans le cas de ce matériau, que l'hypothèse faite pour le calcul de la fonction F_w, ne tenant pas compte de la variation de l'indice des vides, n'a pas de conséquence sur les résultats.

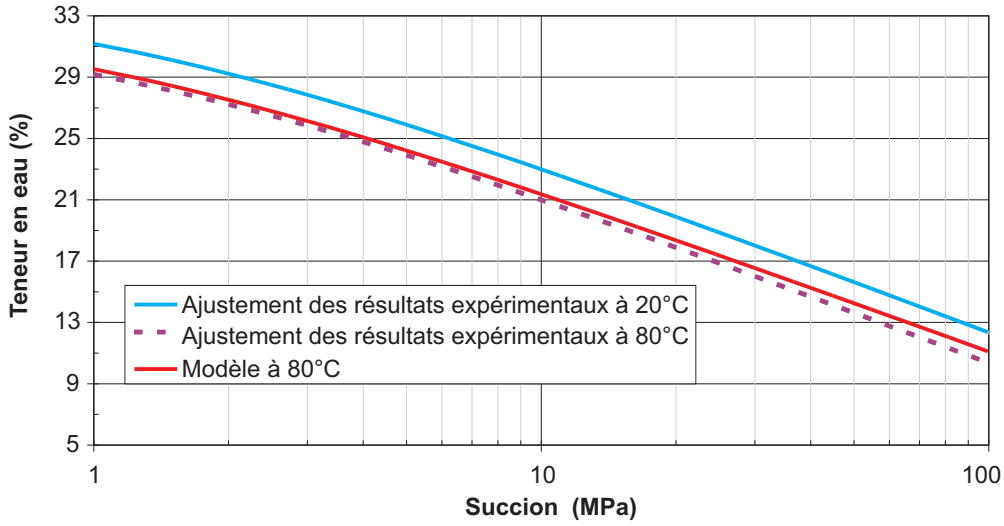

FIG. 5.6 – Effet de la température sur la courbe de rétention de l'argile FoCa.

L'argile Boom

Le second sol étudié est une argile remaniée, préparée à base d'argile de Boom (Romero (1999)). Ce sol est prélevé à 230 m de profondeur au laboratoire souterrain HADES à Mol en Belgique. Il s'agit d'une argile faiblement gonflante dont la fraction argileuse se compose de 20% à 30% de kaolinite, 20% à 30% d'illite et 10% à 20% de smectite. La fraction non argileuse est composée essentiellement de quartz. La limite de liquidité est de 56%, la limite de plasticité de 29%. Les échantillons sont préparés à partir d'une poudre d'argile séchée puis intimement mélangée avec 15% d'eau. Le sol ainsi constitué est compacté statiquement en une seule couche afin d'atteindre la densité voulue.

Les courbes de rétention de ce sol sont connues pour deux poids volumiques secs différents $\Gamma_s = 13,7$ kN.m^{-3} et $\Gamma_s = 16,7$ kN.m^{-3} (ce qui correspond aux indices des vides respectifs de $0,97$ et de $0,62$) et dans chacun de ces cas, pour deux températures 22 et 80°C.

Les résultats expérimentaux ont été ajustés à l'aide d'une forme modifiée de la fonction, proposée par Van Genuchten (1980), qui s'écrit :

$$w = w_{sat}\left(1 - \frac{\ln\left(1+\frac{s}{a_r}\right)}{\ln(2)}\right)\left(\frac{1}{1+(\alpha_T \times s)^n}\right)^m \tag{5.15}$$

où a_r, n, m et α_T sont les paramètres de la fonction d'ajustement. La succion est exprimée en MPa.

En s'inspirant des travaux de Grant et Salehzadeh (1996), Romero et al. (2001) ont proposé pour le paramètre relatif à la succion d'entrée d'air, α_T, une expression empirique qui prend en compte l'effet de la température :

$$\alpha_T = \alpha_r\left(\frac{a_1 + b_1 \times T_{ref}}{a_1 + b_1 \times T}\right)^{b_1} \tag{5.16}$$

où a_1 et b_1 sont des paramètres pris respectivement égaux à -608 K et 1. α_r est la valeur de α_T à la température de référence T_{ref}. Dans la relation (5.16), T et T_{ref} sont exprimées en Kelvin.
Les valeurs des paramètres de la modélisation sont synthétisées dans le tableau 5.1.

Coefficient	$\Gamma_s = 13,7$ kN.m^{-3}	$\Gamma_s = 16,7$ kN.m^{-3}
w_{sat} (/)	$32,9\%$	$23,9\%$
a_r (MPa)	300	300
n (/)	$1,14$	$0,75$
m (/)	$0,20$	$0,35$
α_r (MPa^{-1})	$21,3$	$1,55$

Tab. 5.1 – Valeurs des coefficients de la fonction d'ajustement des courbes de rétention de l'argile de Boom (Romero (1999)).

L'effet de la température sur les courbes de rétention de l'argile de Boom a été modélisé par le modèle de comportement thermo-hydrique basé sur l'équation (5.3). Pour chacune des deux densités, on applique la même méthode de calcul : à partir de la fonction d'ajustement de la courbe à 20°C, on détermine la fonction F_w puis on calcule la courbe théorique à 80°C en appliquant le schéma incrémental de calcul (5.8). Les figures 5.7 et 5.8 présentent les résultats obtenus. La même charte graphique que pour les autres matériaux est appliquée. Bien que la

prédiction du modèle soit moins satisfaisante pour la densité la plus faible, la comparaison des résultats donnés par le modèle et les mesures expérimentales montre un très bon accord.

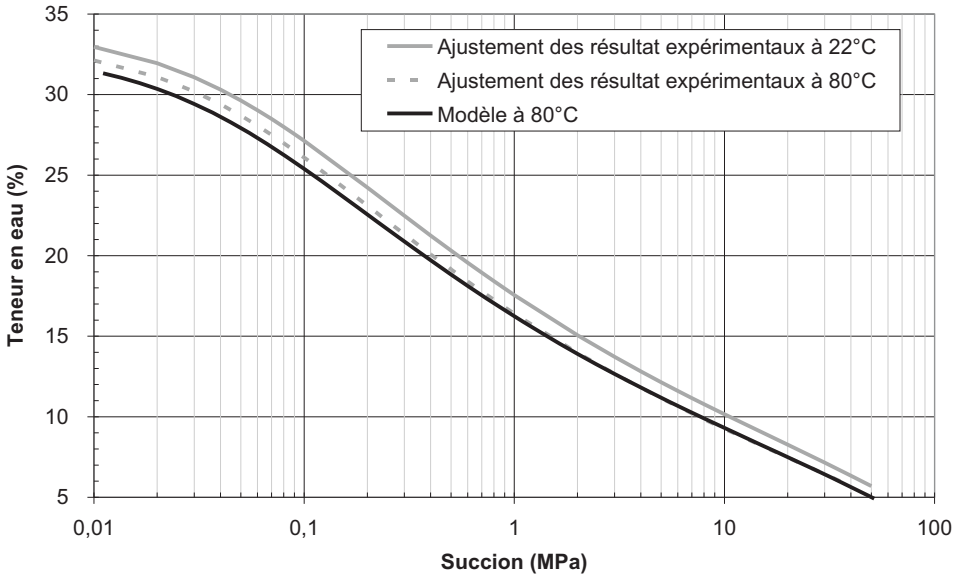

FIG. 5.7 – Effet de la température sur la courbe de rétention de l'argile de Boom $\Gamma_s = 13,7$ kN.m^{-3}.

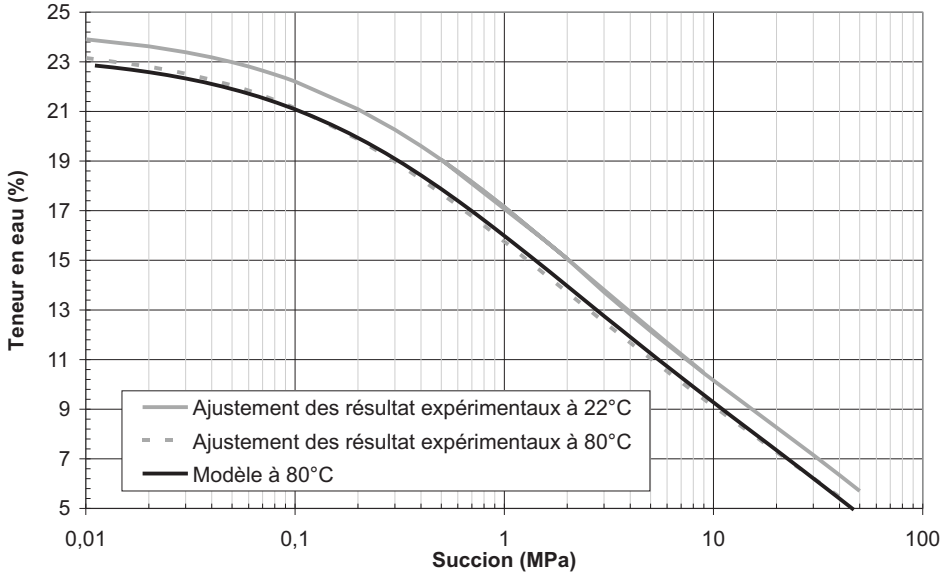

FIG. 5.8 – Effet de la température sur la courbe de rétention du l'argile de Boom $\Gamma_s = 16,7$ kN.m^{-3}.

Les comparaisons entre modélisations et expérimentations, pour l'argile FoCa et l'argile de

Boom, montrent la capacité de la relation (5.3) à prédire la courbe de rétention à n'importe quelle température dans la mesure où on dispose de la courbe de rétention à une température de référence.

L'hypothèse qui a conduit à négliger l'effet des couplages hydro-mécaniques dans la détermination de la fonction F_w apparaît acceptable. En fait, bien que la variation de l'indice des vides puisse être non négligeable sur l'ensemble d'un essai, il ne semble pas nécessaire de prendre en compte explicitement cette variation dans le calcul. En effet, la détermination de l'inverse de la pente de la courbe de rétention, F_w, intègre implicitement la contribution de la déformation progressive du matériau au cours du chargement hydrique.

5.2 Effet de la température sur l'isotherme de sorption

Pour le sable limoneux argileux, l'étude du chapitre 4 a montré que dans le domaine hygroscopique :

– La succion n'avait pas d'effet significatif sur l'indice des vides.

– L'indice des vides initial ne modifiait pas l'isotherme de sorption.

En l'absence de couplages hygro-mécaniques, le modèle thermo-hydrique de GAB décrit dans la section 1.2.5 suffit pour la modélisation des isothermes de sorption des deux matériaux (céramique et sable limoneux argileux) de cette étude.

La figure 5.9 donne les points expérimentaux obtenus au moyen du banc de sorption pour la céramique. Trois températures ont été étudiées : 20, 40 et 60°C.

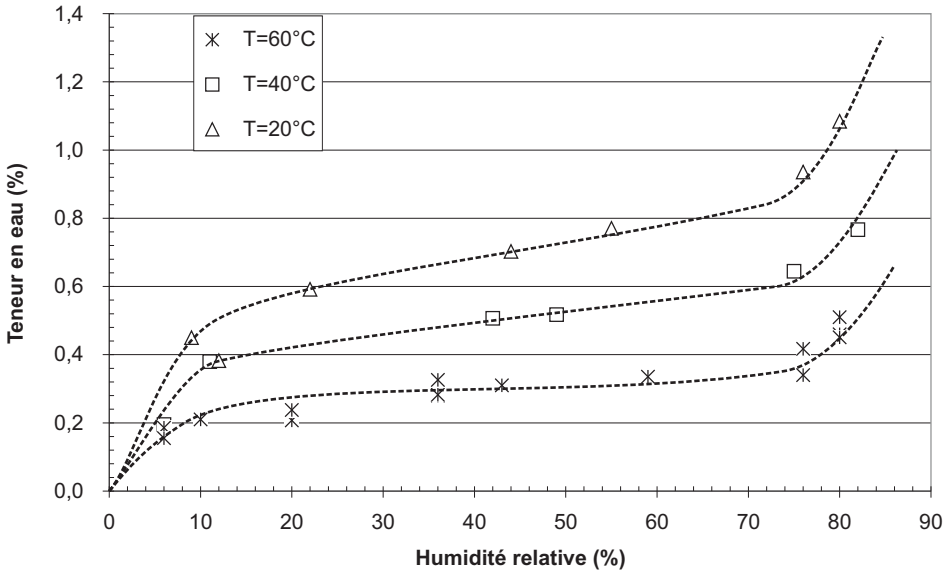

FIG. 5.9 – Points expérimentaux des isothermes de sorption de la céramique pour différentes températures.

Les figures 5.10 et 5.11 donnent les points expérimentaux obtenus pour le sable limoneux argileux. Dans ce cas les expérimentations ont porté sur cinq températures : 20, 30, 40, 50 et 60°C.

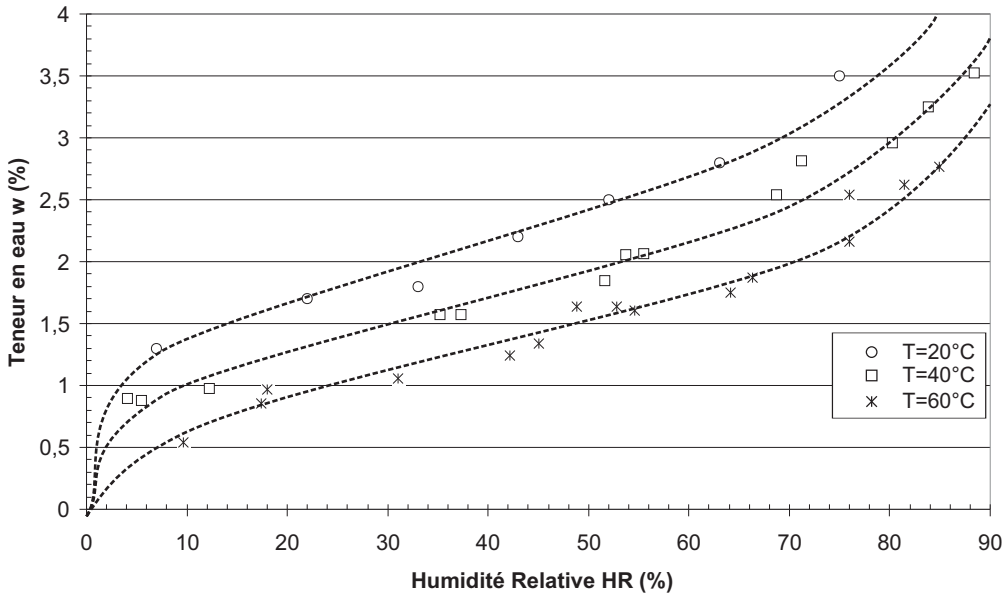

FIG. 5.10 – Points expérimentaux des isothermes du sable limoneux argileux pour 20, 40 et 60°C (Jamin (2003)).

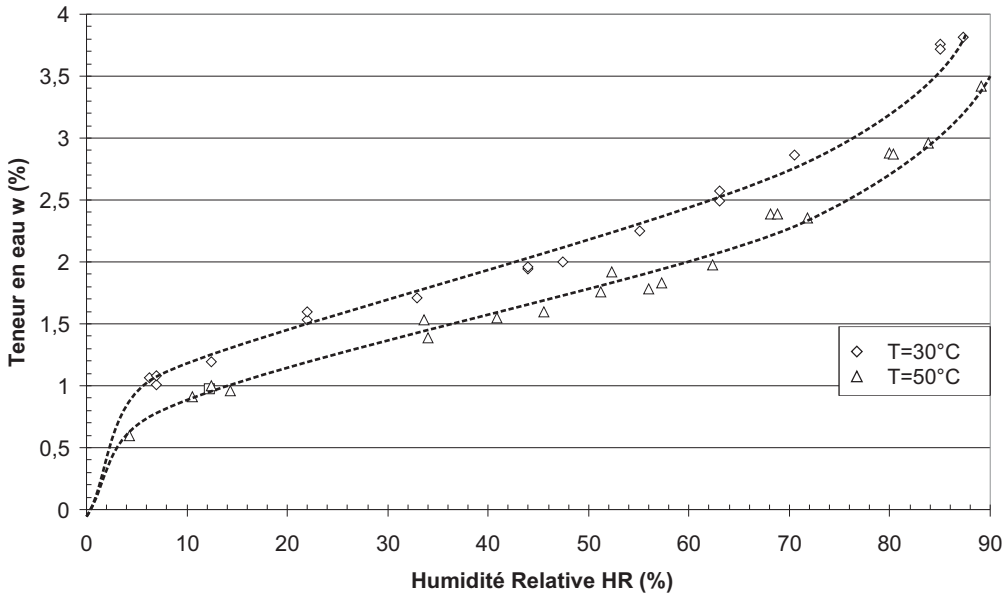

FIG. 5.11 – Points expérimentaux des isothermes du sable limoneux argileux pour 30 et 50°C (Jamin (2003)).

Pour les deux matériaux, il apparaît clairement qu'à humidité relative constante, l'élévation de la température entraîne une diminution de la teneur en eau d'équilibre. Cette tendance est en accord avec la théorie décrite dans la section 1.2.1 qui montrait que l'adsorption physique est favorisée par une baisse de la température.

Le modèle thermo-hydrique de GAB comporte les six paramètres v_m, c, k, H, h_C, h_K (voir la sous section 3.2.6). Pour déterminer ces paramètres, il est nécessaire de disposer des données expérimentales des isothermes pour deux températures différentes. L'ajustement mathématique de ces données permet ensuite le calcul des six paramètres du modèle thermo-hydrique. Pour la céramique, on utilise les ajustements des points mesurés à 20 et 40°C et pour le sable limoneux argileux ceux des points mesurés à 20 et 30°C.

Ajustement mathématique des points expérimentaux obtenus à deux températures différentes :

La fonction d'ajustement mathématique des isothermes est donnée par l'équation (3.18) que l'on rappelle ici :

$$w = \frac{w_m \times C \times K \times HR}{(1 - K \times HR)\,(1 - K \times HR + C \times K \times HR)} \tag{5.17}$$

L'équation (5.17) nécessite la détermination des trois paramètres w_m, C et K.
Une des étapes de résolution consiste à transformer l'équation (5.17) en polynôme du second degré comme suit :

$$\frac{HR}{w} = \left[\frac{C-1}{w_m \times C}K\right] HR^2 + \left[\frac{C-2}{w_m \times C}\right] HR + \frac{1}{w_m \times C \times K} \Leftrightarrow f(HR) = \chi \times HR^2 + \eta \times HR + \zeta \tag{5.18}$$

Enfin, à partir des trois coefficients de la parabole, χ, η et ζ, on détermine les paramètres des fonctions d'ajustement w_m, C et K par les relations :

$$w_m = \Delta^{-0,5} \tag{5.19}$$

$$C = \frac{2 \times \Delta^{0,5}}{\Delta^{0,5} - \eta} \tag{5.20}$$

$$K = \frac{\Delta^{0,5} - \eta}{2 \times \zeta} \tag{5.21}$$

où Δ est le déterminant du polynôme ($\Delta = \eta^2 - 4 \times \chi \times \zeta$).

Les figures 5.12 et 5.13 montrent, pour chacun des matériaux, les tracés de la fonction $f(HR) = \frac{HR}{w}$ pour deux températures différentes. L'ajustement fait par le polynôme du second degré est meilleur dans le cas du sable limoneux argileux que dans le cas de la céramique. Les carrés des coefficients de régression moyens sont d'environ 0,92 pour la céramique et 0,99 pour le sable limoneux argileux.

Les valeurs des trois coefficients des paraboles, χ, η et ζ, pour chacun des matériaux et pour les deux températures choisies, sont données dans le tableau 5.2.

Les valeurs des paramètres des fonctions d'ajustement des isothermes de la céramique à 20 et 40°C et du sable limoneux argileux à 20 et 30°C, calculées à partir des coefficients des paraboles, sont données dans le tableau 5.3.

A ce stade, on dispose des paramètres w_m, C et K de l'ajustement mathématique des isothermes des matériaux de notre étude à deux températures différentes que l'on note T_1 et T_2. On définit aussi $w_m^{T_1}$, C^{T_1} et K^{T_1} les paramètres obtenus à la température la plus faible

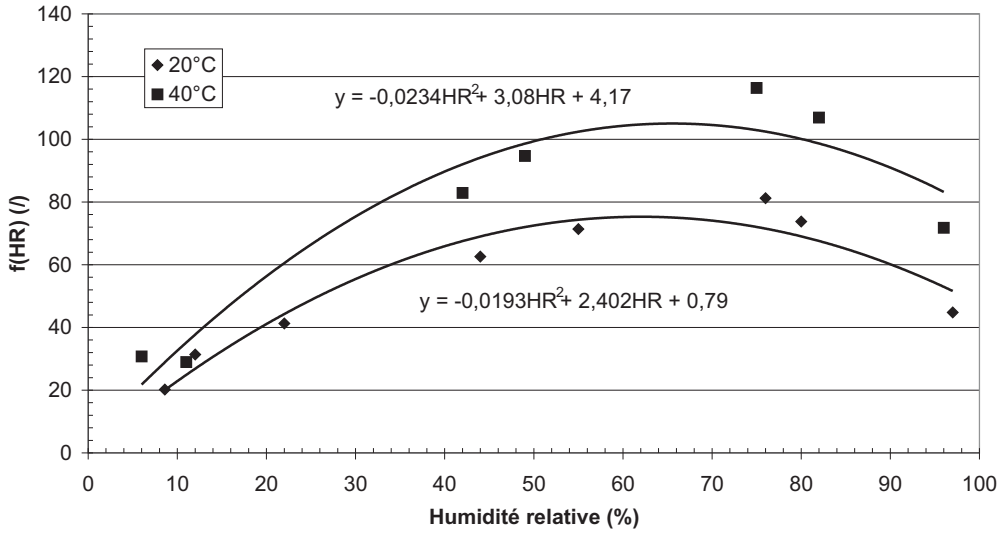

FIG. 5.12 – Fonction $f(HR)$ de la céramique pour 20 et 40°C.

Paramètre	Céramique		Sable limoneux argileux	
	20°C	40°C	20°C	30°C
χ (/)	$-0,0193$	$-0,0234$	$-0,0045$	$-0,0056$
η (/)	$2,402$	$3,08$	$0,6129$	$0,7259$
ζ (/)	$0,79$	$4,17$	$1,7388$	$1,6148$

TAB. 5.2 – Valeurs des coefficients de la fonction $f(HR)$ pour la céramique et le sable limoneux argileux aux deux températures choisies.

T_1 et $w_m^{T_2}$, C^{T_2} et K^{T_2} les paramètres obtenus à la température la plus élevée T_2.

Les relations entre les six paramètres du modèle thermo-hydrique et les paramètres des fonctions d'ajustement des isothermes aux températures T_1 et T_2 s'écrivent :

$$H = \frac{R \times T_1 \times T_2 \times \ln\left(\frac{w_m^{T_1}}{w_m^{T_2}}\right)}{T_2 - T_1} \tag{5.22}$$

$$h_C = \frac{R \times T_1 \times T_2 \times \ln\left(\frac{C^{T_1}}{C^{T_2}}\right)}{T_2 - T_1} \tag{5.23}$$

Paramètre	Céramique		Sable limoneux argileux	
	20°C	40°C	20°C	30°C
w_m (/)	$0,41$	$0,32$	$1,57$	$1,33$
C (/)	376	100	51	61
K (/)	$0,008$	$0,0075$	$0,0072$	$0,0076$

TAB. 5.3 – Valeurs des coefficients des fonctions d'ajustement des isothermes de la céramique et du sable limoneux argileux pour les deux températures choisies.

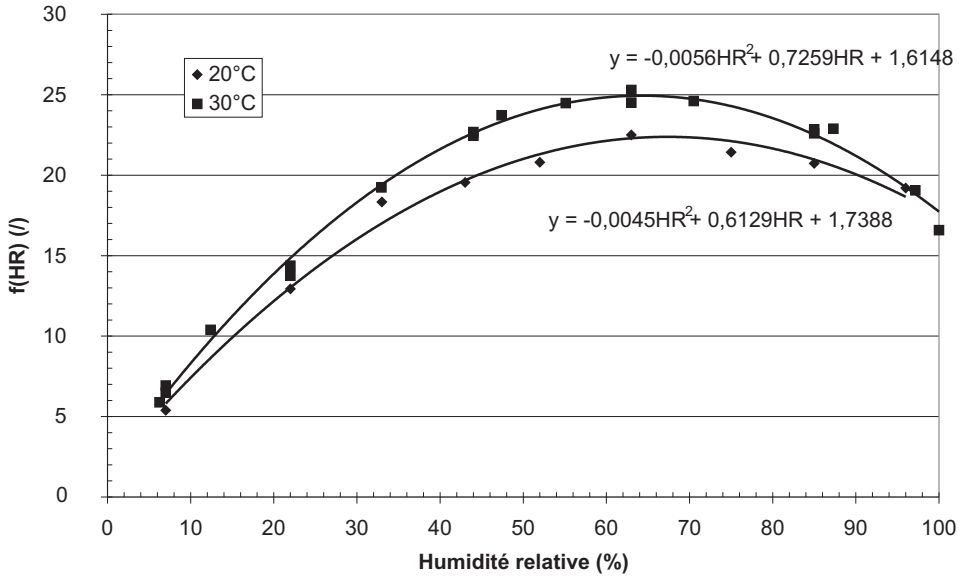

FIG. 5.13 – Fonction $f(HR)$ du sable limoneux argileux pour 20 et 30°C.

Paramètre	Céramique	Sable limoneux argileux
H (J.mol^{-1})	$1,01 \times 10^4$	$1,21 \times 10^4$
h_C (J.mol^{-1})	$5,04 \times 10^4$	$-1,38 \times 10^4$
h_K (J.mol^{-1})	$2,45 \times 10^3$	$-3,81 \times 10^3$
v_m (/)	$6,6 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-2}$
c (/)	$3,88 \times 10^{-7}$	$1,44 \times 10^4$
k (/)	$2,93 \times 10^{-3}$	$3,44 \times 10^{-2}$

TAB. 5.4 – Valeurs des coefficients du modèle de GAB pour la céramique et pour le sable limoneux argileux.

$$h_K = \frac{R \times T_1 \times T_2 \times \ln\left(\frac{K^{T_1}}{K^{T_2}}\right)}{T_2 - T_1} \tag{5.24}$$

$$v_m = \frac{w_m^{T_1}}{e^{\frac{H}{RT_1}}} \tag{5.25}$$

$$c = \frac{C^{T_1}}{e^{\frac{h_C}{RT_1}}} \tag{5.26}$$

$$k = \frac{K^{T_1}}{e^{\frac{h_K}{RT_1}}} \tag{5.27}$$

Le tableau 5.4 donne les six paramètres de ce modèle pour chacun des deux matériaux.

Les paramètres du modèle thermo-hydrique de GAB sont déterminés dans le cas des deux matériaux, on peut donc tracer leurs isothermes de sorption pour n'importe quelle température. Les figures 5.14, 5.15 et 5.16 permettent de confronter les résultats du modèle avec les

points expérimentaux.

Dans le cas de la céramique, on observe une très bonne adéquation entre résultats expérimentaux et théoriques. Cependant, pour les fortes valeurs d'humidité relative $HR > 70\%$, le modèle sur-estime la teneur en eau de $0,04$ à $0,1\%$.

Pour le sable limoneux argileux, globalement, la corrélation est encore bonne. Pour les courbes à 50 et 60°C, le modèle sur-estime la teneur en eau aux fortes humidités relatives comme dans le cas de la céramique.

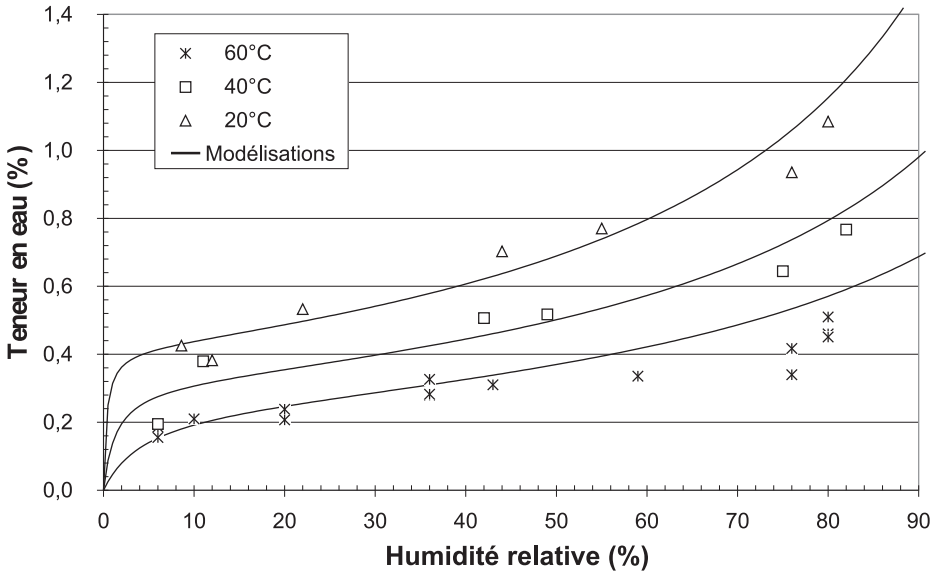

FIG. 5.14 – Isothermes de sorption de la céramique pour différentes températures ; points expérimentaux et résultats du modèle.

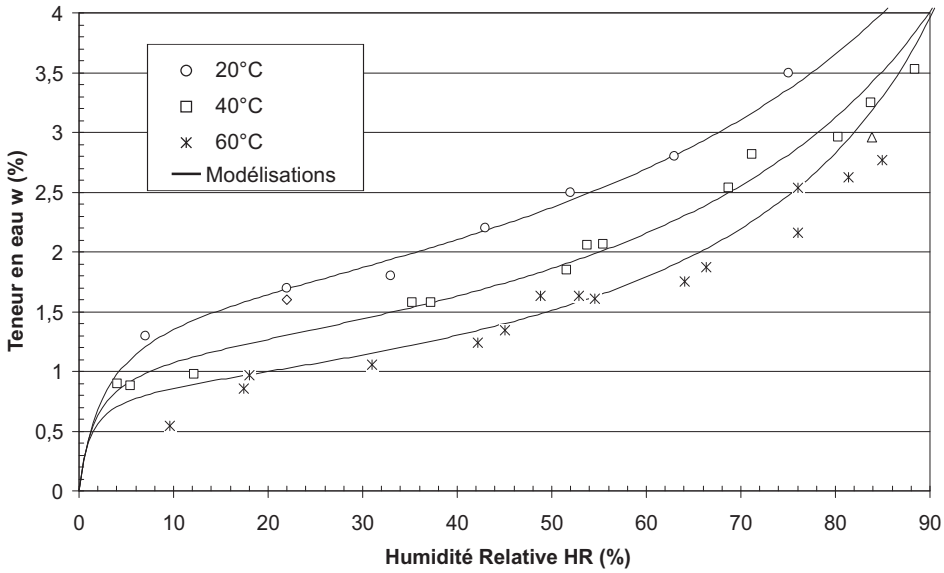

FIG. 5.15 – Isothermes de sorption du sable limoneux argileux pour 20, 40 et 60°C ; points expérimentaux et résultats du modèle.

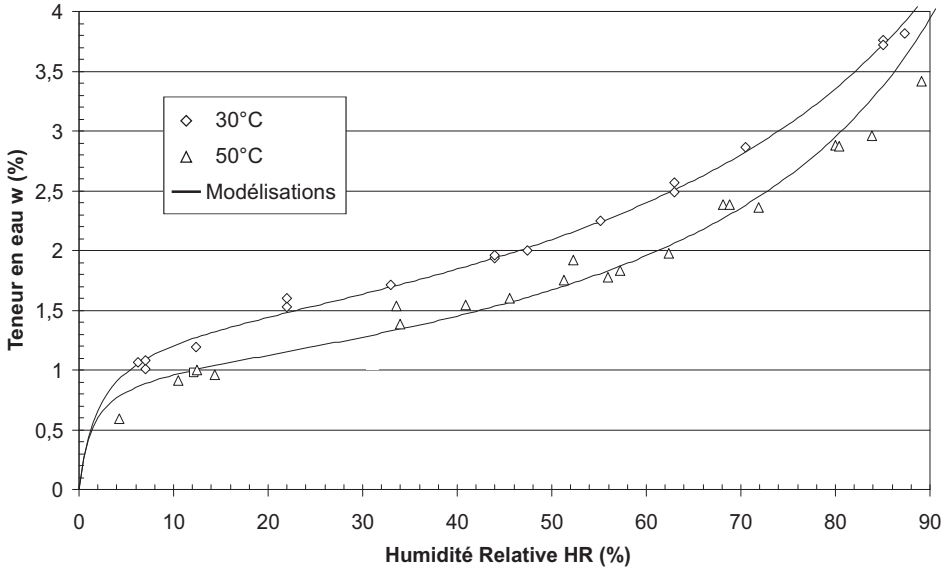

FIG. 5.16 – Isothermes de sorption du sable limoneux argileux pour 30 et 50°C ; points expérimentaux et résultats du modèle.

Conclusion

Ce chapitre, a présentée une étude du comportement thermo-hydrique des milieux poreux.

Dans les domaines funiculaire et pendulaire, un modèle exprimant les variations de teneur en eau en fonction des variations de température a été proposé. Ce modèle, associé à

la donnée d'une courbe de rétention ou d'une surface caractéristique à une température de référence, permet d'accéder à la courbe de rétention à la surface caractéristique pour d'autres températures. Des expérimentations réalisées sur les deux matériaux de l'étude (céramique et sable limoneux argileux) et l'exploitation de résultats de la littérature relatifs à deux autres matériaux différents, ont permis de valider ce modèle.

Dans le domaine hygroscopique, un modèle emprunté à la littérature a été testé. Ce modèle permet, à partir de la donnée de deux isothermes de sorption correspondant à deux températures différentes, de prédire cet isotherme pour toute autre température. Ce modèle a donné des résultats satisfaisants dans le cas de la céramique et du sable limoneux argileux.

Ces résultats permettent de réduire considérablement le nombre d'expérimentations nécessaires à la caractérisation du comportement thermo-hydrique d'un milieu poreux.

Chapitre 6

Application à la détermination de la perméabilité des sols non saturés

La modélisation des écoulements dans les sols saturés ou non saturés nécessite la connaissance de la perméabilité du milieu. Dans le cas des sols non saturés, les méthodes de mesure directes de ce coefficient utilisent des instrumentations complexes, et peuvent nécessiter des temps très importants pour les sols faiblement perméables. Pour ces raisons, de multiples recherches se sont orientées vers la mise en place de méthodes de mesure indirectes.

L'étude présentée dans ce chapitre s'insère dans ce contexte. Elle permet également d'aborder cette question dans le cadre des recherches thermo-hydro-mécaniques des sols non saturés.

On propose ici une méthode de calcul de la perméabilité prenant en compte les effets thermique, mécanique et hydrique. En se basant sur la relation proposée par Romero (1999), on prend en compte ces différents effets de façon découplée sous la forme :

$$\frac{K_{ns}(T,e,w)}{K_{sat}(T_{ref},e_{ref})} = k_r(T,e,w) = k_T(T) \times k_e(e) \times k_w(w) \tag{6.1}$$

où $K_{ns}(T,e,w)$ est la perméabilité en conditions non saturées à la température T, à l'indice des vides e et à la teneur en eau w. $K_{sat}(T_{ref},e_{ref})$ est la perméabilité en conditions saturées dans la configuration de référence : température T_{ref} et indice des vides e_{ref}. $k_r(T,e,w)$ est le coefficient relatif de perméabilité à la température T, à l'indice des vides e et à la teneur en eau w. $k_T(T)$ est une fonction relative à l'effet de la température T, $k_e(e)$ une fonction relative à l'effet de l'indice des vides e et $k_w(w)$ une fonction relative à l'état de désaturation.

Romero (1999) a montré, dans le cas de l'argile de Boom, que le découplage des effets thermique, mécanique et hydrique n'était pas total. En effet, sur ce sol, les fonctions k_T et k_e dépendent légèrement du degré de saturation. La fonction k_w peut être prise, dans certains cas, comme une fonction de la teneur en eau et de l'indice des vides (Romero (1999)).

Dans notre étude, les données expérimentales ne sont pas assez riches pour prendre en compte les couplages sur les fonctions k_T et k_e. Quant à la dépendance de la fonction k_w vis-à-vis de l'indice des vides, elle est prise en compte au travers de la succion d'entrée d'air.

On se propose d'établir l'expression de la perméabilité comme une fonction de la température, de l'indice des vides et de l'état de désaturation en considérant deux cas :

– Le cas général : connaissant complètement l'état du matériau (température, indice des vides et teneur en eau), on cherche à déterminer la perméabilité correspondante. On s'appuie ici sur la donnée de la surface caractéristique déterminée dans le chapitre 4.
– Le cas des chemins de chargement hydrique : connaissant le comportement hydrique du milieu ($w(s, e_0)$ et $e(s, e_0)$) on cherche à déterminer l'évolution de la perméabilité du milieu durant la désaturation. On s'appuie ici sur la donnée des chemins de chargement hydrique déterminés dans le chapitre 4. On considère donc uniquement les chemins de désaturation à partir d'un état saturé.

6.1 Cas général

A une température donnée, et pour des chemins de chargement hydrique monotones, on a vu dans le chapitre 4 qu'il existe une relation entre les trois variables succion, teneur en eau et indice des vides, qui peut être représentée par la surface caractéristique. Pour une température donnée, deux variables suffisent donc à définir totalement l'état du milieu (on se place ici à contrainte extérieure nulle).
Dans la modélisation initiale proposée par Romero (1999), le jeu de variables choisi pour décrire l'état du matériau était T, e, w, on préfère ici utiliser le jeu de variables T, e, s. Ce choix est motivé par le type de modèle utilisé pour calculer la fonction relative à la désaturation k_w. La relation (6.1) devient :

$$\frac{K_{ns}(T, e, s)}{K_{sat}(T_{ref}, e_{ref})} = k_T(T) \times k_e(e) \times k_w(s) \tag{6.2}$$

où $K_{ns}(T, e, s)$ est la perméabilité en conditions non saturées à la température T, à l'indice des vides e et à la succion s. $K_{sat}(T_{ref}, e_{ref})$ est la perméabilité en conditions saturées (la succion est inférieure à la succion d'entrée d'air) dans la configuration de référence : température T_{ref} et indice des vides e_{ref}. $k_T(T)$, $k_e(e)$ et $k_w(s)$ sont les fonctions respectivement relatives à la température, à l'indice des vides et à l'état de désaturation.

On présente ci-dessous des propositions concernant les fonctions relatives aux différents effets découplés : k_T, k_e et k_w.

Effet de la température
En conditions saturées, l'effet de la température sur la perméabilité est habituellement attribué à la variation de la viscosité de l'eau. L'application de ce résultat aux cas non saturés a été validée par plusieurs études (Romero et al. (2001), Jamin (2003)). Cette interprétation conduit à écrire l'expression :

$$k_T(T) = \frac{\rho_e^*(T_0) \times \nu_e(T_0)}{\rho_e^*(T) \times \nu_e(T)} = \frac{\mu_e(T_0)}{\mu_e(T)} \approx 1 + \delta_T \times \Delta T \tag{6.3}$$

où ν_e est la viscosité cinématique de l'eau, μ_e la viscosité dynamique et δ_T un coefficient relatif à la viscosité. Entre 20 et 60°C, il peut être pris égal à 0,03°C^{-1} (Jamin (2003)).

Effet de l'indice des vides
Concernant cet effet, Taylor (1948) a proposé, d'après des mesures expérimentales menées sur un sable et sur un sol fin, deux types de modélisation pour décrire l'évolution de la

perméabilité en fonction de l'indice des vides, en conditions saturées et à la température ambiante T_{amb}. Ces modélisations sont données par les relations :

$$K_{sat}(T_{amb}, e) = K_{sat}(e) = D_1 \times \frac{e^3}{1+e} \tag{6.4}$$

$$K_{sat}(T_{amb}, e) = K_{sat}(e) = D_2 \times \exp(d_2 \times e) \tag{6.5}$$

où D_1, D_2 et d_2 sont les paramètres des modèles qui dépendent du matériau.
L'expression (6.4), qui est la plus utilisée dans la littérature (Huang et al. (1998), Romero (1999), Chapuis (2004)), a été développée par Taylor à partir des équations de l'écoulement dans un milieu poreux. L'expression (6.5) est issue d'une démarche entièrement empirique, mais Lambe et Whitman (1969) ont vérifié sa capacité à décrire l'évolution de la perméabilité en fonction de l'indice des vides pour plusieurs types de sol.

Des mesures de perméabilité en conditions saturées et à température ambiante (22°C) ont été réalisées sur des échantillons de sable limoneux argileux compactés à différents indices des vides afin de déterminer laquelle des deux modélisations proposées correspondait le mieux à notre matériau. La figure 6.1 montre les résultats de cette campagne d'essais. L'ajustement mathématique des points expérimentaux met en évidence que c'est l'équation (6.5) qui traduit le mieux ces résultats. Les paramètres D_2 et d_2 prennent respectivement pour valeur 5.10^{-13} m.s^{-1} et $19,5$.

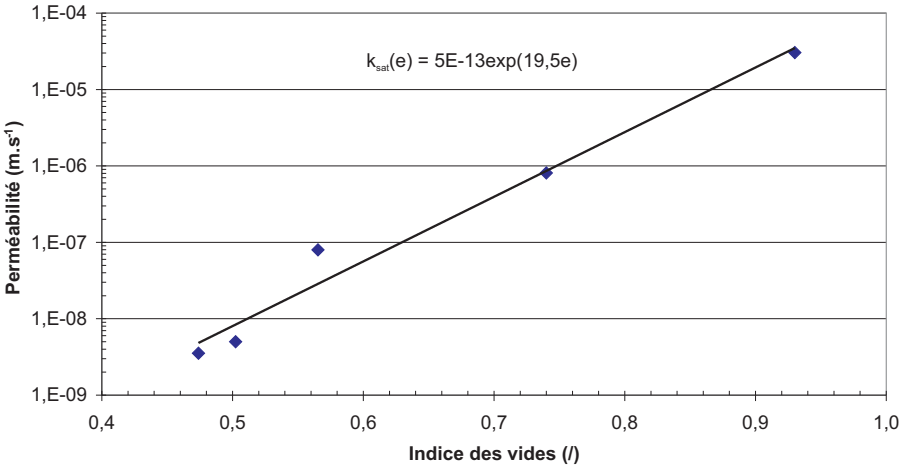

FIG. 6.1 – Évolution de la perméabilité du sable limoneux argileux en fonction de l'indice des vides, en conditions saturées et à température ambiante (22°C) .

D'après ces résultats, on peut modéliser la fonction relative à l'influence de l'indice des vides par l'équation :

$$k_e(e) = \frac{K_{sat}(e)}{K_{sat}(e_{ref})} = \exp(19,5(e - e_{ref})) \tag{6.6}$$

Effet de la désaturation

La fonction relative à l'état de désaturation k_w et la courbe de rétention ou la courbe caractéristique dépendent principalement de la répartition de la taille des pores, de leur connectivité,

et de la nature minéralogique de la phase solide. Plusieurs auteurs se sont donc attachés à établir une relation entre ces caractéristiques.

Parmi les premiers résultats, on trouve ceux de Burdine (1953) et de Brooks et Corey (1964) qui ont appliqué leurs modèles au cas des réservoirs pétrolifères. Puis de nombreuses études ont permis de préciser ce mode de calcul de la fonction k_w (Van Genuchten (1980), Fredlund et al. (1994), Fleureau et Taibi (1995)).

Dans le cas du sable limoneux argileux, une étude expérimentale (Jamin (2003)) a permis de vérifier la pertinence d'un des modèles proposés dans la littérature : celui de Fredlund et al. (1994). C'est ce modèle que l'on utilise ici pour calculer l'effet de la désaturation sur la perméabilité. Son écriture prend la forme suivante :

$$k_w(s) = \left[\frac{w(s) - w_r}{w_{sat} - w_r}\right] \frac{\int_{\ln(s)}^{\ln(s_r)} \left(\frac{w(e^y)-w(s)}{e^y} \times w'(e^y)\right) dy}{\int_{\ln(s_a)}^{\ln(s_r)} \left(\frac{w(e^y)-w(s)}{e^y} \times w'(e^y)\right) dy} \tag{6.7}$$

où s_a est la succion d'entrée d'air, s_r la succion résiduelle, y la variable d'intégration représentant le logarithme de la succion et w' la dérivée de la teneur en eau par rapport à la succion. La fonction $w(s)$ peut être déterminée à e=cte à partir de l'équation de la surface caractéristique.

La forme de l'expression mathématique de la fonction k_w décrite par l'équation (6.7) impose une faible décroissance de la perméabilité au voisinage de la succion d'entrée d'air et la rend nulle pour une succion égale à la succion résiduelle (succion à partir de laquelle la phase liquide devient a priori discontinue). Si la succion résiduelle ne dépend pas de la compacité, la succion d'entrée d'air en dépend fortement. Cette succion est un paramètre important dans la modélisation car elle définit la limite pour laquelle la perméabilité va commencer à diminuer ($s \leq s_a \Rightarrow k_w = 1, s \geq s_a \Rightarrow k_w \leq 1$).
La valeur de s_a (en kPa) a été déterminée au moyen de l'équation de la surface caractéristique pour sept indices des vides différents. La figure 6.2 présente les résultats obtenus.

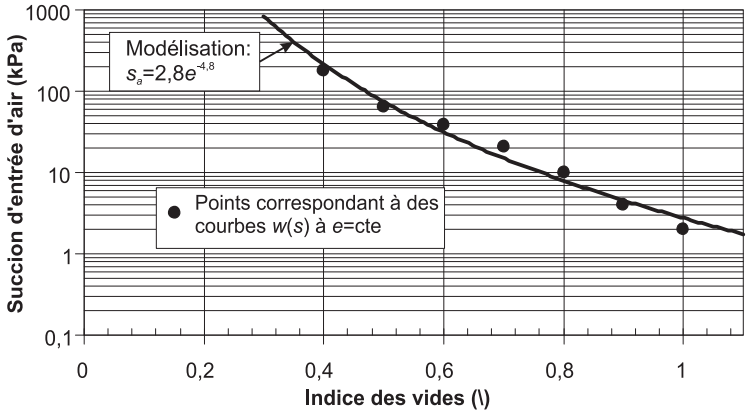

FIG. 6.2 – Évolution de la succion d'entrée d'air des courbes $w(s, e = rmcte)$ en fonction de l'indice des vides.

La courbe représente la modélisation des points établie en utilisant l'équation (1.6). L'évolution de la succion d'entrée d'air en fonction de l'indice des vides prend la forme :

$$s_a = 2,8 \times e^{-4,8} \tag{6.8}$$

Les paramètres de l'équation (6.7) étant déterminés, on peut remarquer que le découplage des différents effets établi par l'équation (6.1) n'est pas scrupuleusement respecté, car au travers du paramètre s_a, la fonction k_w dépend de l'indice des vides.

Le calcul des intégrales de l'équation (6.7) est réalisé numériquement. Le domaine $[\ln(s_a); \ln(s_r)]$ est découpé en N intervalles identiques Δy. On note $\bar{y_i}$ le milieu du $i^{\text{ième}}$ intervalle. On peut alors écrire :

$$\ln(s_a) = y_1 < y_2 < ... < y_{N+1} = \ln(s_r) \tag{6.9}$$

$$\Delta y = \frac{\ln(s_r) - \ln(s_a)}{N} \tag{6.10}$$

$$\bar{y_i} = \frac{y_i + y_{i+1}}{2} \tag{6.11}$$

Le calcul du coefficient relatif de perméabilité revient à évaluer numériquement l'expression :

$$k_w(s_j) = \left[\frac{w(s_j) - w_r}{w_{sat} - w_r}\right] \frac{\sum_{i=j}^{N+1} \left(\frac{w(\bar{y_i}) - w(s_j)}{e^{\bar{y_i}}} \times w'(e^{\bar{y_i}})\right) dy}{\sum_{i=1}^{N+1} \left(\frac{w(\bar{y_i}) - w(s_j)}{e^{\bar{y_i}}} \times w'(e^{\bar{y_i}})\right) dy} \tag{6.12}$$

La figure 6.3 présente l'évolution du coefficient relatif de perméabilité en fonction de la succion pour trois indices des vides différents. On remarque l'effet important de la succion d'entrée d'air. Au delà de cette succion, le coefficient relatif de perméabilité commence à diminuer. Comme on l'a vu dans le chapitre 4, à partir de succions de 100 à 200 kPa, les couplages hydro-mécaniques deviennent négligeables ; cela se traduit ici par des courbes quasiment parallèles.

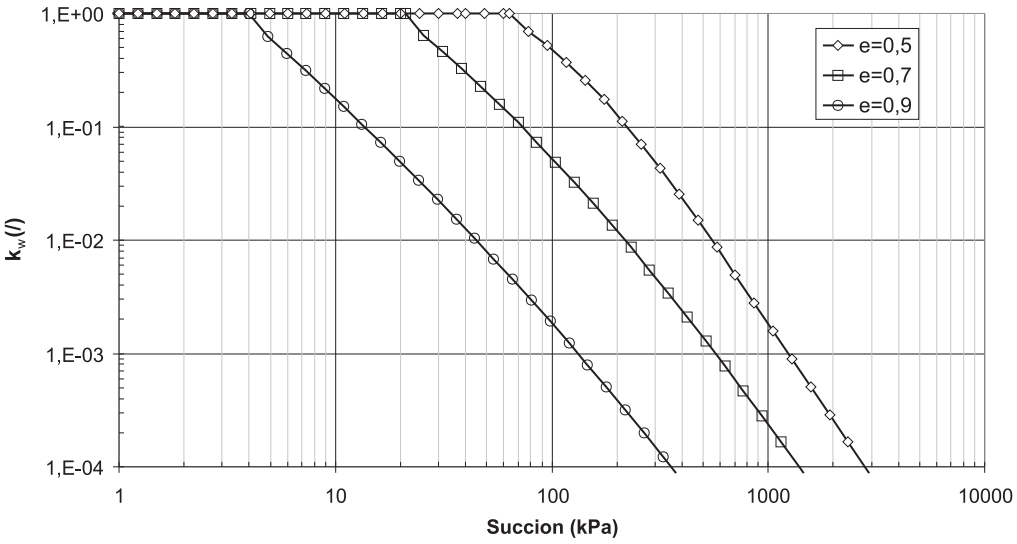

FIG. 6.3 – Evolution de la fonction k_w en fonction de la succion pour trois indices des vides différents maintenus constants.

Effet des couplages hydro-mécaniques sur le coefficient de perméabilité
A température constante ($T = T_{ref}$), l'équation (6.2) devient :

$$\frac{K_{ns}(e,s)}{K_{sat}(e_{ref})} = k_e(e) \times k_w(s) \tag{6.13}$$

On se place à la température ambiante ($T_{amb} = 22°\text{C}$) et on considère comme indice des vides de référence $e_{ref} = 0,74$. Les fonctions $K_{sat}(0,74)$, $k_e(e)$ et $k_w(s)$ sont connues. On peut donc calculer $K_{ns}(e,s)$ pour tous les couples *indice des vides - succion*.

La figure 6.4 présente l'évolution de la perméabilité du sable limoneux argileux en fonction de la succion et de l'indice des vides. Le tracé de la surface a été réalisé avec les trois courbes de la figure 6.3 donnant la perméabilité en fonction de la succion à trois indices des vides différents : 0,5, 0,7 et 0,9. La surface présente une zone plane pour les succions inférieures au seuil d'entrée d'air. Dans cette zone la valeur de la perméabilité ne dépend pas de la succion. Pour les succions supérieures au seuil d'entrée d'air, la perméabilité du milieu dépend des effets conjugués de la succion et de l'indice des vides.

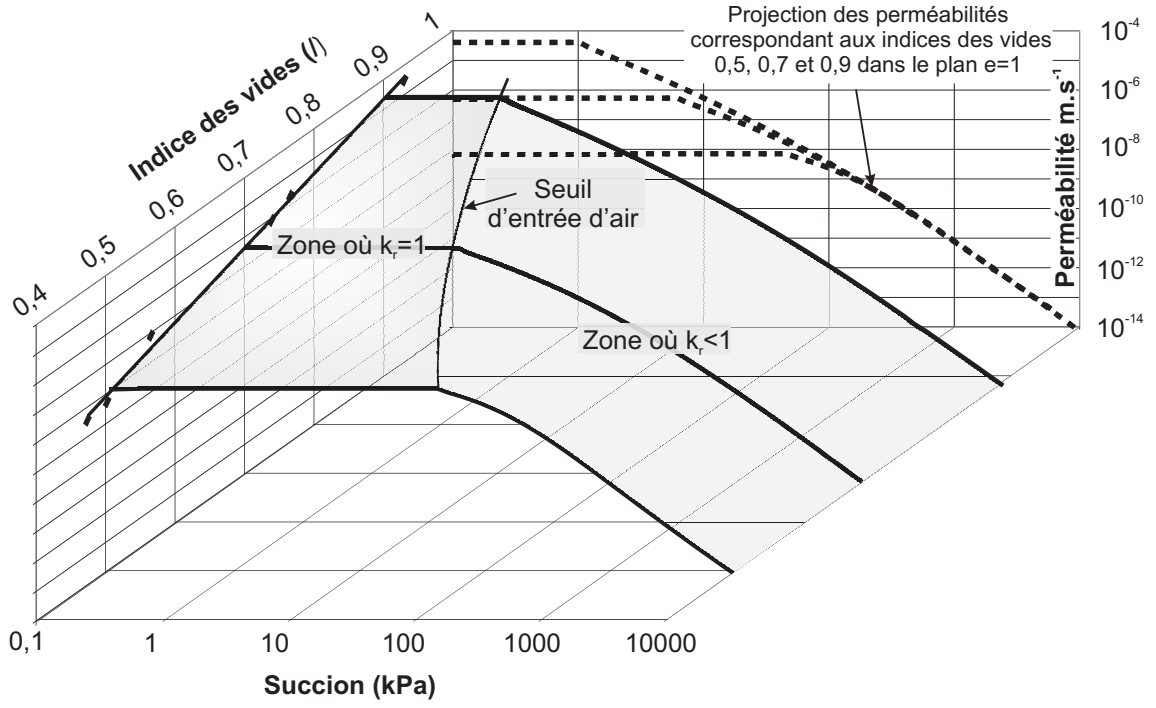

FIG. 6.4 – Évolution de la perméabilité en fonction de l'indice des vides et de la succion.

6.2 Cas des chemins de chargement hydrique

On se place dans le cas où on cherche à déterminer la perméabilité d'un matériau tout au long d'un chemin de chargement hydrique. On a vu dans le chapitre 4 que pour un indice des

vides initial donné, il existe deux relations exprimant, la teneur en eau d'une part et l'indice des vides d'autre part, en fonction de la succion. Pour le sable limoneux argileux, ces relations ont été établies pour un drainage à partir d'un état saturé.
Pour une température donnée, la succion suffit à définir totalement l'état du milieu. En prenant l'indice des vides initial comme indice des vides de référence ($e_{ref} = e_0$), le long d'un chargement hydrique monotone, la relation (6.1) prend la forme :

$$\frac{K_{ns}(T, e_0, s)}{K_{sat}(T_{ref}, e_0)} = k_T(T) \times k_e(e_0, s) \times k_w(e_0, s) \tag{6.14}$$

où $K_{ns}(T, e_0, s)$ est la perméabilité en conditions non saturées à la température T, pour un indice des vides initial e_0 et à la succion s. $K_{sat}(T_{ref}, e_0)$ est la perméabilité en conditions saturées (la succion est inférieure à la succion d'entrée d'air), à la température de référence T_{ref} et pour un indice des vides initial e_0. $k_T(T)$, $k_e(e_0, s)$ et $k_w(e_0, s)$ sont les fonctions respectivement relatives à la température, à l'indice des vides et à l'état de désaturation.

Un chemin de chargement hydrique est un chemin particulier sur la surface caractéristique. Les résultats obtenus dans le cas général sont toujours valables, mais les fonctions k_e et k_w sont partiellement à redéfinir.

Pour un chargement hydrique monotone, il existe une relation entre l'indice des vides et le couple *indice des vides initial - succion* ($e = e(s, e_0)$). L'équation (6.6), qui définit la fonction relative à l'effet de l'indice des vides, devient :

$$k_e(s, e_0) = \exp(19,5 \times (e(s, e_0) - e_{ref})) \tag{6.15}$$

On peut prendre l'état initial comme état de référence, ce qui se traduit par $e_0 = e_{ref}$. De plus, on a vu dans le chapitre 4 que l'indice des vides peut s'exprimer en fonction de la succion et de l'indice des vides initial sous la forme $e(s, e_0) = \alpha(s) \times e_0$. On obtient finalement :

$$k_e(s, e_0) = \exp(19,5 \times e_0 \times (\alpha(s) - 1)) \tag{6.16}$$

Dans l'expression de la fonction k_w, deux changements sont à prendre en compte :

1. La relation entre succion et teneur en eau qui est donnée par l'équation (4.16).
2. La succion d'entrée d'air qui dépend de l'indice des vides initial.

Les cinq succions d'entrée d'air correspondant aux cinq séries d'échantillons étudiées dans le chapitre 4 ont été déterminées. La figure 6.5 présente les résultats obtenus. Le trait continu représente la modélisation obtenue avec l'équation (1.6). La fonction de modélisation est :

$$s_a = 0,4 \times e_0^{-7} \tag{6.17}$$

La figure 6.6 présente l'évolution de la fonction k_w en fonction de la succion dans le cas où on suit un chemin de chargement hydrique à partir d'un état saturé, pour trois indices des vides initiaux différents. Globalement la forme des courbes est similaire à celle observée sur la figure 6.3, mais dans ce cas, l'indice des vides des vides n'est pas constant, il diminue quand la succion augmente. Cet effet induit une décroissance plus rapide de la fonction k_w.

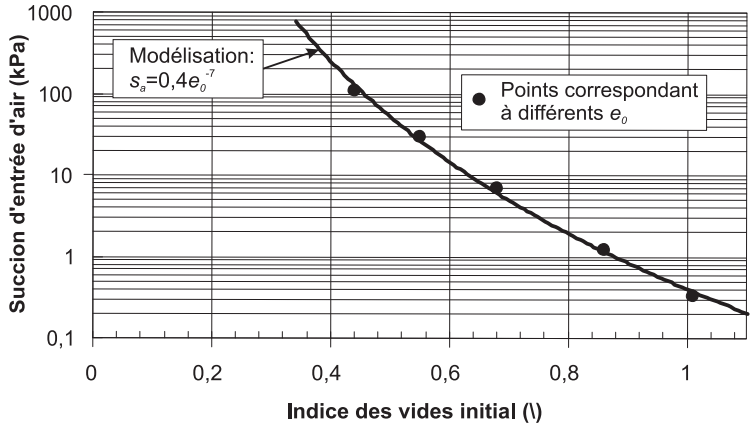

FIG. 6.5 – Évolution de la succion d'entrée d'air des courbes de rétention en fonction de l'indice des vides initial.

A la température ambiante ($T_{amb} = 22°$), la fonction (6.14) prend la forme :

$$\frac{K_{ns}(e_0, s)}{K_{sat}(e_0)} = k_e(s, e_0) \times k_w(s, e_0) \tag{6.18}$$

On considère comme indice des vides de référence $e_{ref} = 0,74$. Les fonctions $K_{sat}(0,74)$, $k_e(s, e_0)$ et $k_w(s, e_0)$ sont connues. On peut donc calculer $K_{ns}(e_0, s)$ pour tous les couples *indice des vides initial - succion.*

La figure 6.7 présente l'évolution de la perméabilité du sable limoneux argileux en fonction de la succion pour trois indices des vides initiaux différents. Si l'effet de l'indice des vides initial est majeur pour les faibles succions, son importance diminue avec la désaturation. Après la succion d'entrée d'air, l'évolution de la perméabilité peut être approchée par des droites. Ces droites, qui correspondent à différents indices des vides initiaux, sont quasiment parallèles.

La figure 6.8 présente l'évolution de la perméabilité le long du chemin de désaturation pour un indice des vides initial de 0,68 dans l'espace *perméabilité - indice des vides - succion.* Le tracée de la perméabilité correspondant au chemin de désaturation appartient à la surcace de perméabilité décrite à la figure 6.4.

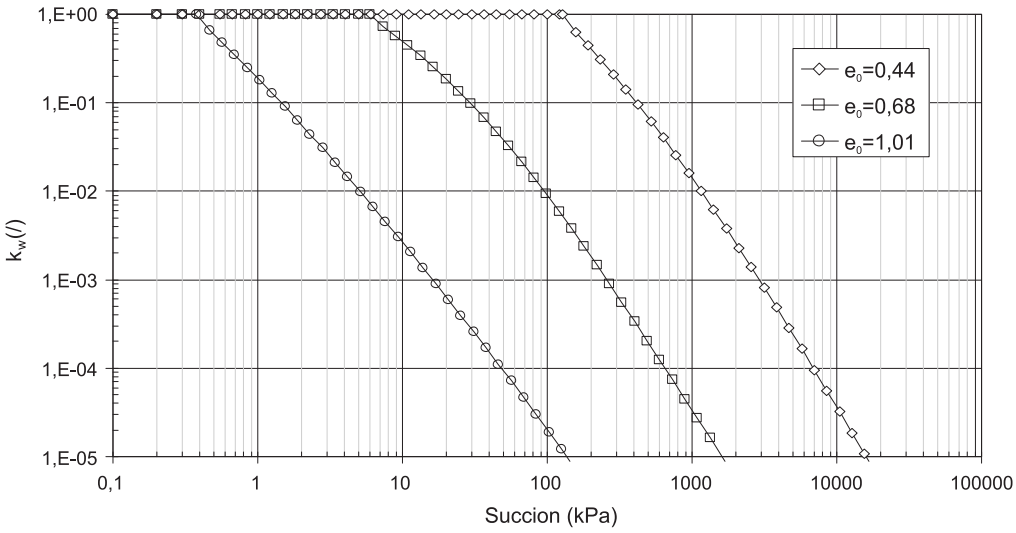

FIG. 6.6 – Évolution de la fonction k_w en fonction de la succion pour trois indices des vides initiaux différents ; projection dans un plan e =cte.

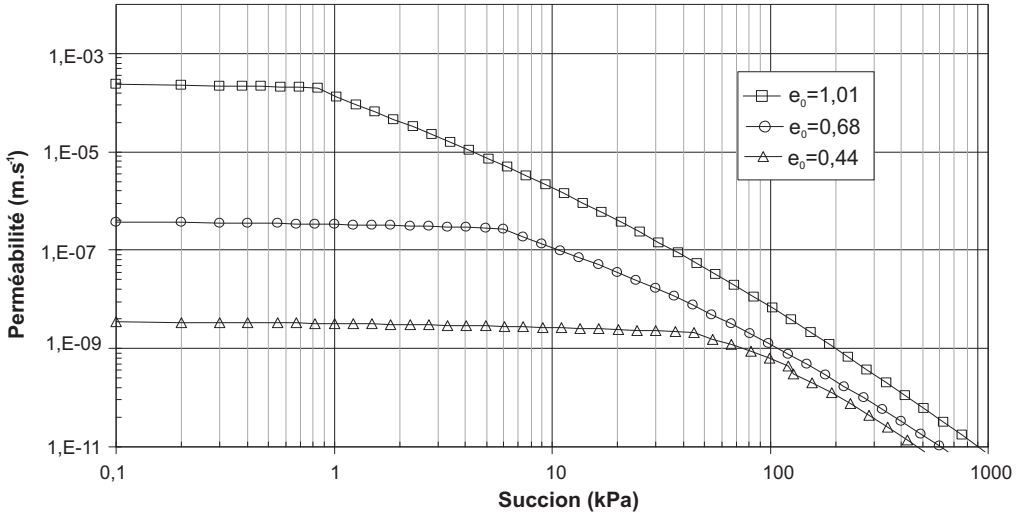

FIG. 6.7 – Évolution de la perméabilité en fonction de la succion pour trois indices des vides initiaux différents ; projection dans un plan e =cte.

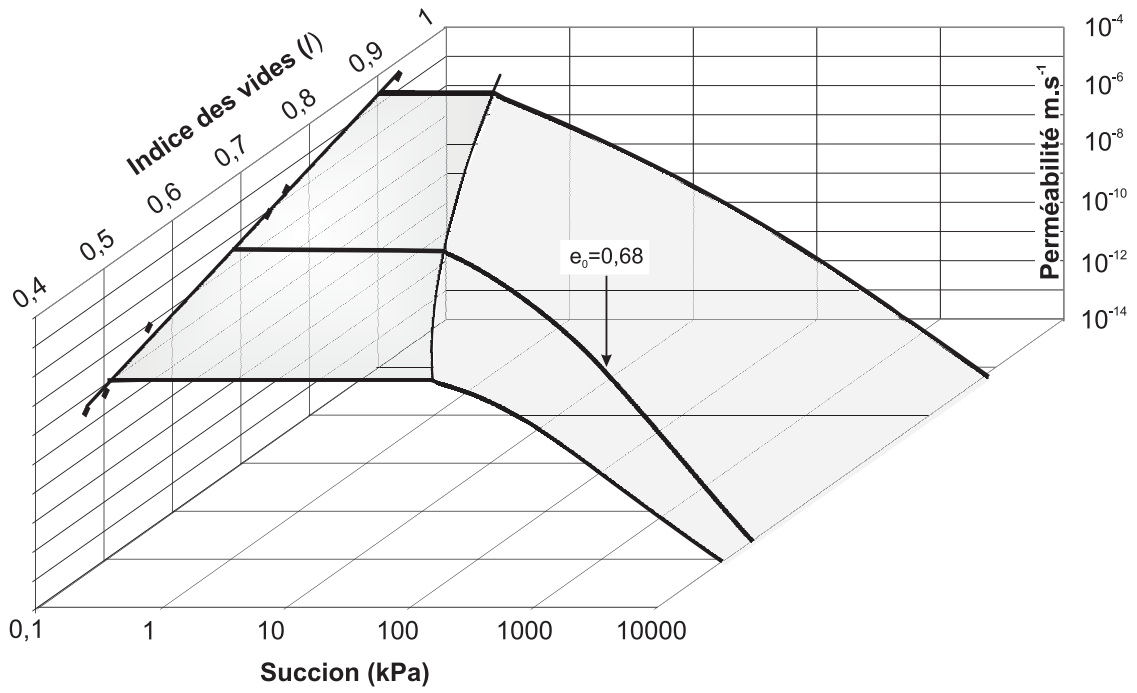

FIG. 6.8 – Evolution de la perméabilité le long du chemin de désaturation, pour un indice des vides initial de 0,68 sur la surface de perméabilité présentée à la figure 6.4

Conclusion

Dans ce chapitre, une méthode de calcul de la perméabilité a été présentée. Cette méthode permet de prendre en compte les effets de la température, de l'indice des vides et de la désaturation de façon découplée. Elle a été illustrée dans le cas du sable limoneux argileux à deux niveau :

- Un niveau général : connaissant complètement l'état du matériau (température, indice des vides et teneur en eau) la méthode proposée permet de déterminer la perméabilité correspondante. A température constante, ce résultat se matérialise par une surface dans l'espace *indice des vides - teneur en eau - perméabilité*.
- Un niveau particulier des chemins de chargement hydrique : connaissant les équations de ces chemins, la méthode proposée permet de déterminer l'évolution de la perméabilité du milieu durant la désaturation.

Conclusion

Cette partie a été consacrée à l'étude du comportement hydrique en s'intéressant particulièrement à la prise en compte des couplages hydro-mécaniques et à l'effet de la température.

Un modèle a été établi en se basant sur le développement de la différentielle de la succion par rapport à différents jeux de variables d'état pouvant caractériser un état thermo-hydro-mécanique. Ce modèle relie les variations de succion, de teneur en eau, de température et d'indice des vides entre elles.

En considérant plusieurs cas particuliers pour lesquels certaines variables sont maintenues constantes, ce modèle se décline en plusieurs lois d'états.

A température constante, on obtient une loi d'état qui relie les variations de succion, de teneur en eau et d'indice des vides. Cette loi met en évidence l'existence d'une relation entre ces trois variables. Cette relation peut être représentée comme une surface dans l'espace *succion - teneur en eau - indice des vides*. Cette surface donne l'ensemble des états que peut prendre le sol. On la nomme surface caractéristique.

A succion constante, on obtient une loi d'état qui relie les variations de teneur en eau et de succion. Cette loi d'état constitue un modèle thermo-hydrique qui permet de déterminer les variations de teneur en eau induites par un changement de température. Ce modèle permet, à partir de la donnée d'une surface caractéristique, ou d'une courbe de rétention, obtenue à une température donnée, de prédire cette même surface ou courbe de rétention à une autre température.

Les chemins de chargement hydrique, à partir d'un état saturé, ont été déterminés expérimentalement pour cinq indices des vides initiaux différents.

Deux types d'expérimentation ont été utilisés, la plaque de pression et le banc de sorption, afin de considérer tous les états hydriques, de la saturation à l'état sec. Pour chaque valeur de succion imposée, la teneur en eau et l'indice des vides ont été mesurés. On a ainsi obtenu les courbes de rétention et les courbes de tassement hydrique pour les cinq indices des vides initiaux étudiés.

A partir de ces données, une modélisation paramétrique des chemins de chargement hydrique dans l'espace *succion - teneur en eau - indice des vides* a été établie. Cette modélisation exprime la teneur en eau d'une part, et l'indice des vides d'autre part, en fonction de la succion et de l'indice des vides initial.

Les expressions analytiques des chemins de chargement hydrique ont permis de déterminer les variations de la teneur en eau en fonction de l'indice des vides à succion constante. Pour les indices des vides faibles, ces variations suivent la droite de saturation ($w = e/G_s$) jusqu'à une limite w_{int} à partir de laquelle on observe un autre comportement linéaire mais avec un changement de pente (la nouvelle pente est notée a). w_{int} et a sont des fonctions de la suc-

cion. Finalement, une expression analytique de la surface caractéristique faisant intervenir les paramètres w_{int} et a a été obtenue. Elle exprime la teneur en eau en fonction de la succion et de l'indice des vides. Outre le fait que cette surface représente l'ensemble des états que peut prendre le sol, elle permet de déterminer les courbes caractéristiques à différents indices des vides, les courbes de tassement hydrique à différentes teneurs en eau constantes et les variations de teneur en eau en fonction de l'indice des vides à succion constante. Cette surface constitue un outil permettant d'appréhender les couplages hydro-mécaniques dans les sols.

Le modèle thermo-hydrique développé précédemment a été utilisé pour prédire, à partir de données mesurées à température ambiante, les courbes de rétention ou la surface caractéristique à une autre température pour différents matériaux.

Le premier matériau qui a été testé est une céramique en terre cuite, matériau considéré comme indéformable sous des sollicitations hydriques. Sa courbe de rétention a été déterminée expérimentalement à 20 et 60°C. A partir de la courbe correspondant à 20°C, le modèle thermo-hydrique a permis de prédire avec succès la courbe correspondant à 60°C.

De la même manière, dans le cas du sable limoneux argileux, le modèle thermo-hydrique a été utilisé pour prédire l'effet de la température sur d'une part, la surface caractéristique, et d'autre part, la courbe de rétention correspondant à un indice des vides initial de 0,86. Des expérimentations menées à 20 et 60°C ont permis de valider les résultats donnés par le modèle sur la courbe de rétention.

Enfin, le modèle thermo-hydrique a été testé sur différents résultats de la littérature. Le bon accord entre les résultats théoriques donnés par le modèle et les résultats expérimentaux fournis par les différents auteurs ont montré la capacité du modèle à prédire le comportement hydrique en température d'une large classe de matériaux.

Le dernier chapitre de cette partie a été consacré à la détermination de la perméabilité du sable limoneux argileux. La méthode de calcul proposée prend en compte les effets de la température, de l'indice des vides et de la désaturation de façon découplée. La perméabilité du sable limoneux argileux a été calculée dans deux cas : d'une part le cas général, connaissant l'état du milieu (température, indice des vides, succion) on a déterminé sa perméabilité, et d'autre part dans le cas d'un chemin de chargement hydrique, connaissant le comportement hydrique du milieu, on a déterminé l'évolution de la perméabilité le long de ce chemin.

Deuxième partie

Comportement mécanique des sols. Effets de la température et de la succion.

Introduction

Cette deuxième partie est consacrée à l'étude des effets de la température et de la succion sur le comportement mécanique des sols. Elle est scindée en trois chapitres.

Le chapitre 7 expose tout d'abord quelques aspects généraux sur le comportement mécanique. Ensuite, une analyse bibliographique donne une synthétise des résultats les plus importants relatifs à l'effet de la température sur le comportement des sols, notamment la consolidation thermique, l'évolution des indices de gonflement et de compression et l'effet d'un chargement thermique sur la surface de charge. Cette analyse bibliographique aborde également les principaux résultats relatifs à l'effet de la succion sur le comportement des sols, notamment l'effet de la succion sur les indices de gonflement et de compression ainsi que sur la surface de charge.

Le chapitre 8 donne une description du sol utilisé dans cette étude, des dispositifs expérimentaux et des méthodes employées.
Le sol utilisé est un limon appelé limon de Sion (Suisse). Sa fraction argileuse est faible. Ce sol a déjà fait l'objet d'une caractérisation dont on rappellera les principaux résultats.
Le dispositif expérimental utilisé est une cellule d'essais thermo-hydro-mécanique isotrope. Elle permet d'imposer simultanément des chargements en température, en succion et en contrainte isotrope. Le fonctionnement de cette cellule est décrit de façon détaillée en considérant chacun des circuits de contrôle ou de mesure des différentes variables expérimentales. Enfin le protocole de fabrication des échantillons, le protocole des essais et le programme expérimental sont présentés.

Le chapitre 9 expose les résultats de l'étude expérimentale. Dans un premier temps, on exploite les résultats donnés par la réalisation de l'état initial des essais. Ils concernent le comportement hydrique du limon de Sion et son comportement thermique sous différentes succions. Ensuite sont présentés les neuf essais de consolidation isotrope réalisés à trois succions et trois températures différentes.
Pour chacun de ces essais, les indices de gonflement et de compression, ainsi que la contrainte de préconsolidation, sont déduits. On peut donc étudier l'influence de la température et de la succion sur ces trois paramètres majeurs de la caractérisation du comportement mécanique. Enfin, on propose une modélisation de l'évolution de la contrainte de préconsolidation en fonction de la température et de la succion.

Chapitre 7

Cadre général de l'étude

7.1 Contexte et motivations

Dans de nombreuses applications liées au génie environnemental, les sollicitations auxquelles le sol est soumis sont de nature complexe, à la fois thermique, hydrique et mécanique. On peut citer par exemple le stockage de déchets nucléaires en formations géologiques profondes, le stockage de chaleur en sous-sol (Saix (1987)), la climatisation des bâtiments par des pieux échangeurs de chaleur (Laloui et al. (2003)) ou encore les aménagements souterrains utilisés pour l'exploitation de la géothermie (Rabemanana et al. (2003)). Un des enjeux majeurs pour les géotechniciens est de pouvoir prédire les déformations induites par ce type de sollicitations. Pour cela des modèles de comportement mécanique qui intègrent les aspects thermique et hydrique doivent être développés. L'élaboration de ces modèles s'appuie sur l'expérience, et les résultats de la littérature concernant les effets couplés de la température et de la succion sont encore peu nombreux.

C'est dans ce cadre que l'on propose une étude expérimentale qui vise à évaluer l'influence du chargement thermique ou hydrique sur le comportement mécanique du limon de Sion. Cette étude comprend 9 essais isotropes, menés à trois niveaux différents de température et de succion. Ces essais permettent notamment de déterminer l'effet de la température et de la succion sur des paramètres essentiels du comportement mécanique, à savoir les indices de gonflement et de compression ainsi que la contrainte de préconsolidation.

Les essais thermo-hydro-mécaniques envisagés ont une durée d'environ un mois. En effet la réponse d'un sol à un chargement n'est pas instantanée ; on observe un fluage dû aux transferts hydriques dans le milieu. Après chaque chargement, qu'il soit de nature thermique, hydrique ou mécanique, il faut attendre que l'équilibre soit atteint. Pour un limon, il est atteint au bout de quelques jours mais peut prendre bien plus longtemps dans le cas des sols à faible perméabilité. Ces durées expérimentales rendent difficiles les campagnes d'essais de grandes ampleurs. Pour pallier ce problème, l'étude concernant l'effet de la température et de la succion sur le comportement mécanique du limon de Sion a été réalisée en collaboration entre le Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC) de l'Université Montpellier 2 (UM2) et le Laboratoire de Mécanique des Sols (LMS) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Deux membres du LMS sont particulièrement concernés : Lyesse Laloui, chef du groupe Géomécanique environnementale et Bertrand François, doctorant.

A la fin de cette partie, afin de donner, autant que faire se peut, plus de légitimité aux interprétations et aux modélisations avancées, les résultats obtenus par l'équipe du LMS seront adjoints à ceux de cette étude. Ces résultats sont empruntés à François et al. (2007). Dans cet article, ils sont présentés en terme de contrainte effective tandis que dans ce manuscrit, ils le sont en terme de contrainte nette. Les interprétations faites ici de ces résultats n'engagent que l'auteur de ce mémoire.

7.2 Généralités sur le comportement mécanique des sols

7.2.1 Notion de contrainte effective

– *Sol saturé*
Dans un milieu granulaire saturé d'un liquide, les efforts extérieurs appliqués à l'ensemble du milieu sont repris, d'une part, par la phase solide qui induit les efforts intergranulaires et, d'autre part, par la phase liquide qui induit la pression de l'eau. La contrainte totale σ_{ij} est donc égale à la somme de la contrainte intergranulaire σ'_{ij} et de la pression de la phase liquide p^*_e. La contrainte intergranulaire qui pilote les déformations est appelée contrainte effective. Cette notion a été introduite par Terzaghi en 1923 (Terzaghi (1936), Terzaghi (1943)) et est définie de la façon suivante :

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - p^*_e \times \delta_{ij} \tag{7.1}$$

avec δ_{ij} le symbole de Kronecker.
Cette décomposition des contraintes se justifie pleinement dans les milieux granulaires car les interfaces solide-liquide sont franches et les interactions entre les deux phases peuvent être considérées de nature purement mécanique (Delage et Cui (2001)). Dans les sols fins, les interactions physico-chimiques ne sont pas négligeables et par conséquent, la décomposition décrite par l'équation (7.1) n'est plus si évidente. Néanmoins, l'observation expérimentale a prouvé la validité du concept de contrainte effective pour les sols fins (Delage et Cui (2001)).

– *Sol non saturé*
Bishop (Bishop (1959)) a proposé d'élargir la notion de contrainte effective au cas des sols non saturés. L'expression de la contrainte effective qu'il propose, dite contrainte effective généralisée de Bishop, fait apparaître la contribution des pressions des deux fluides en présence dans le milieu. L'expression de la contrainte effective prend la forme :

$$\sigma'_{ij} = (\sigma_{ij} - p^*_g \times \delta_{ij}) + \chi(S_r) \times (p^*_g - p^*_e) \times \delta_{ij} \tag{7.2}$$

avec S_r le degré de saturation et p^*_g la pression de la phase gazeuse.
La fonction $\chi(S_r)$ doit prendre des valeurs comprises entre 0 et 1 : elle est nulle pour les états secs et égale 1 à la saturation. Plusieurs fonctions ont été utilisées pour définir ce paramètre. Dernièrement, certains auteurs (Khalili et Khabbaz (1998); Loret et Khalili (2002)) ont utilisé la relation $\chi = \left(\frac{s_a}{s}\right)^\Gamma$ (s_a est la succion d'entrée d'air et Γ est un paramètre lié au matériau) mais dans la plupart des études, cette fonction est prise égale au degré de saturation ($\chi = S_r$). Dans ce cas, la contrainte effective s'écrit :

$$\sigma'_{ij} = (\sigma_{ij} - p^*_g \times \delta_{ij}) + S_r \times (p^*_g - p^*_e) \times \delta_{ij} \tag{7.3}$$

Limite de la notion de contrainte effective

Des essais expérimentaux ont montré que l'approche du comportement mécanique des sols utilisant la contrainte effective n'était pas capable de décrire le phénomène d'effondrement. Pour illustrer ce phénomène, prenons l'exemple d'un essai œdométrique réalisé sur un lœss peu plastique (Cui et al. (2004), figure 7.1). On commence par imposer un chargement mécanique à l'échantillon jusqu'à une contrainte totale de 200 kPa en maintenant la teneur en eau constante ($w = 14\%$). Puis, en maintenant la contrainte totale constante, on diminue la succion. Pendant l'imbibition se produit une augmentation brutale de la déformation volumique de 5%. C'est le phénomène d'effondrement.

Pendant l'imbibition, la contrainte effective diminue. Ce relâchement, par définition, devrait entraîner une diminution de la déformation or c'est l'inverse qui est observé. Le phénomène d'effondrement met donc en défaut la notion de contrainte effective.

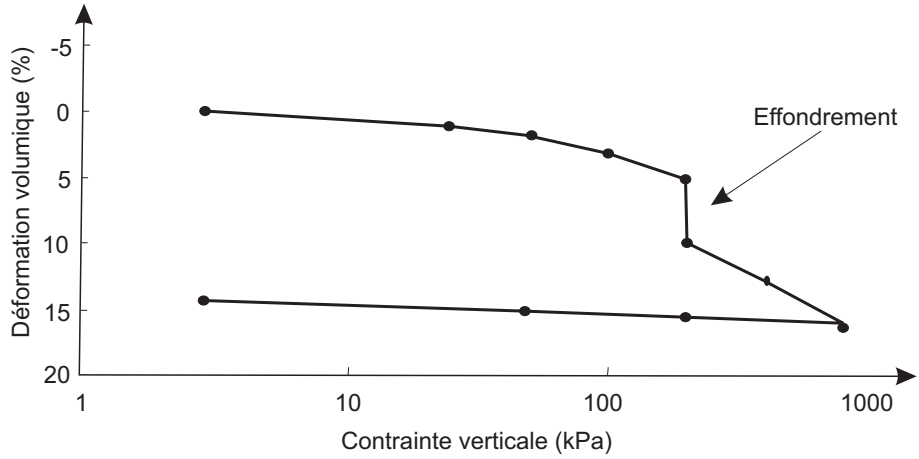

FIG. 7.1 – Effondrement observé lors d'une consolidation œdométrique réalisée sur un lœss (Cui et al. (2004)).

Variables indépendantes

Devant la difficulté de trouver une variable unique permettant de définir les chargements mécaniques, certains auteurs (Coleman (1962), Bishop et Blight (1963)) ont suggéré d'utiliser deux variables indépendantes pour décrire l'état de contrainte d'un milieu. Fredlund (1978) montre que la description du comportement des sols non saturés passe par deux variables séparées dont il propose trois jeux possibles :

- $(\sigma_{ij} - p_g^* \times \delta_{ij}\ ;\ p_g^* - p_e^*)$
- $(\sigma_{ij} - p_e^* \times \delta_{ij}\ ;\ p_g^* - p_e^*)$
- $(\sigma_{ij} - p_g^* \times \delta_{ij}\ ;\ \sigma_{ij} - p_e^* \times \delta_{ij})$

En règle générale, c'est le premier jeu de variables qui est utilisé. La première composante définit la contrainte nette ($\sigma_{net} = \sigma_{ij} - p_g^* \times \delta_{ij}$) et la seconde définit la succion ($s = p_g^* - p_e^*$).

Derniers développements théoriques

Dernièrement, certains cadres théoriques ont permis de rendre à nouveau le concept de contrainte effective cohérent avec les observations expérimentales (Laloui et Nuth (2005)). L'idée de base consiste à considérer que la succion induit deux effets :

- une modification de la contrainte effective subie par le squelette

– une modification de la loi comportement et de la surface de charge. De ce fait la limite entre les comportements élastique et plastique peut être ainsi définie en fonction de la succion et de la contrainte effective, ce qui permet, selon les auteurs, de modéliser les phénomènes d'effondrement.

Dans ce mémoire, on fait le choix d'utiliser deux variables séparées, la contrainte nette ($\sigma_{net_{ij}} = \sigma_{ij} - p_g^* \times \delta_{ij}$) et la succion ($s = p_g^* - p_e^*$). Pour alléger les différents développements, la contrainte nette est simplement appelée contrainte. Toutes les variables utilisées pour définir l'état de contrainte p, q, p_c, σ_c, ... font référence aux contraintes nettes. Cette règle générale sera levée dans certains cas spécifiques. Dans ces cas les variables écritent en contrainte nette seront notées avec l'indice *net* et celle écritent en contrainte effective porteront un exposant '

7.2.2 Variables utilisées pour caractériser les états de contrainte et de déformation

On s'intéresse ici aux déformations volumiques des sols. Dans ce cas, les états de contrainte et de déformation peuvent être décrits par des variables scalaires. On se propose de présenter ci-dessous celles qui seront utilisées dans la suite de ce mémoire.

Plusieurs variables permettent de traduire les variations de volume d'un sol, mais les plus couramment utilisées sont la déformation volumique ϵ_{vol} ou la variation de l'indice des vides Δe. Ces deux variables sont définies par les relations suivantes, dans lesquelles e_0 est l'indice des vides avant déformation.

$$\epsilon_{vol} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \tag{7.4}$$

$$\Delta e = -\epsilon_{vol} \times (1 + e_0) \tag{7.5}$$

où ϵ_1, ϵ_2, ϵ_3 sont les composantes du tenseur des déformations exprimé dans les directions principales.
Le signe négatif s'explique par le fait que les déformations sont comptées positivement quand le milieu se contracte.
Pour caractériser l'état de contrainte du milieu, on utilise la contrainte moyenne notée p et la contrainte déviatorique notée q. Ces deux contraintes sont définies par les relations suivantes :

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \tag{7.6}$$

$$q = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2}} \tag{7.7}$$

où σ_1, σ_2, σ_3 sont les composantes du tenseur des contraintes exprimé dans les directions principales.
En conditions triaxiales, le milieu est soumis à une contrainte verticale σ_v et une contrainte radiale σ_r. Les différentes variables liées aux états de contrainte et de déformation prennent les formes suivantes ($\underline{\underline{\epsilon}}$ et $\underline{\underline{\sigma}}$ étant respectivement les tenseurs de déformation et de contrainte exprimés dans un repère cartésien) :

$$\underline{\underline{\epsilon}} = \begin{bmatrix} \epsilon_v & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_r & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_r \end{bmatrix} \tag{7.8}$$

$$\epsilon_{vol} = \epsilon_v + 2 \times \epsilon_r \tag{7.9}$$

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{bmatrix} \sigma_v & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_r & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_r \end{bmatrix} \tag{7.10}$$

$$p = \frac{1}{3} \times (\sigma_v + 2 \times \sigma_r) \tag{7.11}$$

$$q = \sigma_v - \sigma_r \tag{7.12}$$

En conditions isotropes, les contraintes verticale et radiale sont égales à la contrainte isotrope σ_{iso}. ϵ_{vol}, p et q s'écrivent :

$$\epsilon_{vol} = \epsilon_v + 2 \times \epsilon_r \tag{7.13}$$

$$p = \sigma_{iso} \tag{7.14}$$

$$q = 0 \tag{7.15}$$

Dans un essai œdométrique, les déformations radiales sont nulles. Les variables définissant l'état de déformation s'écrivent donc :

$$\underline{\underline{\epsilon}} = \begin{bmatrix} \epsilon_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{7.16}$$

$$\epsilon_{vol} = \epsilon_v \tag{7.17}$$

L'état de contrainte qui correspond à ce type de chargement est identique à celui correspondant à un chargement triaxial mais dans ce cas, seule la contrainte verticale est imposée, la contrainte radiale est une contrainte induite par la condition aux limites radiales de déplacement nul. Dans le domaine élastique, la relation entre σ_v et σ_r s'obtient à partir des équations du comportement et s'écrit :

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_v} = k_0 = \frac{\nu}{1 - \nu} \tag{7.18}$$

où k_0 est une notation simplifiée du rapport entre σ_v et σ_r et ν le coefficient de Poisson. D'après Biarez et Hicher (1994) il existe aussi une relation entre ces deux contraintes dans le domaine plastique qui s'écrit :

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_v} = k_0 = 1 - \sin\delta \tag{7.19}$$

où δ est l'angle de frottement interne du sol. Dans ce cas, le rapport k_0 est nommée constante de Jacky, du nom de celui qui a établi cette relation en 1944.
On peut donc exprimer la contrainte moyenne, la contrainte déviatorique et leur rapport η en fonction de la contrainte verticale et du rapport k_0 (en restant attentif au fait que, suivant que l'on se trouve dans le domaine élastique ou plastique, ce rapport n'a pas la même valeur) :

$$p = \frac{(1 + 2 \times k_0) \times \sigma_v}{3} \tag{7.20}$$

$$q = (1 - k_0) \times \sigma_v \tag{7.21}$$

$$\eta = \frac{q}{p} = \frac{3 \times (1 - k_0)}{1 + 2 \times k_0} \tag{7.22}$$

7.2.3 Déformation volumique des sols

On considère des chemins de chargement en conditions triaxiales avec des rapports η constants. Les résultats expérimentaux obtenus dans un tel cas peuvent être approchés dans un plan $\ln(p)$-e par deux droites comme le schématise la figure 7.2. La première droite, de pente κ, traduit un comportement élastique tandis que la seconde, de pente λ, traduit un comportement plastique. κ est appelé indice de gonflement et λ indice de compression. Si l'axe des abscisses est tracé en échelle logarithmique décimale, les indices κ et λ sont respectivement notés C_s et C_c.
Sur un sol vierge, qui n'a donc subi aucune histoire mécanique, la consolidation est plastique dès les faibles valeurs de contrainte. La contrainte correspondant au point d'intersection entre la droite de pente κ et la droite de pente λ est la contrainte maximale que le sol a subi. Cette valeur, notée p_c, est appelée contrainte moyenne de préconsolidation (la notation générale de la contrainte de préconsolidation est σ_c). Si la contrainte actuelle est inférieure à cette limite, le sol est dit surconsolidé et si la contrainte actuelle est égale à cette limite, le sol est dit normalement consolidé.

D'après certains auteurs (Biarez et Hicher (1994), Verbrugge et Fleureau (2002)), les droites correspondant au domaine plastique, pour des chemins de contrainte pour lesquels le rapport $\eta = q/p$ =cte, sont parallèles . En d'autres termes, la pente de la droite de consolidation λ ne dépend pas de η. Ce point a d'ailleurs été vérifié expérimentalement sur un sable limoneux argileux par Jamin (2003).

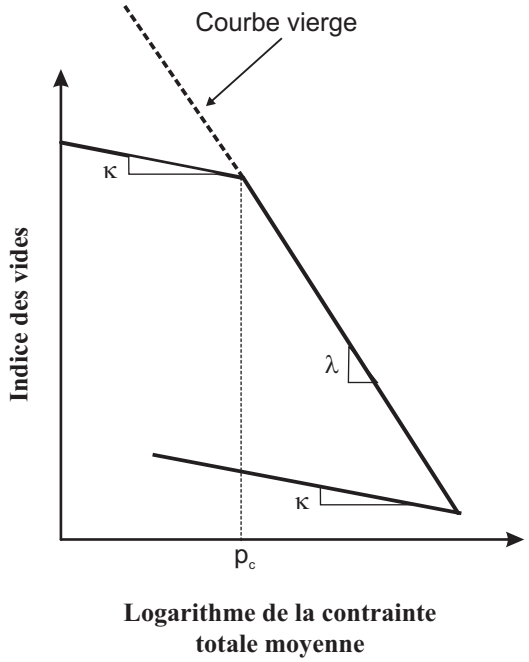

FIG. 7.2 – Consolidation mécanique.

7.2.4 Critère de plasticité - Surface de charge

Dans l'espace des contraintes, les valeurs de la contrainte de préconsolidation décrivent la surface de charge du sol. Plusieurs modèles élastoplastiques ont été développés et leur surface de charge dérive, la plupart du temps, de celle du modèle de Cam-Clay modifié (Roscoe et Burland (1968)) valable dans le cas saturé. C'est cette dernière que l'on présente ici.
Dans un plan contrainte effective moyenne-contrainte déviatorique $(p' - q)$, la surface de charge de ce modèle prend une forme elliptique comme montré sur la figure 7.3. Son équation s'écrit :

$$\frac{q^2}{M^2 p'^2} + 1 - \frac{p'_c}{p'} = 0 \tag{7.23}$$

où M qui est aussi la pente de la droite d'état critique, définit l'élancement de l'ellipse et p'_c est le paramètre d'écrouissage. M peut être calculé à partir de l'angle de frottement interne par la relation :

$$M = \frac{6 \times \sin\delta}{3 - sin\delta} \tag{7.24}$$

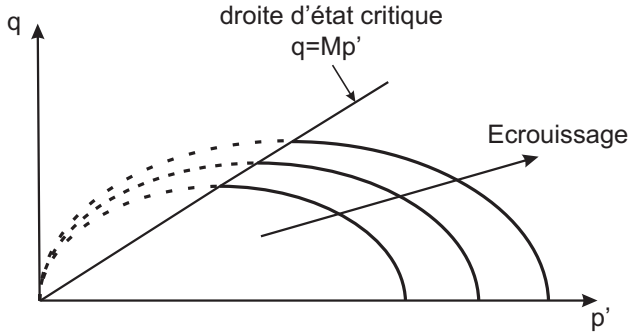

FIG. 7.3 – Surface de charge du modèle Cam-Clay modifié.

7.3 Synthèse bibliographique

Cette section est consacrée à une synthèse bibliographique concernant l'influence de la température et de la succion sur les principales caractéristiques rhéologiques des sols non saturés.

7.3.1 Consolidation thermique et effet de la température sur le comportement mécanique

Consolidation thermique

De nombreuses études (Plum et Esrig (1969), Hueckel et Baldi (1990), Saix (1991), Sultan et al. (2002), Cekerevak (2003), Tang (2005)) ont abordé le comportement des sols sous chargement thermique. Il a notamment été mis en évidence que ce comportement dépendait fortement de l'état mécanique du matériau. Cet état peut être partiellement défini au travers

d'un paramètre appelé degré de surconsolidation (*Over Consolidation Ratio*). Pour un état de contrainte σ quelconque, l'OCR s'écrit :

$$OCR = \frac{\sigma_{max}}{\sigma} \tag{7.25}$$

où σ_{max} est la contrainte mécanique maximale subie par le sol.
L'OCR est donc un paramètre supérieur ou égal à l'unité. Si l'OCR est égal à l'unité, l'état du sol est dit normalement consolidé.

Pour l'analyse de la consolidation thermique, on s'appuie sur les résultats de Cekerevak (2003) qui sont représentatifs de ce que l'on trouve dans la littérature. Il a réalisé une étude sur le comportement thermo-mécanique d'un kaolin (argile). Il s'est notamment intéressé aux changements de volume associés au chargement thermique. Sur le graphe de la figure 7.4, est représentée l'évolution de la déformation volumique des échantillons d'argile en fonction de la température pour cinq OCR différents. Pour les états correspondant à un OCR faible (ici jusqu'à une valeur de deux, mais cette limite dépend du matériau), le matériau a un comportement contractant dès le début du chargement thermique. Pour les OCR plus élevés, l'argile commence par se dilater pour de faibles températures puis se contracte pour des températures plus élevées. On peut définir une température limite qui correspond au passage entre comportement dilatant et comportement contractant. Il apparaît que cette température limite augmente avec l'OCR (Sultan et al. (2002)).

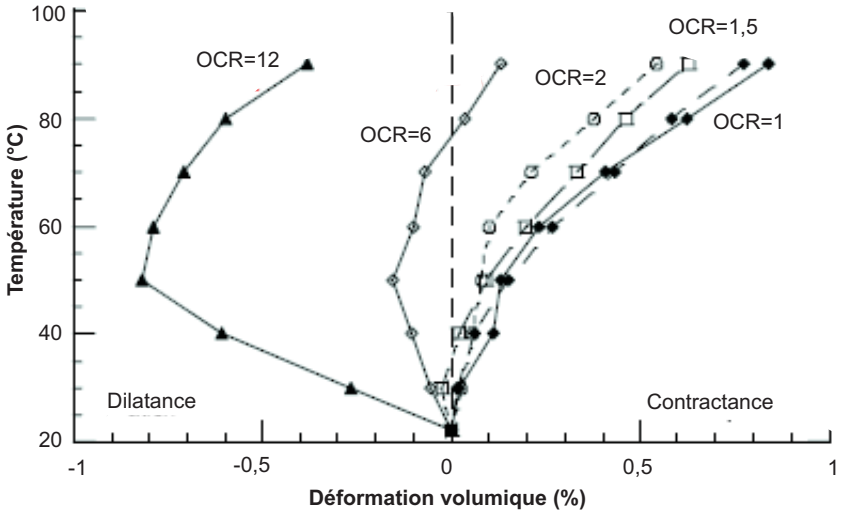

FIG. 7.4 – Consolidation thermique d'une argile de type kaolin, pour cinq OCR différents (Cekerevak (2003)).

Ce type de comportement est le plus souvent attribué au rôle de l'eau adsorbée à la surface des plaquettes argileuses. La théorie de la double couche diffuse permet d'expliquer ce phénomène (Van Damme (2002).
La surface des feuillets d'argile est électriquement chargée, ce qui induit la présence d'une charge nette de signe opposé dans la solution aqueuse (excès d'ions de signe opposé à la charge électrique de la surface). Dans l'espace confiné interparticulaire, se forme une concentration élevée d'ions retenus par les forces électrostatiques. Cette concentration forcée d'ions, violant

la tendance entropique à la dilution, produit une force de nature osmotique répulsive. Par rapport à l'attraction entre les plaquettes due aux forces de Van der Walls, les forces dues à la double couche diffuse entourant chaque plaquette ont une action mutuelle de répulsion électrique. Quand l'épaisseur de la double couche diffuse est faible, l'attraction l'emporte et les plaquettes s'attirent. Dans le cas contraire, les particules se repoussent. L'épaisseur de cette double couche est intimement liée à la température : plus elle est élevée plus l'épaisseur de la double couche augmente. Ainsi, lors d'une consolidation thermique, les plaquettes argileuses se repoussent.
On peut alors expliquer, suivant les valeurs de l'OCR, la réponse observée lors d'une élévation de température sur des sols argileux :

- Dans le cas normalement consolidé ($OCR \approx 1$), l'augmentation de température, entraînant une augmentation de l'épaisseur de la double couche, permet alors un réarrangement entre plaquettes qui sera d'autant plus important que l'état de contraintes appliquées est élevé.
- Dans le cas surconsolidé (en général $OCR > 2$), l'augmentation de température induit dans un premier temps une expansion du sol du fait de la répulsion mutuelle des plaquettes argileuses. Cette expansion s'effectue jusqu'à une température limite qui correspond au moment où l'état de contraintes appliquées permet un réarrangement des plaquettes argileuses. Cette température limite atteinte, la déformation sera d'autant plus importante que l'état de contrainte est important comme dans le cas normalement consolidé.

Il est à noter que les déformations de dilatance sont élastiques tandis que les déformations de contractance sont plastiques.

Saix (1991) a réalisé des essais de consolidation thermique à succion constante pour différents états de contraintes sur un sable limoneux argileux. L'OCR est toujours égal à un. La figure 7.5 présente les résultats obtenus. Quelle que soit la valeur du chargement mécanique, il a observé un tassement de l'échantillon ce qui confirme les résultats présentés précédemment. L'auteur ajoute que la déformation thermique est plus importante pour des états de contraintes faibles. Il attribue cette tendance au fait que pour de faibles valeurs de contraintes (inférieures à 160 kPa pour le sol étudié), le sol possède encore, malgré la déformation mécanique imposée par son état initial, un certain potentiel de déformation lors d'une augmentation de température. À l'inverse, pour de fortes valeurs de contraintes (supérieures à 160 kPa), ce potentiel de déformation est déjà en partie utilisé par la déformation mécanique imposée, cela réduit les déformations induites par une augmentation de température.

Effet de la température sur les indices de gonflement et de compression

Dans le cas saturé, Mesri (1973) et Habibagahi (1977) ont conclu, à partir de résultats expérimentaux obtenus sur une argile provenant du comté de Paulding (Georgie, USA), que la température a un effet négligeable sur les indices de gonflement et de compression. Les mêmes conclusions ont été faites par d'autres auteurs : Campanella et Mitchell (1968) sur une illite, Cekerevak (2003) sur un kaolin ou Behrooz (2003) sur un kaolin et sur une illite.
Dans le cas non saturé, Saix et al. (2000) et Jamin (2003), sur un sable limoneux argileux, et Tang (2005) sur une bentonite, ont montré une faible sensibilité des indices de gonflement et de compression à la température.

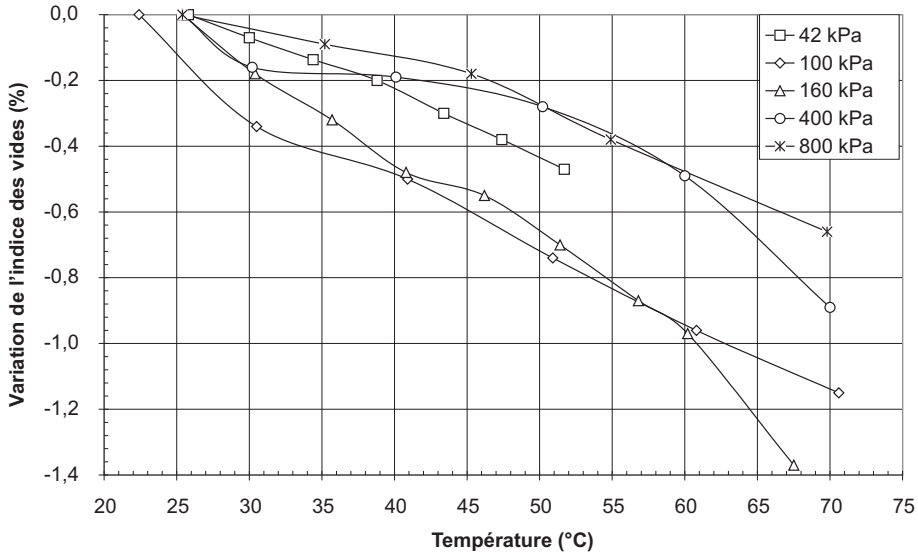

FIG. 7.5 – Consolidation thermique d'un sable limoneux argileux pour différentes contraintes mécaniques (Saix (1991)).

Effet de la température sur la contrainte de préconsolidation

La contrainte de préconsolidation σ_c est définie comme la contrainte limite entre domaine élastique et domaine plastique.
Gray (1936), qui réalisa des essais de consolidation œdométrique à 10 et 20°C, fut un des premiers à observer la dépendance de cette limite à la température. Toujours en conditions œdométriques, Tidförs et Sällfors (1989) modélisent cette dépendance par une fonction linéaire décroissante de la température.
Cekerevak (2003) a mené des essais de consolidation isotrope à trois températures différentes, 22, 60 et 90°C sur un kaolin. Ces essais ont été réalisés en quatre étapes :

1. Consolidation mécanique à température ambiante jusqu'à atteindre une contrainte isotrope de 600 kPa.
2. Déchargement à une valeur de 300 ou 200 kPa de la contrainte suivant les essais pour amener l'échantillon à un OCR de 2 ou 3.
3. Chargement thermique par paliers de 10°C.
4. Re-consolidation mécanique jusqu'à une contrainte isotrope de plus de 900 kPa

Les résultats de cette étude, en terme d'évolution de la contrainte de préconsolidation en fonction de la température, sont présentés sur le graphe de la figure 7.6.
L'auteur propose une modélisation du phénomène faisant intervenir une fonction logarithme pour donner un caractère asymptotique à l'évolution de la contrainte de préconsolidation :

$$\sigma_c(T) = \sigma_c(T_0)\left(1 + \gamma \log\left(\frac{T}{T_0}\right)\right) \tag{7.26}$$

où $\sigma_c(T)$ est la contrainte de préconsolidation à la température T, $\sigma_c(T_0)$ la contrainte de préconsolidation à la température T_0 et γ un paramètre caractéristique du matériau. Ce modèle

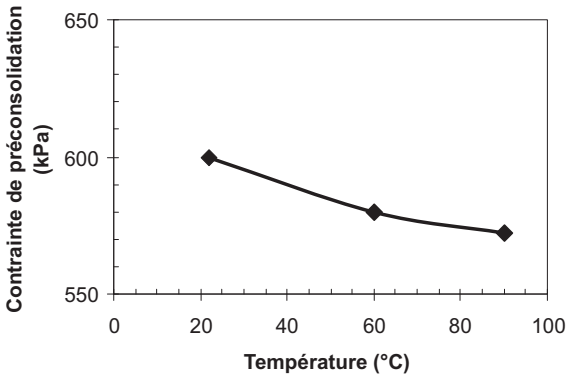

FIG. 7.6 – Influence de la température sur la contrainte de préconsolidation d'un kaolin (Cekerevak (2003)).

a été testé avec succès sur de nombreux résultats de la littérature (γ varie entre 0,1 et 0,4). On peut aussi citer le modèle proposé par Cui et al. (2000) qui conserve le caractère asymptotique de l'évolution de la contrainte de préconsolidation en faisant intervenir une fonction exponentielle à la place de la fonction logarithme :

$$\sigma_c(T) = \sigma_c(T_0)e^{-\alpha_0 \Delta T} \tag{7.27}$$

où α_0 est un paramètre caractéristique du matériau et $\Delta T = T - T_0$.

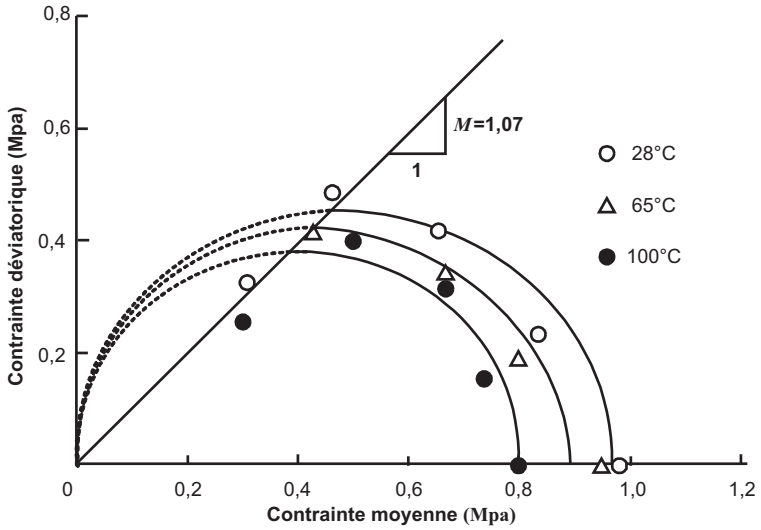

FIG. 7.7 – Influence de la température sur la surface de charge d'une illite (Tanaka et al. (1997)).

L'ensemble des contraintes de préconsolidation correspondant aux différents chemins de chargement mécanique définit la surface de charge du sol. Dans un plan contrainte déviatorique-

contrainte moyenne, la surface de charge à une forme elliptique (Figure 7.7).
Si la contrainte de préconsolidation augmente avec la température la surface de charge est dite thermo-extensive, dans le cas contraire elle est dite thermo-rétrécissante (Figure 7.8). Les études de Hueckel et Baldi (1990), Tanaka et al. (1997), Romero (1999), Sultan et al. (2002) et Tang (2005) qui portent toutes sur des sols argileux, montrent que la surface de charge à un caractère thermo-rétrécissant (Figure 7.7).

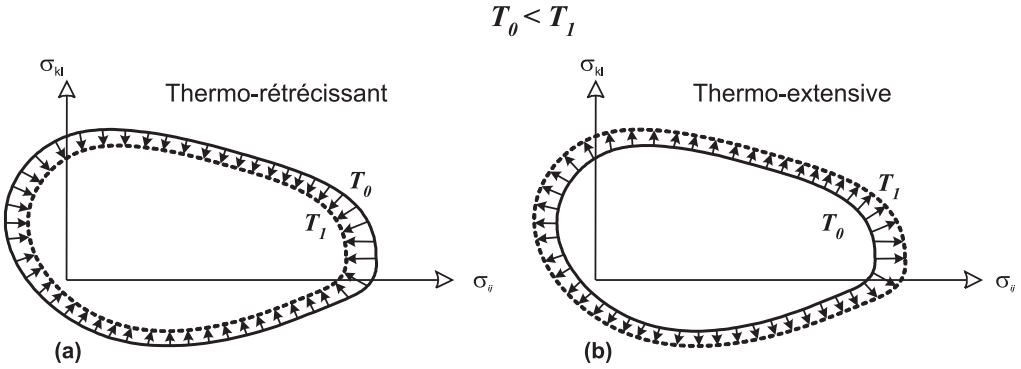

FIG. 7.8 – Influence de la température sur la surface de charge ; (a) thermo-rétrécissante et (b) thermo-extensive (Jamin (2003)).

Dans le cas d'un sable limoneux argileux, Saix et al. (2000) et Jamin (2003) n'observent pas le même sens d'évolution. Les résultats de Jamin (2003) présentés par le graphe de la figure 7.9 mettent clairement en évidence le caractère thermo-extensif de la surface de charge pour le sol étudié.
Pour expliquer ce phénomène, l'auteur se fondent sur le fait que la distribution de l'eau et sa liaison avec la phase solide diffèrent entre un sol grenu et un sol plus argileux.
D'après la loi de Jurin-Laplace, une augmentation de température (toutes les autres variables étant supposées constantes) induit une diminution du rayon moyen des ménisques. Cette diminution se traduit par une augmentation des forces de cohésion par capillarité entre les grains, ce qui a pour effet de limiter leurs réarrangements qui sont les principaux facteurs des irréversibilités dans le comportement des sols. Cette limitation correspond à une augmentation de la contrainte de préconsolidation, et donc à une extension de la surface de charge.
Dans le cas d'un sol fin, les ménisques capillaires se situent au contact d'agrégats argileux et de grains de limon. Ces agrégats formés de plaquettes argileuses sont saturés d'eau dite adsorbée. Ceci résulte de la faible taille des pores et des fortes liaisons entre les molécules d'eau et les particules solides. Dans ces conditions, l'augmentation des forces de cohésion due à la diminution des rayons des ménisques semble faible devant les effets de la température sur la double couche diffuse et sur la viscosité de l'eau. Ces deux derniers phénomènes seraient à l'origine, dans le cas des sols fins, de la diminution de la contrainte de préconsolidation, et donc de la contraction de la surface de charge avec la température.

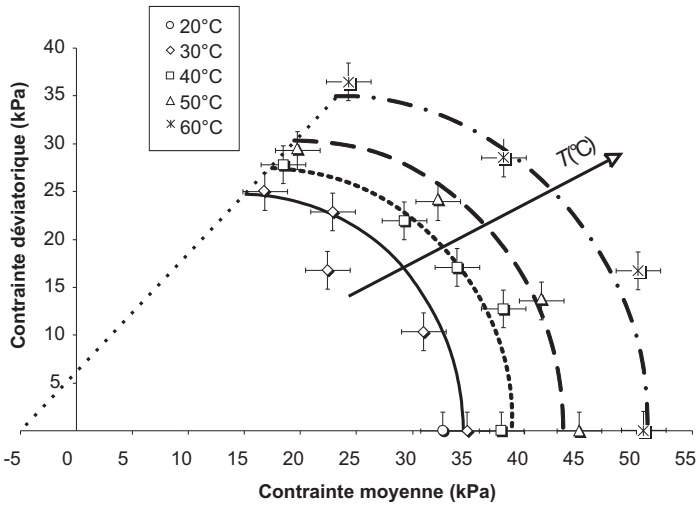

FIG. 7.9 – Influence de la température sur la surface de charge du sable limoneux argileux (Jamin (2003)).

7.3.2 Effet de la succion sur le comportement mécanique des sols

Effet de la succion sur les indices de gonflement et de compression

Maatouk et al. (1995) ont réalisé une série de chargements mécaniques à différents niveaux de succion sur le limon dit des Trois Rivières. Le graphe de la figure 7.10 présente les résultats de cette étude. Elle met en évidence que l'effet de la succion n'est pas le même concernant l'indice de compression λ qui diminue avec l'augmentation de succion et l'indice de gonflement κ qui ne semble pas être influencé.

En fait, plusieurs études (Medjo Eko (2004), Cuisinier et Masrouri (2005)) confirment la faible

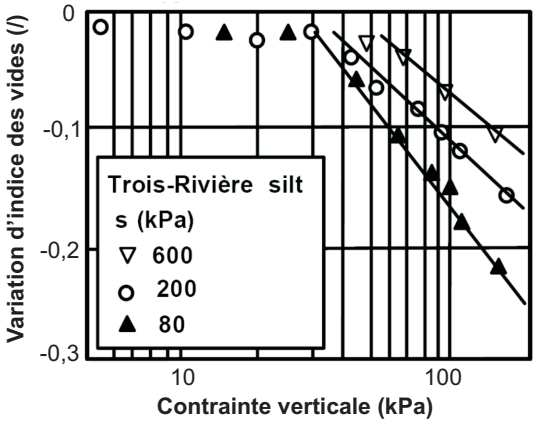

FIG. 7.10 – Chargements mécaniques à différentes valeurs de succion sur un limon (Maatouk et al. (1995)).

dépendance de la pente de la partie élastique vis à vis de la succion. Pourtant, Tang (2005) fait remarquer que, dans le cas des essais réalisés sur des bentonites compactées (Al-Mukhtar et al.

(1999), Lloret et al. (2003) et Tang (2005)), il a été constaté une diminution sans équivoque de l'indice de gonflement avec l'augmentation de succion. Pour cet auteur, dans le cas des argiles gonflantes compactées, la compressibilité des agrégats de feuillets d'argile varie avec la teneur en eau et ce phénomène se traduit macroscopiquement par une évolution de la pente du domaine élastique.
Rampino et al. (2000) convergent vers le même résultat dans une étude expérimentale concernant un sable limoneux.

Dans le domaine plastique, il est convenu que l'indice de compression diminue quand la succion augmente (Matyas et Radhakrishna (1968)). Ce point est d'ailleurs confirmé par de nombreux résultats plus récents (Geiser (1999), Al-Mukhtar et al. (1999), Rampino et al. (2000), Lloret et al. (2003), Cuisinier et Masrouri (2005)). Le graphique de la figure 7.11 emprunté à Cuisinier (2002) regroupe les résultats de plusieurs auteurs.

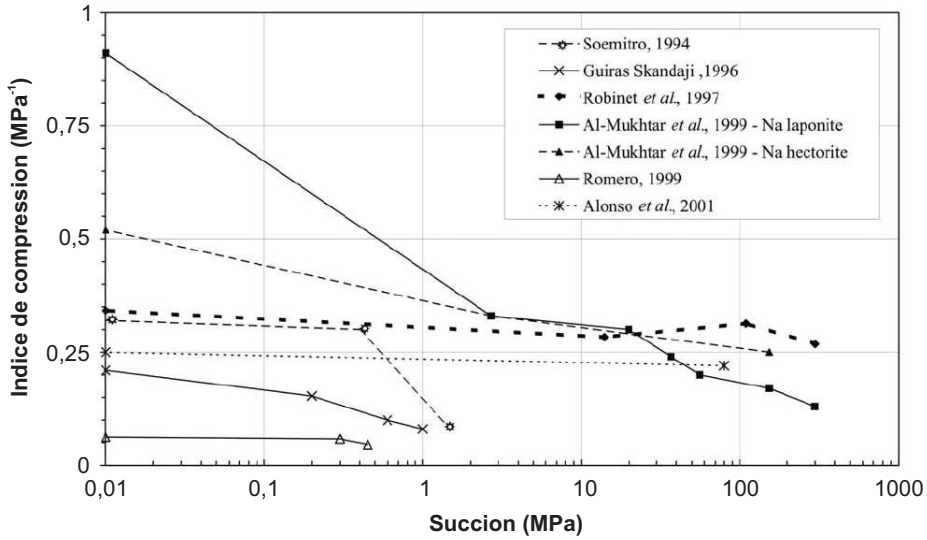

FIG. 7.11 – Évolution de l'indice de compression en fonction de la succion (Cuisinier (2002)).

Dans le modèle de Barcelone (Alonso et al. (1990)), cette évolution de l'indice de compression est prise en compte par la fonction :

$$\lambda(s) = \lambda(0)\left(r + (1-r)e^{-\beta s}\right) \tag{7.28}$$

où $\lambda(s)$ est l'indice de compression à la succion s, $\lambda(0)$ l'indice de compression à la saturation, r et β sont les deux paramètres du modèle qui dépendent du matériau.
Il existe néanmoins certains résultats expérimentaux qui tendent à mettre en défaut la généralisation de ce sens d'évolution de l'indice de compression. Medjo Eko (2004) observe sur une argile, au cours d'essais en conditions isotropes, une augmentation de l'indice accompagnant une augmentation de la succion. Estabragh et al. (2004) et Geiser et al. (2006) observent, sur un sol limoneux, en conditions isotropes, une évolution non monotone de la pente de la partie plastique.

Effet de la succion sur la contrainte de préconsolidation et sur la surface de charge

De nombreux travaux ont montré que la contrainte de préconsolidation augmente avec l'augmentation de la succion. Parmi les résultats les plus récents on peut citer : Estabragh et al. (2004), Medjo Eko (2004), Tang (2005), Cuisinier et Masrouri (2005).
Les modèles élatoplastiques qui prennent en compte la désaturation du milieu doivent tenir compte de ce phénomène. Leur surface de charge doit être fonction de la succion.
Dans le modèle de Barcelone (Alonso et al. (1990)), l'évolution de la contrainte moyenne de préconsolidation est décrite par l'équation suivante.

$$p_c(s) = p_r \left(\frac{p_c(0)}{p_r} \right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}} \tag{7.29}$$

où $p_c(s)$ est la contrainte moyenne de préconsolidation à la succion s, $p_c(0)$ est la contrainte moyenne de préconsolidation à la saturation et p_r la contrainte moyenne de référence.
Le graphe de la figure 7.12 donne la représentation de la surface de charge dans le plan contrainte moyenne-succion.
Dans ce modèle, le sol se comporte de façon élastique sous des contraintes moyennes négatives jusqu'à une certaine valeur limite p_0 reliée à la succion par la relation :

$$p_0 = -k \times s \tag{7.30}$$

où k est une caractéristique du milieu.
On peut également citer le modèle développé par l'équipe du LMS de l'EPFL, exprimé en

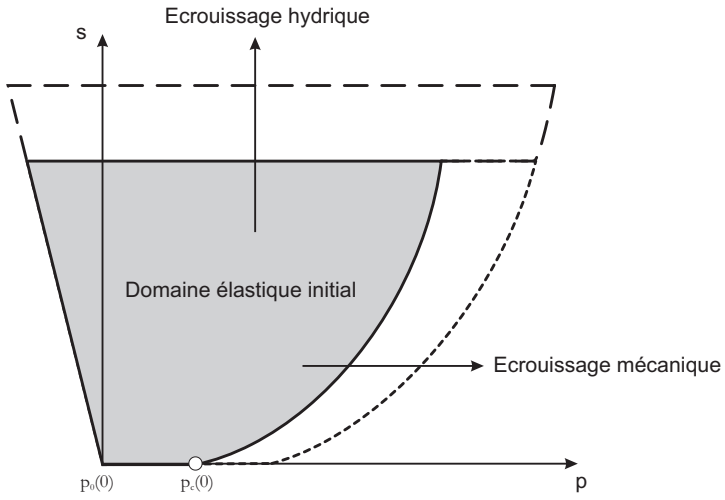

FIG. 7.12 – Surface de charge dans le plan contrainte moyenne-succion du modèle de Barcelone.

contrainte effective, et qui donne l'évolution de la contrainte effective moyenne de préconsolidation en fonction de la succion sous la forme :

$$\text{si} \quad s \leq s_a \Rightarrow \quad p'_c(s) = p'_c(0) = \text{cte} \tag{7.31}$$

$$\text{si} \quad s \geq s_a \Rightarrow \quad p'_c(s) = p'_c(0) \left(1 + \gamma_s \log \left(\frac{s}{s_a} \right) \right) \tag{7.32}$$

où $p'_c(0)$ est la contrainte moyenne de préconsolidation à succion nulle et γ_s est un paramètre du modèle qui dépend du matériau.
En dessous de la pression d'entrée d'air s_a la succion n'a pas d'influence sur la surface de charge. La surface de charge de ce modèle est représentée dans le plan contrainte moyenne-succion à la figure 7.13.

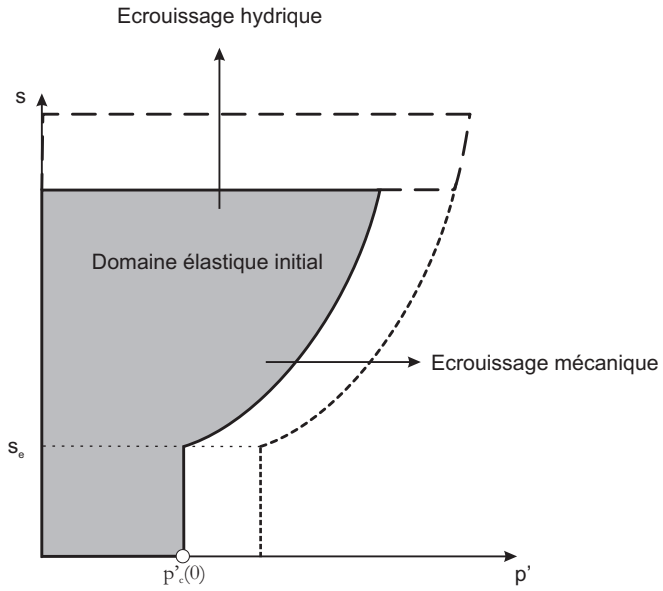

FIG. 7.13 – Surface de charge dans le plan contrainte effective moyenne-succion du modèle développé par l'équipe du LMS de l'EPFL.

Conclusion

Ce chapitre a permis dans un premier temps de présenter quelques notions générales concernant le comportement mécanique des sols. Puis, une synthèse des résultats bibliographiques relatifs aux effets de la température et de la succion sur le comportement mécanique a été établie.
Dans la suite de cette partie on s'appuiera sur ces résultats, notamment pour les interprétations et les modélisations des données expérimentales.

Chapitre 8

Matériau, dispositifs expérimentaux et méthodes

Ce chapitre est consacrée à la présentation du matériau, de la cellule d'essais, du protocole de fabrication des échantillons et du protocole de déroulement des essais. En premier lieu, on présente les principales caractéristiques du milieu étudié. La cellule d'essai est ensuite décrite en considérant chacun des circuits de mesure ou de contrôle des différentes variables. Puis, on présente les essais qui ont permis d'établir le protocole de fabrication des échantillons. Enfin, on définit toutes les étapes qui composent les essais de consolidation isotrope à différents niveaux de succion et de température.

8.1 Matériau de l'étude : le limon de Sion

Le limon de Sion est un sol prélevé dans la gravière de Bilieux à Grône dans la région de Sion (Suisse). Il s'agit des boues de lavage de la gravière. C'est un matériau de référence au sein du LMS de l'EPFL qui a déjà fait l'objet de plusieurs études (Geiser (1999), François et al. (2007), Péron et al. (2007)).
On se propose ici de rappeler quelques unes de ses principales caractéristiques.

8.1.1 Granulométrie

Le sol est prélevé sous forme de boues. Il est ensuite séché, écrasé et passé au tamis d'ouverture $0,5$ mm. La figure 8.1 présente sa courbe granulométrique.
Sa masse volumique spécifique est 2741 kg.m^{-3}.
Ses limites d'Atterberg sont $25,4\%$ pour la limite de liquidité et $16,7\%$ pour la limite de plasticité ce qui conduit à un indice de plasticité de $8,7$.
La classification USCS du limon de Sion est CL-ML.

8.1.2 Analyse minéralogique

Une analyse diffractométrique semi-quantitative par rayon X a permis de déterminer la composition minéralogique de ce sol ; les résultats de cette analyse sont synthétisés dans le tableau 8.1

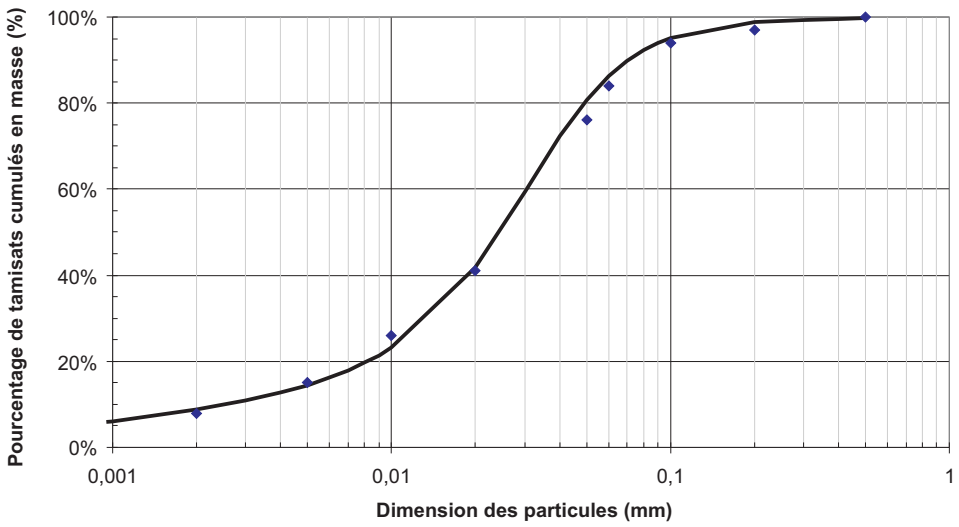

FIG. 8.1 – Courbe granulométrique du limon de sion.

Minéraux	Quartz	Plagioclase	k-Feldspath	Calcite	Dolomite	Anhydrite	Phyllosilicates
% en poids	37	17	16	6	1	1	22

TAB. 8.1 – Composition minéralogique du limon de Sion.

Les phyllosilicates représentent donc une fraction massique de 22% du sol. Le tableau 8.2 donne la répartition des types d'argile qui la composent.

Type de phyllosilicates	Chlorite	Illite	Kaolinite	Smectite
% en poids	27	60	0	13

TAB. 8.2 – Répartition des phyllosilicates dans le limon de Sion.

Le seul phyllosilicate de type "gonflant" est la smectite qui représente moins de 3% du poids total du limon de Sion, ce qui est très faible. Les parties fines sont donc peu gonflantes.

8.1.3 Caractérisation hydrique

L'étude du comportement hydrique a été réalisée par Péron et al. (2007). On reproduit ici ces résultats au travers de deux figures :

– La figure 8.2 qui donne la courbe de rétention en drainage à partir d'un état saturé ; elle donne le degré de saturation en fonction de la succion. Les points correspondent à des mesures expérimentales réalisées à la marmite de Richard.
La succion d'entrée d'air est comprise entre 40 et 50 kPa. La succion la plus forte qui a été appliquée est de 800 kPa. A cette succion, correspond un degré de saturation d'environ 18% et une teneur en eau massique de $4,4\%$. Le degré de saturation résiduel n'est toujours pas atteint.

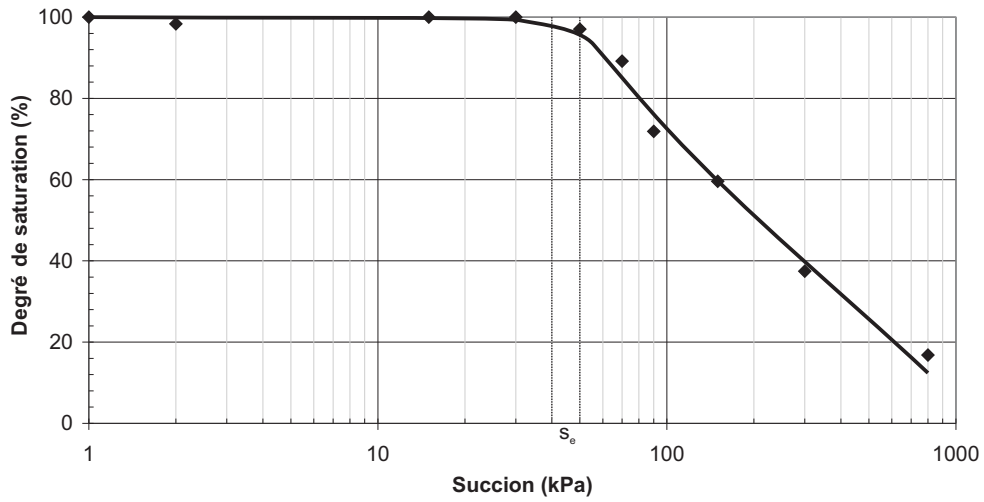

FIG. 8.2 – Courbe de rétention du limon de Sion (Péron et al. (2007)).

– La figure 8.3 qui donne la courbe de tassement hydrique en drainage à partir d'un état saturé. Elle exprime l'indice des vides en fonction de la succion. On observe une variation très rapide de l'indice des vides pour les succions inférieures à 30 kPa. Pour les succions supérieures, la pente de la courbe est faible. Le déchargement hydrique montre que dans cette dernière partie (correspondant à une pente du tassement faible) le comportement est réversible.

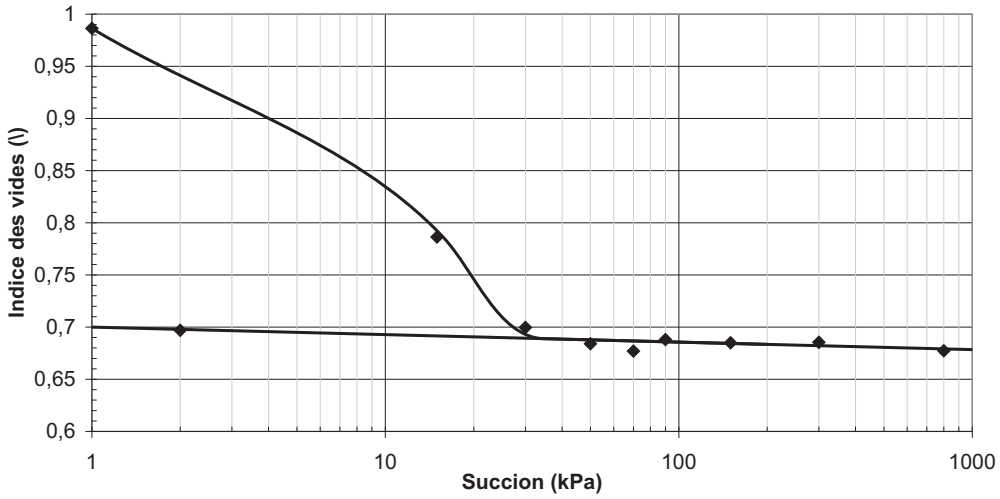

FIG. 8.3 – Courbe de tassement hydrique du limon de Sion (Péron et al. (2007)).

8.2 La cellule d'essai isotrope thermique

8.2.1 Historique

L'appareil d'essai isotrope thermique était à l'origine un appareil triaxial thermique qui a été modifié pour les besoins de cette étude.

Il a été étudié, conçu et mis au point dans le cadre d'une étude sur le stockage de chaleur dans les nappes phréatiques (Saix (1987)). Les détails d'ordre expérimental de cette première version de l'appareil et les premiers résultats concernant l'étude d'un prototype de stockage de chaleur apparaissent dans les travaux de Saix et Jouanna (1989).
Cet appareil a été utilisé pour de nombreuses études expérimentales avec des modifications et des améliorations successives. Ces études ont concerné la consolidation thermique par chaleur de sol non saturé (Saix (1991)) et plus particulièrement les couplages thermo-hydro-mécaniques (Devillers et al. (2000), Devillers (1998), Saix et al. (2000), Jamin et al. (2002), Jamin (2003)).
La version actuelle de l'appareil permet de réaliser des essais isotropes avec contrôle de la succion et de la température. Elle est décrite dans les sections suivantes.

8.2.2 Description générale

Cette cellule d'essai isotrope permet d'appliquer des chargements thermo-hydro-mécaniques à des échantillons de sol et d'en mesurer les variations de volume et de teneur en eau.
L'échantillon de 70 mm de diamètre et 15 mm de hauteur se trouve au centre de la cellule (figure 8.4). Il est disposé sur une céramique poreuse à forte pression d'entrée d'air. Au-dessus sont placés un disque perforé et le chapeau. Enfin, il est entouré d'une membrane en néoprène. La chambre de la cellule est délimitée par les flasques supérieur et inférieur ainsi que par l'enceinte cylindrique. Ces trois pièces, qui forment le corps de la cellule, sont en acier inoxydable. Le fonctionnement de la cellule est décrit dans la suite en considérant chacun des circuits de contrôle ou de mesure des différentes variables expérimentales.

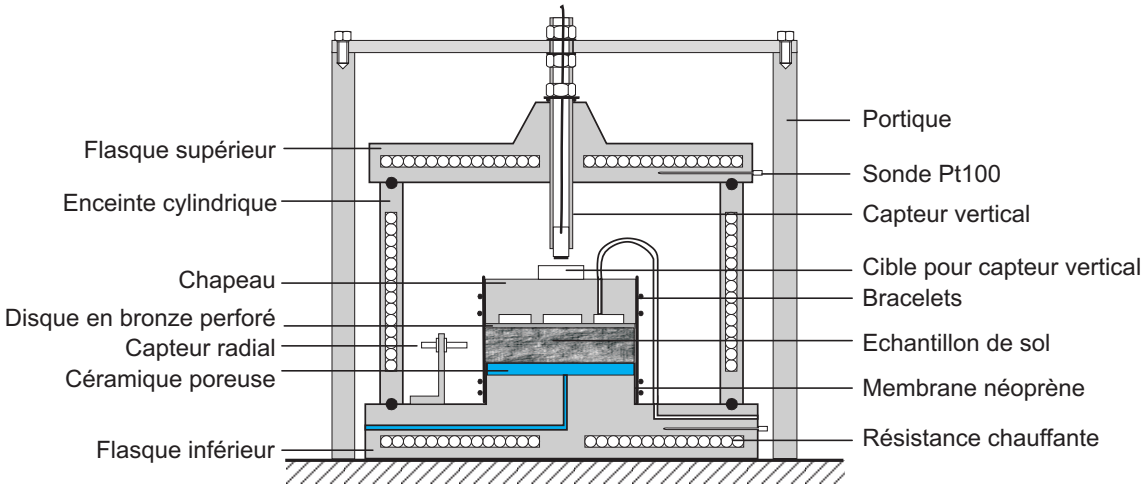

FIG. 8.4 – Schéma général de la cellule d'essai isotrope.

8.2.3 Système de régulation de la contrainte isotrope

Le système de régulation de la contrainte isotrope est schématisé sur la figure 8.5. La contrainte isotrope est appliquée à l'échantillon par de l'air comprimé dans la chambre de la cellule. Cette pression est imposée et contrôlée par un circuit pneumatique équipé de détendeurs et de manomètres. Pour garder une bonne précision sur toute la gamme des pressions

imposées, deux systèmes détendeur-manomètres sont mis en parallèle. Le premier permet d'imposer des pressions allant de 0 à 400 kPa avec une incertitude de $\pm 2,5$ kPa et le second des pressions allant de 0 à 1000 kPa avec une incertitude de ± 50 kPa. La pression est transmise radialement à l'échantillon par l'intermédiaire d'une membrane en néoprène et verticalement par l'intermédiaire du chapeau.
Afin de prendre en compte les déformations de la structure induites par la mise sous pression de l'air contenu dans la chambre, un étalonnage de la mesure des déplacements vertical et radial a été réalisé.

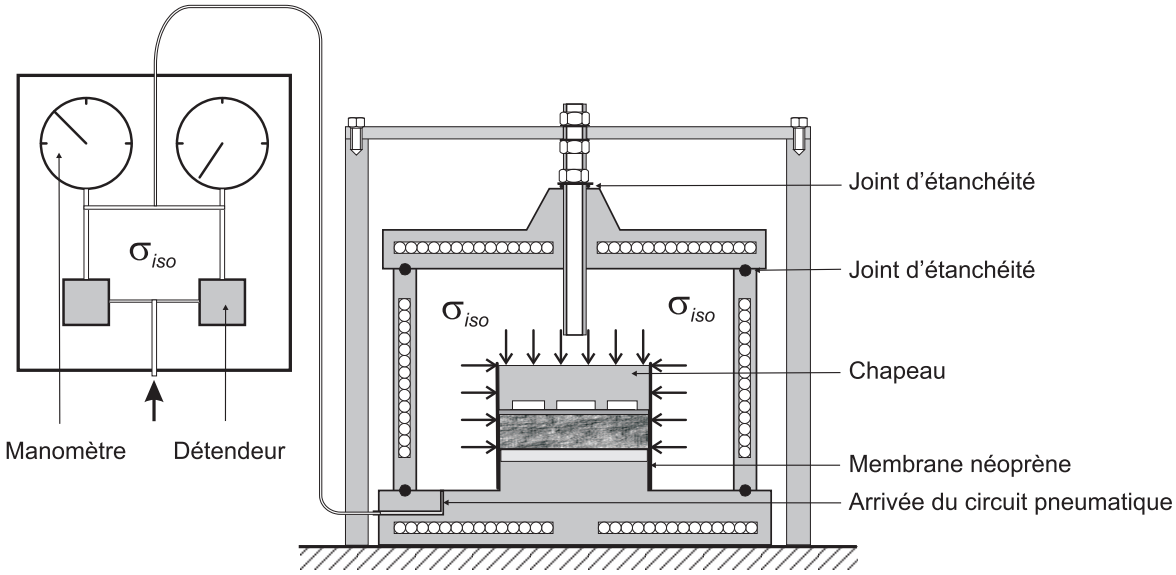

FIG. 8.5 – Système d'application et de régulation de la contrainte isotrope.

8.2.4 Système de régulation de la succion

Le système de régulation de la succion est schématisé sur la figure 8.6. La succion est appliquée par la méthode de surpression d'air.
La pression de la phase gazeuse est régulée et contrôlée par un système similaire à celui utilisé pour la contrainte isotrope. Deux systèmes détendeurs-manomètres sont mis en parallèle. Le premier permet d'imposer des pressions allant de 0 à 50 kPa avec une incertitude de ± 1 kPa et le second des pressions allant de 0 à 400 kPa avec une incertitude de $\pm 2,5$ kPa. Afin de limiter le changement de phase, on sature en vapeur d'eau l'air du circuit pneumatique. Pour cela, cet air barbote successivement dans deux réservoirs d'eau, le premier à la température ambiante et le second à la température de la cellule. Un disque perforé placé au-dessus de l'échantillon permet une bonne répartition de l'air sur l'échantillon testé.

La céramique sur laquelle est disposé l'échantillon permet la continuité entre la phase liquide de l'échantillon et celle du circuit hydraulique. La charge hydraulique de l'eau contenue dans le milieu est donc la même que l'eau du circuit hydraulique. Cette pression est mesurée par un capteur situé à l'extérieur de la cellule. A la suite du capteur se trouve le dispositif de mesure des échanges d'eau (figure 8.8). Enfin, la pression de la phase liquide est régulée

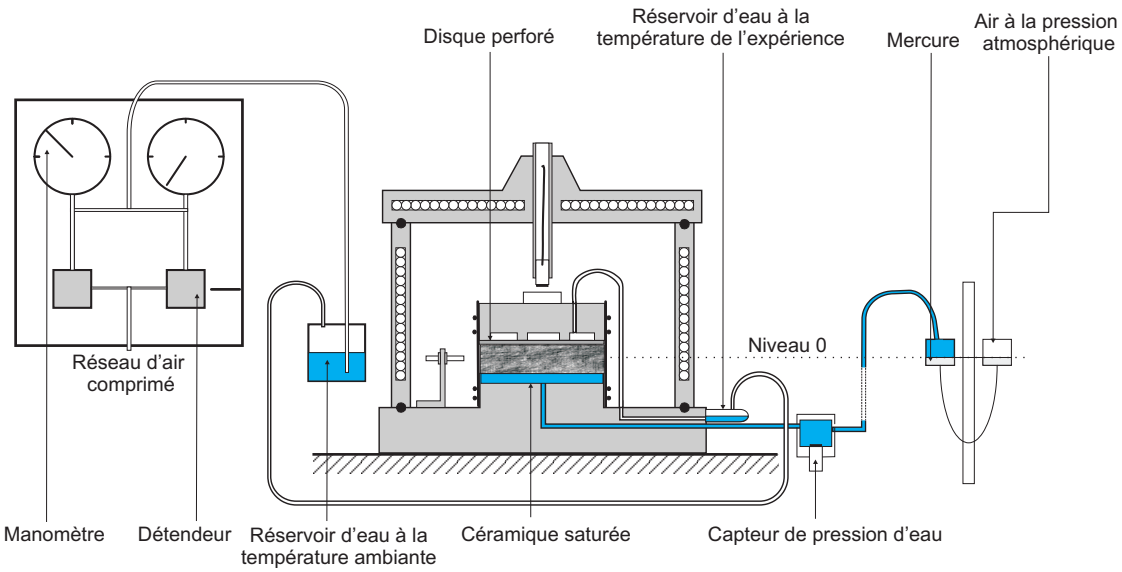

FIG. 8.6 – Système de régulation de la succion.

au moyen de deux réservoirs cylindriques de grande section, contenant du mercure. Le niveau de mercure étant maintenu au niveau 0 (niveau correspondant au centre de l'échantillon), la pression de la phase liquide dans l'échantillon est nulle.

8.2.5 Système de mesure et de régulation de la température

Le système de mesure et de régulation de la température de l'appareil isotrope est présenté sur la figure 8.7.
Le dispositif de chauffage est composé de résistances chauffantes noyées dans les parties massives de la cellule. Elles sont pilotées par un régulateur de température. Pour déterminer l'écart à la consigne, un thermocouple implanté dans la partie inférieure de l'appareil est relié à ce régulateur. Le calorifugeage de la cellule est assuré par une coquille en alliage léger contenant une épaisseur de 4 cm de laine de verre.
La température est contrôlée au moyen de deux sondes PT100, une placée dans le flasque supérieur et l'autre dans le flasque inférieur. Les valeurs données par ces sondes sont enregistrées durant les essais.
Afin de prendre en compte les perturbations dues aux dilatations thermiques sur la mesure des déplacements de l'échantillon, un étalonnage en température de la cellule a été réalisé.

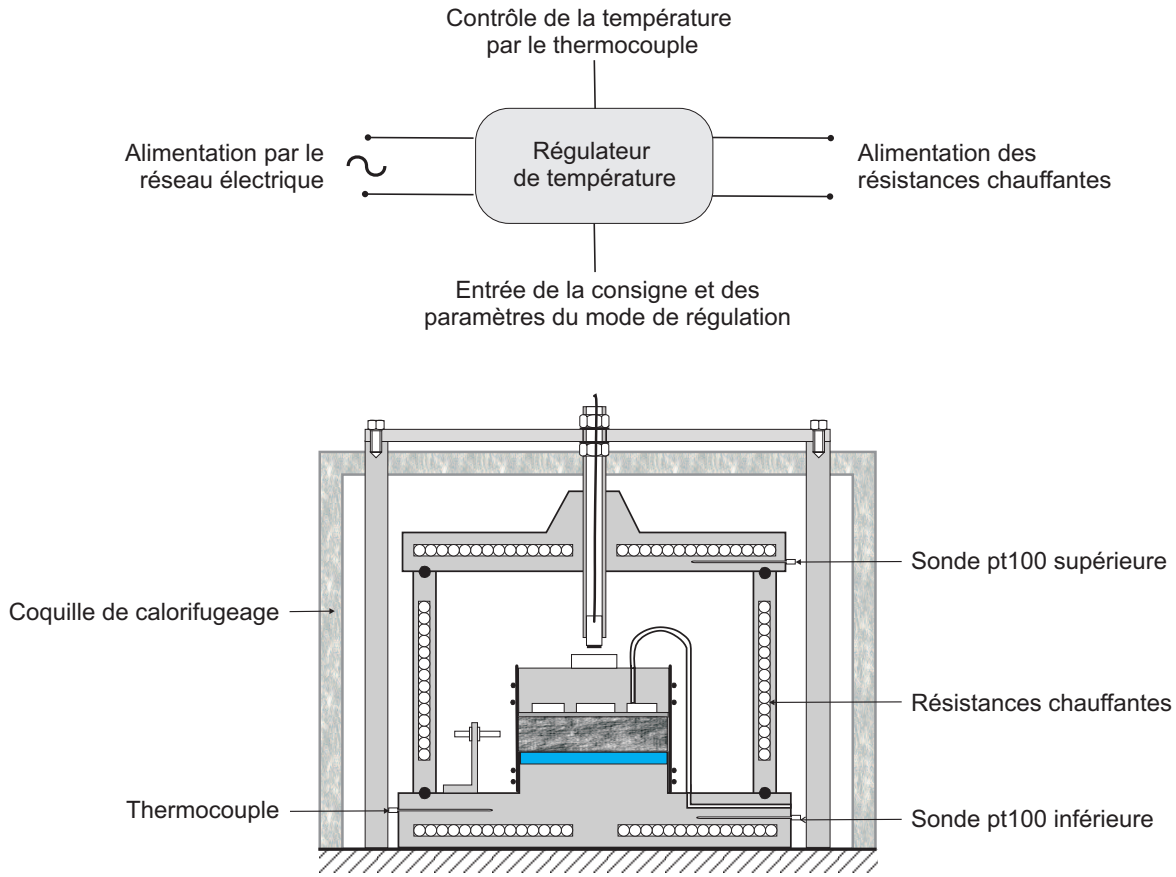

FIG. 8.7 – Système de mesure et de régulation de la température.

8.2.6 Dispositif de mesure des échanges d'eau

Les variations de teneur en eau de l'échantillon sont déterminées à partir de la mesure des volumes d'eau entrant ou sortant à travers la céramique poreuse placée sous l'échantillon. Le dispositif (figure 8.8) qui permet de mesurer ces échanges est constitué de deux burettes graduées insérées dans deux tubes montés en série. Le déplacement du ménisque séparant les fluides non miscibles dont sont remplies les burettes indique les échanges d'eau. Les volumes échangés sont lus sur la graduation des burettes avec une incertitude de 0,05 cm^3. A partir de ces mesures consignées régulièrement au cours de l'essai, et connaissant la teneur en eau finale ou initiale de l'échantillon, on peut connaître l'évolution de la teneur eau de l'échantillon au cours de l'essai.
Un étalonnage en température a été établi afin de prendre en compte les effets de la dilatation de l'eau lors d'essais réalisés en température.

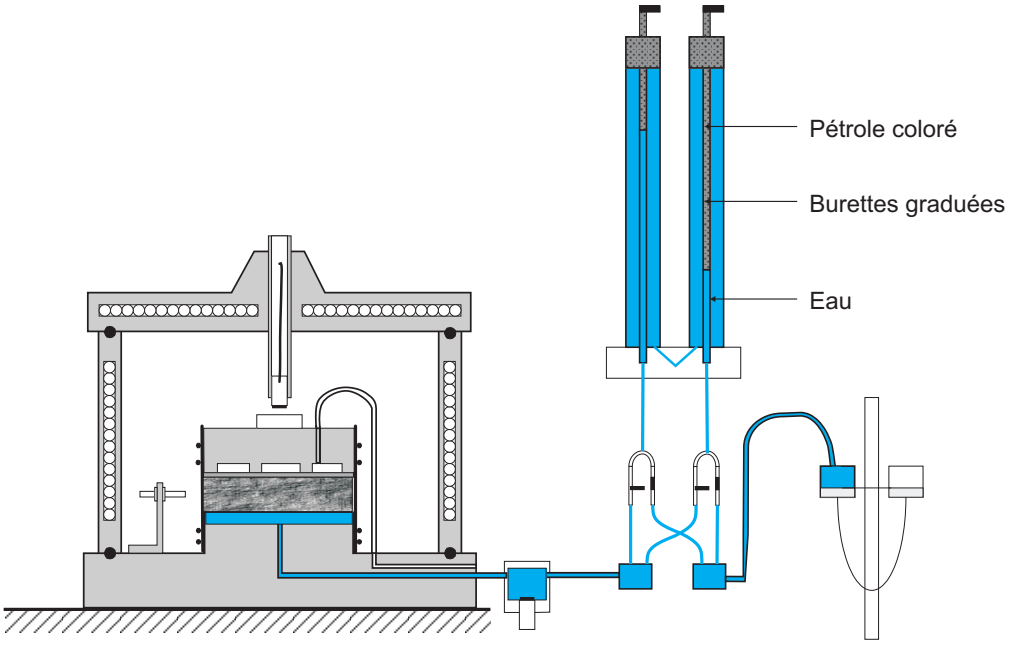

FIG. 8.8 – Dispositif de mesure des échanges d'eau.

8.2.7 Dispositif de mesure des déplacements

Les variations de volume de l'échantillon, et par conséquent les variations de l'indice des vides, sont calculées à partir de la mesure des déplacements verticaux et radiaux des surfaces de l'échantillon. Pour réaliser ces mesures (figure 8.9), deux capteurs de déplacement à induction électromagnétique sont placés dans la cellule d'essai (capteur Kaman). La cible du capteur vertical est collée au centre du chapeau et celle du capteur radial est directement collée sur l'échantillon. Ces capteurs délivrent des variations de tension proportionnelles aux variations de distance. Le capteur vertical permet de mesurer des déplacements entre 0 et 2,5 mm tandis que le capteur radial permet de mesurer des déplacements entre 0 et 1 mm. L'incertitude des deux capteurs est de l'ordre du micromètre.

Avec seulement deux points de mesure, il est nécessaire de faire une hypothèse sur la forme de la déformée de l'échantillon pour calculer les variations de volume total. En supposant l'isotropie du comportement du sol, la surface supérieure initialement plane reste plane après l'application de la charge répartie. La mesure faite par le capteur au centre de la surface suffit puisque les déplacements de tous les points de la surface sont les mêmes.
La déformation radiale est supposée être de forme parabolique comme l'illustre la figure 8.10, et toujours pour des raisons d'isotropie du comportement, cette déformation admet une symétrie de révolution autour d'un axe vertical au centre de l'échantillon. Pour des raisons de frettage avec la céramique poreuse et le disque perforé, le déplacement radial au niveau des faces inférieure et supérieure de l'échantillon est considéré comme nul.
L'équation du profil supposé parabolique s'écrit :

$$\Delta r(z) = \left(1 - \left(\frac{2 \times z}{H}\right)^2\right) \times \Delta r_{mes} \tag{8.1}$$

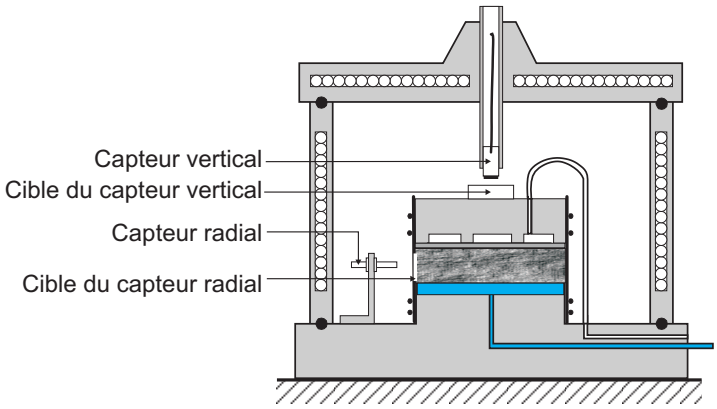

FIG. 8.9 – Dispositif de mesure des déplacements.

où $\Delta r(z)$ est la variation de rayon de l'échantillon à l'ordonnée z, H la hauteur de l'échantillon, Δr_{mes} la variation de rayon mesurée à la hauteur $H/2$.
On peut définir un rayon équivalent r_e d'un échantillon qui resterait cylindrique mais de même volume que l'échantillon réel. L'égalité des volumes de révolution engendrés par le rectangle de largeur Δr_e et la portion de parabole située à droite de l'axe $\left(O, \vec{z}\right)$ conduit à la relation :

$$\Delta r_e = \frac{2}{3} \times \Delta r_{mes} \tag{8.2}$$

La déformation volumique est égale à la trace du tenseur des déformations. Dans le cas de notre essai, on peut donc la calculer comme suit :

$$\epsilon_{vol} = -\left(\frac{\Delta H}{H_0} + 2 \times \frac{\Delta r_e}{r_0}\right) = -\frac{\Delta e}{1 + e_0} \tag{8.3}$$

où H_0, r_0 et e_0 sont respectivement la hauteur, le rayon et l'indice des vides initiaux de l'échantillon.

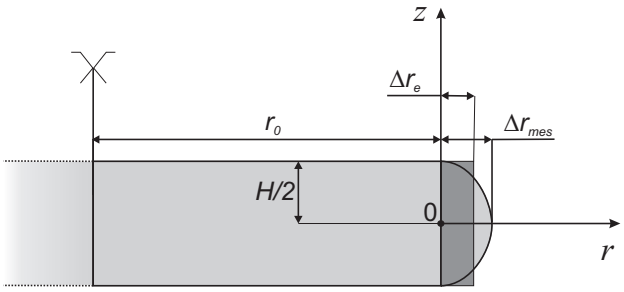

FIG. 8.10 – Schéma de la déformation radiale d'un échantillon de sol.

8.2.8 Acquisition

Un programme d'acquisition des variables délivrées par les différents capteurs a été développé pour cette version de l'appareil. Les étapes du flux des données sont représentées par la figure 8.11. La pression de la phase liquide, et les températures supérieure et inférieure de la cellule sont affichées sur l'écran de contrôle afin de s'assurer du bon déroulement de l'essai. La cinétique de déformation de l'échantillon est traduite par l'affichage des variations, en fonction du temps, de la hauteur, du rayon et de l'indice des vides.

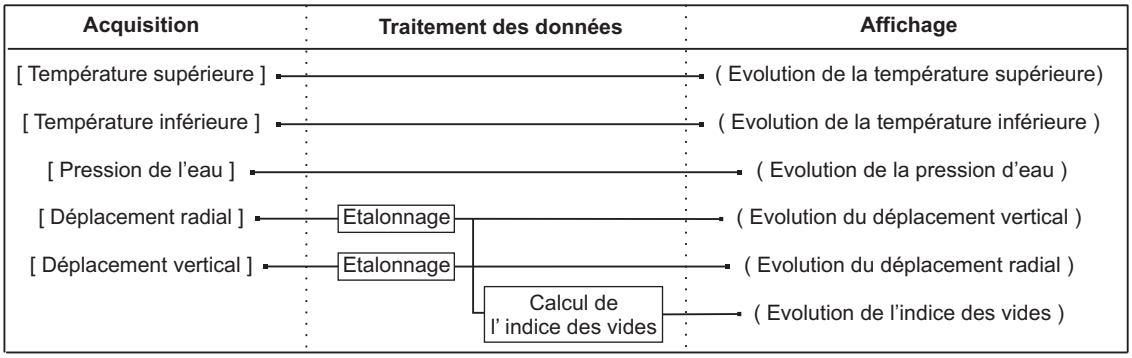

FIG. 8.11 – Acquisition, traitement et affichage des données.

Le schéma de la figure 8.12 explicite la structure du programme d'acquisition. La première étape est l'initialisation de l'essai dans laquelle on introduit les caractéristiques initiales de l'échantillon qui serviront pour le calcul de l'indice des vides. Un essai est une suite de chargements thermiques, hydriques ou mécaniques. A l'initialisation d'un chargement, on introduit les valeurs de température et de contrainte qui vont être imposées. Ces valeurs sont introduites dans les fonctions d'étalonnage appliquées aux déplacements mesurés. Un critère de fin du chargement permet de considérer que l'équilibre est atteint. Durant les chargements, les variations des différentes données acquises sont affichées sur l'écran de contrôle et enregistrées. A la fin de l'essai, les différents états d'équilibre obtenus sont enregistrés.

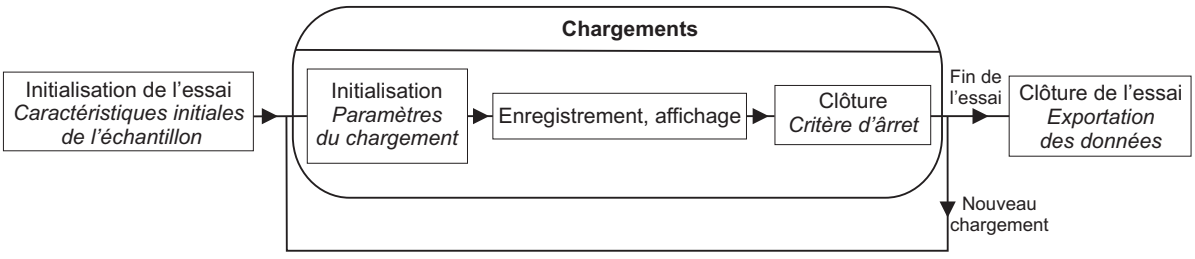

FIG. 8.12 – Structure du programme d'acquisition.

8.3 Essais préliminaires de caractérisation

Ces essais de caractérisation s'inscrivent dans l'étude préliminaire visant à établir le protocole de fabrication des échantillons. Ce protocole doit permettre d'obtenir des états initiaux pour les essais réalisés au LMGC proches de ceux obtenus par l'équipe du LMS de l'EPFL, c'est à dire $e_0 = 0,74 \pm 0,02$ et $w_0 = 24,5\% \pm 1\%$, afin de se placer dans des conditions expérimentales identiques.
Dans ce cadre, le comportement du limon de Sion a fait l'objet d'une caractérisation au compactage et au fluage. On a pu ainsi tester la faisabilité d'une mise en forme des échantillons par ces deux types de chargement mécanique.

8.3.1 Essais de compactage

Les essais de compactage œdométrique ont été réalisés en conditions drainées pour différentes teneurs en eau. Le sol est préparé sous forme d'un mélange de sol sec avec une certaine quantité d'eau permettant d'atteindre la teneur en eau recherchée. Ce mélange est placé dans une cellule œdométrique dont le piston de chargement est piloté par une machine d'essai de compression. La machine impose une vitesse de déplacement constante au piston.
Le graphe de la figure 8.13 présente les courbes obtenues. On constate qu'en valeur absolue, les pentes de la partie plastique de ces courbes diminuent avec l'augmentation de la teneur en eau. La teneur en eau ne semble pas influencer la partie élastique. En moyenne, le gonflement de l'échantillon au déchargement correspond à une augmentation de l'indice des vides de 0,08. Pour atteindre un indice des vides final proche de 0,74, il faut appliquer un contrainte de compactage très importante (entre 600 et 1000 kPa) quelle que soit la teneur en eau. Ces valeurs de contraintes trop élevées ne permettent pas d'envisager de mettre en forme l'échantillon par compactage.

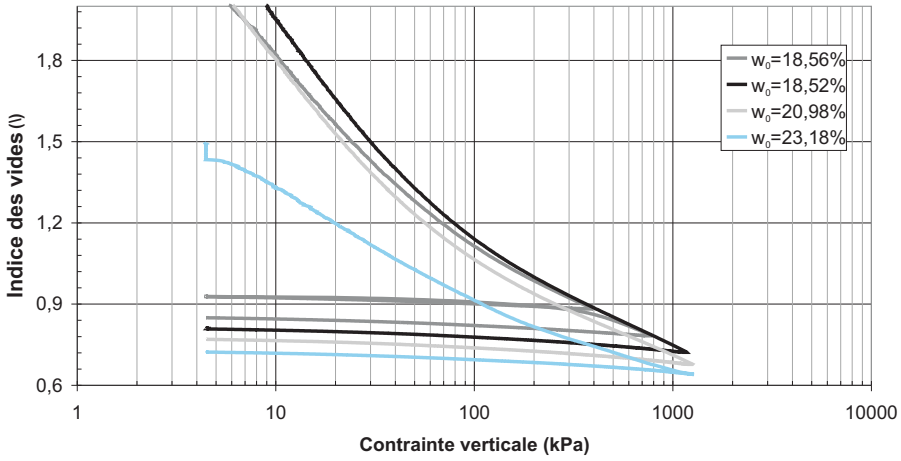

FIG. 8.13 – Courbes de compactage œdométrique pour différentes teneurs en eau initiales.

8.3.2 Essais de fluage

Comme pour les essais de compactage, l'échantillon est préparé sous forme d'une boue dont la teneur en eau est égale à 1,5 fois la limite de liquidité. Cette boue est placée dans une cellule œdométrique dont le piston de chargement est piloté par une machine d'essais de compression. L'essai de fluage consiste à imposer à l'échantillon une charge constante et à mesurer l'évolution des déformations au cours du temps. On se trouve en conditions drainées. On a réalisé 6 essais afin de faire des moyennes sur les résultats. La pression de consigne est de 100 kPa. Elle est atteinte en 6 à 7 minutes. La durée des essais est de 4 heures.
Le graphe de la figure 8.14 présente cinq des résultats obtenus (pour le sixième, seuls les caractéristiques finales de l'échantillon ont été mesurées). Sur ces graphes, on distingue clairement trois parties :

- Une diminution rapide de l'indice des vides qui correspond à la rampe de contrainte permettant d'atteindre la valeur de consigne. Cette partie dure entre 6 et 7 minutes selon les essais.
- Un plateau qui correspond à une valeur de contrainte constante. C'est là que l'on observe le comportement au fluage. Cette partie dure 4 heures.
- Une augmentation de l'indice des vides qui correspond à l'arrêt du chargement. On observe ici un léger gonflement qui induit une augmentation d'environ $0,02$ de l'indice des vides.

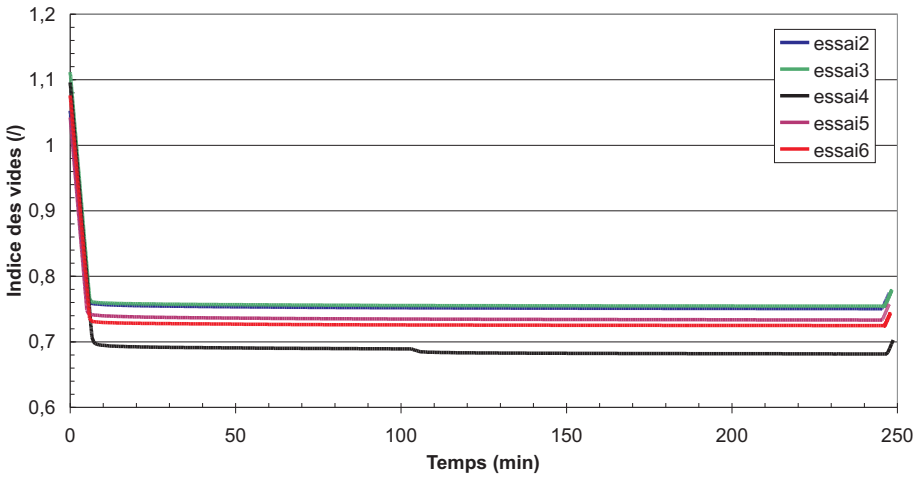

FIG. 8.14 – Courbes de fluage en conditions œdométriques : indice des vides en fonction du temps sous une contrainte verticale de 100 kPa.

Le tableau 8.3 donne les valeurs finales des 6 essais de fluage. Ces valeurs sont en concordance avec les résultats recherchés en ce qui concerne l'indice des vides (compris entre 0,7 et 0,78 par rapport à $0,74 \pm 0,02$) par contre les teneurs en eau obtenues sont trop importantes de 2% en moyenne.

8.3.3 Conclusion

Ces essais préliminaires ont montré que la fabrication des échantillons par compactage n'est pas possible car elle nécessite l'application d'efforts trop importants. Par contre, les

Essais	Indice des vides (/)	Teneur en eau (%)	Degré de saturation (%)
Essai 1	0,76	27,4	97
Essai 2	0,77	27,5	96
Essai 3	0,78	26,1	90
Essai 4	0,70	26,5	102
Essai 5	0,76	27,8	99
Essai 6	0,74	24,9	91
Moyenne	0,75	26,7	96
Ecart type	0,03	1,08	4,64

TAB. 8.3 – États finaux des échantillons soumis aux essais de fluage.

essais de fluage ont été concluants. Les résultats de ces essais montrent que cette méthode permet d'atteindre l'indice des vides voulu, mais la teneur en eau finale des échantillons est trop élevée. De plus, pour être placé dans la cellule de l'appareil d'essai isotrope il faut que l'échantillon ait une certaine rigidité pour qu'il ne se déforme pas sous son propre poids. Or, aux teneurs en eau finales obtenues (tableau 8.3) on observe que l'échantillon s'affaisse. Pour résoudre ce problème, le protocole de fabrication est complété par un chargement hydrique jusqu'à une succion de 50 kPa (sur la courbe de rétention cela correspond à une teneur en eau d'environ 23%). Ce chargement permettra de diminuer la teneur en eau des échantillons et d'augmenter ainsi leur rigidité.

8.4 Protocole et programme expérimentaux

8.4.1 Protocole de fabrication des échantillons

A partir des essais préliminaires le protocole de fabrication des échantillons a pu être établi. Les différentes étapes qui le composent sont décrites ci-dessous :
La première étape permet de garantir des états mécanique et hydrique vierges.

- Préparation d'un mélange de limon sec avec de l'eau déminéralisée afin d'atteindre une teneur en eau égale à $1,5$ fois la limite de liquidité soit $38,1\%$ (cette teneur en eau garantit un état initial saturé).
- Vibration du mélange pendant 5 minutes afin d'éliminer les bulles d'air occluses

La deuxième étape permet d'atteindre la compacité recherchée.

- Consolidation de l'échantillon en appliquant, à l'aide de masses, les paliers suivants :

Etape	Charge (kg)	Durée (min)
1)	18,3	10
2)	38,1	230

La dernière étape permet d'atteindre la teneur en eau recherchée.

- Application d'une succion de 50 kPa jusqu'à atteindre l'équilibre hydrique

A des fins de validation, ce protocole a été testé sur 3 échantillons. Des essais de fluage étant déjà présentés dans la sous section 8.3.2, on présente ici uniquement la dernière partie

du protocole, le chargement hydrique.
La figure 8.15 donne les cinétiques de désorption des échantillons soumis au chargement hydrique de 50 kPa. La diminution de teneur en eau est comprise entre 2 et 4%. L'équilibre est atteint au bout d'un jour. Le tableau 8.4 fait la synthèse des caractéristiques finales obtenues. Ces caractéristiques finales concordent bien avec nos objectifs et la teneur en eau est telle que la consistance des échantillons permet de les installer dans la cellule d'essai isotrope.

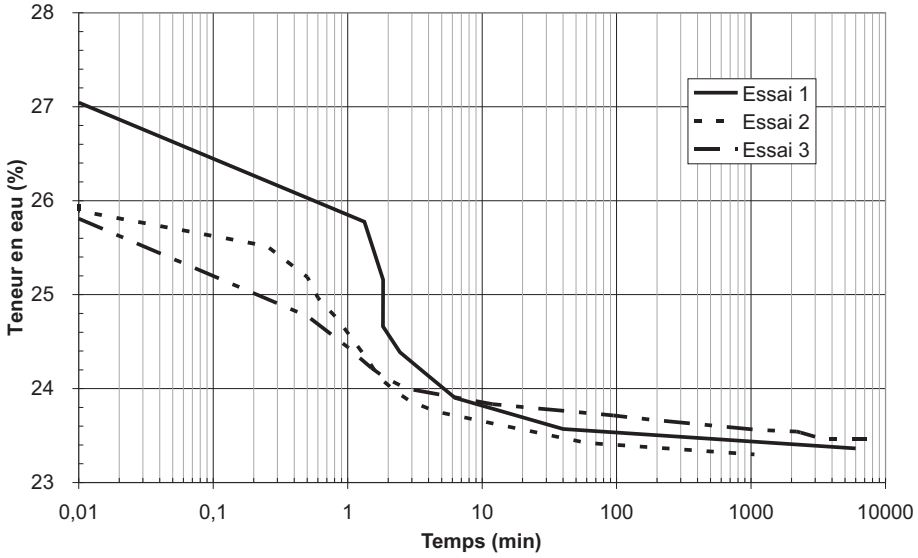

FIG. 8.15 – Cinétiques de désorption sous un chargement de 50 kPa.

Essais	Indice des vides (/)	Teneur en eau (%)
Essai 1	0,696	23,5
Essai 2	0,719	23,3
Essai 3	0,732	23,5
Moyenne	0,716	23,4
Ecart type	0,020	0,29

TAB. 8.4 – États finaux des échantillons.

8.4.2 Programme expérimental

L'objectif du programme expérimental est l'étude de l'effet de la succion et de la température sur le comportement mécanique du limon de Sion.
Le programme expérimental comprend des essais de consolidation isotrope à différents niveaux de succion et de température. Les résultats des essais permettront d'analyser l'influence de la succion et de la température sur les indices de gonflement et de compression ainsi que sur la contrainte de préconsolidation. La figure 8.16 donne, sous forme de chemins de chargement, les différentes étapes des essais réalisés et chacune de ces étapes est décrite par la suite.

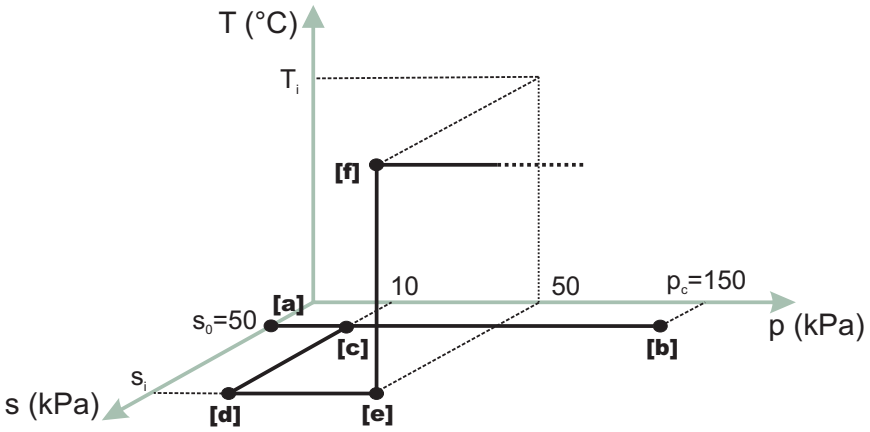

FIG. 8.16 – Étapes des essais de consolidation isotrope à différents niveaux de succion et de température.

1. **Réalisation des conditions initiales :**
   Le point **[a]** représente l'état initial de l'essai obtenu après l'application du protocole de fabrication de l'échantillon. En moyenne, l'indice des vides est de 0,72 et la teneur en eau de 23%. Il existe une contrainte de préconsolidation due à la consolidation par fluage en conditions œdométriques que l'échantillon a subie. L'état hydrique du milieu est imposé par la succion de 50 kPa. La température initiale est de 22°C.
2. **Établissement de la contrainte de préconsolidation**
   A partir des conditions initiales, un cycle de chargement **[b]**/ déchargement **[c]** mécanique est imposé à l'échantillon afin d'établir la contrainte de préconsolidation. La valeur de cette contrainte est 150 kPa. Le déchargement se fait jusqu'à une contrainte isotrope de 10 kPa (OCR=15).
3. **Chargement hydrique**
   Un chargement hydrique est appliqué jusqu'à atteindre la succion s_i à laquelle doit se dérouler la consolidation isotrope **[d]**. Pour les essais où $s_i = s_0$ cette étape n'existe pas et **[d]**=**[c]**.
4. **Chargement thermique**
   Après s'être placé à un OCR de 3 **[e]**, le chargement thermique se fait par incréments inférieurs à 20°C jusqu'a atteindre la température T_i à laquelle doit se dérouler la consolidation isotrope **[f]**. Pour chaque incrément, on attend l'état d'équilibre.
5. **Consolidation isotrope**
   Le chargement mécanique se fait par incréments d'environ 30 kPa jusqu'à atteindre la zone de la nouvelle valeur de la contrainte de préconsolidation puis les incréments sont augmentés pour finir la consolidation.
6. **Déchargement mécanique**
7. **Déchargement thermique**
8. **Déchargement hydrique**
9. **Démontage de l'appareil**
   Plus aucune contrainte n'est appliquée sur l'échantillon. Après démontage on réalise une

Essai	Température (°C)	Succion (kPa)
I-T22S50	22	50
I-T45S50	45	50
I-T68S50	68	50
I-T22S100	22	100
I-T45S100	45	100
I-T68S100	68	100
I-T22S300	22	300
I-T45S300	45	300
I-T68S300	68	300

Tab. 8.5 – Liste des essais de consolidation isotrope et nomenclature.

Essai	Température (°C)	Succion (kPa)
O-T22S0-1	22	0
O-T22S0-2	22	0
O-T80S0	80	0
O-T22S100	22	100
O-T80S100	80	100
O-T22S300	22	300
O-T80S300	80	300

Tab. 8.6 – Liste des essais de consolidation œdométrique et nomenclature.

mesure des valeurs finales de l'indice des vides et de la teneur en eau par pesée (la méthode de mesure est présentée à la sous section 3.2.3).

Le programme expérimental comporte 9 essais de consolidation isotrope. Ces essais correspondent à trois valeurs de succion 50, 100 et 300 kPa et trois valeurs de température 22, 45, 68°C. Le tableau 8.5 donne la liste de ces essais et la nomenclature utilisée.

Afin de tirer des interprétations plus générales, les résultats d'essais en conditions œdométriques réalisés par l'équipe du LMS de l'EPFL seront joints aux résultats des essais de cette étude. Ces essais ont été réalisés avec trois valeurs de succion 0, 100, 300 kPa et deux valeurs de température 20 et 80°C. Le tableau 8.6 donne la liste de ces essais et la nomenclature utilisée.

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter le sol de cette étude en faisant une synthèse de ces principales caractéristiques. Puis, la cellule d'essai isotrope a été décrite en considérant chacun des circuits de contrôle et/ou de mesure des différentes variables. Enfin, le protocole de fabrication des échantillons et le protocole d'essais ont été détaillés.

Chapitre 9

Étude expérimentale

Ce chapitre est consacré à la présentation des essais de consolidation mécanique réalisés sous différents niveaux de température et de succion. Les résultats des essais concernent en particulier les indices de gonflement et de compression et la contrainte de préconsolidation qui seront obtenus au cours de l'étape 5 du programme expérimental "consolidation mécanique". Mais il a également été possible d'exploiter les étapes 3 et 4 qui concernent les chargements hydriques puis thermiques.

Dans la section 9.1, les résultats seront présentés dans l'ordre des étapes 3, 4 et 5 du programme expérimental. Puis, les indices de gonflement et de compression ainsi que les contraintes de préconsolidation des neuf essais de consolidation isotrope, réalisés à trois niveaux différents de température et de succion, seront déterminés. A partir de ces données, on analysera et on interprétera, dans la section 9.2, l'effet de la température et de la succion sur les indices de gonflement et de compression. Enfin, la section 9.3 sera consacrée à l'étude de l'influence des chargements thermique et hydrique sur la contrainte de préconsolidation. Une fonction d'approximation exprimant la contrainte de préconsolidation en fonction de la température et de la succion, sera proposée.

9.1 Résultats des essais

9.1.1 Comportement hydrique

Après avoir réalisé les étapes 1 et 2 (fabrication de l'échantillon et établissement de la contrainte de préconsolidation), l'étape 3 consiste à appliquer la succion s_i à laquelle doit se dérouler la consolidation mécanique. On rappelle que les trois valeurs de succion étudiées sont 50, 100 et 300 kPa. Pour les essais I-T22S50, I-T45S50, I-T68S50 la succion s_i est déjà atteinte dans l'étape 1. Pour les autres essais, l'application de la succion s_i est faite en plusieurs étapes. Les variations de teneur en eau et d'indice des vides obtenues lors des chargements hydriques sont présentées sur les figures 9.1 et 9.2. L'incertitude des résultats est estimée à $\pm 2\%$ pour la teneur en eau et $\pm 0,001$ pour l'indice des vides.
A titre de comparaison, la courbe de rétention du limon de Sion obtenue par Péron et al. (2007) est également tracée. Elle correspond à la température ambiante (T=20°C) et à un indice des vides moyen de 0,69. On peut noter que, malgré les différences de densité des échantillons testés, les courbes de rétention sont proches. L'incertitude sur la mesure de la teneur en eau ne nous permet pas de faire des conclusions quantitatives sur ces résultats mais on constate que la tendance est la même pour tous les essais.

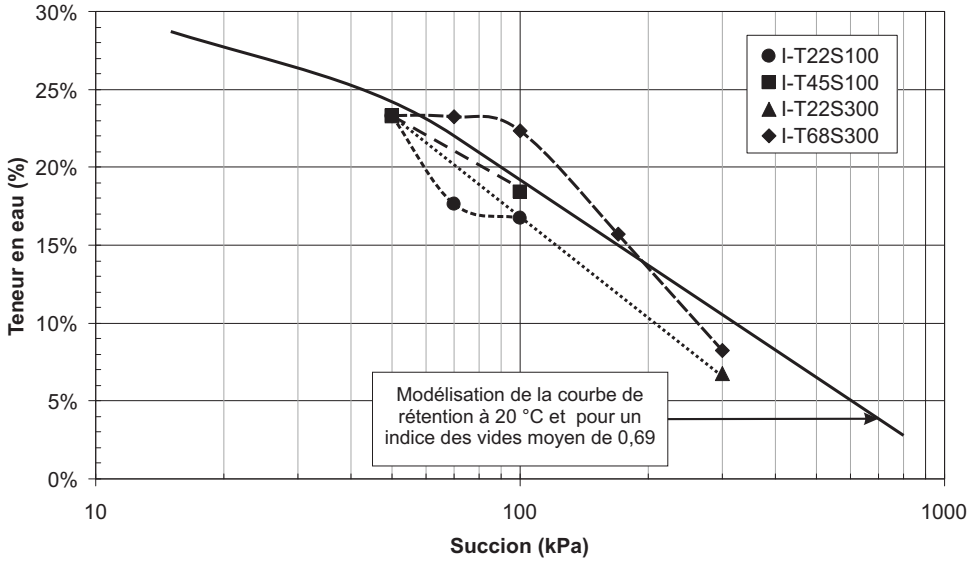

FIG. 9.1 – Variation de la teneur en eau observée lors du chargement hydrique pour les différents essais.

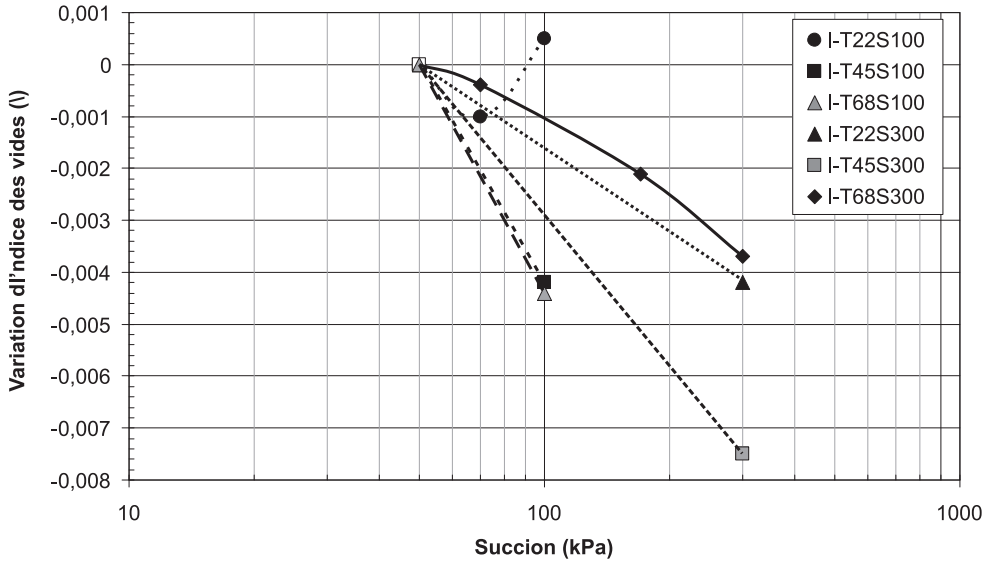

FIG. 9.2 – Variation de l'indice des vides observée lors du chargement hydrique pour les différents essais.

La figure 9.2 donne les variations de l'indice des vides induites par le chargement hydrique pour les six essais. L'ordre de grandeur de ces variations est très faible car inférieur au centième. On se trouve proche de la limite de la résolution de l'appareillage. Ici aussi l'ordre de grandeur des variations de volume ne permet pas de faire des conclusions quantitatives mais les résultats de ces essais sont, dans l'ensemble, cohérents.
La comparaison directe avec les résultats de Péron et al. (2007) n'est pas possible puisque l'état

initial des échantillons n'est pas le même, une boue dans le premier cas et un état consolidé dans le second. Par contre ces auteurs montrent que le tassement hydrique est réversible pour des succions supérieures à 30 kPa. On se trouve donc dans un domaine élastique.

La figure 9.3 exprime les variations du degré de saturation en fonction de la succion. La figure 9.2 a montré que les variations de l'indice des vides correspondantes sont faibles. Leur incidence sur le degré de saturation est donc mineure. De ce fait, la comparaison entre les résultats obtenus dans nos conditions expérimentales et dans celles étudiées par Péron et al. (2007) est envisageable.
Sur la figure 9.3, la courbe en pointillés représente la courbe de rétention obtenue par Péron et al. (2007) à la température ambiante (T=22°C) et pour un indice des vides moyen de 0,69. Les points expérimentaux sont issus des essais I-T22S100, I-T45S100, I-T22S300 et I-T68S300. On observe la même tendance pour tous les essais.
Pour une même valeur de succion, les écarts entre les mesures correspondant aux différents essais peuvent être de 20%. Ces écarts résultent de la variabilité de l'état initial et de l'incertitude sur les mesures d'indices des vides et de teneurs en eau.

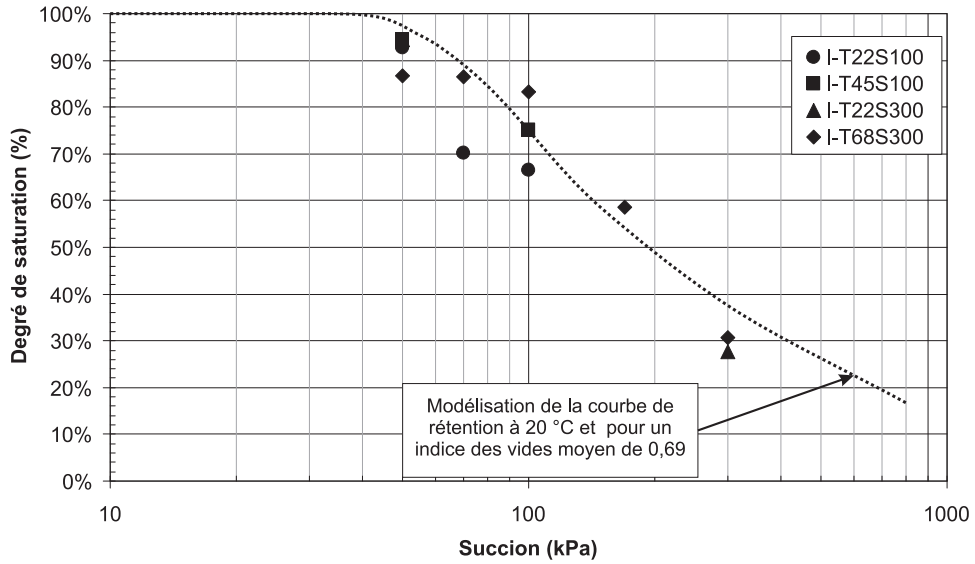

FIG. 9.3 – Évolution du degré de saturation observée lors du chargement hydrique pour les différents essais.

9.1.2 Chargement thermique

Aprés avoir atteint l'état hydrique correspondant à une succion s_i, on applique le chargement thermique pour atteindre la température T_i à laquelle le chargement mécanique est envisagé. Ce chargement thermique est réalisé par incréments successifs inférieurs à 20°C. Entre chaque incrément de température on vérifie que les équilibres mécanique et hydrique sont atteints. Pour les essais I-T22S50, I-T22S100 et I-T22S300, il n'y pas de chargement thermique car la température T_i est la température initiale. Les six autres essais permettent d'étudier le comportement thermique du milieu pour les trois niveaux de succion 50, 100 et 300 kPa. La figure 9.4 présente les résultats obtenus. A titre de comparaison on présente également

sur cette figure les résultats d'un essai de consolidation thermique en conditions œdométriques drainées d'un échantillon saturé réalisé par Cekerevak (2003). On observe un comportement contractant à l'augmentation de température. En se plaçant à un OCR relativement faible, le chargement thermique induit des déformations plastiques, la température réduit la viscosité de l'eau et facilite les réarrangements granulaires.
Les courbes correspondant aux différentes succions sont très proches et aucune tendance ne peut être dégagée. On peut donc conclure que la succion semble peu influencer le comportement en température. Il est à noter que les variations mesurées de l'indice des vides sont faibles et se trouvent proches de la résolution de la chaîne de mesure.

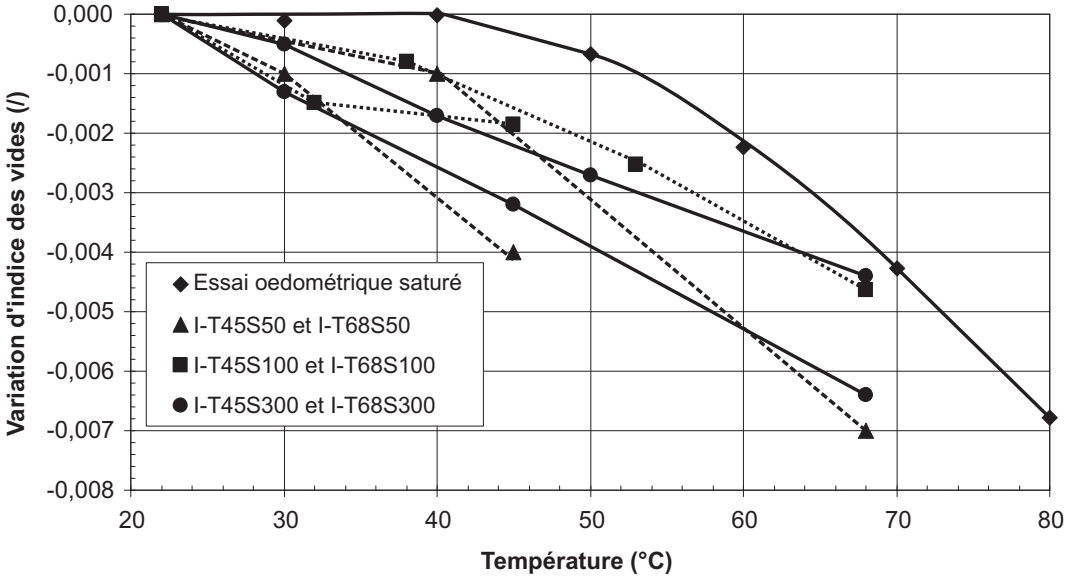

FIG. 9.4 – Consolidation thermique à différents niveaux de succion.

9.1.3 Consolidation mécanique

Les figures 9.5 et 9.6 présentent les neuf essais de consolidations isotropes réalisés. La figure 9.5 permet de comparer les résultats d'essais réalisés à la même température pour mettre en évidence les effets de la succion sur le comportement mécanique. La figure 9.6 permet de comparer les résultats d'essais réalisés à la même succion pour mettre en évidence les effets de la température.
L'état initial des consolidations isotropes est défini par un OCR de 3, une température T_i et une succion s_i. Les variations dues aux chargements thermique et hydrique ne sont donc pas prises en compte sur ces figures.
Les contraintes isotropes maximales imposées sont comprises entre 500 et 600 kPa selon les essais. Ces valeurs de contrainte sont suffisantes pour caractériser correctement la partie plastique du comportement. Ces valeurs maximales sont atteintes en une dizaine de paliers de chargement.

De façon générale, on note que le limon de Sion est un milieu peu déformable ; les variations observées de l'indice des vides sont faibles (inférieures à 0,1). Comparativement à d'autres matériaux, le changement de pente entre les parties élastique et plastique est peu marqué.

L'essai I-T22S50 est un essai de référence. La consolidation isotrope a été réalisée directement après le protocole de fabrication. La contrainte de préconsolidation de 150 kPa n'a pas été appliquée à l'échantillon.

9.1.4 Mise en évidence de l'effet de la succion

La comparaison des résultats des essais réalisés à la même température présentés sur la figure 9.5 met en évidence principalement deux points :

- Dans le domaine plastique, pour un même accroissement de la contrainte isotrope la variation de l'indice des vides diminue quand la succion augmente. La désaturation a pour effet de "rigidifier" le comportement du sol. Ce point s'explique par le fait que l'eau lubrifie les contacts entre grains. Plus le milieu est sec et plus les réarrangements granulaires sont difficiles.
- L'augmentation de succion a pour effet de "décaler les courbes vers la droite". La valeur de la contrainte isotrope où se situe le changement de pente qui caractérise le passage du comportement élastique au comportement plastique augmente avec la succion. Plus la succion est élevée, plus la cohésion granulaire due aux ponts capillaires est forte. Les réarrangements granulaires qui sont à l'origine des déformations plastiques nécessitent donc des états de contrainte plus importants.

Pour les essais réalisés à 45 et 68°C, les courbes correspondant aux deux valeurs de succion les plus importantes sont quasiment confondues. Les deux effets décrits ci-dessus sont donc moins importants pour les fortes succions. On peut penser que les effets de la désaturation s'atténuent à partir d'un certain niveau de succion.
Ce point a d'ailleurs été observé dans la partie I. Dans le cas d'essais de chargement hydrique (réalisés à contrainte extérieure nulle), on a montré qu'il existe une valeur limite de succion à partir de laquelle les couplages hydro-mécaniques deviennent négligeables.

9.1.5 Mise en évidence de l'effet de la température

La figure 9.6 met en évidence l'effet de la température sur le comportement mécanique du limon de Sion.
On remarque en premier lieu que l'effet de la température sur les pentes des parties élastique et plastique n'est pas marqué.
La plupart des résultats bibliographiques montrent que la température influe sur la contrainte correspondant à la limite entre les parties élastique et plastique. Cet effet pourrait se traduire, sur les graphes de la figure 9.6, par un "décalage" des courbes comme cela a été observé dans le cas de la succion. Mais aucun décalage n'est mis en évidence. Pourtant, comme le montrera l'interprétation de ces résultats, cette contrainte limite diminue avec la température. Deux phénomènes expliquent cette diminution. Premièrement, l'augmentation de température diminue la viscosité de la phase liquide ce qui facilite le glissement entre grains. Deuxièmement, comme cela a été décrit dans la section 7.3, l'épaisseur de la double couche diffuse augmente avec la température. Cela facilite le réarrangement au niveau des plaquettes d'argile. La fraction argileuse du limon de Sion ne représentant que 22% de sa composition, ce deuxième phénomène n'est pas a priori prépondérant. Ce deux phénomènes conduisent au fait que le seuil élastique apparait pour des états de contrainte plus faibles.

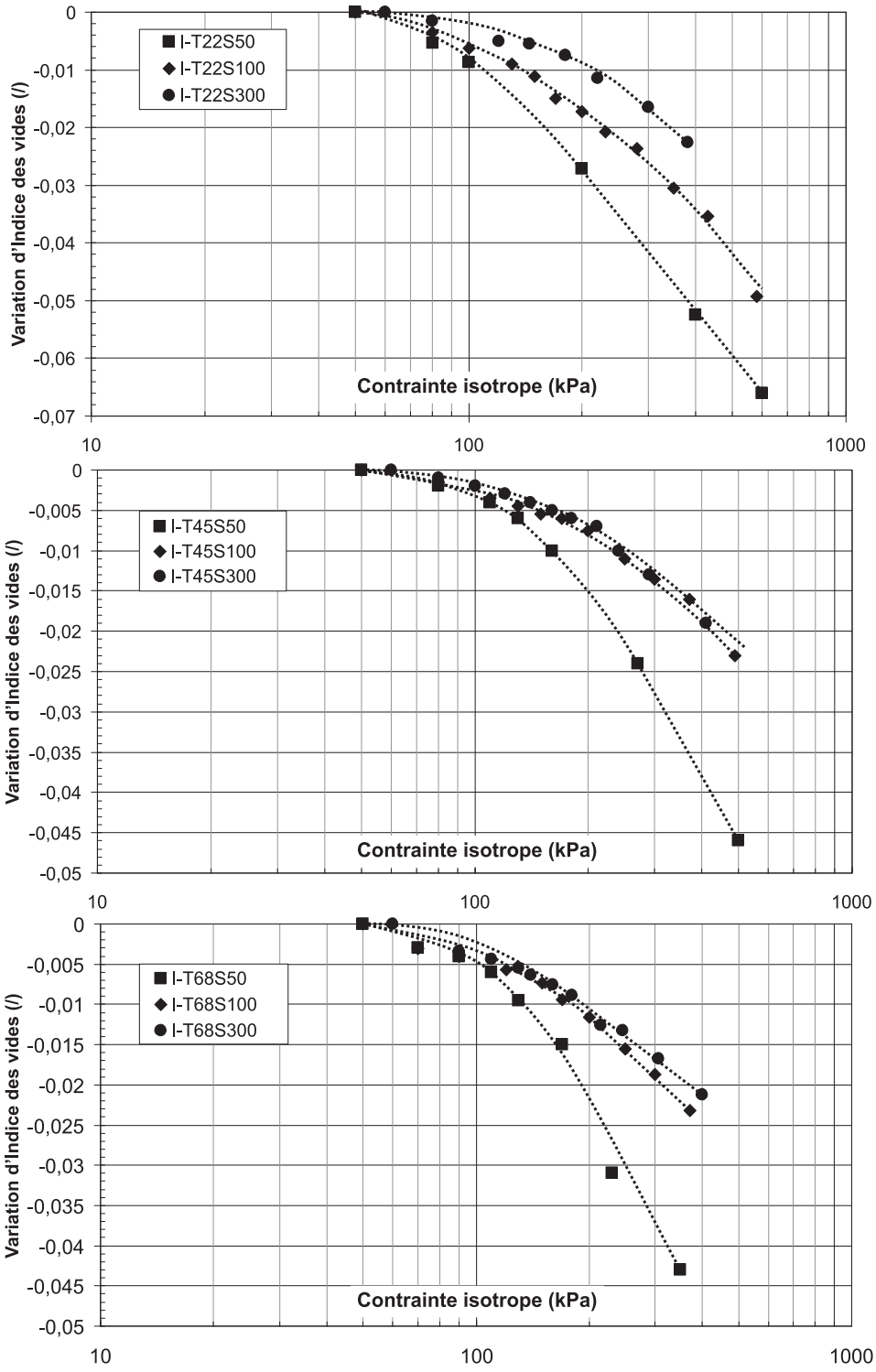

FIG. 9.5 – Résultats des essais de consolidation isotrope présentés à la même température et à différentes succions.

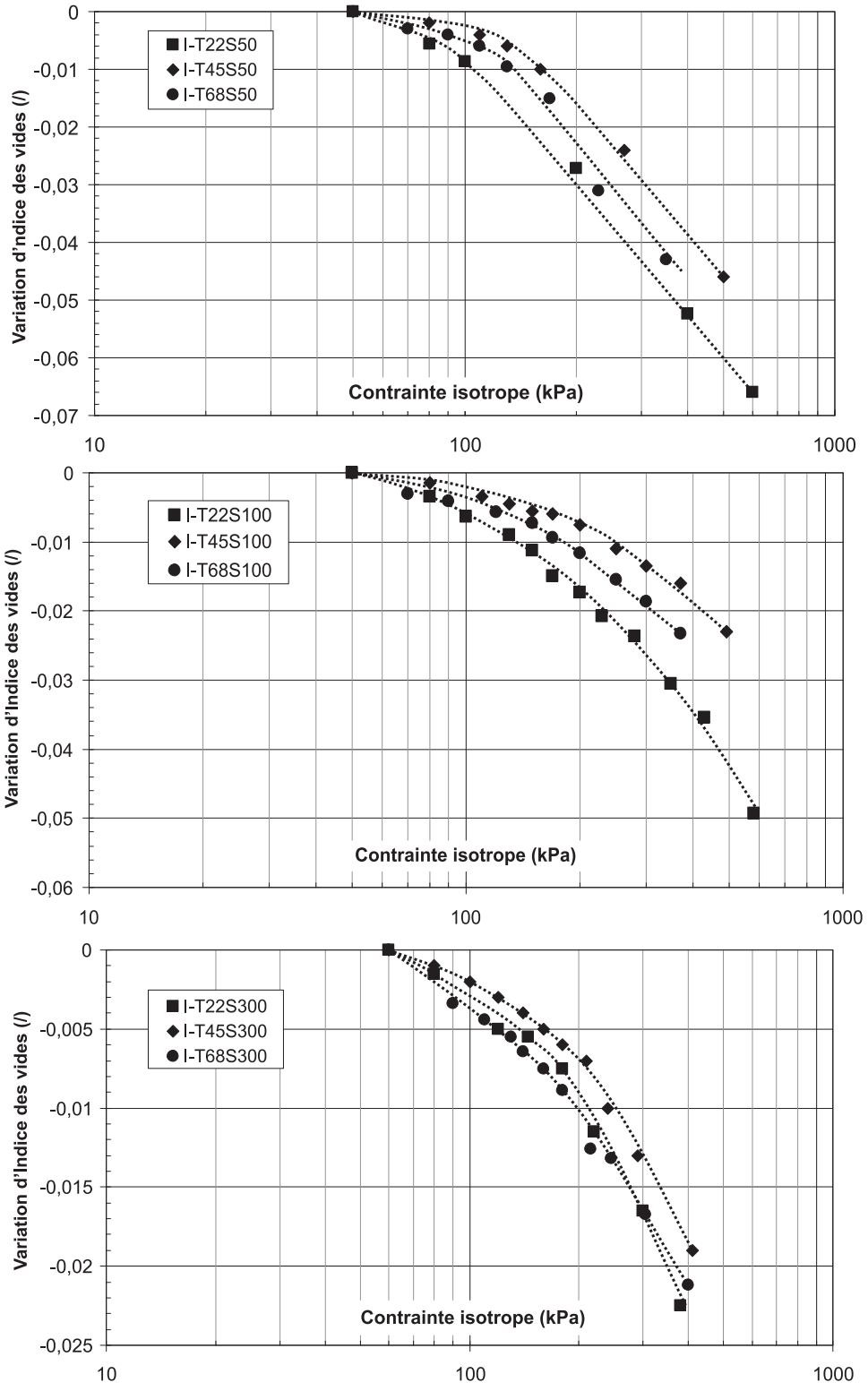

FIG. 9.6 – Résultats des essais de consolidation isotrope présentés à la même succion et à différentes températures.

9.2 Indice de gonflement et de compression

A partir des neuf essais de consolidation mécanique, les indices de gonflement κ et de compression λ ont été déterminés (figure 9.7). Ces indices représentent les pentes des parties élastique et plastique des courbes de consolidation. Ces paramètres ont été mesurés en utilisant le protocole suivant :

- Les indices de gonflement κ ont été mesurés en considérant la partie élastique du chargement. Classiquement ce paramètre est mesuré au déchargement. Il se trouve que certains de nos essais ont été interrompus avant le déchargement complet. Pour tous les essais où on dispose des courbes de déchargement, la pente de ces dernières coïncide avec celle de la partie de la courbe concernant le chargement surconsolidé. Pour cette raison et pour garder une démarche cohérente sur l'ensemble des essais, tous les indices ont été mesurés sur la même partie du graphe de consolidation en utilisant les points situés entre 50 et 150 kPa.
- Les indices de compression λ ont été mesurés en utilisant les points situés entre 250 et 600 kPa.

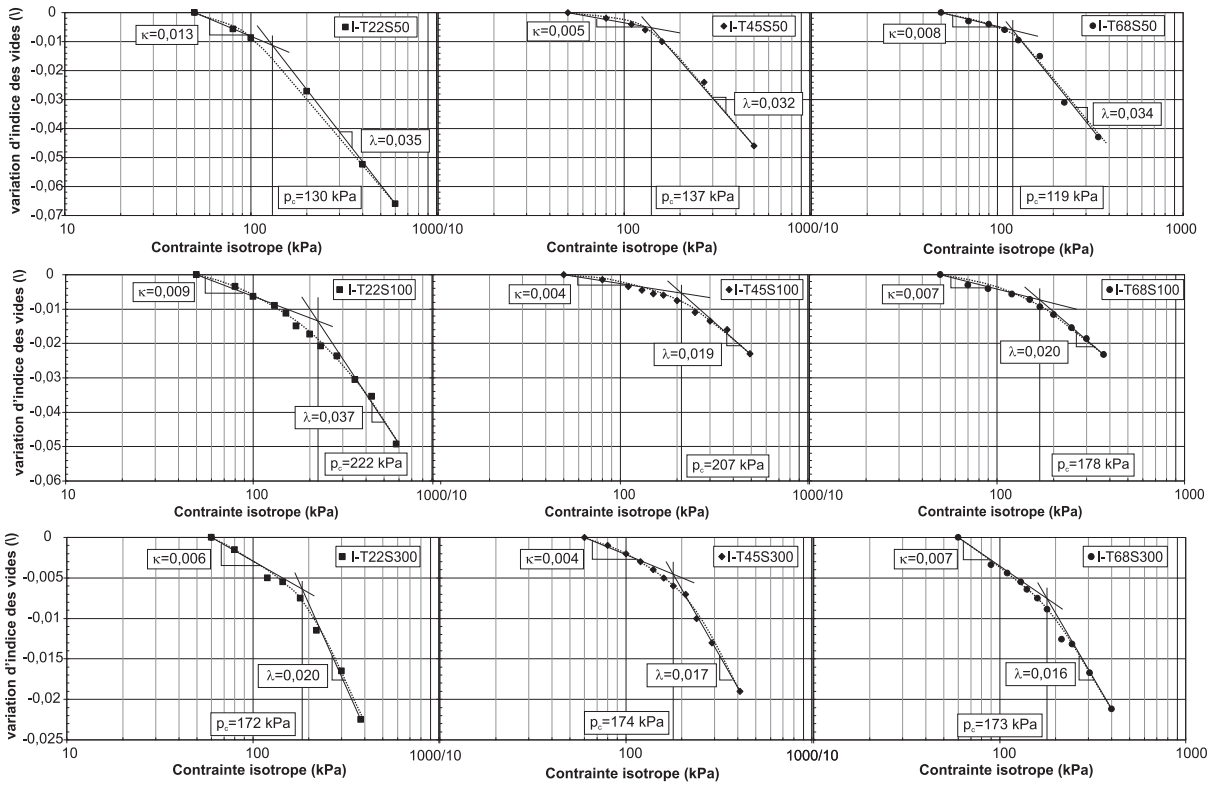

FIG. 9.7 – Détermination des indices de gonflement et de compression ainsi que de la contrainte de préconsolidation sur les neufs essais de consolidation isotrope.

Le tableau 9.1 donne les indices mesurés.

La figure 9.8 donne l'évolution des indices de gonflement et de compression en fonction de la température pour les trois succions de 50, 100 et 300 kPa. De façon générale, les indices

Essais	Indice de gonflement	Indice de compression
I-T22S50	0,013	0,035
I-T45S50	0,005	0,032
I-T68S50	0,008	0,034
I-T22S100	0,009	0,037
I-T45S100	0,004	0,019
I-T68S100	0,007	0,020
I-T22S300	0,006	0,020
I-T45S300	0,004	0,017
I-T68S300	0,007	0,016

TAB. 9.1 – Indice de gonflement et de compression des différents essais.

diminuent légèrement avec la température.

Pour les indices de gonflement, cette tendance est plus marquée et leur valeur peut varier du simple au double. La diminution est nette entre la température ambiante et 45°C puis on observe une légère augmentation. L'effet de la température semble important pour les succions voisines de 50 et 100 kPa. Au-delà l'effet de la température devient très faible voire négligeable. Ce point est a rapprocher avec un des résultats de la partie I où on a observé que les couplages thermo-hydriques était moins importants pour les fortes succions.

Pour les indices de compression, les diminutions observées sont quasiment négligeables. On ne tiendra pas compte de l'indice obtenu pour l'essai réalisé à la température ambiante et à une succion de 100 kPa qui s'écarte trop des tendances observées. L'influence de la température est la même pour toutes les succions.

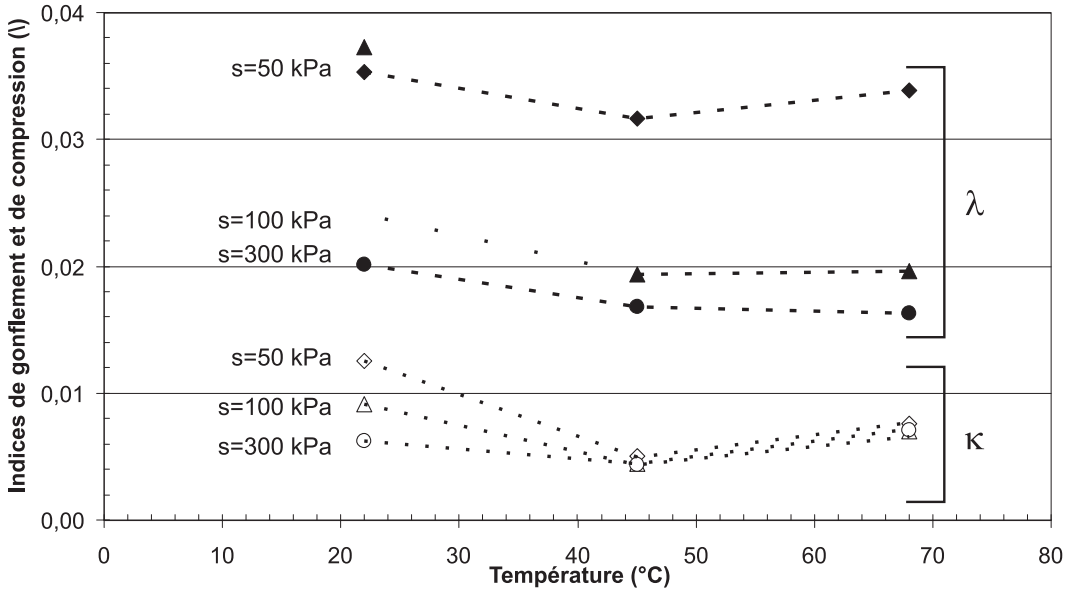

FIG. 9.8 – Évolution des indices de gonflement κ et de compression λ en fonction de la température pour les trois succions de 50, 100 et 300 kPa.

La figure 9.9 donne l'évolution des indices de gonflement et de compression en fonction de la succion pour les trois températures de 22, 45 et 60°C.

- La tendance générale observée est la diminution des indices lorsque la succion augmente. Cette diminution due à la succion est plus marquée que celle due à la température (figure 9.8).
- Pour les indices de gonflement, il n'y a pas d'évolution notable en fonction de la succion sauf à la température de 22°C entre 50 et 100 kPa.
- Pour les indices de compression, si on laisse de coté la valeur donnée par l'essai I-T22S100, la diminution est d'environ 30% entre 50 et 100 kPa. Au-delà, la diminution des indices de compression est très faible voire négligeable. L'influence de la succion apparait quelle que soit la température.

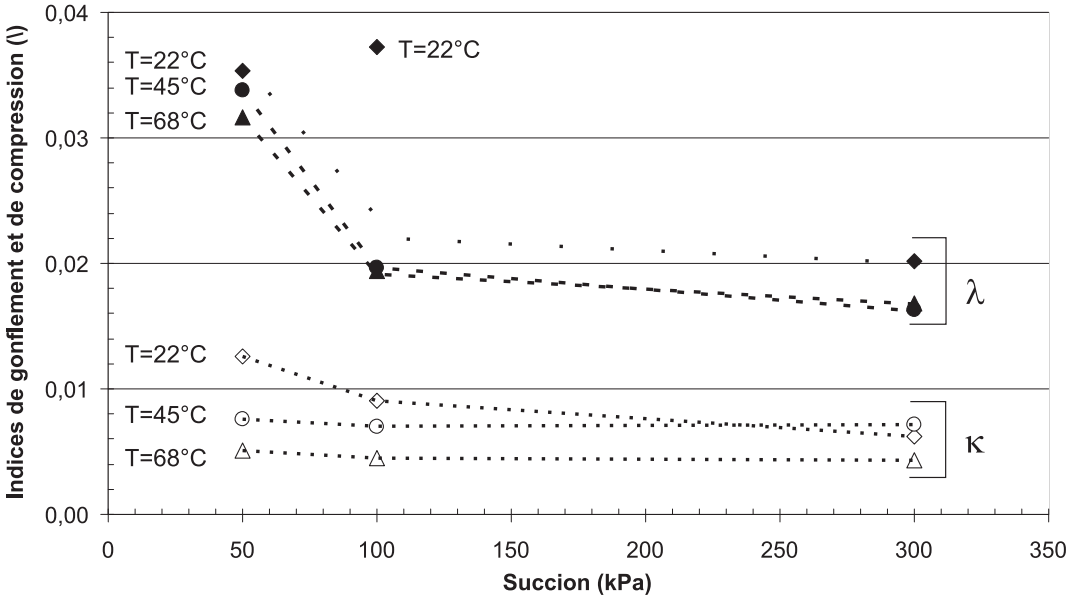

FIG. 9.9 – Évolution des indices de gonflement κ et de compression λ en fonction de la succion pour les trois température de 22, 45 et 60°C.

Les essais isotropes présentés ci-dessus s'intègrent dans un programme expérimental plus large concernant l'influence de la température et de la succion sur le comportement mécanique du limon de Sion. D'autres essais ont été réalisés par l'équipe du LMS de l'EPFL en utilisant un œdomètre (François et al. (2007)). Les résultats de ces essais sont présentés ici à titre de comparaison. Le tableau 9.2 rassemble les indices de gonflement et de compression mesurés lors de ces essais. L'évolution de ces indices ainsi que celle des indices obtenus dans les essais isotropes en fonction de la température et de la succion sont représentées dans les figures 9.10 et 9.11.

Pour les essais réalisés en conditions saturées, la température induit une petite augmentation des indices de gonflement et de compression. Par contre, dans le cas non saturé, ces indices diminuent légèrement avec la température comme on l'avait observé pour les essais isotropes.

Essais	Indice de gonflement	Indice de compression
O-T22S0-1	0,012	0,048
O-T22S0-2	0,010	0,061
O-T80S0	0,018	0,066
O-T22S100	0,004	0,055
O-T80S100	0,003	0,044
O-T22S300	0,015	0,062
O-T80S300	0,005	0,052

TAB. 9.2 – Indice de gonflement et de compression des différents essais réalisés en conditions œdométriques.

L'effet de la succion est moins marqué pour les indices des essais œdométriques qu'il ne l'est sur les indices des essais isotropes. En ce qui concerne les indices de compression, aucune tendance claire ne se dégage. Par contre si l'on ne tient pas compte du résultat obtenu à la température ambiante et à une succion de 300 kPa, on retrouve la même évolution des indices de gonflement : forte diminution jusqu'à la succion de 100 kPa puis, quasi stabilité pour les succions supérieures.

On peut conclure que, de façon générale, une augmentation de température ou de succion tend à diminuer les indices de gonflement et de compression. L'effet de la température est moins marqué que celui de la succion. Dans plusieurs cas, on observe que la succion induit une forte diminution des indices entre 0 et 100 kPa puis, pour les valeurs supérieures, son incidence s'atténue.

On remarque enfin que les indices de gonflement des essais réalisés en conditions isotropes et œdométriques ont des valeurs voisines. Par contre, concernant les indices de compression, on note que les valeurs obtenues pour les essais œdométriques sont fortement supérieures à celles obtenues pour les essais isotropes. Ce point est en désaccord avec certains résultats bibliographiques (Biarez et Hicher (1994), Verbrugge et Fleureau (2002), Jamin (2003)).
Pour obvier à tout artefact dû aux particularités des cellules d'essais, ces résultats ont été comparés à ceux obtenus, par l'équipe du LMS de l'EPFL, en conditions saturées et à la température ambiante, sur deux autres cellules d'essais, l'une œdométrique et l'autre isotrope. En conditions isotropes, on trouve un indice de compression de $0,04$ et en conditions œdométriques un indice de $0,06$. Ces valeurs confirment celles trouvées dans le présent programme expérimental.
Tous ces résultats suggèrent que l'indépendance de l'indice de compression vis-à-vis du type de chargement (oedométrique ou triaxial), avancée par les différents auteurs cités ci-dessus, n'est, a priori, pas généralisable à tous les types de sols.

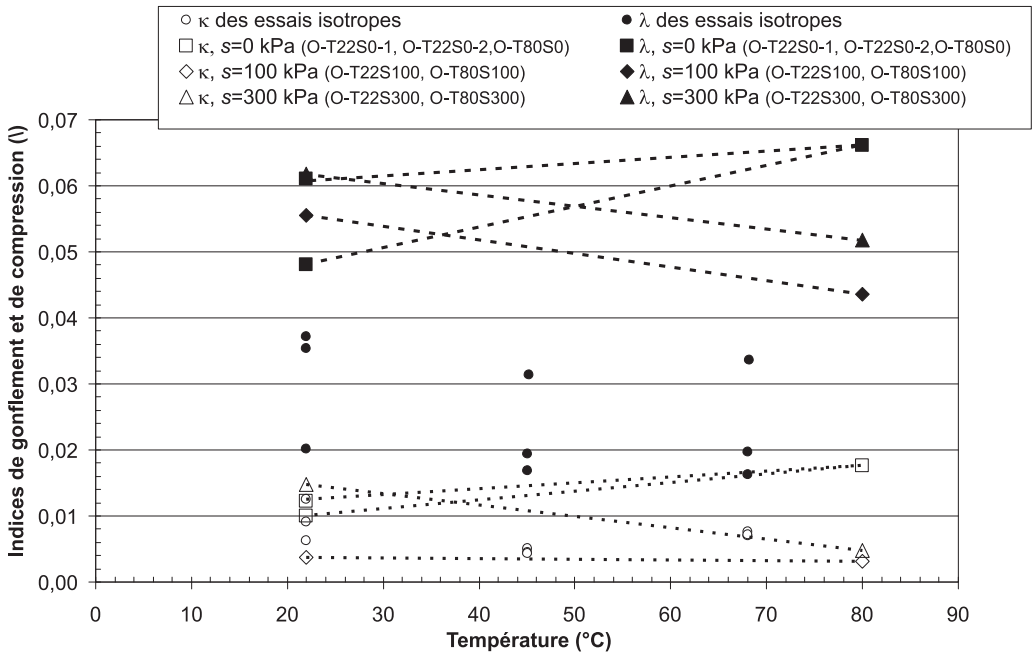

FIG. 9.10 – Comparaison des résultats obtenus en conditions isotropes et œdométriques : évolution des indices de gonflement κ et de compression λ en fonction de la température.

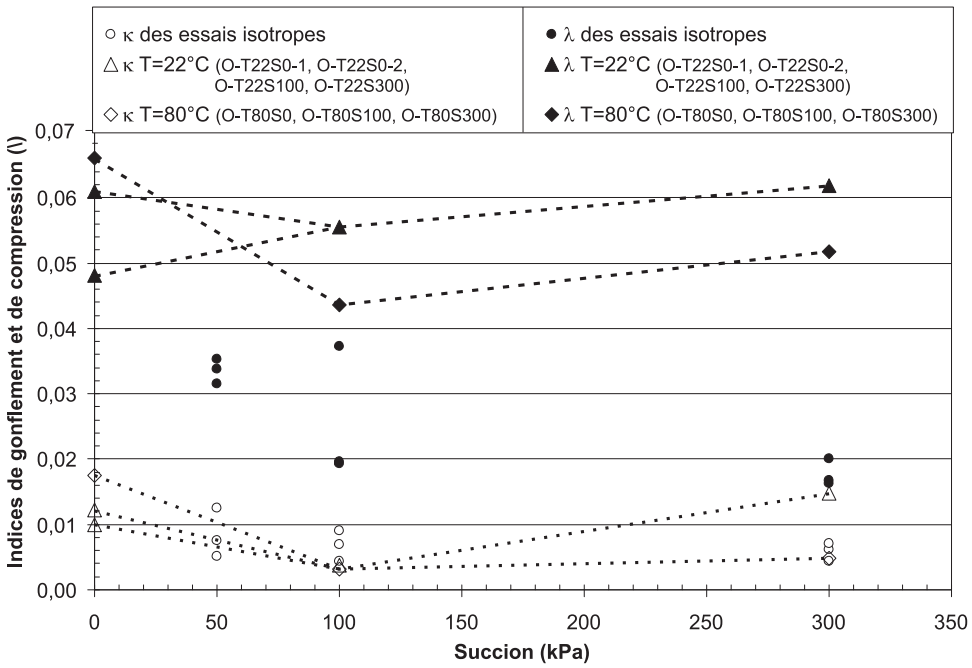

FIG. 9.11 – Comparaison des résultats obtenus en conditions isotropes et œdométriques : évolution des indices de gonflement κ et de compression λ en fonction de la succion.

9.3 Contrainte de préconsolidation

9.3.1 Cas des essais isotropes

Les contraintes de préconsolidation des différents essais ont été déterminées à l'intersection de la droite du domaine élastique de pente κ, et de la droite du domaine plastique de pente λ. Les valeurs des contraintes de préconsolidation obtenues dépendent donc directement des mesures de ces deux indices (figure 9.7). L'essais I-T22S50 qui a servi à déterminer les indices κ et λ correspondant à la température de 22°C et à la succion de 50 kPa n'est pas pris en compte dans l'analyse de la contrainte de préconsolidation. La contrainte de préconsolidation de référence, à la température de 22°C et à la succion de 50 kPa, est la contrainte de préconsolidation initiales de tous les essais (excepté l'essai I-T22S50), à savoir 150 kPa. Le tableau 9.3 donne les contraintes de préconsolidation calculées pour les neuf essais isotropes de cette étude.

Essais	p_c (kPa)
Référence	150
I-T22S50	130
I-T45S50	137
I-T68S50	119
I-T22S100	222
I-T45S100	207
I-T68S100	178
I-T22S300	172
I-T45S300	174
I-T68S300	173

Tab. 9.3 – Contraintes de préconsolidation des différents essais isotropes.

La figure 9.12 présente l'évolution de la contrainte de préconsolidation en fonction de la température pour les trois succions étudiées.
Pour des succions de 50 et 100 kPa, on observe une décroissance de la contrainte de préconsolidation avec l'augmentation de température. Pour ces deux succions, on note une diminution de la contrainte de préconsolidation linéaire avec l'augmentation de température dont la pente ne semble pas dépendre de la succion.
Par contre, pour une succion de 300 kPa, la température ne semble pas avoir d'influence sur la contrainte de préconsolidation. Ce dernier point apparaît singulier par rapport aux autres résultats de cette étude ainsi qu'à ceux de la littérature.

La figure 9.13 représente l'évolution de la contrainte de préconsolidation en fonction de la succion pour les trois températures étudiées. Si on s'en tient strictement aux résultats expérimentaux, cette évolution n'est pas monotone. La contrainte de préconsolidation qui semble augmenter entre 50 et 100 kPa de succion puis diminuer pour les valeurs supérieures. Pour une succion de 300 kPa, tous les points sont confondus. Cela correspond à l'indépendance vis-à-vis de la température observée pour ce niveau de succion sur la figure 9.12.
L'interprétation que l'on peut faire de ces résultats est différente de l'observation première. Cette interprétation est représentée sur le graphe par les points espacés. La contrainte de

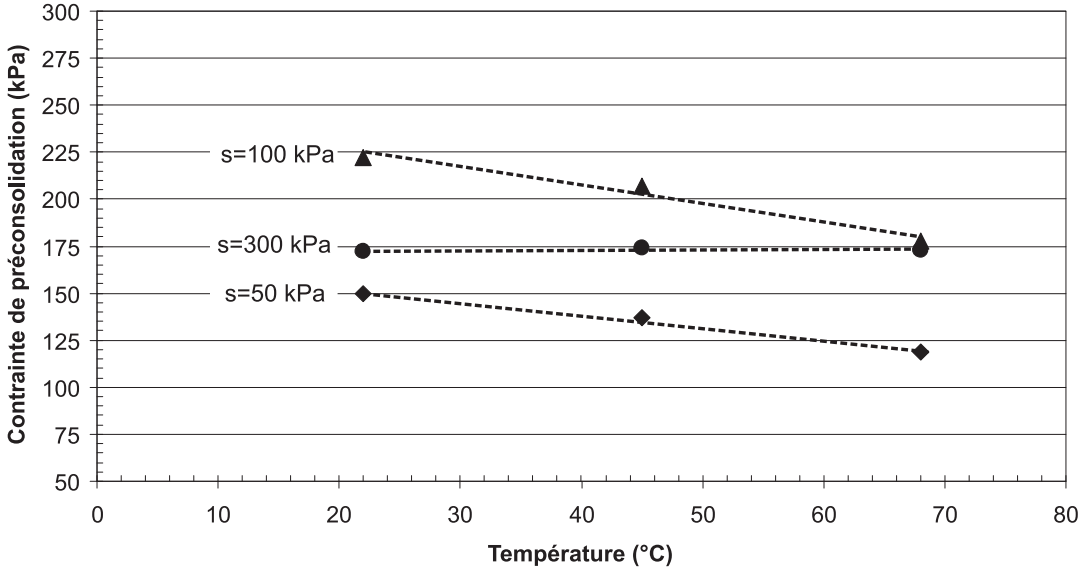

FIG. 9.12 – Évolution de la contrainte de préconsolidation en fonction de la température pour les trois succions étudiées.

préconsolidation augmenterait pour les faibles succions (entre 50 et 100 kPa) puis atteindrait un plateau. On suppose donc qu'à partir d'un certain seuil, la désaturation, n'induit plus de "rigidification".
Cette interprétation est appuyée par les résultats obtenus sur les indices de compression pour lesquels on observe le même type de comportement.

9.3.2 Comparaison avec les essais œdométriques réalisés par l'équipe du LMS de l'EPFL

Les résultats des essais œdométriques obtenus par François et al. (2007) vont être rapprochés de ceux de cette étude afin d'enrichir les données expérimentales sur lesquelles s'appuiera le choix des fonctions d'ajustement de l'évolution de la contrainte de préconsolidation. Les contraintes de préconsolidation initiales, établies avant les chargements thermique et hydrique, ne sont pas les mêmes pour les essais isotropes et œdométriques. On analysera donc l'influence de la température et de la succion à travers un rapport adimensionné σ_c/σ_{c0}, σ_c est la contrainte de préconsolidation déterminée à la température et à la succion du chargement mécanique final de l'essai et σ_{c_0} est la contrainte de préconsolidation initiale (). De plus, pour les différentes représentations graphiques utilisées, on adimensionne les variables température et succion en utilisant les rapports entre la température ou la succion de l'essai (T ou s) et la température ou la succion de référence ($T_0 = 22°\text{C}$ ou $s_a = 50$ kPa).
Le tableau 9.4 synthétise ces différentes données correspondant à chacun des essais.

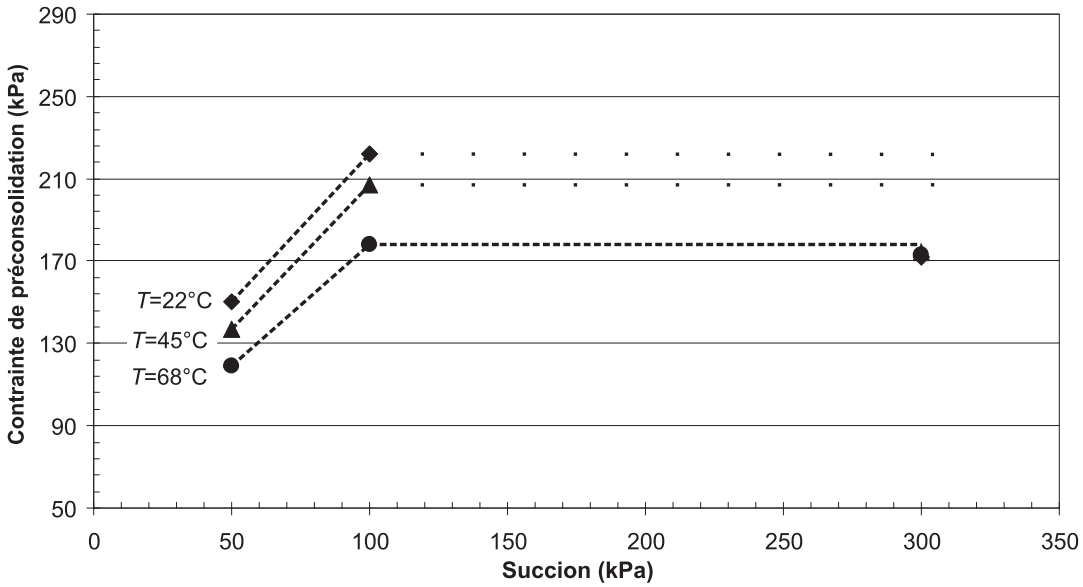

FIG. 9.13 – Évolution de la contrainte de préconsolidation en fonction de la succion pour les trois températures étudiées.

Essai	$\sigma_{c_0} kPa$	σ_c kPa	T/T_0 (/)	s/s_a (/)	σ_c/σ_{c_0} (/)
I-T45S50	150	137	2	1	0,91
I-T68S50	150	119	3,1	1	0,79
I-T22S100	150	222	1	2	1,48
I-T45S100	150	207	2	2	1,38
I-T68S100	150	178	3,1	2	1,19
I-T22S300	150	172	1	6	1,15
I-T45S300	150	174	2	6	1,16
I-T68S300	150	173	3,1	6	1,15
O-T22S0-1	250	250	1	0	1
O-T22S0-2	134	134	1	0	1
O-T80S0	99	98	3,6	0	0,99
O-T22S100	100	130	1	2	1,30
O-T80S100	100	57	3,6	2	0,57
O-T22S300	100	142	1	6	1,42
O-T80S300	91	97	3,6	6	1,07

TAB. 9.4 – Données relatives aux contraintes de préconsolidation des essais isotropes et œdométriques.

La figure 9.14 présente l'évolution du rapport σ_c/σ_{c_0} en fonction du rapport T/T_0. Pour les essais isotropes, on retrouve les résultats présentés sur la figure 9.12.
Les essais œdométriques réalisés à saturation montrent une contrainte de préconsolidation qui ne varie pas en fonction de la température. Par contre, pour les succions de 100 et 300 kPa, on retrouve les mêmes tendances que celles observées dans le cas des essais isotropes à savoir une

diminution linéaire de la contrainte de préconsolidation avec l'augmentation de température. La pente correspondant à la succion de 300 kPa semble proche de celles trouvées pour les essais isotropes.

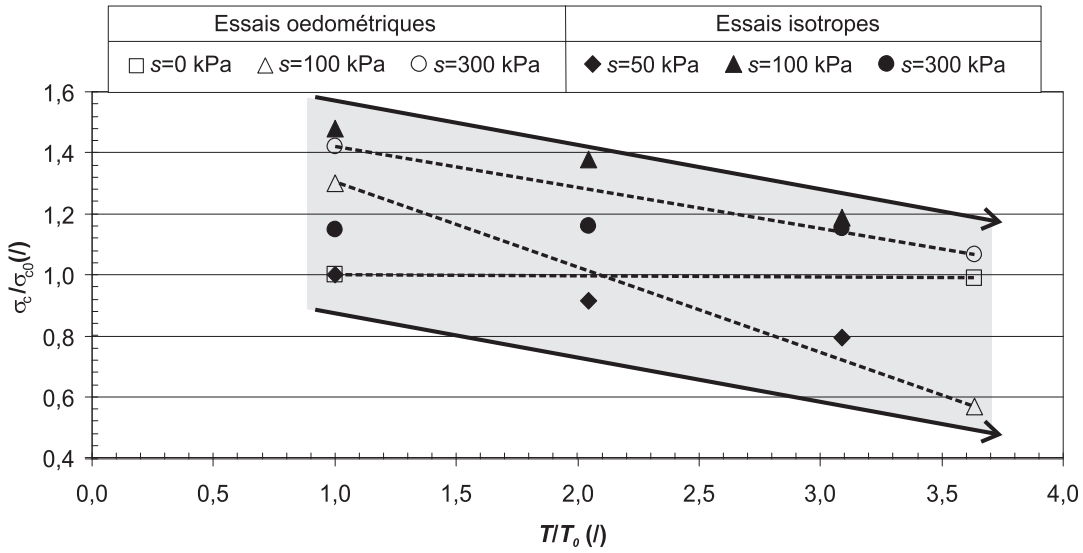

FIG. 9.14 – Évolution du rapport σ_c/σ_{c_0} en fonction du rapport T/T_0 pour les succions étudiées.

La figure 9.15 présente l'évolution du rapport σ_c/σ_{c_0} en fonction du rapport s/s_a. Pour les essais isotropes, on retrouve la même forme d'évolution que dans le plan succion-contrainte de préconsolidation.
On ne tient pas compte de la contrainte de préconsolidation obtenue pour l'essai O-T22S100 dont la valeur s'écarte trop des autres résultats. Les autres essais œdométriques confirment l'interprétation faite sur la base des résultats des essais isotropes : l'augmentation de succion induit une augmentation de la contrainte de préconsolidation pour les faibles succions puis, pour les succions plus fortes, cette limite entre comportement élastique et plastique n'évolue plus. On fait l'hypothèse qu'en dessous de la succion d'entrée d'air, la succion n'a pas d'effet sur le comportement mécanique du sol car on reste très proche de la saturation (François et Laloui (2007)).

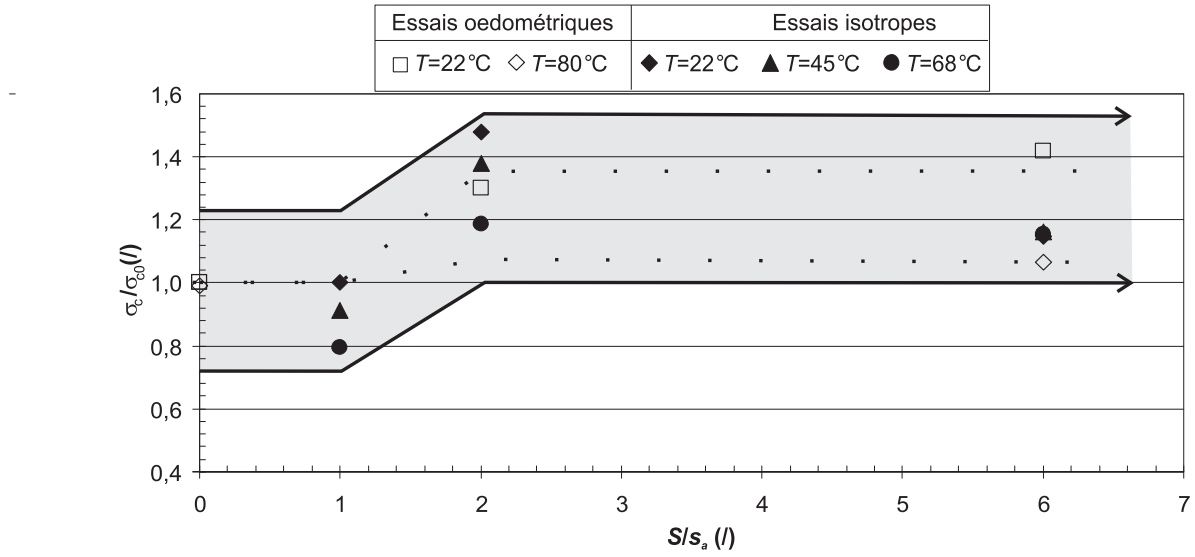

FIG. 9.15 – Évolution du rapport σ_c/σ_{c_0} en fonction du rapport s/s_a pour les températures étudiées.

9.3.3 Fonctions d'approximation de la contrainte de préconsolidation

On propose une modélisation de l'effet de la température et de la succion sur la base des essais isotropes de cette étude et des essais œdométriques réalisés par François et al. (2007).

Dans la majorité des cas, on a observé des variations linéaires décroissantes de la contrainte de préconsolidation en fonction de la température. On choisit donc une fonction d'approximation linéaire. On suppose que les effet de la température et de la succion peuvent être découplés. Autrement dit, on attribue les écarts obtenus pour T/T_0 =cte à l'effet de la succion. La fonction d'approximation s'écrit :

$$\frac{\sigma_c(T,s)}{\sigma_c(T_0,s)} = A \times \frac{T}{T_0} + B \tag{9.1}$$

où A et B sont respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine.
En notant γ_T la valeur absolue de la pente et en imposant que pour $T = T_0$, le rapport entre les contraintes de préconsolidation doit être égal à un, la fonction d'approximation prend la forme :

$$\frac{\sigma_c(T,s)}{\sigma_c(T_0,s)} = 1 - \gamma_T \left(\frac{T}{T_0} - 1\right) \tag{9.2}$$

où γ_T est un paramètre relatif au matériau.

En faisant des ajustements linéaires des résultats expérimentaux, le paramètre γ_T a été mesuré pour les différentes succions étudiées. Le tableau 9.5 rassemble les résultats obtenus. On note une certaine dispersion dans les valeurs de ce paramètre. Malgré tout, une moyenne peut être établie ; elle est de 0,11 avec un écart type de 0,09. On ne remarque aucune tendance de l'évolution de ce paramètre en fonction de la succion.

Type d'essai	Succion (kPa)	γ_T
Isotrope	50	0,1
Isotrope	100	0,14
Isotrope	300	0
œdométrique	0	0
œdométrique	100	0,28
œdométrique	300	0,13

TAB. 9.5 – Valeurs de γ_T obtenues pour les différentes succions.

La fonction d'approximation utilisée pour modéliser l'effet de la succion sur la contrainte de préconsolidation doit tenir compte de toutes les observations expérimentales et des hypothèses établies précédemment tout en ayant une expression mathématique simple :

- La contrainte de préconsolidation est constante en dessous de la succion d'entrée d'air.
- L'effet de la succion est le plus important pour les valeurs comprises entre 50 et 100 kPa.
- L'effet de la succion s'atténue pour les fortes valeurs et on observe un comportement asymptotique.
- On attribue les écarts obtenus pour des valeurs s/s_a =cte à l'effet de la température et, pour $s = s_a$, le rapport entre les contraintes de préconsolidation σ_c/σ_{c_0} est égal à un.

La fonction d'approximation proposée prend la forme :

$$\frac{\sigma_c(T_0,s)}{\sigma_c(T_0,s_a)} = \begin{cases} 1 \quad \text{si} \quad \text{s} \leq \text{s}_\text{a} \\ 1+\gamma_s\left(\exp\left(-1\right)-\exp\left(-\frac{s}{s_a}\right)\right) \quad \text{si} \quad \text{s} \geq \text{s}_\text{a} \end{cases} \tag{9.3}$$

où γ_s est un paramètre relatif au matériau.
Pour le limon de Sion, on trouve que le paramètre de la fonction d'approximation (9.3) qui donne un résultat optimal est $\gamma_s = 1,2$. Ce paramètre ne semble pas influencé par la température.

En faisant une combinaison des deux fonctions d'approximation précédentes (9.2) et (9.3), on obtient une fonction modélisant l'évolution de la contrainte de préconsolidation en fonction de la température et de la succion. Cette fonction prend la forme :

$$\frac{\sigma_c(T,s)}{\sigma_c(T_0,s_a)} = \begin{cases} 1-\gamma_T\left(\frac{T}{T_0}-1\right) \quad \text{si} \quad \text{s} \leq \text{s}_\text{a} \\ 1-\gamma_T\left(\frac{T}{T_0}-1\right)+\gamma_s\left(\exp\left(-1\right)-\exp\left(-\frac{s}{s_a}\right)\right) \quad \text{si} \quad \text{s} \geq \text{s}_\text{a} \end{cases} \tag{9.4}$$

Les figures 9.16 et 9.17 permettent de comparer les résultats expérimentaux et ceux donnés par la fonction d'ajustement mathématique proposée dans l'équation (9.4).
Dans le plan T/T_0 - σ_c/σ_{c_0}, la fonction d'ajustement donne une bonne approximation des points expérimentaux sauf pour les essais isotropes à la succion de 300 kPa et les essais œdométriques à saturation ($s = 0$).
Dans le plan s/s_a - σ_c/σ_{c_0}, on observe que la fonction proposée dans l'équation (9.4) reproduit l'évolution du rapport σ_c/σ_{c_0} en fonction de s/s_a. La dispersion des résultats expérimentaux ne permet pas de conclusion affirmée sur l'aspect quantitatif.

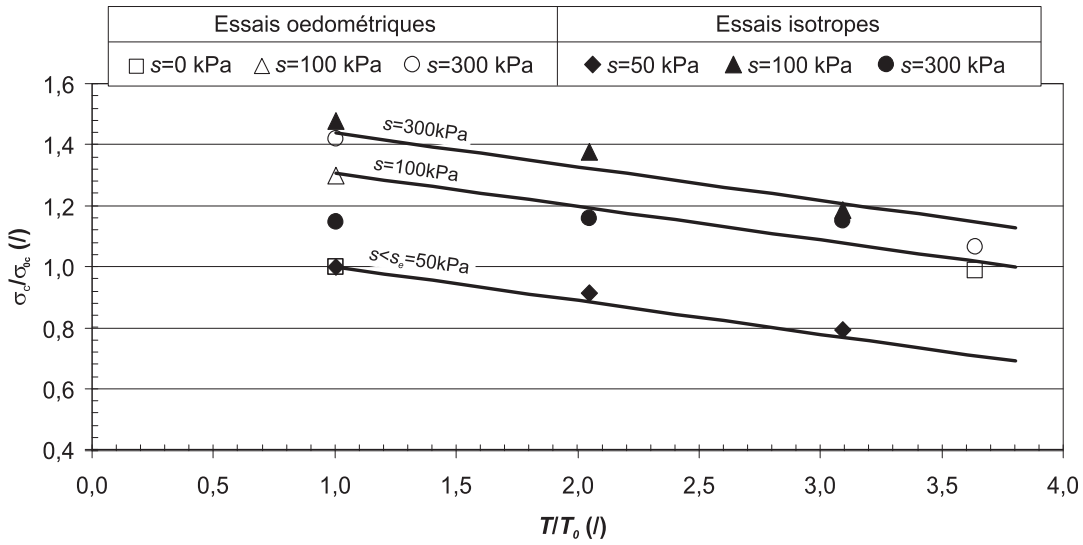

FIG. 9.16 – Modélisation de l'évolution du rapport σ_c/σ_{c_0} en fonction du rapport T/T_0 pour les succions étudiées.

-

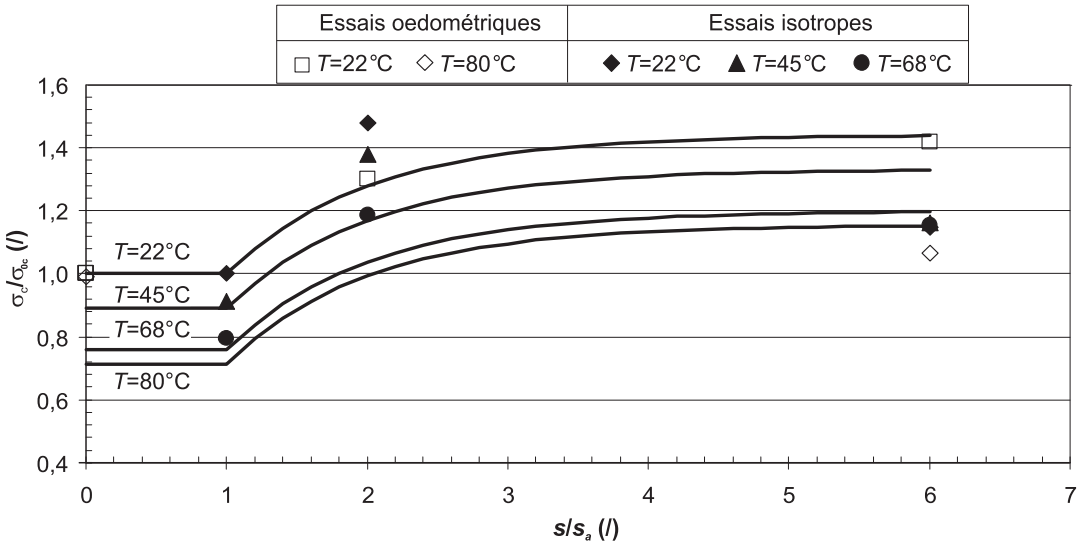

FIG. 9.17 – Modélisation de l'évolution du rapport σ_c/σ_{c_0} en fonction du rapport s/s_a pour les températures étudiées.

Conclusion

Ce chapitre a présenté les résultats des différents essais de consolidation isotrope réalisés dans cette partie. A partir de ces essais, on a pu analyser l'influence de la température et

de la succion sur les indices de gonflement et de compression ainsi que sur la contrainte de préconsolidation. Enfin, dans la dernière section, on a proposée une fonction d'approximation qui permet de modéliser l'effet de la température et de la succion sur la contrainte de préconsolidation.

Conclusion

Dans cette partie, on a présenté une étude expérimentale concernant les effets de la température et de la succion sur le comportement mécanique d'un limon, le limon de Sion.
Le premier chapitre a été consacré à la présentation de quelques aspects généraux concernant le comportement mécanique des sols, suivi d'une synthèse des principaux résultats bibliographiques portant sur l'influence des effets thermique et hydrique sur le comportement mécanique.
Dans le deuxième chapitre, on a commencé par présenter le sol de cette étude en synthétisant ses principales caractéristiques. Puis, la cellule d'essais isotrope a été décrite en détaillant chacun des circuits de mesure et/ou de contrôle des différentes variables. Dans les deux dernières sections de ce chapitre, les étapes du protocole de fabrication des échantillons et du protocole des essais ont été définies.
Le dernier chapitre a été consacré à la présentation et à l'interprétation des résultats expérimentaux. Tout d'abord deux résultats préliminaires ont été présentés : les comportements hydrique et thermique du limon de Sion. On a vu notamment que la succion n'influence pas le comportement thermique de ce sol. On a ensuite détaillé les neuf essais de consolidation isotrope réalisés. De ces essais, les indices de gonflement et de compression ont été déterminés. Ces résultats montrent que ces indices sont faiblement influencés par la température. Par contre une augmentation de succion induit une diminution importante des indices de compression. Sur la base des neuf contraintes de préconsolidation mesurées sur les différentes consolidations isotropes, on a pu analyser l'influence de la température et de la succion sur la contrainte limite entre domaine élastique et plastique. Sur le limon de Sion, la contrainte de préconsolidation diminue de façon linéaire avec la température et augmente avec la succion. Cette augmentation est importante pour les succions moyennes, puis devient négligeable. Enfin une fonction d'approximation permettant de modéliser l'effet de la température et de la succion sur la contrainte de préconsolidation a été proposée.

Conclusion Générale

La recherche présentée dans ce mémoire avait pour double objectif l'analyse de "l'effet de la déformation et de la température sur le comportement hydrique" et l'analyse de "l'effet de la température et de la succion sur le comportement mécanique" de sols non saturés.

Le premier objectif de ce travail a été abordé dans la partie I. Concernant *l'effet des déformations sur le comportement hydrique*, on a montré la pertinence du concept de surface caractéristique d'un sol par opposition à la courbe de rétention. Ce concept a été illustré expérimentalement dans le cas d'un sable limoneux argileux. On a présenté une méthode permettant d'obtenir l'expression explicite de l'équation de la surface caractéristique. Cette étude expérimentale a aussi permis d'établir les équations paramétriques des chemins de chargement hydrique, exprimant la teneur en eau, d'une part, et l'indice des vides, d'autre part, en fonction de la succion et de l'indice des vides initial. Ces différentes fonctions d'approximation s'appuient sur une importante campagne expérimentale comprenant la mesure d'environ 240 triplets (indice des vides, teneur en eau, succion). Il a été montré que ce concept de surface caractéristique contient et généralise la notion de courbe de rétention et va au delà en représentant d'autres types de chemins de chargement.
Ce résultat important a toute sa place dans les modélisations innovantes en thermo-hydro-mécanique des sols non saturés. En effet, dans ce cas, le squelette solide subit des contraintes mécaniques importantes. Les déformations qui en résultent doivent être prises en compte dans les problèmes d'évolution du système, et en particulier au niveau du comportement hydrique caractérisé par la surface caractéristique. Le développement de ce concept constitue donc un enjeu important pour une étude thermo-hydro-mécanique globale des sols non saturés.

Concernant *l'effet de la température sur le comportement hydrique*, un modèle de comportement thermo-hydrique a été proposé. Il exprime les variations de teneur en eau en fonction des variations de température. Ce modèle permet, à partir de la courbe de rétention d'un sol ou de sa surface caractéristique, mesurées à une certaine température, de prédire cette courbe ou cette surface pour n'importe quelle autre température. Le domaine de validité de ce modèle couvre les états funiculaire et pendulaire. Ce modèle a été validé dans le cas des deux matériaux de cette étude : la céramique en terre cuite et le sable limoneux argileux. Le modèle a également été testé, avec succès, sur d'autres matériaux de la littérature, ce qui montre sa capacité à prédire le comportement hydrique en température d'une large gamme de matériaux.
Dans le domaine hygroscopique, un modèle emprunté à la littérature a été utilisé (le modèle de GAB). Un calcul développé sur la base de ce modèle a permis de prédire l'isotherme de désorption pour n'importe quelle température dans les cas de la céramique et du sable limoneux argileux. Ce résultat, qui concerne le domaine hygroscopique, permet de compléter la gamme de teneurs en eau concernée par l'analyse faite ci-dessus, c'est à dire de la saturation aux états quasi-secs. La portée de ces résultats va au delà de la géomécanique puisqu'elle couvre également des domaines comme les sciences du sol, la gestion des ressources en eau etc... En fait, l'atout principal réside dans la capacité du modèle à transposer, à n'importe quelle température, les résultats de mesures obtenues à une température donnée. Ceci permet de réduire considérablement le nombre d'essais, souvent laborieux et longs, mais nécessaires à la caractérisation thermo-hydrique des sols, et plus généralement des milieux poreux, non saturés.

Le dernier chapitre de la partie I a été consacré à la détermination de la perméabilité du sable limoneux argileux. On a proposé une méthode de calcul qui prend en compte les effets

de la température, de l'indice des vides et de la désaturation de façon découplée. La surface caractéristique a servi de base au calcul de la perméabilité du sable limoneux argileux.

La partie II de ce mémoire a été consacrée à l'étude de l'influence de la température et de la succion sur le comportement mécanique des sols. Cette étude s'inscrivait dans le cadre d'un programme de collaboration entre le Laboratoire de Mécanique des Sols (LMS) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) et le Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC) de l'Université Montpellier 2 (UM2).

L'effet de la température et de la succion a été examiné à partir d'essais de consolidation mécanique du limon de Sion (Suisse). Ces essais ont été réalisés à différents niveaux de température et de succion en configurations œdométrique (LMS) et isotrope (LMGC). Sur chacun de ces essais, on a mesuré les indices de gonflement et de compression ainsi que la contrainte de préconsolidation. On a ainsi pu déterminer l'influence de la température et de la succion sur ces paramètres essentiels du comportement mécanique. Il apparaît qu'une augmentation de température ou de succion tend à diminuer les indices de gonflement et de compression. L'effet de la température est moins marqué que celui de la succion. Dans plusieurs cas, on observe que la succion induit une forte diminution des indices pour les faibles succions (entre 0 et 100 kPa pour le limon de Sion), puis, pour les valeurs supérieures, son incidence s'atténue. Concernant la contrainte de préconsolidation, il a été montré qu'elle diminue avec la température et augmente avec la succion. Enfin, une relation exprimant l'évolution de la contrainte de préconsolidation en fonction de la température et de la succion a été proposée. Cette relation, d'un grand intérêt pour les applications, mérite d'être confortée par d'autres résultats expérimentaux.

Table des figures

1.1 Forces d'interaction agissant sur une molécule d'eau. 25
1.2 Illustration du phénomène d'ascension capillaire. 26
1.3 Pont capillaire entre deux grains sphériques. 27
1.4 Schématisation de l'agitation des molécules d'eau adsorbées. 27
1.5 Schématisation des différents états hydriques d'un sol : **1** état hygroscopique, **2** état pendulaire, **3** état funiculaire, **4** saturation. 29
1.6 Courbes de rétention pour différents types de sols **a** et description générale de cette courbe **b**. 31
1.7 Mécanismes entraînant le phénomène d'hystérésis (Delage et Cui (2000)). . . . 31
1.8 Différents types d'isotherme de sorption. 32
1.9 Schématisation du processus d'adsorption de molécules d'eau sur la surface d'un solide (Bakrania et Anderson). 33
1.10 Chemin hydrique du limon de Sterrebeek dans les plans w-s, S_r-s, S_r-w, e-w (Biarez et al. (1988)). 34
1.11 Influence de l'indice des vides initial sur la succion d'entrée d'air dans le cas d'une argile sableuse (Kawaï et al. (2000)). 35
1.12 Courbes de rétention d'une Na-laponite compactée à 1 et 10 MPa (Al-Mukhtar et al. (1999)). 36
1.13 Évolution du volume d'air occlus en fonction du chargement hydrique pour 15 et 35°C. a) cas de billes de verre b) cas d'une marne sableuse, Hopmans et Dane (1986). 39

3.1 Photographies du sable limoneux argileux avant et après tamisage à 2 mm. . . 54
3.2 Courbe granulométrique du sable limoneux argileux (Jamin (2003)). 55
3.3 Courbe de compactage de l'essai Proctor du sable limoneux argileux (Jamin (2003)). 55
3.4 Dimensions et sens d'extrusion des échantillons de céramique. 56
3.5 Porosimétrie de la céramique ; dérivée logarithmique de l'intrusion cumulative du volume V de mercure ($dV/d\,(logD)$) en fonction du diamètre D des pores. . 58
3.6 Porosimétrie de la céramique ; Volume cumulé de mercure en fonction, de la pression de mercure **a**, du diamètre moyen des pores remplis **b**. 59
3.7 Courbe de rétention de la céramique obtenue à partir de sa porosimétrie. 59
3.8 Schéma de principe de la plaque de pression et de l'environnement de mesure. . 60
3.9 Schéma de principe du banc de sorption ; le banc contient deux rangées de quatre dessiccateurs. 61
3.10 Paramètres de la fonction d'ajustement de la courbe de rétention. 65

4.1 États de fabrication et états initiaux des échantillons de sol. 71
4.2 Différents plans de projection du chemin de chargement hydrique de la série $n°2$. 72
4.3 Chemin de chargement hydrique de la série $n°2$ tracé dans l'espace $w - e - s$. . 72
4.4 Points expérimentaux et paramètres de la modélisation des chemins de chargement hydrique des cinq séries projetés dans un plan e =cte. 74
4.5 Évolution de la succion d'inflexion en fonction de l'indice des vides initial. . . . 75
4.6 Modélisation des projections des chemins de chargement hydrique et points expérimentaux dans un plan e =cte en utilisant les paramètres directement estimés à partir la figure 4.4. 76
4.7 Modélisation des projections des chemins de chargement hydrique et points expérimentaux dans le plan e =cte en utilisant les paramètres optimisés. 77
4.8 Variation de l'indice des vides en fonction de l'indice des vides initial pour différentes succions. 78
4.9 Modélisation de l'évolution de la pente α en fonction de la succion. 79
4.10 Modélisation des projections des chemins de chargement hydrique et points expérimentaux dans un plan w =cte. 80
4.11 Points expérimentaux des chemins de chargement hydrique projetés dans un plan s =cte. 81
4.12 Evolution de l'indice des vides en fonction de l'humidité relative pour les 5 séries d'essais. 81
4.13 Isothermes de désorption du sable limoneux argileux pour les 5 indices des vides initiaux. 82
4.14 Modélisation de l'évolution du degré de saturation en fonction de la succion. . . 84
4.15 Évolution de la teneur en eau en fonction de l'indice des vides, à succion constante. 85
4.16 Évolution du coefficient directeur $a(s)$ en fonction de la succion. 87
4.17 Évolution de la teneur en eau d'intersection $w_{int}(s)$ en fonction de la succion. . 88
4.18 Surface caractéristique du sable limoneux argileux. 89
4.19 Évolution de la teneur en eau en fonction de la succion pour différents indices des vides constants. 90
4.20 Évolution de F_w en fonction de la succion pour plusieurs indices des vides. . . . 91
4.21 Évolution de l'indice des vides en fonction de la succion pour différentes teneurs en eau. 92
4.22 Évolution de F_e en fonction de la succion pour plusieurs indices des vides. . . . 92

5.1 Effet de la température sur la courbe de rétention de la céramique. 100
5.2 Contribution des deux termes du modèle pour une variation totale de température de 40°C. 101
5.3 Effet de la température sur les courbes caractéristiques du sable limoneux argileux pour trois valeurs d'indice des vides. 102
5.4 Effet de la température sur une courbe de rétention du sable limoneux argileux. 103
5.5 Contribution des deux termes du modèle pour une variation totale de température de 40°C. 104
5.6 Effet de la température sur la courbe de rétention de l'argile FoCa. 105
5.7 Effet de la température sur la courbe de rétention de l'argile de Boom Γ_s = $13,7$ kN.m^{-3}. 107
5.8 Effet de la température sur la courbe de rétention du l'argile de Boom Γ_s = $16,7$ kN.m^{-3}. 107

5.9 Points expérimentaux des isothermes de sorption de la céramique pour différentes températures. . . . 108
5.10 Points expérimentaux des isothermes du sable limoneux argileux pour 20, 40 et 60°C (Jamin (2003)). . . . 109
5.11 Points expérimentaux des isothermes du sable limoneux argileux pour 30 et 50°C (Jamin (2003)). . . . 109
5.12 Fonction $f(HR)$ de la céramique pour 20 et 40°C. . . . 111
5.13 Fonction $f(HR)$ du sable limoneux argileux pour 20 et 30°C. . . . 112
5.14 Isothermes de sorption de la céramique pour différentes températures ; points expérimentaux et résultats du modèle. . . . 113
5.15 Isothermes de sorption du sable limoneux argileux pour 20, 40 et 60°C ; points expérimentaux et résultats du modèle. . . . 114
5.16 Isothermes de sorption du sable limoneux argileux pour 30 et 50°C ; points expérimentaux et résultats du modèle. . . . 114

6.1 Évolution de la perméabilité du sable limoneux argileux en fonction de l'indice des vides, en conditions saturées et à température ambiante (22°C) . . . 119
6.2 Évolution de la succion d'entrée d'air des courbes $w(s, e = rmcte)$ en fonction de l'indice des vides. . . . 120
6.3 Evolution de la fonction k_w en fonction de la succion pour trois indices des vides différents maintenus constants. . . . 121
6.4 Évolution de la perméabilité en fonction de l'indice des vides et de la succion. . 122
6.5 Évolution de la succion d'entrée d'air des courbes de rétention en fonction de l'indice des vides initial. . . . 124
6.6 Évolution de la fonction k_w en fonction de la succion pour trois indices des vides initiaux différents ; projection dans un plan e =cte. . . . 125
6.7 Évolution de la perméabilité en fonction de la succion pour trois indices des vides initiaux différents ; projection dans un plan e =cte. . . . 125
6.8 Evolution de la perméabilité le long du chemin de désaturation, pour un indice des vides initial de 0,68 sur la surface de perméabilité présentée à la figure 6.4 . 126

7.1 Effondrement observé lors d'une consolidation œdométrique réalisée sur un lœss (Cui et al. (2004)). . . . 135
7.2 Consolidation mécanique. . . . 138
7.3 Surface de charge du modèle Cam-Clay modifié. . . . 139
7.4 Consolidation thermique d'une argile de type kaolin, pour cinq OCR différents (Cekerevak (2003)). . . . 140
7.5 Consolidation thermique d'un sable limoneux argileux pour différentes contraintes mécaniques (Saix (1991)). . . . 142
7.6 Influence de la température sur la contrainte de préconsolidation d'un kaolin (Cekerevak (2003)). . . . 143
7.7 Influence de la température sur la surface de charge d'une illite (Tanaka et al. (1997)). . . . 143
7.8 Influence de la température sur la surface de charge ; (a) thermo-rétrécissante et (b) thermo-extensive (Jamin (2003)). . . . 144
7.9 Influence de la température sur la surface de charge du sable limoneux argileux (Jamin (2003)). . . . 145

7.10 Chargements mécaniques à différentes valeurs de succion sur un limon (Maatouk et al. (1995)). 145
7.11 Évolution de l'indice de compression en fonction de la succion (Cuisinier (2002)).146
7.12 Surface de charge dans le plan contrainte moyenne-succion du modèle de Barcelone. 147
7.13 Surface de charge dans le plan contrainte effective moyenne-succion du modèle développé par l'équipe du LMS de l'EPFL. 148

8.1 Courbe granulométrique du limon de sion. 150
8.2 Courbe de rétention du limon de Sion (Péron et al. (2007)). 151
8.3 Courbe de tassement hydrique du limon de Sion (Péron et al. (2007)). 151
8.4 Schéma général de la cellule d'essai isotrope. 152
8.5 Système d'application et de régulation de la contrainte isotrope. 153
8.6 Système de régulation de la succion. 154
8.7 Système de mesure et de régulation de la température. 155
8.8 Dispositif de mesure des échanges d'eau. 156
8.9 Dispositif de mesure des déplacements. 157
8.10 Schéma de la déformation radiale d'un échantillon de sol. 157
8.11 Acquisition, traitement et affichage des données. 158
8.12 Structure du programme d'acquisition. 158
8.13 Courbes de compactage œdométrique pour différentes teneurs en eau initiales. . 159
8.14 Courbes de fluage en conditions œdométriques : indice des vides en fonction du temps sous une contrainte verticale de 100 kPa. 160
8.15 Cinétiques de désorption sous un chargement de 50 kPa. 162
8.16 Étapes des essais de consolidation isotrope à différents niveaux de succion et de température. 163

9.1 Variation de la teneur en eau observée lors du chargement hydrique pour les différents essais. 166
9.2 Variation de l'indice des vides observée lors du chargement hydrique pour les différents essais. 166
9.3 Évolution du degré de saturation observée lors du chargement hydrique pour les différents essais. 167
9.4 Consolidation thermique à différents niveaux de succion. 168
9.5 Résultats des essais de consolidation isotrope présentés à la même température et à différentes succions. 170
9.6 Résultats des essais de consolidation isotrope présentés à la même succion et à différentes températures. 171
9.7 Détermination des indices de gonflement et de compression ainsi que de la contrainte de préconsolidation sur les neufs essais de consolidation isotrope. . . 172
9.8 Évolution des indices de gonflement κ et de compression λ en fonction de la température pour les trois succions de 50, 100 et 300 kPa. 173
9.9 Évolution des indices de gonflement κ et de compression λ en fonction de la succion pour les trois température de 22, 45 et 60°C. 174
9.10 Comparaison des résultats obtenus en conditions isotropes et œdométriques : évolution des indices de gonflement κ et de compression λ en fonction de la température. 176

9.11 Comparaison des résultats obtenus en conditions isotropes et œdométriques : évolution des indices de gonflement κ et de compression λ en fonction de la succion. 176
9.12 Évolution de la contrainte de préconsolidation en fonction de la température pour les trois succions étudiées. 178
9.13 Évolution de la contrainte de préconsolidation en fonction de la succion pour les trois températures étudiées. 179
9.14 Évolution du rapport σ_c/σ_{c_0} en fonction du rapport T/T_0 pour les succions étudiées. 180
9.15 Évolution du rapport σ_c/σ_{c_0} en fonction du rapport s/s_a pour les températures étudiées. 181
9.16 Modélisation de l'évolution du rapport σ_c/σ_{c_0} en fonction du rapport T/T_0 pour les succions étudiées. 183
9.17 Modélisation de l'évolution du rapport σ_c/σ_{c_0} en fonction du rapport s/s_a pour les températures étudiées. 183
9.18 Représentation schématique et dimensions d'une molécule d'eau (il n'y pas proportionnalité entre les distances inter-atomiques et les diamètres des atomes) . 209
9.19 Schéma de principe d'un tensiomètre 211
9.20 Schéma de principe de la dessiccation par solutions salines saturées 212

Liste des tableaux

2.1 Analyse de quelques cas simples. 48

3.1 Limites d'Atterberg du sable limoneux argileux. 54
3.2 Caractéristiques des huit échantillons de céramique utilisés. 57
3.3 Caractéristiques de la céramique obtenues par la méthode d'intrusion de mercure. 58
3.4 Solutions salines utilisées dans le banc de sorption avec leurs humidités relatives correspondantes pour différentes températures. 62

4.1 États de fabrication et états initiaux des cinq séries d'échantillons. 70
4.2 Paramètres de l'ajustement de $w(s, e_0)$ (équation (4.1)) déterminés directement à partir des résultats expérimentaux. 76
4.3 Paramètres de l'ajustement de $w(s, e_0)$ dont les valeurs ont été optimisées. . . . 77
4.4 Valeurs du coefficient α pour différentes succions. 78
4.5 Valeurs des paramètres a et w_{int} pour différentes succions. 86
4.6 Paramètres des fonctions de modélisation de $a(s)$ et $w_{int}(s)$. 87

5.1 Valeurs des coefficients de la fonction d'ajustement des courbes de rétention de l'argile de Boom (Romero (1999)). 106
5.2 Valeurs des coefficients de la fonction $f(HR)$ pour la céramique et le sable limoneux argileux aux deux températures choisies. 111
5.3 Valeurs des coefficients des fonctions d'ajustement des isothermes de la céramique et du sable limoneux argileux pour les deux températures choisies. 111
5.4 Valeurs des coefficients du modèle de GAB pour la céramique et pour le sable limoneux argileux. 112

8.1 Composition minéralogique du limon de Sion. 150
8.2 Répartition des phyllosilicates dans le limon de Sion. 150
8.3 États finaux des échantillons soumis aux essais de fluage. 161
8.4 États finaux des échantillons. 162
8.5 Liste des essais de consolidation isotrope et nomenclature. 164
8.6 Liste des essais de consolidation œdométrique et nomenclature. 164

9.1 Indice de gonflement et de compression des différents essais. 173
9.2 Indice de gonflement et de compression des différents essais réalisés en conditions œdométriques. 175
9.3 Contraintes de préconsolidation des différents essais isotropes. 177
9.4 Données relatives aux contraintes de préconsolidation des essais isotropes et œdométriques. 179

9.5 Valeurs de γ_T obtenues pour les différentes succions. 182

Bibliographie

M. Al-Mukhtar, Y. Qi, J.F. Alcover et F. Bergaya. œdometric and water-retention behavior of highly compacted unsaturated smectites. *Canadian Geotechnical Journal*, 36:675–684, 1999.

E.E. Alonso, A. Gens et A. Josa. A constituve model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3):405–430, 1990.

S. Assouline, D. Tessier et A. Bruand. A conceptual model of the soil water retention curve. *Water Resource Reseach*, 34(2):223–231, 1998.

J. Bachmann, R. Horton, S.A. Grant et R.R. Van Der Ploeg. Temperature dependence of water retention curves for wettable and water-repellent soils. *Soil Science Society of America Journal*, 66:44–52, 2002.

J. Bachmann, R. Horton, R.R. van der Ploeg et S. Woche. Modified sessile drop method for assessing initial soil-water contact angle of sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 64:564–567, 2000.

J. Bachmann et R.R. van der Ploeg. A review on recent developments in soil water retention theory : interfacial tension and temperature effects. *Journal of Plant Nutrition Soil Science*, 165:468–478, 2002.

S. Bakrania et A. Anderson. Characterization of silica-aerogels fabricated using a novel processing technique. *http ://www.vu.union.edu/ bakranis/aerogels/index.htm.*

G. Behrooz. *Thermo-mechanical behaviour of two reconstituted clays.* Thèse de doctorat, University of Sidney, Sidney, 2003.

J. Biarez, J.M. Fleureau, M.I. Zerhouni et B.S. Soepandji. Variations de volume des sols argileux lors de cycles de drainage-humidification. *Revue Française de Géotechnique*, 41: 63–71, 1988.

J. Biarez et P.Y. Hicher. *Elementary mechanics of soil behaviour : saturated remoulded soils.* Balkema, Rotterdam, 1994.

A.W. Bishop. The principle of effective stress. *Tecnisk Ukeblad*, 39:859–863, 1959.

A.W. Bishop et G.E. Blight. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soil. *Géotechnique*, 13(3):177–197, 1963.

J. C. Bénet, G. Della Valle, P. Jouanna et C Saix. Etude expérimentale des transferts de masse et d'énergie au-dessus d'un stockage de chaleur en sol non saturé. *Revue Générale de Thermique*, 281(24):517–528, 1985.

R.H. Brooks et A.T. Corey. Hydraulic properties of porous medium. *Hydrology Papers*, Colorado State University:24, 1964.

S. Brunauer, P.H. Emmett et E. Teller. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60:309–319, 1938.

N.T. Burdine. Relative permeability calculation from size distribution data. *Petroleum Transactions, American Institute of Minning, Metallurgical and Petroleum Engineers*, 198:71–78, 1953.

R.G. Campanella et J.K. Mitchell. Influence of temperature variations on soil behavior. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94:709–733, 1968.

C. Cekerevak. *Thermal effects on the mechanical behaviour of saturated clays : an experimental and constitutive study.* Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2003.

R.S. Chahal. Effect of temperature and entrapped air on matric suction. *Soil Science*, 100(4): 262–266, 1965.

P. Chapuis. Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Canadian Geotechnical Journal*, 41:787–795, 2004.

V.Y. Chertkov. A physically based model for the water retention curve of clay pastes. *Journal of Hydrology*, 286:203–226, 2003.

J.D. Coleman. Stress-strain relations for partly saturated soils. *Géotechnique*, 12(4):348–350, 1962.

J. Constantz. Comparison of isothermal and isobaric water retention paths in nonswelling porous materials. *Water Resources Research*, 27(12):3165–3170, 1991.

Y.J. Cui, M. Marcial, P. Delage, Antoine P., Marchadier G. et Ye W.M. A geological and geotechnical characterisation of the loess of northern france. volume 1, pages 417–428. Skempton Memorial Conference, 2004.

Y.J. Cui, N. Sultan et P. Delage. A thermomechanical model for saturated clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 37:607–620, 2000.

O. Cuisinier. *Comportement hydromécanique des sols gonflants compactés.* Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 2002.

O. Cuisinier et F. Masrouri. Influence de sollicitations hydriques et mécaniques complexes sur le comportement d'un sol gonflant compacté. *Canadian Geotechnical Journal*, 42:731–741, 2005.

L. De Backer et A. Klute. Comparison of pressure and suction methods for soil-water content-pressure-head determinations. *Soil Science*, 104(1):46–56, 1966.

P. Delage et Y.-J. Cui. L'eau dans les sols non saturés. Dans *Les techniques de l'ingénieur*, pages C301–13. 2000.

P. Delage et Y.-J. Cui. Comportement mécanique des sols non saturés. Dans *Les techniques de l'ingénieur*, pages C302–19. 2001.

P. Delage et J. Graham. The mechanical behaviour of unsaturated soils. volume 3, pages 1223–1256. 1st International Conference on Unsaturated soils, Balkema, 1995.

P. Delage, M.D. Howat et Y.J. Cui. The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. *Engineering Geology*, 50:31–48, 1998.

P. Devillers. *Couplages thermohydromécaniques en milieux poreux :application à la consolidation d'un sol non saturé*. Thèse de doctorat, Université Montpellier 2, Montpellier, 1998.

P. Devillers, C. Saix et M.S. El Youssoufi. Loi de comportement thermo-hydromécanique pour les sols non saturés : identification in situ des indices de compression thermique. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(2):250–259, 2000.

S. Escoffier. *Caractérisation expérimentale du comportement hydromécanique des argilites de Meuse/Haute-Marne*. Thèse de doctorat, Institut Nationnal Polytechnique de Lorraine, Nancy, 2002.

A.R. Estabragh, A.A. Javadi et J.C. Boot. Effect of compaction pressure on consolidation behaviour of unsaturated silty soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 41:540–550, 2004.

D. Farrell et W. Larson. Modeling the pore structure of porous media. *Water Resource Reseach*, 8(3):699–706, 1972.

J.M. Fleureau et S. Taibi. Water-air permeabilities of unsaturated soils. volume 2, pages 479–484, Rotterdam, 1995. 1st International Conference on Unsaturated Soils, Balkema.

J.M. Fleureau, J-C. Verbrugge, P.J. Huergo, A. Gomes Correia et S. Kheirbek-Saoud. Aspects of the behaviour of compacted clayey soils on drying and wetting paths. *Canadian Geotechnical Journal*, 39:1341–1357, 2002.

B. François et L. Laloui. A stress-strain framework for modelling the behaviour of unsaturated solis under non-isothermal conditions. Dans *Theoritical and numerical unsaturated soil mechanics*, pages 119–125. 2nd international conference on mechanics of unsaturated soils, Springer, 2007.

B. François, S. Salager, M.S. El Youssoufi, D Ubals Picanyol, L. Laloui et C. Saix. Compression tests on a sandy silt at different suction and temperature level. Dans *CDrom*, page 10, Denver, 2007. GeoDenver.

D.G. Fredlund. Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 16:121–139, 1978.

D.G. Fredlund et H.Q. Pham. Independent roles of the stress state variables on volume-mass constitutive relations. pages 1223–1256. 2nd international conference on mechanics of unsaturated soils, Springer, 2007.

D.G. Fredlund et A. Xing. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3):521–532, 1994.

D.G. Fredlund, A. Xing, M.D. Fredlund et S.L. Barbour. The relationship of the unsaturated soil shear strenght to the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 32:440–448, 1995.

D.G. Fredlund, A. Xing et S. Huang. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31:533–545, 1994.

M.D. Fredlund, G. Ward Wilson et D.G Fredlund. Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 39:1103–1117, 2002.

D. Gallipoli, S.J. Wheeler et M. Karstunen. Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil. *Géotechnique*, 53(1):105–112, 2003.

W.R. Gardner. Relation of temperature to moisture tension of soil. *Soil Science*, 79:257–265, 1954.

W.R. Gardner. Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from water table. *Soil Science*, 85:228–232, 1958.

F. Geiser. *Comportement mécanique d'un limon non saturé*. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 1999.

F. Geiser, L. Laloui et Vulliet L. Elasto-plasticity of unsaturated soils : laboratory test results on a remoulded silt. *Soil and Foundations*, 45(5):545–556, 2006.

D. Gimenez, E. Perfect, W.J. Rawls et Y. Pachepsky. Fractal models for predicting soil hydraulic properties : a review. *Engineering Geology*, 48(3):161–183, 1997.

S. Grant et A. Salehzadeh. Calculation of temperature effects on wetting coefficients of porous solids and their capillary functions. *Water Ressource Research*, 32(2):261–270, 1996.

H. Gray. Progress report on the consolidation of fine-grained soils. pages 138–141, Cambridge, 1936. 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.

K. Habibagahi. Temperature effect and the concept of effective void ratio. *Indian Geotechnical Journal*, 7(1):14–34, 1977.

J.W. Hopmans et J.H. Dane. Temperature dependence of soil water retention curves. *Soil Science Society of America Journal*, 50:562–567, 1986.

S. Huang, S.L. Barbour et Fredlund D.G. Development and verification of a coefficient of permeability function for a deformable unsaturated soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 35:411–425, 1998.

T. Hueckel et G. Baldi. Thermoplasticity of saturated clays : Experimental constitutive study. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(12):1778–1796, 1990.

V. Huon, B. Wattrisse, M.S. El Youssoufi et A. Chrysochoos. Elastic behavior of anisotropic terra cotta ceramics determined by kinematic full-field measurements. *Journal of the European Ceramic Society*, 27:2303–2310, 2007.

O. Iglesias et J.L. Bueno. Water agar-agar equilibrium : determination and correlation of sorption isotherm. *International Journal of Food Science and Technology*, 34:209–216, 1999.

C. Imbert, E. Olchitzky, T. Lassabatère et P. Dangla. Evaluation of a thermal criterion for an engineered barrier system. *Engineering Geology*, 81:311–332, 2005.

F. Jamin. *Contribution à l'étude du transport de matière et de la rhéologie dans les sols non saturés à différentes températures*. Thèse de doctorat, Université Montpellier 2, Montpellier, 2003.

F. Jamin, M. S. EL Youssoufi et C. Saix. Temperature influence on the yield surface for unsatured soils. Dans J.L. Auriault, G. Deindreau, P. Royer, J.-F. Bloch, C. Boutien et J. Lewandowska, éditeurs, *Poromecanics 2*, pages 461–467. 2nd Biot conference, Balkema, 2002.

D. Karube et K. Kawaï. The role of pore water in the mechanical behavior of unsaturated soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 19:211–241, 2001.

K. Kawaï, D. Karube et S. Kato. The model of water retention curve considering effect of void ratio. pages 329–334, Rotterdam, 2000. Unsaturated soil for Asia, Balkema.

N. Khalili et M.H. Khabbaz. A unique relationship for χ for the determination of the shear strength of unsaturated soils. *Géotechnique*, 48:681–687, 1998.

F.H. King. Observations and experiments on the fluctuations in the level and rate of movement of ground water on the wisconsin agricultural experiment station farm. *Weather Bureau Bulletin*, pages 67–69, 1892.

K. Kosugi. The parameter lognormal distribution model for soil water retention. *Water Ressource Research*, 30:891–901, 1994.

P. Kumar et H.N. Mishra. Moisture sorption characteristics of mango soy fortified yogurt powder. volume 59(1), pages 22–28. Blackwell Publishing, 2006.

L. Laloui, C. Cekerevac et B. François. Constitutive modelling of the thermo-plastic behaviour of soils. *Revue Européenne de Génie Civil*, 9:651–669, 2005.

L. Laloui, M. Moreni et L. Vulliet. Comportement d'un pieu bi-fonction, fondation et échangeur de chaleur. *Canadian Geotechnical Journal*, 40:388–402, 2003.

L. Laloui et M. Nuth. An introduction to the constituve modeling of unsaturated soils. *Revue Européenne de Génie Civil*, 9:651–669, 2005.

T.W. Lambe et S.E. Whitman. *Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, 1969.

I. Langmuir. The adsorption of gases on plane surfaces of glasses, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40:1361–1401, 1918.

S. Lee Barbour. Nineteenth canadian geotechnical colloquium : The soil-water characteristic curve : a historical perspective. *Canadian Geotechnical Journal*, 35:873–894, 1998.

H.H. Liu et J.H. Dane. Reconciliation between measured and theoritical temperature effects on soil water retention curves. *Soil Science Society of America Journal*, 57:1202–1207, 1993.

A. Lloret, M. V. Villar, M. Sànchez, A. Gens, X. Pintado et E. E. Alonso. Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes. *Géotechnique*, 53:27–40, 2003.

B. Loret et N. Khalili. An effective stress elastic-plastic model for unsaturated porous media. *Mechanics of Materials*, 34:97–116, 2002.

A. Maatouk, S. Leroueil et La Rochelle P. Yielding and critical state of a collapsible unsaturated silty soil. *Géotechnique*, 45(3):465–477, 1995.

E.L. Matyas et H.S. Radhakrishna. Volume change characteristics of partially saturated soils. *Géotechnique*, 18(4):432–448, 1968.

R. Medjo Eko. Use of isotropic stress state framework to evaluate the effect of suction on some mechanical parameters of sainte-rosalie clay submitted to confined compression. *Journal of Scientific Research and Development*, pages 1–17, 2004.

G. Mesri. Coefficient of secondary compression. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99:123–137, 1973.

D. Mihoubi. *Deshydratation d'argiles par compression et séchage. Aspect de modélisation et de simulation.* Thèse de doctorat, Université de Pau et des pays de l'Adour, Pau, 2004.

C. J. Miller, N. Yesiller, K. Yaldo et S. Merayyan. Impact of soil type and compaction conditions on soil water characteristic. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128:733–742, 2002.

R. Moreira, G. Vazquez et F. Chenlo. Influence of the temperature on sorption isotherms of chickpea : evaluation of isosteric heat of sorption. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, pages 1–11, 2002.

A Mouratidis et J.P. Magnan. Modèle élastoplastique anisotrope avec écrouissage pour le calcul des ouvrages sur sols compressibles. *Rapport de recherche du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, pages 1–11, 1983.

J. R. Nimmo et E.E. Miller. the temperature dependence of isothermal moisture vs. potential characterictic of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 50:1105–1113, 1986.

R. Nova et T. Hueckel. An engineering theory of soil behaviour in unloading and reloading. *Meccanica*, 3(16):136–148, 1981.

E. Olchitsky. *Couplage hydromécanique et perméabilité d'une argile gonflante non saturée sous sollicitations hydriques et thermiques.* Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2002.

F. Ouedraogo, A.L. Lozano, F. Cherblanc et J.-C. Bénet. Utilisation des potentiels chimiques en mécanique des milieux complexes ; cas du transport de matière sous contraintes en milieu biphasique, élastique, hygroscopique. Grenoble, 2007. Congrès Français de mécanique.

A.J. Peck. Change of moisture tension with temperature and air pressure : theoritical. *Soil Science*, 89:303–310, 1960.

H.Q. Pham, D.G. Fredlund et S.L. Barbour. A study of hysteresis models for soil-water characteristic curves. *Canadian Geotechnical Journal*, 42:1548–1568, 2005.

J. R. Philip et D.A de Vries. Moisture movement in porous materials under temperature gradient. *AGU Transaction*, 38:222–232, 1957.

R.L. Plum et M.I. Esrig. Some temperature effects on soil compressibility and pore water pressure. *Highway Research Board (Special Report)*, 103:231–242, 1969.

H. Péron, T. Hueckel et L. Laloui. An improved volume measurement for determining soil water retention curves. *Geotechnical Testing Journal*, 30(1):1–8, 2007.

M. Py, V. Huon, B. Wattrisse, A. Chrysochoos et M.S. El Youssoufi. Comportement thermo-hygro-mécanique de céramiques à base de terre cuite. Montpellier, 2003. Colloque Lagrange.

V. Rabemanana, Durst P., Bächler D., Vuataz F.-D. et Kohl T. Geochemical modelling of the soultz-sous-forêts hot fractured rock system : comparison of two reservoirs at 3.8 and 5 km depth. *Geothermics*, 32:645–653, 2003.

C. Rampino, C. Mancuso et F. Vinale. Experimental behaviour and modelling of an unsaturated compacted soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 37:748–763, 2000.

E. Romero. *Characterisation and thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated boom clay : experimental study.* Thèse de doctorat, Universitat Politechnica de Catalunya, 1999.

E. Romero, A. Gens et A. Lloret. Temperature effect on the hydraulic behaviour of an unsaturated clay. *Geotechnical and Geological Engineering*, 19:311–332, 2001.

E. Romero et J. Vaunat. Retentions curves of deformable clays. Dans *Experimental evidence and theoretical approaches in unsaturated soils.* Balkema, 2000.

K.H. Roscoe et J.B. Burland. On the generalized stress strain behaviour of wet clay. Dans J. Heyman et F.A. Leckie, éditeurs, *Engineering Plasticity*, pages 535–609. Cambridge University press, Cambridge, 1968.

T. Ruiz. *Eléments de modélisation et contribution expérimentale à l'étude du transport réactif dans un sol non saturé.* Thèse de doctorat, Université Montpellier 2, Montpellier, 1998.

C. Saix. *Contribution à l'étude des sols non saturés en température. Application à l'exploitation thermique du sous-sol.* Thèse de doctorat, Université Montpellier 2, Montpellier, 1987.

C. Saix. Consolidation thermique par chaleur d'un sol non saturé. *Canadian Geotechnical Journal*, 28:42–50, 1991.

C. Saix, P. Devillers et M.S. El Youssoufi. Eléments de couplage thermomécanique dans la consolidation de sols non saturés. *Canadian Geotechnical Journal*, 37:308–317, 2000.

C. Saix et P. Jouanna. Appareil triaxial thermique pour l'étude du comportement thermique de sols non saturés. *Canadian Geotechnical Journal*, 27:119–128, 1989.

S. Salager, M.S. El Youssoufi et C. Saix. Experimental study of the water retention curve as a function of void ratio. Dans *CDrom*, page 10, Denver, 2007. GeoDenver.

S. Salager, F. Jamin, M.S. El Youssoufi et C. Saix. Influence de la température sur la courbe de rétention d'eau. *C. R. Mécanique*, 334:393–398, 2006.

H.Y. She et B. Sleep. The effect of temperature on capillary pressure-saturation relationships for air-water and tetrachloroethylene-water systems. *Water Resources Research*, 34:2587–2597, 1998.

W.S. Singleton. Solution porperties. pages 609–682. Wiley Interscience, New York, 1960.

V. Sivakumar. *A critical state framework for unsaturated soil*. Thèse de doctorat, University of Sheffield, Sheffield, 1993.

F. Soulié. *Cohésion par capillarité et comportement mécanique de milieux granulaires*. Thèse de doctorat, Université Montpellier 2, Montpellier, 2005.

T. Sugii, K. Yamada et T. Kondou. Relationship between soil-water characteristic curve and void ratio. volume 1, pages 209–214. 3rd International Conference on Unsaturated Soils, Swets and Zeitlinger, 2002.

N. Sultan, P. Delage et Y.J. Cui. Temperature effects on the volume change behaviour of boom clay. *Engineering Geology*, 64(11):135–145, 2002.

N. Tanaka, J. Graham et T. Crilly. Stress-strain behaviour of reconstituted illitic clay at different temperatures. *Engineering Geology*, 47:339–350, 1997.

A.M. Tang. *Effet de la température sur le comportement des barrières de confinement*. Thèse de doctorat, Ecole Nationnale des Ponts et Chaussées, Paris, 2005.

A. Tarantino et S. Tombolato. Coupling of hydraulic and mechanical behaviour in unsaturated compacted clay. *Géotechnique*, 55(4):307–317, 2005.

D.W. Taylor. *Fundamentals of Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, 1948.

K. Terzaghi. The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear. volume 1, pages 54–56. 1st international conference of soil mechanics, 1936.

K. Terzaghi. *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, 1943.

M. Tidförs et G. Sällfors. Temperature effect on preconsolidation pressure. *Geotechnical Testing Journal*, 12(1):93–97, 1989.

E.O. Timmermann, J. Chirife et H.A. Iglesias. Water sorption isotherms of foods and foodstuffs : Bet or gab parameters ? *Journal of Food Engineering*, 48:19–31, 2001.

S. Tripathy, K.S. Subba Rao et D.G. Fredlund. Water content-void ratio swell-shrink paths of compacted expansive soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 39:938–959, 2002.

H. Van Damme. L'eau et sa représentation. Dans O. Coussy et J.M. Fleureau, éditeurs, *Mécanique des sols non saturés*, pages 23–68. Hermes, 2002.

C. Van Den Berg. Description of water activity of foods for engineering purposes bymeans of the g.a.b. model of sorption. *Department of food Science, Food and Bioengineering Group*, 31:311–321, 1984.

M.T. Van Genuchten. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, 44:892–898, 1980.

S.K. Vanapalli, D.G Fredlund et D.E. Pufahl. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. *Géotechnique*, 44:892–898, 1999a.

S.K. Vanapalli, D.G Fredlund et D.E. Pufahl. Relationship between soil-water characteristic curves and the as-compacted water content versus soil suction for clay till. *Eleventh Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 44:991–998, 1999b.

J.C. Verbrugge et J.M. Fleureau. Bases expérimentales du comportement des sols non saturés. Dans O. Coussy et J.M. Fleureau, éditeurs, *Mécanique des sols non saturés*, pages 69–112. 2002.

Y. Watabe, S. Leroueil et J.P. Le Bihan. Influence of compaction conditions on pore-size distribution and saturated hydraulic conductivity of a glacial till. *Canadian Geotechnical Journal*, 37:1184–1194, 2000.

J. Zhou et J.L Yu. Influences affecting the soil-water characteristic curve. *Journal of Zhejiang University Sciences*, 6A(8):797–804, 2004.

Annexe I : Discussion autour des variables d'état caractérisant l'état hydrique

Définition et domaine de validité de la succion

Classiquement, pour la caractérisation hydrique des milieux poreux, et particulièrement en mécanique des sols non saturés, on utilise la succion comme variable pour quantifier le niveau de chargement hydrique. La succion a été définie tout d'abord par les agronomes comme la dépression qu'il faut appliquer à l'eau libre, dans un système isotherme, pour amener son potentiel à la même valeur que celui de l'eau contenue dans l'échantillon de sol libéré de toute contrainte extérieure (Verbrugge et Fleureau (2002)). Cette définition correspond à celle de la succion totale s_{tot} qui est la somme de la succion matricielle s et de la succion osmotique s_o. Dans le cas où la phase liquide est de l'eau pure, on a $s = s_{tot}$. La succion osmotique représente la contribution des solutés dissouts dans l'eau. Ici il n'y a pas d'ambiguïté puisqu'on considère toujours la phase liquide comme constituée uniquement d'eau pure. La succion osmotique est donc nulle et les succions totale et matricielle qui sont égales seront dénommées simplement succion.

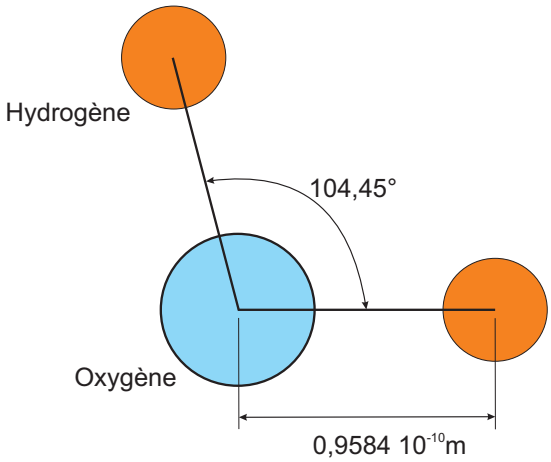

FIG. 9.18 – Représentation schématique et dimensions d'une molécule d'eau (il n'y pas proportionnalité entre les distances inter-atomiques et les diamètres des atomes)

La succion représente, à l'échelle d'un ménisque, la différence entre la pression de gaz et la pression d'eau. Cette variable est utilisée pour couvrir tout les domaines hydriques du milieu allant de la saturation aux états les plus secs. On utilise donc une gamme de succions comprises entre 0 (saturation) et 1.10^9 Pa (succion à laquelle on suppose généralement que l'on a atteint un état totalement sec). Avec la loi de Jurin-Laplace, on peut déterminer les rayons du ménisque correspondant. Les calculs montrent que ces rayons varient d'une valeur théoriquement infinie, pour une succion nulle, à des valeurs de 1.10^{-9} m pour les états les plus secs. La figure 9.18 représente le schéma d'une molécule d'eau. Ses dimensions étant de l'ordre de 1.10^{-10} m, il est donc clair que, pour les chargements hydriques importants, les notions de ménisque et de pression n'ont plus de sens. Plus généralement, à partir du domaine hygroscopique, la succion ne peut plus être définie comme une différence de pressions. On se propose donc ici de discuter la validité d'une variable d'état équivalente à la succion, mais qui présente l'avantage d'avoir un sens physique bien défini dans tous les domaines hydriques, à savoir le potentiel chimique de l'eau μ_e.

Définition du potentiel chimique

Le potentiel chimique de l'eau quantifie l'énergie qu'il faut apporter à un système pour lui extraire une mole d'eau. Le potentiel chimique μ_i d'un constituant i est défini thermodynamiquement comme la dérivée partielle de l'enthalpie libre massique du système G par rapport au nombre de moles n_i de ce constituant, soit :

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T,p,n_{j\neq i}} \tag{9.5}$$

En dérivant le potentiel chimique du constituant i, par p, la pression du milieu, on obtient :

$$\frac{\partial \mu_i}{\partial p} = \left(\frac{\partial}{\partial p}\left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T,p,n_{j\neq i}}\right)_{T,n_i} = \left(\frac{\partial}{\partial n_i}\left(\frac{\partial G}{\partial p}\right)_{T,n_i}\right)_{T,p,n_{j\neq i}} = \frac{1}{\rho_i^*} \tag{9.6}$$

Où ρ_i^* la masse volumique spécifique du constituant i.

En intégrant cette relation entre un état de référence à la pression p_0 et l'état actuel à la pression p, on obtient :

$$\mu_i(T,p) - \mu_i(T,p_0) = \int_{p_0}^{p} \frac{dp}{\rho_i^*} \tag{9.7}$$

Pour certains cas particuliers, on peut intégrer le second membre de cette équation. Il faut alors connaître la relation entre la masse volumique et la pression.

- Dans le cas d'un fluide incompressible, la densité est une constante, on peut intégrer l'équation (9.7) et écrire :

$$\mu_i(T,p) = \mu_i(T,p_0) + \frac{p-p_0}{\rho_i^*} \tag{9.8}$$

- Et dans le cas d'un gaz, sous l'hypothèse des gaz parfaits, on peut intergrer l'équation (9.7) et on obtient :

$$\mu_i(T,p) = \mu_i(T,p_0) + \frac{RT}{M_i} ln\left(\frac{p}{p_0}\right) \tag{9.9}$$

avec R, constante des gaz parfaits et M_i, masse molaire du constituant i. Cette expression peut être utilisée pour déterminer le potentiel chimique de la vapeur d'eau par exemple.

Expressions du potentiel chimique

Cas de l'eau capillaire

La figure 9.19 représente une schématisation d'un tensiomètre. L'eau du milieu est dans un état capillaire ; la pression d'eau est donc inférieure à celle de la phase gazeuse. Une pierre poreuse entre le milieu et le réservoir permet les transferts d'eau ; l'équilibre va donc s'établir entre l'eau du milieu et l'eau libre du circuit hydraulique.

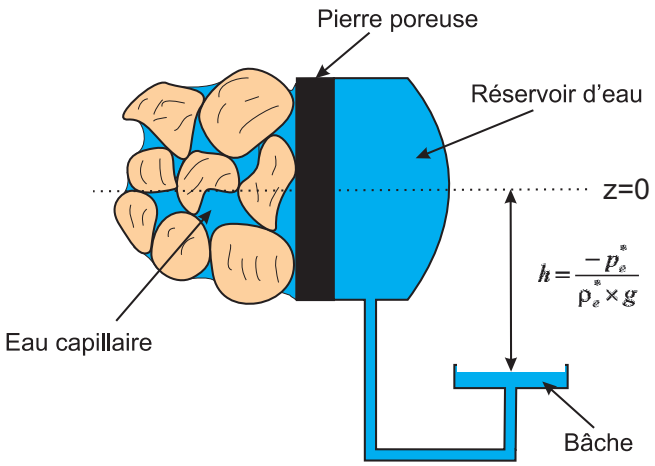

FIG. 9.19 – Schéma de principe d'un tensiomètre

En posant l'hypothèse que l'eau est incompressible, on peut écrire, à partir de l'équation (9.8), l'expression du potentiel chimique massique de l'eau libre μ_e^{libre} comme suit :

$$\mu_e^{libre}(T, p_e^*) = \mu_e^{libre}(T, p_{e_0}^*) + \left(\frac{p_e^* - p_{e_0}^*}{\rho_e^*}\right) \tag{9.10}$$

Pour un état de référence à la pression atmosphérique, supposée nulle, $p_{e_0}^* = p_{atm} = 0$, l'expression précédente devient :

$$\mu_e^{libre}(T, p_e^*) = \mu_e^{libre}(T, 0) + \left(\frac{p_e^*}{\rho_e^*}\right) \tag{9.11}$$

A l'équilibre, le potentiel chimique de l'eau libre est égal au potentiel chimique de l'eau contenue dans le milieu poreux μ_e^m , soit :

$$\mu_e^m(T, p_e^*) = \mu_e^{libre}(T, p_e^*) = \mu_e^{libre}(T, 0) + \left(\frac{p_e^*}{\rho_e^*}\right) \tag{9.12}$$

Cas de l'eau adsorbée

Dans le domaine hygroscopique le chargement hydrique est définit par l'humidité relative de la phase gazeuse. La figure 9.20 présente le schéma de principe de la dessiccation par

solutions salines saturées. Le sol se trouve dans un récipient hermétique dont l'humidité est régulée par une solution saline. Les transferts d'eau se font par filtration en phase gazeuse et par changement de phase pour établir l'équilibre entre l'eau du milieu et la vapeur d'eau de la phase gazeuse. A partir de l'équation (9.9), on peut écrire le potentiel chimique de la vapeur

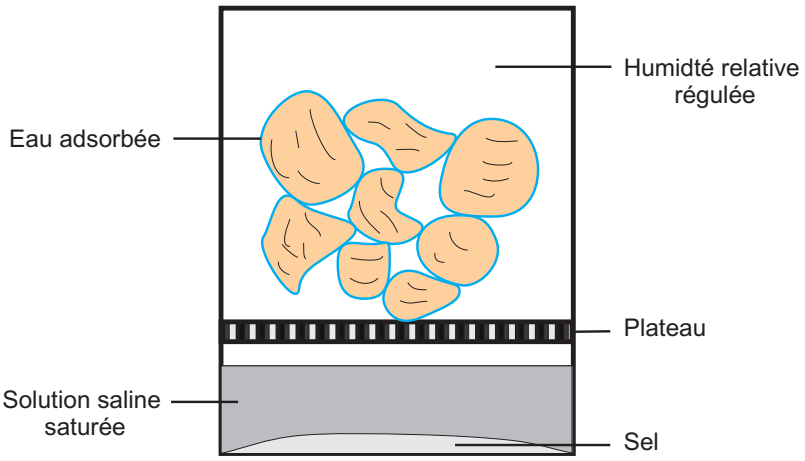

FIG. 9.20 – Schéma de principe de la dessiccation par solutions salines saturées

d'eau sous la forme :

$$\mu_v(T, p_v^*) = \mu(T, p_{v_0}^*) + \frac{RT}{M_e} ln \left(\frac{p_v^*}{p_{v_0}^*} \right) \tag{9.13}$$

En prenant comme pression de référence la pression de vapeur saturante ($p_{v_0}^* = p_{v_s}^*$), on obtient :

$$\mu_v(T, p_v^*) = \mu(T, p_{v_s}^*) + \frac{RT}{M_e} ln \left(\frac{p_v^*}{p_{v_s}^*} \right) = \mu(T, p_{v_s}^*) + \frac{RT}{M_e} ln\,(HR) \tag{9.14}$$

avec HR, l'humidité relative de la phase gazeuse ($HR = \frac{p_v^*}{p_{v_s}^*}$). A l'équilibre, le potentiel chimique de l'eau du milieu est égal au potentiel chimique de la vapeur d'eau, soit :

$$\mu_e^m(T, p_v^*) = \mu_v(T, p_v^*) = \mu(T, p_{v_s}^*) + \frac{RT}{M_e} ln\,(HR) \tag{9.15}$$

Continuité de l'expression du potentiel chimique

Si on considère de l'eau libre dans un système isolé, le potentiel chimique de l'eau et de sa vapeur s'écrivent :

$$\mu_e^m(T, p_e^*) = \mu_e^{libre}(T, 0) + \left(\frac{0}{\rho_e^*} \right) = \mu_e^{libre}(T, 0) \tag{9.16}$$

$$\mu_v^m(T, p_v^*) = \mu(T, p_{v_s}^*) + \frac{RT}{M_e} ln\,(1) = \mu(T, p_{v_s}^*) \tag{9.17}$$

Or, à l'équilibre ces deux expressions du potentiel chimique sont égales ($\mu_e^{libre}(T, 0) = \mu(T, p_{v_s}^*)$) et égales au potentiel chimique de l'eau pure. En entendant le potentiel chimique de l'eau du milieu comme relatif à celui de l'eau pure, on peut écrire :

$$\mu_e^m(T, p_e^*) = \left(\frac{p_e^*}{\rho_e^*} \right) \tag{9.18}$$

$$\mu_e^m(T, p_v^*) = \frac{RT}{M_e} ln\,(HR) \tag{9.19}$$

Conclusion

Dans cette section on a montré que la notion de succion n'est pas clairement définie dans tous les domaines hydriques car pour les forts chargements, l'interface entre la phase liquide et la phase gazeuse ne peut plus être considérée comme un ménisque et la notion de pression de la phase liquide n'a plus de sens. La variable potentiel chimique qui quantifie l'énergie à apporter au système pour lui extraire une mole de phase liquide, est une variable plus adéquate pour définir l'état hydrique d'un milieu car elle conserve un sens physique quel que soit le domaine hydrique considéré (Ouedraogo et al. (2007)).

Pour les faibles chargements hydriques, les méthodes d'application du potentiel énergétique à la phase liquide d'un milieu poreux sont de deux types : par dépression d'eau ou par surpression d'air. D'après L. De Backer (De Backer et Klute (1966)), il y a équivalence entre les deux méthodes : un échantillon auquel on applique une pression de la phase gazeuse de 50 kPa, la pression de la phase liquide étant nulle, aura à l'équilibre, la même teneur en eau qu'un échantillon en contact avec de l'eau à la pression de -50 kPa, la pression d'air étant par ailleurs nulle. Ce n'est pas la pression d'eau qui définit l'état hydrique d'un milieu mais la différence de pression entre la phase gazeuse et la phase liquide.

Le potentiel chimique de la phase liquide ne peut pas rendre compte de ce dernier point car il ne dépend pas de la pression en phase gazeuse. Son utilisation se limite donc, en attendant de prochains développements, aux cas où la pression en phase gazeuse est nulle.

RESUME

Ce mémoire est consacré à l'étude de la rétention d'eau et de la consolidation des sols non saturés dans un cadre thermo-hydro-mécanique. Il est organisé en deux parties qui concernent respectivement "l'effet de la déformation et de la température sur le comportement hydrique" et "l'effet de la température et de la succion sur le comportement mécanique" de sols non saturés.
Dans la première partie, on montre la pertinence du concept de surface caractéristique d'un sol par opposition à la courbe de rétention dont la portée s'avère limitée dans le cas de milieux très déformables. Ce concept est illustré expérimentalement dans le cas d'un sable limoneux argileux. La modélisation mathématique de la surface caractéristique s'appuie sur une importante campagne expérimentale comprenant la mesure d'environ 240 triplets (indice des vides, teneur en eau, succion). Par ailleurs, un modèle de comportement thermo-hydrique est proposé afin de déterminer la surface caractéristique et la courbe de rétention à une température donnée. Ce modèle est validé dans le cas de deux matériaux (une céramique à base de terre cuite et un sable limoneux argileux) testés par l'auteur ainsi que dans le cas d'autres matériaux de la littérature. Enfin, on présente une application à la détermination de la perméabilité des sols non saturés prenant en compte la déformation et la température.
Dans la deuxième partie, l'effet de la température et de la succion sur le comportement mécanique est examiné à partir d'essais de consolidation du limon de Sion. Ces essais sont réalisés à différents niveaux de température et de succion. Pour chacun de ces essais, les indices de gonflement et de compression ainsi que la contrainte de préconsolidation sont mesurés. On détermine ainsi l'influence de la température et de la succion sur ces paramètres essentiels du comportement mécanique. Enfin, on propose une fonction d'approximation modélisant l'évolution de la contrainte de préconsolidation en fonction de la température et de la succion.

TITLE

Study of the water retention and the consolidation of partially saturated soils in a thermo-hydro-mechanical framework

ABSTRACT

This work is concerned with the study of water retention and consolidation of unsaturated soils in a thermo-hydro-mechanical framework. It is organized into two parts which deal respectively with deformation and temperature effects on hydric behaviour, and suction and temperature effects on mechanical behaviour. In the first part, we point out the relevance of the characteristic surface concept for soils as opposed to the retention curve, which has limited modelling power in the case of deformable media. The characteristic surface concept is experimentally illustrated for the example of a clayey silty sand. Its modelling is based on a large sample of experimental investigations with about 240 measurements of the triplet void ratio, water content, suction. In addition, a thermo-hydric behaviour model is proposed in order to determine the characteristic surface and the retention curve for a given temperature. This model is validated for the case of two materials : a ceramic and a clayey silty sand through direct testing, and for other materials on the basis of an analysis of the literature. Finally, we present an application to the determination of the permeability of unsaturated soils taking into account deformation and temperature. In the second part, temperature and suction effects on the mechanical behaviour are studied through consolidation tests on "Sion" silt. These tests are performed for different temperatures and suctions. For each test, swelling and compression indexes, as well as the preconsolidation pressure are measured. The influence of temperature and suction on these essential parameters of mechanical behaviour is determined. Finally, we propose a theoretical model which account for preconsolidation pressure as a function of temperature and suction.

SPECIALITE

Mécanique et Génie Civil

MOTS-CLES Couplages thermo-hydro-mécaniques / Sols non saturés / Surface caractéristique / Courbe de rétention / Perméabilité / Indice de gonflement / Indice de compression / Contrainte de préconsolidation.

INTITULE ET ADRESSE DU LABORATOIRE

Laboratoire de Mécanique et Génie Civil
UMR UM2-CNRS 5508
CC048 Place Eugène Bataillon
34095 Montpellier Cedex 5

RESUME

Ce mémoire est consacré à l'étude de la rétention d'eau et de la consolidation des sols non saturés dans un cadre thermo-hydro-mécanique. Il est organisé en deux parties qui concernent respectivement "l'effet de la déformation et de la température sur le comportement hydrique" et "l'effet de la température et de la succion sur le comportement mécanique" de sols non saturés.
Dans la première partie, on montre la pertinence du concept de surface caractéristique d'un sol par opposition à la courbe de rétention dont la portée s'avère limitée dans le cas de milieux très déformables. Ce concept est illustré expérimentalement dans le cas d'un sable limoneux argileux. La modélisation mathématique de la surface caractéristique s'appuie sur une importante campagne expérimentale comprenant la mesure d'environ 240 triplets (indice des vides, teneur en eau, succion). Par ailleurs, un modèle de comportement thermo-hydrique est proposé afin de déterminer la surface caractéristique et la courbe de rétention à une température donnée. Ce modèle est validé dans le cas de deux matériaux (une céramique à base de terre cuite et un sable limoneux argileux) testés par l'auteur ainsi que dans le cas d'autres matériaux de la littérature. Enfin, on présente une application à la détermination de la perméabilité des sols non saturés prenant en compte la déformation et la température.
Dans la deuxième partie, l'effet de la température et de la succion sur le comportement mécanique est examiné à partir d'essais de consolidation du limon de Sion. Ces essais sont réalisés à différents niveaux de température et de succion. Pour chacun de ces essais, les indices de gonflement et de compression ainsi que la contrainte de préconsolidation sont mesurés. On détermine ainsi l'influence de la température et de la succion sur ces paramètres essentiels du comportement mécanique. Enfin, on propose une fonction d'approximation modélisant l'évolution de la contrainte de préconsolidation en fonction de la température et de la succion.

TITLE

Study of the water retention and the consolidation of partially saturated soils in a thermo-hydro-mechanical framework

ABSTRACT

This work is concerned with the study of water retention and consolidation of unsaturated soils in a thermo-hydro-mechanical framework. It is organized into two parts which deal respectively with deformation and temperature effects on hydric behaviour, and suction and temperature effects on mechanical behaviour. In the first part, we point out the relevance of the characteristic surface concept for soils as opposed to the retention curve, which has limited modelling power in the case of deformable media. The characteristic surface concept is experimentally illustrated for the example of a clayey silty sand. Its modelling is based on a large sample of experimental investigations with about 240 measurements of the triplet void ratio, water content, suction. In addition, a thermo-hydric behaviour model is proposed in order to determine the characteristic surface and the retention curve for a given temperature. This model is validated for the case of two materials : a ceramic and a clayey silty sand through direct testing, and for other materials on the basis of an analysis of the literature. Finally, we present an application to the determination of the permeability of unsaturated soils taking into account deformation and temperature. In the second part, temperature and suction effects on the mechanical behaviour are studied through consolidation tests on "Sion" silt. These tests are performed for different temperatures and suctions. For each test, swelling and compression indexes, as well as the preconsolidation pressure are measured. The influence of temperature and suction on these essential parameters of mechanical behaviour is determined. Finally, we propose a theoretical model which account for preconsolidation pressure as a function of temperature and suction.

SPECIALITE

Mécanique et Génie Civil

MOTS-CLES Couplages thermo-hydro-mécaniques / Sols non saturés / Surface caractéristique / Courbe de rétention / Perméabilité / Indice de gonflement / Indice de compression / Contrainte de préconsolidation.

INTITULE ET ADRESSE DU LABORATOIRE

Laboratoire de Mécanique et Génie Civil
UMR UM2-CNRS 5508
CC048 Place Eugène Bataillon
34095 Montpellier Cedex 5