



HAL
open science

Etudes des propriétés hydromécaniques d'un sable limoneux : de la saturation partielle à la saturation complète

Ngoc Lan Hoang

► **To cite this version:**

Ngoc Lan Hoang. Etudes des propriétés hydromécaniques d'un sable limoneux : de la saturation partielle à la saturation complète. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Université de Lyon, 2017. Français. NNT : 2017LYSET005 . tel-01625084

HAL Id: tel-01625084

<https://theses.hal.science/tel-01625084>

Submitted on 27 Oct 2017

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.



N°d'ordre NNT : 2017LYSET005

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON

opérée au sein de

Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat

Ecole Doctorale N° 162

Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique

Spécialité : Génie Civil

Soutenue publiquement le 13 Juin 2017, par :

Ngoc Lan HOANG

Etudes des propriétés hydromécaniques d'un sable limoneux :

de la saturation partielle à la saturation complète

Devant le jury composé de :

DJERAN MAIGRE Irini	Professeure (Insa de Lyon)	Présidente
TAIBI Said	Professeur (Université du Havre)	Rapporteur
SOULI Hanène	Maître de Conférence (ENISE)	Rapporteur
COMBE Gaël	Professeur (Université Grenoble Alpes)	Examineur
BRANQUE Denis	Chargé de recherche (ENTPE)	Directeur de thèse
DO ANH Thiep	Chargé de recherche (ENTPE)	Directeur de thèse
BOUTONNIER Luc	Docteur Ingénieur (Egis Géotechnique)	Examineur

Table des matières

TABLE DES MATIERES.....	3
LISTE DES FIGURES	7
LISTE DES TABLEAUX.....	13
REMERCIEMENTS.....	15
INTRODUCTION GENERALE.....	17
CHAPITRE I : PROPRIETES DES SOLS PARTIELLEMENT SATURES	21
I.1 Succion dans les sols partiellement saturés	21
I.1.1 Les phénomènes capillaires	21
I.1.2 L'eau adsorbée	24
I.1.3 Etats de saturation en terrains naturels	25
I.1.4 . Définition de la succion.....	25
I.2 Caractérisation du comportement des sols sur chemin de drainage-imbibition	28
I.3 Propriétés du comportement mécanique des sols non saturés.....	33
I.3.1 Comportement volumique	33
I.3.2 Résistance au cisaillement.....	34
I.4 Influence des paramètres sur le compactage du sol.....	38
I.4.1 Influence de l'énergie de compactage sur la courbe Proctor:	39
I.4.2 Influence de la teneur en eau sur la courbe de Proctor	41
I.5 Influence des paramètres liés au compactage sur la microstructure du sol	42
I.5.1 Influence du compactage sur la perméabilité du sol.....	42
I.5.2 Organisation des constituants des sols fins compactés	44
I.5.3 Effet du compactage sur la microstructure du sol	46
I.5.4 Influence de l'état hydrique sur la microstructure du sol	50
I.5.5 Influence la succion sur la structure interne des sols.....	53
I.6 Influence des paramètres liés au compactage sur chemin de drainage-imbibition.....	55
I.7 Conclusions	58
CHAPITRE II : CARACTERISATION PHYSIQUE ET COMPORTEMENT MECANIQUE DE REFERENCE DU MATERIAU DE GAVET	60
II.1 Introduction.....	60

II.2 Caractérisation physique du sol étudié	60
II.2.1 Matériau réceptionné :	60
II.2.2 Analyse granulométrique	61
II.2.3 Masse volumique des grains solides ρ_s	64
II.2.4 Limites d'Atterberg	64
II.2.5 Valeur de bleu de méthylène	65
II.2.6 Classification du matériau	66
II.2.7 Densité sèche et teneur en eau optimales de compactage :	68
II.3 Comportement de référence sur chemin œdométrique.	70
II.3.1 Dispositif expérimental	71
II.3.2 Confection des échantillons de sol	72
II.3.3 Procédure de chargement œdométrique	74
II.3.4 Courbe de compressibilité du sable limoneux de Gavet à l'état normalement consolidé	74
II.3.5 Courbe de compressibilité du sable limoneux de Gavet à l'état sur-consolidé	75
II.3.6 Coefficient de perméabilité du sable limoneux de Gavet.....	77
II.4 Comportement de référence sur chemin triaxial.....	80
II.4.1 Dispositif expérimental	81
II.4.2 Confection des échantillons de sol	84
II.4.3 Saturation et consolidation des échantillons de sol	86
II.4.4 Programme expérimental :	87
II.4.5 Comportement sous consolidation isotrope	88
II.4.6 Comportement du sable limoneux fabriqué par sous compaction à sec sur chemin de chargement déviatorique	90
II.4.7 Comportement du sable limoneux compacté à 25 coups sur chemin de chargement déviatorique	99
II.4.8 Synthèse du comportement de référence du sable limoneux de Gavet sur chemins déviatoires	110
II.5 Conclusion	113
 CHAPITRE III : ETUDE DU COMPORTEMENT DU SABLE LIMONEUX DE GAVET AU COMPACTAGE.....	116
III.1 Introduction	116
III.2 Essais de compactage Proctor à énergie variable	117
III.2.1 Principe de l'essai	117
III.2.2 Appareillage spécifique	117
III.2.3 Préparation des échantillons soumis à l'essai	119
III.2.4 Expression des résultats	121
III.2.5 Programme expérimental	121
III.2.6 Résultats des essais	122
III.3 Mesure de la succion	127
III.3.1 Objectifs de l'essai.....	127
III.3.2 Principe de mesure de la succion dans l'échantillon de sol compacté	128
III.3.3 Procédure expérimentale :	130
III.3.4 Courbes d'iso-succion	131
III.4 Mesure de l'Indice de Portance Immédiat.....	137
III.4.1 Principe de l'essai :	137
III.4.2 Dispositif et procédure expérimentale :	137

III.4.3 Analyse des mesures d'Indice de Portance Immédiate.....	139
III.5 Essai de compression simple.....	143
III.5.1 Principe de l'essai	143
III.5.2 Procédure expérimentale.....	144
III.5.3 Analyse des résistances à la compression simple	148
III.6 Conclusions	153
CHAPITRE IV : ETUDE DES PROPRIETES DE RETENTION D'EAU DU SABLE LIMONEUX DE GAVET	155
IV.1 Introduction	155
IV.2 Essai de rétention d'eau	155
IV.2.1 Principe de l'essai.....	155
IV.2.2 Préparation des échantillons de sol.....	164
IV.2.3 Les différentes procédures d'essais	167
IV.2.4 Programme expérimental.....	173
IV.3 Analyse des résultats des essais de rétention d'eau.....	174
IV.3.1 Essai de drainage-imbibition sur la pâte ($w = w_l$)	175
IV.3.2 Essai de drainage-imbibition sur le sable limoneux compacté à 25 coups par couche à la teneur en eau de l'optimum.....	179
IV.3.3 Essais de drainage-imbibition sur le sable limoneux compacté à 55 et 85 coups par couche à la teneur en eau de l'optimum	182
IV.3.4 Influence des paramètres de compactage sur les propriétés de rétention du matériau	185
IV.4 Essais de porosimétrie au mercure.....	195
IV.4.1 Principe et dispositif expérimental	195
IV.4.2 Procédure d'essai :	196
IV.4.3 Les matériaux testés :	196
IV.4.4 Préparation des échantillons :	198
IV.5 Analyse des résultats des essais de porosimétrie au mercure	199
IV.5.1 Echantillons préparés à énergie de compactage constante et teneur en eau variable.....	199
IV.5.2 Echantillons préparés à teneur en eau constante et énergie de compactage variable.....	204
IV.5.3 Analyse des courbes d'intrusion et d'extrusion de mercure en fonction de l'énergie de compactage ..	204
IV.6 Relations entre propriétés de rétention et distribution porale du matériau.....	209
IV.6.1 Influence de la distribution porale sur la succion d'entrée d'air	209
IV.6.2 Construction de la courbe de rétention (drainage) à partir de la courbe d'injection de mercure	216
IV.7 Conclusions	219
CONCLUSION GENERALE	221
BIBLIOGRAPHIE	224
ANNEXE I : ESSAI ŒDOMETRE MODIFIE	231

A-I.1 Principe de l'essai	231
A-I.2 Dispositif expérimental :	231
A-I.3 Procédure expérimentale de l'ENTPE :	233
A-I.3.1 Essais œdomètre classique sur la pâte Livet – Gavet mélangé à limite de liquidité.....	233
A-I.3.2 Essais œdomètre classique sur la bille de verre :	236
 ANNEXE II : RESULTATS NUMERIQUES DES ESSAIS DE RETENTION D'EAU.....	240
A-II.1 Résultats numériques des essais de rétention d'eau.....	240
A-II.2 Quelques images des essais de rétention d'eau:	248

Liste des figures

FIGURE I-1 : ILLUSTRATION DES FORCES A L'INTERFACE EAU-AIR (DELAGÉ & CUI, 2000)	21
FIGURE I-2 : ILLUSTRATION DU PHENOMENE DE REMONTEE CAPILLAIRE DANS UN TUBE (DELAGÉ & CUI, 2000)	22
FIGURE I-3 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UN SOL GRANULAIRE NON SATURE	22
FIGURE I-4 : ILLUSTRATION DE LA PENETRATION DE L'AIR DANS UN SOL GRANULAIRE, D'APRES CHILDS (1969) CITE PAR (DELAGÉ & CUI, 2000)	23
FIGURE I-5 : MENISQUES CAPILLAIRES DANS LE CAS DE GRAINS SPHERIQUES DE MEME DIAMETRE	24
FIGURE I-6 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UN SOL FIN NON SATURE	24
FIGURE I-7 : ILLUSTRATION DES ETATS DE SATURATION RENCONTRES DANS LES SOLS NATURELS	25
FIGURE I-8 : EVOLUTION DE LA SUCCION (S) EN FONCTION DE L'HUMIDITE RELATIVE (H_r) DE L'AIR	27
FIGURE I-9 : MECANISMES INVOQUES POUR L'HYSTERESIS DES COURBES DE RETENTION D'EAU	29
FIGURE I-10 : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA DIFFERENCE ENTRE ANGLE DE DRAINAGE ET ANGLE DE MOUILLAGE (D'APRES (DELAGÉ & CUI, 2000))	29
FIGURE I-11 : COURBE DE RETENTION DE L'ARGILE BLANCHE (FLEUREAU, ET AL., 1993)	31
FIGURE I-12 : COURBE DE RETENTION DE L'ARGILE DE VIEUX PRE (INDARTO, 1991)	32
FIGURE I-13 : RESULTATS DES ESSAIS CEDOMETRIQUES A SUCCION CONSTANTE SUR LE LIMON DE STERREBEEK (LECLERCQ & VERBRUGGE, 1985)	33
FIGURE I-14 : RESULTATS DES ESSAIS TRIAXIAUX A SUCCION IMPOSEE SUR LE GRANITE DECOMPOSE (HO & FREDLUND, 1982) ..	35
FIGURE I-15 : EVOLUTION DE L'ANGLE DE FROTTEMENT EN FONCTION DE LA SUCCION IMPOSEE A L'APPAREIL TRIAXIAL (FREDLUND, ET AL., 1995)	35
FIGURE I-16 : RESULTATS DES ESSAIS TRIAXIAUX A SUCCION CONSTANTE SUR UN LIMON NON SATURE (BLIGHT, 1967)	36
FIGURE I-17 : RESULTATS DES ESSAIS TRIAXIAUX A SUCCION CONSTANTE SUR LE LIMON DE JOSSIGNY (CUI & DELAGE, 1996) ...	37
FIGURE I-18 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE L'ETAT DE SATURATION (BOUTONNIER, 2007)	38
FIGURE I-19 : LES DOMAINES DE LA SATURATION SUR LE CHEMIN $P_b - W$ DE L'ESSAI PROCTOR POUR LES SOLS FINS (BOUTONNIER, 2007)	39
FIGURE I-20 : COURBES DE COMPACTAGE D'ECHANTILLONS COMPACTES EN LABORATOIRE SUIVANT L'ESSAI PROCTOR MODIFIE A DIFFERENTES ENERGIES DE COMPACTAGE (TURNBULL ET FOSTER, 1956 CITE PAR HOLTZ ET KOVACS (HOLTZ & KOVACS, 1991))	40
FIGURE I-21 COURBE PROCTOR D'UNE ARGILE A DIFFERENTES ENERGIES DE COMPACTAGE (SERRATRICE, 2013)	40
FIGURE I-22 COURBES DE COMPACTAGE DES ESSAIS PROCTOR NORMAL ET MODIFIES POUR LE LIMON ARGILEUX DE XEUILLEY (DAOUD, 1996).....	41
FIGURE I-23 : ESSAI PROCTOR SUR LIMON DE JOSSIGNY (CUI & DELAGE, 2003)	41
FIGURE I-24 : COMPARAISON ENTRE LES VALEURS DE PERMEABILITE OBTENUE SUR DES EPROUVETTES COMPACTEES PAR PETRISSAGE ET PAR METHODE STATIQUE (MITCHELL & SOGA, 1976) CITE PAR GUEDDOUDA (GUEDDOUDA, 2011)	42
FIGURE I-25 EFFET DE LA METHODE DE COMPACTAGE SUR LA PERMEABILITE (MITCHELL & SOGA, 1976)	43
FIGURE I-26 RELATION CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE-TENEUR EN EAU/ DENSITE SECHE (MOUSSAI, 1993)	43
FIGURE I-27 EFFET DE L'AJOUT DE BENTONITE SUR LES PARAMETRES DE PROCTOR (CHALERMYANONT & ARRYKUL, 2005)	44
FIGURE I-28 : DIFFERENTES FORMES D'ARRANGEMENT DES PARTICULES ELEMENTAIRES SELON DIVERS AUTEURS (COLLINS & MCGOWN, 1974)	45
FIGURE I-29 : ELEMENTS DE LA STRUCTURE DU SOL (ALONSO, ET AL., 1987)	45
FIGURE I-30 : EFFET DU COMPACTAGE SUR LA STRUCTURE DU SOL (LAMBE, 1958)	47
FIGURE I-31 : LA DISTRIBUTION BIMODALE DES PORES POUR UN MELANGE DE 70% DE SABLE D'OTTAWA ET DE 30% DE KAOLIN COMPACTE PAR PETRISSAGE A DEUX ENERGIES DE COMPACTAGE A GAUCHE DE L'OPTIMUM (JUANG & HOLTZ, 1986)	48
FIGURE I-32 : DISTRIBUTIONS DES TAILLES DE PORES DANS UN LIMON COMPACTE A DEUX DENSITES (WAN, ET AL., 1995)	48
FIGURE I-33 : EFFET DE LA TENEUR EN EAU DE COMPACTAGE SUR LA REPARTITION DES PORES. (PRAPAHARAN, ET AL., 1985)	49
FIGURE I-34 : ESSAI POROSIMETRIE AU MERCURE A DEUX DENSITES SECHES DIFFERENTES SUR UNE BENTONITE COMPACTE (LLORET, ET AL., 2003)	50

FIGURE I-35 : INFLUENCE DE L'ETAT HYDRIQUE D'UN LIMON COMPACTE SUR LES DISTRIBUTIONS DE TAILLES DE PORES (CAS DU LIMON DE JOSSIGNY, (DELAGE, ET AL., 1996))	51
FIGURE I-36 : COURBES POROSIMETRIQUES D'ECHANTILLONS DE GRUNDITE COMPACTE A L'OPTIMUM PROCTOR, DU COTE SEC ET DU COTE HUMIDE. (AHMED ET AL, 1974 CITE PAR DELAGE ET CUI (DELAGE & CUI, 2000))	51
FIGURE I-37 : PHOTOGRAPHIES AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE D'ECHANTILLONS DE LIMON DE JOSSIGNY COMPACTES (DELAGE & CUI, 2000)	52
FIGURE I-38 : STRUCTURE D'UN ECHANTILLON DE LOESS DU NORD DE LA FRANCE (MUNOZ-CASTELBLANCO, 2011)	53
FIGURE I-39 : ESSAI DE POROSIMETRIE AU MERCURE SUR UN SOL LIMON SABLEUX COMPACTE A DIFFERENTES SUCCIONS (CUISINIER & LALOUI, 2004)	54
FIGURE I-40 : EVOLUTION DE LA MICROSTRUCTURE D'UN TILL COMPACTE DU COTE HUMIDE AVEC LA VARIATION DE SUCCION ENTRE 0 ET 2500kPa (SIMMS & YANFUL, 2002)	54
FIGURE I-41 : CHEMIN DE DRAINAGE-IMBIBITION DE L'ARGILE DE BOOM COMPACTEE A DEUX DENSITES DIFFERENTES (ROMERO, 1999)	55
FIGURE I-42 : L'ESSAI DE DRAINAGE SUR L'ARGILE SABLEUSE COMPACTEE A DES TENEURS EN EAU DIFFERENTES (VANAPALLI, ET AL., 1999)	56
FIGURE I-43 : CHEMIN D'HUMIDIFICATION SUR L'ARGILE DE VIEUX PRE COMPACTEE A DIFFERENTES CONTRAINTES (TAIBI, 1994)	56
FIGURE I-44 : ESSAI DE RETENTION D'EAU SUR L'ARGILE DE LA VERNE COMPACTE A TENEUR EN EAU DIFFERENTES DU COTE HUMIDE (FLEUREAU, ET AL., 2002)	57
FIGURE II-1 : MATERIAU GAVET NATUREL (ETAT SEC)	61
FIGURE II-2 : MATERIAU GAVET PASSANT A 2 MM (ETAT SEC)	61
FIGURE II-3 : COURBE GRANULOMETRIQUE DU MATERIAU GAVET NATUREL	62
FIGURE II-4 : COURBE GRANULOMETRIQUE DU MATERIAU GAVET PASSANT A 20 MM (DEDUITE DE LA COURBE GRANULOMETRIQUE DU MATERIAU NATUREL DONNEE FIGURE II-3)	62
FIGURE II-5 : COURBE GRANULOMETRIQUE DU MATERIAU GAVET PASSANT A 2 MM	63
FIGURE II-6 : CLASSIFICATION DU MATERIAU GAVET PASSANT A 2 MM SELON LCPC	66
FIGURE II-7 : CLASSIFICATION DU MATERIAU GAVET PASSANT A 2 MM SELON LCPC (SUITE)	67
FIGURE II-8 : CLASSIFICATION DU MATERIAU GAVET PASSANT A 2 MM SELON GTR	67
FIGURE II-9 : CLASSIFICATION DU MATERIAU GAVET PASSANT A 2 MM SELON GTR (SUITE)	68
FIGURE II-10 : COURBES PROCTOR POUR DEUX NIVEAUX D'ENERGIE (25 COUPS ET 55 COUPS PAR COUCHE) DU SABLE LIMONEUX DE GAVET PASSANT A 2 MM	69
FIGURE II-11 : COURBES PROCTOR DU SABLE LIMONEUX DE GAVET PASSANT A 20 MM	70
FIGURE II-12 : DISPOSITIFS D'ŒDOMETRE – PERMEAMETRE UTILISES LORS DES ESSAIS DE CHARGEMENT ŒDOMETRIQUE.	72
FIGURE II-13 : SCHEMA DE PRINCIPE DE L'ESSAI DE PERMEABILITE A CHARGE VARIABLE.	72
FIGURE II-14 : CHEMIN DE CHARGEMENT IMPOSE LORS DES ESSAIS ŒDOMETRIQUES SUR SABLE LIMONEUX DE GAVET	74
FIGURE II-15 : COURBES DE COMPRESSIBILITE DU SABLE LIMONEUX DE GAVET PREPARE A L'ETAT INITIAL DE PATE ($w=w_l$)	76
FIGURE II-16 : COURBES DE COMPRESSIBILITE DU SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 25 COUPS PAR COUCHE ET A TENEUR EN EAU w_{opn25}	76
FIGURE II-17 : EVOLUTION DE LA PERMEABILITE A L'EAU DU SABLE LIMONEUX DE GAVET EN FONCTION DE SON INDICE DES VIDES (CAS DU MATERIAU PREPARE A L'ETAT DE PATE ET DU MATERIAU COMPACTE A 25 COUPS)	79
FIGURE II-18 : EVOLUTION DE LA PERMEABILITE A L'EAU DU SABLE LIMONEUX DE GAVET EN FONCTION DE LA CONTRAINTE VERTICALE (CAS DU MATERIAU PREPARE A L'ETAT DE PATE ET DU MATERIAU COMPACTE A 25 COUPS)	80
FIGURE II-19 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL UTILISE LORS DES ESSAIS TRIAXIAUX DE REFERENCE SUR SABLE LIMONEUX DE GAVET	82
FIGURE II-20 : SYSTEME D'EMBASES UTILISE LORS DES ESSAIS TRIAXIAUX DE REFERENCE SUR SABLE LIMONEUX DE GAVET	82
FIGURE II-21 : SCHEMA DE PRINCIPE DU DISPOSITIF TRIAXIAL UTILISE LORS DES ESSAIS TRIAXIAUX DE REFERENCE SUR SABLE LIMONEUX DE GAVET (SCHEMA PAR FINGE BOUSAID, 2004)	83
FIGURE II-22 : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA PROCEDURE DES ESSAIS TRIAXIAUX CIU ET CID REALISES SUR LE SABLE LIMONEUX DE GAVET SATURE	88
FIGURE II-23 : RESULTATS DES ESSAIS DE CONSOLIDATION ISOTROPE REALISES SUR LE SABLE LIMONEUX DE GAVET PREPARES SELON DEUX MODES DE FABRICATION DIFFERENTS (SOUS COMPACTION A SEC ET COMPACTAGE HUMIDE)	89

FIGURE II-24 : EVOLUTION DU DEVIATEUR DES CONTRAINTES (q) EN FONCTION DE LA DEFORMATION AXIAL LORS DES ESSAIS CIU (ECHANTILLONS DE SABLE LIMONEUX DE GAVET FABRIQUES PAR SOUS-COMPACTION A SEC PUIS SATURES)	91
FIGURE II-25 : EVOLUTION DE LA SURPRESSION INTERSTITIELLE NORMALISEE EN FONCTION DE DEFORMATION AXIALE	92
FIGURE II-26 : CHEMINS DE CONTRAINTES EFFECTIVES REPRESENTEES DANS LE PLAN (DEVIATEUR – PRESSION MOYENNE EFFECTIVE) POUR LES ESSAIS CIU ((A) : DROITE D’ETAT LIMITE ; (B) : DROITE DE TRANSFORMATION DE PHASE)	94
FIGURE II-27 : EVOLUTION DU DEVIATEUR DES CONTRAINTES (q) EN FONCTION DE LA DEFORMATION AXIALE LORS DES ESSAIS CID (ECHANTILLONS SABLE LIMONEUX DE GAVET FABRIQUES PAR SOUS-COMPACTION A SEC PUIS SATURES)	95
FIGURE II-28 : EVOLUTION DE LA DEFORMATION VOLUMIQUE (ϵ_v) EN FONCTION DE LA DEFORMATION AXIALE (ϵ_1) LORS DES ESSAIS CID (SABLE LIMONEUX DE GAVET FABRIQUES PAR SOUS-COMPACTION A SEC PUIS SATURES)	96
FIGURE II-29 EVOLUTION DE MODULE DE DEFORMATION EN FONCTION DE LA PRESSION DE CONSOLIDATION (SABLE LIMONEUX GAVET FABRIQUE PAR SOUS COMPACTION A SEC PUIS SATURE –ETAT DE PATE)	97
FIGURE II-30 : DROITE D’ETAT LIMITE ET DROITE DE TRANSFORMATION DE PHASE OBTENUES A PARTIR DES ESSAIS TRIAXIAUX CIU ET CID REALISES SUR SABLE LIMONEUX DE GAVET SOUS COMPACTE A SEC	98
FIGURE II-31 : ETATS INITIAUX DES ECHANTILLONS TESTES ET LIGNE D’ETAT CRITIQUE DEDUIT DES ESSAIS TRIAXIAUX CIU ET CID REALISES SUR SABLE LIMONEUX DE GAVET SOUS COMPACTE A SEC	99
FIGURE II-32 : EVOLUTION DU DEVIATEUR DES CONTRAINTES (q) EN FONCTION DE LA DEFORMATION AXIALE LORS DES ESSAIS CIU (ECHANTILLONS SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 25 COUPS A W_{OPN} PUIS SATURES)	101
FIGURE II-33 : EVOLUTION DE LA SURPRESSION INTERSTITIELLE NORMALISEE EN FONCTION DE DEFORMATION AXIALE LORS DES ESSAIS CIU (ECHANTILLONS SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 25 COUPS A W_{OPN} PUIS SATURES)	101
FIGURE II-34 : CHEMINS DE CONTRAINTES EFFECTIVES REPRESENTEES DANS LE PLAN (DEVIATEUR – PRESSION MOYENNE EFFECTIVE) POUR LES ESSAIS CIU ((A) : DROITE D’ETAT LIMITE ; (B) : DROITE DE TRANSFORMATION DE PHASE)	103
FIGURE II-35 : EVOLUTION DU DEVIATEUR DES CONTRAINTES (q) EN FONCTION DE LA DEFORMATION AXIALE LORS DES ESSAIS CID (ECHANTILLONS SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 25 COUPS A W_{OPN} PUIS SATURES)	105
FIGURE II-36 : EVOLUTION DE LA DEFORMATION VOLUMIQUE (ϵ_v) EN FONCTION DE LA DEFORMATION AXIALE (ϵ_1) LORS DES ESSAIS CID (SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 25 COUPS A W_{OPN} PUIS SATURES)	106
FIGURE II-37 : EVOLUTION DE MODULE DE DEFORMATION EN FONCTION DE LA PRESSION DE CONSOLIDATION (SABLE LIMONEUX GAVET COMPACTE 25 COUPS PAR COUCHE A OPTIMUM PROCTOR PUIS SATURE)	107
FIGURE II-38 : DROITE D’ETAT LIMITE OBTENUES A PARTIR DES ESSAIS TRIAXIAUX CIU ET CID REALISES SUR SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 25 COUPS A W_{OPN} PUIS SATURES	108
FIGURE II-39 : DROITE DE TRANSFORMATION DE PHASE OBTENUE A PARTIR DES ESSAIS TRIAXIAUX CIU ET CID REALISES SUR SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 25 COUPS A W_{OPN} PUIS SATURES	108
FIGURE II-40 : ETATS INITIAUX DES ECHANTILLONS TESTES ET LIGNE D’ETAT CRITIQUE DEDUIT DES ESSAIS TRIAXIAUX CIU ET CID REALISES SUR SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 25 COUPS A W_{OPN} PUIS SATURES	109
FIGURE II-41 : COMPARAISON DES CHEMINS DE CONTRAINTES EFFECTIVES OBSERVES LORS DES ESSAIS TRIAXIAUX CIU POUR LES DEUX ETATS INITIAUX DU SABLE LIMONEUX DE GAVET	111
FIGURE II-42 : COMPARAISON DES DROITES D’ETAT CRITIQUE OBSERVES LORS DES ESSAIS TRIAXIAUX CIU ET CID POUR LES DEUX ETATS INITIAUX DU SABLE LIMONEUX DE GAVET	111
FIGURE II-43 : COMPARAISON DES DROITES DE TRANSFORMATION DE PHASE OBSERVEES LORS DES ESSAIS TRIAXIAUX CIU POUR LES DEUX ETATS INITIAUX DU SABLE LIMONEUX DE GAVET (DETERMINATION PAR P'_{min})	112
FIGURE II-44 : COMPARAISON DES DROITES DE TRANSFORMATION DE PHASE OBSERVEES LORS DES ESSAIS TRIAXIAUX CIU POUR LES DEUX ETATS INITIAUX DU SABLE LIMONEUX DE GAVET (DETERMINATION PAR U_{max} ET PAR P_{min})	112
FIGURE III-1 : MOULE PROCTOR (A) ET MOULE CBR (B)	118
FIGURE III-2 APPAREILLAGE POUR L’ESSAI PROCTOR A L’ENTPE, DE GAUCHE A DROITE : DAME PROCTOR NORMAL, REGLE A ARASER, MOULE CBR	119
FIGURE III-3 : LA REPARTITION DES COUPS POUR L’ESSAI PROCTOR SUR LE MOULE CBR	120
FIGURE III-4 : ESSAI PROCTOR NORMAL ET A ENERGIE MODIFIEE REALISES	123
FIGURE III-5 : ETUDE DE LA REPRODUCTIBILITE DES ESSAIS PROCTOR	124
FIGURE III-6 : COURBES DE PROCTOR DU SABLE LIMONEUX DE GAVET	126
FIGURE III-7 EVOLUTION DE LA DENSITE SECHE ET DE LA TENEUR EN EAU A L’OPTIMUM	127

FIGURE III-8 : COURBES DE CALIBRATION DU PAPIER FILTRE WHATMAN N42 OBTENUES PAR DIFFERENTS AUTEURS.....	129
FIGURE III-9 : COURBE DE CALIBRATION DU PAPIER FILTRE WHATMAN N42 SELON ASTM.....	129
FIGURE III-10 : PROCEDURE EXPERIMENTALE DE L'ESSAI PROCTOR AVEC MESURE DE SUCCION ET PRELEVEMENT D'ECHANTILLON POUR L'ESSAI DE POROSIMETRIE AU MERCURE	130
FIGURE III-11 PHASE D'EQUILIBRAGE DE LA SUCCION (ECHANTILLON RECOUVERT D'UN FILM PLASTIQUE ET CONSERVE DANS UNE SALLE CLIMATISEE)	131
FIGURE III-12 : COURBES PROCTOR ET COURBES D'ISO-SUCCION OBTENUES A DIFFERENTES ENERGIES DE COMPACTAGE DANS LE CAS DU SABLE LIMONEUX DE GAVET.....	131
FIGURE III-13 : EVOLUTION DE LA SUCCION EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU	133
FIGURE III-14 : COURBES D'ISO-SUCCION OBTENUES SUR KAOLIN SPESWHITE COMPACTE (TARANTINO & DE COL, 2008).....	134
FIGURE III-15 : COURBES D'ISO-SUCCION OBTENUES SUR LE LIMON DE BARCELONE	134
FIGURE III-16 : COURBES D'ISO-SUCCION OBTENUES SUR L'ARGILE DE BOOM	135
FIGURE III-17 : COURBES D'ISO-SUCCION OBTENUES SUR L'ARGILE A CHATAIGNIER LGV SEA COMPACTE DYNAMIQUEMENT (LI, 2015)	135
FIGURE III-18 : EVOLUTION DE LA SUCCION EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU	136
FIGURE III-19 : PRINCIPE DE PREPARATION DE L'ECHANTILLON PROCTOR	138
FIGURE III-20 : MESURE DE L'INDICE DE PORTANCE IMMEDIAT LE LONG DES COURBES PROCTOR (CAS DU SABLE LIMONEUX DE GAVET)	140
FIGURE III-21 : EVOLUTION DE L'INDICE DE PORTANCE IMMEDIAT EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU POUR DIFFERENTES ENERGIES DE COMPACTAGE (CAS DU SABLE LIMONEUX DE GAVET)	141
FIGURE III-22 : EVOLUTION DE L'INDICE DE PORTANCE IMMEDIAT EN FONCTION DE LA SUCCION POUR DIFFERENTES ENERGIES DE COMPACTAGE (CAS DU SABLE LIMONEUX DE GAVET).....	141
FIGURE III-23 : EVOLUTION DE L'INDICE DE PORTANCE IMMEDIAT EN FONCTION DE LA DENSITE SECHE POUR DIFFERENTES ENERGIES DE COMPACTAGE (CAS DU SABLE LIMONEUX DE GAVET).....	142
FIGURE III-24 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE L'ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE	145
FIGURE III-25 : LES POINTS DE MESURE SOUHAITES POUR L'ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE.....	146
FIGURE III-26 : PROCEDURE DE L'ESSAI COMPRESSION SIMPLE	147
FIGURE III-27 : MISE EN PLACE DE L'EPROUVETTE POUR L'ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE.....	147
FIGURE III-28 : RUPTURE DE L'EPROUVETTE	148
FIGURE III-29 : RESULTATS DES DEUX SERIES D'ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE REALISEES SUR LE SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 25 COUPS/COUCHE AVEC DEUX TEMPS D'HOMOGENEISATION.	149
FIGURE III-30 : RESULTATS DES ESSAIS DE COMPRESSION SIMPLE REALISES SUR SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 25 COUPS/COUCHE (TEMPS D'EQUILIBRAGE DE 7 A 8 JOURS)	150
FIGURE III-31 : EVOLUTION DE LA DENSITE SECHE AVEC LA TENEUR EN EAU MASSIQUE DES EPROUVETTES DE SABLE LIMONEUX DE GAVET SOUMISES AUX ESSAIS DE COMPRESSION SIMPLE	151
FIGURE III-32 : EVOLUTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE ET DU MODULE DE DEFORMATION INITIAL TANGENT EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU MASSIQUE (CAS DU SABLE LIMONEUX DE GAVET)	152
FIGURE IV-1 PRINCIPE DE LA PLAQUE TENSIOMETRIQUE (DELAGE & CUI, 2000)	157
FIGURE IV-2 PRINCIPE DE LA PLAQUE TENSIOMETRIQUE A L'AIDE D'UNE POMME A VIDE (DELAGE & CUI, 2000).....	158
FIGURE IV-3 CELLULE DE RICHARDS POUR LE CONTROLE DE SUCCION PAR TRANSLATION D'AXE (DELAGE & CUI, 2000).....	158
FIGURE IV-4 TECHNIQUE OSMOTIQUE : RELATION ENTRE SUCCION ET CONCENTRATION DE PEG (DELAGE & CUI, 2000).....	159
FIGURE IV-5 MISE EN ŒUVRE DE LA TECHNIQUE OSMOTIQUE (DELAGE & CUI, 2000)	160
FIGURE IV-6 COURBE D'ETALONNAGE DU POLYETHYLENE-GLYCOL 20000 ET SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE CELLULE OSMOTIQUE (INDARTO, 1991).	160
FIGURE IV-7 CONTROLE DE SUCCION PAR PHASE VAPEUR, A L'AIDE D'UN DESSICCATEUR ET D'UNE SOLUTION SALINE SATUREE (DELAGE & CUI, 2000).....	161
FIGURE IV-8 REPRESENTATION DES CHEMINS DE DRAINAGE DES MATERIAUX SATURES SUR LE DIAGRAMME DE COMPRESSIBILITE DEDUIT DES CORRELATIONS EN FONCTION DE LA LIMITE DE LIQUIDITE. (FLEUREAU & KHEIRBEK-SAOUD, 2002).....	163
FIGURE IV-9 VARIATION D'INDICE DES VIDES e_L - e_{sL} EN FONCTION DE LIMITE DE LIQUIDITE w_L PAR FLEUREAU (FLEUREAU, 2011), CITE PAR LI (LI, 2015).....	163

FIGURE IV-10 LA BAGUE UTILISEE POUR L'ESSAI SUR LA PATE.....	165
FIGURE IV-11 PRINCIPE DE SATURATION DE L'EPROUVETTE DANS LA CELLULE ŒDOMETRIQUE	166
FIGURE IV-12 DISPOSITIF EXPERIMENTAL D'ESSAI DE PLAQUE TENSIONOMETRIQUE	167
FIGURE IV-13 POSITIONS DES POINTS DE MESURE DES VARIATIONS DE HAUTEUR DE L'ECHANTILLON	168
FIGURE IV-14 DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE L'ESSAI OSMOTIQUE A L'ENTPE	169
FIGURE IV-15 PROBLEMES BACTERIENS DANS LA SOLUTION PEG.....	170
FIGURE IV-16 PRINCIPE DU CONTROLE DE LA SUCCION DANS UN ECHANTILLON DE SOL A L'AIDE DE LA METHODE PAR ECHANGE DE PHASE VAPEUR (FLEUREAU & KHEIRBEK-SAOUD, 2002)	171
FIGURE IV-17 ESSAI DRAINAGE SUR LA PATE : VARIATION DE LA MASSE D'EAU CONTENUE DANS LES ECHANTILLONS AU COURS DU TEMPS	172
FIGURE IV-18 ESSAI D'IMBIBITION SUR LA PATE : VARIATION DE LA MASSE D'EAU CONTENUE DANS LES ECHANTILLONS AU COURS DU TEMPS	173
FIGURE IV-19 ESSAIS DE DRAINAGE DU SABLE LIMONEUX LIVET-GAVET PASSANT A 2 MM A ETAT DE PATE : EVOLUTION DE L'INDICE DES VIDES EN FONCTION DE LA SUCCION.	176
FIGURE IV-20 COMPORTEMENT DU SABLE LIMONEUX LIVET-GAVET PREPARE A L'ETAT DE PATE($w=w_l$) SUR CHEMIN DE DRAINAGE-IMBIBITION	178
FIGURE IV-21 COMPORTEMENT DU SABLE LIMONEUX LIVET-GAVET PASSANT A 2 MM, COMPACTE A 25 COUPS/COUCHE, DE L'ESSAI DE DRAINAGE-IMBIBITION : EVOLUTION DE L'INDICE DES VIDES EN FONCTION DE SUCCION.....	179
FIGURE IV-22 COMPORTEMENT DU SABLE LIMONEUX LIVET-GAVET, COMPACTE A 25 COUPS/COUCHE A $w_{op25} = 11.8\%$, LORS DE L'ESSAI DE DRAINAGE-HUMIDIFICATION.	181
FIGURE IV-23 COMPORTEMENT DU SABLE LIMONEUX LIVET-GAVET COMPACTE A 55 COUPS/COUCHE A w_{opn} LORS DE L'ESSAI DE DRAINAGE-HUMIDIFICATION	183
FIGURE IV-24 COMPORTEMENT DU SABLE LIMONEUX LIVET-GAVET, COMPACTE A 85 COUPS/COUCHE A w_{op85}, LORS DE L'ESSAI DE DRAINAGE-HUMIDIFICATION	184
FIGURE IV-25 EVOLUTION DE L'INDICE DES VIDES EN FONCTION DE LA SUCCION POUR LES ESSAIS DE DRAINAGE SUR SABLE LIMONEUX DE GAVET.....	186
FIGURE IV-26 EVOLUTION DE L'INDICE DES VIDES EN FONCTION DE LA SUCCION POUR LES ESSAIS D'IMBIBITION SUR SABLE LIMONEUX DE GAVET.....	186
FIGURE IV-27 EVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU EN FONCTION DE LA SUCCION LORS DES ESSAIS D'IMBIBITION SUR SABLE LIMONEUX DE GAVET (ETAT DE PATE ET ETAT COMPACTE)	187
FIGURE IV-28 COMPARAISON DES COURBES DE RETENTION OBTENUES SUR CHEMINS DE DRAINAGE – HUMIDIFICATION POUR LE SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE SOUS DIFFERENTES ENERGIES	188
FIGURE IV-29 COURBES DE DRAINAGE OBTENUES SUR LE SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A DIFFERENTS NIVEAUX D'ENERGIE.	188
FIGURE IV-30 SUCCION D'ENTREE D'AIR EN FONCTION DE L'ENERGIE DE COMPACTAGE	190
FIGURE IV-31 PENTE DE DRAINAGE EN FONCTION DE LA SUCCION D'ENTREE D'AIR	191
FIGURE IV-32 RESULTAT DES ESSAIS D'IMBIBITION SUR LE SABLE LIMONEUX LIVET-GAVET COMPACTE.....	191
FIGURE IV-33 Δs_r ET Δw D'HYSTERESIS A SUCCION CONSTANTE POUR LES MATERIAUX COMPACTES A L'OPTIMUM PROCTOR A 3 ENERGIES DE COMPACTAGE (25, 55 ET 85 COUPS PAR COUCHE)	193
FIGURE IV-34 COMPARAISON DES VALEURS D'HYSTERESIS DE SATURATION (Δs_r) ET DE TENEUR EN EAU (Δw) MESUREES A SUCCION CONSTANTE POUR LES MATERIAUX COMPACTES A L'OPTIMUM PROCTOR A 3 ENERGIES DE COMPACTAGE (25, 55 ET 85 COUPS PAR COUCHE))	194
FIGURE IV-35 PRINCIPE D'ESSAI POROSIMETRIQUE AU MERCURE (PATI, 2010).....	197
FIGURE IV-36 PRINCIPE DE L'ESSAI DE POROSIMETRIE AU MERCURE	198
FIGURE IV-37 PRINCIPE DE PREPARATION DES ECHANTILLONS TESTES AU POROSIMETRE MERCURE	199
FIGURE IV-38 EVOLUTION DES VOLUMES INCREMENTAUX DE MERCURE INJECTE EN FONCTION DU DIAMETRE DES PORES (CAS DU SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 25 COUPS/COUCHE).....	201
FIGURE IV-39 EVOLUTION DES VOLUMES INCREMENTAUX DE MERCURE INJECTES EN FONCTION DU DIAMETRE DES PORES (CAS DU SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 55 COUPS/COUCHE).....	202

FIGURE IV-40 EVOLUTION DES VOLUMES INCREMENTAUX DE MERCURE INJECTES EN FONCTION DU DIAMETRE DES PORES (CAS DU SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 85 COUPS/COUCHE).....	203
FIGURE IV-41 EVOLUTION DES VOLUMES INCREMENTAUX DE MERCURE INJECTES EN FONCTION DU DIAMETRE DES PORES (CAS DU SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE, $w \sim 11\%$).....	206
FIGURE IV-42 EVOLUTION DES VOLUMES INCREMENTAUX DE MERCURE INJECTES EN FONCTION DU DIAMETRE DES PORES (CAS DU SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE, $w \sim 12\%$).....	207
FIGURE IV-43 : EVOLUTION DU VOLUME CUMULE DE MERCURE AU COURS DES PHASES D'INTRUSION ET D'EXTRUSION EN FONCTION DU DIAMETRE DE PORES (CAS DU SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 25 COUPS/COUCHE ET TENEUR EN EAU INITIALE VARIABLE).....	207
FIGURE IV-44 : EVOLUTION DU VOLUME CUMULE DE MERCURE AU COURS DES PHASES D'INTRUSION ET D'EXTRUSION EN FONCTION DU DIAMETRE DE PORES (CAS DU SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 55 COUPS/COUCHE ET TENEUR EN EAU INITIALE VARIABLE).....	208
FIGURE IV-45 : EVOLUTION DU VOLUME CUMULE DE MERCURE AU COURS DES PHASES D'INTRUSION ET D'EXTRUSION EN FONCTION DU DIAMETRE DE PORES (CAS DU SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 85 COUPS/COUCHE ET TENEUR EN EAU INITIALE VARIABLE).....	208
FIGURE IV-46 DEFINITION DES ZONES CARACTERISTIQUES DE LA COURBE DE RETENTION (VANAPALLI, ET AL., 1999).....	210
FIGURE IV-47 COURBES DE DRAINAGE OBTENUES SUR LE SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A DIFFERENTS NIVEAUX D'ENERGIE.	211
FIGURE IV-48 EVOLUTION DES VOLUMES INCREMENTAUX DE MERCURE INJECTES EN FONCTION DU DIAMETRE DES PORES POUR DES ECHANTILLONS PREPARES A w_{op} ET COMPACTES SOUS DIFFERENTS NIVEAU D'ENERGIE (CAS DU SABLE LIMONEUX DE GAVET).....	211
FIGURE IV-49 RESULTATS DES ESSAIS DE DRAINAGE ET ESSAIS POROSIMETRIQUES AU MERCURE SUR LE SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 25 COUPS/COUCHE ET A TENEUR EN EAU DE 12.1 ET 13.2 %.....	213
FIGURE IV-50 RESULTATS DES ESSAIS DE DRAINAGE ET ESSAIS POROSIMETRIQUES AU MERCURE SUR LE SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 55 COUPS/COUCHE ET A TENEUR EN EAU DE 12.8 %.....	214
FIGURE IV-51 RESULTATS DES ESSAIS DE DRAINAGE ET ESSAIS POROSIMETRIQUES AU MERCURE SUR LE SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 85 COUPS/COUCHE ET A DEUX TENEURS EN EAU (COTE SEC ET COTE HUMIDE DE L'OPTIMUM).	215
FIGURE IV-52 VOLUME D'INTRUSION CUMULE DE MERCURE EN FONCTION DE DIAMETRE DES PORES	217
FIGURE IV-53 COURBES DE RETENTION DEDUITES DES MESURES EXPERIMENTALES DE SUCCION ET COURBES DE RETENTION CALCULEES A PARTIR DES VOLUMES CUMULES DE MERCURE INJECTES (CAS DU SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 25 COUPS/ COUCHE ET A DEUX TENEURS EN EAU DIFFERENTES)	218
FIGURE IV-54 COURBES DE RETENTION DEDUITES DES MESURES EXPERIMENTALES DE SUCCION ET COURBES DE RETENTION CALCULEES A PARTIR DES VOLUMES CUMULES DE MERCURE INJECTES (CAS DU SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 55 COUPS/ COUCHE ET A UNE TENEUR EN EAU).....	218
FIGURE IV-55 COURBES DE RETENTION DEDUITES DES MESURES EXPERIMENTALES DE SUCCION ET COURBES DE RETENTION CALCULEES A PARTIR DES VOLUMES CUMULES DE MERCURE INJECTES (CAS DU SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 85 COUPS/ COUCHE ET A DEUX TENEURS EN EAU DIFFERENTES).....	219

Liste des tableaux

TABLEAU II-1 : COEFFICIENTS CARACTERISTIQUES DES COURBES GRANULOMETRIQUES DU MATERIAU GAVET.	63
TABLEAU II-2 RESULTATS DES ESSAIS DE MESURE DE LA MASSE VOLUMIQUE DES GRAINS DU MATERIAU GAVET.....	64
TABLEAU II-3 RESULTATS DES ESSAIS DE MESURE DE LIMITE DE LIQUIDITE DU MATERIAU GAVET.....	65
TABLEAU II-4 RESULTATS DES ESSAIS DE MESURE DE LIMITE DE PLASTICITE DU MATERIAU GAVET.	65
TABLEAU II-5 RESULTATS DES ESSAIS AU BLEU DE METHYLENE SUR LE MATERIAU GAVET.....	66
TABLEAU II-6 RESULTATS DES ESSAIS PROCTOR NORMAL SUR LE SABLE LIMONEUX DE GAVET.....	70
TABLEAU II-7 MASSE VOLUMIQUE AVANT ESSAI DES ECHANTILLONS DE SABLE LIMONEUX DE GAVET SOUMIS AUX ESSAIS TRIAXIAUX.	86
TABLEAU II-8 CARACTERISTIQUES DES ESSAIS TRIAXIAUX REALISES SUR LE SABLE LIMONEUX DE GAVET PRIS DANS UN ETAT INITIAL SATURE.....	87
TABLEAU II-9 PARAMETRES MECANIQUES OBTENUS LORS DES ESSAIS DE CONSOLIDATION REALISES SUR LE SABLE LIMONEUX DE GAVET PREPARES SELON DEUX MODES DE FABRICATION DIFFERENTS (SOUS COMPACTION A SEC ET COMPACTAGE HUMIDE)	90
TABLEAU II-10 PARAMETRES DEDUITS DES ESSAIS TRIAXIAUX CIU REALISES SUR SABLE LIMONEUX DE GAVET SOUS COMPACTE A SEC.	93
TABLEAU II-11 PARAMETRES DEDUITS DES ESSAIS TRIAXIAUX CID REALISES SUR SABLE LIMONEUX DE GAVET SOUS COMPACTE A SEC	97
TABLEAU II-12 PARAMETRES DEDUITS DES ESSAIS TRIAXIAUX CIU REALISES SUR SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 25 COUPS	104
TABLEAU II-13 PARAMETRES DEDUITS DES ESSAIS TRIAXIAUX CID REALISES SUR SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE A 25 COUPS A W _{OPN} PUIS SATURES	106
TABLEAU II-14 PARAMETRES DEDUITS DES ESSAIS ŒDOMETRIQUES ET TRIAXIAUX DE REFERENCE REALISES SUR LE SABLE LIMONEUX DE GAVET SATURE.....	115
TABLEAU III-1 : DIMENSIONS DE MOULE PROCTOR ET MOULE CBR.....	118
TABLEAU III-2 : CARACTERISTIQUES DES ESSAIS DE COMPACTAGE PROCTOR	118
TABLEAU III-3 : PROGRAMME EXPERIMENTAL DES ESSAIS DE PROCTOR NORMAL ET MODIFIE	122
TABLEAU III-4 : RESULTATS DES ESSAIS PROCTOR NORMAL ET MODIFIE.....	126
TABLEAU III-5 : CARACTERISTIQUES DES ECHANTILLONS UTILISES POUR LA MESURE DE L' IPI.....	139
TABLEAU III-6 : RECAPITULATIF DES RESULTATS D'ESSAIS DE POINÇONNEMENT IPI.....	142
TABLEAU III-7 : CLASSIFICATION DU SABLE LIMONEUX GAVET EN FONCTION DE SON ETAT HYDRIQUE (SELON CLASSIFICATION GTR)	143
TABLEAU III-8 : ECHELLE DE CONSISTANCE DU SOL EN FONCTION DE SA RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE (TERZAGHI & PECK, 1967).....	144
TABLEAU III-9 : TABLEAU RECAPITULATIF DES ESSAIS DE COMPRESSION SIMPLE SUR SABLE LIMONEUX LIVET-GAVET A DENSITE SECHE CONSTANTE, TENEUR EN EAU VARIABLE.	152
TABLEAU III-10 : RECAPITULATIF DES GRANDEURS MESUREES LORS DES ESSAIS DE COMPACTAGE DU SABLE LIMONEUX DE GAVET... ..	154
TABLEAU IV-1 RELATION HUMIDITE RELATIVE-SUCCION-NATURE DU SEL (EN SOLUTION AQUEUSE SATUREE) (DELAGE & CUI, 2000)	161
TABLEAU IV-2 TENEURS EN EAU DE PREPARATION ET ENERGIES DE COMPACTAGE DES ECHANTILLONS DE SABLE LIMONEUX DE GAVET SOUMIS A L'ESSAI DE RETENTION D'EAU.....	166
TABLEAU IV-3 CARACTERISTIQUES DES ESSAIS DE RETENTION D'EAU REALISES SUR LE SABLE LIMONEUX DE GAVET.....	174
TABLEAU IV-4 VARIATION D'INDICE DES VIDES MESUREE EXPERIMENTALEMENT ET DONNEE PAR LA CORRELATION DE FLEUREAU (2011)	176
TABLEAU IV-5 : TABLEAU RECAPITULATIF DES ESSAIS DE DRAINAGE-IMBIBITION REALISES SUR LE SABLE LIMONEUX DE GAVET PREPARE A DIFFERENTES ENERGIES DE COMPACTAGE	192
TABLEAU IV-6 CARACTERISTIQUES DE FABRICATION DES DIFFERENTS ECHANTILLONS DE SABLE LIMONEUX DE GAVET TESTES AU POROSIMETRE MERCURE.	198
TABLEAU IV-7 TABLEAU DE RECAPITULATION DES ESSAIS POROSIMETRIQUES AU MERCURE SUR SABLE LIMONEUX LIVET-GAVET A DIFFERENTES ENERGIES DE COMPACTAGE	203
TABLEAU IV-8 : VOLUME PORAL INJECTE PAR LE MERCURE POUR CHAQUE ENERGIE DE COMPACTAGE ET DIFFERENTES TENEURS EN EAU (CAS DU SABLE LIMONEUX DE GAVET COMPACTE).	209

TABLEAU IV-9 COMPARAISON LES SUCCIONS D'ENTREE D'AIR OBTENUES PAR ESSAIS DE RETENTION D'EAU ET PAR POROSIMETRIE AU MERCURE..... 216

Remerciements

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été réalisés au Laboratoire de Tribologie et de Dynamique des Systèmes (LTDS) de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE). J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire :

Je tiens à remercier tout d'abord mes Directeurs de thèse, Monsieur Denis BRANQUE et Monsieur Thiep DO ANH, qui m'ont accueilli très chaleureusement et qui m'ont dirigé, surveillé, encouragé pendant ces quatre années. Ils m'ont guidé dans mon travail, toujours en me montrant la voie la plus simple pour arriver à comprendre des phénomènes complexes. Leur enthousiasme, leur expérience et leurs connaissances m'ont aidée non seulement à compléter mes travaux, mais aussi savoir comment être un bon expérimentateur en travaillant de manière scientifique et efficace.

J'adresse mes remerciements aux personnes qui ont accepté de participer au jury :

Je remercie Madame DJERAN MAIGRE d'avoir accepté de présider le jury

Je remercie Madame SOULI et Monsieur TAIBI pour avoir rapporté mon mémoire

Je remercie Messieurs BOUTONNIER et COMBE qui ont bien voulu accepter de participer au jury

Je remercie Monsieur Henry WONG et Monsieur Antonin FABBRI, lors des réunions de l'équipe, ils m'ont donné des idées et des commentaires importants du point de vue théorique pour mieux analyser mes essais et mieux organiser la procédure expérimentale.

J'adresse mes remerciements à toute l'équipe technique du LTDS de l'ENTPE: Monsieur Frédéric SALLET, Monsieur Stéphane COINTET, Madame Laureen GIRAUD pour la qualité de l'assistance technique qu'ils m'ont apportée.

Je remercie M. Joachim BLANC-GONNET qui m'a aidé à résoudre les problèmes techniques et programmer le logiciel pour le système odométrique.

Enfin, j'exprime aussi mes remerciements à tous les membres du laboratoire : mes amis, mes collègues, les doctorants du LTDS qui ont contribué au maintien d'une bonne ambiance de travail par leur bonne humeur et leur sympathie.

Introduction générale

Les sols partiellement saturés sont des milieux poreux multiphasiques pour lesquels coexistent une phase liquide, une phase gazeuse constituée d'air et de vapeur d'eau ainsi qu'une matrice solide contrairement aux sols entièrement saturés dont les pores entre les grains solides sont entièrement remplis d'eau.

De nombreux géo-matériaux ne sont pas saturés en eau. Ainsi les sols soumis à des cycles de drainage et d'humidification sont caractérisés par ce type de structure. Ce sont par exemple les sols de sub-surface soumis à des périodes de sécheresse et de pluies ou les sols situés en périphérie de nappes phréatiques pour lesquels le degré de saturation varie par exemple selon les conditions climatiques ou la hauteur de la nappe. Les sols ouvragés et les géo-matériaux de construction peuvent également présenter une saturation hydrique partielle. Ainsi le compactage artificiel des sols s'effectue généralement sur des matériaux partiellement saturés dans lesquels l'eau est utilisée pour améliorer le taux de compaction. Au-delà, les barrages en terre ou digues, les sols de fondation, les remblais et talus routiers connaissent des variations hydriques qui peuvent affecter leur stabilité ou celle des infrastructures qu'ils supportent. Des catastrophes naturelles et des dommages géotechniques tels que les ruptures de pente, le retrait ou le gonflement des sols entraînant des tassements différentiels peuvent être dus aux changements de comportement des sols en raison d'une modification de l'état hydrique. Ces désordres ont des conséquences sur les activités humaines : instabilités des constructions, dommages sur les réseaux de transports,

Les principes de dimensionnement des ouvrages géotechniques en présence d'eau considèrent dans le cadre d'une approche classique l'hypothèse de saturation totale des sols. Ainsi sur la base du principe de Terzaghi, les déformations du sol sont supposées être entièrement pilotées par la contrainte effective, définie comme la différence entre la contrainte totale et la pression du liquide interstitiel. Cette approche permet de transposer facilement les modèles de comportement des sols secs au comportement des sols entièrement saturés. Cette transposition n'est plus possible dans le cas de sols partiellement saturés où l'existence de trois interfaces de natures différentes dans le matériau (solide/liquide, solide/gaz et liquide/gaz) conduit à la présence de phénomènes capillaires et de forces d'attraction entre les particules solides du sol qui vont influencer le comportement en contraintes/déformations du matériau à l'échelle macroscopique.

Le comportement d'un sol partiellement saturé est généralement très différent de celui d'un sol saturé. Ainsi par exemple, la variation de teneur en eau d'un sol partiellement saturé peut conduire soit à un effondrement, soit à un gonflement de ce sol. Pour caractériser le comportement hydromécanique des sols partiellement saturés à l'échelle macroscopique, il est alors indispensable de comprendre les phénomènes physiques se produisant à l'échelle des grains. Depuis trente ans, plusieurs écoles ont mené des travaux sur le comportement des sols partiellement saturés parmi lesquels Wheeler (Wheeler 1988), Alonso et Gens (Alonso et al.,

1987), Fredlund et Rahardjo (Fredlund et al. 1995), Cui et Delage (Cui et al. 1996), Fleureau et al (Fleureau et al. 2002). Dans ce domaine, le laboratoire LTDS (Laboratoire Tribologie et Dynamique des Systèmes) de l'ENTPE a développé des travaux de recherche sur le matériau terre à partir des années 90. Ces études se sont poursuivies par les thèses de Pereira (2005), Morvan (2012), Lai (2016) durant lesquelles des modèles rhéologiques descriptifs du comportement hydromécanique complexes des sols partiellement saturés ont été développés.

Cette présente thèse, à forte composante expérimentale, s'inscrit dans la continuité de ces travaux. Elle a été réalisée dans le cadre du projet ANR TerreDurable (TERRassements, économiques, Ecologiques et DURABLEs) (programme Bâtiments et Villes Durables, convention ANR 2011 VILD 004 01), débuté en septembre 2012 et achevé en décembre 2016.

Ce projet avait pour objectif de :

- Caractériser le comportement hydromécanique des ouvrages en terre (remblais, digues, barrages) non traités, partiellement saturés, lors des phases de construction (compactage en particulier) et d'exploitation (stabilité de l'ouvrage),
- Optimiser la conception et la fiabilité de ces ouvrages vis-à-vis de phénomènes comme la rupture par glissements, les tassements, les gonflements, tout en favorisant le réemploi de matériaux à l'état naturel,
- Proposer de nouvelles méthodologies pour le dimensionnement des ouvrages neufs et la réparation des ouvrages existants (désordres liés aux chargements hydromécaniques).

Dans le cadre de ce projet ANR, plusieurs campagnes expérimentales ont été réalisées par différents partenaires sur quatre types de sols : deux marnes provenant du chantier de l'autoroute A304 (Charleville Mézières, 08), un sable limoneux provenant du barrage de Livet - Gavet (Isère, 38) et une argile plastique provenant du chantier de la LGV SEA.

Dans ce contexte, le laboratoire LTDS de l'ENTPE a été chargé de la caractérisation expérimentale du sable limoneux provenant du barrage de Livet – Gavet. Les autres matériaux ont été étudiés par les autres partenaires du projet : LOMC (Laboratoire Ondes et Milieux Complexes) de l'Université du Havre et Lab MSSMat (Laboratoire de Mécanique des Sols, Structures et Matériaux) de CentraleSupélec. Les objectifs de cette présente thèse sont :

- Caractériser au travers d'essais de laboratoire le comportement hydromécanique d'un sable fin limoneux (sol A1 dans la classification GTR) en fonction de son état de saturation. Lors de cette étude, un accent particulier est porté à la caractérisation de ce comportement dans le domaine proche de la saturation.
- Interpréter le comportement hydrique du matériau sur chemin de drainage – imbibition en relation avec l'analyse de sa microstructure,
- Fournir d'un point de vue général une base de données et d'analyses exhaustive permettant le développement et la calibration de modèles de comportement des sols fins proches de la saturation, en particulier en considérant des chemins de chargement hydromécanique complexes.

Pour l'ensemble de cette étude, le matériau sera considéré sous différents états : soit à l'état de pâte préparée à une teneur en eau proche de la limite de liquidité, soit sous forme compactée à différentes énergies de compactage et différentes teneurs en eau initiales.

Cette thèse est présentée en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est une étude bibliographique non exhaustive du comportement des sols non saturés sous sollicitations hydriques et mécaniques dans laquelle sont évoquées l'influence du paramètre d'état « succion » mais aussi l'influence de paramètres de fabrication comme l'énergie de compactage ou la teneur en eau de fabrication sur le comportement hydromécanique des sols partiellement saturés.
- Le second chapitre est consacré aux essais d'identification du sol étudié (le sable limoneux de Gavet) ainsi qu'à la caractérisation mécanique de ce matériau à l'état saturé au travers d'essais appelés « essais de référence », qui comprennent des essais de chargement œdométrique et des essais triaxiaux de révolution consolidés isotropes drainés (CID) et consolidés isotropes non drainés (CIU).
- Le troisième chapitre présente l'étude du comportement au compactage du sable limoneux. Une importante campagne d'essais de compactage Proctor a été réalisée en considérant différents niveaux d'énergie de compactage. En parallèle, l'état hydrique des échantillons compactés et leur résistance mécanique ont été caractérisés au travers de mesures de succion, de mesures d'Indice de Portance Immédiat et de mesure de résistance à la compression simple. Une analyse croisée de ces différents essais est proposée.
- Le quatrième et dernier chapitre est consacré à la caractérisation des propriétés de rétention d'eau du sable limoneux. Pour cela, le matériau étudié a été soumis à des cycles de drainage – imbibition à partir d'état initiaux différents situés le long de la courbe de compactage Proctor. L'analyse de ces essais de rétention est menée à la lumière des résultats d'essais de porosimétrie par injection de mercure réalisés en parallèle. Ainsi l'influence de la microstructure du matériau sur les propriétés de rétention d'eau du matériau est analysée.
- En annexe de ce rapport de thèse, une cellule œdométrique à membrane développée au cours de cette thèse, et destinée à étudier l'évolution de la pression de pore dans le cas du chargement œdométrique de matériaux quasi-saturés, est présentée. Les résultats des premiers essais de validation sont également décrits.

Chapitre I : Propriétés des sols partiellement saturés

I.1 Succion dans les sols partiellement saturés

Les sols partiellement saturés sont des milieux multiphasiques constitués d'eau, d'une phase gazeuse composée d'air et de vapeur d'eau ainsi que des particules solides. Dans ce chapitre consacré à une revue bibliographique, nous présentons dans un premier temps les phénomènes physiques à l'échelle microscopique résultant de l'existence de ces trois phases distinctes qui sont à l'origine d'un comportement hydromécanique macroscopique complexe.

I.1.1 Les phénomènes capillaires

Au sein d'un fluide, les molécules sont toujours influencées par les forces moléculaires des molécules qui les entourent. Lorsque ces molécules se trouvent à l'intérieur d'un même environnement, elles sont entourées par les mêmes molécules. La résultante des forces moléculaires à laquelle elles sont alors soumises est nulle pour des raisons de symétrie (Figure I-1b). En revanche, à l'interface entre deux phases fluides de natures différentes, les molécules ne subissent pas les mêmes actions de part et d'autre des deux milieux considérés. Ainsi les molécules d'eau à l'interface entre une phase gazeuse et une phase liquide subissent des actions dont la résultante est non nulle et orientée vers la phase liquide (Figure I-1a). Une molécule d'eau à l'interface eau-air sera donc attirée par la masse d'eau. La surface de l'eau est alors soumise à une force qui lui est perpendiculaire, ce qui donne lieu pour des raisons d'équilibre à l'apparition d'une tension de surface σ_s (Figure I-1a).

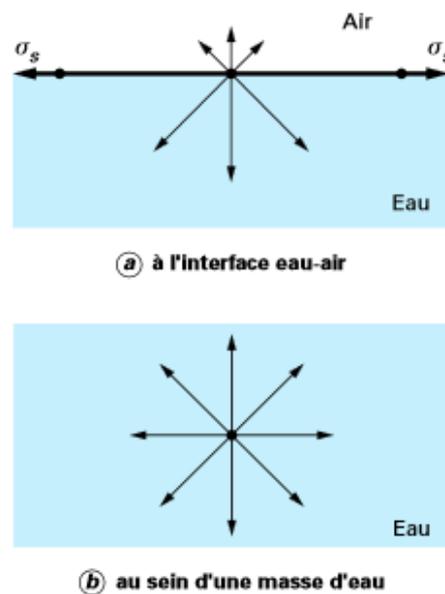


Figure I-1 : Illustration des forces à l'interface eau-air (DELAGÉ & CUI, 2000)

Dans le cas de l'interface eau-air, ce phénomène de tension de surface peut être illustré par la remontée de l'eau dans un capillaire et l'existence d'un ménisque courbe au niveau de l'interface entre l'air et l'eau (Figure I-2). La pression de l'air et la pression de l'eau au niveau de l'interface entre l'air et l'eau au sommet du capillaire sont alors différentes. La loi de Jurin donne la différence entre la pression de l'air (u_a) et la pression de l'eau (u_w) dans le capillaire cylindrique :

$$u_a - u_w = \frac{2 \cdot \sigma_s \cdot \cos\theta}{r}$$

Où : u_a est la pression de l'air, u_w est la pression de l'eau, σ_s est la tension de surface et θ l'angle de raccordement entre les directions des deux ménisques.

Pour l'eau à 20° C, σ_s prend la valeur suivante : $\sigma_s = 72.75 \cdot 10^{-3}$ N/m.

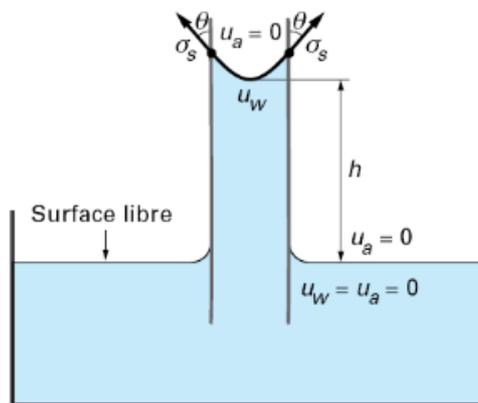


Figure I-2 : Illustration du phénomène de remontée capillaire dans un tube
(DELAGE & CUI, 2000)

Lors de la désaturation d'un sol, ces mêmes phénomènes capillaires apparaissent au sein du réseau poral du matériau (**Figure I-3**). Ainsi pour les raisons évoquées précédemment, des ménisques capillaires se forment aux interfaces entre la phase gazeuse et l'eau en contact avec les grains. Il est à noter que l'eau de rétention capillaire peut être évaporée en revanche les forces exercées par la pesanteur sont trop faibles devant les forces de tension capillaire pour la percoler.

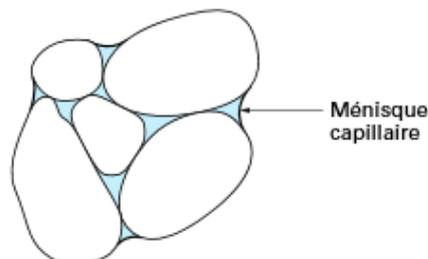


Figure I-3 : Représentation schématique d'un sol granulaire non saturé
(DELAGE & CUI, 2000)

La Figure I-4 illustre le processus de désaturation d'un sol. Au cours de la désaturation (drainage), la différence entre la pression d'air et la pression d'eau dans le réseau poral augmente et les ménisques capillaires tendent à se creuser (rayons de courbure qui diminuent). La différence entre la pression de l'air et la pression de l'eau est appelée succion (aussi appelée pression capillaire).

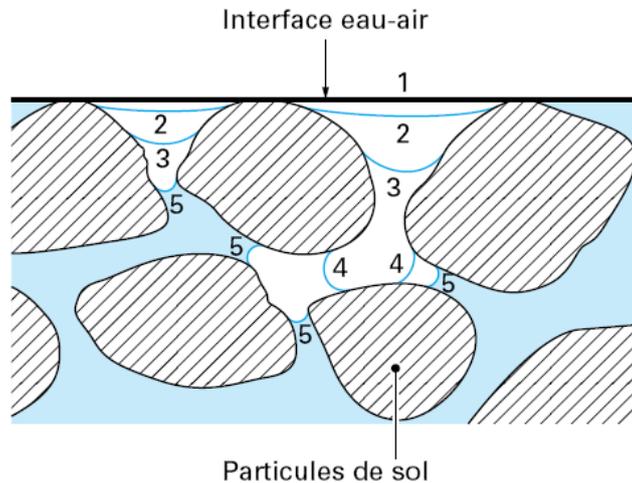


Figure I-4 : Illustration de la pénétration de l'air dans un sol granulaire, d'après Childs (1969) cité par (DELAGE & CUI, 2000)

Plusieurs auteurs ont étudié d'un point de vue théorique l'influence des phénomènes capillaires dans les milieux granulaires à partir d'approche à l'échelle des grains. Un modèle classique pour étudier l'effet de la désaturation dans les sols granulaires est par exemple de considérer le sol comme un arrangement de particules sphériques de même diamètre (TAIBI, 1994). Dans ce cas, la loi de Laplace entre deux sphères (Figure I-5) permet de calculer la succion:

$$u_a - u_w = \sigma_s \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l} \right)$$

Où σ_s est la tension de surface, r et l sont deux paramètres géométriques qui permettent de déterminer la forme du ménisque.

Pendant la désaturation du sol, le volume d'eau liant deux particules solides tend à diminuer ; ce qui entraîne une réduction des rayons de courbure (r) des ménisques (pour des raisons géométriques, il est à noter que r diminue plus vite que l). Sur la base du modèle décrit précédemment, il apparaît qu'une désaturation du sol entraîne nécessairement une augmentation de la succion. Dans le même temps, l'existence de ménisques capillaires entre les grains solides suppose que ceux-ci sont soumis à des forces de traction inter-granulaires qui ont tendance à lier les particules entre elles et qui sont en mesure d'influencer le comportement macroscopique des sols non saturés.

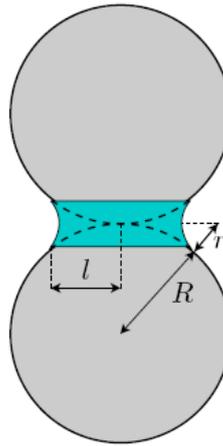
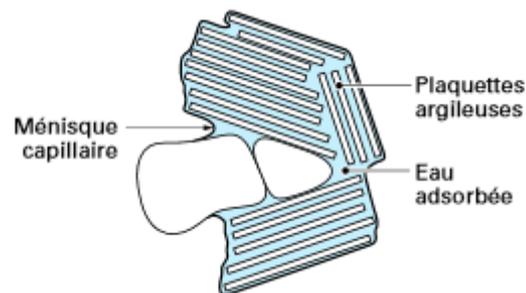


Figure I-5 : Ménisques capillaires dans le cas de grains sphériques de même diamètre

I.1.2 L'eau adsorbée

Les phénomènes capillaires décrits précédemment ne peuvent expliquer à eux seuls les valeurs très élevées de succion couramment rencontrées dans le cas des sols fins, en particulier pour les sols argileux. Ces fortes pressions sont en réalité dues à la présence d'eau adsorbée au contact des particules argileuses. Ainsi il est connu que la structure des argiles est organisée sous forme d'empilements de feuillets entre lesquels les molécules d'eau, attirées par des forces électrochimiques, peuvent venir s'insérer plus ou moins facilement lors du mouillage. La théorie de la double couche a été utilisée par différents auteurs (Van Olphen, Lambe voir dans Delage et Cui) pour décrire les mécanismes microscopiques d'interaction eau – argile. Cette théorie repose sur l'hypothèse que les molécules d'eau adsorbées sont ordonnées par couches successives et possèdent une énergie de liaison avec les feuillets solides qui décroît lorsque la distance par rapport à la surface du feuillet augmente. Cette énergie de liaison influence la pression de l'eau adsorbée. Ainsi lors de la désaturation d'un sol fin constitué de grains et d'agrégats de feuillet argileux, les ménisques capillaires situés aux contacts des particules granulaires auront des rayons de courbure influencés par la pression de l'eau adsorbée entre les feuillets d'argile, d'où les succions plus élevées rencontrées dans les sols fins argileux.



*Figure I-6 : Représentation schématique d'un sol fin non saturé
(DELAGE & CUI, 2000)*

I.1.3 Etats de saturation en terrains naturels

D'un point de vue hydrogéologique, il est possible de distinguer dans les terrains naturels deux zones distinctes généralement superposées : la zone supérieure située au-dessus de la nappe phréatique dans laquelle le sol se trouve dans un état partiellement saturé, la zone inférieure dans laquelle l'eau se trouve à l'état libre.

Dans la zone partiellement saturée, l'eau est présente sous forme capillaire et/ou adsorbée autour des particules solides. Cette présence d'eau au-dessus de la nappe est liée aux forces de tension capillaires et intermoléculaires décrites aux paragraphes précédents (§ I.1.1 et §I.1.2). Du fait de ces forces de tension élevées, l'eau se maintient dans les pores et demeure peu sensible aux forces de gravité. De plus, l'eau capillaire montera d'autant plus haut que les pores sont petits. Dans les vides non saturés en eau, il convient de noter la présence de vapeur d'eau qui tend à se déplacer par diffusion pour satisfaire les conditions d'équilibre.

Au-dessous de la limite supérieure de la nappe phréatique, l'eau sature l'ensemble des vides. Dans cette zone, l'eau est mobile sous l'action des forces de gravité et obéit à la loi de Darcy.

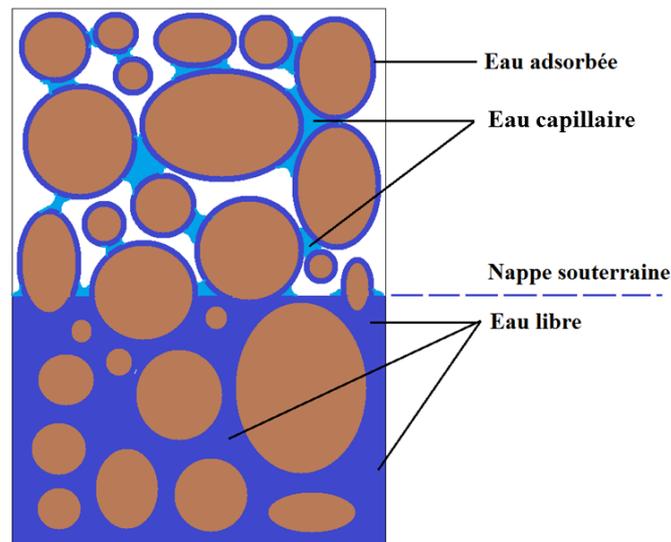


Figure I-7 : Illustration des états de saturation rencontrés dans les sols naturels

I.1.4 . Définition de la succion

La succion est un paramètre d'état qui caractérise l'attraction entre les particules solides et l'eau. A l'image de la charge hydraulique pour les sols saturés, la succion a été définie comme une énergie potentielle qu'il convient de fournir pour déplacer une quantité d'eau retenue par les forces d'attraction capillaires. Plus précisément selon Mitchell (MITCHELL & SOGA, 1976) – cité par Delage et Cui dans (DELAGE & CUI, 2000), ce potentiel est égal à « *la quantité de travail par unité de volume d'eau pure, nécessaire pour transporter de façon réversible, isotherme, à altitude constante et à la pression atmosphérique, une quantité infinitésimale d'eau depuis un état d'eau pure loin du sol à celui d'eau interstitielle dans le sols non saturé* ».

D'un point de vue thermodynamique, la succion totale (s) est définie comme un potentiel (Ψ) tel que :

$$s = -\Psi$$

Ce potentiel peut se décomposer en quatre termes selon Aitchison et al. (1965) cités par Gens (2009) :

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_g + \Psi_m + \Psi_o$$

Avec :

- Ψ_p : le potentiel lié à la pression d'eau,
- Ψ_g : le potentiel gravitaire,
- Ψ_m : le potentiel matriciel,
- Ψ_o : le potentiel lié aux phénomènes osmotiques.

Les potentiels de pression d'eau (Ψ_p) et gravitaire (Ψ_g) sont communs aux sols saturés et ne seront pas développés ici. En revanche, les potentiels matriciel (Ψ_m) et osmotique (Ψ_o) sont propres aux sols partiellement saturés et jouent un rôle important dans leur comportement hydromécanique. Ils sont détaillés ci-après.

1.1.4.a Le potentiel matriciel

Le potentiel matriciel (Ψ_m) est la somme des potentiels de pression capillaire (Ψ_{cap}) et d'adsorption (Ψ_{ads}) :

$$\Psi_m = \Psi_{cap} + \Psi_{ads}$$

Le potentiel matriciel dans un sol non saturé est toujours négatif, la pression de l'eau dans le capillaire (u_w) étant inférieure à la pression atmosphérique de référence (u_a). La succion matricielle (s_m) est définie comme l'opposé du potentiel matriciel. On aura donc :

$$s_m = -\Psi_m = u_a - u_w$$

1.1.4.b Le potentiel osmotique

Le potentiel osmotique traduit la capacité de rétention d'eau par les sels présents sous forme dissoute dans l'eau interstitielle. La succion osmotique (ou pression osmotique) dépend de la concentration de sel dans la solution. Elle est donnée par la relation suivante :

$$s_o = -\frac{\rho_w \cdot R \cdot T \cdot \ln(x_w)}{M_v}$$

Avec : ρ_w : la masse volumique de l'eau (kg/m^3), R : la constante des gaz parfaits ($R = 8.3143 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), T : la température absolue (degrés Kelvin, K), x_w : la fraction molaire d'eau dans la solution, M_v : masse molaire de la vapeur d'eau ($M_v = 18.016 \text{ g.mol}^{-1}$).

Il convient de remarquer que dans les sols fins les phénomènes d'adsorption sont liés à la succion osmotique puisqu'ils sont directement dépendant de la nature et de la concentration des ions présents dans la solution.

1.1.4.c Loi de Kelvin

Sur la base d'un raisonnement thermodynamique, la succion totale (s) peut aussi être exprimée en fonction de la pression partielle de vapeur d'eau dans les pores. Dans ce cas, elle est donnée par la loi de Kelvin :

$$s = -\frac{R \cdot T}{M_w \cdot g} \ln\left(\frac{p_v}{p_{v0}}\right) = -\frac{R \cdot T}{M_w \cdot g} \ln(h_r)$$

Avec : p_v : pression partielle de la vapeur d'eau, p_{v0} : pression de la vapeur d'eau saturante, h_r : l'humidité relative, R : la constante des gaz parfaits, T : la température absolue (degrés Kelvin, K), M_w : la masse molaire de l'eau.

Ainsi la loi de Kelvin montre que la succion s'annule dès lors que l'humidité relative dans les pores du sol atteint 100 %. De même, il convient de retenir que la succion augmente très vite lorsque l'humidité relative devient inférieure à 100 % (**Figure I-8**). Enfin, deux sols différents placés dans la même humidité relative ambiante présenteront des succions identiques.

A noter que si la concentration de sel dans l'eau est faible, la succion osmotique peut être négligée. Dans le cas d'un sol granulaire, il vient alors :

$$s = u_a - u_w = -\frac{R \cdot T}{M_w \cdot g} \ln(h_r)$$

Nous verrons par la suite que cette relation est à la base du principe de la méthode de contrôle de la succion par phase vapeur présentée dans les chapitres suivants.

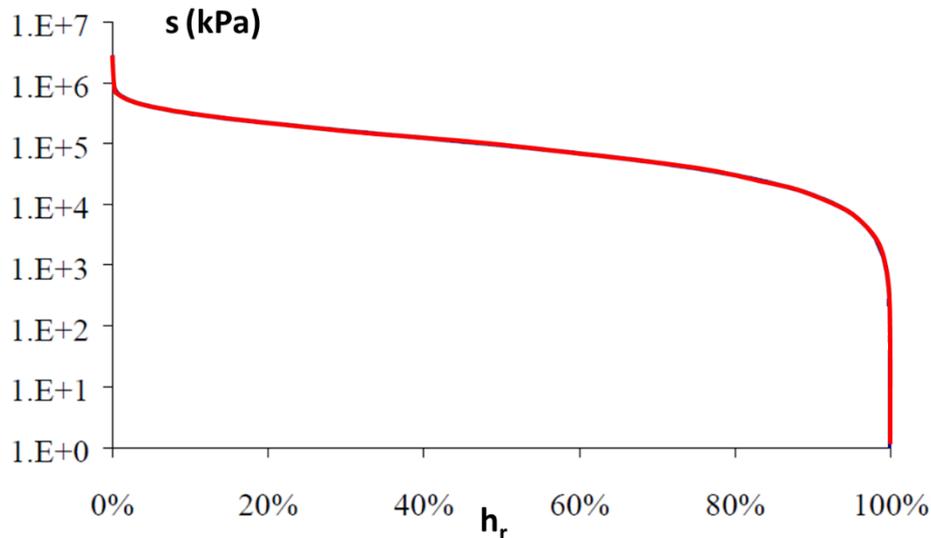


Figure I-8 : Evolution de la succion (s) en fonction de l'humidité relative (h_r) de l'air (à 20°C)

I.2 Caractérisation du comportement des sols sur chemin de drainage-imbibition

Sous l'impact des conditions météorologiques telles que la pluie, la température, l'humidité, la hauteur des nappes d'eau souterraine change fréquemment, affectant l'eau interstitielle présente dans le sol, entraînant des changements de succion. Par conséquent, il y a parfois des cas où le sol est seulement affecté par des changements hydriques alors que les chargements mécaniques externes qu'il subit restent constants.

Les courbes de rétention d'eau sont déterminées expérimentalement par l'essai de rétention sur un échantillon de sol. Cet essai comprend un cycle de drainage-imbibition avec deux phases. La phase de drainage se fait en augmentant progressivement la valeur de succion. Puis à la fin du drainage, la phase d'imbibition est effectuée en diminuant la valeur de succion jusqu'à 0. Sur un cycle, plusieurs points de mesure sont réalisés afin de déterminer la relation entre degré de saturation des échantillons et valeurs de succion correspondantes. Enfin, les résultats de la courbe de rétention sont présentés dans un diagramme "logarithme de la succion en fonction de la teneur en eau, ou degré de saturation".

La figure I-11 est une représentation globale des essais de rétention d'eau réalisés sur l'argile blanc, et proposée par Fleureau (FLEUREAU, et al., 1993) pour mieux observer et analyser les cycles de drainage-humidification en reliant les variations des paramètres différentes tels que : la succion, l'indice des vides, le degré de saturation et la teneur en eau du matériau. Sur cette figure, un phénomène d'hystérésis est observé : le chemin de drainage se trouve au-dessus du chemin d'imbibition dans les plans $(\log(s), S_r)$ ou $(\log(s), w)$. En d'autres termes, pour une succion donnée, la teneur en eau du sol en drainage est toujours supérieure à celle mesurée en imbibition.

Ce comportement non réversible est connu et a été expliqué par différentes auteurs à partir d'une analyse à l'échelle microscopique (DELAGE et CUI, 2000 ; DANGLA, 2001 ; COUSSI, 2005.). Pour cette analyse, les pores sont considérés comme sphériques de diamètre D_1 et reliés par des tubes capillaires de rayon D_2 ($D_2 \ll D_1$). Soient s_1 et s_2 les succions correspondantes aux diamètres respectifs D_1 et D_2 . Selon la loi de Jurin, on aura $s_1 \ll s_2$. La disposition des pores considérée peut être de deux formes : soit les pores sont connectés en parallèle, soit ils sont connectés en série (Figure I-9).

Dans le cas d'une connexion en parallèle (Figure I-9a), l'essai de drainage à partir d'un état saturé est conduit en imposant une succion croissante dans le matériau. A partir de la succion s_1 ($\ll s_2$), les gros pores vont se désaturer alors que les capillaires restent saturés. En revanche sur chemin d'imbibition partant d'un état sec (succion décroissante), l'eau ne pourra pénétrer dans le matériau par les gros pores qu'à partir de la succion s_1 . A ce stade les capillaires ne seront pas encore saturés puisque n'ayant pas été au contact de l'eau. En conséquence pour la succion s_1 donnée, la teneur en eau dans le matériau sera plus forte en drainage qu'en imbibition.

Si l'on considère à présent une connexion en série (Figure I-9b), sur chemin de drainage une partie des gros pores (diamètre D1) ne pourront se désaturer tant que la succion dans le matériau n'aura pas atteint la valeur de la succion de désaturation des capillaires (s_2). Inversement sur chemin d'imbibition, un certain nombre de capillaires ne communiquant qu'avec des pores plus gros ne pourront se saturer que lorsque ces plus gros pores seront eux-mêmes saturés (succion s_1). Là encore pour une succion donnée, la teneur en eau dans le matériau sera plus forte en drainage qu'en imbibition.

A noter que certains auteurs ont aussi avancé l'explication de la différence de valeurs entre angle de drainage et angle de mouillage de l'eau au contact d'un solide pour expliquer l'hystérésis des courbes de rétention d'eau (Figure I-10).

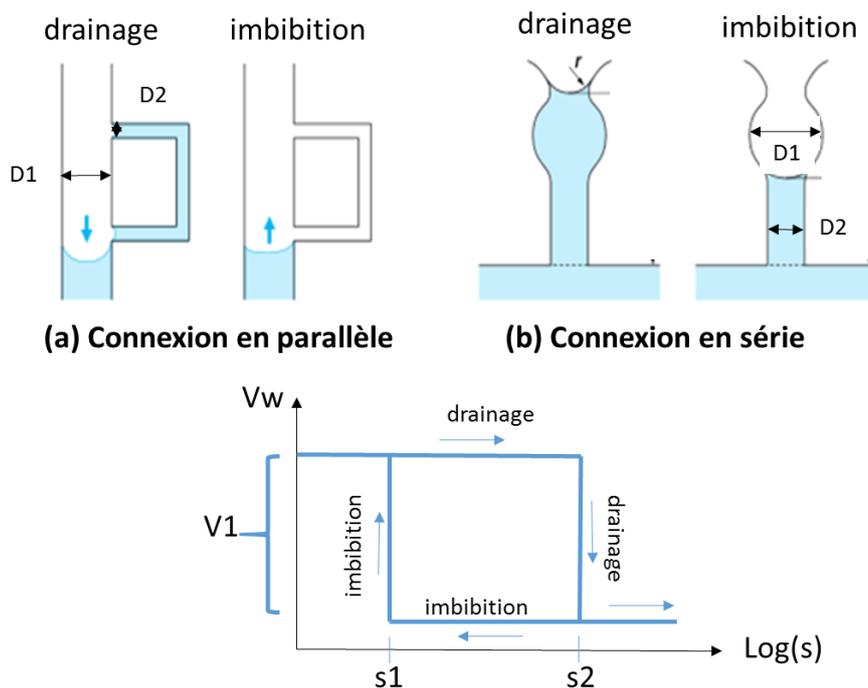


Figure I-9 : Mécanismes invoqués pour l'hystérésis des courbes de rétention d'eau

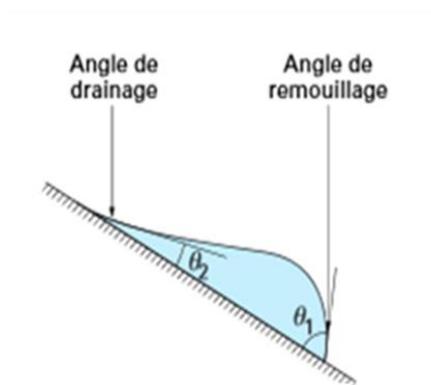


Figure I-10 : Schéma de principe de la différence entre angle de drainage et angle de mouillage (d'après (DELAGE & CUI, 2000))

La Figure I-11 présente le chemin de drainage-imbibition de l'argile blanche tirée des travaux de Fleureau (FLEUREAU, et al., 1993). Les deux courbes de rétention en drainage et en imbibition (Figure I-11d) ont presque la même forme avec un léger décalage. Sur ces deux courbes, l'argile garde un état quasi-saturé avec un fort degré de saturation S_r , quasiment constant, jusqu'à une certaine valeur de succion s_{air} , puis S_r décroît fortement avant d'atteindre une valeur de stabilisation commune pour des succions élevées. Cette succion s_{air} est identifiée comme la succion d'entrée d'air représentant le moment où l'air commence à pénétrer dans le réseau poral de l'échantillon.

Dans le plan semi-logarithmique ($\log(s)$, indice des vides), on s'aperçoit que l'effet d'une augmentation de succion est comparable à un effet d'un chargement mécanique avec notamment la génération de déformations volumiques irréversibles (diminution de volume du matériau). Pour des succions élevées supérieures à une valeur s_{csl} de succion, les variations volumiques sont moindres et pratiquement négligeables. Cette valeur de succion (s_{csl}) est appelée succion de limite de retrait.

Ces résultats expérimentaux avec des paramètres importants comme s_{air} et s_{csl} peuvent se retrouver dans la Figure I-12 pour un autre exemple de courbe de rétention réalisée sur l'argile de Vieux Pré (INDARTO, 1991).

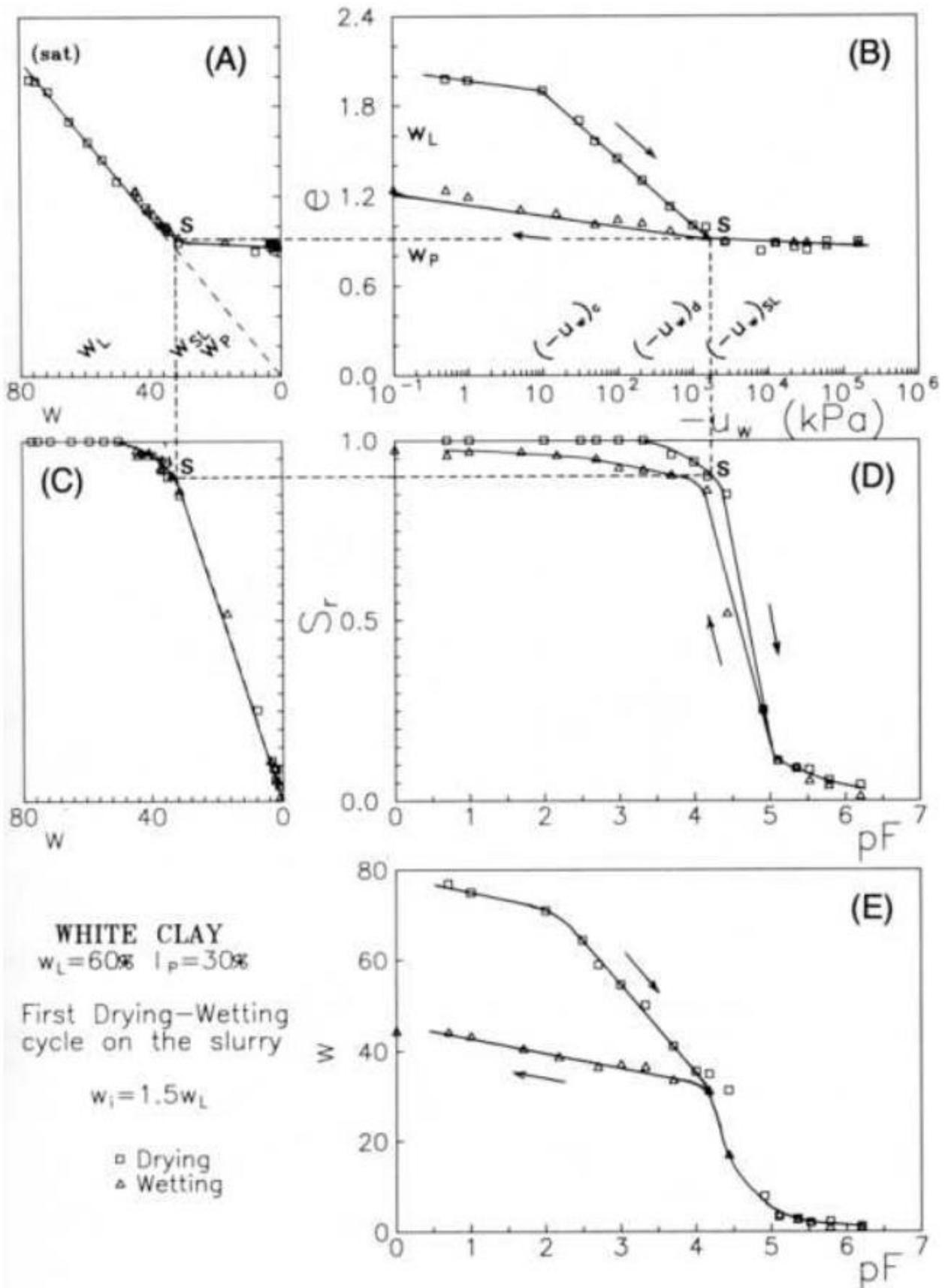


Figure I-11 : Courbe de rétention de l'argile blanche (FLEUREAU, et al., 1993)

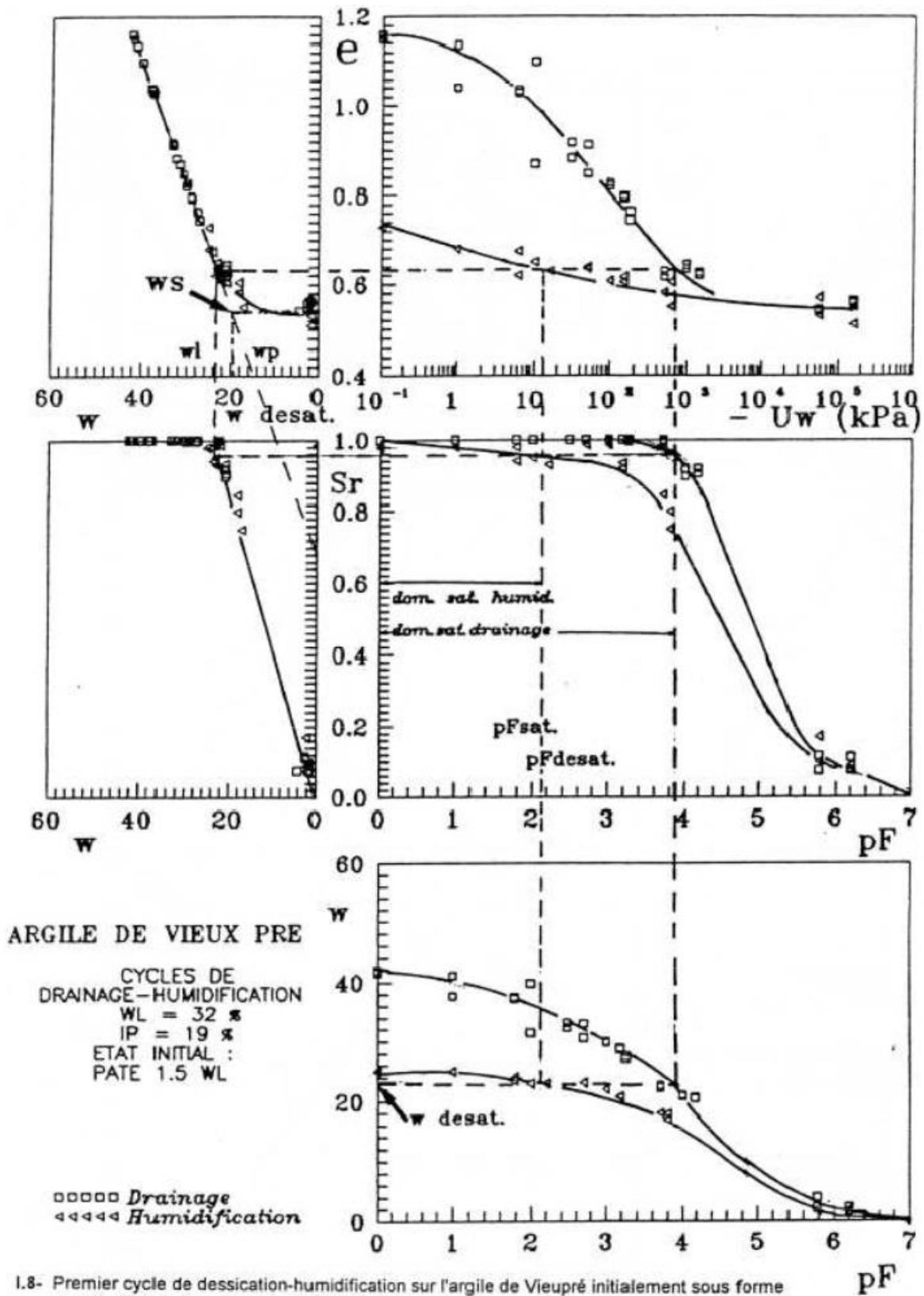


Figure I-12 : Courbe de rétention de l'argile de Vieux Pré (INDARTO, 1991)

I.3 Propriétés du comportement mécanique des sols non saturés

I.3.1 Comportement volumique

Dans la section précédente, on a vu l'effet de la succion sur le comportement volumique en l'absence de toute contrainte mécanique. Dans cette partie, on présente les principales caractéristiques du comportement des sols non saturés sous l'effet de différentes combinaisons entre variations de contraintes mécaniques et variations de succion.

Des résultats d'essais œdométriques à succion contrôlée sur le limon de Sterrebeek ($W_L = 27$; $I_p = 4$) (LECLERCQ & VERBRUGGE, 1985) ont montré qu'avec l'augmentation de la succion, la compressibilité du sol diminue. En conséquence, la pression de pré-consolidation augmente avec la succion. En outre, au-delà de la limite élastique, on relève une diminution du coefficient de compressibilité traduisant une augmentation de la rigidité avec l'augmentation de la succion (Figure I-13).

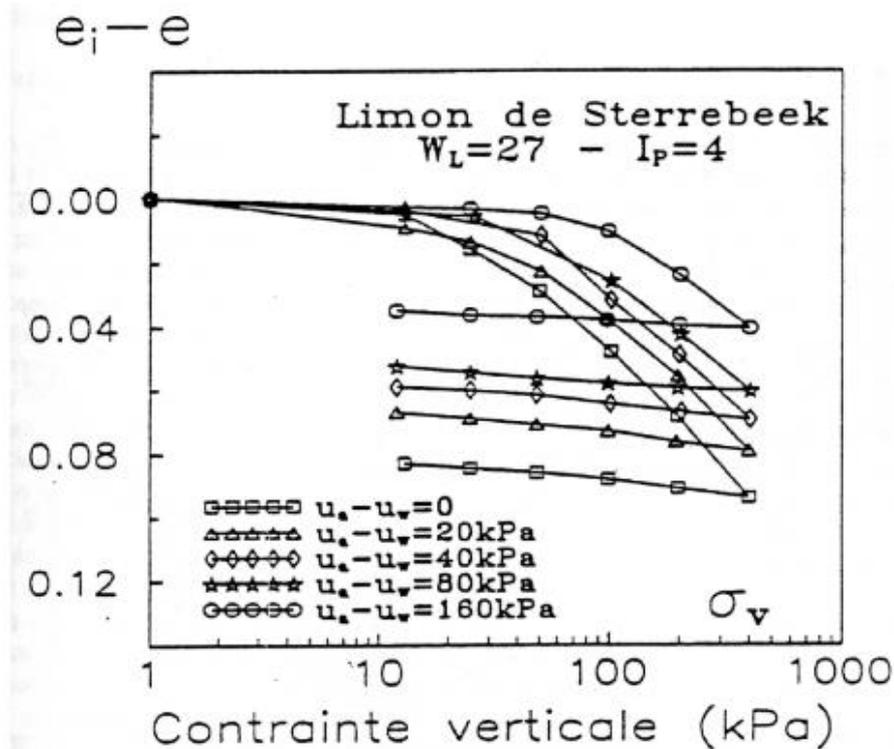


Figure I-13 : Résultats des essais œdométriques à succion constante sur le limon de Sterrebeek (LECLERCQ & VERBRUGGE, 1985)

Le comportement volumique d'un sol non saturé s'avère très complexe. La Figure I-17 représente les résultats des essais triaxiaux à succion contrôlée sur le limon de Jossigny (CUI & DELAGE, 1996). En observant la variation volumique à chaque niveau de succion, il semble que la pente initiale de contractante ne soit pas influencée par la succion. La différence réside essentiellement dans la capacité de dilatation du sol. On note que le matériau sera d'autant plus

dilatant que la succion à laquelle il est soumis est grande ; ce qui est opposé à la tendance observée avec la contrainte de confinement.

Un élément de comportement très étudié pour les dommages qu'il cause est le phénomène de retrait gonflement des sols soumis à des cycles de drainage et d'imbibition. En effet, lors d'un drainage, le sol subit un retrait alors qu'il aura tendance à gonfler au remouillage comme cela a été observée lors des essais de rétention décrits aux Figure I-11 et Figure I-12 sur des sols argileux. L'intensité de la variation de volume dépend du sol étudié, elle est particulièrement forte sur certaines argiles dites gonflantes. Fleureau et Kheirbek Saoud (FLEUREAU, et al., 1993) comparent le pouvoir gonflant de différentes argiles comme la kaolinite et la smectite. La première atteint des gonflements de l'ordre de 12 % et la seconde de 100 %. Maswowe (MASWOWE, 1985) a, par exemple, réalisé des essais d'effondrement sur sol partiellement saturé.

Dans le cas des sols normalement consolidés sollicités sur un chemin œdométrique ou isotrope, les déformations volumiques sont regroupées sur des droites parallèles dans le plan ($e, \log(\sigma_v')$) ou ($e, \log(p')$). Dans le cas d'un chemin de drainage, les variations volumiques engendrées par une variation de pression interstitielle seront comparables aux déformations qui auraient résulté d'un changement de contrainte tant que l'échantillon reste saturé. Notons que le phénomène de retrait et de gonflement d'un sol dépend aussi de la contrainte qui lui est appliquée. Ce comportement a d'ailleurs mis en défaut de nombreuses modélisations.

I.3.2 Résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement peut être seulement liée à la contrainte nette moyenne (différence entre la contrainte totale et la pression d'air dans les pores) et la succion (différence entre la pression d'air et la pression d'eau dans les pores).

Les essais triaxiaux à succion imposée sur le granite décomposé (HO & FREDLUND, 1982) ont montré que la résistance au cisaillement augmente avec la succion tandis que l'angle de frottement reste constant. On note alors une augmentation linéaire de la résistance au cisaillement avec la succion lorsque celle-ci reste inférieure à 140 kPa. La cohésion apparente croît avec la succion; ceci est cohérent avec le fait que la succion implique des forces d'attraction entre les grains (Figure I-14).

Par contre, les essais de cisaillement direct à succion contrôlée réalisés par différents auteurs ont donné des résultats montrant une enveloppe de résistance au cisaillement non linéaire. Ainsi au niveau de l'évolution de l'angle de frottement avec la succion, certains auteurs relèvent une augmentation avec la succion (ESCARIO & SAEZ, 1986), d'autres en revanche notent une diminution (FREDLUND, et al., 1995) (Figure I-15). Il apparaît donc qu'on ne puisse pas définir des règles précises à ce sujet. L'effet de la succion sur l'angle de frottement dépend du type de sol et de son état (CUI & DELAGE, 2003)

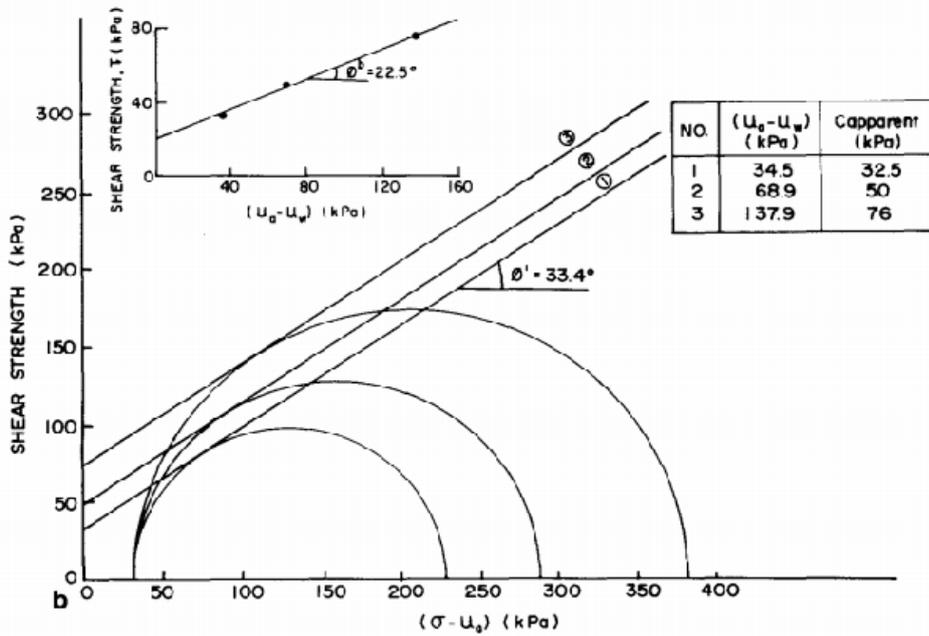
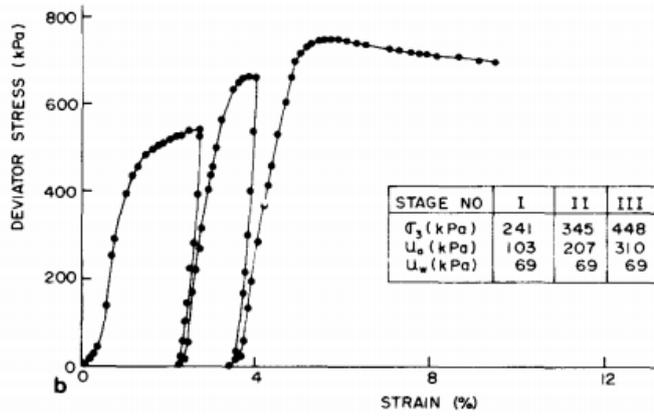


Figure I-14 : Résultats des essais triaxiaux à succion imposée sur le granite décomposé (HO & FREDLUND, 1982)

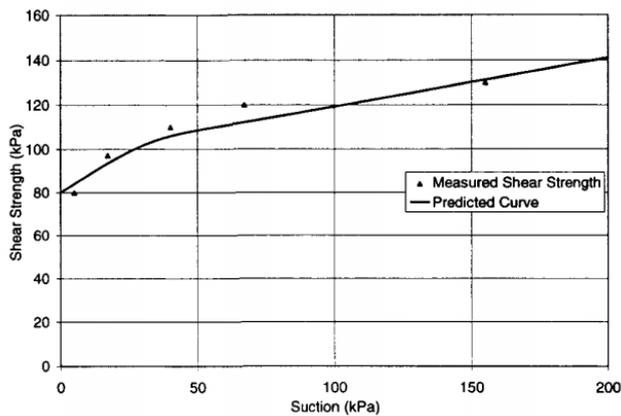


Figure I-15 : Evolution de l'angle de frottement en fonction de la succion imposée à l'appareil triaxial (FREDLUND, et al., 1995)

Au niveau du comportement pré-rupture du sol, des résultats d'essais sur un limon non saturé (BLIGHT, 1967) (Figure I-16) et les essais triaxiaux réalisés à succion constante sur limon de Jossigny compacté à l'optimum (CUI & DELAGE, 1996) (Figure I-17), ont montré qu'avec l'augmentation de la succion, le module de rigidité et la résistance au cisaillement augmentent.

L'augmentation du module initial du matériau montre une rigidification de celui-ci. L'augmentation de la résistance au cisaillement rappelle l'effet de la contrainte de confinement sur les résultats d'un essai triaxial. Alors que l'apparition du pic de déviateur tend à montrer sa fragilisation. L'augmentation de l'attraction inter-granulaire peut engendrer une rigidification puisque la liaison entre les grains due aux phénomènes capillaires (ménisques) peut s'apparenter aux effets de la cimentation pour des succions élevées. Cette rigidification a tendance à amener un sol non saturé à un état métastable avec une porosité plus élevée à contrainte mécanique égale, ce qui explique sa fragilisation.

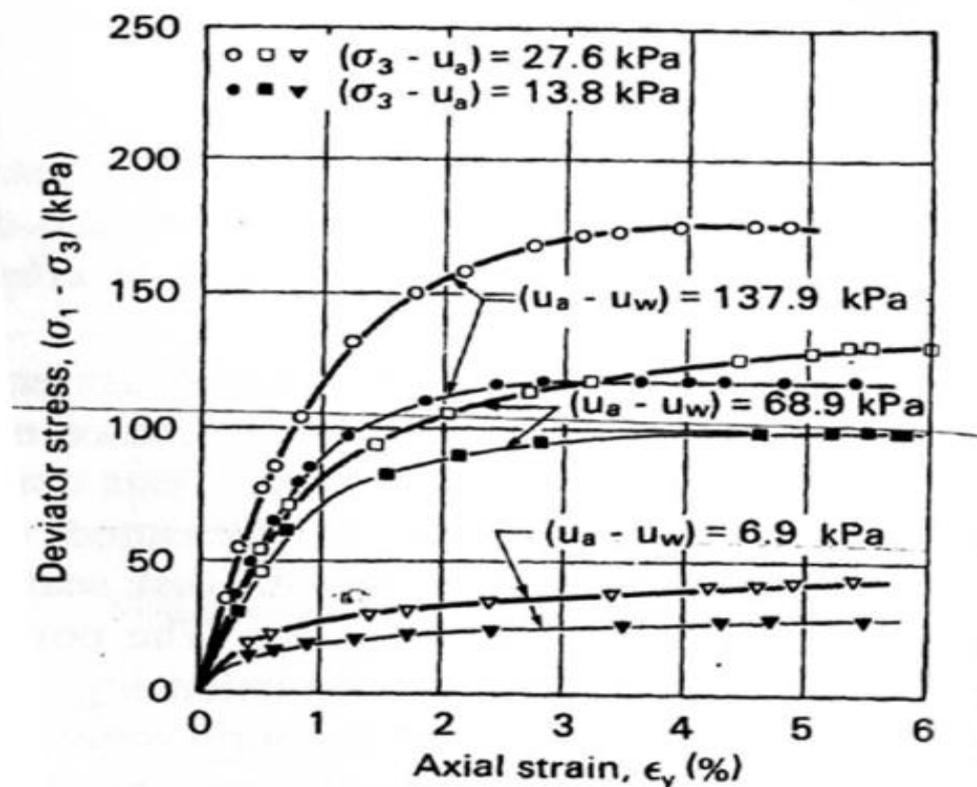


Figure I-16 : Résultats des essais triaxiaux à succion constante sur un limon non saturé (BLIGHT, 1967)

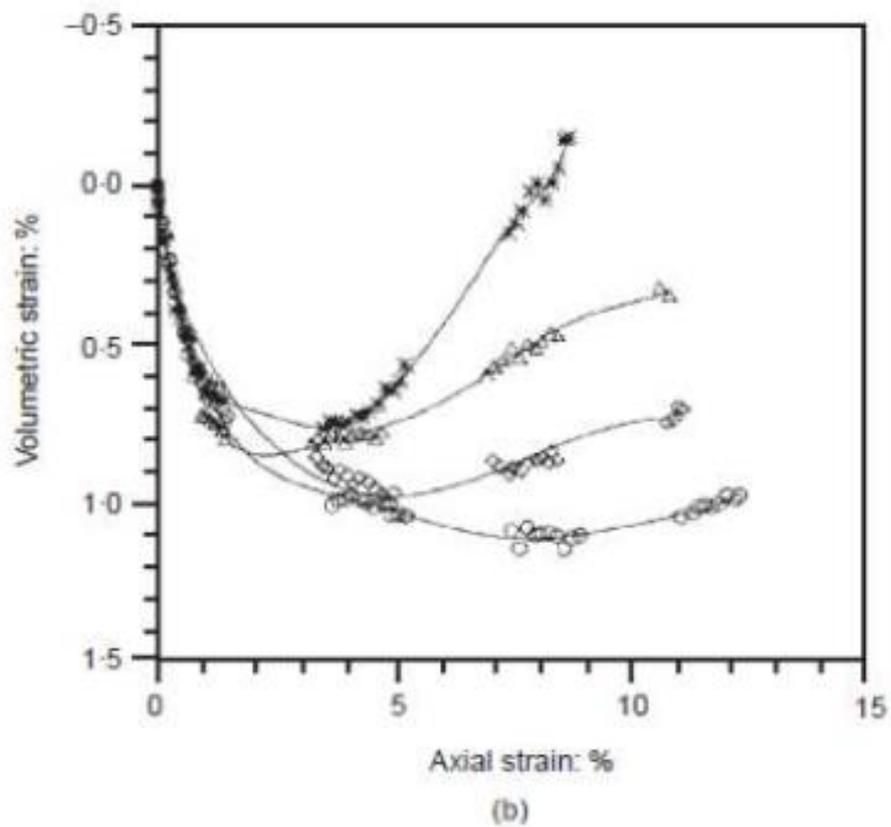
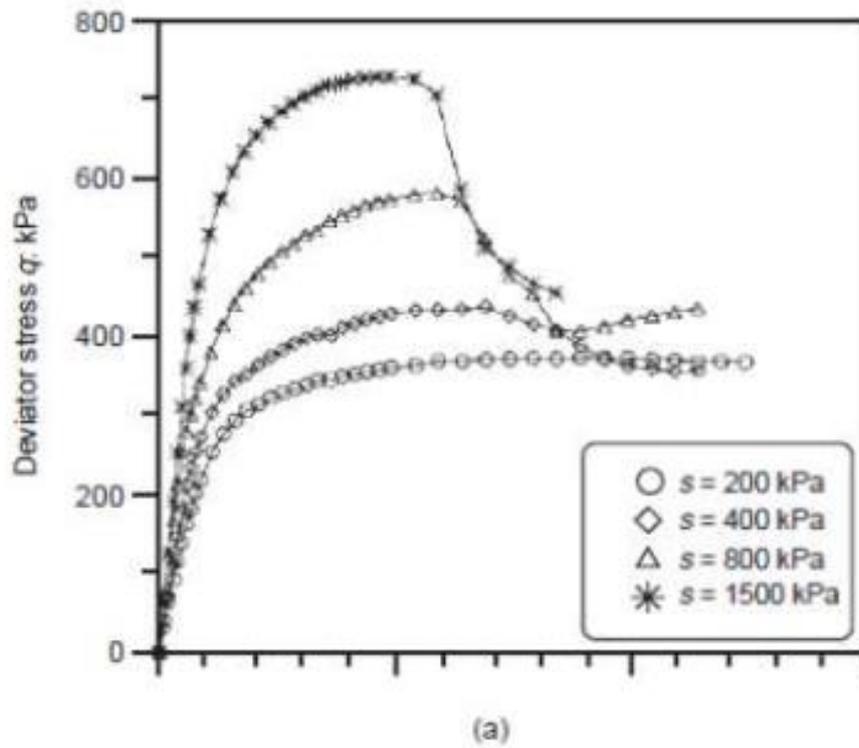


Figure I-17 : Résultats des essais triaxiaux à succion constante sur le limon de Jossigny (CUI & DELAGE, 1996)

I.4 Influence des paramètres sur le compactage du sol

Figure I-18 montre quatre domaines de la saturation pour les sols compactés en fonction du degré de saturation selon une proposition de Boutonnier, variant de l'état non saturé D1 à l'état complètement saturé D4, en passant par deux états partiellement saturés D2 et D3 (BOUTONNIER, 2007) :

- **D1** : Le sol est non saturé et la phase gazeuse (air) est continue,
- **D2** : Le sol est non saturé et la phase d'air est discontinue. L'air se présente sous forme de poches d'air occluses dans le matériau et restant en contact avec le squelette solide. Des ponts liquides se forment entre les grains,
- **D3** : Le sol est partiellement saturé et la phase liquide est continue. La phase d'air est discontinue et l'air occlus (bulles d'air) n'est plus en contact avec le squelette solide,
- **D4** : Le sol est totalement saturé par le fluide interstitiel. L'air est complètement dissous dans l'eau.

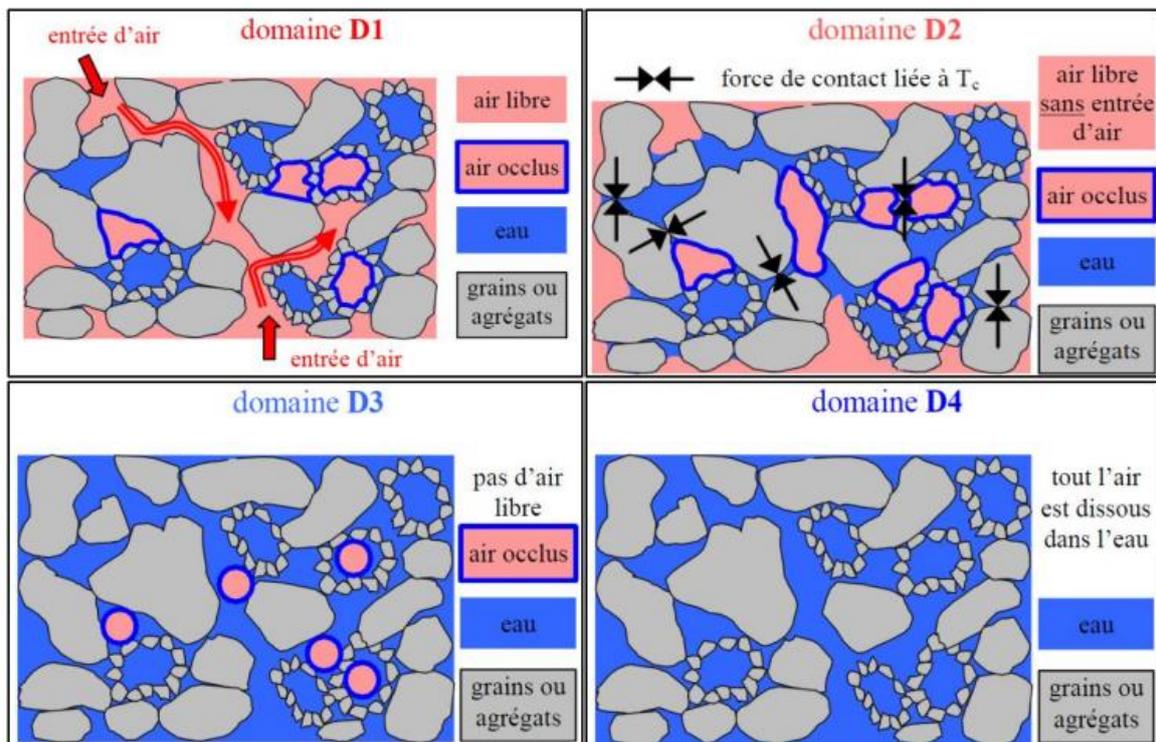


Figure I-18 : Représentation schématique de l'état de saturation (BOUTONNIER, 2007)

A partir des résultats de littérature, Boutonnier (BOUTONNIER, 2007) considère que le domaine D2 pour lequel la phase d'air occlus est en contact avec le squelette s'étend à droite (côté humide) de la ligne optimale de compactage (ligne pointillée de la Figure I-19).

Il est connu que le compactage est fonction de quatre variables : la masse volumique du sol sec, sa teneur en eau, l'énergie de compactage et le type de sol. Dans cette thèse, on n'utilisera qu'une seule méthode de compactage dynamique (Proctor CBR) et les essais seront réalisés sur un seul matériau (sable limoneux). Par conséquent, les deux paramètres susceptibles d'influencer nos résultats seront l'énergie de compactage et la teneur en eau du matériau.

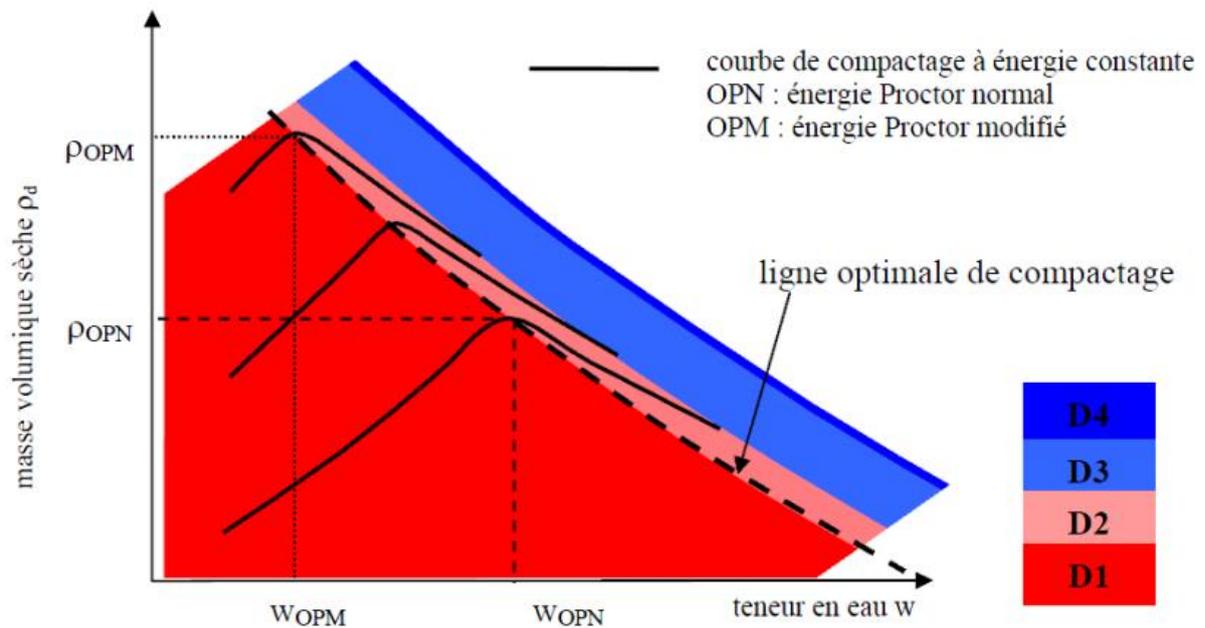


Figure I-19 : Les domaines de la saturation sur le chemin $\rho_d - w$ de l'essai Proctor pour les sols fins (BOUTONNIER, 2007)

I.4.1 Influence de l'énergie de compactage sur la courbe Proctor:

Pour étudier l'influence de l'énergie de compactage sur le sol, de nombreux essais Proctor Normal (OPN) et Proctor Modifié (OPM) ont été réalisés par différents auteurs :

TurnBull et Foster (1956) cité par Holtz et Kovac (HOLTZ & KOVACS, 1991) ont réalisé les essais de Proctor à 4 niveaux d'énergies de compactage, variant de 4 coups par couche à 55 coups par couche (Figure I-20). En 1995, Serratrice (SERRATRICE, 1995) a réalisé les essais Proctor sur l'argile à 3 niveaux d'énergie de compactage (Proctor Normal-PN, Proctor Modifié-PM et Proctor Réduit-PR) (Figure I-21). Daoud (DAOUD, 1996) a réalisé des essais Proctor Normal et Proctor Modifié sur le limon argileux de Xeuilley à seulement deux énergies de compactage, les résultats sont présentés dans Figure I-22.

L'ensemble de ces résultats montrent que pour un même type de sol, l'augmentation de l'énergie de compactage se traduit, d'une part, par une augmentation de la masse volumique à l'optimum du sol et, d'autre part, par une diminution de la teneur en eau optimale.

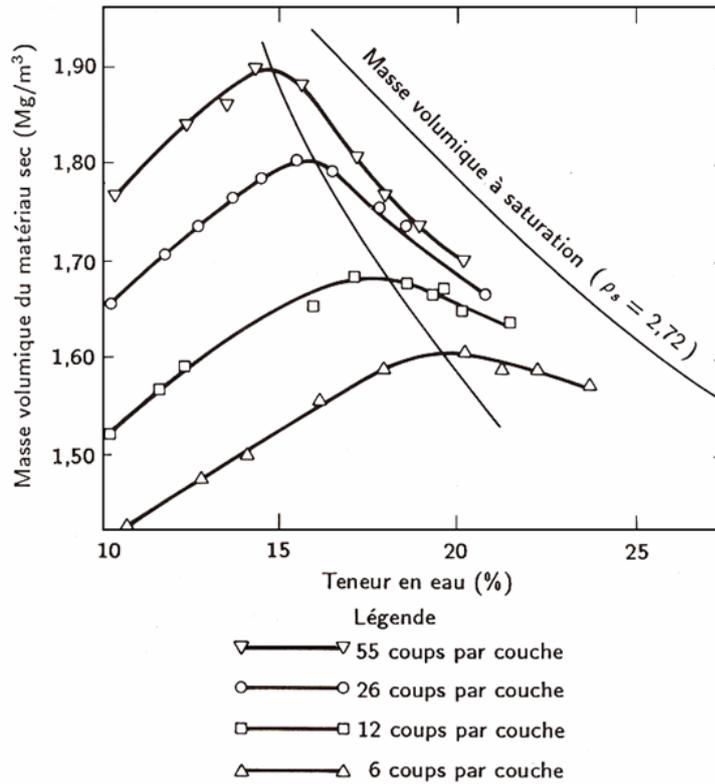


Figure I-20 : Courbes de compactage d'échantillons compactés en laboratoire suivant l'essai Proctor modifié à différentes énergies de compactage (TurnBull et Foster, 1956 cité par Holtz et Kovacs (HOLTZ & KOVACS, 1991))

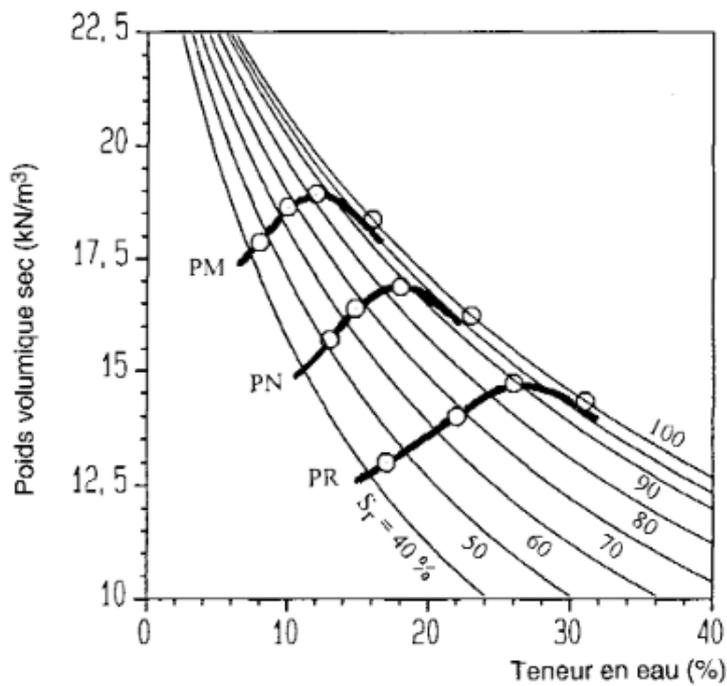


Figure I-21 Courbe Proctor d'une argile à différentes énergies de compactage (SERRATRICE, 2013)

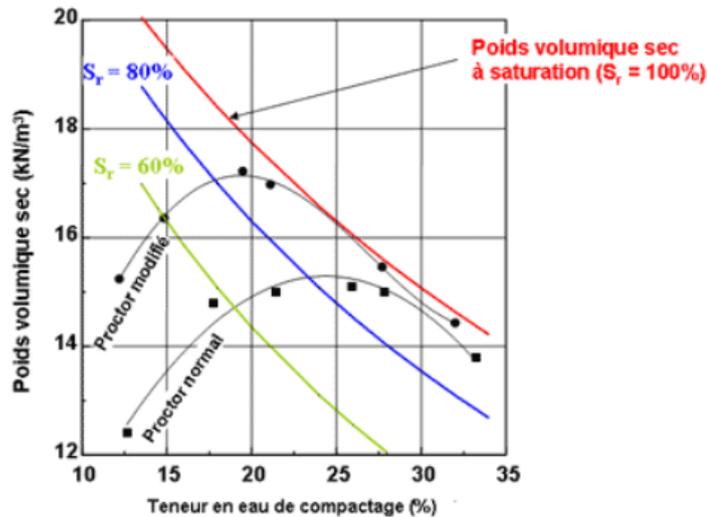


Figure I-22 Courbes de compactage des essais Proctor Normal et modifiés pour le limon argileux de Xeuley (DAOUD, 1996)

I.4.2 Influence de la teneur en eau sur la courbe de Proctor

La teneur en eau est le paramètre fondamental pour le compactage des sols, surtout dans le cas des sols fins pour lesquels ce paramètre ne peut changer que lentement en raison de l'affinité de l'eau avec les particules argileuses.

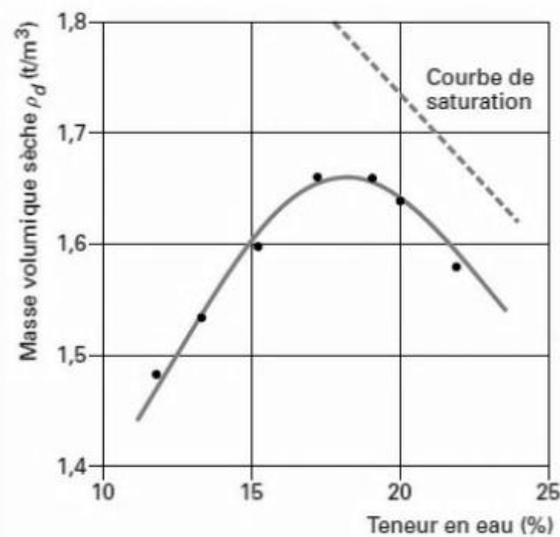


Figure I-23 : Essai Proctor sur limon de Jossigny (CUI & DELAGE, 2003)

A partir des résultats types de l'essai Proctor (Figure I-23), on observe toujours une augmentation de la densité sèche avec la teneur en eau jusqu'à une valeur maximale (Optimum Proctor), puis elle diminue (CUI & DELAGE, 2003). On remarque aussi que :

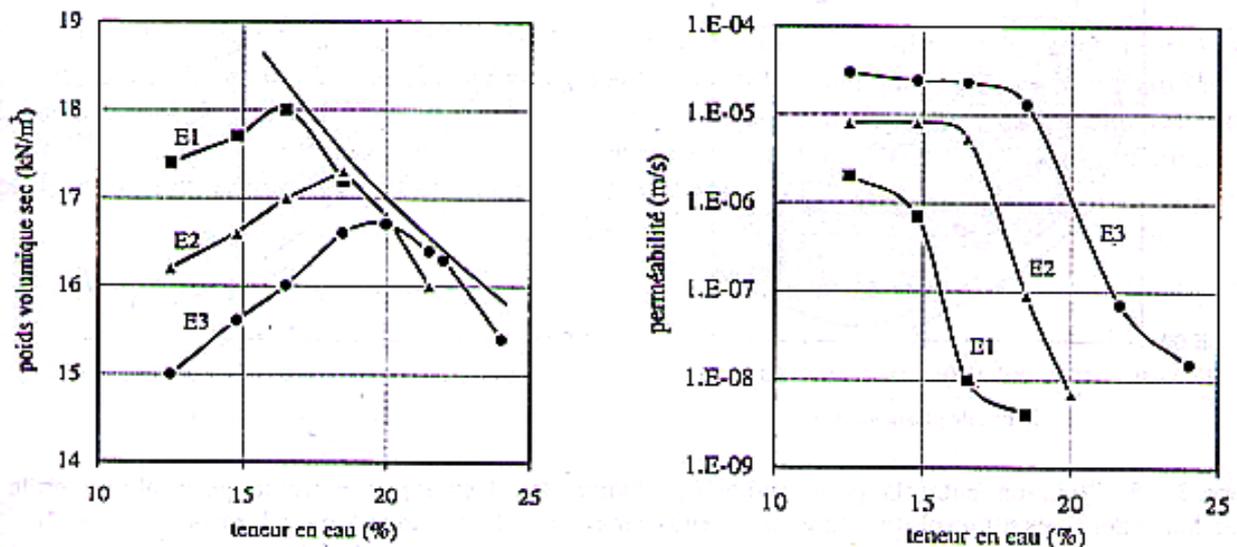
- Le sol est plus rigide et difficile à comprimer du côté sec, quand la teneur en eau est faible.
- Lorsque la teneur en eau augmente, l'eau agit comme un lubrifiant, provoquant un ramollissement du sol qui devient plus déformable.

- Pour des teneurs en eau supérieures à la teneur en eau de l'optimum, l'eau incompressible et l'air occlus empêche une partie du transfert de l'énergie de compactage sur les particules solides. Ainsi la densité du sol lors du compactage tend à diminuer.

I.5 Influence des paramètres liés au compactage sur la microstructure du sol

I.5.1 Influence du compactage sur la perméabilité du sol

Figure I-24 montre l'influence de trois méthodes de compactage (statique, dynamique et par pétrissage) sur les résultats de Proctor et sur la perméabilité (MITCHELL & SOGA, 1976). Le compactage par pétrissage (E1) donne une densité sèche maximale à Optimum Proctor ($\gamma_d \max$) et une teneur en eau à Optimum Proctor (w_{op}) minimale. Pour la perméabilité, le compactage par pétrissage donne les valeurs les plus faibles par rapport aux deux autres méthodes. L'influence des méthodes de compactage sur la perméabilité est plus grande du côté humide ($w > w_{op}$) que du côté sec ($w < w_{op}$) alors que pour une même teneur en eau, les densité sèche des matériaux côté humide sont quasi identiques. Ces résultats montrent que le mode de compactage du côté humide influence la structure du matériau et très certainement sa distribution porale.



E1 : compactage par pétrissage ; E2 : compactage statique

E3 : compactage dynamique

Figure I-24 : Comparaison entre les valeurs de perméabilité obtenue sur des éprouvettes compactées par pétrissage et par méthode statique (MITCHELL & SOGA, 1976) cité par Gueddouda (GUEDDOUDA, 2011)

Comme il est difficile de séparer les influences des méthodes de compactage et celles des énergies de compactage, la Figure I-26 montre que pour trois énergies de compactage différentes (de 15 à 45 coups par couche), la perméabilité des sols compactés du côté sec où la teneur en eau w est plus faible que celle de l'optimum w_{op} est beaucoup plus forte que la

perméabilité des sols compactés du côté humide (MOUSSAI, 1993). Un rapport allant de 10 à 1000 peut être obtenu (BOYTON & DANIEL, 1985).

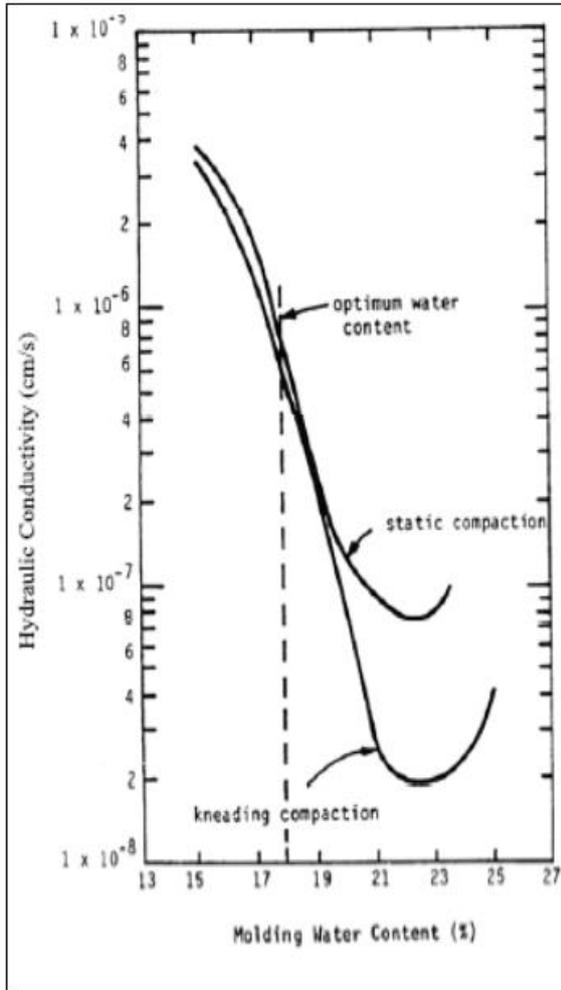


Figure I-25 Effet de la méthode de compactage sur la perméabilité (MITCHELL & SOGA, 1976)

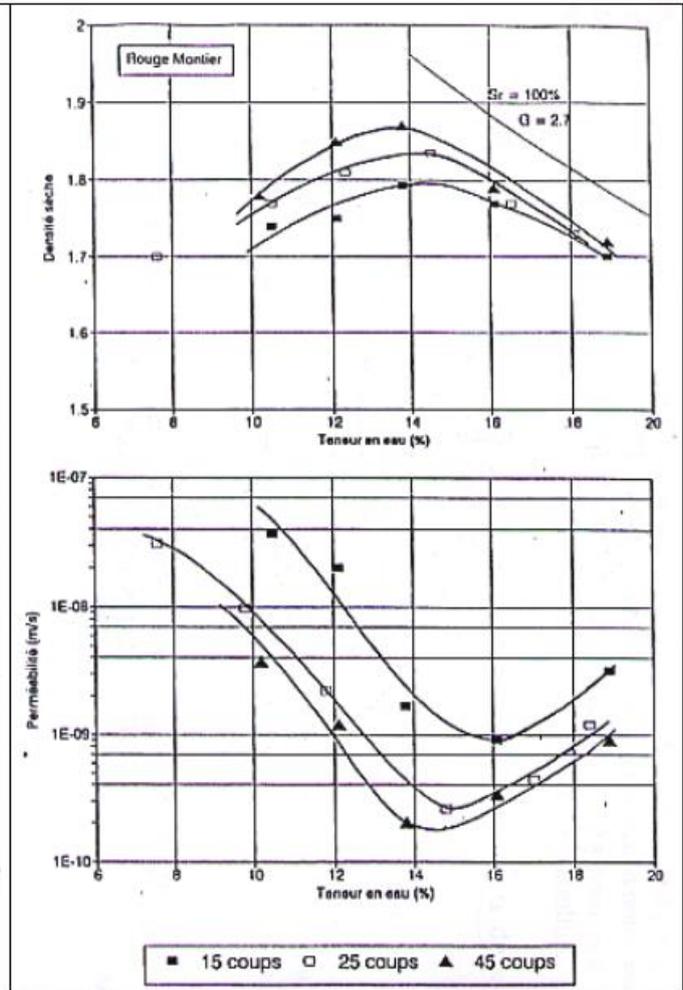


Figure I-26 Relation Conductivité hydraulique-teneur en eau/ densité sèche (MOUSSAI, 1993)

Dans le cas des mélanges de sable-bentonite, les essais de compactage Proctor Normal présentés Figure I-27 montrent que l'optimum Proctor et la densité sèche maximale dépendent grandement de la teneur en argile (CHALERMYANONT & ARRYKUL, 2005). La teneur en eau optimale (w_{op}) augmente et la densité sèche à l'optimum ($\gamma_{d op}$) diminue avec l'augmentation de la fraction massique de bentonite. Cette augmentation de teneur en eau optimale est probablement liée à l'eau adsorbée à la surface des feuillets d'argile.

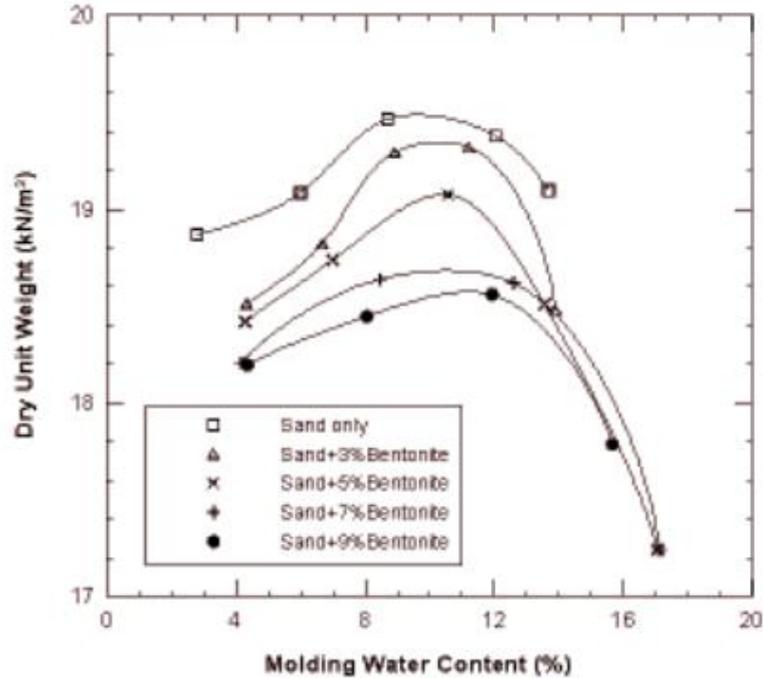


Figure I-27 Effet de l'ajout de bentonite sur les paramètres de Proctor (CHALERMYANONT & ARRYKUL, 2005)

I.5.2 Organisation des constituants des sols fins compactés

I.5.2.a Définition de la microstructure

Il est nécessaire de se préoccuper de la répartition des constituants dans le sol et de leur agencement dans l'espace. Le terme de «microstructure » est défini selon Collins et McGown (COLLINS & MCGOWN, 1974) cité par Ferber (FERBER, 2005) comme: « *la microstructure est l'arrangement dans le sol des particules solides et des vides entre elles* ».

Le travail de Hu (HU, et al., 2011), cité par Ferber (FERBER, 2005) a indiqué que : « *Toute la complexité de ce concept de microstructure réside en fait dans le terme « arrangement », qui recouvre un grand nombre de questions, telles que : la forme des particules, incluant leur taille ainsi que la forme et la rugosité des grains ; la position des particules, incluant leur orientation et leur arrangement ; la porosité, et notamment la taille et la distribution des pores ; la connectivité, qui concerne, le cas échéant, le mode de cimentation des particules et sa répartition.* »

I.5.2.b Observations sur la microstructure

Pour la description de la microstructure, il existe plusieurs moyens expérimentaux pour réaliser des observations à cette échelle apparus depuis la moitié du XXème siècle parmi lesquels la microscopie électronique à balayage (MEB), la porosimétrie au mercure, la microscopie optique.

Ces outils ont été utilisés depuis les années 1960-1970 par de nombreux chercheurs pour décrire la microstructure des sols. Au cours de cette période, la grande quantité d'informations ainsi récoltée a permis de dégager les grandes tendances de l'organisation microscopique des sols, et en particulier des sols argileux.

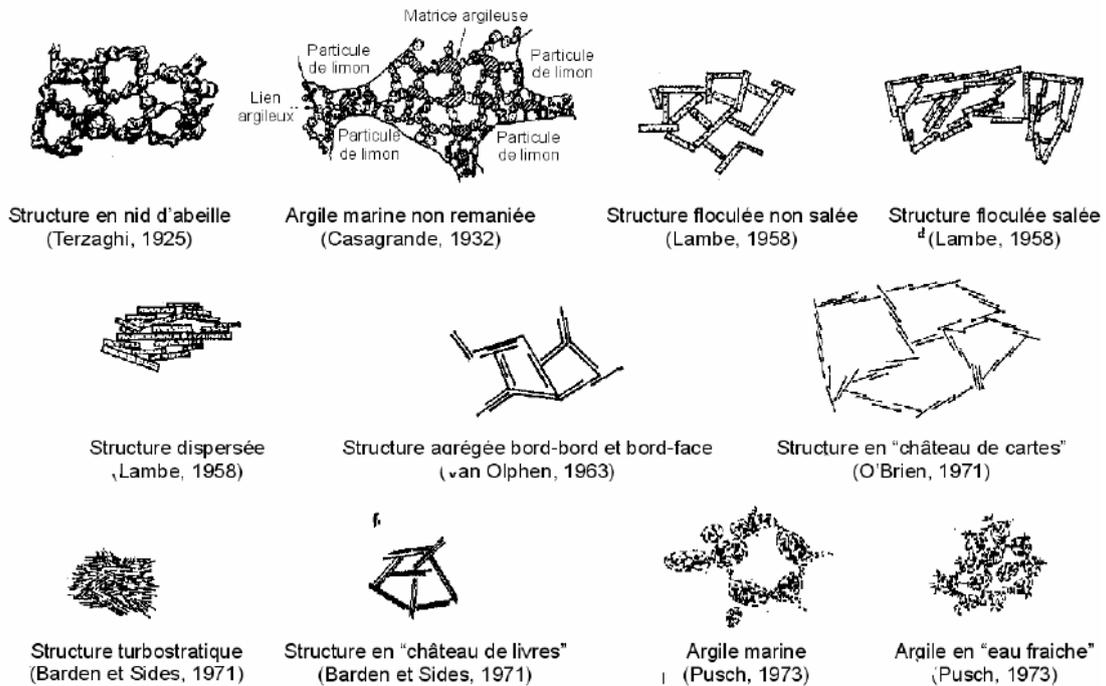


Figure I-28 : Différentes formes d'arrangement des particules élémentaires selon divers auteurs (COLLINS & MCGOWN, 1974)

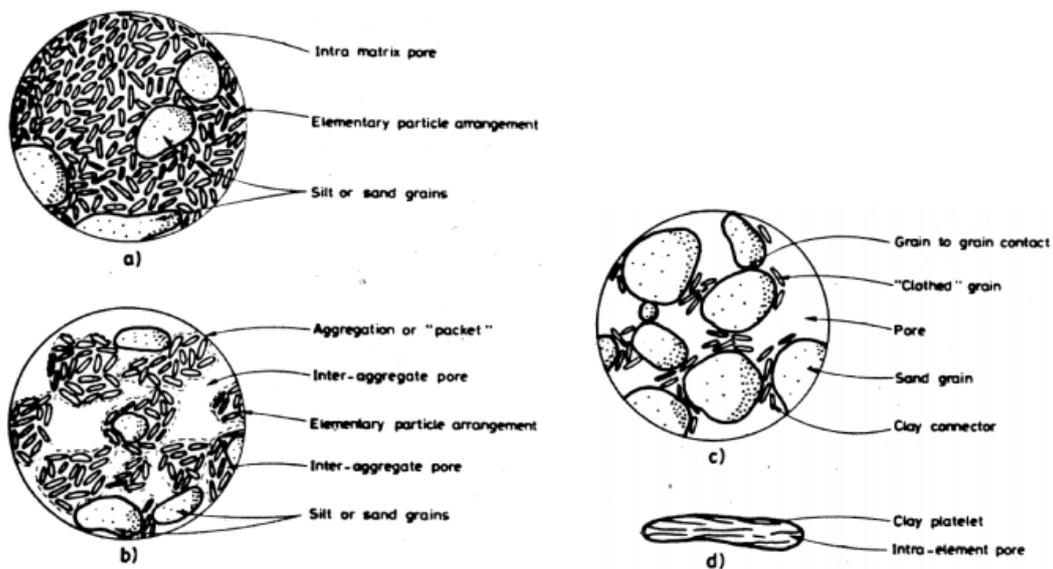


Figure I-29 : Eléments de la structure du sol (ALONSO, et al., 1987)

Alonso (ALONSO, et al., 1987) ont proposé une caractérisation de la structure du sol partiellement saturé par l'identification de quelques éléments simples, (Figure I-29), allant d'une matrice argileuse composée uniquement des plaquettes d'argile à une matrice de grains de sable ou limon avec quelques ponts d'argile entre les grains, et passant par quelques situations particulières comme des grains noyés dans une matrice d'argile avec ou sans la présence des macrospores.

I.5.3 Effet du compactage sur la microstructure du sol

I.5.3.a Interactions entre les particules :

D'après Camapum de Carvalho (CAMAPUM DE CARVALHO, et al., 1987), les interactions entre les particules d'un sol dépendent en grande partie de leur nature (granulaire ou colloïdale) ; elles se font, soit par contact direct des grains, soit par l'intermédiaire de forces électromagnétiques. Pour les sols granulaires, les interactions de contact dominent, mais dans le cas des argiles, ce sont les interactions électromagnétiques entre particules et avec le milieu dans lequel elles se trouvent qui pilotent le comportement hydromécanique du matériau.

Lambe (LAMBE, 1958) a proposé un des premiers modèles de microstructure des sols fins, dédié aux sols compactés, qui est encore fréquemment évoqué dans les ouvrages de mécanique des sols. Il a montré que la structure de l'argile compactée change avec la modification de la teneur en eau de compactage (Figure I-30). Un système de particules parallèles appelé système dispersé est généré quand on compacte à droite de l'optimum Proctor. Quand on compacte à gauche de l'optimum, un système floclé de particules se produit.

- Pour le point A du côté sec : la quantité d'eau est insuffisante pour développer entièrement la double couche, et les forces d'attraction sont prédominantes, ce qui conduit à une structure floclée, à un arrangement désordonné des particules.
- Du point A au point B de l'optimum Proctor : l'augmentation de la teneur en eau entraîne une augmentation de compacité.
- Pour le point C du côté humide : il y a suffisamment d'eau pour permettre le développement de la double couche. La structure du sol est de plus en plus orientée mais la compacité diminue car le gain de teneur en eau provoque un accroissement de distance entre les éléments.

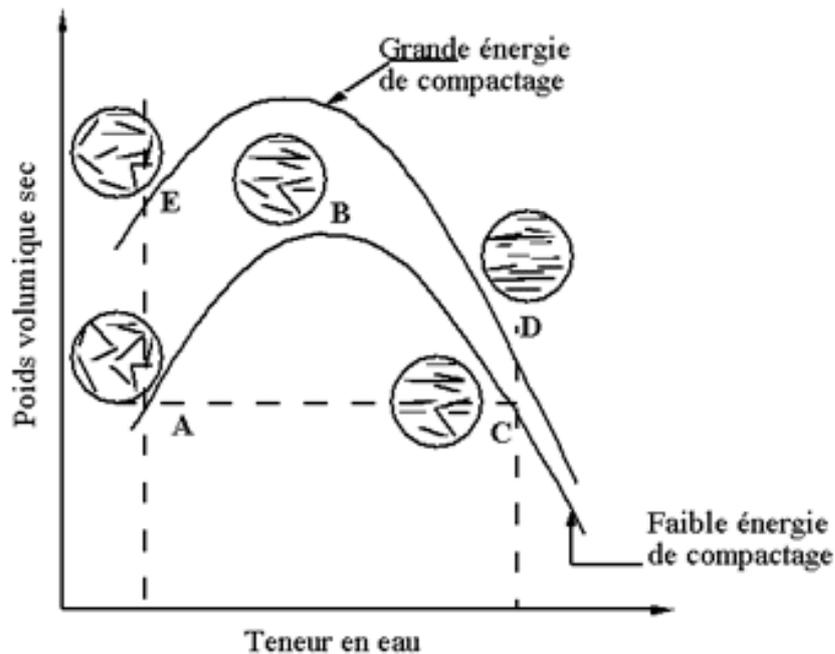


Figure I-30 : Effet du compactage sur la structure du sol (LAMBE, 1958)

Lambe (LAMBE, 1958) a aussi indiqué quatre types de forces qui gouvernent les interactions dans les argiles : les forces externes appliquées, les forces de contact, les forces d'attraction Van der Waals, les forces de répulsion.

Barden et Sides (BARDEN & SIDES, 1970) ont montré que le compactage du côté sec, à faible teneur en eau donne des agrégats peu déformables. Il existe des macropores et la structure du sol est de type ouverte, isotrope avec une densité faible. Avec l'augmentation de teneur en eau, les agrégats deviennent de plus en plus déformables; ce qui peut faire disparaître des macropores et augmenter la densité. La structure est de type ouverte et moitié orientée. Du côté humide, quand la teneur en eau est très élevée, la densité diminue car il existe de l'air piégé dans les pores et les particules argileuses sont de plus en plus orientées. L'eau ne peut pas rentrer et remplacer l'air facilement. Le comportement dans ce cas est anisotrope.

1.5.3.b Effet du compactage sur la répartition des pores

Les études sur la microstructure du sol compacté ont été effectuées par différents auteurs. La Figure I-31 représente la distribution des pores sur un mélange de 70% de sable d'Ottawa et de 30% de kaolin compacté à deux énergies de compactage (JUANG & HOLTZ, 1986). On observe qu'à l'énergie de compactage moyenne, il existe une distribution bimodale des vides : un grand mode pour les pores inter-agrégats et un petit pour les pores intra-agrégats. Avec l'énergie de compactage plus grande, une distribution bimodale est toujours observée mais il y a un changement de la distribution des grands pores : le pic est décalé un peu vers la gauche. Par contre, la famille des petits pores ne change pas avec l'effort de compactage.

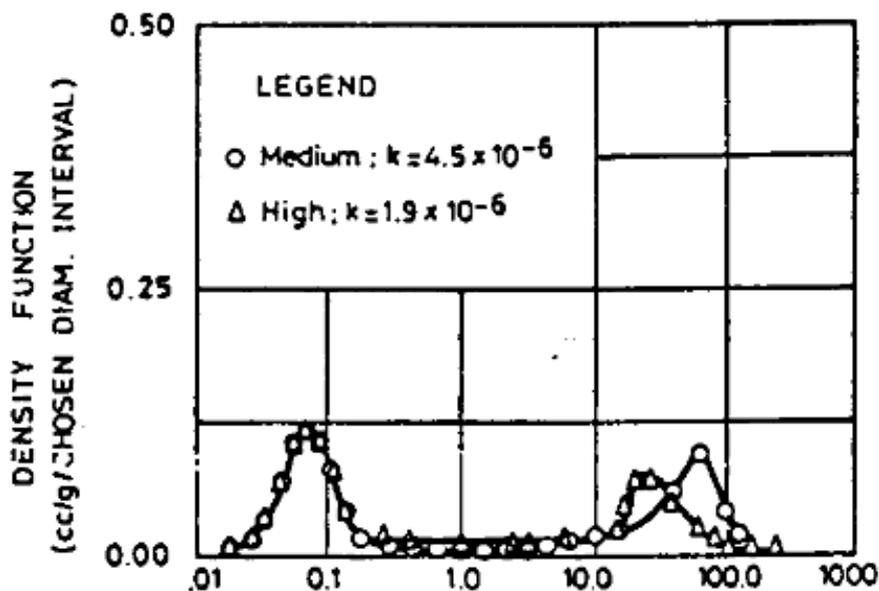


Figure I-31 : La distribution bimodale des pores pour un mélange de 70% de sable d'Ottawa et de 30% de Kaolin compacté par pétrissage à deux énergies de compactage à gauche de l'optimum (JUANG & HOLTZ, 1986)

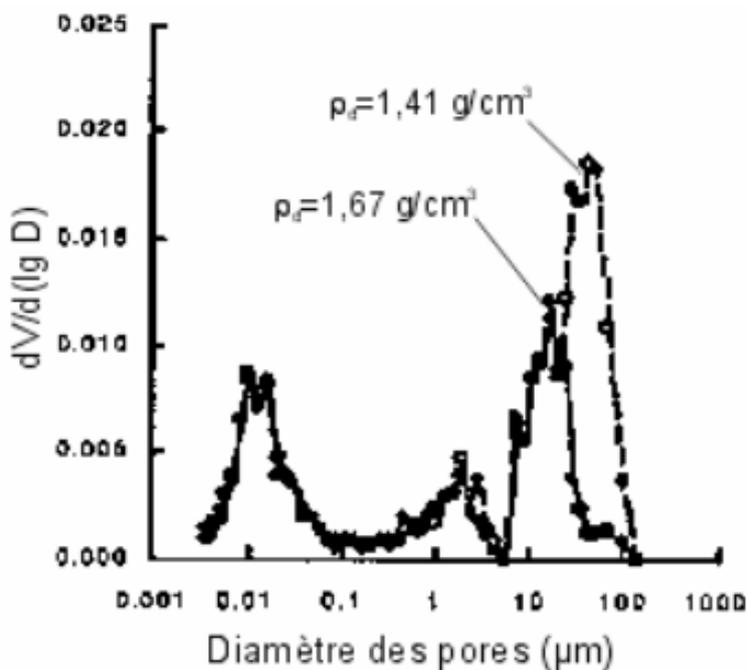


Figure I-32 : Distributions des tailles de pores dans un limon compacté à deux densités (WAN, et al., 1995)

La Figure I-32 représente également la distribution des pores sur un limon compacté à deux densités (WAN, et al., 1995). En comparant avec les résultats de Juang et Holtz ci-dessus, un même effet est remarqué. Une diminution d'indice des vides due au compactage peut provenir d'une diminution de la taille des plus gros pores (les pores de dimension $> 1 \mu\text{m}$). Les microspores (les pores de dimension $< 1 \mu\text{m}$) ne semblent pas être affectées par le compactage.

L'augmentation de la teneur en eau de compactage réduit le volume occupé par les pores de plus grande taille. Cette réduction de volume est distribuée en plus petits pores qui ne sont pas affectés par la teneur en eau de compactage, (Figure I-33 d'après (PRAPAHARAN, et al., 1985))

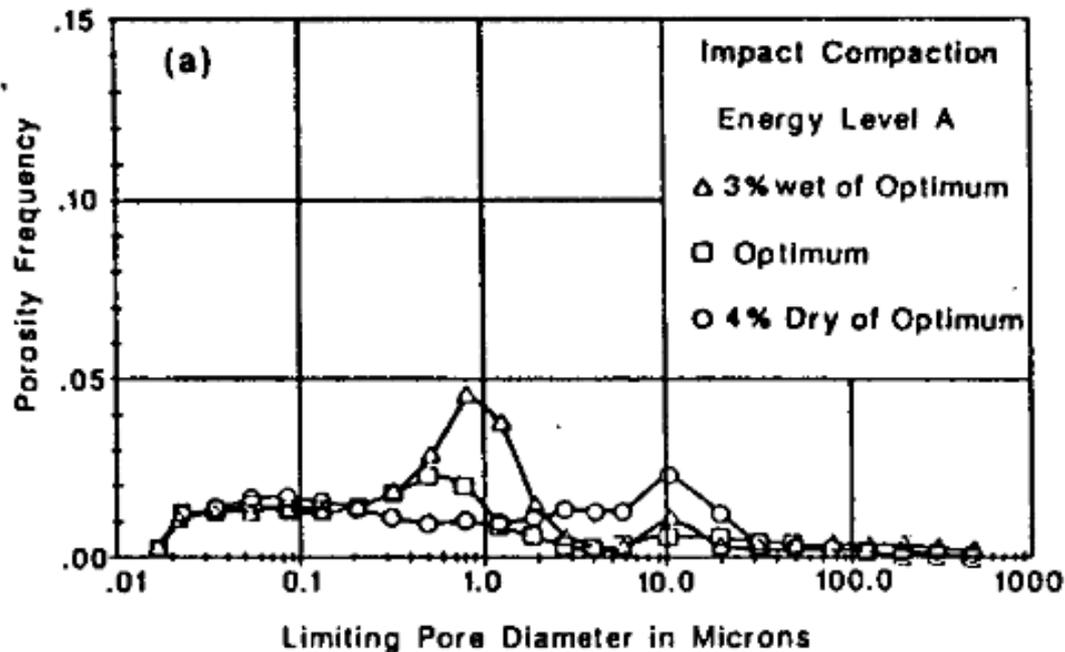


Figure I-33 : Effet de la teneur en eau de compactage sur la répartition des pores.
(PRAPAHARAN, et al., 1985)

Lloret (LLORET, et al., 2003) a réalisé les essais de porosimétrie au mercure sur une bentonite fortement compactée à deux densités sèches différentes, avec une teneur en eau très proche de la limite de retrait (Figure I-34) :

- Concernant le volume incrémental des pores, on observe deux familles de pores pour chaque courbe. Dans ce cas, le sol présente une distribution bimodale : une microstructure dominante avec une valeur de diamètre au pic maximal d'environ 10 μm , et une macrostructure avec un pic dominant variant de 10 μm à 40 μm en fonction de la densité sèche de 1.8 à 1.5 Mg/m^3 . Il n'y a pas beaucoup de différences pour les familles des micropores de diamètre inférieur à 0.13 μm puisque les courbes ont la même forme et sont presque superposées. Il semble que l'énergie de compactage n'influence pas la distribution des micropores. La frontière entre ces familles de pores est vers 0.13 μm .
- Concernant l'indice des vides cumulés, on observe également deux courbes différentes à deux niveaux de compactage. Les mesures des indices des vides nous donnent la valeur de l'espace résiduel correspondant au volume des pores des macrostructures : 0.28 pour 1.55 Mg/m^3 et 0.11 pour 1.73 Mg/m^3 . Ce résultat nous confirme que le compactage modifie la macrostructure et influence peu la microstructure du sol.

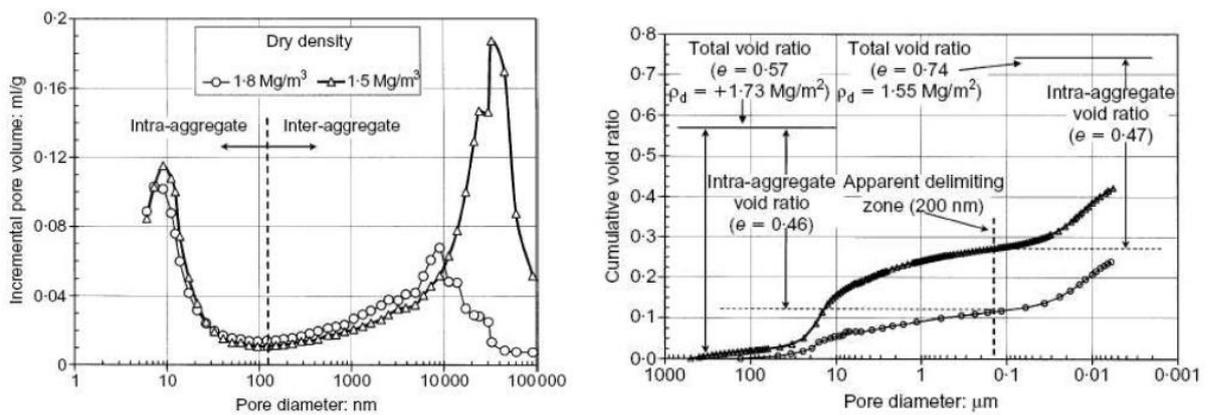


Figure I-34 : Essai porosimétrie au mercure à deux densités sèches différentes sur une bentonite compacté (LLORET, et al., 2003)

Généralement, les résultats bibliographiques montrent qu’une augmentation de l’énergie de compactage influence la structure interne des sols en présence de macropores ; ceux-ci auront tendance à être écrasés par un accroissement d’énergie de compactage alors que les micropores sont peu influencés.

I.5.4 Influence de l’état hydrique sur la microstructure du sol

La Figure I-35 montre la distribution des pores par porosimétrie au mercure sur le limon de Jossigny compacté à différentes teneurs en eau, à l’optimum Proctor, du côté sec et du côté humide (DELAGE, et al., 1996) et Figure I-36 sur un grundite (AHMED, et al., 1974) cité par Delage et Cui (DELAGE & CUI, 2000). Les auteurs recommandent une interprétation prudente de ces courbes à cause d’une double influence de la teneur en eau et de la masse volumique ; en plus de la difficulté d’obtenir des échantillons de même masse volumique sèche.

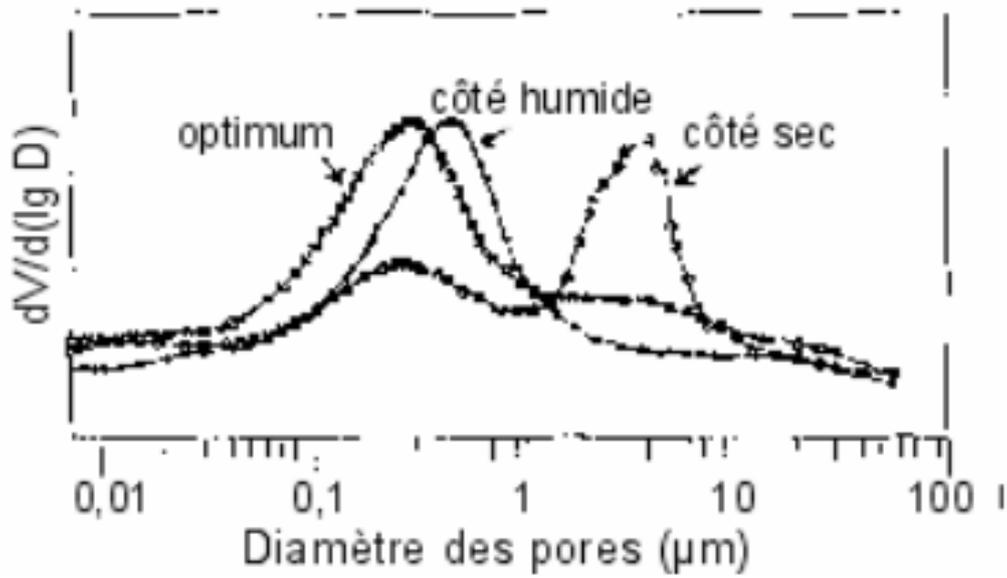


Figure I-35 : Influence de l'état hydrique d'un limon compacté sur les distributions de tailles de pores (cas du limon de Jossigny, (DELAGE, et al., 1996))

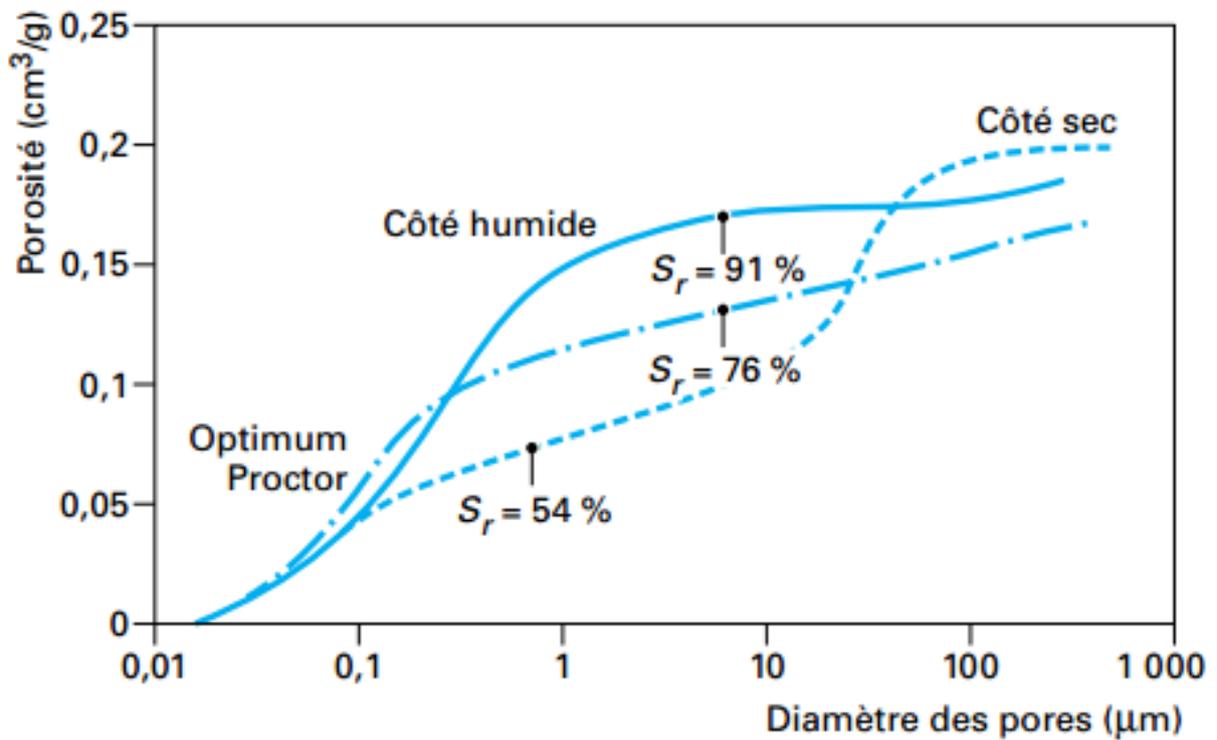


Figure I-36 : Courbes porosimétriques d'échantillons de grundite compacté à l'optimum Proctor, du côté sec et du côté humide. (AHMED et al, 1974 cité par Delage et Cui (DELAGE & CUI, 2000))

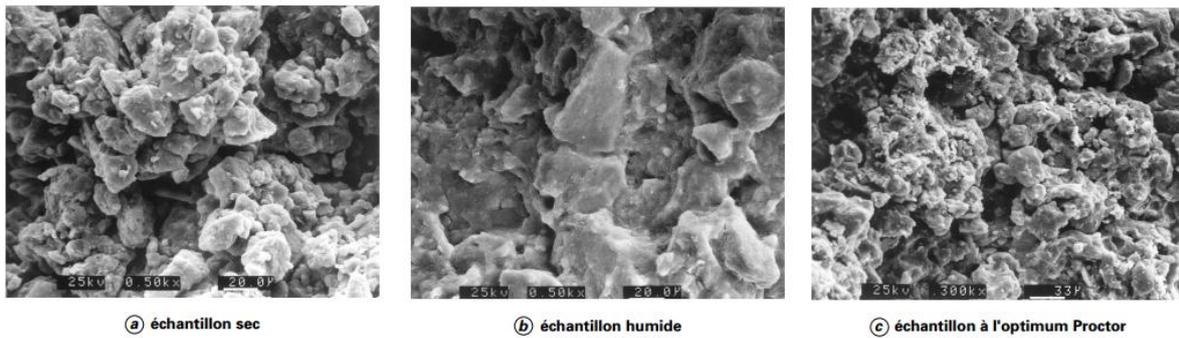


Figure I-37 : Photographies au microscope électronique à balayage d'échantillons de limon de Jossigny compactés (DELAGE & CUI, 2000)

Delage et Cui (DELAGE & CUI, 2000) ont réalisé les observations par MEB sur le limon de Jossigny à trois teneurs en eau différentes : à l'optimum, du côté sec et du côté humide. (Figure I-37)

Figure I-37a présente la photographie au microscope du côté sec. On observe l'apparition d'un agrégat de 70 μm environ de diamètre, constitué de grains de limon de diamètre voisin de 20 μm . La phase argileuse est peu apparente et les plaquettes sont collées sur les grains de limon. La courbe de porosimétrie au mercure de cet échantillon est probablement bimodale pour une structure en agrégats, semblable à celle de la Figure I-32.

Figure I-37b représente la structure de l'échantillon du côté humide : les grains de limon sont entièrement contenus et en comparant avec la photographie du côté sec, on note une augmentation significative du volume de la phase argileuse, qui forme une matrice autour des grains de limon. Dans l'essai de porosimétrie au mercure, le rayon déterminé par la pénétration du mercure est le rayon d'entrée dans la matrice argileuse.

Figure I-37c représente la structure du limon de Jossigny à l'Optimum Proctor de type granulaire, sans présence d'agrégats. Il est possible que cette configuration soit le résultat d'une rupture des agrégats lors du compactage, du fait d'une résistance moindre des agrégats, due à une teneur en eau plus grande.

Figure I-38 présente une observation au microscope électronique à balayage de la structure d'un échantillon de loess provenant du Nord de la France (MUNOZ-CASTELBLANCO, 2011). La structure de ce matériau composée par des assemblages entre agrégats de particules argileuses et de grains de limon. Sur cette figure on observe 3 zones principales :

- Une première zone composée de blocs de gros agrégats de grains de limon liés par des particules argileuses.
- Une seconde zone composée de grains de limon avec des liaisons argileuses distribuées de manière aléatoire dans une matrice de grains.
- Une troisième zone composée de pores de gros diamètres situés entre les agrégats.

D'après Munoz (MUNOZ-CASTELBLANCO, 2011) ce type de structure est caractéristique des sols effondrables, et l'effondrement du sol peut se produire dans 2 cas :

- 1^{er} cas : le sol est humidifié sous charge externe constante, ce qui entraîne la disparition des effets de la succion entraînant un effondrement lié à la présence des zones composées par de grains propres de limon et faiblement cimentées.
- 2^{ème} cas : une charge externe est appliquée et les agrégats de limon-argile s'effondrent et remplissent les gros pores qu'on observe à l'état intact.

D'après Alonso (ALONSO, et al., 1987), le comportement d'effondrement se manifeste souvent dans des sols fins dans lesquels les particules de silt ou de sable sont présentes en grande proportion. Les agrégats d'argiles peuvent s'écraser sous une augmentation des contraintes externes. Les gros pores entre les agrégats peuvent alors être remplis soit par les agrégats déformés, soit par les grains indéformables. Une forte réduction de ces pores peut se traduire par une contraction volumique macroscopique du sol et peut causer éventuellement un effondrement.

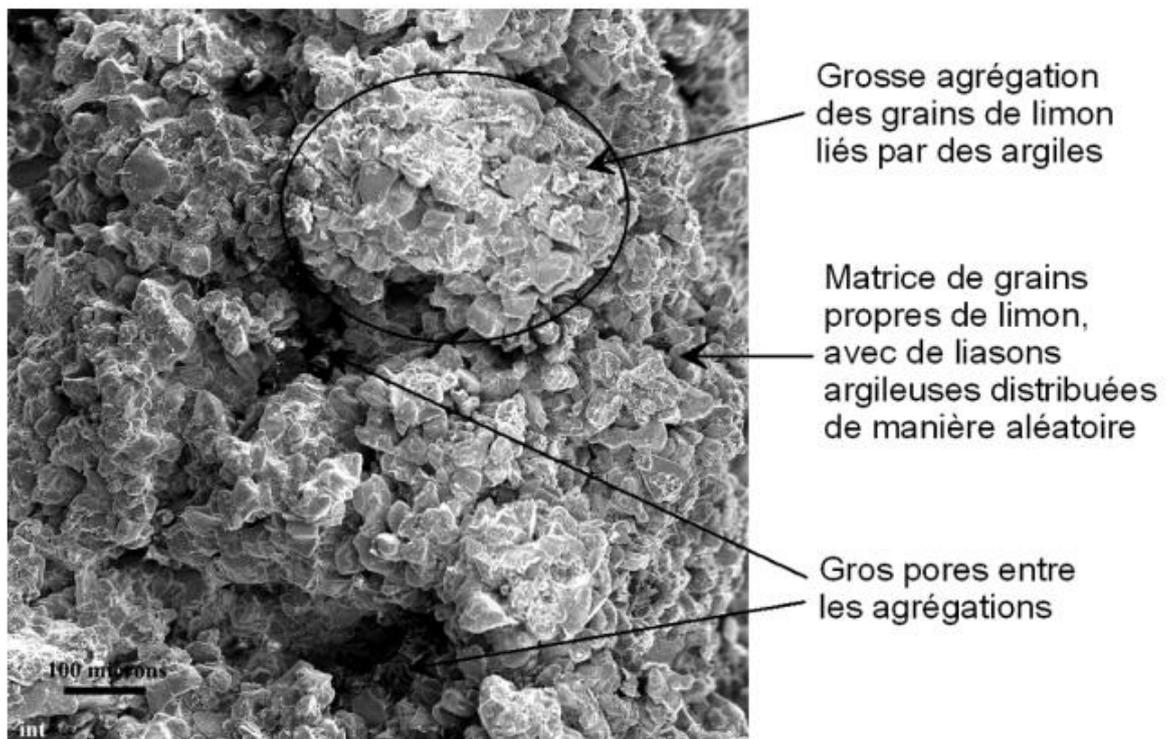


Figure I-38 : Structure d'un échantillon de loess du Nord de la France (MUNOZ-CASTELBLANCO, 2011)

I.5.5 Influence la succion sur la structure interne des sols

Figure I-39 montre l'influence de la succion sur la structure interne d'un limon sableux compacté et saturé (CUISINIER & LALLOUI, 2004). Une augmentation de succion de 0 à 400 kPa entraîne une réduction de manière significative de la macroporosité de rayons variant de 2 à 7 μm . A noter que les rayons inférieurs à 0.1 μm sont inchangés par le changement de succion. Seule une relative augmentation des micropores est observée en parallèle de la diminution des macropores. En comparant les résultats, il semble que le processus de séchage induit une réduction de certaines classes de macropores et laisse intacts les micropores.

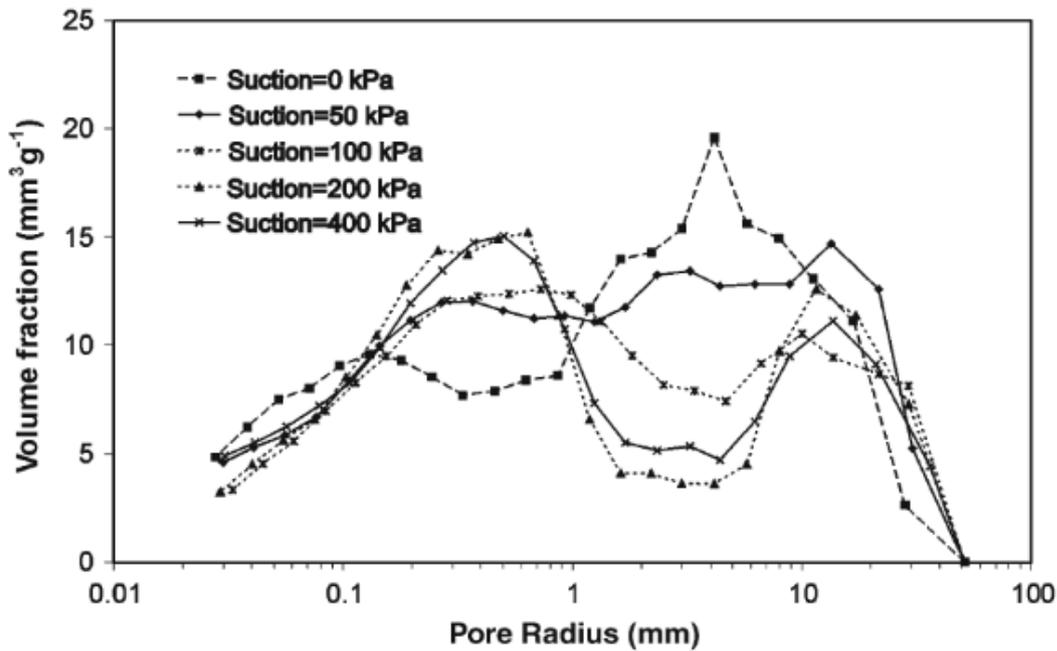


Figure I-39 : Essai de porosimétrie au mercure sur un sol limon sableux compacté à différentes succions (CUISINIER & LALOUÏ, 2004)

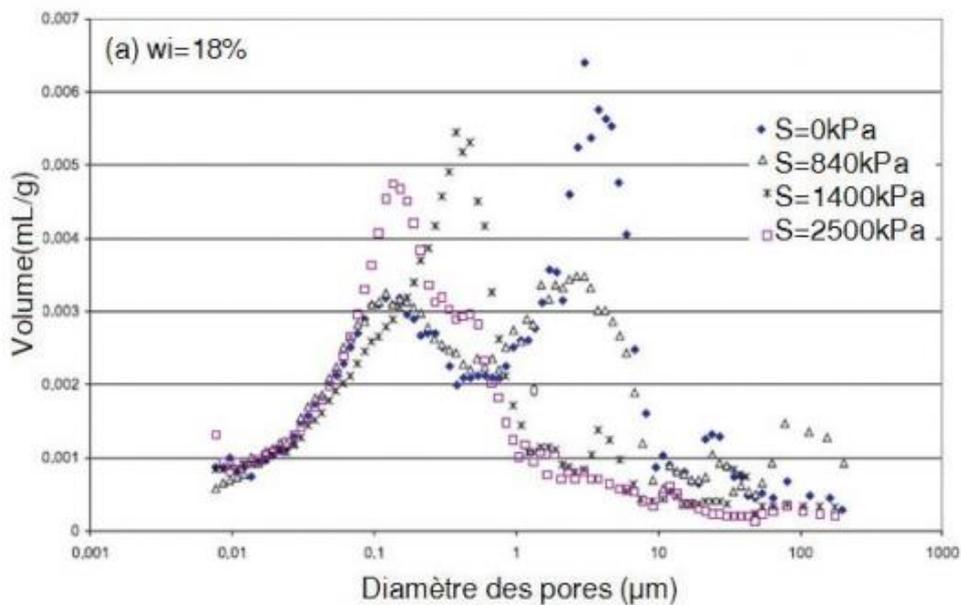


Figure I-40 : Evolution de la microstructure d'un till compacté du côté humide avec la variation de succion entre 0 et 2500kPa (SIMMS & YANFUL, 2002)

Un autre résultat de (SIMMS & YANFUL, 2002) représenté sur la Figure I-40, montre l'évolution de la courbe porosimétrie d'un échantillon de till compacté du côté humide à une teneur en eau de 18 % soumis directement à différents niveaux de succion sans passer par la phase de saturation. Pour de faible succion, 0 kPa à 840 kPa, le matériau présente une structure bimodale avec deux familles séparées de micropores et macropores. Pour les succions plus élevées, une structure unimodale a été observée avec une réduction de la famille des

macropores. Le séchage entraîne une diminution de la porosité totale donc une contraction macroscopique. Cette diminution de porosité est générée par une réduction des macropores associée à une augmentation de la quantité de micropores.

I.6 Influence des paramètres liés au compactage sur chemin de drainage-imbibition

Figure I-41 montre les résultats d'essais de drainage-imbibition sur l'argile de Boom compactées à deux densités sèches différentes (ROMERO, 1999). Les courbes de rétentions dépendent fortement de l'énergie de compactage. Le chemin de drainage-imbibition peut être divisé en 2 zones :

- A faible succion ($s < 2$ MPa), la succion est gouvernée par les pores inter-agrégats. Les courbes de l'échantillon compacté à l'énergie de compactage plus élevée ($\rho = 16.7$ kN/m³) se situent au-dessus des courbes de l'échantillon moins dense ($\rho = 13.7$ kN/m³)
- Avec la succion plus élevée ($s > 2$ MPa), la succion est gouvernée par les pores intra-agrégats. Dans le plan (teneur en eau – succion), dans cette zone, les courbes de drainage-imbibition semblent indépendantes de la densité sèche initiale. Toutefois dans le plan (Degré de saturation – succion), les courbes se distinguent nettement.

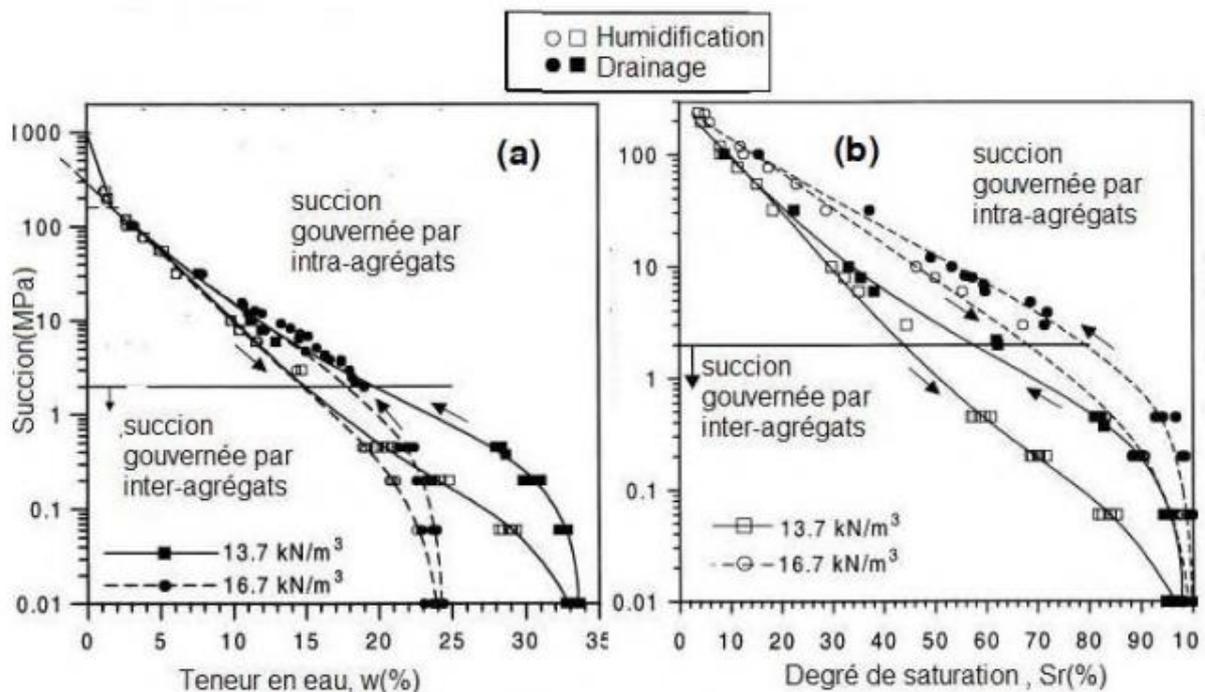


Figure I-41 : Chemin de drainage-imbibition de l'argile de Boom compactée à deux densités différentes (ROMERO, 1999)

Vanapalli et al (VANAPALLI, et al., 1999) ont réalisé les essais de drainage sur des échantillons d'argile sableuse ($w_L = 36$ %, $I_p = 19$ %) compactés à la même énergie de compactage mais à différents teneurs en eau (optimum Proctor, côté sec de l'optimum et côté humide de l'optimum). Les résultats sont présentés sur la Figure I-42 :

Globalement, on observe que :

- La courbe de drainage du côté sec est nettement séparée avec les courbes à l'Optimum Proctor et du côté humide.
- Dans le domaine des succions inférieures à 2 MPa pour lequel la succion est gouvernée par les pores inter-agrégats, il apparaît qu'à même degré de saturation, la succion est toujours plus forte dans l'échantillon préparé du côté humide ; ce qui tend à montrer que la taille des pores doit être plus petites pour cet échantillon.
- La succion d'entrée d'air augmente lors la teneur en eau de compactage augmente.

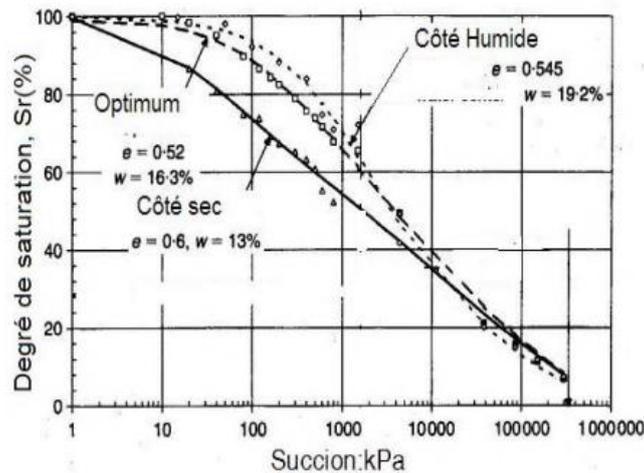


Figure I-42 : L'essai de drainage sur l'argile sableuse compactée à des teneurs en eau différentes (VANAPALLI, et al., 1999)

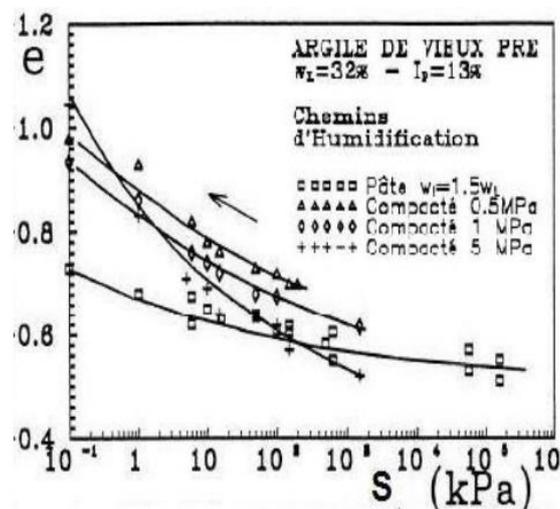


Figure I-43 : Chemin d'humidification sur l'argile de Vieux Pré compactée à différentes contraintes (TAIBI, 1994)

Les résultats de Taibi (TAIBI, 1994) sur l'argile de Vieux Pré compactée à différentes contraintes représentent l'influence de l'énergie de compactage sur le chemin d'imbibition. Le gonflement observé est d'autant plus important que l'énergie de compactage est élevée, et ce gonflement apparaît essentiellement dans le domaine des faibles succions. (Figure I-43)

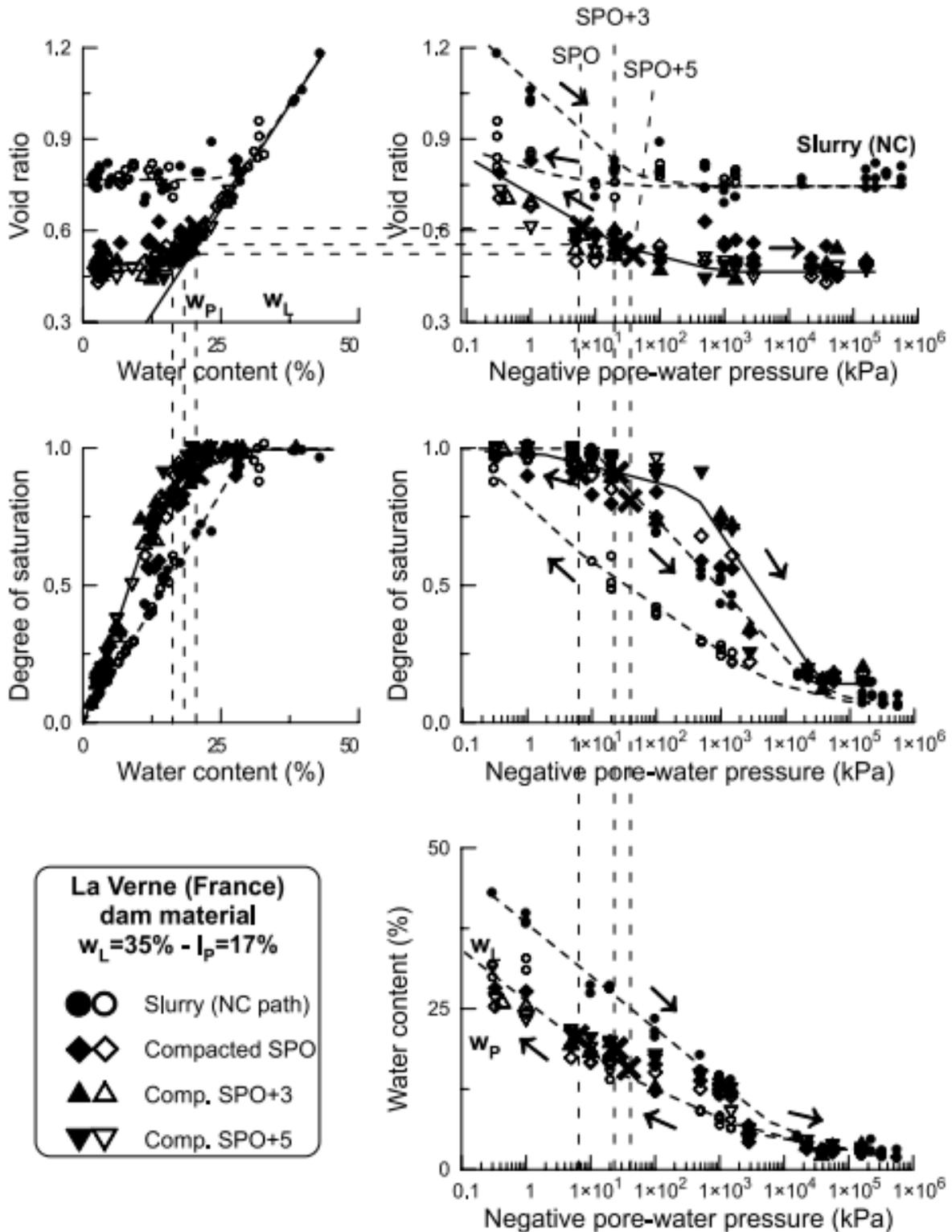


Figure I-44 : Essai de rétention d'eau sur l'argile de la Verne compacté à teneur en eau différentes du côté humide (FLEUREAU, et al., 2002)

La Figure I-44, présentant les résultats des essais de Fleureau (FLEUREAU, et al., 2002) sur le matériau de la Verne à différentes teneurs en eau (OPN, OPN+3% et OPN+5%). Ces résultats montrent que :

- Il est possible d'observer la réversibilité de chemin drainage-imbibition pour les sols compactés à Proctor Normal ou à Proctor Modifié, par contre, d'après ces auteurs, il y a probablement une énergie de compactage minimum requise pour obtenir la réversibilité des chemins.
- Les sols compactés à une teneur en eau supérieure à celle de l'optimum (côté humide), suivent le même chemin d'humidification avec le sol compacté à l'optimum dans le cas du matériau de La Verne.

I.7 Conclusions

A travers ce chapitre, les principales caractéristiques du comportement hydromécanique des sols compactés ont été décrites. Elles peuvent être résumées de la façon suivante :

Concernant le compactage au Proctor

- Pour un même type de sol, l'augmentation de l'énergie de compactage se traduit par une augmentation de la masse volumique optimum du sol et par une diminution de la valeur de la teneur en eau à l'optimum.

Sur la microstructure du sol :

- La double structure est plus marquée pour les sols compactés du côté sec de l'optimum, alors qu'à l'optimum et du côté humide la microstructure est plutôt homogène, et sa distribution porale présente un caractère unimodal (pores intra-agrégats).
- Une sollicitation hydrique conduit à une variation du volume des pores de petite dimension, qui sont probablement localisés au sein des agrégats argileux.
- Le volume inter-agrégats est aussi soumis à des variations de volume lors de sollicitation hydriques ou mécaniques, mais seulement par une diminution de volume : une augmentation de la teneur en eau réduit le volume inter-agrégats.
- L'énergie de compactage influence fortement sur la structure interne des sols : ainsi une augmentation de l'énergie de compactage est susceptible d'entraîner l'écrasement des macropores (pores intra-agrégats) lorsque ceux-ci existent.
- L'augmentation de succion entraîne une diminution de la porosité totale donc une contraction macroscopique. Cette diminution de porosité est générée par une réduction des macropores et une augmentation en parallèle de la quantité de micropores.

Sur le chemin drainage-imbibition :

- Dans le cas de matériaux normalement consolidés, les déformations volumiques du matériau sont irréversibles pour des succions inférieures à la succion de retrait.
- Dans le cas des sols compactés :
 - o L'hystérésis des courbes de rétention obtenues sur chemin de drainage - humidification tend à disparaître avec l'augmentation de l'énergie de compactage, il peut exister une contrainte de compactage limite à partir de laquelle les chemins de drainage et d'imbibition deviennent quasi-réversibles.

- A faible succion, une augmentation de l'énergie de compactage cause l'augmentation de la valeur de succion d'entrée d'air sur le chemin de drainage.
- Sur le chemin d'imbibition, l'augmentation de l'énergie de compactage engendre un gonflement plus important du sol.

Chapitre II : Caractérisation physique et comportement mécanique de référence du matériau de Gavet

II.1 Introduction

Ce chapitre présente d'une part les résultats des essais de caractérisation physique du sol étudié dans cette thèse, d'autre part les résultats des essais de caractérisation mécanique de référence réalisés sur ce même matériau.

Les essais de caractérisation physique réalisés comprennent : les analyses granulométrique et sédimentométrique, la mesure de la densité des grains solides (ρ_s), la détermination des limites d'Atterberg (limite de liquidité w_L et limite de plasticité w_P), la mesure de la valeur de bleu (VBS), la mesure de densité et de teneur en eau optimales de compactage (essai Proctor).

Les essais de caractérisation mécanique de référence ont été réalisés sur la frange passante à 2 mm du matériau étudié. Lors de ces essais, le matériau est préalablement saturé en eau. Ces essais comprennent :

- des essais de chargement sur chemins œdométriques. Ces essais ont été réalisés sur le matériau à l'état de pâte (préparée à $1.5 w_L$) ainsi que sur le matériau compacté à différentes teneurs en eau dans un moule Proctor avec une énergie de 25 coups par couche puis saturé.
- des essais de mesure de la perméabilité à l'eau réalisés lors des paliers de chargements œdométriques.
- des essais triaxiaux de révolution permettant d'étudier le comportement du matériau sous chargements isotrope (phase de consolidation) et déviatorique. Ces essais menés en condition drainée ou non drainée (avec mesure de la pression interstitielle) ont été réalisés d'une part sur le matériau préparé à la teneur en eau de l'optimum Proctor (w_{OPN}) et compacté avec une énergie de 25 coups par couche, d'autre part sur des échantillons confectionnés à partir du matériau à l'état sec (poudre), compactés à une densité voisine de celle de l'optimum Proctor ($\rho_d=0.91\rho_{d\text{ OPN}}$) puis saturés.

II.2 Caractérisation physique du sol étudié

II.2.1 Matériau réceptionné :

Le sol étudié dans cette thèse nous a été fourni par la société Egis Géotechnique dans le cadre du projet ANR TerreDurable. Il a été prélevé en amont du village de Livet (38) sur le chantier du barrage prise d'eau du projet d'aménagement hydroélectrique Romanche Gavet conduit par EDF. Après prélèvement, ce matériau a été conditionné dans des sacs plastiques étanches.

Environ 150 kg de ce matériau ont été réceptionnés le 13 janvier 2013 à l'ENTPE. Ce matériau présente une couleur grise – noire (Figure II-1). La teneur en eau « naturelle » mesurée à l'ouverture des sacs plastiques était de l'ordre de 12 %. Le stock de matériau reçu a été partagé en 3 parties : 6 kg de matériau ont été prélevés aléatoirement pour une analyse granulométrique globale, la moitié du matériau restant a été criblé à 20 mm, l'autre moitié a été criblé à 2 mm (Figure II-2).



Figure II-1 : Matériau Gavet naturel (état sec)



Figure II-2 : Matériau Gavet passant à 2 mm (état sec)

II.2.2 Analyse granulométrique

Deux analyses granulométriques ont été menées selon la norme française NF P 94-057 sur le matériau de Gavet. La première analyse a été réalisée par tamisage (diamètres des grains compris entre 0.1 mm et 100 mm) sur le matériau naturel (points bleus sur les Figure II-3, Figure II-4 et Figure II-5). La seconde analyse a été conduite sur la frange passante à 2 mm (points rouges sur les Figure II-3, Figure II-4 et Figure II-5) par tamisage (diamètres des grains supérieurs à 80 μ m) et par sédimentométrie (diamètres des grains inférieurs à 80 μ m).

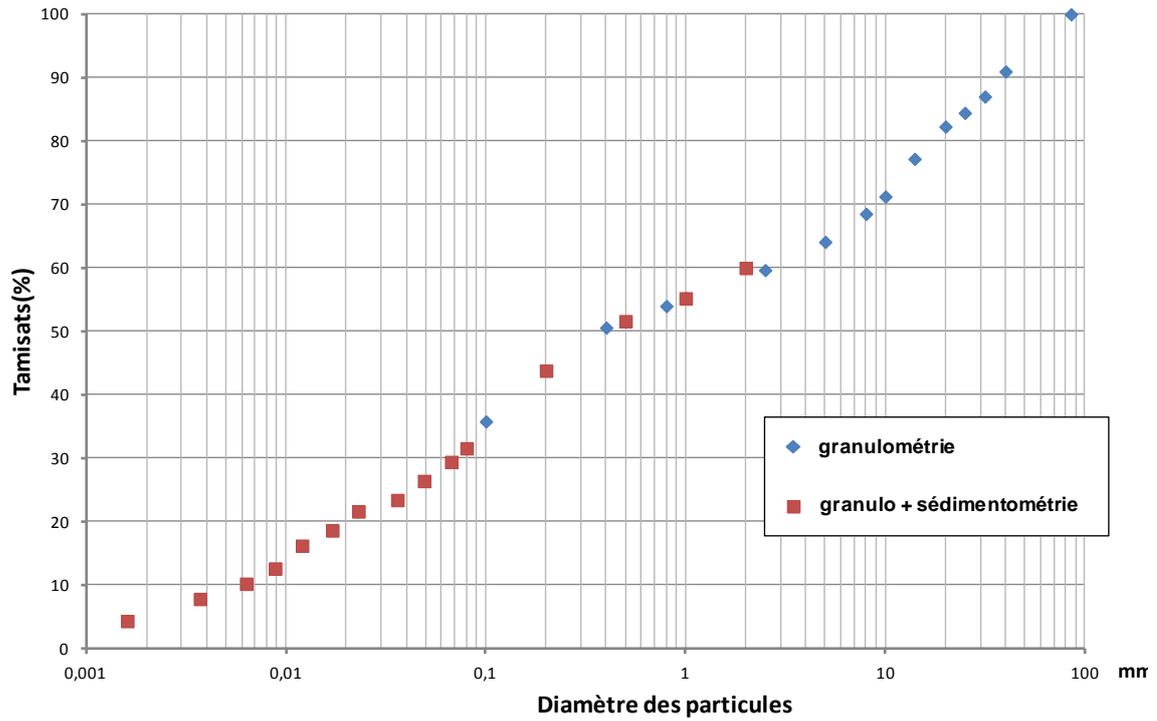


Figure II-3: Courbe granulométrique du matériau Gavet naturel

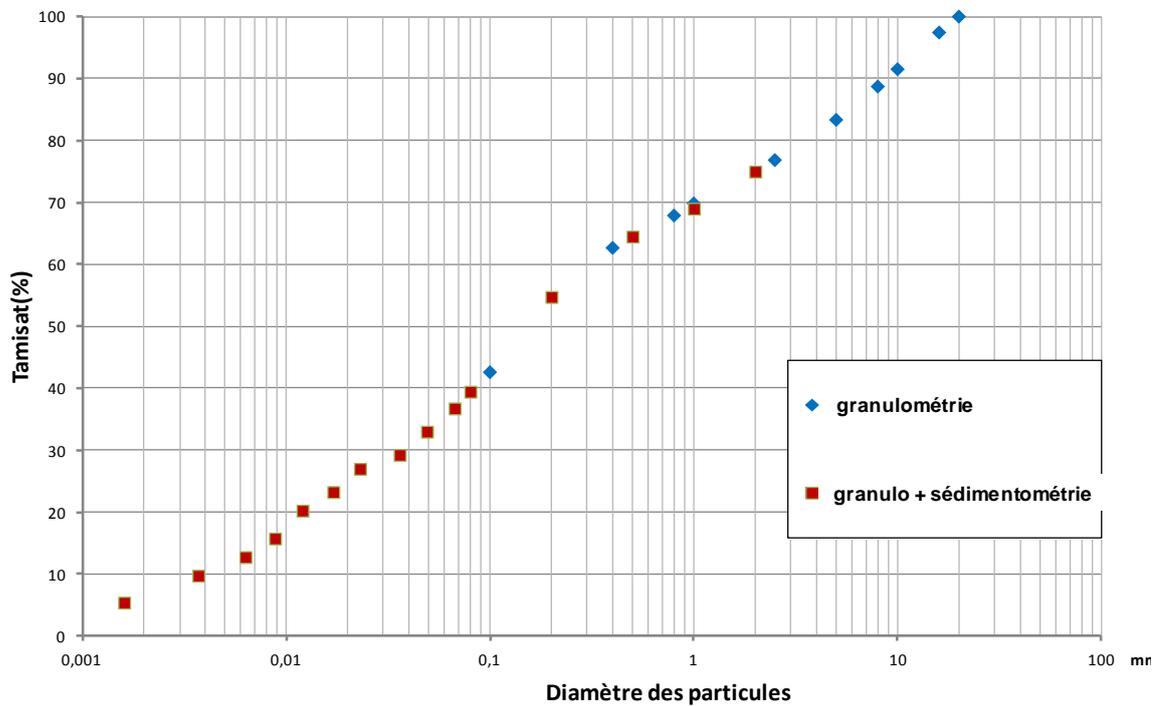


Figure II-4 : Courbe granulométrique du matériau Gavet passant à 20 mm (déduite de la courbe granulométrique du matériau naturel donnée Figure II-3)

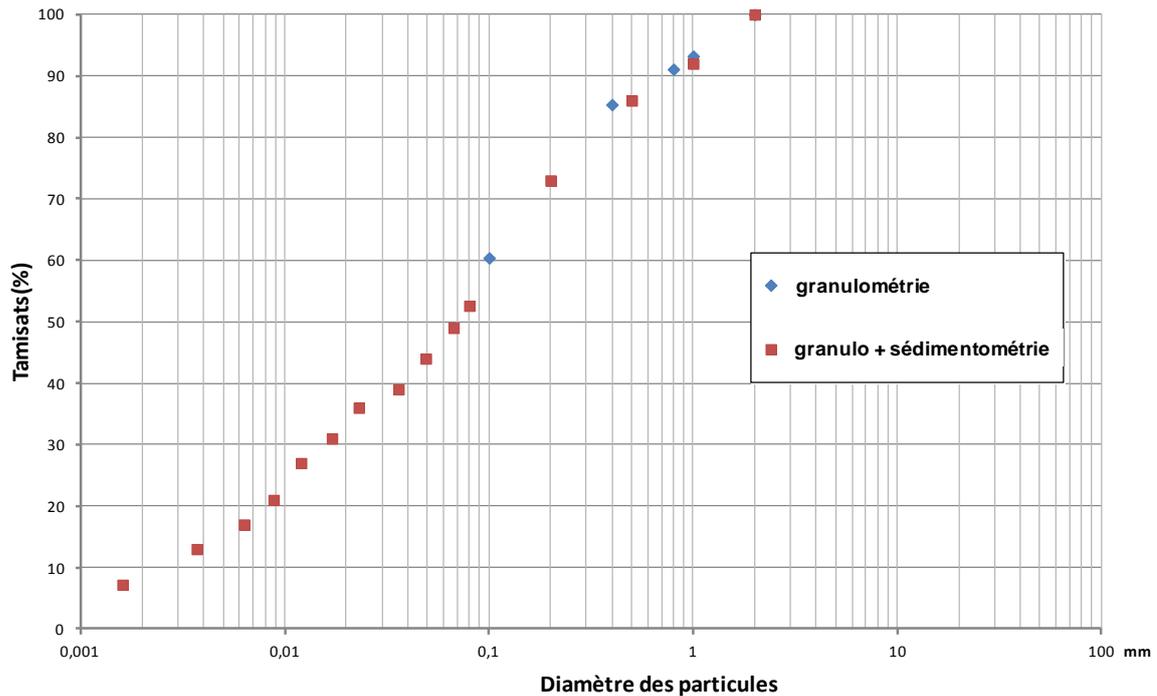


Figure II-5 : Courbe granulométrique du matériau Gavet passant à 2 mm

Les résultats de ces deux analyses granulométriques montrent une bonne correspondance des répartitions granulométriques obtenues lors de ces deux essais. Le tableau ci-après donne pour les deux échantillons étudiés (matériau Gavet naturel, matériau Gavet passant à 2 mm) les coefficients caractéristiques de leur courbe granulométrique respective: diamètre moyen (d_{50}), coefficient d'uniformité ($C_u = d_{60}/d_{10}$), coefficient de courbure ($C_c = d_{30}^2/d_{10} \times d_{60}$).

	Matériau Gavet naturel	Matériau Gavet passant à 2 mm
$d_{50}(mm)$	0.4	0.07
$C_u = d_{60}/d_{10}$	31.2	33
$C_c = d_{30}^2/d_{10} \times d_{60}$	0.25	0.75

Tableau II-1 : Coefficients caractéristiques des courbes granulométriques du matériau Gavet.

Les essais réalisés dans la suite de ce travail de thèse seront menés presque exclusivement sur la frange passante à 2 mm du matériau de Gavet puisqu'il est connu que se sont les particules fines qui contrôlent le comportement hydromécanique des sols. Pour cette frange passante à 2 mm, le pourcentage des particules inférieures à 80 μm est de 53 %. Selon la classification GTR, le matériau Livet-Gavet passant à 2 mm est de type **sable fin limoneux**.

II.2.3 Masse volumique des grains solides ρ_s

Une série de sept essais de mesure au pycnomètre a été réalisée pour déterminer la masse volumique des grains (ρ_s). Celle-ci est égale à la masse des grains solides (m_s) divisée par le volume des particules solides (V_s). Ces essais ont été réalisés selon la norme française NF P 94-054

Pour chaque essai au pycnomètre, 250 g de matériau passant à 2 mm ont été utilisés. Lors de ces essais, l'évacuation des bulles d'air contenu dans le mélange (eau distillée / sol) a été réalisée par agitation en continue de la solution à l'aide d'un barreau magnétique et aspiration à l'aide d'une pompe à vide (nous n'avons pas eu recours à un chauffage de la solution).

Les résultats des sept essais sont présentés dans le tableau après.

n° d'essai	1	2	3	4	5	6	7
ρ_s mesuré (g/cm ³)	2.73	2.73	2.73	2.70	2.72	2.71	2.72

Tableau II-2 Résultats des essais de mesure de la masse volumique des grains du matériau Gavet.

Dans la suite de ce travail, nous considérerons pour le matériau de Gavet passant à 2 mm une masse volumique moyenne des grains solides égale à **2.72 g/cm³**.

II.2.4 Limites d'Atterberg

Plusieurs séries d'essais ont été conduites pour déterminer la limite de liquidité (w_L) et la limite de plasticité (w_P) du matériau de Gavet selon la norme française NF P 94-051.

La limite de liquidité (w_L) représente la teneur en eau massique du matériau à la limite entre l'état liquide et l'état plastique. Dans notre cas, nous avons déterminé cette limite à la coupelle de Casagrande (w_L correspond à la teneur en eau pour laquelle l'incision faite dans le matériau se referme après 25 chocs).

La limite de plasticité (w_P) représente la teneur en eau massique du matériau à la limite entre l'état plastique et l'état solide. Elle correspond à la teneur en eau limite pour laquelle il est possible de confectionner en les roulant sur un marbre des petits rouleaux de matériau de 10 cm de longueur et 3 mm de diamètre sans les fractionner.

Deux séries de quatre essais ont été réalisées pour mesurer ces deux limites sur le matériau Gavet passant à 2 mm. Les résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

n° d'essai	E1	E2	E3	E4
Limite de liquidité WL (%)	28.9	29.5	29	28.6

Tableau II-3 Résultats des essais de mesure de limite de liquidité du matériau Gavet.

n° d'essai	E5	E6	E7	E8
Limite de plasticité w_P (%)	21	22	20	22

Tableau II-4 Résultats des essais de mesure de limite de plasticité du matériau Gavet.

Sur la base de ces deux séries d'essais, nous retiendrons pour le matériau Gavet passant à 2 mm, **une limite de liquidité moyenne (w_L) de 29 % et une limite de plasticité moyenne (w_P) de 21.5 %.**

Par conséquent **l'indice de plasticité (I_P) du matériau Gavet passant à 2 mm, correspondant à la différence entre limite de liquidité et limite de plasticité, sera considéré compris entre 7 % et 8 %.**

II.2.5 Valeur de bleu de méthylène

L'essai au bleu de méthylène est une méthode de mesure de la surface spécifique totale des particules argileuses contenu dans un sol et permet de caractériser l'activité des sols argileux. Cet essai est basé sur le principe que le bleu de méthylène est adsorbé préférentiellement par les argiles en solution aqueuse. La valeur de bleu de méthylène du sol (VBS) représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules de sol. Etant donné que dans un sol c'est avant tout, la surface spécifique des particules argileuses qui détermine sa surface spécifique totale, on peut considérer que la VBS exprime globalement la quantité et l'activité de l'argile contenue dans ce sol.

Trois essais au bleu de méthylène ont été réalisés selon la norme NF P 94-068. Pour déterminer la VBS, nous avons travaillé sur la fraction 0/5 mm du matériau. Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène. A chaque ajout, on contrôle l'adsorption du sol en prélevant une goutte de suspension que l'on dépose sur un papier filtre normalisé pour faire une tache. L'adsorption maximale est atteinte quand une auréole bleu clair se produit à la périphérie de la tâche. La valeur de bleu du sol (VBS) est alors rapportée à la fraction 0 – 50 mm du sol par une simple règle de proportionnalité. La VBS s'exprime en gramme de bleu pour 100 g de sol

Les résultats des trois essais au bleu de méthylène réalisés sur le matériau de Gavet sont donnés dans le tableau ci-dessous. Ces essais ont montré une très bonne répétabilité de la valeur de bleu mesurée. **Nous retiendrons que le matériau de Gavet étudié présente une valeur de bleu (VBS) égale à 0.18.**

n° d'essai	E9	E10	E11
Valeur de bleu VBS	0.18	0.18	0.18

Tableau II-5 Résultats des essais au bleu de méthylène sur le matériau Gavet.

II.2.6 Classification du matériau

Sur la base des caractéristiques physiques du matériau Gavet déterminées précédemment, il est possible de classer ce matériau selon les classifications LCPC et GTR.

Le matériau Gavet passant à 2 mm sur lequel seront réalisés la plupart des essais de cette thèse est composé de plus de 50 % d'éléments fins ($D < 80 \mu\text{m}$) (Figure II-5). Ce matériau présente un indice de plasticité I_p compris entre 7 et 8 %, une limite de liquidité et une valeur de bleu (VBS) de 0.18.

Selon la classification LCPC, ce matériau s'apparente à un sable limoneux peu plastique (Figure II-6 et Figure II-7). Selon la classification du Guide Technique Routier (GTR), ce sol est de type A1 (Figure II-8 et Figure II-9).

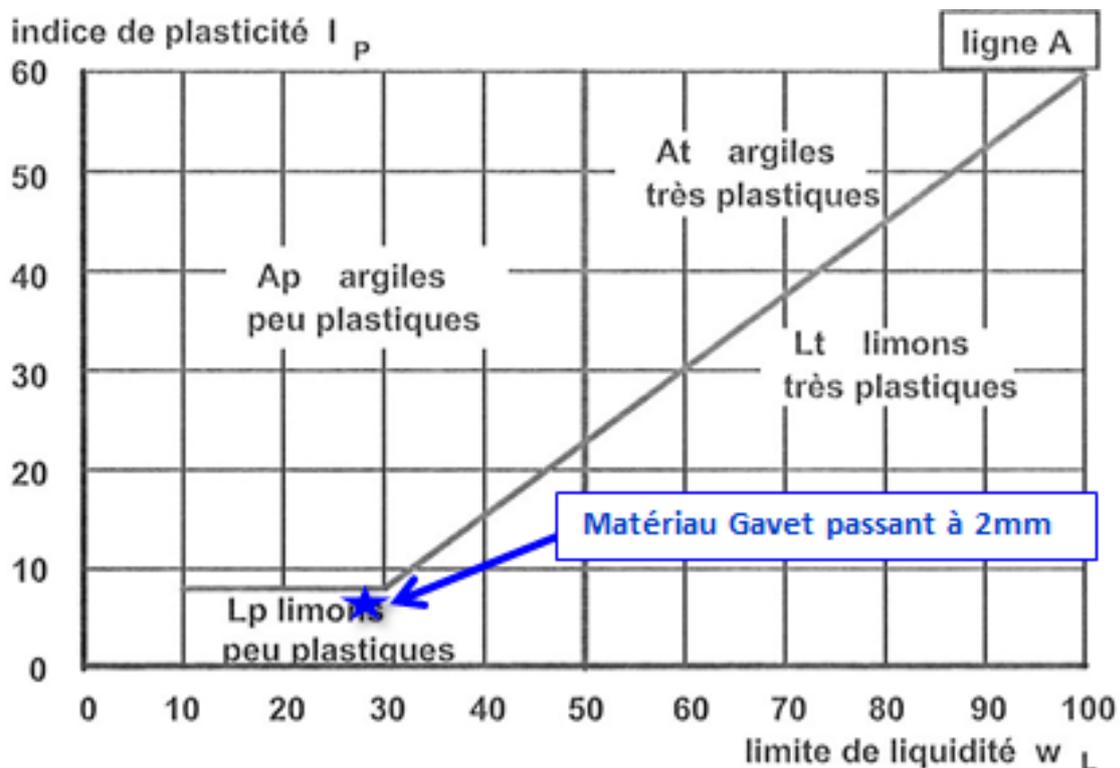


Figure II-6 : Classification du matériau Gavet passant à 2 mm selon LCPC

Sables	Plus de 50% des éléments >80µm ont un diamètre <2 mm	Moins de 5% des éléments <80µm	Sb	$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} > 6$ Et $1 < C_C = \frac{(d_{30})^2}{d_{10}d_{60}} < 3$	Sable propre bien gradué
			Sm	Une des conditions de Sb non satisfaite	Sable propre mal gradué
		Plus de 12% des éléments <80µm	SL	Limites d'Atterberg au-dessous de A	Sable limoneux
			SA	Limites d'Atterberg au dessus de A	Sable argileux

Figure II-7 : Classification du matériau Gavet passant à 2 mm selon LCPC (suite)

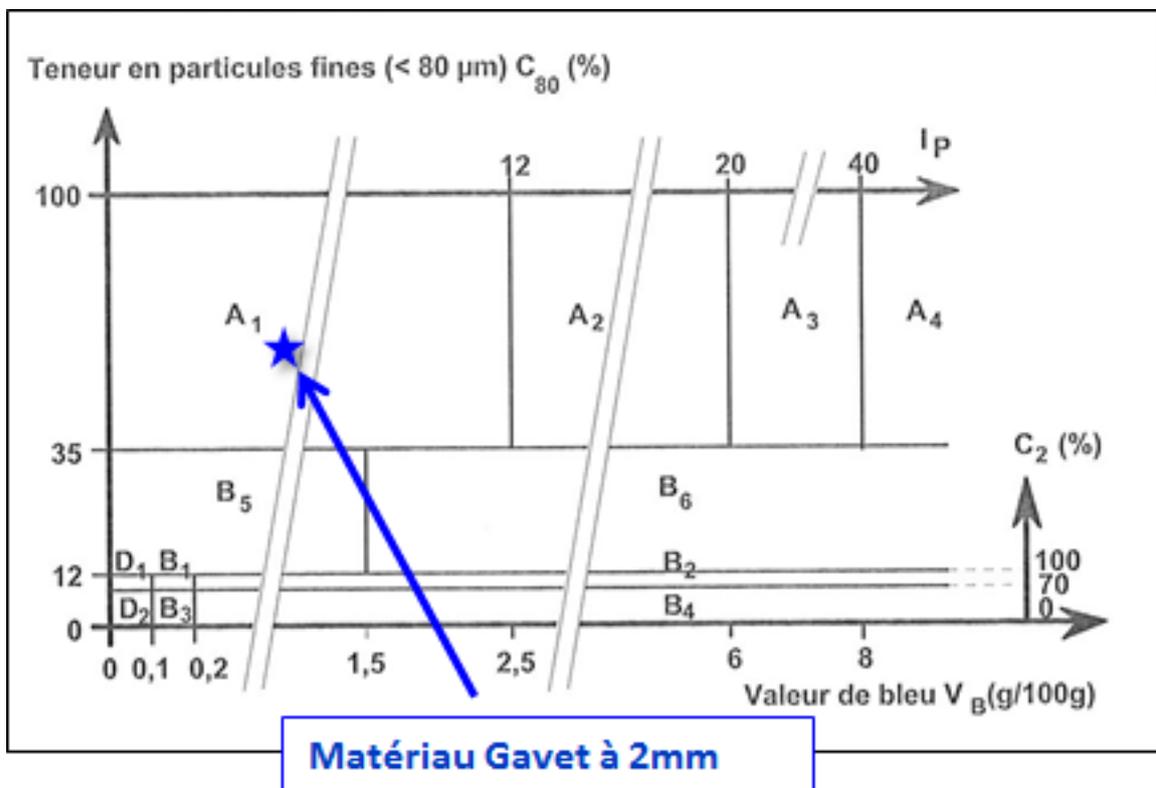


Figure II-8 : Classification du matériau Gavet passant à 2 mm selon GTR

CLASSE A : SOLS FINS			
Paramètres de nature 1 ^{er} niveau de classification	Classe	Paramètres de nature 2 ^{eme} niveau de classification	Sous classe fonction de la nature
$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ Et $T_{80\mu\text{m}} > 35\%$	A Sols fins	$VBS \leq 2,5$ ou $I_p \leq 12$	A1 : Limons peu plastiques Loess, Silts alluvionnaires, Sables fins peu pollués, Arènes peu plastiques,
		$2,5 \leq VBS \leq 6$ Ou $12 \leq I_p \leq 25$	A2: Sables fins argileux, Limons, Argiles et marnes peu plastiques, Arènes
		$6 \leq VBS \leq 8$ Ou $25 \leq I_p \leq 40$	A3: Argiles et argiles marnieuses Limons très plastiques
		$VBS > 8$ ou $I_p > 40$	A4: Argiles et argiles marnieuses très plastiques

Figure II-9 : Classification du matériau Gavet passant à 2 mm selon GTR (suite)

II.2.7 Densité sèche et teneur en eau optimales de compactage :

La densité sèche optimale et la teneur en eau optimale de compactage du sable limoneux de Gavet ont été déterminées à l'essai Proctor.

Cet essai consiste à humidifier le matériau étudié à différentes teneurs en eau et à le compacter par couches à l'intérieur d'un moule cylindrique rigide de dimension définies. L'énergie de compactage est fonction du nombre imposé de coups de dame par couche (la masse de la dame et sa hauteur de chute sont constantes durant l'essai). Pour chaque valeur de teneur en eau considérée, on détermine la densité sèche du matériau après compactage et on trace la courbe densité sèche en fonction de la teneur en eau (courbe Proctor).

Sur la courbe Proctor, il existe généralement une valeur de densité sèche maximale obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ces deux valeurs s'appellent densité sèche optimale (ρ_{dOPN}) et teneur en eau optimale (w_{OPN}) de compactage.

Dans le cadre de cette thèse, les essais Proctor réalisés sur le matériau de Gavet sont des essais Proctor Normal. Ils ont été réalisés dans un moule CBR selon la norme NFP 94-093 (masse de la dame : 2490 g, diamètre du mouton: 51 mm, hauteur de chute: 305 mm, nombre de couches: 3).

Pour le matériau Gavet passant à 2 mm, deux courbes Proctor ont été déterminées (Figure II-10). Celles-ci correspondent à deux niveaux d'énergie de compactage : 55 coups par couche (ce qui correspond à la norme pour l'obtention de ρ_{dOPN} dans le cas du moule CBR) et 25 coups par couche.

A titre comparatif, nous avons également déterminé la courbe Proctor du matériau de Gavet passant à 20 mm (Figure II-11).

Sur la base des résultats présentés Figure II-10 et Figure II-11, les remarques suivantes peuvent être faites :

- Les courbes Proctor obtenues pour le sable limoneux de Gavet présentent une forme en cloche assez prononcée caractéristique des matériaux faiblement argileux et qui témoigne de l'influence de la teneur en eau sur la capacité de compactage du sol.
- Dans le cas du matériau passant à 2 mm, l'augmentation de l'énergie compactage (de 25 coups par couche à 55 coups) entraîne une augmentation de la densité sèche optimale et une diminution de la teneur en eau optimale.
- Pour une teneur en eau optimale quasi – identique (10.8 % contre 11.2 %), le matériau de Gavet passant à 20 mm présente une densité sèche optimale (1.98 g/cm^3) supérieure à celle du matériau de Gavet passant à 2 mm (1.87 g/cm^3). Ce résultat peut s'expliquer par un meilleur étalement de la granulométrie des particules solides dans le cas du matériau passant à 20 mm.
- A l'optimum Proctor, le degré de saturation du sable limoneux de Gavet passant à 2 mm est relativement faible (67 %). Il est de 80 % dans le cas du matériau de Gavet passant à 20 mm.

Les valeurs des teneurs en eau optimales et densités sèches optimales pour le sable limoneux de Gavet sont rassemblées dans Tableau II-6.

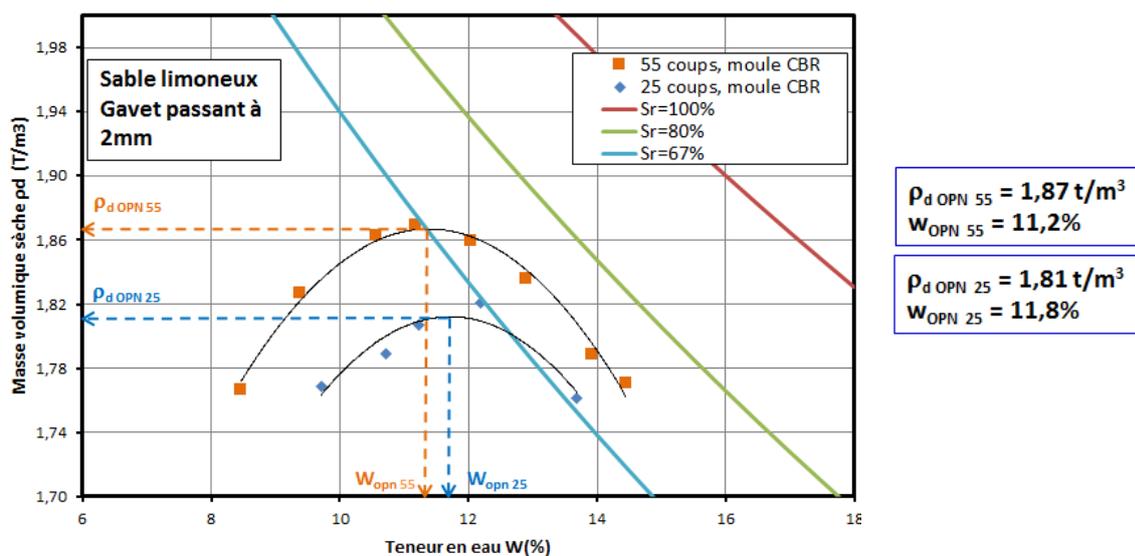


Figure II-10 : Courbes Proctor pour deux niveaux d'énergie (25 coups et 55 coups par couche) du sable limoneux de Gavet passant à 2 mm

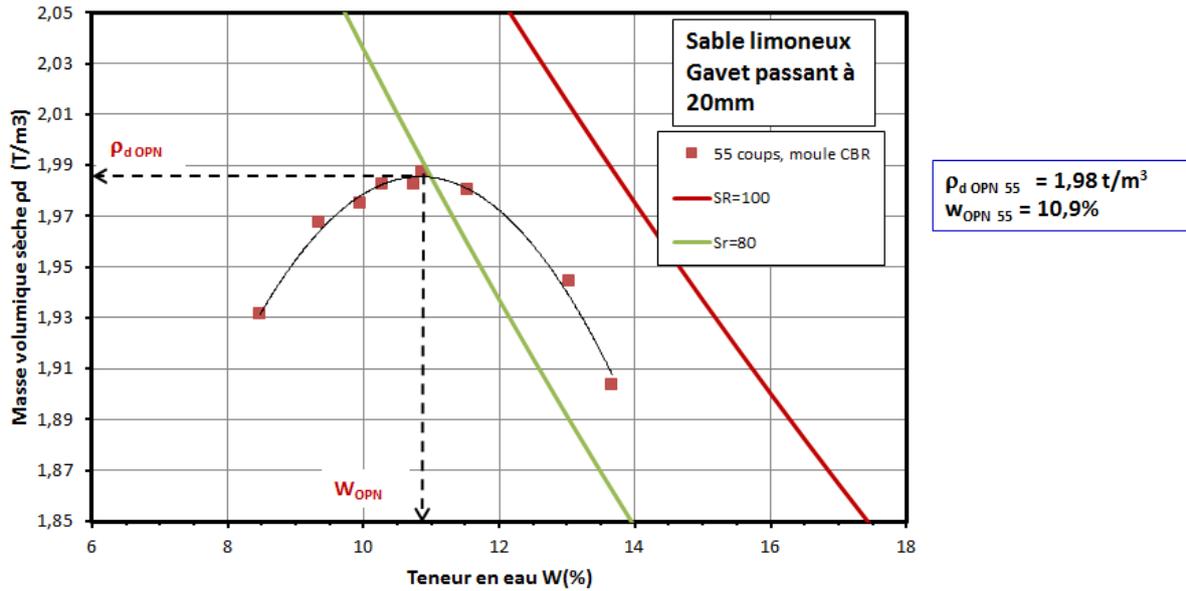


Figure II-11 : Courbes Proctor du sable limoneux de Gavet passant à 20 mm

Matériau / énergie de compactage	ρ_{dOPN} (g/cm ³)	W _{OPN} (%)
Sable limoneux Gavet (passant à 2 mm) / 25 coups par couche	1.81	11.8
Sable limoneux Gavet (passant à 2 mm) / 55 coups par couche	1.87	11.2
Sable limoneux Gavet (passant à 20 mm) / 55 coups par couche	1.98	10.9

Tableau II-6 Résultats des essais Proctor Normal sur le sable limoneux de Gavet.

II.3 Comportement de référence sur chemin œdométrique.

L'objectif de ce paragraphe est d'étudier le comportement du sable limoneux de Gavet sur chemin de chargement œdométrique afin d'en déduire les paramètres caractéristiques de consolidation de ce matériau (coefficient de consolidation C_v , coefficient de compressibilité C_c , coefficient de gonflement C_s , contrainte de pré-consolidation σ'_p).

Ces essais de référence ont été réalisés sur le sable limoneux passant à 2mm. Deux états initiaux du matériau ont été considérés. D'une part des essais œdométriques ont été réalisés sur le sable limoneux pris à l'état de pâte et préparé à une teneur en eau égale à la limite de liquidité (w_L =

29 %). Dans ce cas le matériau est considéré comme normalement consolidé (NC). D'autre part, des essais œdométriques ont été réalisés sur le sable limoneux de Gavet compacté en moule CBR à 25 coups par couche ($\rho_{d\text{ OPN}25}$) à la teneur en eau optimale ($w_{\text{OPN}25}$) puis saturé (cf Figure II-10). Dans ce cas, le matériau est considéré comme sur-consolidé (OC).

II.3.1 Dispositif expérimental

Les essais œdométriques réalisés dans le cadre de cette thèse ont été menés à l'aide de dispositifs d'œdomètre – perméamètre disponibles au laboratoire. Grâce à ces appareils, il est possible de réaliser des mesures de la perméabilité de l'échantillon de sol en parallèle de son chargement œdométrique.

Chaque dispositif d'œdomètre – perméamètre est constitué de (Figure II-12 et Figure II-13) :

- une cellule œdométrique - perméamétrique (embase, corps central, piston, modèle VJT 0650, de marque VJTech) pouvant accueillir un échantillon de sol de diamètre : 70 mm, hauteur : 20 mm, placé au sein d'une bague œdométrique (trousse coupante). L'embase et le piston sont munis de pierres poreuses permettant l'évacuation de l'eau contenue dans l'échantillon. Le corps central de la cellule qui entoure l'éprouvette de sol interdit toute dilatation radiale du sol de sorte que les déformations qui se produisent lorsqu'on exerce une pression sur le piston sont uniquement verticales (ou axiales)
- un tableau perméamétrique équipé d'un tube (diamètre : 2 mm, hauteur : 500 mm) relié à la cellule œdométrique – perméamétrique, donc à l'éprouvette de sol, et permettant d'imposer une charge hydraulique variable à la base de l'échantillon de sol,
- un bâti métallique sur lequel est placé la cellule œdométrique – perméamétrique et par l'intermédiaire duquel une charge verticale (poids morts) est appliquée sur le piston de cette cellule
- un capteur LVDT (course 5 mm) utilisé pour la mesure du déplacement vertical du piston de la cellule en cours d'essai,
- une centrale d'acquisition de National Instrument et d'un ordinateur pour l'enregistrement en temps réel des déplacements verticaux du piston.



Figure II-12 : Dispositifs d'œdomètre – perméamètre utilisés lors des essais de chargement œdométrique.

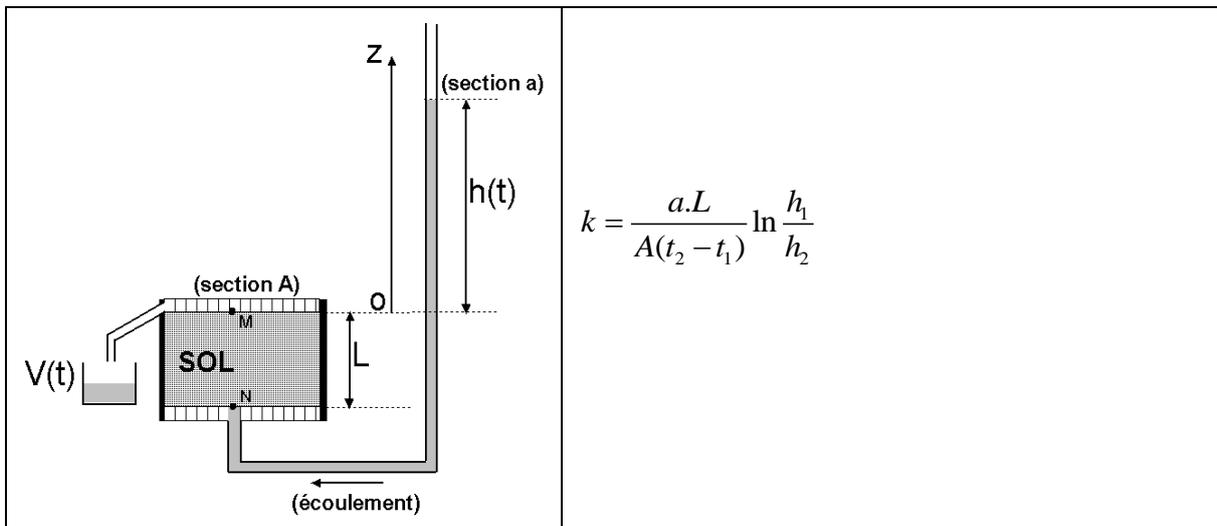


Figure II-13 : Schéma de principe de l'essai de perméabilité à charge variable.

II.3.2 Confection des échantillons de sol

Préparation des échantillons à l'état de pâte (matériau NC)

Le sable limoneux de Gavet (passant à 2 mm) a été séché dans l'étuve à 105°C puis mélangé avec une quantité d'eau déminéralisée calculée pour avoir une teneur en eau proche de la limite de liquidité ($w_L = 29\%$). Le mélange est effectué à l'aide d'un malaxeur électrique tournant à une vitesse de 400 tours/minute, pendant 10 minutes (pour 1 kg de sable sec). Une fois malaxé, le matériau se trouve dans un état de pâte liquide.

La bague œdométrique est placée sur la pierre poreuse de l'embase; celle-ci a été préalablement saturée par immersion dans l'eau pendant 24 h. Une feuille de papier filtre est posée sur la pierre poreuse à l'intérieur de la bague afin d'éviter que les particules fines de sol obstruent la pierre poreuse. La bague est ensuite remplie soigneusement avec la pâte et une spatule tout en évitant de créer une pression de pré-consolidation en appuyant sur la pâte. Quand la bague est remplie, l'échantillon est arasé à l'aide d'une règle de métal, de l'intérieur vers l'extérieur. Ensuite, on emboîte la bague dans le corps central de la cellule œdométrique, celui-ci étant fixé ensuite par 3 vis verticales. On pose le piston de la cellule équipé d'une pierre poreuse sur l'échantillon en ayant placé au préalable une feuille de papier filtre à l'interface entre le sol et la pierre poreuse.

Préparation des échantillons compactés (matériau OC) :

Après passage en étuve à 105°C, le sable limoneux de Gavet (passant à 2 mm) est préparé à une teneur en eau proche de celle de la teneur en eau à l'optimum obtenue pour le matériau compacté à 25 coups / couche : $w_{OPN\ 25cps} = 11.8\ %$. Il est toutefois très difficile d'obtenir précisément après malaxage la teneur en eau recherchée pour plusieurs raisons. Durant le mélange et le compactage, il y a toujours une quantité d'eau qui adhère sur les parois du malaxeur et une autre qui s'évapore. Par expérience tirée des essais Proctor réalisés durant cette thèse, on peut estimer la quantité de teneur en eau perdue pendant la préparation de l'ordre de 0.3 à 0.5 %.

Dans notre cas, le sol est préparé à l'aide d'une quantité d'eau correspondante à $w_{OPN\ 25cps} + 0.3$. Le sol est ensuite compacté en 3 couches dans un moule CBR avec une énergie de 25 coups par couche (ce qui correspond à une énergie OPN-30 coups). Après compactage et pesée, l'échantillon de Proctor est sorti du moule, filmée et gardée dans une salle climatisée pendant 24 heures pour homogénéisation de sa teneur en eau.

Après 24 heures d'homogénéisation, l'échantillon est posé sur un disque rotatif de 70 mm de diamètre et taillé soigneusement par une scie à fil. Le sol restant après la taille est utilisé pour calculer la teneur en eau réel du matériau compacté. L'échantillon taillé est ensuite mis dans la bague œdométrique, arasé délicatement, puis positionné dans la cellule œdométrique – perméamétrique. L'échantillon de sol est ensuite saturé.

Les dimensions finales des échantillons œdométriques testés sont de 20 mm de hauteur et 70 mm de diamètre.

Saturation des échantillons

Pour cette phase, l'échantillon de sol a été placé au sein de la cellule œdométrique. Celle-ci est ensuite immergée dans de l'eau déminéralisée. La hauteur d'eau recouvrant l'œdomètre est légèrement supérieure à la position du piston de la cellule œdométrique. Lors de cette phase de saturation, le piston de la cellule est bloqué afin d'empêcher tout gonflement de l'éprouvette de sol. Les bulles d'air contenu dans l'éprouvette peuvent sortir par un trou sur le piston. Le temps de la saturation imposé est de 7 jours pour la pâte et 14 jours pour le matériau compacté 25 coups par couche.

II.3.3 Procédure de chargement œdométrique

Le processus d'un essai œdométrique complet comprend quatre phases après saturation :

- Une phase de "chargement" par paliers de l'éprouvette de sols de 7 kPa à 875 kPa (Figure II-14). La contrainte verticale appliquée sur l'échantillon est doublée à chaque palier comme le recommande la norme. Pour chaque palier de chargement, la contrainte verticale est maintenue constante pendant au minimum 24 heures afin que puissent se dissiper les surpressions interstitielles. A noter que ces dernières ne sont pas mesurées sur le dispositif utilisé. A la fin de chaque palier de chargement (24 heures), une mesure de la perméabilité de l'échantillon est réalisée.
- Une phase de "déchargement" au cours de laquelle la contrainte verticale est ramenée à une valeur de 30 kPa en 4 paliers intermédiaires d'une durée de 24 heures.
- Une phase de "rechargement" par paliers (avec doublement de la charge à chaque palier) au cours de laquelle la contrainte verticale est de nouveau appliquée par paliers jusqu'à la valeur maximale de 875 kPa.

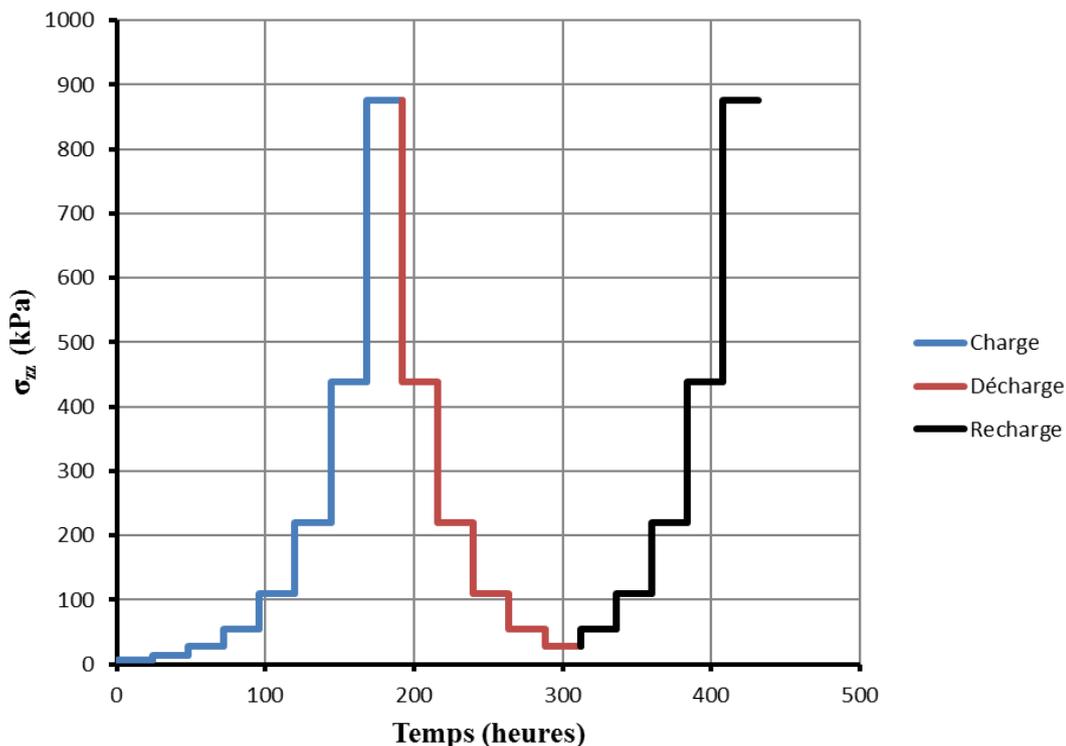


Figure II-14 : Chemin de chargement imposé lors des essais œdométriques sur sable limoneux de Gavet.

II.3.4 Courbe de compressibilité du sable limoneux de Gavet à l'état normalement consolidé

Figure II-15 présente les résultats des trois essais de chargement œdométrique réalisés sur le sable limoneux de Gavet initialement préparé à l'état de pâte. Cette figure donne l'évolution de l'indice des vides du matériau mesuré après 24 heures de palier de chargement en fonction du logarithme de la contrainte verticale appliquée.

Les profils des trois courbes de compressibilité obtenues témoignent du comportement normalement consolidé du matériau. En particulier, celui-ci est caractérisé par une évolution quasi linéaire de la branche du premier chargement. Bien que les indices des vides initiaux des 3 échantillons diffèrent légèrement (compris entre 0.80 et 0.85), les trois essais conduisent à un coefficient de compressibilité C_c égal à 0.083.

Lors du cycle de charge-décharge, le comportement du matériau est quasi-réversible durant tout le cycle à l'exception de l'essai 1. Lors de la décharge, le gonflement du sable limoneux de Gavet reste très limité. Les trois essais conduisent à la même valeur d'indice de gonflement C_s égale à 0.015.

II.3.5 Courbe de compressibilité du sable limoneux de Gavet à l'état sur-consolidé

La Figure II-16 présente les résultats des deux essais de chargement œdométrique réalisés sur le sable limoneux de Gavet préparé à w_{OPN25} et compacté à 25 coups par couche dans le moule CBR pour atteindre une densité sèche finale égale à ρ_{dOPN25} .

Les courbes de compressibilité obtenues attestent de l'état initial sur-consolidé du matériau. Les contraintes de pré-consolidation observées pour les deux échantillons sont respectivement de 200 kPa et 350 kPa. Cet ordre de grandeur est généralement retrouvé dans la littérature pour les matériaux préparés à l'optimum Proctor. A noter que l'échantillon qui présente la contrainte de pré-consolidation la plus élevée (350 kPa) a été préparé à un indice des vides initial (0.53) légèrement inférieur à celui de l'échantillon présentant la plus faible contrainte de pré-consolidation ($e = 0.55$, $\sigma'_p = 200$ kPa).

Les coefficients de compressibilité (C_c) mesurés lors des deux essais œdométriques présentent des valeurs similaires à 0.16. Etonnement, le coefficient de compressibilité observé sur matériau compacté apparaît plus élevé que celui observé sur le matériau initialement préparé à l'état de pâte. Ce résultat n'a pas pu être expliqué.

En revanche, le coefficient de gonflement (C_s) des deux échantillons compactés est identique à celui observé sur les échantillons préparés à l'état de pâte. Sa valeur est de 0.015. Notons que lors du cycle de charge – décharge, le comportement volumique du matériau compacté est particulièrement réversible.

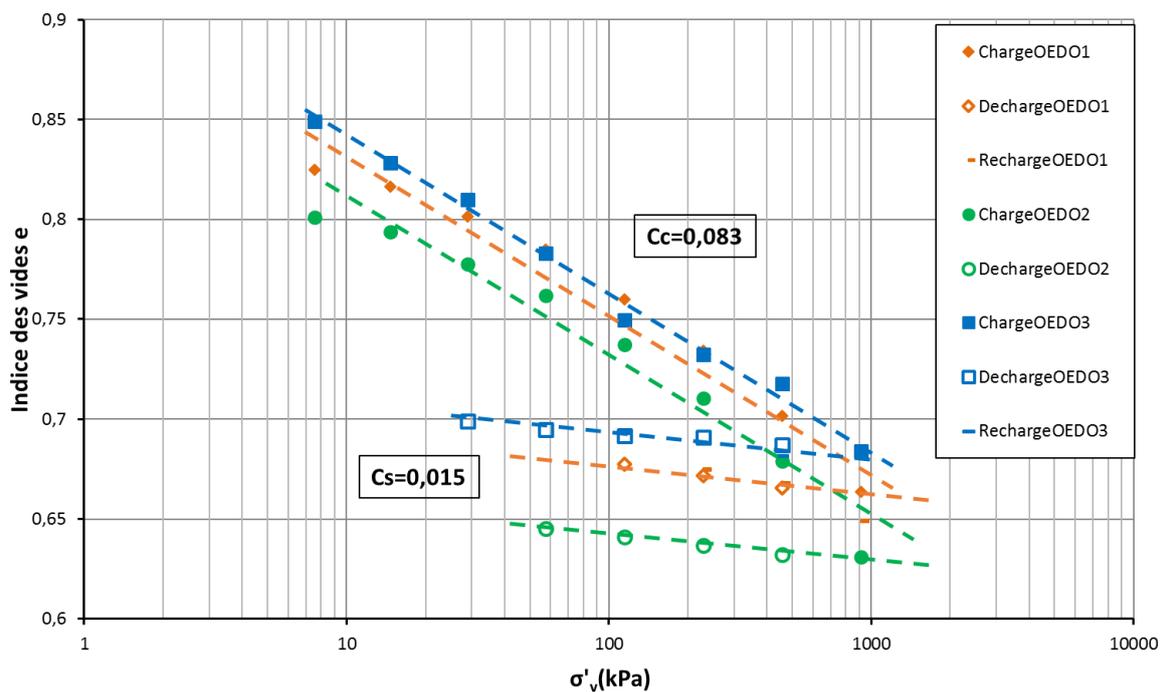


Figure II-15 : Courbes de compressibilité du sable limoneux de Gavet préparé à l'état initial de pâte ($w=w_L$)

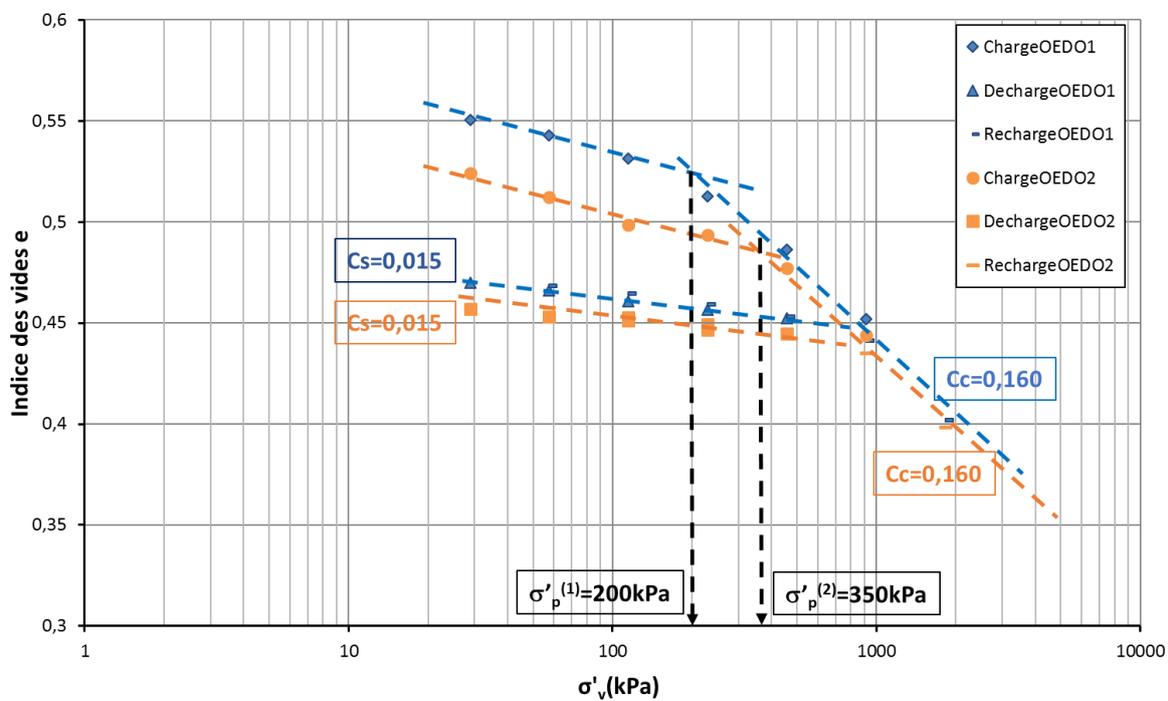


Figure II-16 : Courbes de compressibilité du sable limoneux de Gavet compacté à 25 coups par couche et à teneur en eau w_{OPN25}

II.3.6 Coefficient de perméabilité du sable limoneux de Gavet

L'ensemble des résultats des essais de mesure de coefficient de perméabilité est représenté en termes d'évolution de l'indice des vides en fonction du logarithme du coefficient de perméabilité

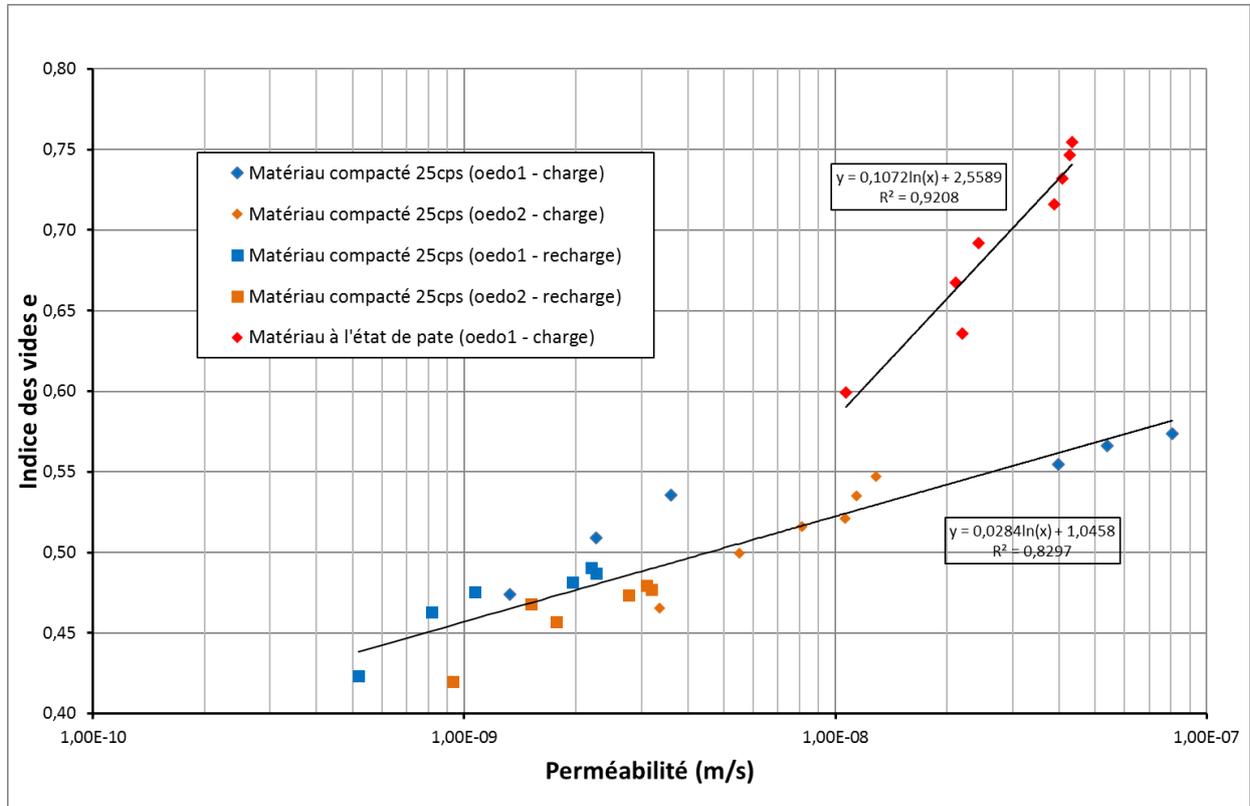


Figure II-17).

Pour le sable limoneux à l'état initial de pâte, les mesures de perméabilité ont été menées à la fin de chaque palier de chargement. La durée du palier de chargement est au minimum de 24 h (points rouges). Pour le sable limoneux compacté à 25 coups/couche, deux échantillons ont été soumis aux essais œdomètre - perméamètre et les mesures de perméabilité sont menées à la fin de chaque palier de chargement et de déchargement. Là encore, la durée des paliers de chargement comme de déchargement est au minimum de 24 h (points bleus et oranges)

Pour les deux états du matériau testé (matériau pâteux et matériau compacté), on note fort logiquement un accroissement du coefficient de perméabilité du matériau lorsque son indice

des vides augmente. Au-delà de ce résultat, la

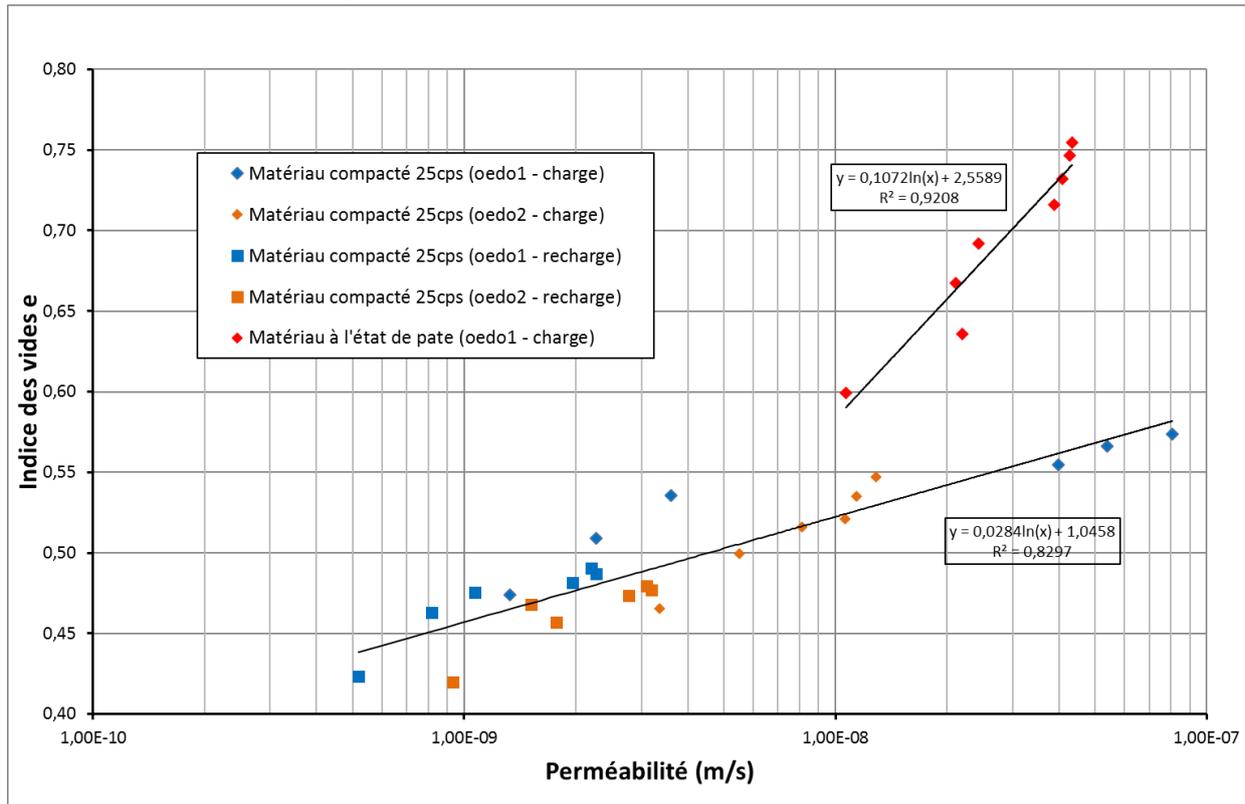


Figure **II-17** souligne une évolution linéaire du logarithme de la perméabilité k en fonction de l'indice des vides du matériau, quel que soit l'état initial de préparation. L'augmentation du coefficient de perméabilité avec l'augmentation de l'indice des vides apparaît ainsi plus sensible dans le cas du matériau pâteux que dans celui du matériau compacté. De plus, notons que pour le matériau compacté (nous n'avons pas fait de mesures de ce type pour les matériaux pâteux), l'évolution linéaire du logarithme de la perméabilité avec l'indice des vides ne semble pas perturbée par le cycle de décharge – recharge opéré au cours du chargement œdométrique.

Il est par ailleurs intéressant de noter qu'à même niveau de perméabilité, le matériau pâteux présente toujours un indice des vides supérieur à celui du matériau compacté ; ce qui tend à prouver que le coefficient de perméabilité dépend non seulement de l'indice des vides mais également de la méthode de confection initiale de l'éprouvette, donc très certainement de la forme de son réseau poral (répartition de la taille des pores).

D'un point de vue quantitatif et pour une même gamme de chargement (contrainte verticale de chargement comprise entre 7 et 875 kPa), les valeurs de coefficient de perméabilité mesurées pour le matériau pâteux sont plus resserrées (comprises entre $5 \cdot 10^{-7}$ et 10^{-8} m/s) que celles mesurées sur le matériau compacté (comprises entre $8 \cdot 10^{-7}$ et 10^{-9} m/s)

Figure II-18 représente les résultats sur chemin de coefficient perméabilité – contrainte verticale. Au niveau de chargement, généralement, on observe une diminution de la perméabilité quand la contrainte verticale évolue. Si on ignore les 3 premiers points bleus, les 3 courbes sont quasi parallèles et à même contrainte verticale, la perméabilité du matériau pâteux est toujours supérieure que celui du matériau compacté. Au niveau de déchargement, les résultats de deux échantillons compactés à 25 coups/couche sont identiques avec une gamme

de changement de k plus resserré qu'au niveau de chargement. Il faut noter que les 3 premiers points bleus (les points du chargement) représentent les valeurs de perméabilité plus élevées que celles de la pâte ; ils sont peut-être un problème de contact entre l'éprouvette (fabriqué à partir un échantillon Proctor) et la bague œdométrique. Avec l'augmentation de la contrainte verticale, le contact entre l'éprouvette et la bague est mieux assuré et ce problème disparaît.

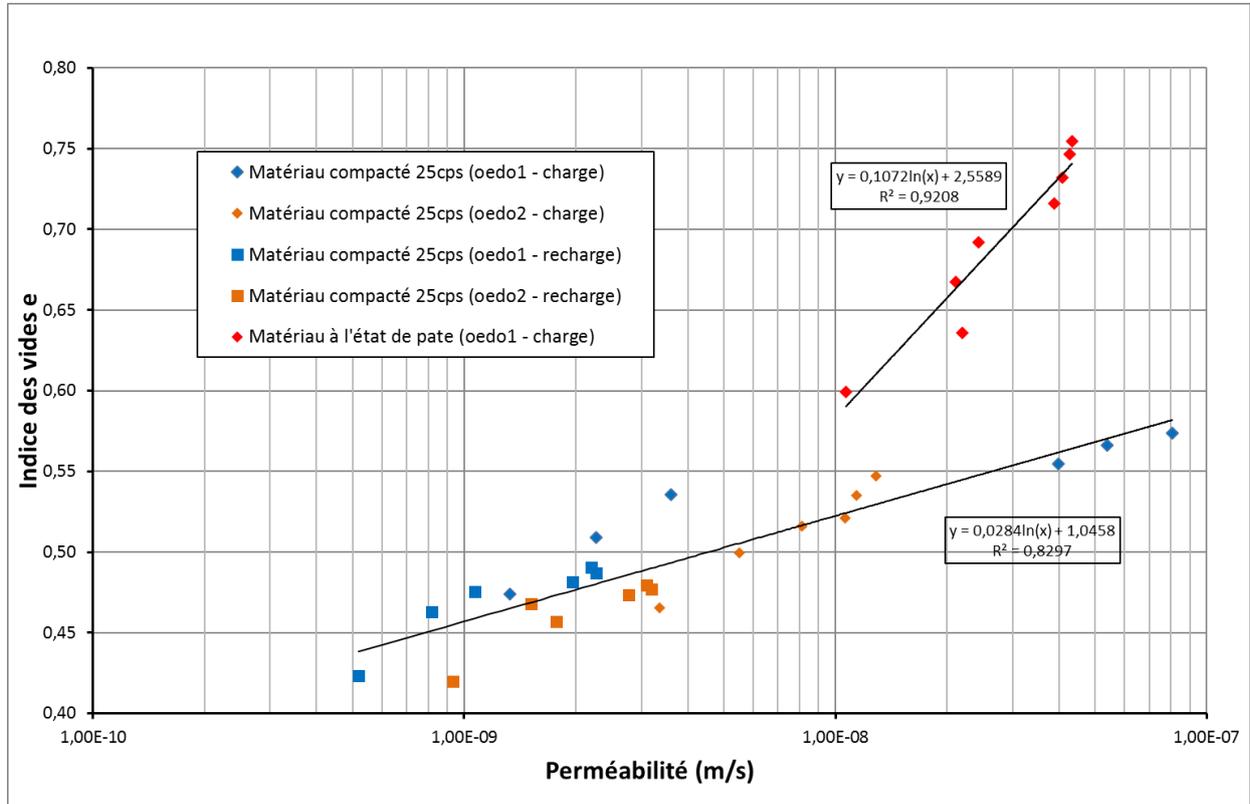


Figure II-17 : Evolution de la perméabilité à l'eau du sable limoneux de Gavet en fonction de son indice des vides (cas du matériau préparé à l'état de pâte et du matériau compacté à 25 coups)

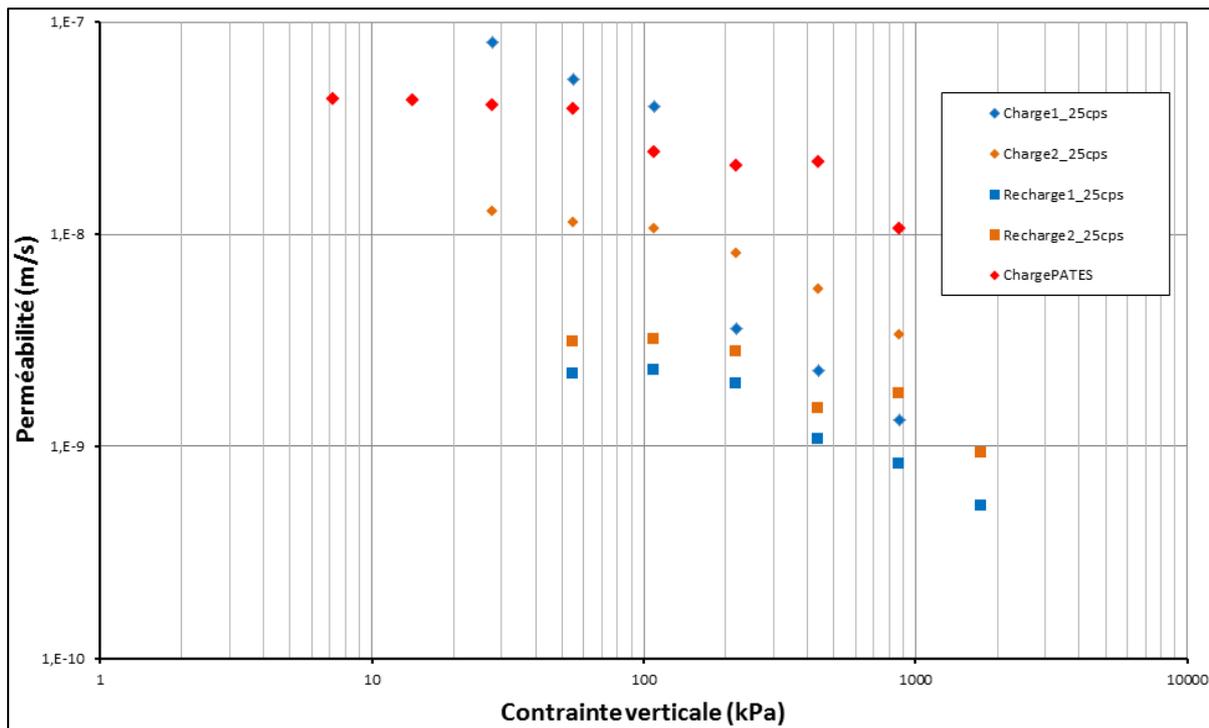


Figure II-18 : Evolution de la perméabilité à l'eau du sable limoneux de Gavet en fonction de la contrainte verticale (cas du matériau préparé à l'état de pâte et du matériau compacté à 25 coups)

II.4 Comportement de référence sur chemin triaxial

L'objectif de ce paragraphe est d'étudier le comportement du sable limoneux de Gavet sur chemin de chargement triaxial. Outre l'analyse du comportement du matériau sous conditions de chargement homogènes, ces essais de référence visent à établir une base de données fiable pour le développement de modèles rhéologiques.

Pour ces essais triaxiaux de référence, le matériau est préalablement saturé. De plus à l'image de ce qui a été fait lors des essais œdométriques, notre volonté initiale était de considérer deux états initiaux du sable limoneux de Gavet pour ces essais triaxiaux : un état pâteux (matériau préparé à une teneur en eau égale à sa limite de liquidité) et un état compacté (matériau préparé à la teneur en eau w_{OPN25} puis compacté dans un moule CBR en trois couches, à 25 coups par couche).

Très rapidement, il s'est avéré très difficile de confectionner des échantillons triaxiaux homogènes avec le matériau pâteux. En effet des poches d'air ont tendance à rester emprisonnées au sein de l'échantillon lorsque l'on déverse la pâte dans le moule triaxial. Une solution aurait pu être de consolider dans un premier temps les échantillons pâteux dans un consolidomètre sous faible charge, puis de les tailler en fin de consolidation et de les placer au sein de la cellule triaxiale. Pour des raisons de gain de temps (durée de la consolidation), nous n'avons pas retenu cette méthode.

Afin d'étudier l'influence du mode de fabrication de l'échantillon sur son comportement à l'essai triaxial (et par conséquent l'influence de son réseau poral), nous avons choisi une autre solution alternative. Ainsi pour une première série d'essais triaxiaux de référence, le sable limoneux de Gavet (passant à 2 mm) est séché, puis mis en place dans le moule triaxial sous forme de poudre à l'aide de la méthode de sous compaction. Le matériau est ensuite saturé avec de l'eau désaérée après circulation de CO₂ dans l'échantillon ($\rho_d = 1.65 \text{ g/cm}^3$). En parallèle, une seconde série d'essais triaxiaux de référence a été réalisée sur le sable limoneux de Gavet préparé à la teneur en eau w_{OPN25} (11.8 %) puis compacté dans un moule CBR en trois couches, à 25 coups par couche pour atteindre la densité sèche ρ_{dOPN25} (1.81 g/cm³). L'échantillon est ensuite taillé pour obtenir les dimensions souhaitées puis saturé.

II.4.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé dans cette étude est composé d'une presse électromécanique de type Farnell, d'une cellule triaxiale, de systèmes de saturation, de consolidation, de mesure, de contrôle et d'acquisition de données par ordinateur (*Figure II-19 et Figure II-21*). Une description complète du dispositif expérimental a été faite par Mohkam (MOHKAM, 1983). Les améliorations apportées sur ce dispositif sont décrites par Ibraim (IBRAIM, 1998) puis par Finge Bousaid (FINGE BOUSAID, 2004).

La presse électromécanique

La presse électromécanique utilisée peut développer une vitesse de déplacement de son embase (vitesse d'écrasement de l'échantillon) comprise entre quelques microns par minute à 4 mm/min.

La cellule triaxiale

La cellule triaxiale (type Wikeham) est constituée de deux embases circulaires entre lesquelles est positionné l'échantillon de sol (Figure II-20). Ces embases inférieure et supérieure sont fabriquées en acier inoxydable poli dans le but de réduire les frottements entre le sol et les embases au cours de l'essai (embases semi-frettées). L'antifretage (par membranes graissées) n'a pas été utilisé pour nos essais. Ces embases faites pour accueillir des échantillons de sol cylindriques de diamètres 70 mm présentent un diamètre élargi de 100 mm afin de permettre le déplacement radial des particules de sol au niveau des embases. Le drainage de l'eau contenu dans l'échantillon de sol au travers des embases est assuré par l'intermédiaire d'une pastille en bronze fritté de 20 mm de diamètre, positionnée au centre de l'embase. La pression maximale de confinement pouvant être appliquée dans cette cellule est de 700 kPa.

Le dispositif de saturation et de contre pression

Le dispositif de saturation de l'échantillon est composé d'une cellule pouvant être mise sous pression et reliée par un capillaire à l'embase basse de la cellule triaxiale. Cette cellule pressurisée permet de faire circuler de l'eau désaérée sous un faible gradient de pression au travers de l'échantillon lors de sa saturation. Elle permet également d'imposer une contre-pression à l'intérieur de l'échantillon de sol pour améliorer sa saturation en favorisant la dissolution des bulles d'air contenues dans l'eau. Enfin dans le cas d'un essai triaxial drainé

réalisé sur un échantillon de sol saturé, les variations de volume de l'échantillon peuvent être déduites des variations du volume d'eau dans cette cellule.



Figure II-19 : Dispositif expérimental utilisé lors des essais triaxiaux de référence sur sable limoneux de Gavet

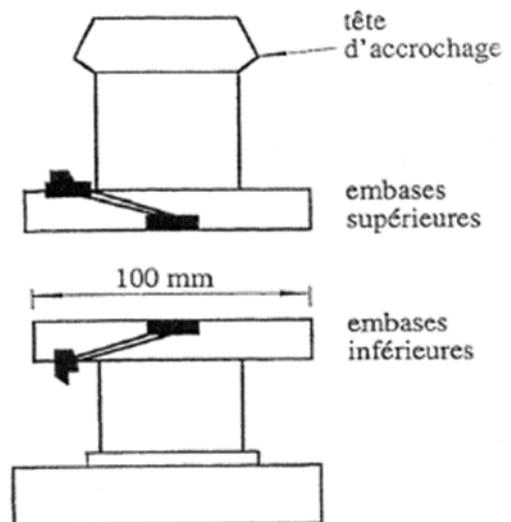


Figure II-20 : Système d'embases utilisé lors des essais triaxiaux de référence sur sable limoneux de Gavet

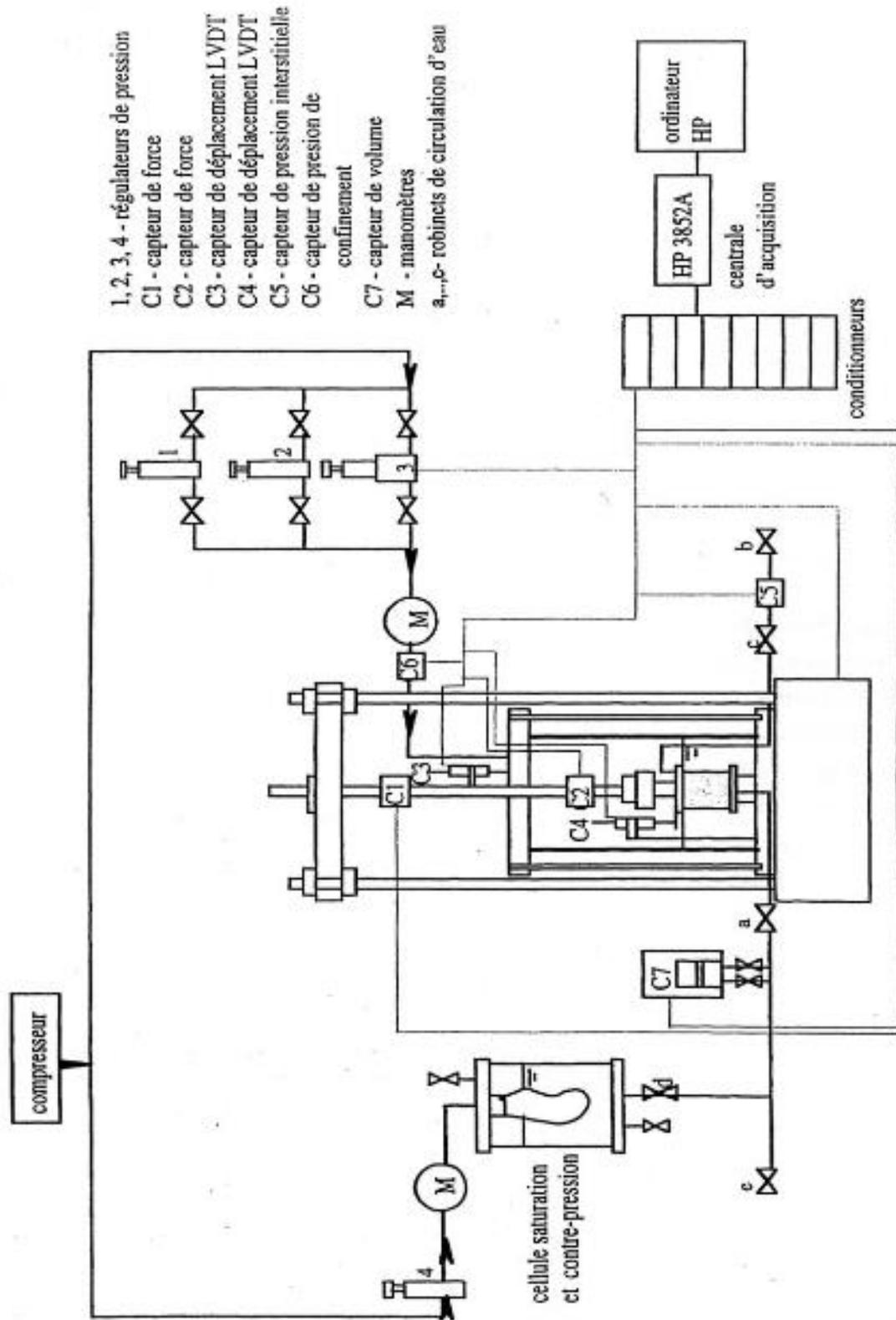


Figure II-21 : Schéma de principe du dispositif triaxial utilisé lors des essais triaxiaux de référence sur sable limoneux de Gavet (Schéma par Finge Bousaid, 2004)

Le dispositif de mesure et d'acquisition des données

Plusieurs mesures sont effectuées au cours de l'essai à l'aide de différents capteurs afin de déterminer l'état de contraintes et de déformations de l'échantillon testé :

- Mesure de la force axiale :

La force axiale exercé par la presse sur l'échantillon de sol (force verticale d'écrasement) est mesuré à l'aide d'un capteur de force de type "Wykeham Farrance" (étendue de mesure : 5 kN) installé à l'intérieur de la cellule de plexiglas, à l'extrémité du piston de cette cellule. Cette force axiale interne est utilisée pour la détermination de la contrainte verticale exercée sur l'échantillon.

- Mesure de la pression de confinement et de la pression interstitielle

La pression de confinement au sein de la cellule triaxiale est mesurée à l'aide d'un capteur de pression relative MD 20 de "Sedeme" (étendue de mesure 20 bars). Cette pression correspond à la contrainte radiale appliquée sur l'échantillon de sol. Il faut noter que la cellule en plexiglas autorise une pression de confinement maximale de 700 kPa.

La pression de l'eau à l'intérieur de l'échantillon de sol (pression interstitielle) est mesurée lors des essais non drainés au moyen d'un capteur de pression relative MD 20 "Sedeme" (étendue de mesure 20 bars).

- Mesure de déformations volumique et axiale :

Lors des essais drainés sur matériau initialement saturé en eau, la variation de volume de l'échantillon de sol est déduite des variations de volume d'eau au sein de l'échantillon. Ces variations de volume d'eau sont mesurées par un capteur de variation volumique de type "Wykeham Farrance" (étendue de mesure 75 cm³), décrit en détail par Mohkam (MOHKAM, 1983).

Les déformations axiales de l'échantillon de sol sont mesurées à l'aide d'un capteur LVDT L20 (longueur de course 20 mm) placé à l'intérieur de la cellule et mesurant le déplacement de la tête de l'échantillon par rapport à l'embase inférieure fixe.

A noter que les déformations axiale et volumique permettent de déterminer la déformation radiale, et ceci en considérant que le champ de déformations est homogène.

L'acquisition des données et le pilotage des essais sont entièrement automatisés. L'ensemble des capteurs est relié à un ordinateur via une centrale d'acquisition (Modèle HP3852A). Un logiciel d'acquisition et de traitement des données permet de visualiser les mesures par l'intermédiaire de graphiques ou par une lecture directe des valeurs.

II.4.2 Confection des échantillons de sol

Nous avons réalisé deux campagnes d'essais triaxiaux sur le sable limoneux de Gavet passant à 2 mm. Une première série d'essais a été réalisée sur le matériau considéré dans un état initial normalement consolidé. Une seconde série d'essais a été menée sur le même matériau pris dans un état initial sur-consolidé. Pour obtenir ces deux états initiaux, deux modes de fabrication des échantillons ont été utilisés.

- *Matériau normalement consolidé (compacté à sec puis saturé) :*

La fabrication des échantillons a été réalisée par la méthode de sous compaction à sec. Les échantillons sont fabriqués à partir du sable limoneux de Gavet sec (poudre) préalablement tamisé à 2 mm. Ces échantillons (masse totale de 400 g) sont confectionnés en cinq couches ($n_t=5$) dans le moule triaxial. Une masse identique (80 g) de matériau est déposée pour chaque couche à l'aide d'une cuillère en respectant une hauteur de chute nulle, avant d'être compactée avec une dame (diamètre : 35 mm) jusqu'à l'obtention de la hauteur désirée. La hauteur finale de l'échantillon après confection est de 70 mm, son diamètre est de 70 mm (élancement 1).

- *Matériau sur-consolidé (compacté à 25 coups / couche) :*

La procédure utilisée pour la fabrication du matériau sur-consolidé (matériau OC) est la même que celle utilisée lors des essais œdométriques. Après avoir été tamisé à 2 mm et séché en étuve à 105°C, le sable limoneux de Gavet est préparé à une teneur en eau proche de celle de la teneur en eau à l'optimum obtenue pour le matériau compacté à 25 coups/couche : $w_{OPN\ 25cps} = 11.8\ %$. Afin de prendre en compte la quantité d'eau qui adhère sur les parois du malaxeur et celle qui s'évapore lors de la phase de malaxage, le sol est préparé à l'aide d'une quantité d'eau correspondante à $w_{OPN\ 25cps} + 0.3$. Le sol est ensuite compacté en 3 couches dans un moule CBR avec une énergie de 25 coups par couche (ce qui correspond à une énergie OPN-30 coups). Après compactage et pesée, l'échantillon de Proctor est sorti du moule, filmée et gardée dans une salle climatisée pendant 24 heures pour homogénéisation de sa teneur en eau.

Après 24 heures d'homogénéisation, l'échantillon est posé sur un disque rotatif de 71.6 mm de diamètre et taillé soigneusement par une scie à fil. Le sol restant après la taille est utilisé pour calculer la teneur en eau réel du matériau compacté.

Les échantillons triaxiaux ainsi confectionnés ont une hauteur de 70 mm et un diamètre de 71.6 mm.

Dans notre étude, une attention particulière a été portée à la détermination de l'indice des vides initial (e_0) de nos échantillons, afin de pouvoir bien analyser l'influence de la variation de l'état de compacité du matériau sur son comportement mécanique.

Pour nos essais, on calcule l'indice des vides initial (e_0) par mesure de la quantité d'eau contenue dans l'échantillon à la fin de l'essai selon la méthode de pesée décrite par Finge Bousaid (FINGE BOUSAID, 2004).

Densité initiale des échantillons de sol soumis à l'essai triaxial

Le tableau ci-après donne les masses volumiques avant l'écrasement triaxial (c'est-à-dire après la phase de saturation et de consolidation) obtenues à l'aide des procédures décrites précédemment pour les échantillons de sable limoneux confectionnés selon les deux méthodes retenues. Notons que pour le matériau confectionné à sec, la densité obtenue correspond à 88 % de celle de l'optimum Proctor ($\rho_{dOPN\ 55}$). Pour le matériau compacté humide, la densité obtenue correspond à 97 % de celle de l'optimum Proctor ($\rho_{dOPN\ 55}$) (cf paragraphe II.2.7).

Matériaux	Etat du matériau testé	ρ_d initiale (mesuré après la saturation)	e_o initiale (mesuré après la saturation)
Sable limoneux Gavet passant à 2 mm	Echantillons fabriqués par sous-compaction à sec puis saturés (état normalement consolidé)	1.65 t/m ³ (= 88 % de ρ_{dOPN})	≈ 0.65
	Echantillons compactés à 25 coups/couche à $w_{OPN} 25_{cps} = 11.8$ % puis saturés (état sur-consolidé)	1.81 t/m ³ (= 97 % de ρ_{dOPN})	≈ 0.5

Tableau II-7 Masse volumique avant essai des échantillons de sable limoneux de Gavet soumis aux essais triaxiaux.

II.4.3 Saturation et consolidation des échantillons de sol

La saturation des échantillons :

Les échantillons de sol soumis à l'essai triaxial après confection ont été saturés en eau. Cette phase de saturation se décompose en trois étapes: d'abord une percolation de gaz soluble CO₂, sous un faible gradient de pression d'environ 0.2 kPa pendant au moins une heure, puis une circulation très lente d'eau désaérée et déminéralisée sous faible pression de 5 kPa pour dissoudre le CO₂ pendant au moins une heure, voire une nuit complète, puis finalement l'application d'une contre-pression de 200 kPa pour dissoudre le reste éventuel de CO₂.

Une densification importante de l'échantillon se produit au cours de cette phase de saturation dans le cas des échantillons confectionnés par sous compaction à sec. Celle-ci se traduit par une augmentation de la déformation axiale. En effet, le frottement inter-granulaire qui maintient le squelette du sol est modifié lors du mouillage, ce qui conduit à l'effondrement de la structure interne du matériau. Au cours de la phase de saturation, cette variation est toujours mesurée à l'aide d'un capteur LVDT installé sur le casque de l'échantillon.

Le coefficient de Skempton permet une vérification de l'état de saturation de l'échantillon. Le principe est de se placer en condition non drainée et d'appliquer un incrément de pression de confinement à l'échantillon. Si l'échantillon est très bien saturé, on retrouve cet incrément à l'identique sur la pression interstitielle. Sinon, si l'incrément de pression interstitielle est plus faible, cela veut dire que les bulles de CO₂ demeurent dans l'échantillon et viennent d'être comprimées.

Le coefficient de Skempton (B) est défini par :

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3}$$

Les essais triaxiaux non drainés réalisés dans cette thèse ont tous été menés sur des échantillons qui présentaient un coefficient de Skempton supérieur à 0.95. Pour les cas où après saturation,

la mesure du coefficient de Skempton était inférieure à 0.95, l'échantillon de sol était soumis à un essai triaxial drainé.

II.4.4 Programme expérimental :

Pour les deux états initiaux du sable limoneux de Gavet considérés (échantillons fabriqués par la méthode de sous-compaction à sec et échantillons confectionnés par compaction au moule CBR), nous avons effectué 2 séries d'essais : à savoir une série d'essais consolidé isotrope non drainé avec mesure de la pression interstitielle (CIU) et une série d'essais consolidés isotropes drainés (CID) (Figure II-22).

Le tableau ci-après présente les caractéristiques de ces différents essais triaxiaux. Notons que les essais CIU ont été menés à une vitesse d'écrasement de 200 $\mu\text{m}/\text{mn}$ jusqu'à 22 % de déformation axiale. Durant ces essais CIU, les surpressions interstitielles développées dans l'échantillon sont mesurées à l'aide d'un capteur de pression placé à l'extérieur de la cellule et relié au réseau poral. Les essais CID ont été réalisés avec une vitesse d'écrasement faible ($v = 5 \mu\text{m}/\text{mn}$) jusqu'à 22 % de déformation axiale afin d'assurer l'absence de surpressions interstitielles pendant l'écrasement. Durant ces essais CID, les variations de volume d'eau et les éventuelles surpressions interstitielles dans l'échantillon sont mesurées.

	Echantillons fabriqués par sous-compaction à sec puis saturés (état normalement consolidé)	Echantillons compactés à 25 coups/couche à $w_{OPN 25cps} = 11.8\%$ puis saturés (état sur-consolidé)
Essais triaxiaux consolidé isotropes non drainés (CIU)	$\sigma'_3 = 50, 100, 200, 300 \text{ kPa}$	$\sigma'_3 = 30, 50, 100, 150 \text{ kPa}$
Essais triaxiaux consolidé isotropes drainés (CID)	$\sigma'_3 = 50, 100, 150 \text{ kPa}$	$\sigma'_3 = 30, 50, 100, 150 \text{ kPa}$.

Tableau II-8 Caractéristiques des essais triaxiaux réalisés sur le sable limoneux de Gavet pris dans un état initial saturé

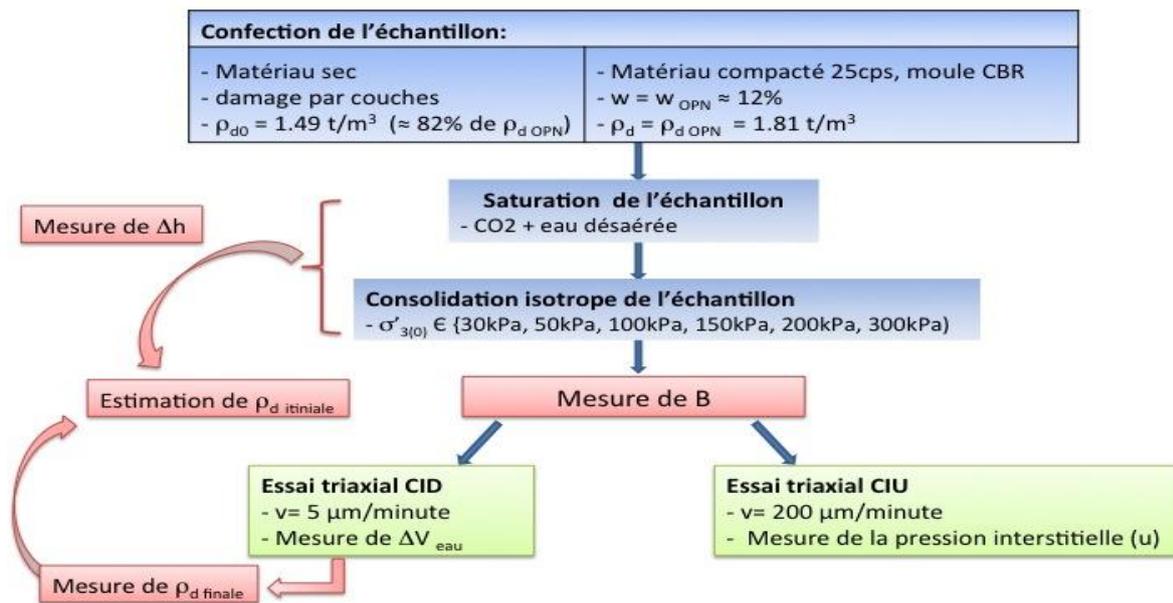


Figure II-22 : Schéma de principe de la procédure des essais triaxiaux CIU et CID réalisés sur le sable limoneux de Gavet saturé

II.4.5 Comportement sous consolidation isotrope

Au préalable des essais triaxiaux CID et CIU, un essai de consolidation isotrope a été réalisé sur deux échantillons préparés selon les deux modes de fabrication décrits précédemment. L'objectif de ces travaux est de déterminer les valeurs de pression de pré-consolidation des échantillons testés, ce qui permettra de connaître pour les essais triaxiaux de révolution réalisés, l'état initial de consolidation du matériau (état normalement consolidé ou état sur-consolidé) en fonction de la pression effective de confinement appliquée. Ces essais nous permettent également de déterminer les valeurs de indices compressibilité (C_c) et de gonflement (C_s) de chaque matériau et de pouvoir les comparer à ceux obtenus lors des essais œdométriques.

Les essais de consolidation isotrope ont été réalisés avec le même dispositif expérimental que celui utilisé lors des essais triaxiaux. Le chargement isotrope est appliqué sur l'échantillon cylindrique de sol à l'aide d'une pression d'eau. Pour cela, l'échantillon de sol est préalablement placé dans une membrane en latex à l'intérieur de la cellule triaxial.

Pour chaque échantillon, le chargement isotrope appliqué augmente de 20 à 500 kPa en 14 paliers de chargement. Les mesures d'indice des vides de l'échantillon testé sont effectuées à la fin de chaque palier de chargement lorsque la surpression interstitielle reste constante quand on ferme le tube de drainage. Le temps de consolidation nécessaire à faible palier de chargement est de 2 heures, il croît lorsque la charge appliquée augmente. Pour les derniers paliers de chargements, le temps nécessaire d'équilibrage est de 5 à 6 heures.

La Figure II-23 présente les résultats de ces deux essais de chargement isotrope dans le repère (indice des vides – logarithme de la pression effective de consolidation). Le tableau ci-dessous

(Tableau II-9) donne les coefficients de compressibilité (C_c), de gonflement (C_s), et les pressions de préconsolidation (σ'_p) déduits de ces essais.

Remarquons que les deux échantillons présentent des coefficients de compressibilité d'une part ($0.10 \leq C_c \leq 0.12$) et des coefficients de gonflement d'autre part ($0.01 \leq C_s \leq 0.016$) assez similaires et en bon accord avec ceux obtenus sur chemin de chargement œdométrique (Tableau II-9).

En revanche, les contraintes de pré-consolidation mesurées sur ces deux échantillons sont très différentes. L'échantillon de sable limoneux fabriqué par sous compaction à sec présente une contrainte de pré-consolidation (σ'_p) de 40 kPa, ce qui supposera un état initial normalement consolidé lors des essais triaxiaux CID et CIU mettant en œuvre des pressions de consolidation isotrope (σ'_3) comprises entre 50 et 500 kPa.

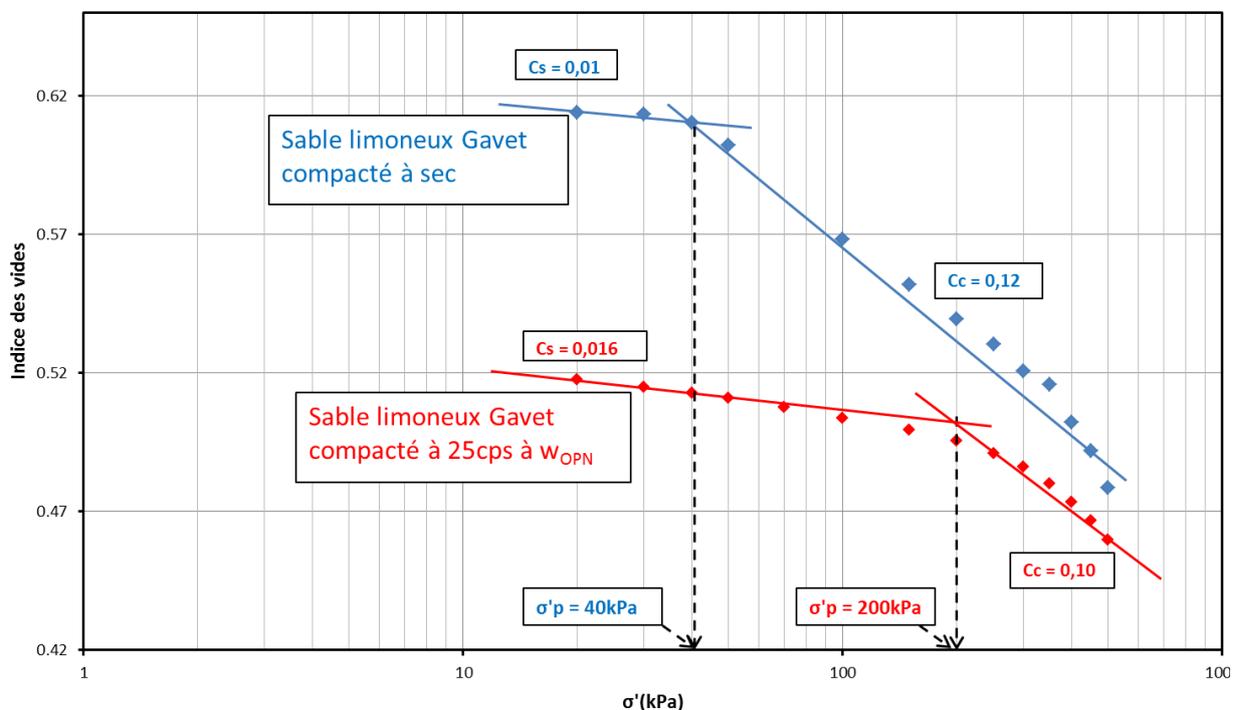


Figure II-23 : Résultats des essais de consolidation isotrope réalisés sur le sable limoneux de Gavet préparés selon deux modes de fabrication différents (sous compaction à sec et compactage humide)

Pour sa part, l'échantillon de sable limoneux préparé par compactage humide dans le moule CBR (25 coups/couche à w_{OPN} 25 coups = 11.8%) présente une contrainte de pré-consolidation (σ'_p) de 200 kPa. Cette contrainte est voisine de celles mesurées sur chemins de chargement œdométriques et comprises entre 200 et 350 kPa (Tableau II-9). Lors des essais triaxiaux CID et CIU, ce type d'échantillon sera considéré dans un état initial normalement consolidé pour des pressions de consolidation isotrope effective σ'_3 inférieures à 200 kPa, et dans un état initial surconsolidé pour des pressions de consolidation isotrope effective σ'_3 supérieures à 200 kPa.

	Echantillons fabriqués par sous-compaction à sec puis saturés (état normalement consolidé)	Echantillons compactés à 25 coups/couche à WOPN 25cps = 11.8 % puis saturés (état surconsolidé)
C_c (consolidation isotrope)	0.12	0.10
C_c (chargement œdométrique)		0.16
C_s (consolidation isotrope)	0.01	0.016
C_s (chargement œdométrique)		0.015
σ'_p (consolidation isotrope)	40 kPa	200 kPa
σ'_p (chargement œdométrique)		200 – 350 kPa

Tableau II-9 Paramètres mécaniques obtenus lors des essais de consolidation réalisés sur le sable limoneux de Gavet préparés selon deux modes de fabrication différents (sous compaction à sec et compactage humide)

II.4.6 Comportement du sable limoneux fabriqué par sous compaction à sec sur chemin de chargement déviatorique

Evolution du déviateur des contraintes en conditions non drainées (essais CIU),

La Figure II-24 donne l'évolution du déviateur des contraintes (q) en fonction de la déformation axiale pour les 4 essais triaxiaux CIU réalisés sur les échantillons de sable limoneux de Gavet fabriqué par sous compaction à sec (donc pris lors de ces essais dans un état initial normalement consolidé). Logiquement, la résistance au cisaillement du matériau en condition non drainée augmente avec la pression de consolidation. Pour les 4 pressions de consolidation imposées, le déviateur des contraintes augmente rapidement en début d'essai jusqu'à un premier palier se situant entre 0.2 % et 0.5 % de déformation axiale. Au-delà de ce palier, l'évolution du déviateur des contraintes dépend fortement de la pression de consolidation. Pour la plus faible pressions de consolidation ($\sigma'_3 = 50$ kPa), le déviateur reste stable à cette valeur de palier. Pour les valeurs de pression de consolidation plus élevées ($\sigma'_3 = 100, 200$ et 300 kPa), le déviateur des contraintes tend à augmenter régulièrement avec la déformation axiale. Cette non stabilisation du déviateur pourrait éventuellement s'expliquer par le faible élanement (égal à 1) de nos

échantillons et l'absence de système d'anti-fretage au niveau des embases de la cellule. Toutefois, cette explication éventuelle liée à la géométrie de nos échantillons n'a pu être vérifiée faute de temps pour réaliser une seconde campagne d'essais avec des échantillons d'élanement supérieur (égal à 2 par exemple).

Evolution de la pression interstitielle en conditions non drainées (essai CIU)

La **Figure II-25** donne l'évolution des surpressions interstitielles mesurées en sortie d'échantillon au cours des essais triaxiaux CIU. Ces surpressions interstitielles sont rapportées à la pression de confinement (σ'_3) avec $\Delta u_{normalisée} = \frac{U-U_0}{\sigma_3}$.

L'application d'un déviateur de contraintes sur les échantillons de sol en condition non drainée entraîne une augmentation rapide de la surpression interstitielle jusqu'à des valeurs comprises entre 80 % et 85 % de la pression moyenne initiale. Par la suite, la surpression interstitielle continue de croître légèrement pour les échantillons consolidés sous 50 kPa et 100 kPa de σ'_3 . Pour les deux échantillons soumis aux pressions de consolidation supérieures (200 kPa, 300 kPa), on note une légère diminution de ces surpressions interstitielles qui se produit entre 6 % - 7 % de déformation axiale.

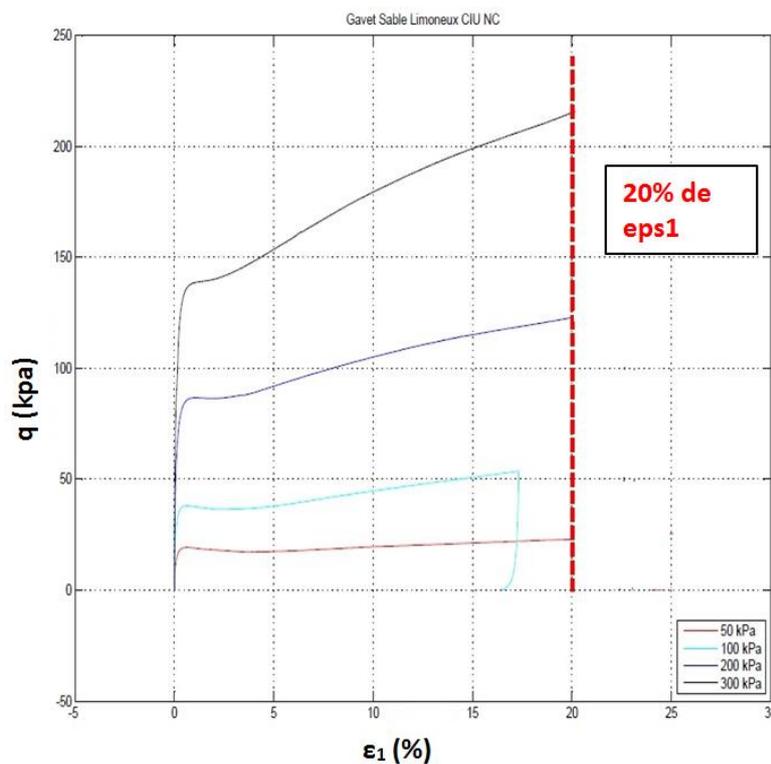


Figure II-24 : Evolution du déviateur des contraintes (q) en fonction de la déformation axiale lors des essais CIU (échantillons de sable limoneux de Gavet fabriqués par sous-compaction à sec puis saturés)

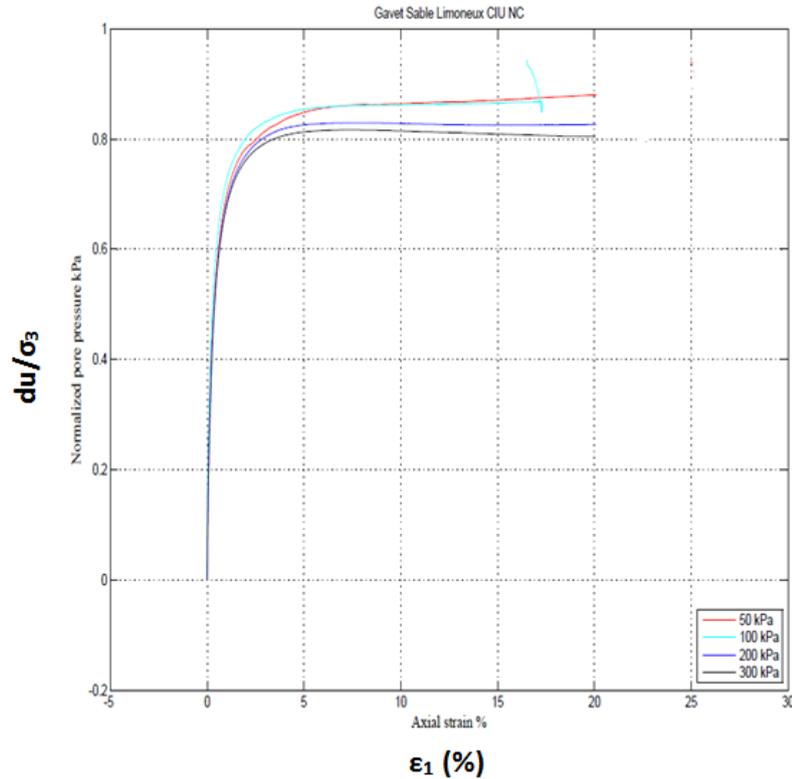


Figure II-25 : Evolution de la surpression interstitielle normalisée en fonction de déformation axiale

D'une manière générale, les Figure II-24 et Figure II-25 tendent à montrer que le comportement du sable limoneux de Gavet sous-compacté à sec s'apparente à celui d'un sable lâche liquéfiable, avec une phase de contractante importante durant laquelle la pression interstitielle augmente.

Chemins de contraintes effectives suivis durant l'essai CIU

La Figure II-26a donne les chemins de contraintes effectives (plan déviateur des contraintes-pression moyenne effective) suivi lors des essais CIU par le matériau sous-compacté à sec. Pour les 4 pressions de consolidation étudiées, ces chemins de contraintes effectives présentent des formes similaires. En début de cisaillement, ils démarrent tous avec une pente quasi verticale dans le plan (p' , q) ; ce qui atteste de l'isotropie du matériau étudié.

Par la suite, on observe un comportement non linéaire contractant : les courbes tournent vers la gauche (p' diminue, et q augmente) jusqu'à l'obtention d'un palier stable du déviateur q alors que la pression moyenne effective (p') diminue jusqu'à l'obtention d'une valeur minimale (p_{ic})

Après le passage de ce minimum de pression moyenne effective, nous observons une ré-augmentation de la pression moyenne et de la valeur du déviateur. Les chemins de contraintes se tournent alors à droite et remontent vers la ligne de rupture, ce qui atteste d'une diminution des surpressions interstitielles en présence d'une légère dilatance du matériau.

En choisissant arbitrairement pour l'ensemble des essais, le déviateur à 20 % de déformation axiale comme le déviateur à la rupture, la ligne de rupture a été définie par linéarisation des

points critiques. Ainsi, cette ligne de rupture est caractérisée par une cohésion effective de 5 kPa et un angle de frottement effectif moyen de 40°.

La Figure II-26b donne les caractéristiques de la ligne de transformation de phase obtenues lors de ces mêmes essais CIU. La transformation de phase en conditions non drainées est l'équivalent de l'état caractéristique en condition drainée. On peut donc l'assimiler au passage de la contractante à la dilatance. Pour chaque chemin de contrainte effective, le point de transformation de phase a été choisi comme le point de la courbe (p',q) présentant une tangente verticale dans ce plan des contraintes effectives (p' minimum). La ligne de transformation de phase est ensuite déterminée par linéarisation les points de transformation de phase. A partir des quatre essais CIU réalisés sur le sable limoneux de Gavet sous-compacté à sec, nous déduisons un angle de transformation de phase effectif moyen de 34° et une cohésion effective de transformation de phase (C_{tp}) égale à 0 kPa.

A partir des résultats obtenus lors des essais CIU, nous pouvons conclure que le comportement du sable limoneux de Gavet sous-compacté à sec s'apparente à celui d'un matériau moyennement lâche, contractant, faiblement cohésif, et potentiellement liquéfiable.

σ'_3 (kPa)	e_0	$p'_{rupture}$ (kPa)	$q_{rupture}$ (kPa)	$\eta_{rupture}$	ϕ'	p'_{min} (kPa)	q_{min} (kPa)	η_{tp}	ϕ_{tp}
50	0.555	16	24	1.500	37	13	17	1.308	32
100	0.536	30	50	1.667	41	27	38	1.407	35
200	0.505	75	125	1.667	41	65	75	1.154	29
300	0.49	130	225	1.731	42	105	150	1.429	35

Tableau II-10 Paramètres déduits des essais triaxiaux CIU réalisés sur sable limoneux de Gavet sous compacté à sec

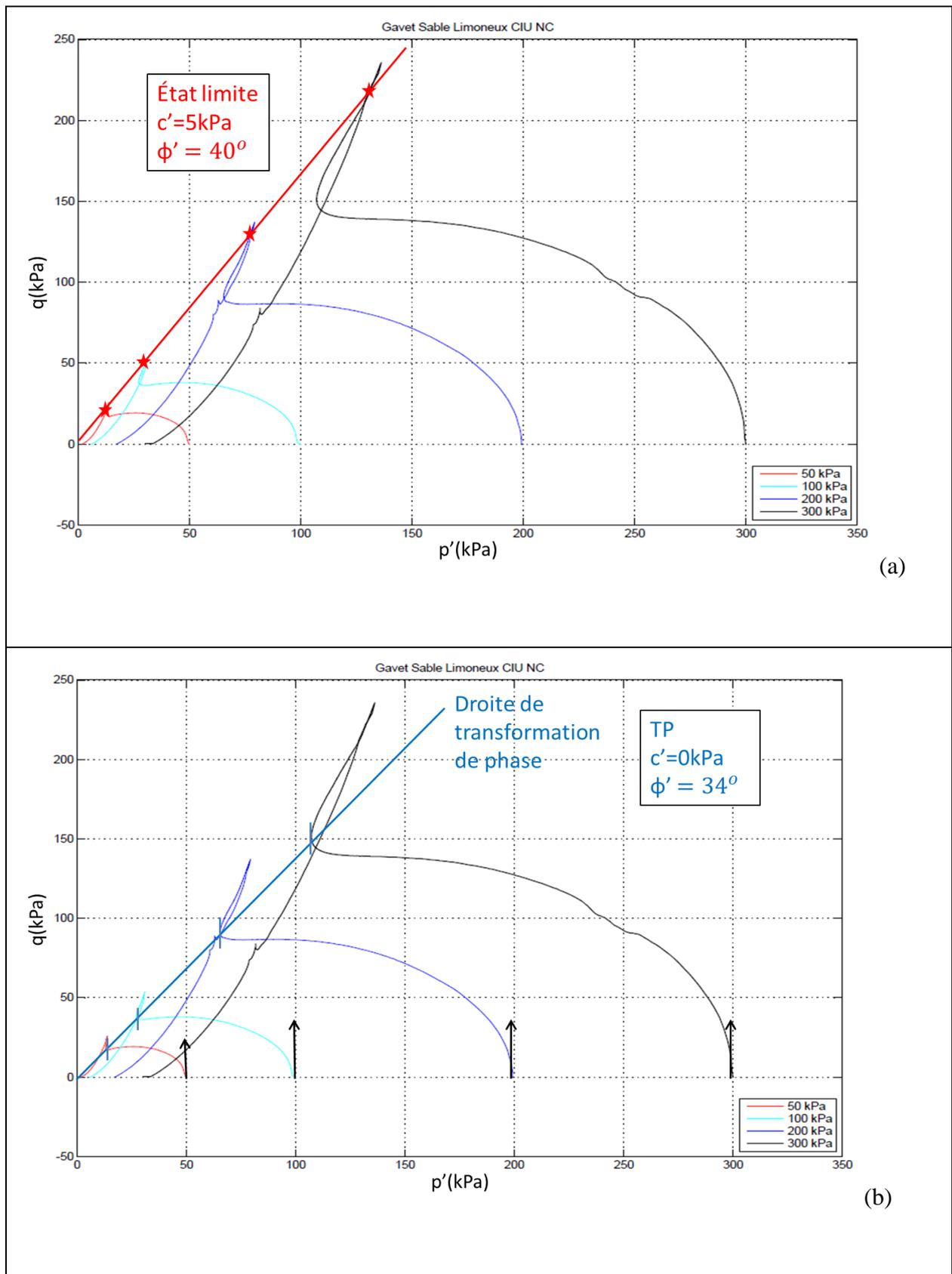


Figure II-26 : Chemins de contraintes effectives représentés dans le plan (déviateur – pression moyenne effective) pour les essais CIU ((a) : droite d'état limite ; (b) : droite de transformation de phase)

Evolution du déviateur des contraintes en conditions drainées (essais CID)

La Figure II-27 donne l'évolution du déviateur des contraintes (q) en fonction de la déformation axiale lors des trois essais triaxiaux consolidés drainés (CID) menés sur le sable limoneux de Gavet sous-compacté à sec. Logiquement, on note une forte influence de la pression de consolidation isotrope sur les valeurs de résistance au cisaillement mobilisée : cette dernière croît lorsque la pression de consolidation augmente. Si à faible déformation axiale, le déviateur des différents échantillons augmente de manière significative au cours de l'écrasement, en grande déformation, le déviateur tend vers un palier sans toutefois l'atteindre en fin d'essai (20 % de déformation axiale). Comme pour les essais triaxiaux CIU, il est possible que le faible élancement de nos échantillons (élancement 1) empêche l'obtention de ce palier.

Par ailleurs, les modules de déformations mesurés lors de ces 3 essais à 0.1 % de déformation axial attestent d'une augmentation logique de la rigidité du matériau avec la pression de consolidation. Figure II-29 représente évolution du module de déformation avec la pression de consolidation : les 3 points sont quasiment linéaires : la pente est identique avec un très bon coefficient de détermination $R^2 = 0.9961$. La valeur n obtenue par la formule $E = \alpha \sigma_3'^n$ est $n = 0.5582 \approx 0.56$.

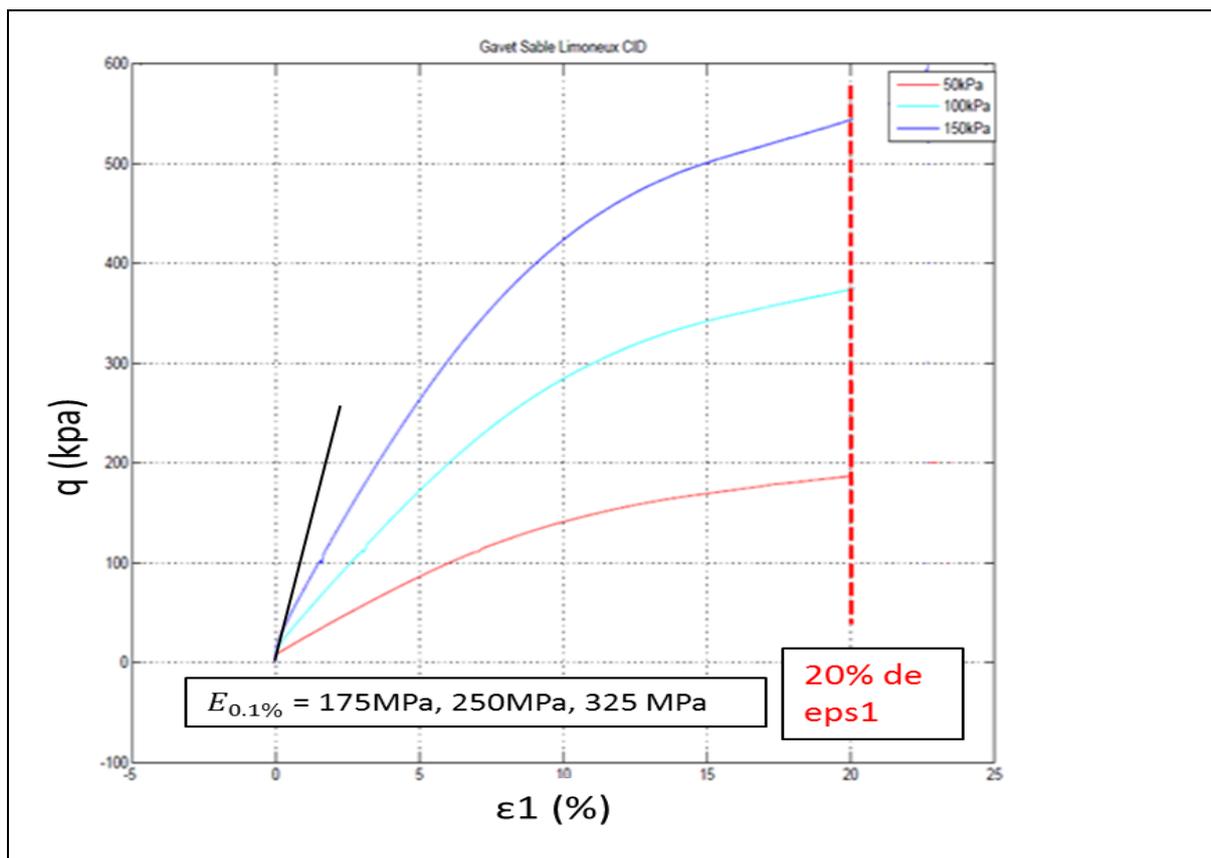


Figure II-27 : Evolution du déviateur des contraintes (q) en fonction de la déformation axiale lors des essais CID (échantillons sable limoneux de Gavet fabriqués par sous-compaction à sec puis saturés)

Evolution de la déformation volumique en conditions drainées (essais CID)

La Figure II-28 donne l'évolution de la déformation volumique des échantillons testés en fonction de la déformation axiale au cours des essais CID. Pour les trois pressions de consolidation étudiées, les échantillons de sable limoneux de Gavet préparés par sous-compaction à sec présentent un comportement purement contractant qui s'apparente à celui d'un matériau lâche. Notons toutefois qu'après une forte phase de contractante (vers 4 %), une stabilisation des déformations volumiques est observée au voisinage de 15 % de déformation axiale.

Ces résultats nous permettent d'évaluer le coefficient de Poisson du matériau. Celui-ci est déduit de la pente initiale des courbes ($\varepsilon_v - \varepsilon_1$). Sa valeur est d'environ 0.16 pour l'ensemble des essais.

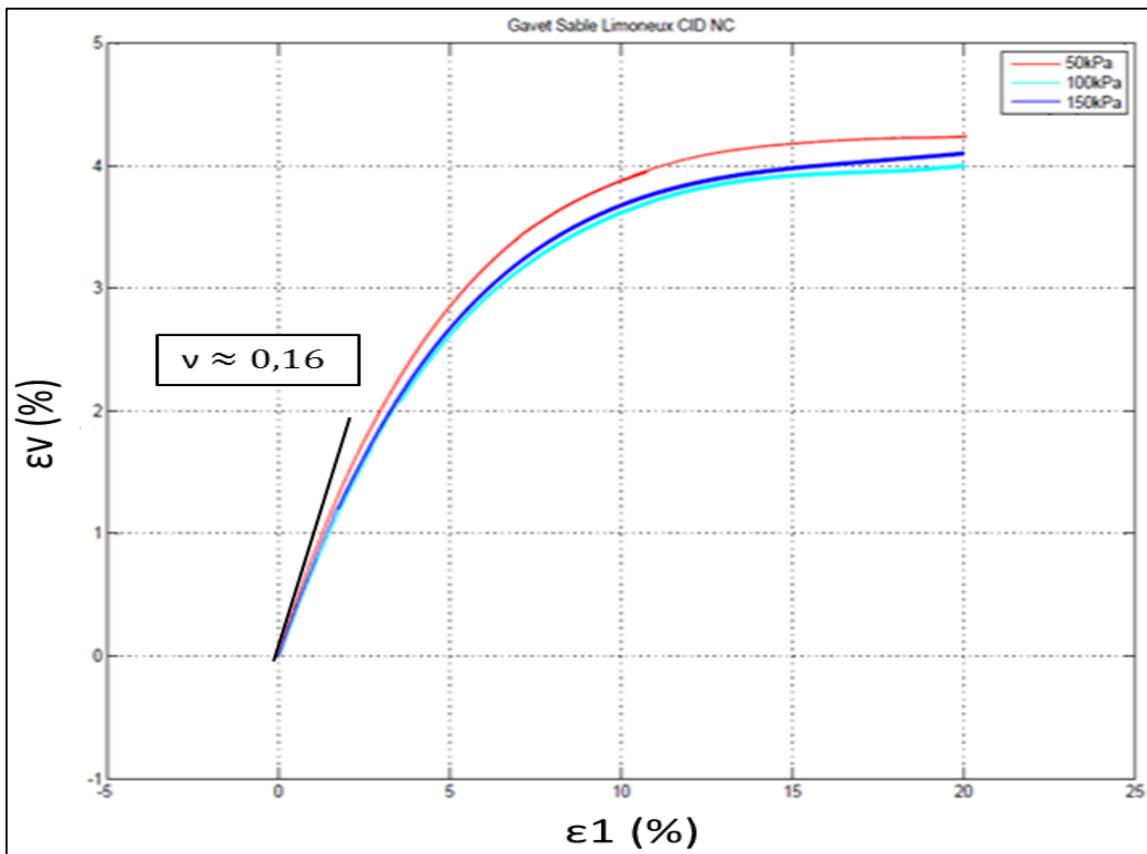


Figure II-28 : Evolution de la déformation volumique (ε_v) en fonction de la déformation axiale (ε_1) lors des essais CID (sable limoneux de Gavet fabriqués par sous-compaction à sec puis saturés)

σ'_3 (kPa)	e_{final}	e_0	$q_{rupture}$ (kPa)	$p_{rupture}$	E' (MPa)	ν	n_{moyen}	$\nu_{moyenne}$
-------------------	-------------	-------	---------------------	---------------	------------	-------	-------------	-----------------

							Avec $E = \alpha \sigma_3^n$	
50	0.49	0.57	115	200	175	0.175	0.56	0.16
100	0.47	0.54	225	380	250	0.1875		
150	0.45	0.53	330	550	325	0.125		

Tableau II-11 Paramètres déduits des essais triaxiaux CID réalisés sur sable limoneux de Gavet sous compacté à sec

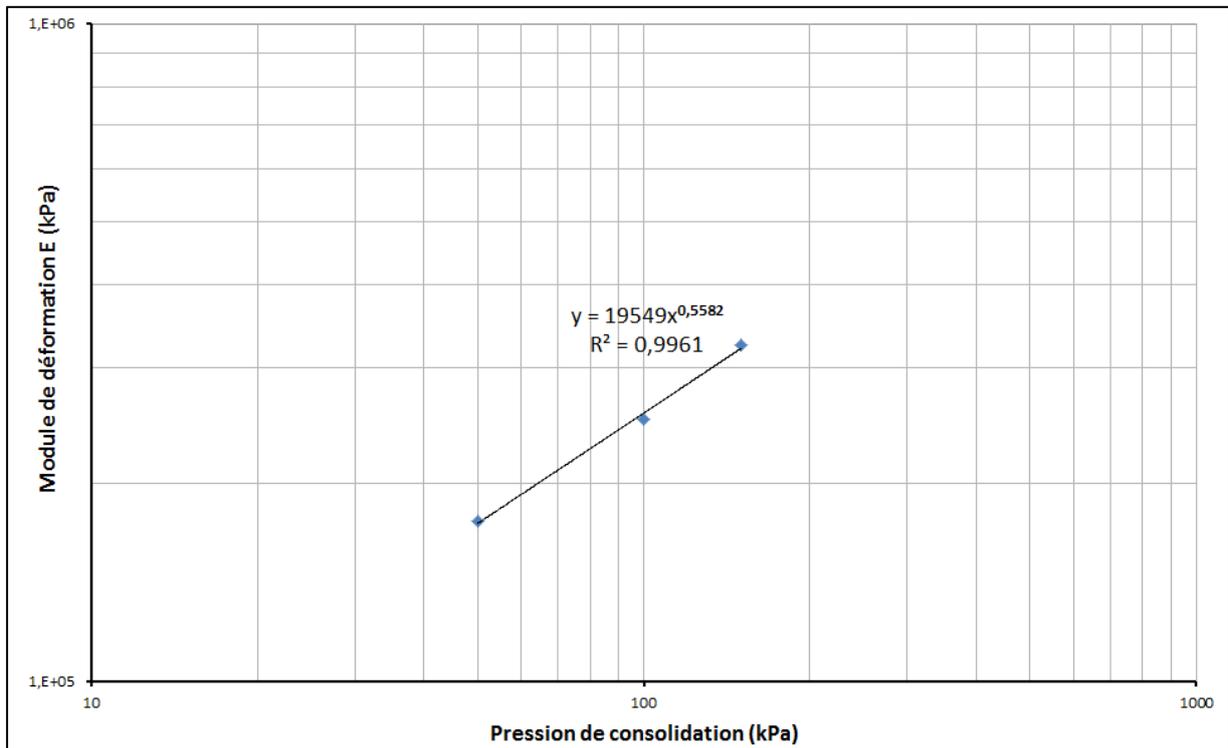


Figure II-29 Evolution de module de déformation en fonction de la pression de consolidation (Sable limoneux Gavet fabriqué par sous compaction à sec puis saturé –état de pâte)

Droites d'état limite et droite de transformation de phase (synthèse des essais CIU et CID)

La Figure II-30 donne dans le plan (p',q) les différents états de contrainte à la rupture et lors de la transformation de phase (passage contractante – dilatance) observés au cours des essais triaxiaux CIU et CID sur le sable limoneux de Gavet sous-compacté à sec.

Concernant l'état limite, une distribution quasi linéaire des points est observée. Les droites d'état limite pour les essais drainés et non drainés sont quasi confondues. Si on linéarise tous les points à la rupture de deux types d'essais, on retrouve une pente de rupture avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.9943$, l'angle de frottement moyenne $\varphi = 40^\circ$ et une cohésion effective (c') de 5 kPa.

Les points de transformation de phase se situent logiquement en dessous de la ligne de rupture. Ces points s'alignent selon une droite ($R^2 = 0.998$) dont la pente correspond à un angle de frottement plus faible que celui à la rupture : $\varphi_{tp} = 34^\circ$.

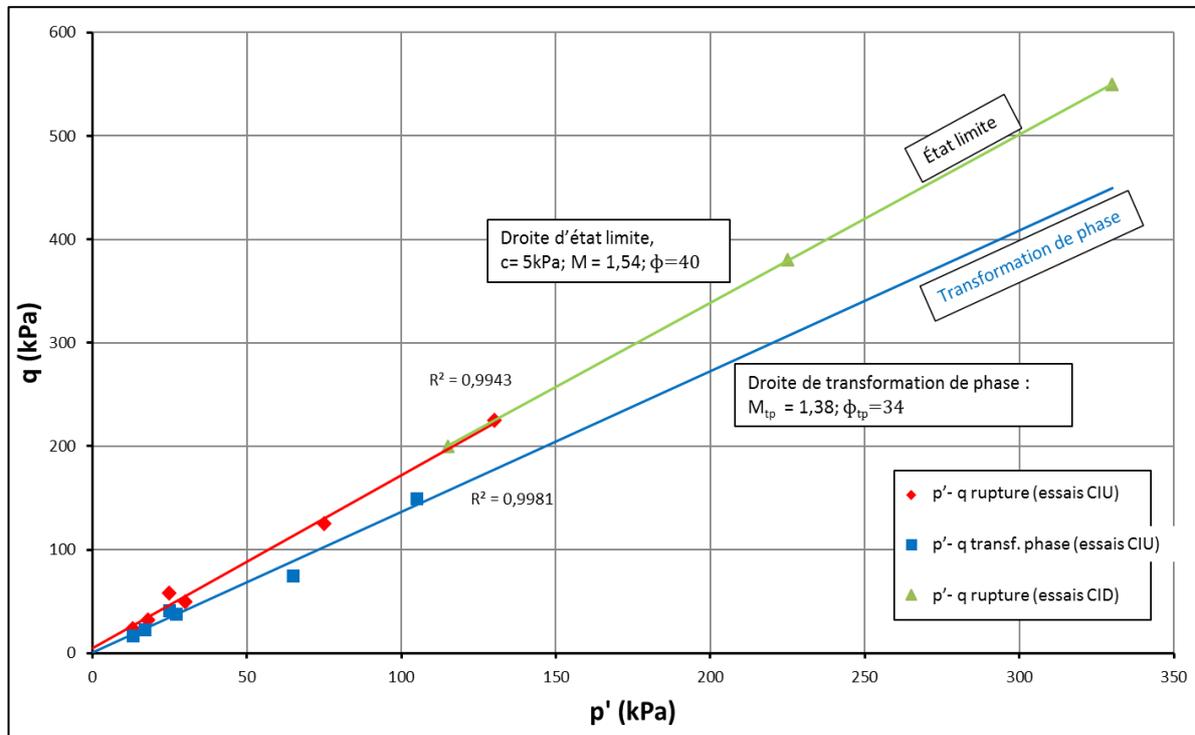


Figure II-30 : Droite d'état limite et droite de transformation de phase obtenues à partir des essais triaxiaux CIU et CID réalisés sur sable limoneux de Gavet sous compacté à sec

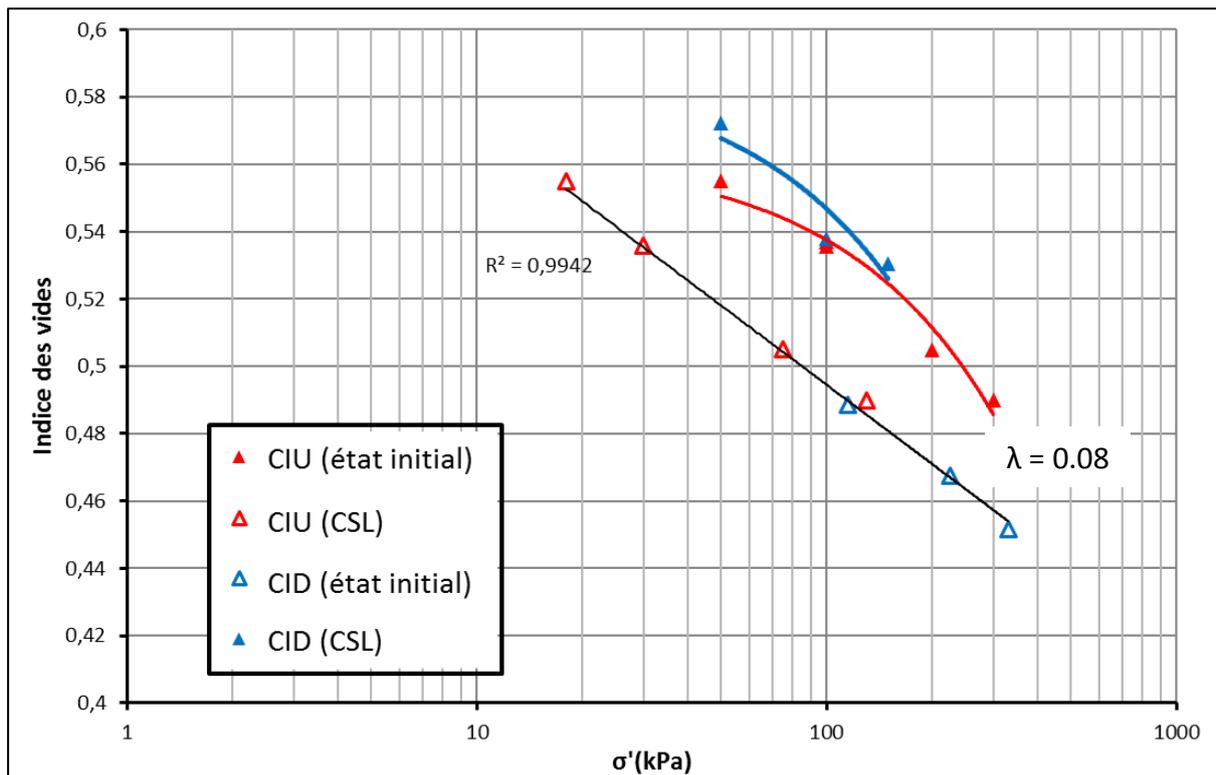


Figure II-31 : Etats initiaux des échantillons testés et ligne d'état critique déduit des essais triaxiaux CIU et CID réalisés sur sable limoneux de Gavet sous compacté à sec

La Figure II-31 donne dans le plan (indice des vides – contraintes effective moyenne) la position initiale (c'est-à-dire en fin de consolidation isotrope) de chacun des échantillons testés. Les points observés sont distribués sur une bande étroite qui se situe au-dessus de la ligne d'état critique déduite des essais triaxiaux CIU et CID. A l'état initial, les échantillons de sol se trouvent donc dans le domaine contractant avec des valeurs d'indices des vides initiales comprises entre 0,49 - 0,58 ; ce qui est en bon accord avec le comportement contractant observés lors des essais triaxiaux.

II.4.7 Comportement du sable limoneux compacté à 25 coups sur chemin de chargement déviatorique

Evolution du déviateur des contraintes en conditions non drainées (essais CIU),

La Figure II-32 présente l'évolution du déviateur des contraintes au cours des 4 essais CIU réalisés sur le sable limoneux de Gavet préparé à w_{OPN} et compacté à 25 coups, puis saturé.

A l'exception de l'essai réalisé à $\sigma'_3=30$ kPa dont les résultats semblent erronés, on note un accroissement logique du déviateur des contraintes avec la pression de consolidation. La croissance rapide du déviateur en début d'essai (faible niveau de déformation axiale) est suivi d'une tendance à la stabilisation au-delà de 5 % de déformation axiale. Cette stabilisation synonyme d'une rupture généralisée de l'échantillon est particulièrement visible pour les essais à $\sigma'_3=50$ kPa et 100 kPa. En revanche, elle n'a pas été obtenue pour l'essai à $\sigma'_3=150$ kPa ; ce qui comme pour les essais décrits précédemment pourrait s'expliquer par le faible élanement

de nos échantillons (élancement 1). Faute de temps, nous n'avons pas pu réaliser une seconde campagne d'essais avec des échantillons d'élancement supérieur à un.

Evolution de la pression interstitielle en conditions non drainées (essai CIU)

La Figure II-33 donne l'évolution des surpressions interstitielles mesurées en sortie d'échantillon au cours des essais CIU. Si l'on exclue l'essai à $\sigma'_3=30$ kPa dont les résultats semblent erronés (ce qui confirme les observations faites sur la mesure du déviateur des contraintes à la Figure II-32), l'application d'un déviateur de contraintes sur les échantillons en conditions non drainées entraîne une augmentation rapide de la surpression interstitielle jusqu'à un pic obtenu vers 1 % de déformation axiale pour les essais à σ'_3 de 50 kPa et 100 kPa et 6 % de déformation axiale pour l'essai à σ'_3 de 150 kPa. Cette augmentation des surpressions interstitielles caractérise une phase de contractance du matériau.

Au-delà de ces niveaux de déformation axiale, les surpressions interstitielles tendent à décroître légèrement pour les trois échantillons puis à se stabiliser ; ce qui atteste d'une courte phase de dilatance puis une stabilisation à l'état critique.

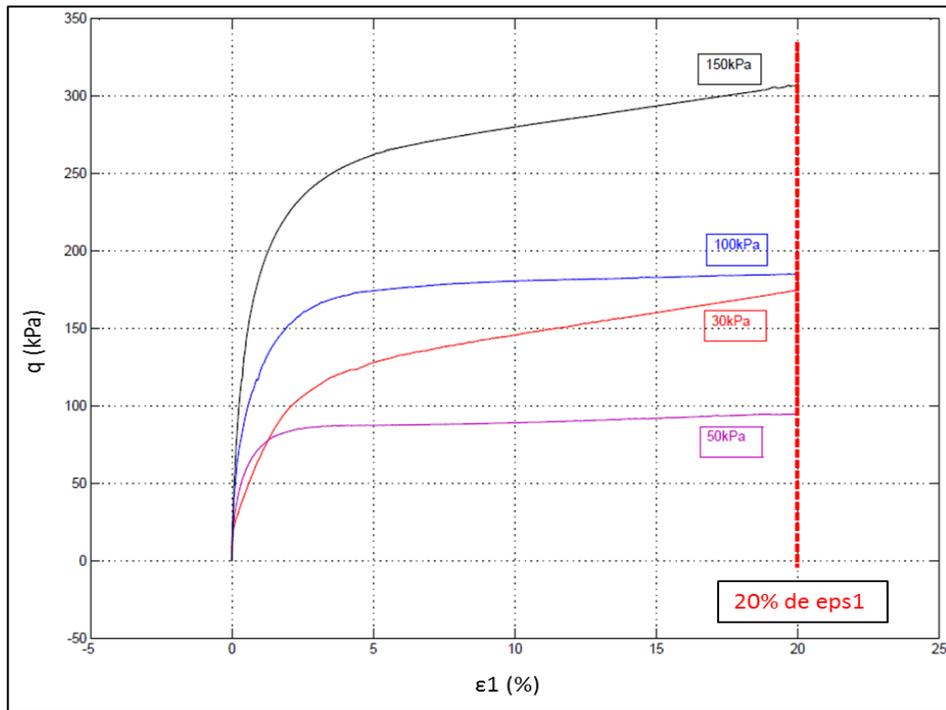


Figure II-32 : Evolution du déviateur des contraintes (q) en fonction de la déformation axiale lors des essais CIU (échantillons sable limoneux de Gavet compacté à 25 coups à w_{OPN} puis saturés)

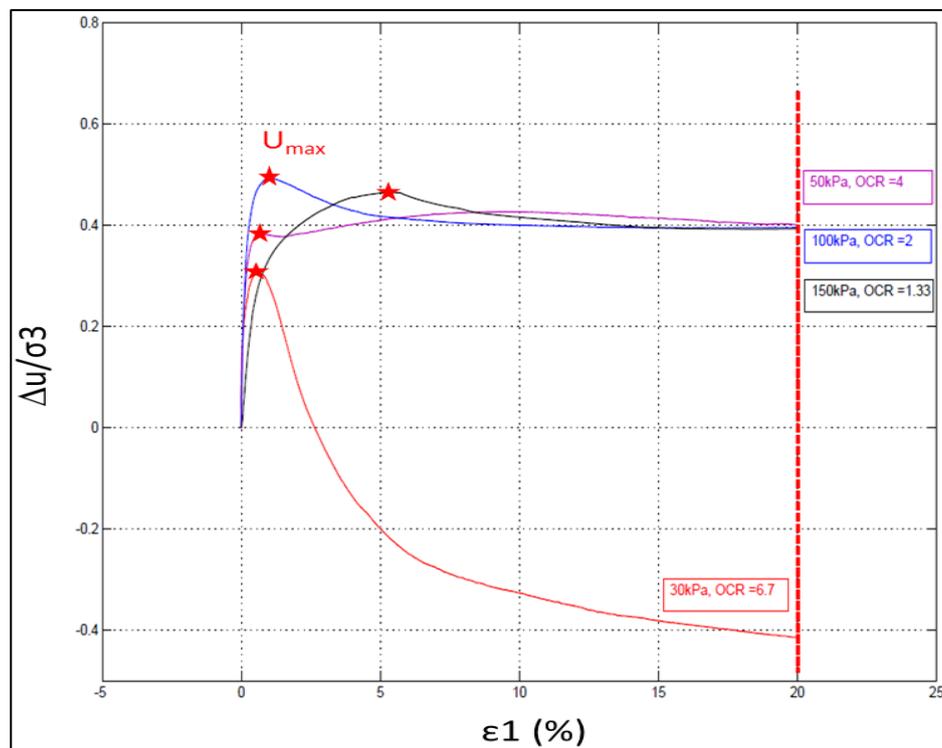


Figure II-33 : Evolution de la surpression interstitielle normalisée en fonction de déformation axiale lors des essais CIU (échantillons sable limoneux de Gavet compacté à 25 coups à w_{OPN} puis saturés)

Chemins de contraintes effectives suivis durant l'essai CIU

La Figure II-34 donne les chemins de contraintes effectives (plan déviateur des contraintes-pression moyenne effective) suivi lors des essais CIU par le matériau compacté à 25 coups. Ces chemins de contraintes effectives présentent des formes assez différentes en fonction de la pression de consolidation imposée.

En début de cisaillement, les gradients verticaux de contraintes initiales ont été observés, sauf sur l'essai de 150 kPa de pression de consolidation qui présente une pente initiale anisotrope. Puis on observe un comportement dilatant non liquéfiable sur les essais à σ'_3 égal à 30 et 150 kPa. En effet pour ces deux essais, les courbes remontent verticalement avant de s'incurver vers la droite pour remonter ensuite le long de la ligne d'état critique. Pour les essais à σ'_3 égal à 50 et 100 kPa, on note une faible phase de contractante en début de cisaillement durant laquelle les courbes s'infléchissent vers la gauche : le déviateur continue à augmenter alors que la pression moyenne diminue jusqu'à une valeur minimale. Au-delà, on note une augmentation de la pression moyenne et du déviateur. Ainsi les chemins de contraintes s'infléchissent vers la droite et remontent le long de la ligne d'état limite. Globalement, et si on exclut l'essai à σ'_3 égal à 30 kPa dont les résultats semblent erronés (cf paragraphes précédents), on remarque que le matériau présente un comportement qui passe de faiblement contractant à dilatant lorsque la pression de consolidation augmente.

La droite d'état limite a été déterminée en considérant arbitrairement la valeur du déviateur à 20 % de déformation axiale comme valeur à la rupture. La ligne d'état limite ainsi définie est caractérisée par une cohésion effective (c') de 11 kPa et un angle de frottement effectif moyen (φ') de 37°.

Concernant la détermination de la droite de changement de phase, les essais réalisés à σ'_3 égal à 50 kPa et 100 kPa mettent clairement en évidence un point de transformation de phase (état de contrainte pour lequel la courbe (p' - q) admet une tangente verticale). La droite de transformation de phase a ensuite été déterminée par linéarisation des points de transformation de phase de ces deux essais. Cette droite est définie par les caractéristiques suivantes : cohésion effective (c'_{tp}) à 0 kPa, angle de transformation de phase (φ_{tp}) à 22°.

L'ensemble de ces résultats tendent à montrer que les échantillons de sable limoneux de Gavet préparés à w_{OPN} puis compactés à 25 coups ont un comportement qui s'apparente à celui d'un matériau dilatant, faiblement cohésif, et non liquéfiable.

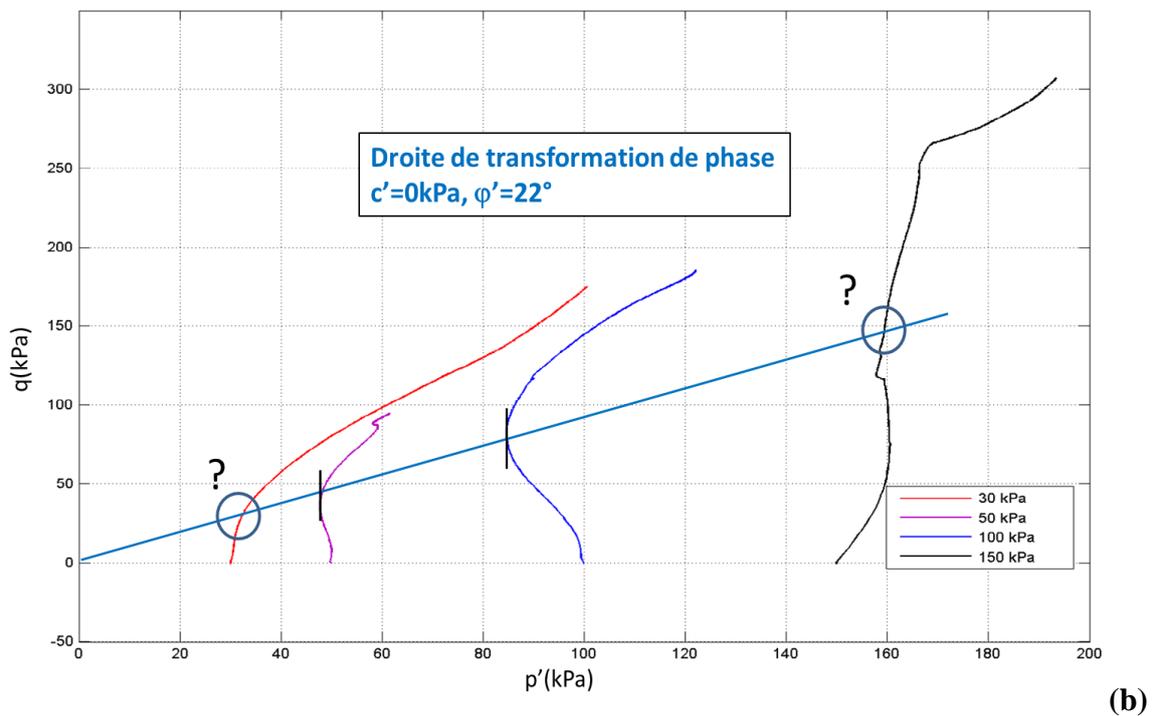
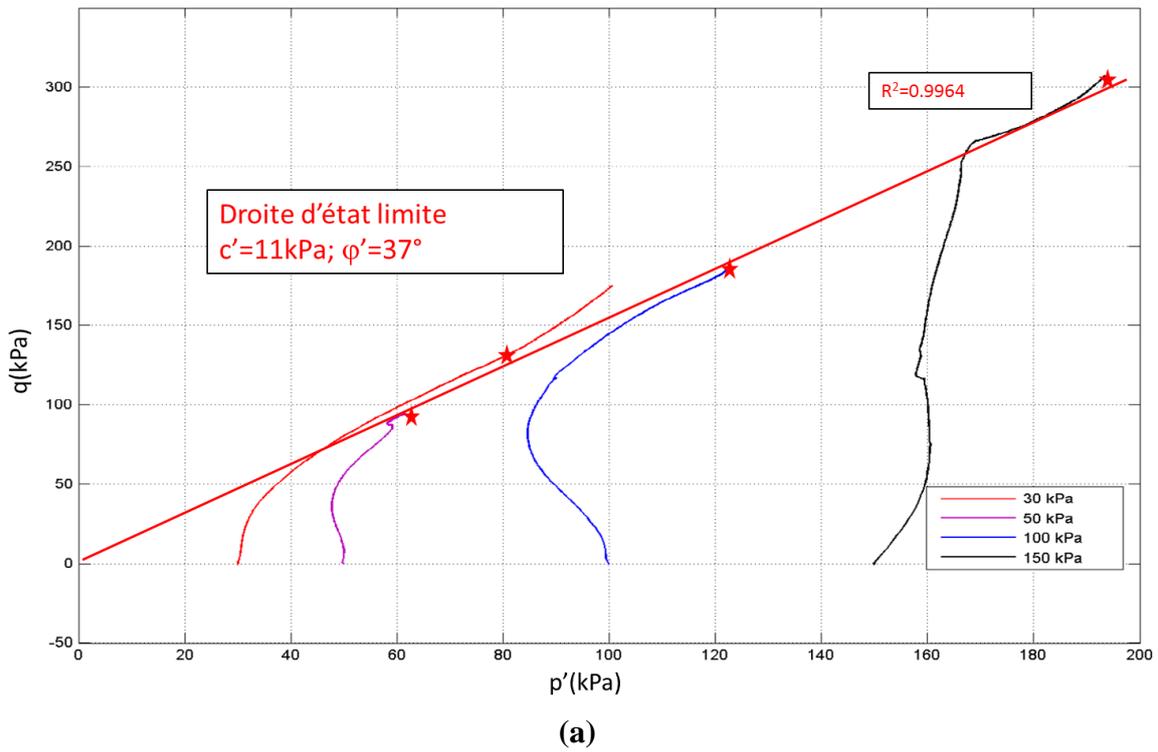


Figure II-34 : Chemins de contraintes effectives représentés dans le plan (déviateur – pression moyenne effective) pour les essais CIU ((a) : droite d'état limite ; (b) : droite de transformation de phase)

σ'_3 (kPa)	OCR	e_0	$p'_{rupture}$ (kPa)	$q_{rupture}$ (kPa)	$\eta_{rupture}$	ϕ'	p'_{min} (kPa)	q_{min} (kPa)	η_{tp}	ϕ_{tp}
30	6.7	0.512	100	175	1.750	43	38	53	1.395	34
50	4	0.518	62	95	1.532	38	52	59	1.135	29
100	2	0.498	122	185	1.516	37	90	120	1.333	33
150	1.33	0.488	190	310	1.632	40	163	210	1.288	32

Tableau II-12 Paramètres déduits des essais triaxiaux CIU réalisés sur sable limoneux de Gavet compacté à 25 coups

Evolution du déviateur des contraintes en conditions drainées (essais CID)

Figure II-35 présente les résultats de 4 essais triaxiaux consolidés isotrope drainés (CID) réalisés sur le sable limoneux de Gavet compacté à 25 coups à w_{OPN} puis saturés. On note un accroissement logique de la résistance au cisaillement du matériau avec la pression de consolidation. Pour les différents essais, le déviateur des contraintes augmente de manière significative jusqu'à 2.5 % de déformation axiale puis évolue ensuite vers une valeur de palier (le palier est obtenu plus tardivement – vers 5 % de déformation axiale - dans le cas de l'essai à σ'_3 de 150 kPa).

Figure II-37 représente évolution du module de déformation avec la pression de consolidation : les 4 points sont quasi linéaire : avec une pente n obtenue par la formule $E = \alpha \sigma_3'^n$ est $n = 0.6354 \approx 0.64$. De manière logique, on observe une augmentation de la rigidité du matériau avec la pression de consolidation.

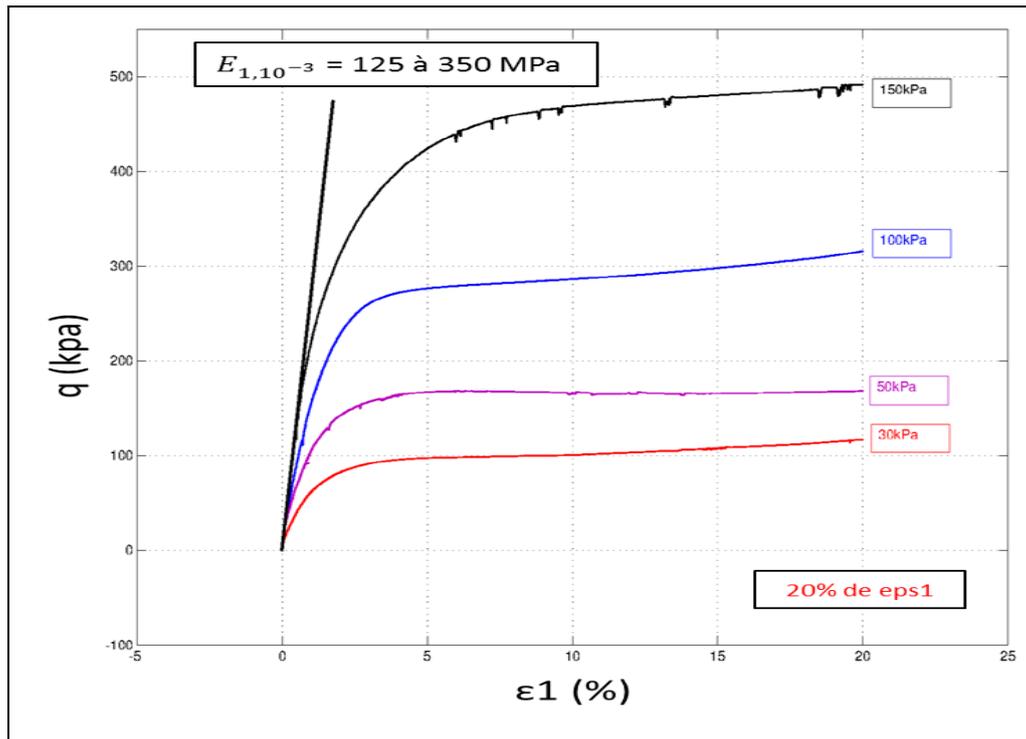


Figure II-35 : Evolution du déviateur des contraintes (q) en fonction de la déformation axiale lors des essais CID (échantillons sable limoneux de Gavet compacté à 25 coups à w_{OPN} puis saturés)

Evolution de la déformation volumique en conditions drainées (essais CID)

La Figure II-36 donne l'évolution de la déformation volumique des échantillons de sable limoneux compactés à 25 coups en fonction de la déformation axiale lors des essais CID. Deux comportements différents sont observés en fonction de la pression de consolidation. Pour les fortes pressions de consolidation (100 et 150 kPa), donc faibles degrés de sur-consolidation (2 et 1.3), le matériau présente un comportement contractant en début d'essai (jusqu'à 2.5 % de déformation axiale) et évolue ensuite vers un état à variation volumique quasi nulle correspondant probablement à l'état critique. A l'opposé, les échantillons soumis aux faibles pressions de consolidation (30 et 50 kPa), donc forts degrés de sur-consolidation (6.7 et 4), présentent une brève phase de contractante en début d'essai (pour des déformations axiales inférieures à 2 %) puis dilatent durant le restant de l'essai sans témoigner de stabilisation des variations volumiques.

Notons que les valeurs de coefficient de Poisson déduites des pentes initiales des courbes ($\varepsilon_v - \varepsilon_1$) obtenues lors de ces essais CID sont comprises entre 0.13 et 0.33 (cf tableau ci-après).

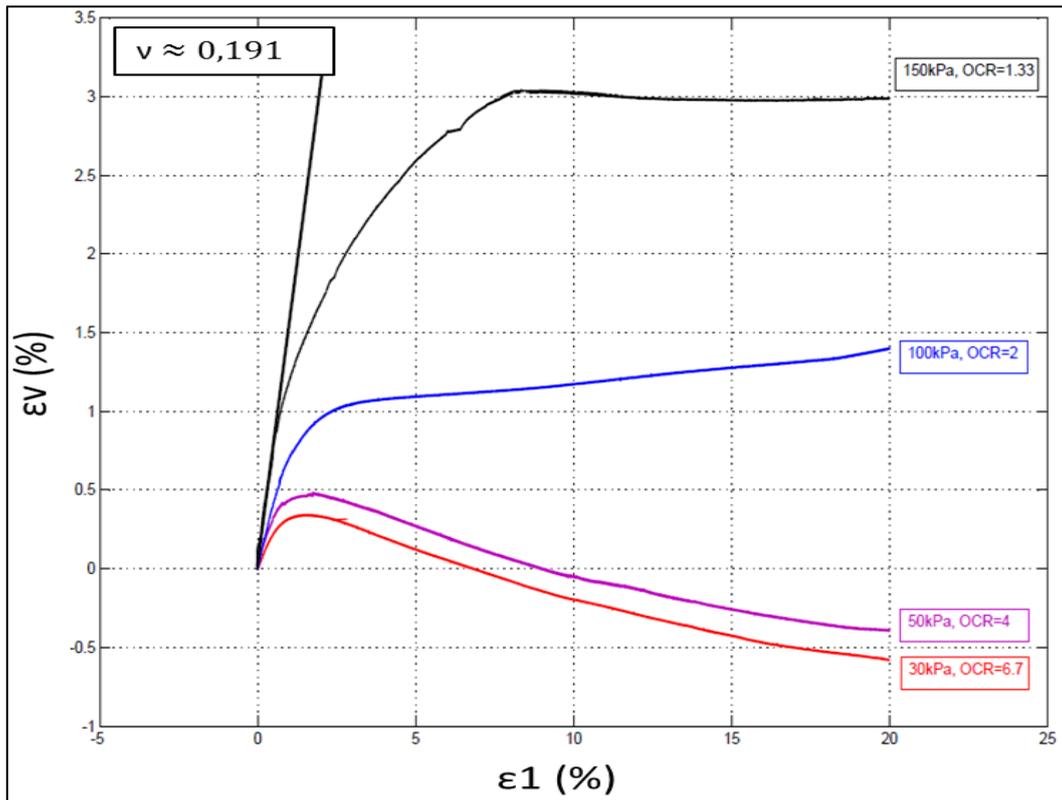


Figure II-36 : Evolution de la déformation volumique (εv) en fonction de la déformation axiale ($\varepsilon 1$) lors des essais CID (sable limoneux de Gavet compacté à 25 coups à w_{OPN} puis saturés)

σ'_3 (kPa)	OCR	e_0	$q_{rupture}$ (kPa)	$p_{rupture}$	E (MPa)	ν	n_{moyen} Avec $E = \alpha \sigma'_3{}^n$	$\nu_{moyenne}$
30	6.7	0.506	68	117	125	0.33	0.64	0.19
50	4	0.510	106	165	200	0.13		
100	2	0.496	205	320	300	0.13		
150	1.33	0.488	325	495	350	0.18		

Tableau II-13 Paramètres déduits des essais triaxiaux CID réalisés sur sable limoneux de Gavet compacté à 25 coups à w_{OPN} puis saturés

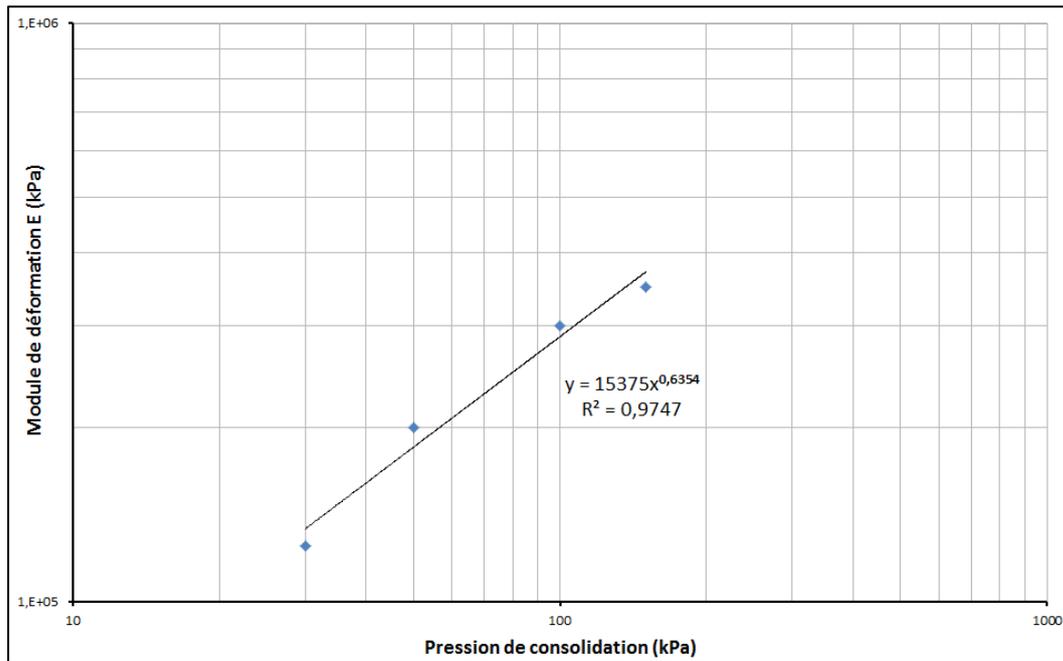


Figure II-37 : Evolution de module de déformation en fonction de la pression de consolidation (Sable limoneux Gavet compacté 25 coups par couche à Optimum Proctor puis saturé)

Droites d'état limite et droite de transformation de phase (synthèse des essais CIU et CID)

La Figure II-38 donne dans le plan (p' , q) les différents états de contrainte à la rupture observés au cours des essais triaxiaux CIU et CID sur le sable limoneux de Gavet compacté à 25 coups à w_{OPN} puis saturés.

Les états de contrainte à la rupture issus des essais CIU et CID présentent une distribution quasi linéaire dans le plan (p' , q) et conduisent à une droite d'état limite identique. Cette droite d'état limite permet de déduire les caractéristiques suivantes du matériau : cohésion effective (c') à 11 kPa, angle de frottement (φ) à 37°.

La Figure II-39 présente la droite de transformation de phase (passage contractant / dilatant) du sable limoneux de Gavet compacté à 25 coups à w_{OPN} puis saturés. Trois critères ont été utilisés pour déterminer cette droite de transformation de phase.

Pour le premier critère retenu, la transformation de phase est supposée correspondre à l'état de pression moyenne effective minimale observé à l'essai triaxial non drainé (CIU). Dans le plan (p' , q), cet état correspond à l'obtention d'une tangente verticale clairement observée lors des essais CIU sous 50 et 100 kPa de pression de consolidation (Figure II-34a). Par cette méthode, la droite de transformation de phase est caractérisée par une cohésion nulle et un angle de frottement de 22°.

Le second critère utilisé suppose que pour les essais triaxiaux non drainés (CIU), la transformation de phase est obtenue lorsque les surpressions interstitielles mesurées en sortie d'échantillon sont maximales. La droite de transformation de phase ainsi obtenue se caractérise par une cohésion nulle et un angle de frottement de 32°.

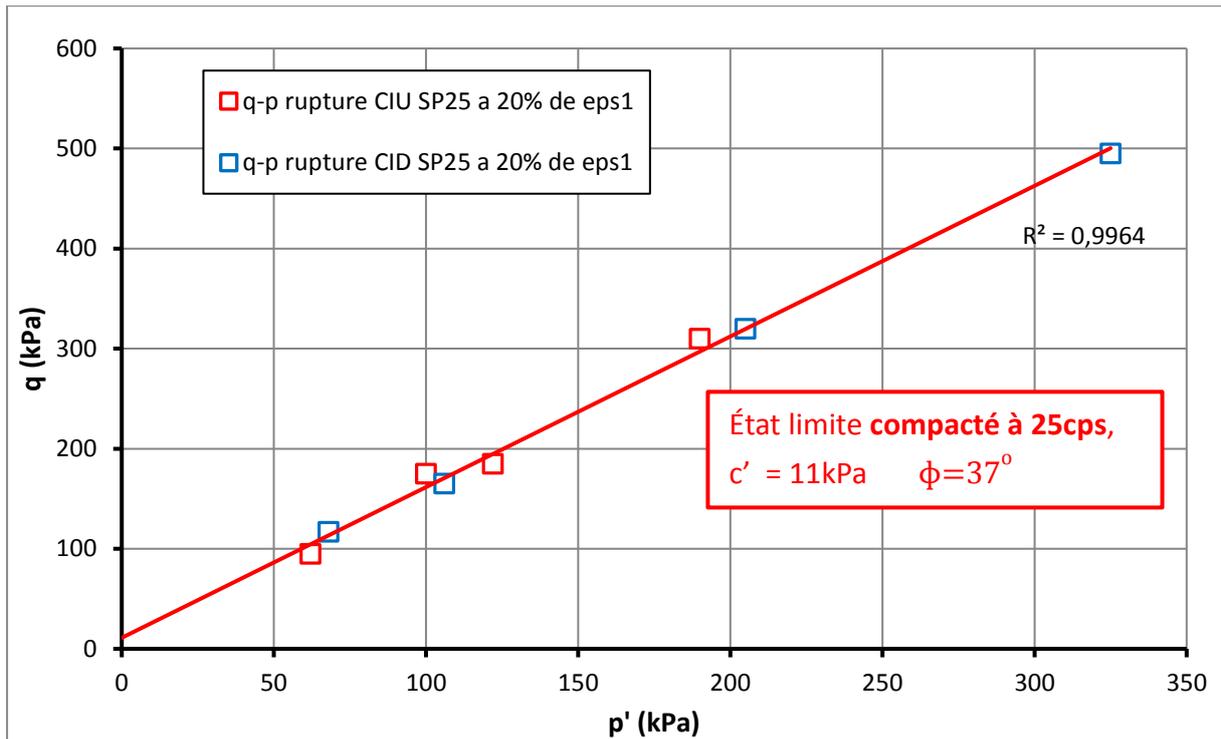


Figure II-38 : Droite d'état limite obtenues à partir des essais triaxiaux CIU et CID réalisés sur sable limoneux de Gavet compacté à 25 coups à w_{OPN} puis saturés

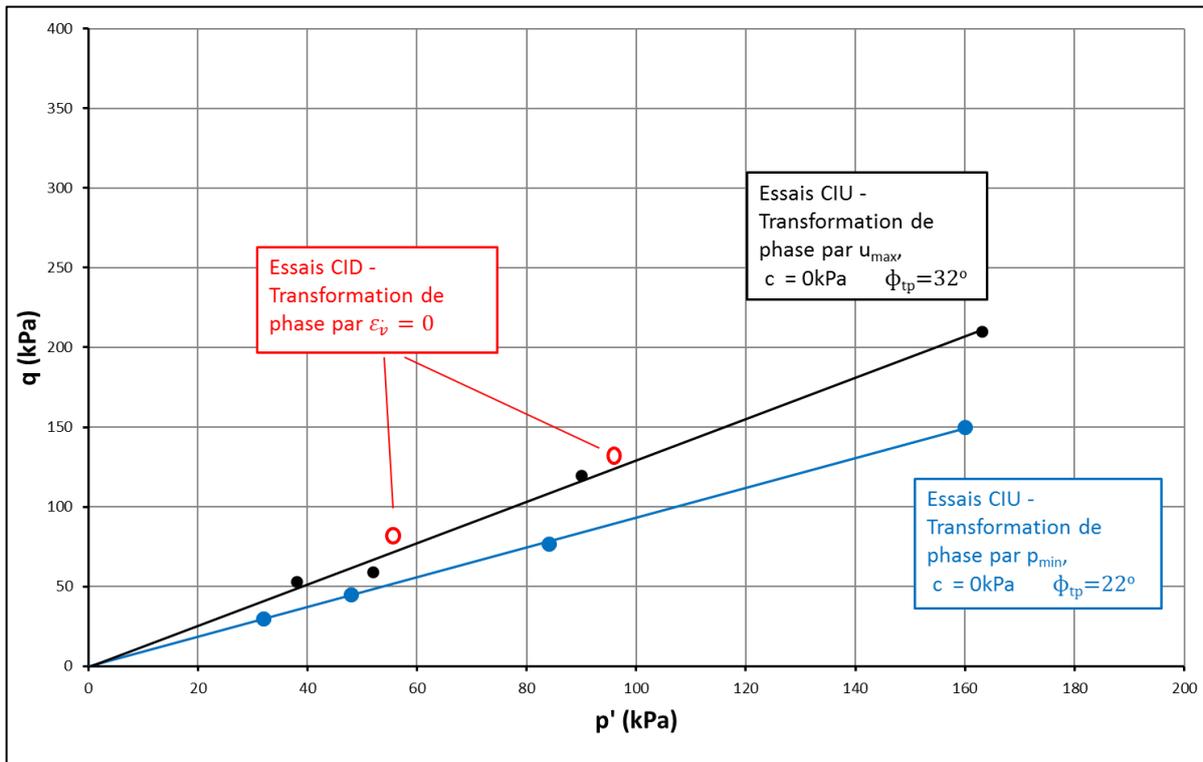


Figure II-39 : Droite de transformation de phase obtenue à partir des essais triaxiaux CIU et CID réalisés sur sable limoneux de Gavet compacté à 25 coups à w_{OPN} puis saturés

Dans le cas des essais triaxiaux drainés (CID), un troisième critère a été utilisé pour déterminer la droite de transformation de phase. Celui-ci suppose que l'état critique est obtenu lorsque le taux de variation volumique est nul. Seuls les essais réalisés sous 30 et 50 kPa de pression de consolidation (Figure II-36) témoignent clairement d'un passage contractance – dilatance et sont donc reportés sur la Figure II-39. Remarquons que ce troisième critère appliqué aux essais CID permet de retrouver une droite de transformation de phase très proche de celle obtenue avec le second critère appliqué aux essais CIU.

La Figure II-40 donne dans le plan (e-p') l'état initial de chaque échantillon (carré pleins), son état final (carré vide) et la position de la ligne d'état critique. Pour les faibles pressions de consolidation, on remarque que les points se trouvent en dessous de la ligne d'état critique et tendent donc à se dilater au cours du cisaillement. Les points initiaux observés sont assez proches et ils se situent au-dessous de la ligne critique, dans la zone dilatant avec les valeurs des indices des vides initiales variant entre 0.49 - 0.52. On remarque un comportement dilatance pour les deux essais aux pressions de consolidation plus faibles, pour les deux autres, les matériaux sont de type contractant. La pente de la ligne de rupture déterminée est de l'ordre $\lambda = 0.1$ avec un coefficient de corrélation $R^2=0.8583$.

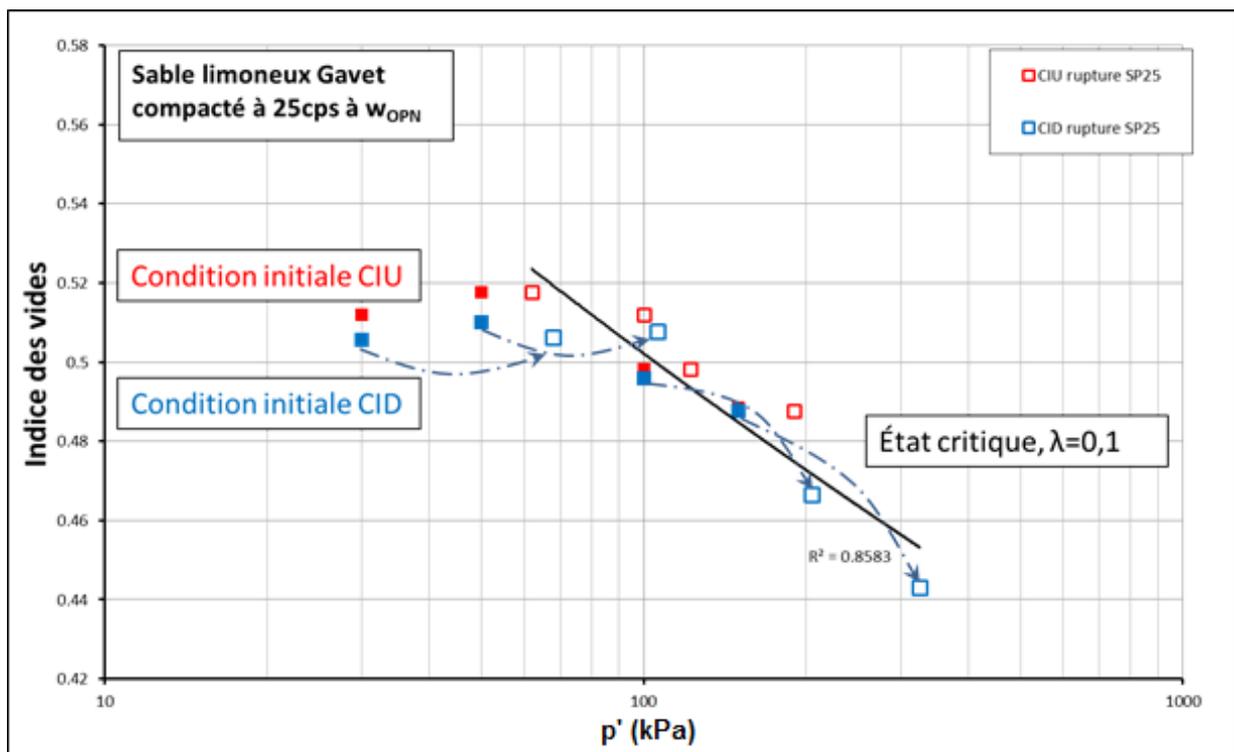


Figure II-40 : Etats initiaux des échantillons testés et ligne d'état critique déduit des essais triaxiaux CIU et CID réalisés sur sable limoneux de Gavet compacté à 25 coups à w_{OPN} puis saturés

II.4.8 Synthèse du comportement de référence du sable limoneux de Gavet sur chemins déviatoires

Comme vu précédemment, différentes séries d'essais triaxiaux consolidés isotropes non drainés (CIU) et consolidés isotropes drainés (CID) ont été réalisées sur le sable limoneux de Gavet pris dans deux états initiaux différents. Pour le premier état, les échantillons de sol ont été préparés par sous compaction de poudre sèche ($\rho_d = 1.65 \text{ t/m}^3$, soit 88 % de ρ_{dOPN}) puis saturé. Ces échantillons présentent une contrainte de pré-consolidation mesurée de 40 kPa (Figure II-23). Ils peuvent par conséquent être considérés comme normalement consolidés pour l'ensemble des essais triaxiaux (pression de consolidation minimum de 50 kPa).

Pour le second état, le matériau a été compacté à 25 coups dans un moule CBR à la teneur en eau de l'optimum Proctor. La densité sèche obtenue est de $\rho_d = 1.81 \text{ t/m}^3$, soit 97 % de ρ_{dOPN} . Les échantillons ainsi fabriqués présentent une contrainte de pré-consolidation de 200 kPa (Figure II-23).

Bien qu'ayant des indices des vides relativement proches (compris entre 0.53 et 0.57 pour l'état 1 et entre 0.49 et 0.51 pour l'état 2), ces deux états initiaux conduisent à des comportements très différents sur chemins déviatoires comme l'illustre la Figure II-41. Ainsi le matériau sous compacté à sec présente un comportement contractant liquéfiable caractérisé dans le cas des essais consolidés non drainés (CIU) par une inflexion vers la gauche des courbes (p' , q), le passage par une pression moyenne minimale correspondant à l'état de transformation de phase, puis une remontée le long de la droite d'état limite. A contrario, le matériau compacté à 25 coups à la teneur en eau de l'optimum Proctor présente un comportement dilatant non liquéfiable qui se caractérise lors des essais triaxiaux CIU par une inflexion très rapide vers la droite des courbes (p' , q) avant une remontée de la ligne d'état limite.

Concernant l'état limite, les deux états initiaux du sable limoneux de Gavet considérés conduisent à des droites d'état limite quasi identiques comme le montre la Figure II-41. Ainsi les cohésions (respectivement 5 kPa pour le matériau compacté à sec et 11 kPa pour le matériau compacté à 25 coups à w_{OPN}) et angles de frottement (respectivement 40° pour le matériau compacté à sec et 37° pour le matériau compacté à 25 coups à w_{OPN}) sont très proches.

Si l'on représente dans le plan (indice des vides – pression moyenne effective) les points correspondants à l'obtention de l'état critique lors des différents essais triaxiaux pour les deux états initiaux du sable limoneux de Gavet, on note que les différents points se rangent dans un fuseau assez resserré de pente moyenne (λ) égale à 0.09. Pour chaque sur le chemin (e - p'), **Figure II-42**, on peut obtenir une bande des points de critiques assez linéaire. La pente de la ligne critique obtenue sur matériau surconsolidé est plus élevée que celle du matériau normalement consolidé. (0.1 avec 0.08).

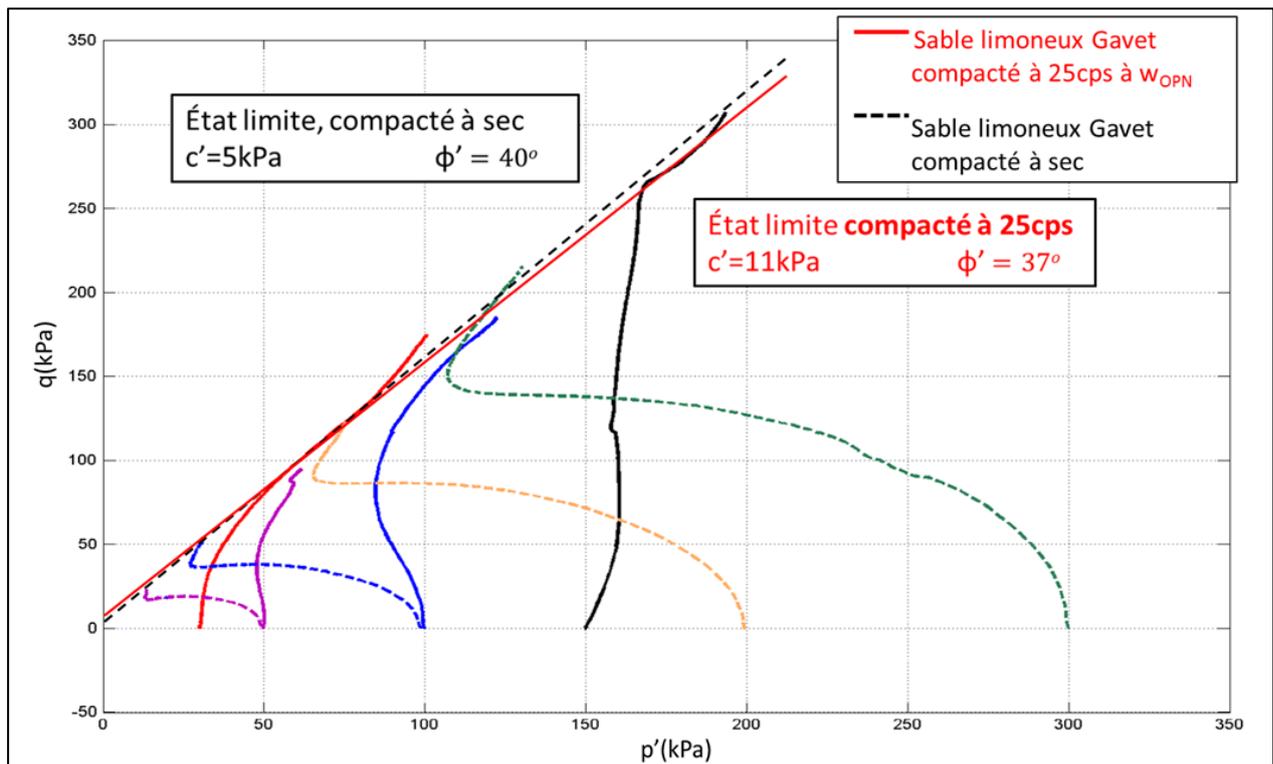


Figure II-41 : Comparaison des chemins de contraintes effectives observés lors des essais triaxiaux CIU pour les deux états initiaux du sable limoneux de Gavet

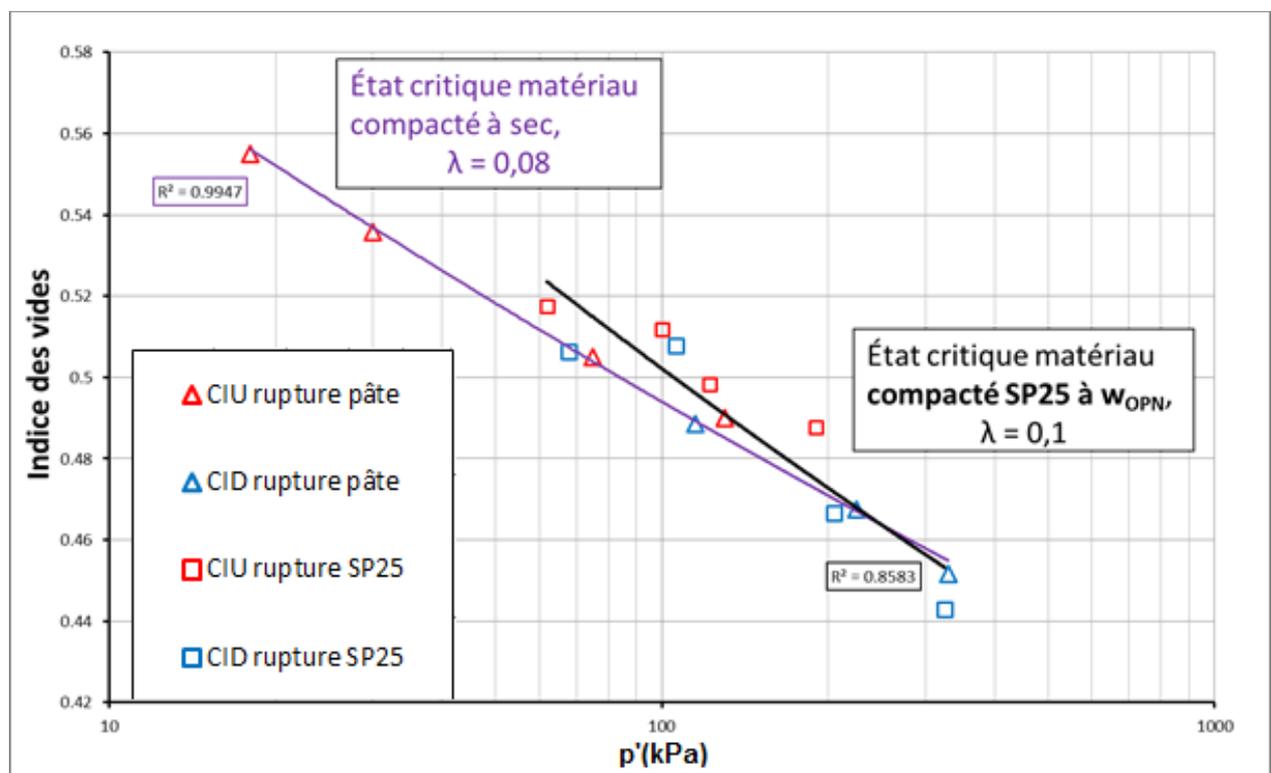


Figure II-42 : Comparaison des droites d'état critique observés lors des essais triaxiaux CIU et CID pour les deux états initiaux du sable limoneux de Gavet

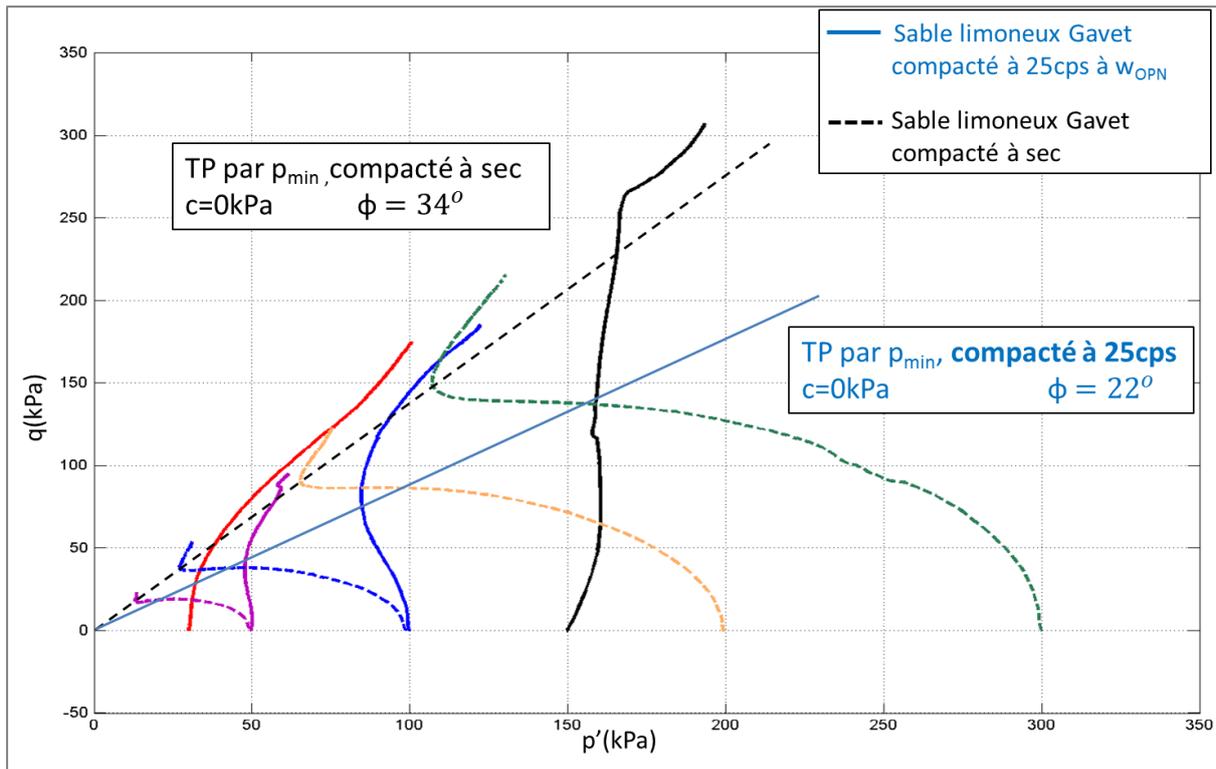


Figure II-43 : Comparaison des droites de transformation de phase observées lors des essais triaxiaux CIU pour les deux états initiaux du sable limoneux de Gavet (détermination par p'_{min})

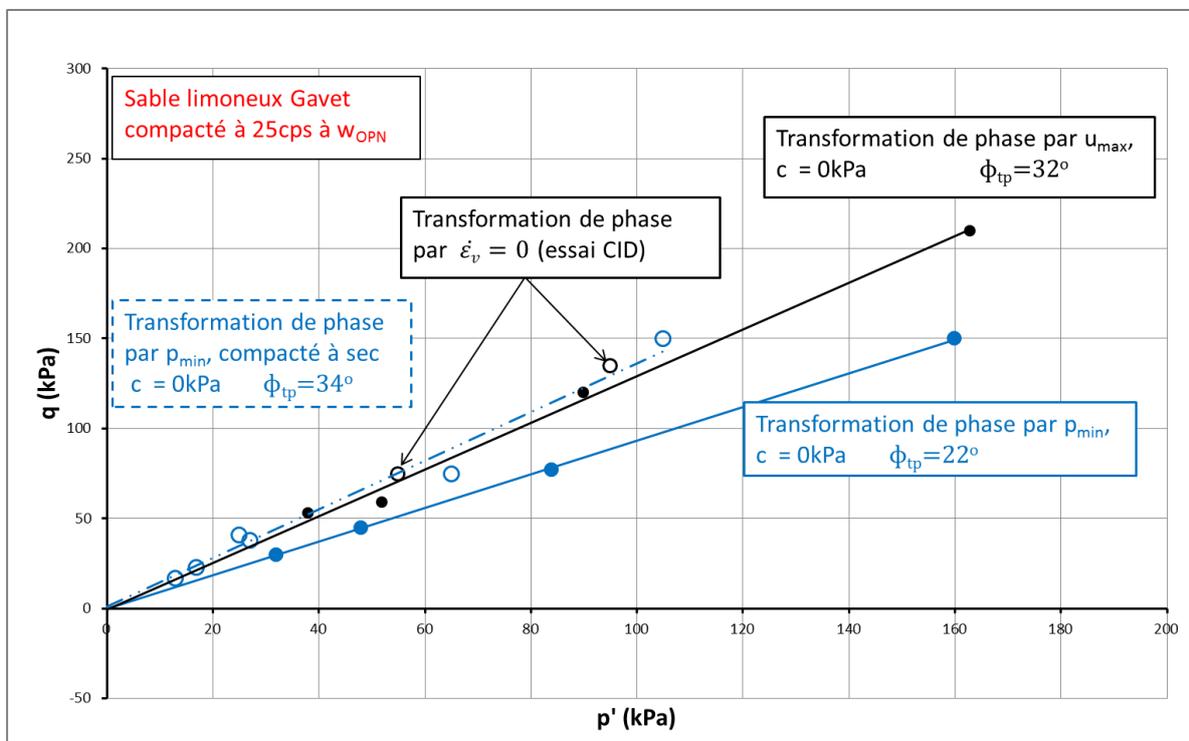


Figure II-44 : Comparaison des droites de transformation de phase observées lors des essais triaxiaux CIU pour les deux états initiaux du sable limoneux de Gavet (détermination par u_{max} et par p_{min})

Concernant la ligne de transformation de phase, le premier critère considéré qui consiste à supposer que la transformation de phase est obtenue quand le minimum de pression moyenne effective (p') est atteint lors des essais CID conduit à deux droites de transformation de phase distinctes pour les deux états initiaux du sable limoneux de Gavet. Dans ce cas, la ligne de transformation de phase du matériau compacté à w_{OPN} se situe en-dessous de celle du matériau compacté à sec et présente un angle de frottement plus faible (22° pour le matériau compacté à w_{OPN} contre 34° pour le matériau compacté à sec).

En revanche, le second critère qui consiste à considérer que la transformation de phase correspond à l'obtention du maximum de surpression interstitielle (u_{max}) lors des essais non drainés (CIU) conduit à des droites de transformation de phase quasi identiques pour les deux états initiaux différents du sable limoneux de Gavet (angle de frottement de 32°) (*Figure II-44*).

II.5 Conclusion

Ce chapitre II présente d'une part les résultats d'essais de caractérisation réalisés sur le matériau de Gavet qui est l'objet des différentes études menées dans cette thèse, d'autre part les résultats d'essais de référence (essais œdométriques, essais triaxiaux) menés sur ce même matériau (passant à 2 mm) pris à l'état saturé. L'objectif de ces campagnes d'essais est de fournir les caractéristiques mécaniques de référence du matériau de Gavet au préalable des études conduites dans les chapitre III et IV sur ce même matériau à l'état partiellement saturé.

Les essais de caractérisation ont permis de montrer que le matériau de Gavet se classe dans la catégorie des sables limoneux peu plastique (I_p compris entre 7 et 8). Il s'agit d'un sol de type A1 selon la classification du Guide des Techniques Routières (GTR).

Les essais œdométriques ont été réalisés sur la frange de matériau passant à 2 mm. Deux états initiaux du matériau ont été considérés. Dans un premier cas, les essais œdométriques ont été réalisés sur le matériau de Gavet pris à l'état de pâte (matériau préparé à la teneur en eau égale à la limite de liquidité). Dans un second cas, les essais ont été menés sur le matériau préparé à la teneur en eau w_{OPN} et compacté à 25 coups par couche dans un moule CBR (ce qui correspond à une énergie OPN-30coups).

Les résultats des essais œdométriques montrent que :

- Le matériau préparé à l'état de pâte présente un comportement normalement consolidé alors que le matériau compacté dans le moule CBR présente un comportement sur-consolidé avec une contrainte de pré-consolidation comprise entre 200 et 300 kPa.
- L'indice de compression C_c du matériau est influencé par le mode de fabrication des échantillons alors que l'indice de gonflement C_s n'en dépend pas. Ainsi, on observe que l'indice de compression mesuré sur le matériau compacté ($C_c = 0.16$) est plus élevé que celui mesuré sur la pâte ($C_c = 0.08$) alors que l'indice de gonflement des deux matériaux est identique ($C_s = 0.015$)
- Le coefficient de perméabilité (k) du matériau mesuré au perméamètre – oedomètre est influencé par l'état de densité du matériau (augmentation de k lorsque l'indice des vides du matériau augmente) mais également par l'état de sa structure solide. Ainsi dans le cas

des plus fortes perméabilités mesurées ($k > 10^{-8}$ m/s), on note que le matériau compacté présente des perméabilités analogues à celles de la pâte alors que son indice des vides est 20 % plus faible.

Les essais triaxiaux CID et CIU ont été réalisés sur la frange de matériau passant à 2 mm. Deux états initiaux du matériau ont été considérés. Dans un premier cas, les échantillons testés ont été fabriqués à partir de sable limoneux de Gavet à l'état de poudre sèche, mis en place dans le moule triaxial par sous-compaction à sec, puis saturé. Ces échantillons ont une densité après saturation de 1.65 (soit 91 % de $\rho_{d\text{ OPN}}$). Dans un second cas, les essais ont été réalisés sur des échantillons de sable limoneux de Gavet, préparés à la teneur en eau w_{OPN} , et compactés à 25 coups par couche dans un moule CBR (ce qui correspond à une énergie OPN-30 coups). Ces échantillons ont une densité après saturation de 1.81 (soit 97 % de $\rho_{d\text{ OPN}}$)

Les essais triaxiaux réalisés permettent de tirer les enseignements suivants :

- Les indices de compressibilité (C_c) mesurés sur les deux types d'échantillons lors de phases de consolidation isotrope à l'appareil triaxial sont quasi analogues ($C_c = 0.10$ pour la pâte, $C_c = 0.12$ pour le matériau compacté) et intermédiaires à ceux mesurés à l'appareil œdométrique (compris entre 0.08 et 0.16).
- Les indices de gonflement (C_s) mesurés lors de phases de consolidation isotrope à l'appareil triaxial (décharge) sont analogues pour les deux matériaux ($C_s = 0.01$) et quasi identiques à ceux mesurés à l'appareil œdométrique ($C_s = 0.016$).
- Les essais de consolidation isotrope réalisés à l'appareil triaxial ont montré que les échantillons de sable limoneux préparés par sous compactage à sec à la densité initiale de 1.65 (soit 91 % de $\rho_{d\text{ OPN}}$) présentent une contrainte de pré-consolidation de 40 kPa alors que les échantillons de sable limoneux compactés à la densité initiale de 1.81 (soit 97 % de $\rho_{d\text{ OPN}}$) témoignent d'une contrainte de pré-consolidation de 200 kPa analogue à celle mesurée à l'essai œdométrique.
- Les essais triaxiaux CIU et CID ont permis de déterminer pour les deux matériaux les droites d'état limite et de changement de phase dans le plan (p', q) et d'en déduire les caractéristiques mécaniques associées (cohésion, angle de frottement, cf tableau ci - après).
- Bien que les deux types d'échantillons de sable limoneux de Gavet (sous-compactés à sec et compacté à w_{OPN}) présentent des structures initiales différentes, leurs droites d'état limite déduites des essais triaxiaux CIU et CID sont quasi-identiques. En revanche, leurs droites de changement de phase sont différentes.
- Cette dernière observation va de pair avec le fait que les deux états initiaux testés conduisent à des comportements très différents sur chemins déviatoires. Ainsi le matériau sous compacté à sec présente un comportement contractant liquéfiable caractérisé dans le cas des essais consolidés non drainés (CIU) par une inflexion vers la gauche des courbes (p', q), le passage par une pression moyenne minimale correspondant à l'état de transformation de phase, puis une remontée le long de la droite d'état limite. A contrario, le matériau compacté à 25 coups à w_{OPN} présente un comportement dilatant non liquéfiable qui se caractérise lors des essais triaxiaux CIU

par une inflexion très rapide vers la droite des courbes (p' , q) avant une remontée de la ligne d'état limite.

Un récapitulatif des caractéristiques mécaniques mesurées lors des essais œdométriques et triaxiaux de référence sur le sable limoneux de Gavet est donné le Tableau II-14:

Etat du matériau testé	Essais œdométriques (matériau saturé)	Essais triaxiaux (matériau saturé normalement consolidé)	Essais triaxiaux (matériau saturé surconsolidé)
Pâte ($w = w_l$) $\rho_d = 1.52 \text{ t/m}^3$ $\approx 81 \%$ de $\rho_d \text{ OPN}$	$C_c = 0.083$ $C_s = 0.015$ $k = 1-4 \cdot 10^{-8} \text{ (m/s)}$	-	-
Compacté à sec puis saturé ($\rho_{\text{dinitiale}} = 1.65 \text{ t/m}^3$) $\approx 91 \%$ de $\rho_d \text{ OPN}$	-	$\lambda = 0.16; n = 0.56$ $c' = 5 \text{ kPa}; \phi' = 40^\circ$ $c_{tp} = 0 \text{ kPa}; \phi_{tp} = 34^\circ$ $c_{csl} = 0.08 \quad \sigma_p' = 40 \text{ kPa}$	-
Compacté à w_{OPN} (CBR- 25 coups) ($\rho_{\text{dinitiale}} = 1.81 \text{ t/m}^3$) $\approx 97 \%$ de $\rho_d \text{ OPN}$	$C_c = 0.160$ $C_s = 0.015$ $\sigma_p' = 200-350 \text{ kPa}$ $k = 5 \cdot 10^{-10} - 8 \cdot 10^{-8} \text{ (m/s)}$	-	$\lambda = 0.19; n = 0.64$ $c' = 11 \text{ kPa}; \phi' = 37^\circ$ $c_{tp} = 0 \text{ kPa}; \phi_{tp} = 22^\circ$ $c_{csl} = 0.1; \sigma_p' = 200 \text{ kPa}$

Tableau II-14 Paramètres déduits des essais œdométriques et triaxiaux de référence réalisés sur le sable limoneux de Gavet saturé

Chapitre III : Etude du comportement du sable limoneux de Gavet au compactage

III.1 Introduction

L'objectif principal des essais réalisés dans ce chapitre est d'étudier la caractérisation du sable limoneux Livet-Gavet à différentes énergies de compactage, puis d'analyser l'influence de l'énergie de compactage et la teneur en eau sur la variation de la succion, de la résistance et de la rigidité du sol. Quatre types d'essais ont été faits :

- Des essais de compactage comprenant des essais Proctor Normal et des essais de compactage réalisés à des niveaux d'énergie de compactage différents de celui de l'essai Proctor Normal. Ces différents essais de compactage permettent d'établir l'évolution de la densité sèche du matériau en fonction de sa teneur en eau de compactage, ceci pour une même énergie de compactage. Ils permettent également de déterminer des grandeurs caractéristiques telles que la densité sèche maximale du matériau (optimum) et la teneur en eau de compactage pour obtenir cette densité maximale.
- Des essais de mesure de succion réalisés à l'aide de la méthode du papier filtre directement sur les échantillons de sol compactés. Pour une même énergie de compactage, ces mesures permettent d'analyser l'évolution de la succion du matériau le long de la courbe de compactage. En croisant les résultats obtenus pour différentes énergies de compactage, ces essais permettent d'établir des courbes d'iso-succion entre échantillons de sol de densités et de teneurs en eau différentes.
- Des essais de poinçonnement réalisés directement sur les échantillons de sol compactés pour mesurer l'Indice de Portance Immédiat (IPI) pour étudier la variation de l'IPI en fonction de l'énergie de compactage et de l'état hydrique du sol.
- Des essais de compression simple réalisés sur les échantillons de sol compactés à OPN moins 30 coups (c-à-d 25 coups par couche) visant à étudier le comportement du matériau sous chargements uni-axial à densité sèche constante et teneur en eau variable, et analyser l'évolution des grandeurs caractéristiques comme son module de déformation et sa résistance à la compression simple.

III.2 Essais de compactage Proctor à énergie variable

III.2.1 Principe de l'essai

Selon la norme française NF P94-093, les caractéristiques de compactage Proctor d'un matériau sont déterminées à partir des essais de Proctor normal ou de Proctor modifié. Ces deux essais sont identiques dans leur principe de réalisation avec différentes énergies de compactage.

Le principe de ces essais est d'effectuer des mesures de masse volumique sèche d'un matériau à plusieurs teneurs en eau à l'énergie de compactage constante, et représenter une courbe de variation de masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau à partir de ces points de mesure. Cette courbe s'appelle la courbe de Proctor, et le point maximal de la courbe Proctor s'appelle l'Optimum Proctor (OP).

Il existe plusieurs types d'essais Proctor (Proctor Normal ou Proctor Modifié), donc le point Optimum peut être appelé l'Optimum Proctor Normal (OPN) ou l'Optimum Proctor Modifié (OPM).

On note que la norme française NF P94-093 envisage plus particulièrement la détermination de la courbe Proctor en cinq points de mesure correspondant à cinq teneurs en eau différentes.

III.2.2 Appareillage spécifique

Selon NF P94-093, l'appareillage spécifique de l'essai Proctor comporte :

- Un socle de compactage constitué d'un bloc de béton présentant une surface plane horizontale d'au moins 30 cm x 30 cm et une épaisseur d'au moins 30 cm. A l'ENTPE, le plancher du laboratoire est assez dur et plat pour effectuer les essais, sans déplacer le moule.
- Deux modèles de moules (*Tableau III-1*):
 - Moule Proctor
 - Moule CBR (California Bearing Ratio).

Les deux modèles sont constitués d'un corps de moule, d'une embase et d'une rehausse. Le corps de moule peut être monobloc ou fendu. Les formes et les dimensions fonctionnelles de ces éléments doivent être conformes aux indications portées sur la Figure III-1.

Le moule CBR comporte en plus un disque d'espacement (épaisseur : 25.4 mm) ; ce qui conduit à un volume effectif du moule de 2296 cm³ (*Tableau III-2*)

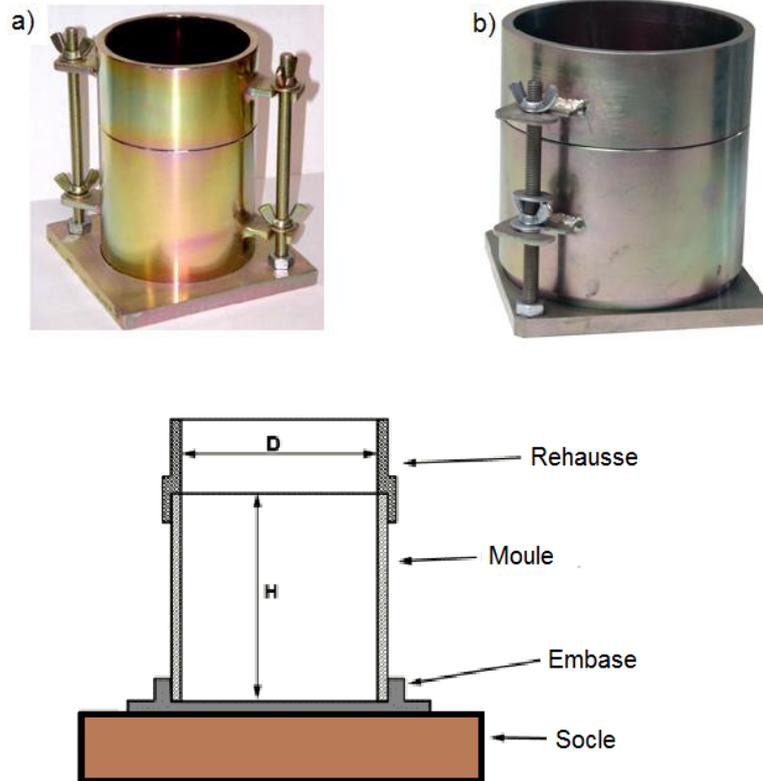


Figure III-1 : Moule Proctor (a) et Moule CBR (b)

Moule	H (mm)	D (mm)
Proctor	116.5	101.5
CBR	152	152

Tableau III-1 : Dimensions de moule Proctor et moule CBR

Caractéristiques de l'essai	Proctor normal		Proctor modifié	
	Proctor	CBR	Proctor	CBR
Moule	Proctor	CBR	Proctor	CBR
Masse de la dame (g)	2490	2490	4535	4535
Diamètre du mouton (mm)	51	51	51	51
Hauteur de chute (mm)	305	305	457	457
Nombre de couches	3	3	5	5
Nombre de coups par couche	25	56	25	56
Volume éprouvette (cm ³)	933	2296	933	2296

Tableau III-2 : Caractéristiques des essais de compactage Proctor

Lors de nos essais, nous avons opté pour le moule CBR, de plus grande taille que le moule Proctor, pour faciliter la fabrication des éprouvettes utilisées lors des essais de rétention d'eau (cf Chapitre IV) et minimiser les effets de bord lors des essais IPI.

Par ailleurs, nos échantillons ont tous été fabriqués par compactage manuel (la machine à compacter mécaniquement n'a pas été utilisée). Il existe deux modèles de dame pour le compactage manuel :

- La dame pour les essais Proctor normal constituée d'un mouton cylindrique de 51 mm de diamètre et d'un poids mobile de 2490 g. L'énergie de compactage est déterminée à partir de la hauteur de chute imposée constante et égale à 305 mm et en fonction du nombre de coups par couche de sol. Le mouton coulisse dans un fourreau métallique pour cibler plus facilement l'endroit de la chute et répartir le nombre de coups. Les formes et autres dimensions fonctionnelles de cette dame doivent être conformes aux indications portées dans le tableau III-2. Nous avons utilisé ce type de dame lors de l'ensemble de nos essais de compactage au moule Proctor.
- La dame de Proctor modifiée présente une hauteur de chute et une masse mobile supérieure à celle de la dame du Proctor normal. Ses dimensions sont spécifiées dans le tableau III-2.



Figure III-2 Appareillage pour l'essai Proctor à l'ENTPE, de gauche à droite : dame Proctor Normal, règle à araser, moule CBR

III.2.3 Préparation des échantillons soumis à l'essai

La masse totale de matériau nécessaire à l'exécution d'un essai doit provenir d'un prélèvement différent pour chaque point de la courbe Proctor, car il n'est pas autorisé de réutiliser le même matériau pour la détermination de plusieurs points de la courbe Proctor. Il faut estimer la quantité minimale nécessaire à la détermination de la courbe Proctor en cinq points.

III.2.3.a Préparation des éprouvettes

Après le séchage, le matériau est tamisé à 2 mm et seul le tamisât est conservé pour l'exécution de l'essai.

Le matériau est divisé par appréciation visuelle en cinq parts quasi-égales.

Les parts sont humidifiées à une teneur en eau telle que les teneurs en eau soient réparties entre : 0.8 w_{OPN} (ou OPM) et 1.2 w_{OPN} (ou OPM). L'ajout d'eau se fait en même temps que le malaxage du matériau. Ce malaxage est réalisé à l'aide d'un malaxeur électrique, il a pour but d'homogénéiser la teneur en eau du matériau. La durée du malaxage est d'environ 15 minutes pour 2 kg de matériau. Le matériau humide est ensuite placé dans un sac plastique fermé hermétiquement et conservé 15-20 minutes pour parfaire l'homogénéisation de sa teneur en eau avant le compactage.

III.2.3.b Préparation du moule :

Dans le cas de l'essai Proctor normal, la paroi du moule doit être lubrifiée au préalable de son remplissage par de la graisse de silicone afin que l'on puisse facilement sortir l'échantillon du moule sans l'endommager. Dans le cas du sable limoneux de Gavet, cette méthode de lubrification n'a pas donné de résultats satisfaisants: l'échantillon était souvent cassé lors de sa sortie du moule. Pour résoudre ce problème, nous avons décidé de coller avec de la graisse deux feuilles de papier A4 sur la paroi du moule pour faciliter le démoulage à la fin de l'essai. La quantité d'eau absorbée par le papier et le changement de volume ont été contrôlés et sont négligeables.

III.2.3.c Le compactage :

Dans le cas de l'essai Proctor Normal réalisé avec le moule CBR, pour chaque couche de matériau, on effectue 8 cycles de 6 coups adjacents entre eux contre la paroi du moule suivis d'un coup au centre, plus 1 cycle de 6 coups (pas de coup au centre), soit 55 coups par couche (Figure III-3).

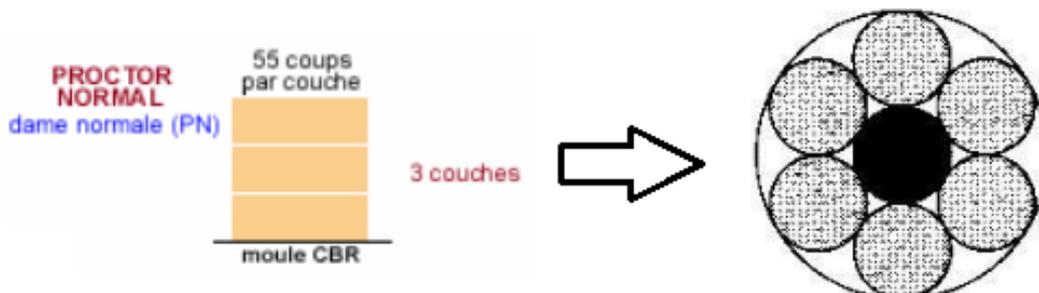


Figure III-3 : la répartition des coups pour l'essai Proctor sur le moule CBR

Dans le cas des essais réalisés avec des énergies de compactage différentes de celle de l'essai Proctor Normal, nous avons conservé la même méthode de compactage et nous avons seulement modifié le nombre de coups par couche.

Après le compactage de la dernière couche, et l'enlèvement de la rehausse, le matériau dépasse du moule sur une hauteur d'environ un centimètre. Cet excédent de sol est arasé soigneusement du centre vers la périphérie du moule à l'aide d'une règle en métal.

Après le démoulage, l'éprouvette est enveloppée dans un film plastique et conservée pendant une semaine dans une salle climatisée pour parfaire l'homogénéisation de sa teneur en eau.

III.2.4 Expression des résultats

Pour chaque éprouvette compactée, on mesure sa teneur en eau (w) et la masse de matériau sec contenu dans le moule (m_s).

On en déduit la masse volumique sèche de l'échantillon par la formule :

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{m}{(1 + w)V}$$

Où

ρ_d	:	Masse volumique sèche de l'échantillon
m_s	:	Masse des grains solides
m	:	Masse de l'échantillon humide
V	:	Volume du moule CBR
w	:	Teneur en eau de l'échantillon compacté

III.2.5 Programme expérimental

Le programme des essais de compactage réalisés sur le sable limoneux de Gavet est présenté dans le Tableau III-3. Ce programme comprend des essais de compactage Proctor normal (essai OPN à 55 coups par couche) réalisés sur le matériau passant à 20 mm et sur le matériau passant à 2 mm. Il comprend par ailleurs des essais à énergies de compactage différentes de celle de l'essai Proctor normal ; à savoir des essais à 15 coups par couche (OPN-40), des essais à 25 coups par couches (OPN-30) et des essais à 85 coups par couche (OPN+30).

A noter que les essais OPN et OPN-30 ont été doublés afin d'étudier la reproductibilité des essais.

	Diamètre maximal des particules (mm)	Essai	Nombre de coups par couche	Energie de compactage E (kJ/m ³)
Essai Proctor Normal	2	OPN	55	597
	20	OPN	55	597
Essai de répétition	2	OPN	55	597
	2	OPN-30	25	271
Essai Proctor à l'énergie de compactage variable	2	OPN-40	15	162
	2	OPN-30	25	271
	2	OPN	55	597
	2	OPN+30	85	922

Tableau III-3 : Programme expérimental des essais de Proctor Normal et Modifié

III.2.6 Résultats des essais

III.2.6.a Essai Proctor Normal :

Pour faciliter la lecture et la continuité des expériences, nous rappelons les résultats des essais de Proctor réalisés lors de la caractérisation du comportement de référence du sable limoneux Livet-Gavet (Figure III-4).

La Figure III-4a présente les résultats des essais de Proctor Normal sur le sable limoneux de Gavet passant à 20 mm. On constate sur cette figure que l'ensemble des points donne une courbe en forme de cloche. Cette courbe présente une augmentation de la densité en fonction de la teneur en eau jusqu'à une certaine valeur maximale suivie par une chute. Le sommet de cette courbe correspond à la densité maximale de compactage obtenue pour ce matériau. La valeur de densité sèche optimum est de $\rho_{dOPN\ 20\ mm} = 1.98\ t/m^3$ et la teneur en eau à optimum $w_{OPN\ 20\ mm} = 10.9\ %$. La courbe à 100 % de saturation constitue l'enveloppe de toutes les courbes $\rho_d = f(w)$ quelle que soit l'énergie de compactage utilisée. Dans le cas du sable limoneux de Gavet passant à 20 mm, l'optimum Proctor Normal se trouve sur la courbe de degré de saturation (S_r) égale à 80 %.

La Figure III-4b présente les essais sur le sable limoneux Livet-Gavet passant à 2 mm, mais à deux niveaux d'énergie de compactage : Essai Proctor Normal (compacté à 55 coups par couche) et essai Proctor modifié (compacté à 25 coups par couche). On observe que les deux courbes présentent la même allure. Elles ont la même forme parabolique, mais décalées verticalement. La courbe de l'essai compacté à 55 coups/couche se trouve au-dessus de la courbe du matériau compacté à 25 coups/couche et le point optimum se décale légèrement vers le côté sec (à gauche) avec l'augmentation de l'énergie de compactage. Il faut noter que ces

deux courbes se situent en-dessous de la courbe $Sr = 80 \%$ et les points optimaux se trouvent proches de la courbe $Sr = 67 \%$.

En comparant les résultats à l'optimum Proctor, le matériau passant à 20 mm a une densité sèche plus importante et plus proche de la saturation que le matériau passant à 2 mm.

On obtient donc les résultats suivants pour le sable limoneux de Gavet passant à 2 mm:

- Pour sol compacté à 55 coups par couche :
 - $\rho_{dOPN55} = 1.87 \text{ t/m}^3$ et $w_{OPN55} = 11.2 \%$
- Pour le sol compacté à 25 coups par couche :
 - $\rho_{dOPM25} = 1.81 \text{ t/m}^3$ et $w_{OPM} = 11.8 \%$

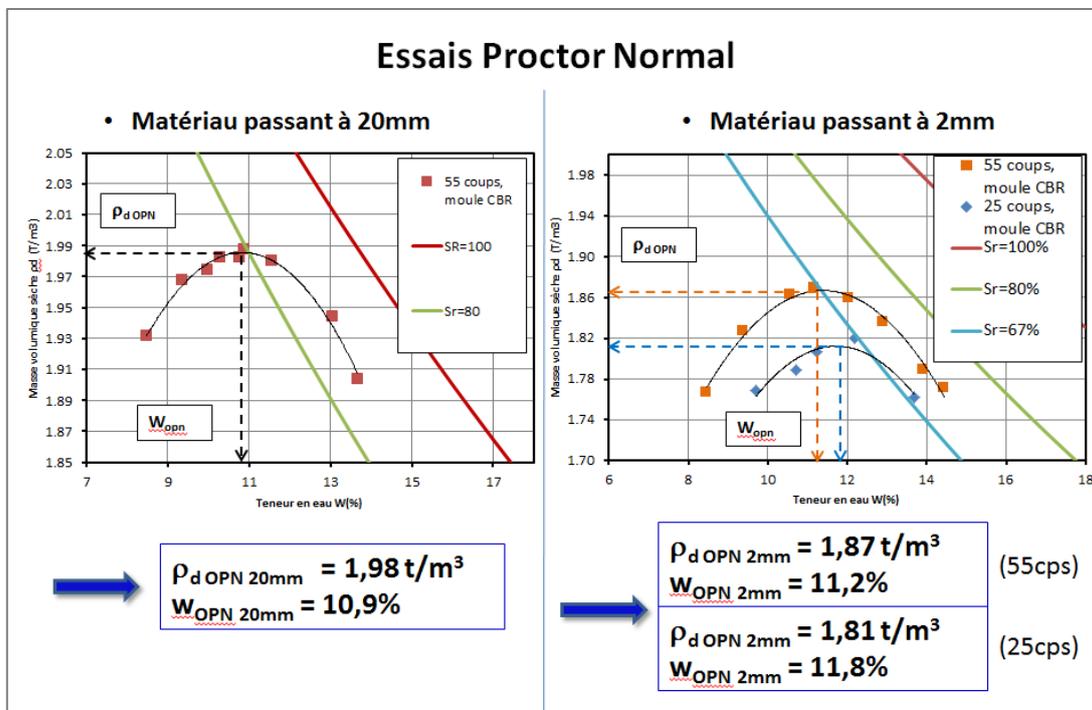


Figure III-4 : Essai Proctor Normal et à énergie modifiée réalisés sur le sable limoneux Livet-Gavet

Une corrélation entre les propriétés des sols argileux à l'Optimum Proctor Normal et la limite de liquidité a été proposée par Fleureau et al. (2002) :

A l'OPN :

$$w_{opn} = 1.99 + 0.46w_L - 0.0012w_L^2$$

$$\rho_{dOPN} = 21.00 - 0.113w_L + 0.00024w_L^2$$

Pour le sable limoneux Livet-Gavet, la limite de liquidité (w_L) est égale à 29 %, les valeurs de teneur en eau et densité sèche optimum données par cette corrélation sont donc:

$$W_{OPN\text{corrélation}} = 14.32 \% > W_{OPN} = 11.2 \%$$

$$\rho_{d\text{ corrélation}} = 1.792 \text{ t/m}^3 < \rho_{d\text{ OPN}} = 1.87 \text{ t/m}^3$$

III.2.6.b Reproductibilité des résultats :

Afin de vérifier la reproductibilité des résultats obtenus lors des essais Proctor réalisés manuellement, nous avons répété deux séries d'essais Proctor compactés à 25 et à 55 coups par couche sur le sable limoneux de Gavet.

La Figure III-5 représente l'ensemble des résultats de ces différentes séries conduites en 2013 et 2014. Pour un même niveau d'énergie de compactage, on observe une très bonne reproductibilité des résultats; ce qui tend à confirmer la fiabilité et la robustesse de la procédure expérimentale retenue, en particulier du processus de compactage manuel. Les points optimums ne sont pas modifiés avec l'ajout des deux nouvelles séries.

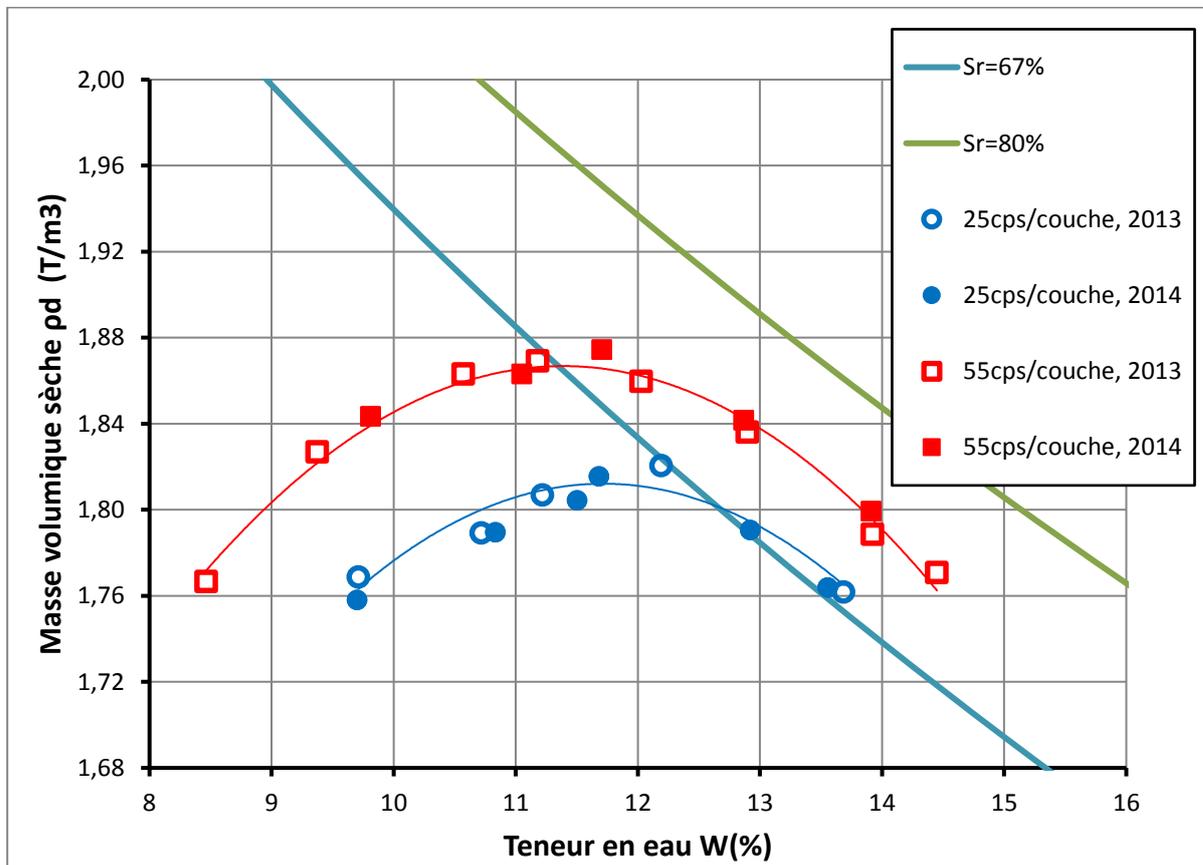


Figure III-5 : Etude de la reproductibilité des essais Proctor réalisés sur le sable limoneux de Gavet

III.2.6.c Essais Proctor à l'énergie de compactage variable :

Le comportement du sable limoneux de Gavet au compactage a également été étudié en faisant varier l'énergie de compactage. En complément des séries d'essais décrites précédemment

correspondant à des énergies de compactage de 55 coups par couche (OPN) et 25 coups par couche (OPN-20), deux séries d'essais Proctor supplémentaires ont été réalisées avec des énergies de compactage de 85 coups par couche (OPN+30) et 15 coups par couche (OPN-40).

La Figure III-6 représente les résultats des essais Proctor sur le sable limoneux de Gavet pour ces quatre énergies de compactage. A noter que les symboles pleins, en couleur, correspondent aux essais pour lesquels une mesure de la succion au sein de l'échantillon de sol compacté a été réalisée (cf paragraphe III.3). De même, les symboles noirs correspondent aux essais pour lesquels une mesure de l'Indice de Portance Immédiat (IPI) a été réalisée après compactage (cf paragraphe III.4).

D'une manière générale, on observe pour le sable limoneux de Gavet passant à 2 mm une augmentation notable de la densité sèche avec l'énergie de compactage. Les courbes Proctor obtenue pour les différentes énergies de compactage présentent toutes un profil en forme de cloche. La densité sèche augmente jusqu'à l'Optimum avec l'augmentation de la teneur en eau, puis décroît lorsque la teneur en eau de compactage dépasse celle de l'optimum.

En ce qui concerne les points à l'Optimum Proctor (OP), avec l'augmentation de l'énergie de compactage, les points OP se décalent à gauche dans le plan (ρ_d , w), donc vers le côté sec. Le Tableau III-4 présenté ci-après donne les valeurs de densité sèche et la teneur en eau correspondantes pour chaque niveau d'énergie.

On note que pour les essais Proctor compactés à 15, 25 et 55 coups par couche, les points Optimum se trouvent proche de la ligne $S_r = 67\%$, donc dans ce cas l'optimum correspond à une saturation de l'ordre de 67 %. A l'énergie plus élevée de 85 coups par couche, le point Optimum se trouve proche de la ligne $S_r = 80\%$. Dans le cas du sable limoneux de Gavet, il semble donc que l'augmentation de l'énergie compactage favorise une augmentation de la saturation.

Un comportement similaire est observé du côté humide des points Optimum. Ainsi à faible l'énergie de compactage (15 et 25 coups par couche) le degré de saturation ne change pas beaucoup mais à l'énergie de compactage plus élevée (55 et 85 coups par couche), les mesures montrent une augmentation significative de la saturation de l'échantillon avec l'énergie de compactage.

Il faut toutefois noter que quelle que soit l'énergie de compactage appliquée, les courbes de compactage Proctor n'atteignent jamais la ligne $S_r = 100\%$, ce qui signifie que de l'air reste emprisonné dans le sol.

Essai	Nombre de coups de couche	de par	Energie de compactage E (kJ/m ³)	Densité sèche à l'optimum ρ_{OP} (T/m ³)	Teneur en eau à l'optimum WOP(%)
OPN-40	15		162	1.78	12.6
OPN-30	25		271	1.82	12.1
OPN	55		597	1.87	11.2
OPN+30	85		922	1.98	10.8

Tableau III-4 : Résultats des essais Proctor Normal et Modifié

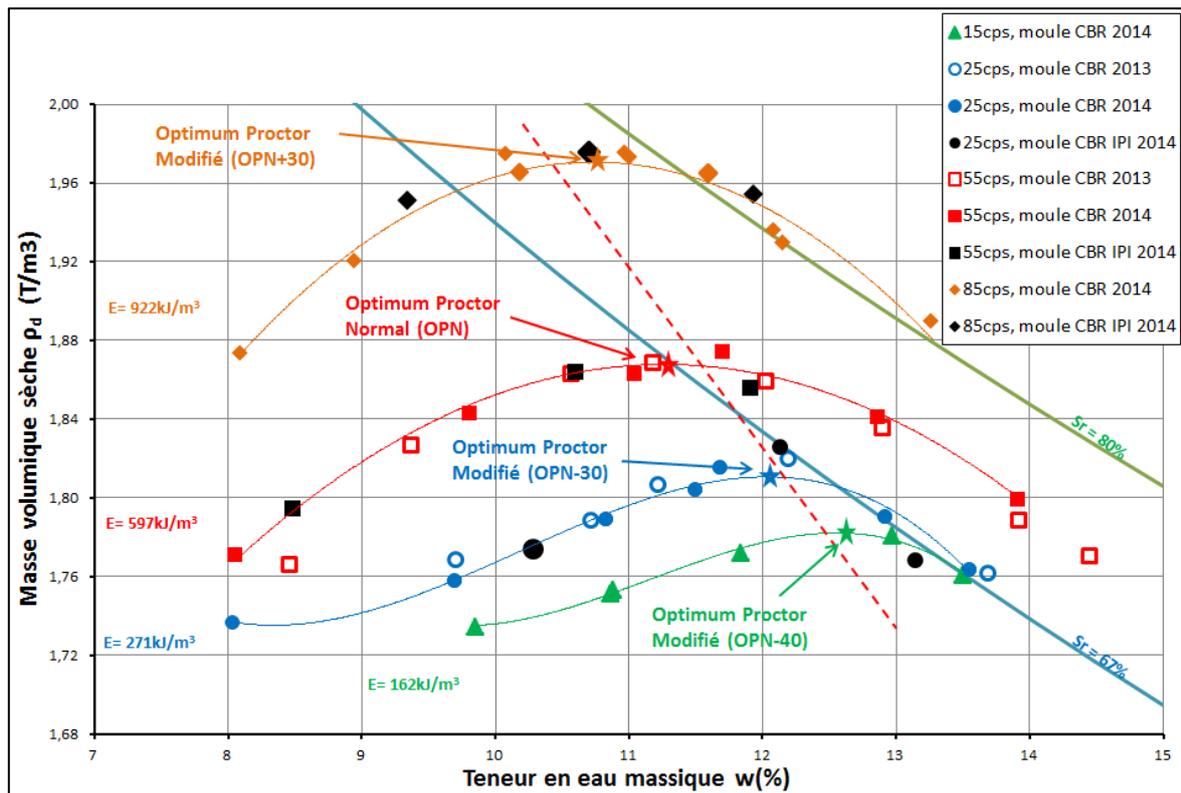


Figure III-6 : Courbes de Proctor du sable limoneux de Gavet obtenues pour différentes énergies de compactage

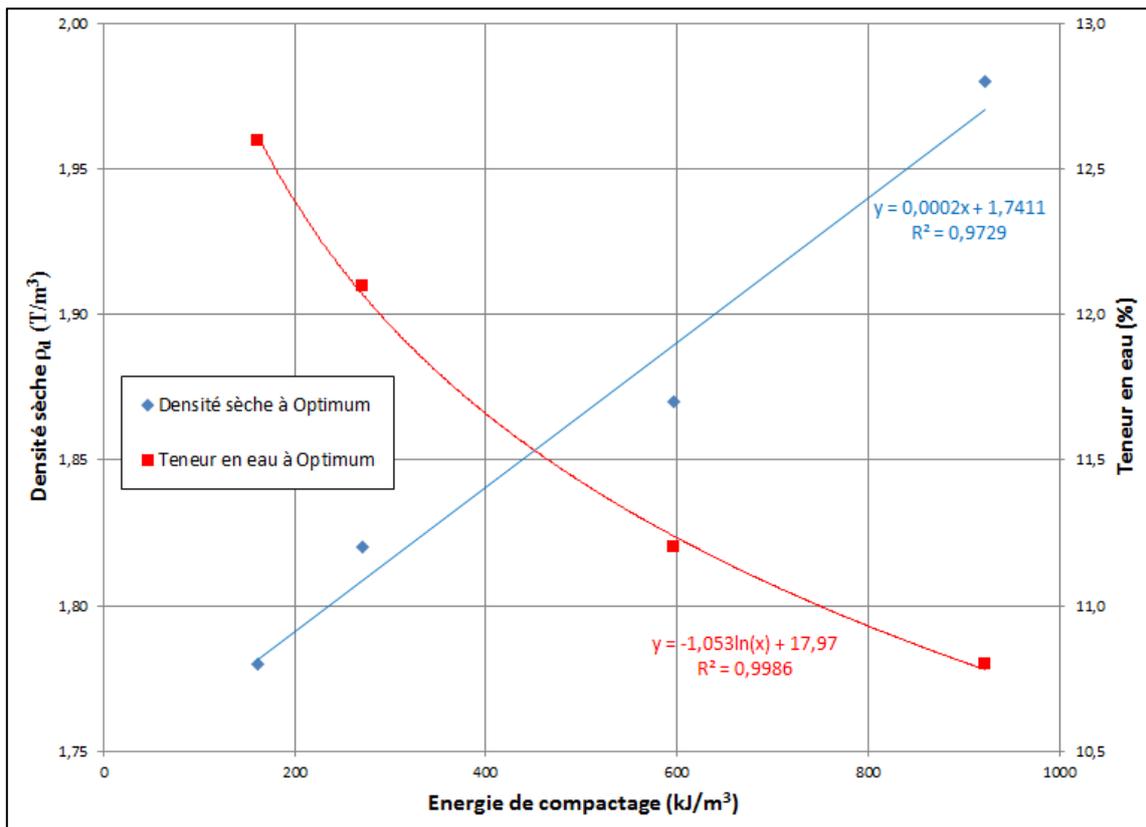


Figure III-7 Evolution de la densité sèche et de la teneur en eau à l'Optimum en fonction de l'énergie de compactage (cas du sable limoneux de Gavet)

La Figure III-7 représente l'évolution des paramètres mesurés à l'optimum Proctor en fonction de l'énergie de compactage. Cette représentation montre qu'il est possible de considérer dans le cas du sable limoneux de Gavet une augmentation linéaire de la densité sèche à l'optimum avec l'énergie de compactage (coefficient de corrélation ($R^2 = 0.973$)). En revanche, la teneur en eau à l'optimum diminue de manière significative avec l'énergie de compactage. Cette évolution est de type logarithmique (avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.999$).

III.3 Mesure de la succion

III.3.1 Objectifs de l'essai

L'objectif de cette essai est de mesurer la succion dans le sable limoneux de Gavet compacté et d'étudier la variation de cette succion le long de la courbe de compactage Proctor. En réalisant ce type de mesure pour différentes énergies de compactage, il est alors possible de tracer des courbes d'iso-succion et d'explorer l'influence du compactage et la teneur en eau sur la succion dans le sol.

Les valeurs de la succion à l'optimum, du côté sec, et du côté humide sont des paramètres qu'il conviendra de prendre en compte dans l'analyse des résultats des essais de poinçonnement et de compression simple présentés aux paragraphes III.4 et III.5 . Ils seront également à considérer dans l'interprétation des essais de rétention d'eau présentés au chapitre IV.

III.3.2 Principe de mesure de la succion dans l'échantillon de sol compacté

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la succion dans l'échantillon du sol : par tensiométrie, par capteur électronique, par papier filtre (cf chapitre I). Nous avons besoin d'une méthode qui permette une mise en œuvre rapide et le traitement de nombreux échantillons en parallèle compte tenu du nombre important de mesures à effectuer et du temps d'équilibrage à respecter lors de la mesure de succion dans un sol fin. Elle doit aussi être compatible avec le compactage de l'échantillon à coups de dame. Ceci proscrit l'utilisation de capteurs tensiométriques fragiles placés en périphérie de l'échantillon et qui pourraient être endommagés lors du compactage.

Pour l'ensemble des raisons évoquées précédemment, nous avons choisi d'utiliser la méthode du papier-filtre. C'est une méthode de mesure de succion simple et pratique.

▪ *Méthode du papier-filtre*

La méthode du papier filtre a été normalisée par ASTM (2003, D 5298-03) pour mesurer la succion entre 0.01 à 100 MPa. Les mesures sont réalisées en plaçant une feuille de papier-filtre en contact avec l'échantillon de sol de manière à parvenir à l'équilibre de succion entre le papier filtre et le sol. La valeur de succion est déterminée par la courbe de calibration du papier filtre. Dans ce travail, le papier Whatman No.42 a été utilisé. La teneur en eau initiale du papier Whatman N. 42 dans laboratoire est environ 6 % (MARINHO & OLIVEIRA, 2006), correspond à une succion de 29 MPa qui est la limite supérieure pour les mesures de succion.

La deuxième méthode du papier filtre est proposée par (PARCEVAUX, 1980). Cette méthode est appelée méthode du papier filtre humide. Le papier filtre a été mouillé avant l'essai et il est soumis à un trajet de séchage lors de l'équilibre de succion.

A la fin de l'essai, la succion de l'éprouvette est calculée à partir de la teneur en eau du papier filtre, en utilisant une courbe d'étalonnage. Il existe plusieurs tentatives de calibration du papier filtre Whatman No 42 dans la littérature en utilisant les deux cycles de séchage ou humidification : Fawcett et Collis-Geogre (FAWCETT & COLLIS-GEOGRE, 1967); Parcevaux (PARCEVAUX, 1980) ; Hamblin (HAMBLIN, 1981) ; Greacen (GREACEN, et al., 1987) ; Ridley (RIDLEY, 1995) ; Harrison & Blight (HARRISON & BLIGHT, 1998) ; Leong (LEONG, et al., 2002) – cité par Munoz-Castelblanco (MUNOZ-CASTELBLANCO, et al., 2010). La Figure III-8 présente différentes courbes d'étalonnage du papier filtre Whatman No.42. On voit qu'il n'existe pas une courbe unique d'étalonnage ; ce qui illustre les limites de la méthode.

A noter que nous avons tenté d'étalonner le papier-filtre Whatman No.42 au laboratoire, mais la courbe est incomplète parce que les équipements au laboratoire ne nous permettent d'augmenter la teneur en eau du papier-filtre au-delà de 30 %. Nous avons finalement décidé d'utiliser la courbe de calibration selon ASTM donnée à la Figure III-9.

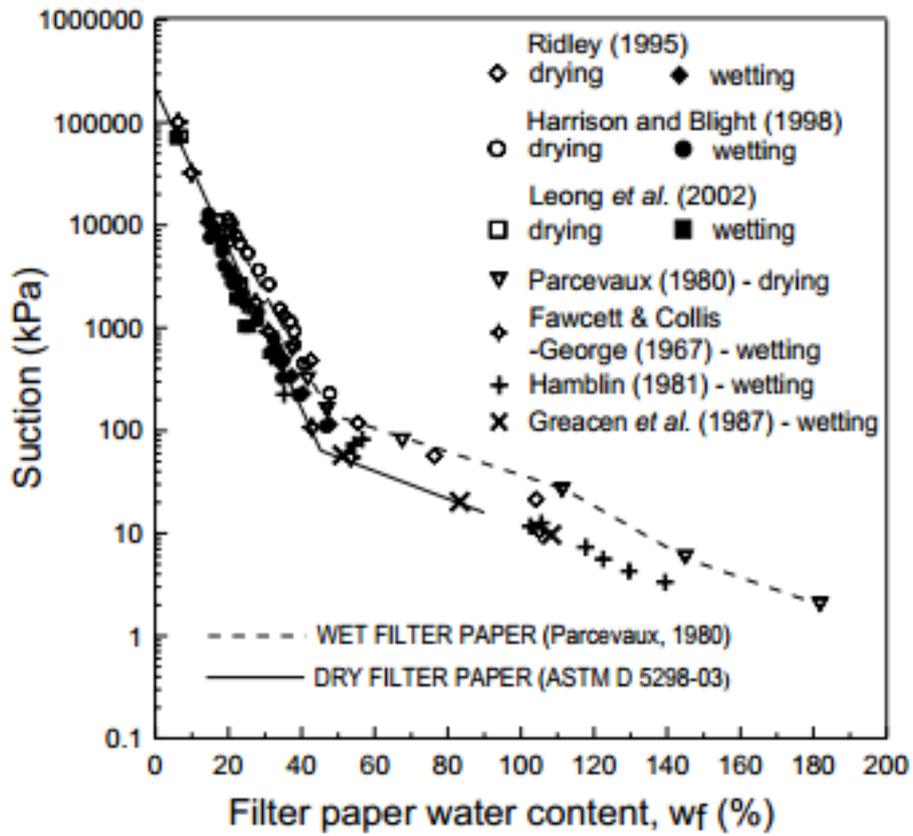
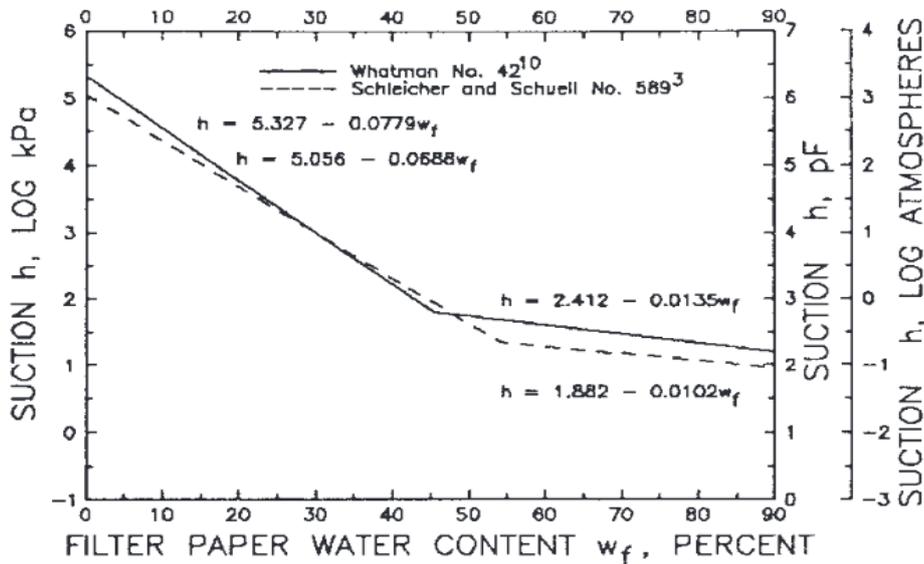


Figure III-8 : Courbes de calibration du papier filtre Whatman N42 obtenues par différents auteurs



NOTE 1—Coefficient of determination $r > 0.99$.

Figure III-9 : Courbe de calibration du papier filtre Whatman N42 selon ASTM

III.3.3 Procédure expérimentale :

Pour nos essais, on utilise la méthode normalisée par ASTM avec le papier-filtre sec. La mise en œuvre des papiers filtres dans l'échantillon en cours de compactage est présentée dans la Figure III-10:

- Le papier filtre utilisé est le papier Whatman No.42. Avant l'essai, les papiers ont été conservés dans les conditions ambiantes du laboratoire. La teneur en eau initiale mesurée est d'environ 7 %. Le papier est ensuite utilisé directement, sans séchage à l'étuve pour éviter de modifier la structure du papier.
- Pour une mesure de succion, trois papiers filtres sont utilisés de façon à constituer une triple épaisseur. Seul le papier intercalé entre les deux papiers externes servira à la mesure de succion. Ce papier central a été découpé pour avoir un diamètre plus petit que les deux autres afin d'éviter toute salissure. La triple couche de papier est placée à l'intérieur de l'échantillon au cours de son compactage, à l'interface entre deux couches de compactage.
- Chaque échantillon de sol compacté au Proctor est équipé de deux ensembles de mesure de succion (chacun comprenant 3 papiers filtre) intercalés entre trois couches de sol ; ceci afin de s'assurer de la reproductibilité des mesures.
- Après compactages, l'échantillon de sol est sorti du moule, enveloppé dans un film plastique pour éviter toute évaporation, et conservé dans une salle climatisée afin d'obtenir l'équilibre des succions au sein de l'échantillon mais aussi entre le sol et les papiers filtre (Figure III-11). Le temps d'équilibre nécessaire est au moins une semaine.
- Une fois l'équilibre de succion supposé atteint, on extrait le papier filtre et mesure sa teneur en eau immédiatement afin d'éviter l'évaporation à l'aide d'une balance de précision. La succion de l'éprouvette est déterminée selon la courbe d'étalonnage du papier filtre par ASTM.

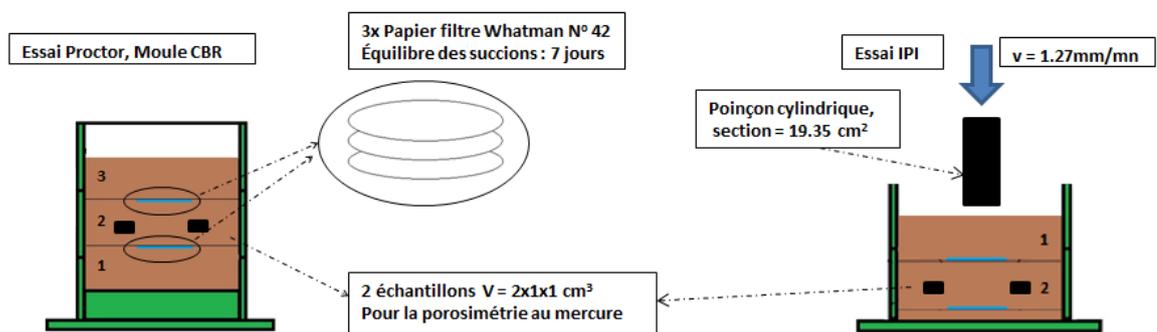


Figure III-10 : Procédure expérimentale de l'essai Proctor avec mesure de succion et prélèvement d'échantillon pour l'essai de porosimétrie au mercure



Figure III-11 Phase d'équilibrage de la succion (échantillon recouvert d'un film plastique et conservé dans une salle climatisée)

III.3.4 Courbes d'iso-succion

La Figure III-12 présente les valeurs de succion mesurées au sein des échantillon de sable limoneux de Gavet le long de la courbe Proctor ; ceci pour les quatre niveaux d'énergie de compactage étudiés. A partir de la succion mesurée à chaque point Proctor pour les quatre énergies de compactage, il est possible de tracer approximativement les courbes d'iso-succion dans le plan (densité sèche, teneur en eau) comme l'illustre les courbes en pointillé sur la Figure III-12.

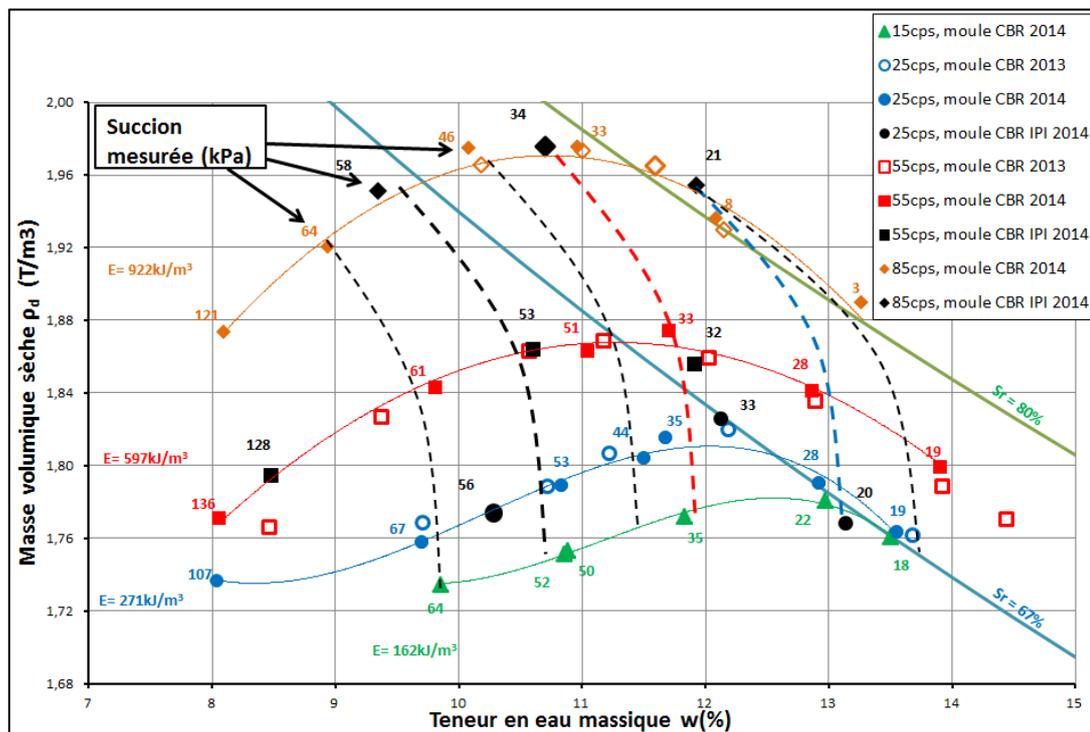


Figure III-12 : Courbes Proctor et courbes d'iso-succion obtenues à différentes énergies de compactage dans le cas du sable limoneux de Gavet

Concernant le sable limoneux de Gavet, on observe :

- Une diminution de la succion avec l'augmentation de la teneur en eau à énergie de compactage constante. Ce résultat suit la tendance observée lors des essais réalisés par différents auteurs sur plusieurs types de sol et rappelés dans l'étude bibliographique de ce rapport (cf chapitre I).
- Une double influence de la teneur en eau et de l'énergie de compactage sur les courbes d'iso-succion. A faible d'énergie de compactage, les courbes sont presque verticales et restent parallèles. Quand l'énergie de compactage augmente, les courbes commencent à s'orienter vers la gauche, c'est-à-dire dans le sens des teneurs en eau décroissantes. A noter que cette courbure vers la gauche des courbes d'iso-succion pour les fortes énergies de compactage est davantage marquée du côté humide de l'optimum.
- Le changement de courbure des courbes d'iso-succion apparaît généralement pour des énergies de compactage proche de celle de l'essai Proctor Normal (597 kNm/m³).
- Les valeurs de succion mesurées à l'Optimum pour les différentes énergies de compactage sont quasi-identiques, de l'ordre de 35 kPa. La courbe d'iso-succion qui relie ces points d'optimum (rouge pointillé) sépare le côté sec à gauche et le côté humide à droite.

La Figure III-13 présente pour chaque niveau d'énergie de compactage l'évolution du logarithme de la succion en fonction de la teneur en eau du matériau compacté. On observe:

- Une évolution linéaire du logarithme de la succion en fonction de la teneur en eau pour les essais OPN, OPN-30 et OPN-40. Cette relation linéaire est identique pour ces trois niveaux d'énergie de compactage (pente égale à 0.143). De plus, cette relation linéaire est identique des deux côtés de l'Optimum (pente conservée entre les côtés sec et humide). Ce résultat traduit pour ces trois niveaux d'énergie de compactage, une évolution de la succion en fonction de la teneur en eau quasi indépendante de l'énergie de compactage appliquée.
- Une évolution bi-linéaire du logarithme de la succion en fonction de la teneur en eau pour les essais OPN+30. Ainsi pour le plus fort niveau d'énergie de compactage appliqué lors de nos essais, on remarque que du côté sec de l'optimum, l'évolution du logarithme de la succion en fonction de la teneur en eau est comparable à celle observée pour les plus faibles énergies de compactage (pente égale à 0.143). Ce qui tend à confirmer que du côté sec de l'optimum, l'évolution de la succion en fonction de la teneur en eau n'est pas (ou peu) influencé par le niveau d'énergie de compactage. En revanche du côté humide de l'Optimum, on observe une décroissance plus forte du logarithme de la succion avec l'augmentation de la teneur en eau (pente égale à 0.714) ; ce qui tend à montrer que dans ce domaine des teneurs en eau (à droite de l'Optimum), les variations de succion en fonction de la teneur en eau sont influencées par le niveau d'énergie de compactage.

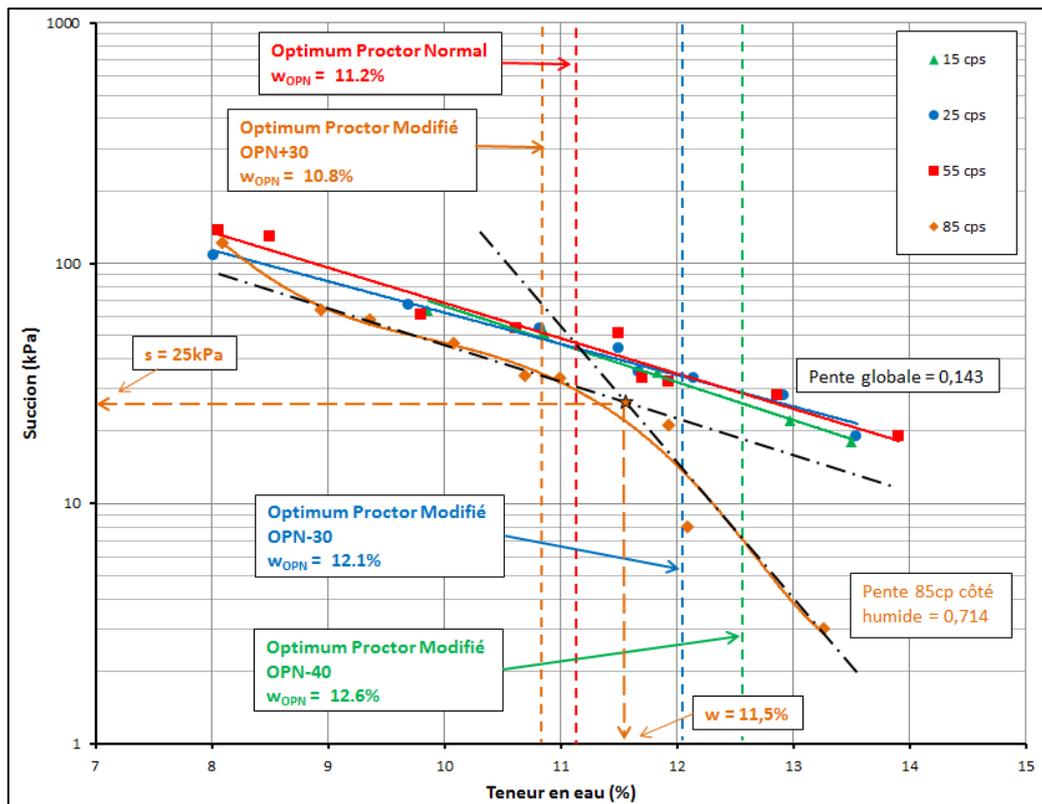


Figure III-13 : Evolution de la succion en fonction de la teneur en eau pour différentes énergies de compactage (cas du sable limoneux de Gavet)

Il nous a paru intéressant de comparer nos résultats obtenus sur le sable limoneux de Gavet avec ceux obtenus par différents auteurs sur d'autres types de sols. Ainsi les courbes d'iso-succion du kaolin Speswhite compacté statiquement (TARANTINO & DE COL, 2008) sont toujours quasi verticales avec des valeurs de succions assez élevées. (Figure III-14).

Les essais sur l'argile Boom (ROMERO, 1999) (Figure III-15), le limon Barcelona (GENS, et al., 1995) (Figure III-16), l'argile à Châtaignier LGV SEA (LI, 2015) (Figure III-17) donnent les résultats assez similaires à ceux de notre étude sur le sable Limoneux Livet-Gavet. Du côté sec, le changement de l'énergie de compactage ne provoque pas de changement de succion et les courbes d'iso-succion restent parallèles. Du côté humide, avec l'augmentation de l'énergie de compactage, les courbes d'iso-succion s'inclinent vers la gauche (sens des teneurs en eau décroissantes). Pour le limon de Barcelona et l'argile de Boom, les auteurs proposent des courbes d'iso-succion rectilignes. Dans le cas de l'argile à Châtaignier, (LI, 2015) présente des courbes d'iso succion curvilignes assez similaires à celles obtenues dans la cas du sable limoneux de Gavet.

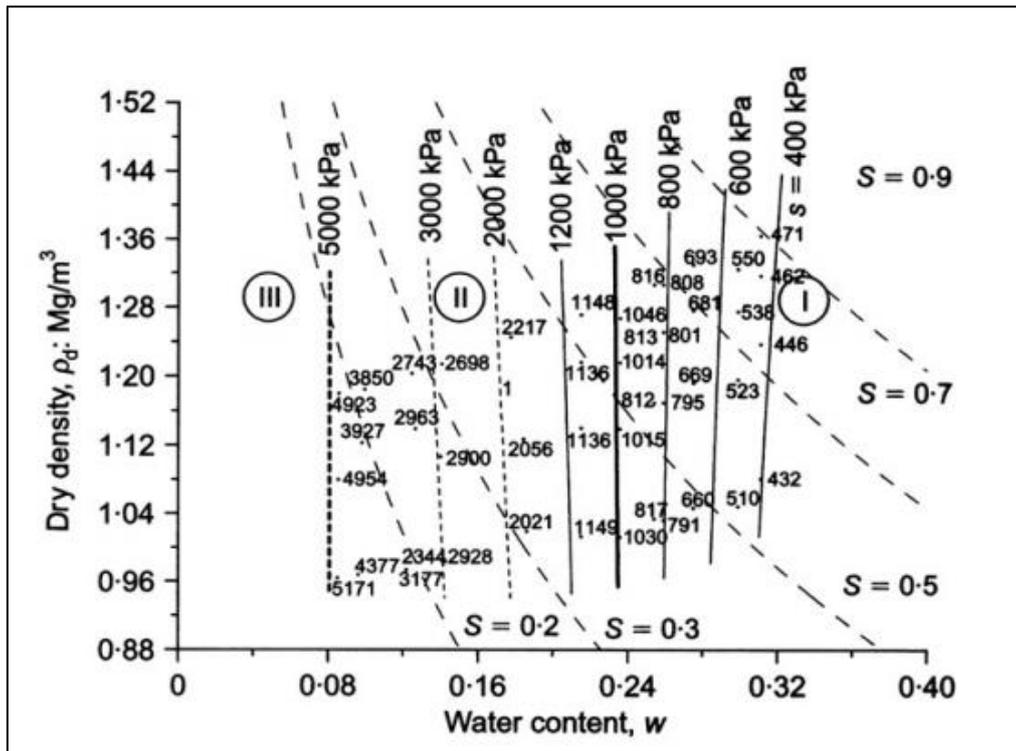


Figure III-14 : Courbes d'iso-succion obtenues sur kaolin Speswhite compacté (TARANTINO & DE COL, 2008)

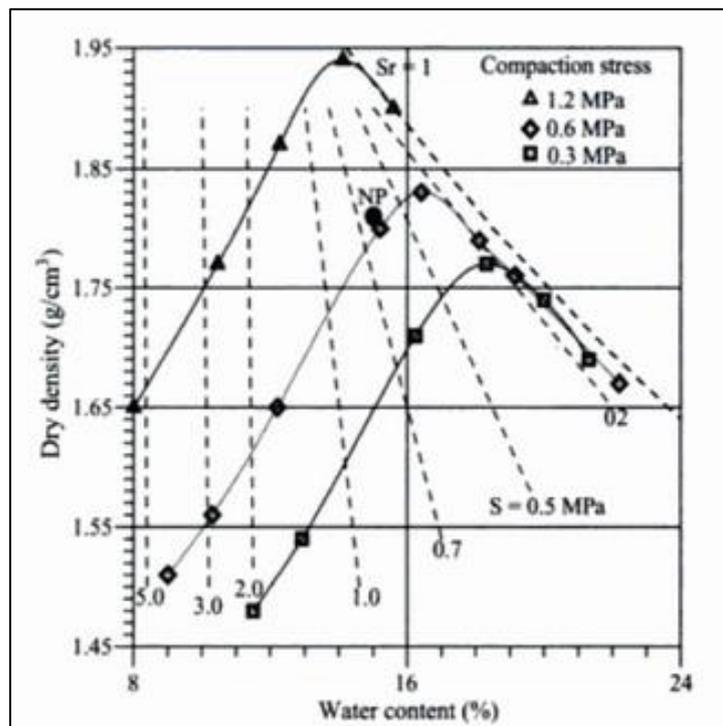


Figure III-15 : Courbes d'iso-succion obtenues sur le limon de Barcelone compacté statiquement Barcelona (GENS, et al., 1995)

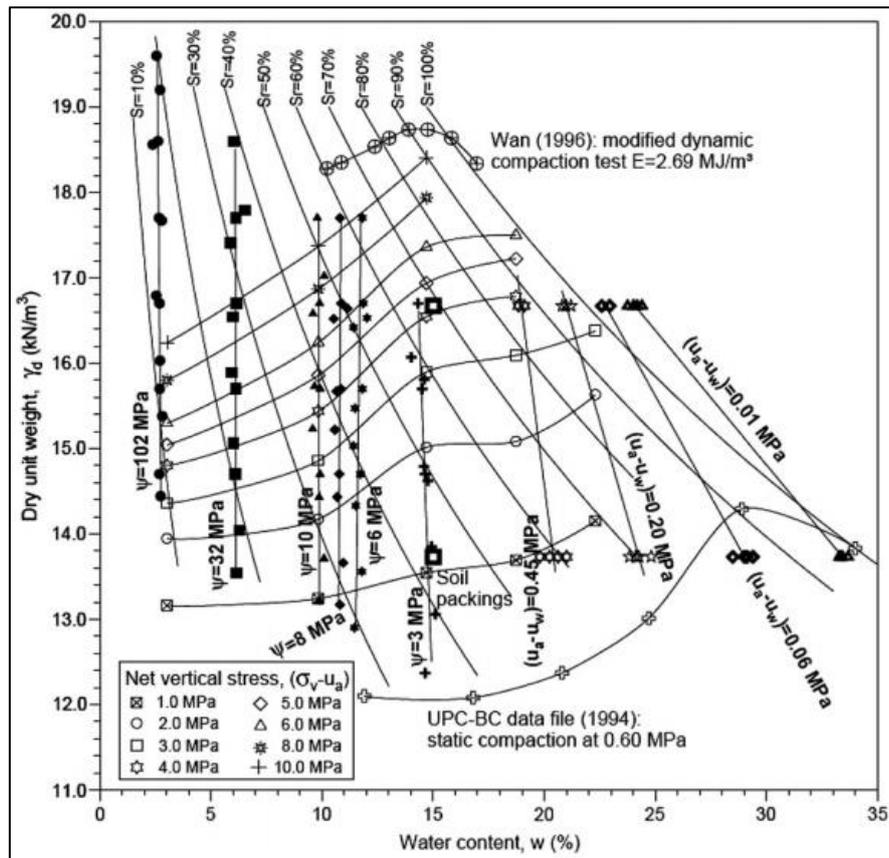


Figure III-16 : Courbes d'iso-succion obtenues sur l'argile de Boom compactée statiquement Bloom (ROMERO, 1999)

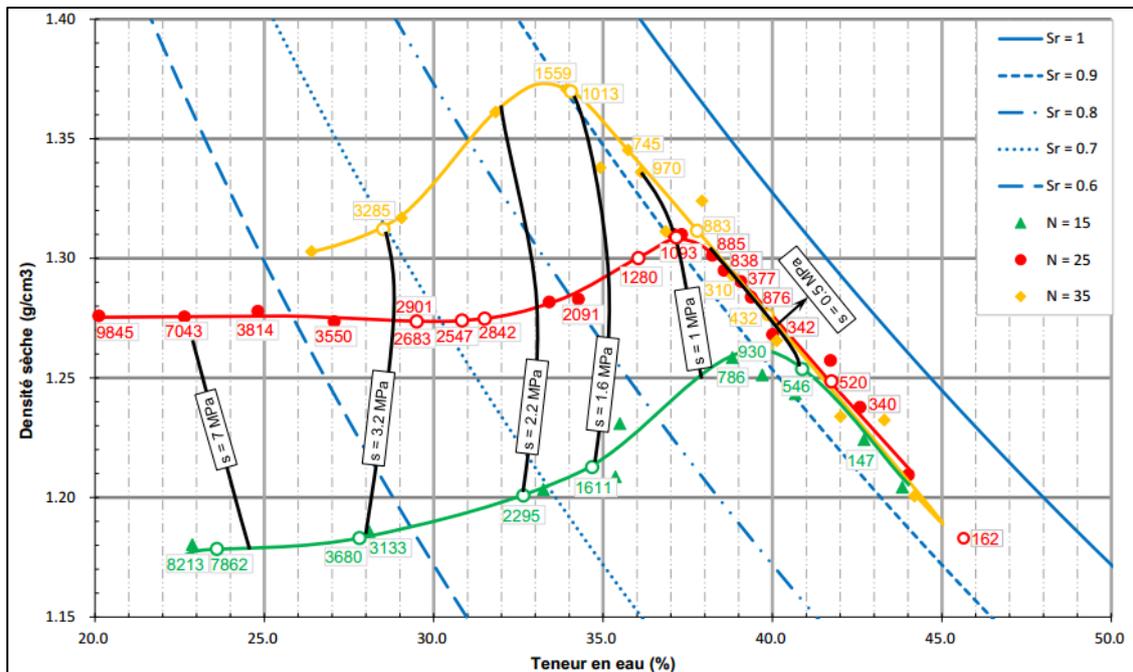


Figure III-17 : Courbes d'iso-succion obtenues sur l'argile à Châtagnier LGV SEA compacté dynamiquement (LI, 2015)

En ce qui concerne l'évolution de la succion en fonction de teneur en eau, Li (LI, 2015) a montré dans le cas de l'argile à Châtaignier LGV SEA une faible influence de l'énergie de compactage du côté sec des Optimums (Figure III-18). En revanche du côté humide, l'évolution de la succion avec la teneur en eau semble influencée par le niveau d'énergie de compactage. Ce résultat est assez similaire aux observations faites dans le cas du sable limoneux de Gavet. Notons toutefois que dans les travaux de Li, les échantillons d'argile sont compactés avec des énergies (15 coups / couche, 25 coups /couche, 35 coups /couche) inférieures à l'énergie Proctor Normal.

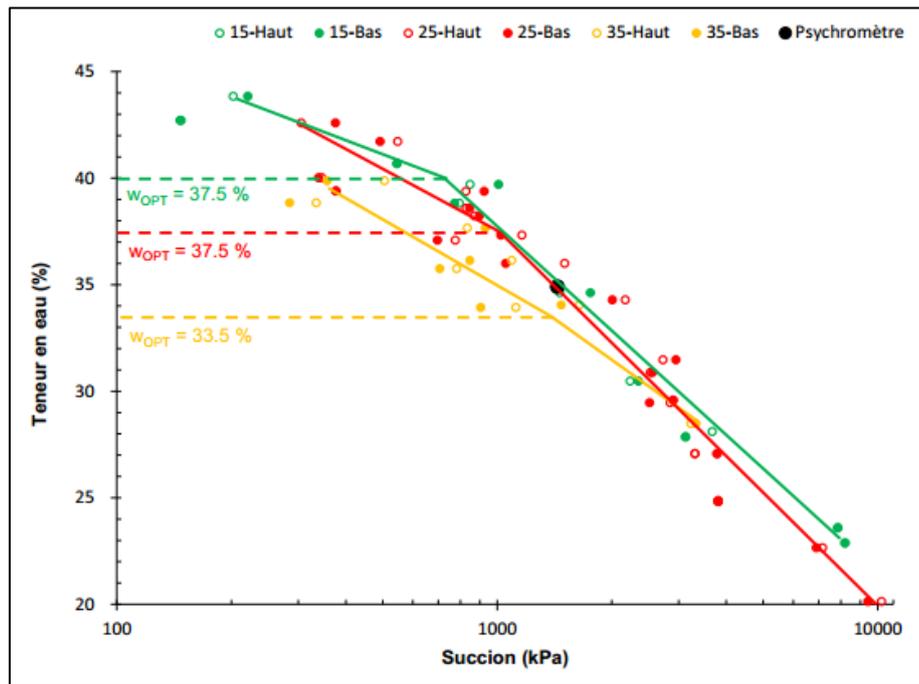


Figure III-18 : Evolution de la succion en fonction de la teneur en eau pour différentes énergies de compactage - cas de l'argile à châtaigner LGV SEA (LI, 2015)

Romero (ROMERO, 1999), ainsi que Delage et Cui (DELAGE & CUI, 2000) expliquent la "verticalité" des courbes d'iso-succion du côté sec de l'Optimum au travers de l'étude de la microstructure du matériau. Ainsi ces auteurs observent que du côté sec, le compactage n'affecte principalement que les macropores du matériau. Ainsi le compactage du côté sec va provoquer l'écrasement des pores inter-agrégats (macropores) sans affecter les pores intra-agrégats (micropores). En considérant que la succion dans le matériau est pilotée par l'eau présente dans les plus petits pores (en référence à la loi de Jurin), la succion côté sec ne sera pas affectée par le compactage.

Dans le cas du sable limoneux de Gavet, on remarque toutefois pour le plus fort niveau d'énergie de compactage (OPN+30), une courbure vers la gauche des courbes d'iso-succion. Celle-ci laisse supposer que le fort niveau d'énergie de compactage appliquée a été en mesure d'entraîner une fermeture partielle des micropores.

Du côté humide de l'Optimum, la présence d'une double porosité demeure plus incertaine. Les essais au porosimètre au mercure réalisés sur le sable limoneux de Gavet (cf chapitre IV) confirmeront en effet que les échantillons compactés du côté humide de l'Optimum ne présentent qu'une seule catégorie de pores ; à savoir celle des micropores. Dans ce cas, on peut déduire qu'une augmentation de l'énergie de compactage pour une teneur en eau constante va entraîner une augmentation de la densité sèche du matériau par réduction du nombre de micropores, et par conséquent une augmentation du degré de saturation, donc une diminution de la succion dans le matériau. Ainsi les courbes d'iso-succion ne pourront demeurer des droites verticales dans le plan (ρ_d , w) mais auront une forme curviligne, incurvée dans le sens des teneurs en eau décroissantes.

III.4 Mesure de l'Indice de Portance Immédiat

III.4.1 Principe de l'essai :

On caractérise la résistance au poinçonnement d'un sol compacté par l'Indice de Portance Immédiat selon la norme NF 94-078. Le principe est de mesurer la force nécessaire pour enfoncer un poinçon cylindrique dans une éprouvette de sol à vitesse de déplacement constante.

III.4.2 Dispositif et procédure expérimentale :

Le dispositif expérimental utilisé pour réaliser les mesures d'IPI sur les éprouvettes de sable limoneux de Gavet compacté comprend (Figure III-19 et Figure III-)

- Une presse hydraulique de type INSTRON équipée d'un capteur de force de capacité 5 kN, amovible et fixé sur la traverse supérieure de la presse. L'embase inférieure (piston) de la presse peut se déplacer verticalement à vitesse de déplacement ou vitesse de force imposée.
- Un poinçon cylindrique de 49.6 mm de diamètre (poinçon spécifique pour l'essai IPI) fixé sur le capteur de force.
- Un ordinateur et une centrale de commande et d'acquisition qui permettent de contrôler la vitesse de déplacement vertical du piston de la presse et d'enregistrer les valeurs de force et de déplacement au cours de l'essai. La vitesse de déplacement du piston est imposée égale à 1.27 mm/min comme dans la norme NF94-078.
- Les mesures de force et déplacement sont effectuées chaque second et enregistrées automatiquement par l'ordinateur.

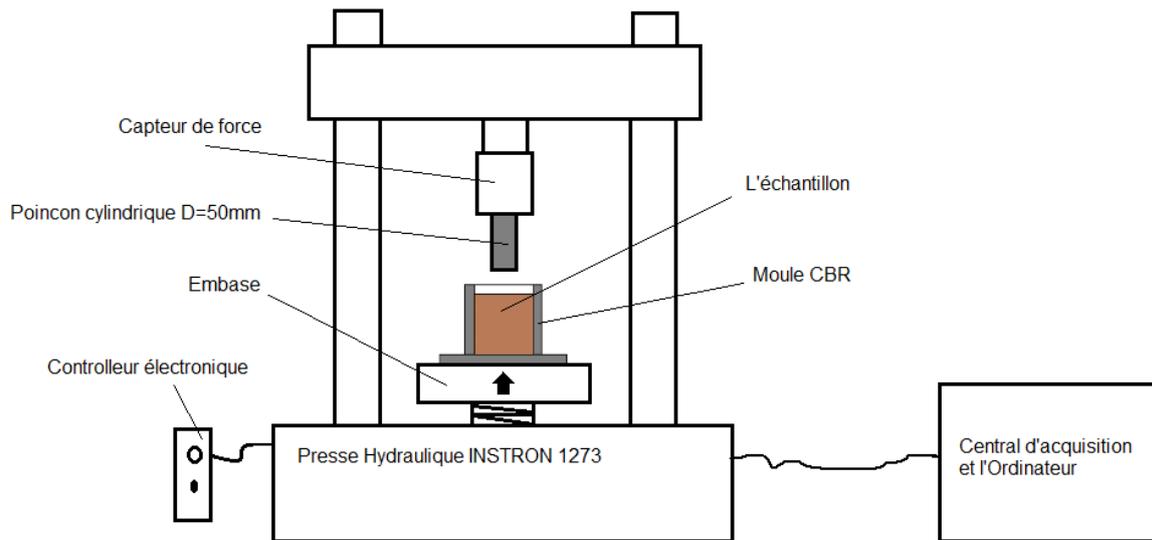


Figure III-19 : Dispositif expérimental de l'essai poinçonnement IPI

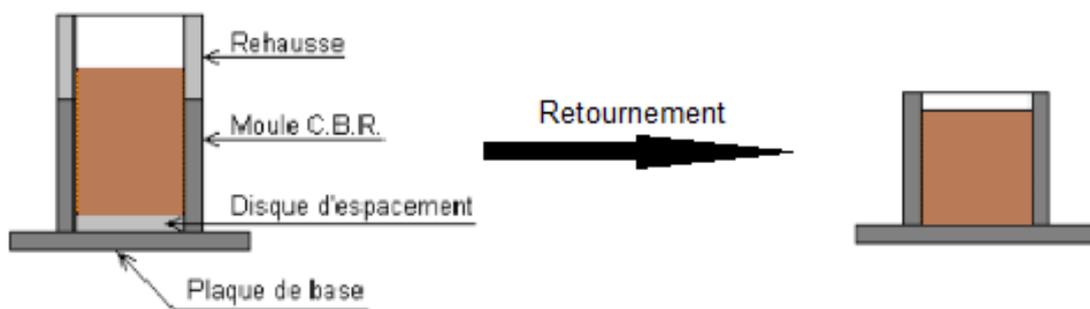


Figure III-19 : Principe de préparation de l'échantillon Proctor en vue de l'essai de poinçonnement IPI

Les essais de mesure de l'IPI ont été réalisés sur le sable limoneux de Gavet compacté dans un moule CBR selon la procédure décrite au paragraphe III.2.3 . Après avoir été compacté, l'échantillon contenu dans le moule CBR est retourné afin que la mesure de l'IPI se fasse sur la face inférieure de l'éprouvette (Figure III-19).

Pour ces essais, nous avons considéré 3 niveaux d'énergie de compactage : OPN-30, OPN, OPN+30. L'objectif étant par ailleurs d'étudier l'influence éventuelle de la teneur en eau sur l'IPI, nous avons réalisé pour chaque énergie de compactage, trois mesures d'IPI à trois teneurs en eau différentes: à l'Optimum, du côté sec de l'Optimum, et du côté humide de l'Optimum (Tableau III-5). Les points de mesure de l'IPI sont représentés par les symboles noirs sur la Figure III-20. Les valeurs d'IPI mesurées sont données en noir sur cette même figure.

A partir des courbes Proctor, on a choisi des points pour mesurer l'IPI. L'objectif est d'étudier les influences éventuelles de la teneur en eau en réalisant au moins trois mesures d'IPI pour chaque énergie de compactage : à l'Optimum Proctor, à gauche de l'OP du côté sec et à droite de l'OP du côté humide. Les essais d'IPI ont été réalisés à trois énergies de compactage (Tableau III-5) :

Energie de compactage	Teneur en eau w(%)	Densité sèche (t/m ³)
25 coups/couche	10.3 (OP-1.8 %)	1.774
	12.2 (OP+0.1 %)	1.825
	13.2 (OP+1.1 %)	1.767
55 coups /couche	8.5 (OPN-2.7 %)	1.794
	10.6 (OPN-0.6 %)	1.863
	11.9 (OPN+0.7 %)	1.855
85 coups /couche	9.4 (OP-1.4 %)	1.951
	10.7 (OP-0.1 %)	1.976
	11.6 (OP+0.8 %)	1.965
	11.9 (OP+1.1 %)	1.954

Tableau III-5 : Caractéristiques des échantillons utilisés pour la mesure de l'IPI

III.4.3 Analyse des mesures d'Indice de Portance Immédiat

Les Figure III-21, Figure III-22 et Figure III-23 présentent les résultats des essais d'IPI réalisés sur le sable limoneux de Gavet. Globalement, on observe :

- Pour une énergie de compactage donnée, l'IPI est généralement maximal au voisinage de l'Optimum (Figure III-20).
- Une augmentation de l'énergie de compactage du côté sec de l'Optimum entraîne généralement une augmentation de l'IPI (Figure III-21).
- Un compactage du côté humide de l'Optimum avec une énergie supérieure à l'énergie de l'essai Proctor Normal peut entraîner une diminution de l'IPI, ce qui traduit une diminution de la capacité portante du sol, et donc un rôle contreproductif du sur-compactage qu'il convient d'éviter dans le domaine des teneurs en eau supérieures à w_{OP} .
- Dans le cas du sable limoneux de Gavet, il ne semble pas exister de relation directe entre les valeurs d'IPI et les valeurs de succion mesurées au sein du matériau compacté (Figure III-22).
- En revanche, l'augmentation de la densité sèche du matériau favorise une augmentation de l'IPI (Figure III-23). Le matériau sera d'autant plus rigide et résistant que sa densité sèche sera élevée.
- Selon la classification GTR de la norme NF P 11-300 (Tableau III-7), la moitié des échantillons fabriqués, principalement compactés à 25 coups/couche, ont un IPI compris entre 8 et 25, donc correspondent à un état hydrique d'humidité moyenne de classe A1m. Les autres points ont l'IPI un peu plus élevé mais proche de 25, avec une valeur maximale de 37. L'ensemble des échantillons peut être considéré de classe A1m.

Au vu des observations précédentes, il convient de retenir que dans le cas du sable limoneux Livet-Gavet, il n'existe pas de corrélations directes entre les valeurs d'IPI et les valeurs de succion régnant dans le matériau. De même si les valeurs d'IPI tendent à augmenter lorsque la densité sèche du matériau augmente, il convient de noter qu'un sur-compactage côté humide peut être contreproductif vis-à-vis des capacités de portance immédiate du matériau.

Les valeurs d'IPI et de succion sont rassemblées dans le Tableau III-6.

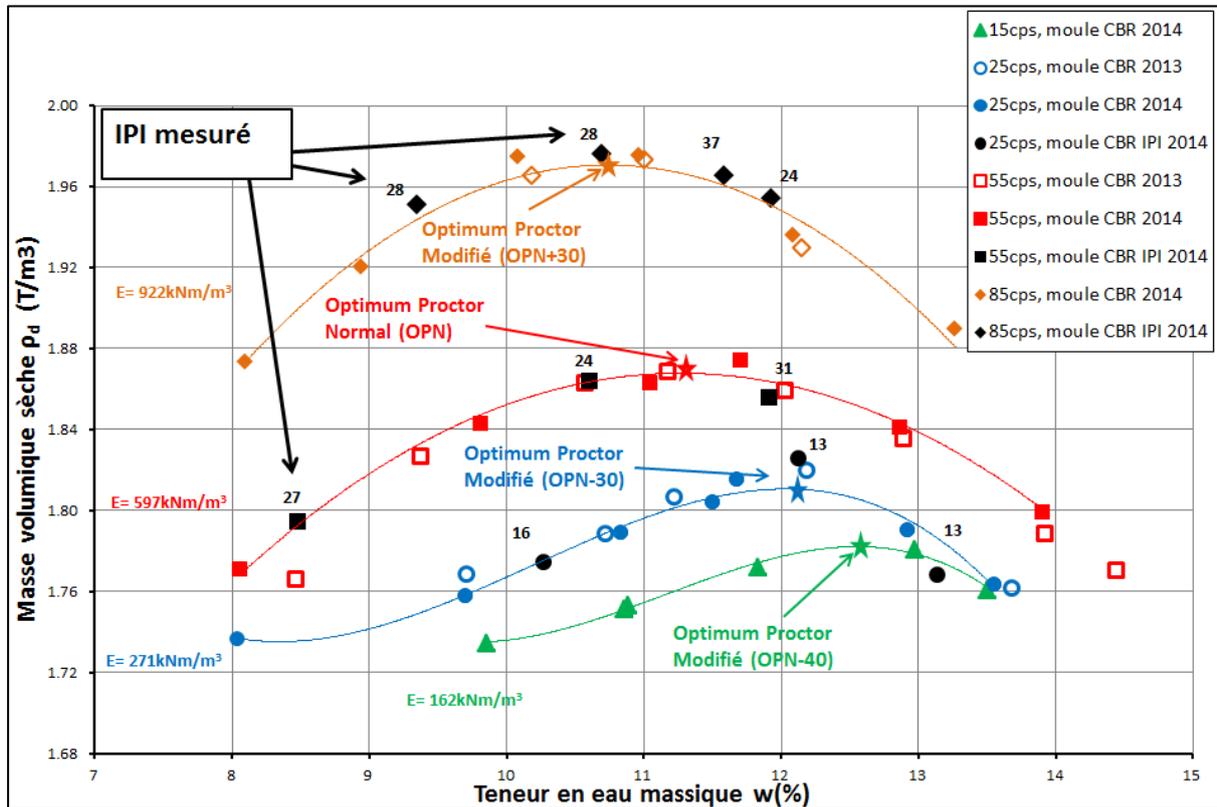


Figure III-20 : Mesure de l'Indice de Portance Immédiate le long des courbes Proctor (cas du sable limoneux de Gavet)

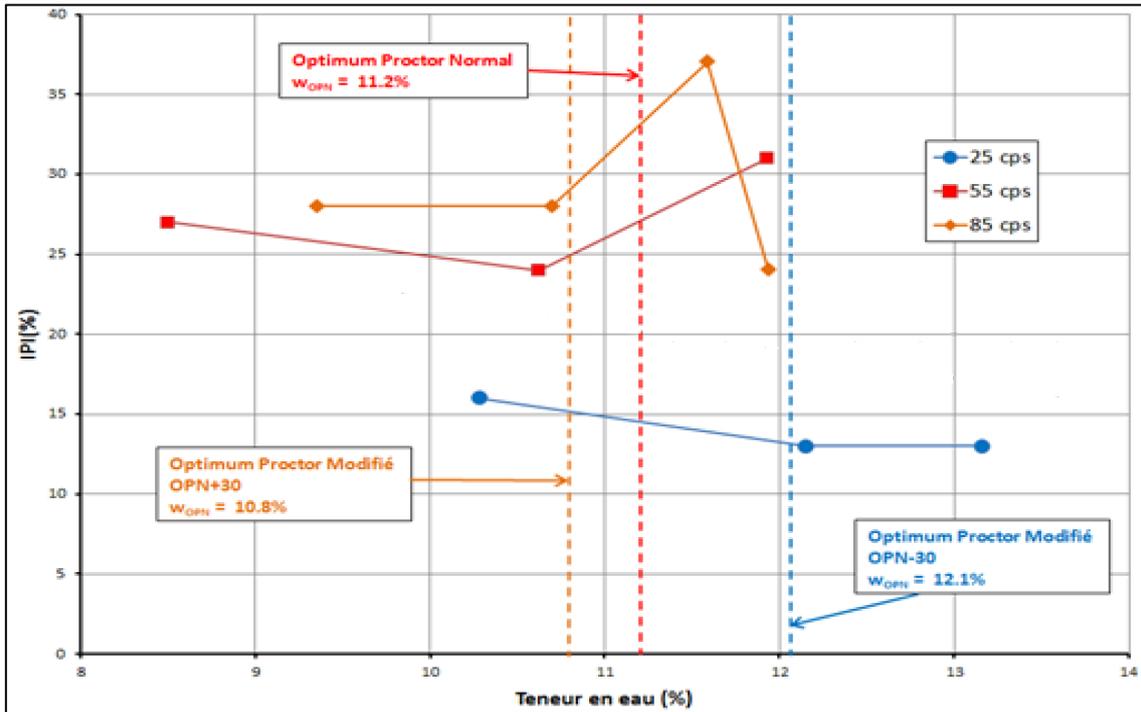


Figure III-21 : Evolution de l'Indice de Portance Immédiate en fonction de la teneur en eau pour différentes énergies de compactage (cas du sable limoneux de Gavet)

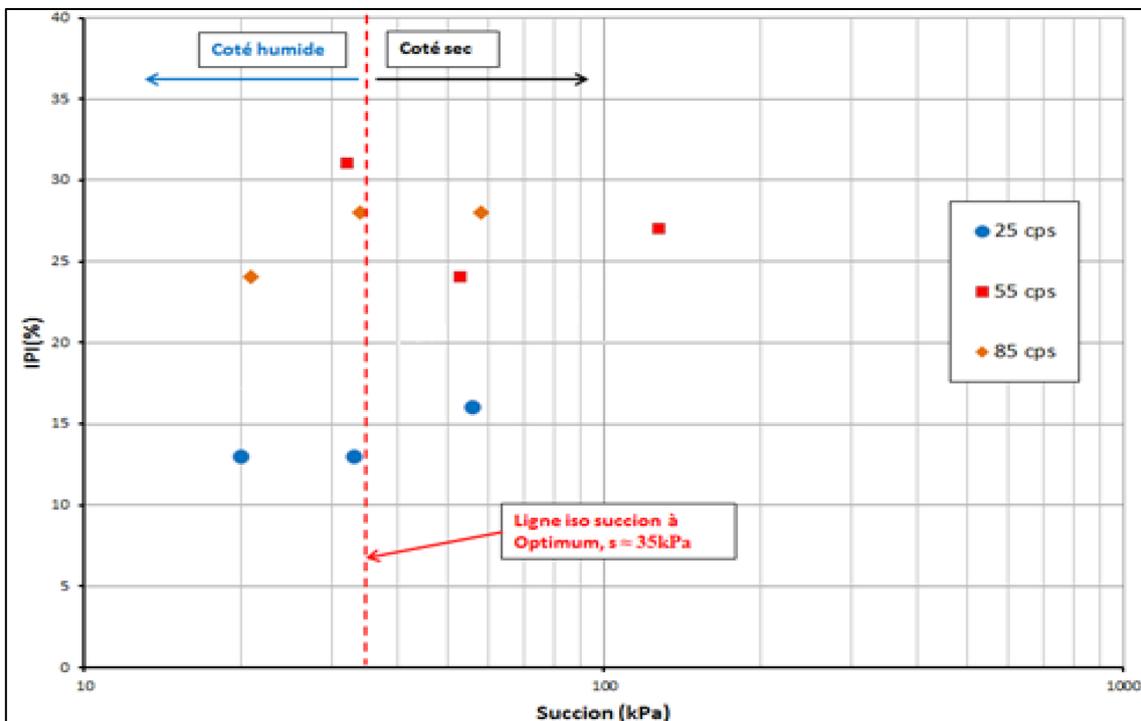


Figure III-22 : Evolution de l'Indice de Portance Immédiate en fonction de la succion pour différentes énergies de compactage (cas du sable limoneux de Gavet)

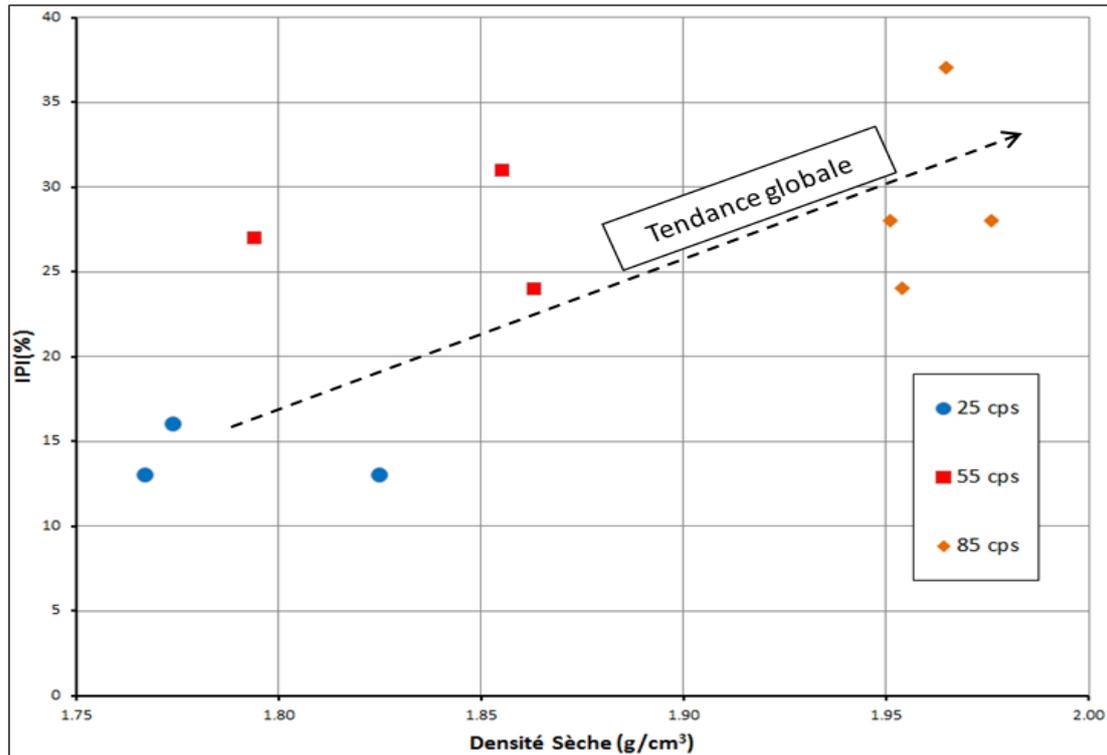


Figure III-23 : Evolution de l'Indice de Portance Immédiate en fonction de la densité sèche pour différentes énergies de compactage (cas du sable limoneux de Gavet)

Energie de compactage	Teneur en eau w(%)	Densité sèche (t/m³)	Succion (kPa)	IPI (%)
25 coups/couche	10.3 (OP-1.8 %)	1.774	56	16
	12.2 (OP+0.1 %)	1.825	33	13
	13.2 (OP+1.1 %)	1.767	20	13
55 coups /couche	8.5 (OPN-2.7 %)	1.794	128	27
	10.6 (OPN-0.6 %)	1.863	53	24
	11.9 (OPN+0.7 %)	1.855	32	31
85 coups /couche	9.4 (OP-1.4 %)	1.951	58	28
	10.7 (OP-0.1 %)	1.976	34	28
	11.6 (OP+0.8 %)	1.965	-	37
	11.9 (OP+1.1 %)	1.954	21	24

Tableau III-6 : Récapitulatif des résultats d'essais de poinçonnement IPI

Classe A		Tableau 1 - Classification des sols fins			
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 μm > 35%	A Sols fins	VBS ≤ 2,5 (*) OU I_p ≤ 12	A₁ Limos peu plastiques, loess, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	IPI^(*) ≤ 3 OU W_n ≥ 1,25 W_{OPN}	A₁ th
				3 < IPI^(*) ≤ 8 OU 1,10 ≤ W_n < 1,25 W_{OPN}	A₁ h
				8 < IPI ≤ 25 OU 0,9 W_{OPN} ≤ W_n < 1,1 W_{OPN}	A₁ m
				0,7 W_{OPN} ≤ W_n < 0,9 W_{OPN}	A₁ s
				W_n < 0,7 W_{OPN}	A₁ ts
		12 < I_p ≤ 25 (*) OU 2,5 < VBS ≤ 6	A₂ Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	IPI^(*) ≤ 2 OU I_c^(*) ≤ 0,9 OU W_n ≥ 1,3 W_{OPN}	A₂ th
				2 < IPI^(*) ≤ 5 OU 0,9 ≤ I_c^(*) < 1,05 OU 1,1 W_{OPN} ≤ W_n < 1,3 W_{OPN}	A₂ h
				5 < IPI ≤ 15 OU 1,05 < I_c ≤ 1,2 OU 0,9 W_{OPN} ≤ W_n < 1,1 W_{OPN}	A₂ m
				1,2 < I_c ≤ 1,4 OU 0,7 W_{OPN} ≤ W_n < 0,9 W_{OPN}	A₂ s
				I_c > 1,3 OU W_n < 0,7 W_{OPN}	A₂ ts
		25 < I_p ≤ 40 (*) OU 6 < VBS ≤ 8	A₃ Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...	IPI^(*) ≤ 1 OU I_c^(*) ≤ 0,8 OU W_n ≥ 1,4 W_{OPN}	A₃ th
				1 < IPI^(*) ≤ 3 OU 0,8 ≤ I_c^(*) < 1 OU 1,2 W_{OPN} ≤ W_n < 1,4 W_{OPN}	A₃ h
				3 < IPI ≤ 10 OU 1 < I_c ≤ 1,15 OU 0,9 W_{OPN} ≤ W_n < 1,2 W_{OPN}	A₃ m
				1,15 < I_c ≤ 1,3 OU 0,7 W_{OPN} ≤ W_n < 0,9 W_{OPN}	A₃ s
				I_c > 1,3 OU W_n < 0,7 W_{OPN}	A₃ ts
		I_p > 40 (*) OU VBS > 8	A₄ Argiles et argiles marneuses, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique	
				A₄ h	
				A₄ m	
				A₄ s	

Tableau III-7 : Classification du sable limoneux Gavet en fonction de son état hydrique (selon classification GTR)

III.5 Essai de compression simple

III.5.1 Principe de l'essai

Afin d'étudier la résistance à la rupture du sol à densité sèche constante mais teneur en eau variable, on a réalisé une série d'essais de compression simple du sol compacté. Le but principal de cette série est d'étudier l'influence des effets du séchage sur la résistance mécanique du sol lorsque celui-ci est compacté à l'optimum sur chantier. Dans le cas des essais de laboratoire, nous avons fabriqué 6 éprouvettes de sable limoneux de Gavet compactées à partir de la même teneur en eau (voisine de celle de l'Optimum) et avec la même énergie de compactage (OPN-30) (Figure III-24). Les éprouvettes ont ensuite été soumises à un séchage contrôlé de durée variable par simple échange avec l'air ambiant du laboratoire. Après avoir respecté un temps d'équilibrage des échanges hydriques au sein des éprouvettes, celles-ci ont été soumises à un essai de compression simple.

L'essai de compression simple permet de mesurer la résistance en compression simple R_c d'un échantillon de sol cylindrique, d'élancement supérieur à deux. L'essai est mené rapidement de façon à éviter tout drainage. Il est réalisé à vitesse d'écrasement constante, de 0.5 à 2 mm/minute.

La résistance en compression simple du matériau est donnée par la formule suivante :

$$R_c = \frac{4P}{\pi D^2}$$

,où P étant la charge appliquée à la rupture, et D le diamètre de l'échantillon.

Terzaghi et Peck (TERZAGHI & PECK, 1967) donnent à partir de R_c une échelle de consistance du sol (Tableau III-8):

Très molle		R_c	< 0.25 bar
Molle	0.25 <	R_c	< 0.50 bar
Mi-consistante	0.5 <	R_c	< 1 bar
Consistante	1 <	R_c	< 2 bars
Très consistante	2 <	R_c	< 4 bars
Extrêmement consistante		R_c	> 4 bars

Tableau III-8 : Echelle de consistance du sol en fonction de sa résistance à la compression simple (TERZAGHI & PECK, 1967)

III.5.2 Procédure expérimentale

III.5.2.a Fabrication des éprouvettes

Pour cette série d'essais, le sable limoneux de Gavet a été initialement séché en étuve, puis humidifié à la teneur en eau de 12.5 % pendant son malaxage, légèrement supérieure à celle de l'Optimum ($w = 12.1$ %) (Figure III-25).

Six éprouvettes de sol ont ensuite été fabriquées par compactage dans un moule CBR conformément à la procédure décrite au paragraphe III.2.3 . L'énergie de compactage appliquée pour chacune des éprouvettes est de 25 coups par couche (OPN-30), soit $E = 271$ kNm/m³. Après compactage, ces éprouvettes sont filmées et gardées dans une salle climatisée pour l'homogénéisation.

Après 7 jours d'homogénéisation, les éprouvettes sont récupérées. Les échantillons sont taillés manuellement à l'aide d'une scie à fil et d'une base tournante. Les dimensions des éprouvettes sont: Diamètre = 71~72 mm ; Hauteur = 120~124 mm.

Les éprouvettes sont ensuite séchées par simple échange avec l'air ambiant du laboratoire. Les variations de teneur en eau de chacune des éprouvettes sont mesurées de temps en temps à l'aide d'une balance électronique. Les temps de séchage de chacune des éprouvettes sont variables et fonction de la teneur en eau finale souhaitée.

Lors de ce séchage, les variations volumiques des éprouvettes ne sont pas mesurées en continue, mais les dimensions des éprouvettes ont été contrôlées avant et après séchage à l'aide d'un pied

à coulisse électronique. A partir de ces mesures de volume, on note que le volume d'éprouvette ne change pas au cours de séchage.

Lorsque la teneur en eau souhaitée est atteinte (celle-ci est estimée à partir de la teneur en eau à la fabrication et sera mesurée précisément après l'essai de compression simple), les éprouvettes sont filmées et gardés dans une salle climatisée pour homogénéisation. En effet, les éprouvettes ayant une forme cylindrique, au cours de séchage, les couches de matériaux à l'extérieur sont toujours plus sèches qu'au centre.

Afin d'étudier l'influence du temps d'équilibrage des échanges hydriques au sein des éprouvettes, deux séries d'essais de compression simple ont été réalisées avec deux durées d'homogénéisation. Le temps d'homogénéisation pour la première série est de 1 à 3 jours, et de 7 à 8 jours pour la seconde série.

Après l'homogénéisation, les éprouvettes sont récupérées, les mesures de masse et de dimensions sont effectuées avant l'écrasement.

Comme l'évaporation de l'eau dans l'éprouvette est très lente (environ 3 heures pour une variation d'un pourcent de teneur en eau) et que la durée des essais est d'environ 8 minutes, la variation de masse d'eau au cours d'écrasement est supposée négligeable. La teneur en eau de l'éprouvette est mesurée à la fin de l'écrasement.

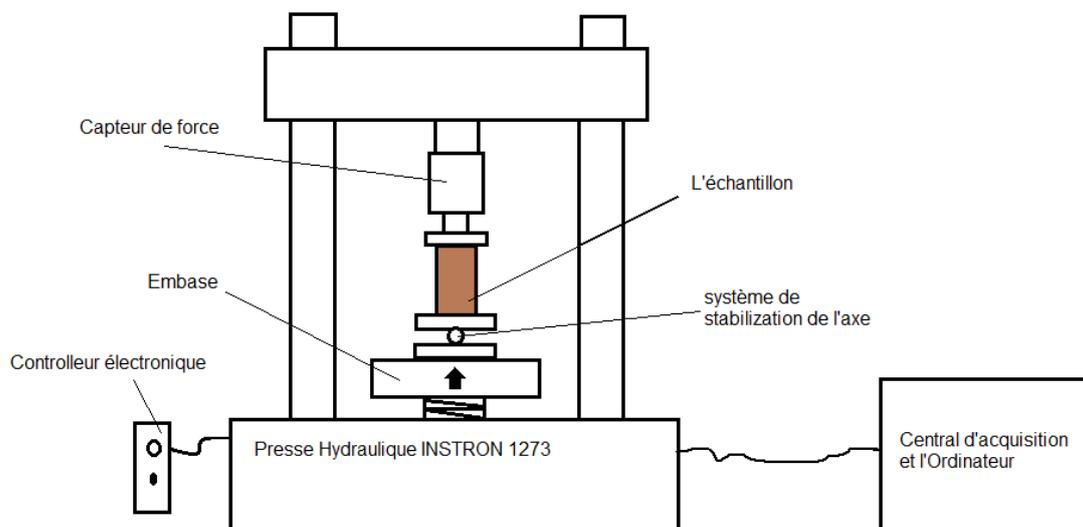


Figure III-24 : Dispositif expérimental de l'essai de compression simple

III.5.2.b Dispositif d'expérimental :

Le dispositif expérimental (Presse, centrale de commande et d'acquisition) utilisé lors des essais de compression simple est quasi analogue à celui utilisé lors des essais IPI et décrit au paragraphe III.4.2 . Le poinçon de l'essai IPI a été remplacé par un casque cylindrique (diamètre : 100 mm) fixé au capteur de force. L'embase inférieure sur laquelle est posée l'éprouvette est équipée d'un système rotulé garantissant l'axialité de la force d'écrasement (Figure III-26).

Pour éviter le freinage entre l'éprouvette et les embases supérieure et inférieure, deux membranes en latex sont collées sur ces embases avec de la graisse de silicone (Figure III-27).

Après la mesure de ses dimensions, l'éprouvette est mise en contact avec l'embase inférieure et supérieure de la presse par pilotage manuel. Une fois l'éprouvette en contact, le chargement est appliqué. La vitesse d'écrasement vertical imposée est de 0.5 mm/min. L'éprouvette est conduite jusqu'à sa rupture (Figure III-28).

Au cours de l'écrasement, les données (force, déplacement vertical) sont enregistrées chaque seconde jusqu'à la fin de l'essai.

Après essai, l'éprouvette est récupérée pour la mesure de sa teneur en eau.

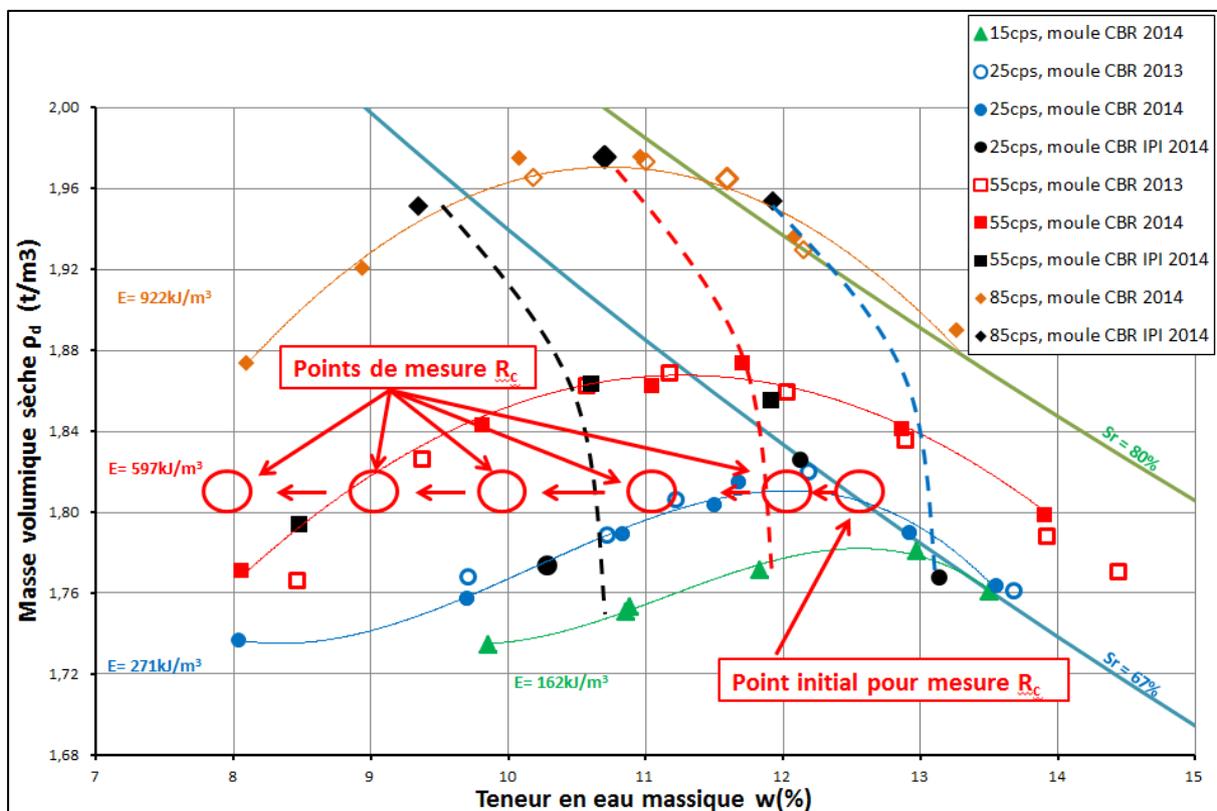


Figure III-25 : Les points de mesure souhaités pour l'essai de compression simple

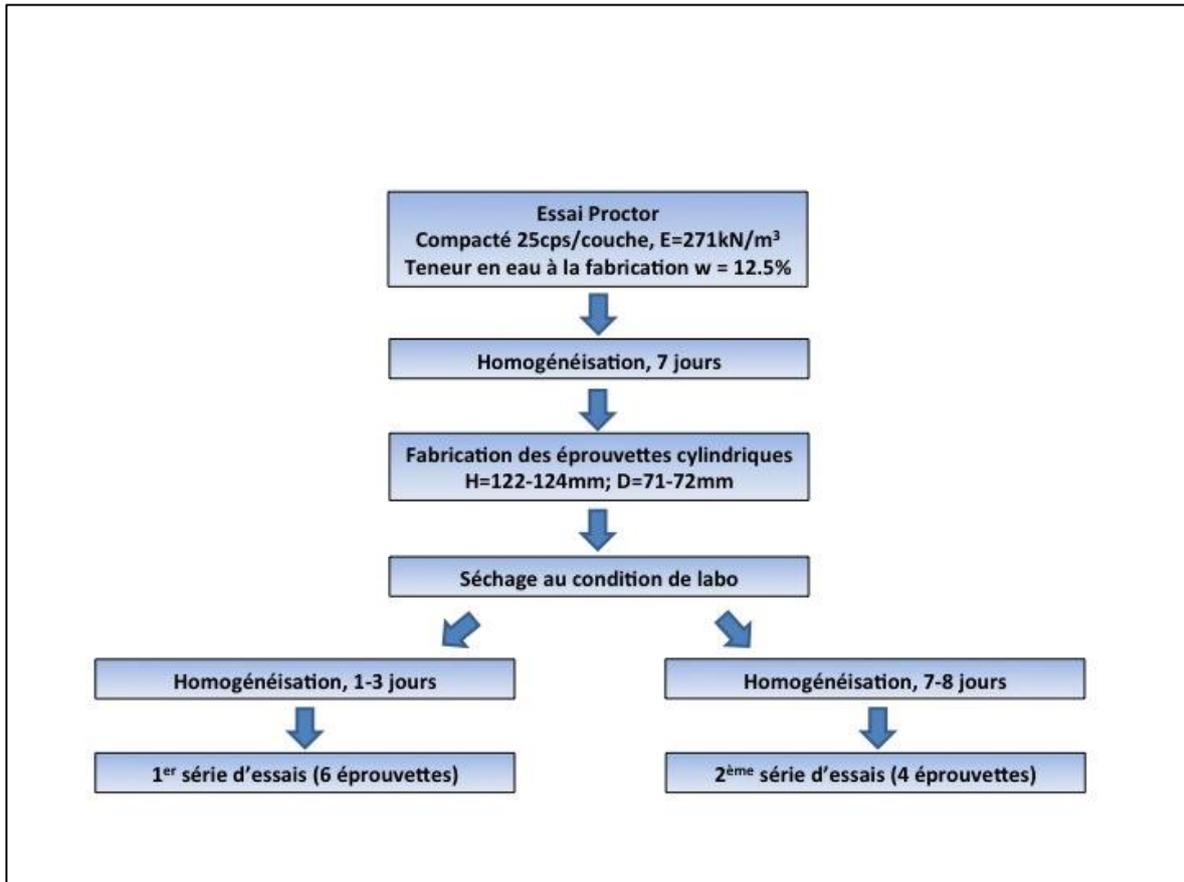


Figure III-26 : Procédure de l'essai compression simple



Figure III-27 : Mise en place de l'éprouvette pour l'essai de compression simple

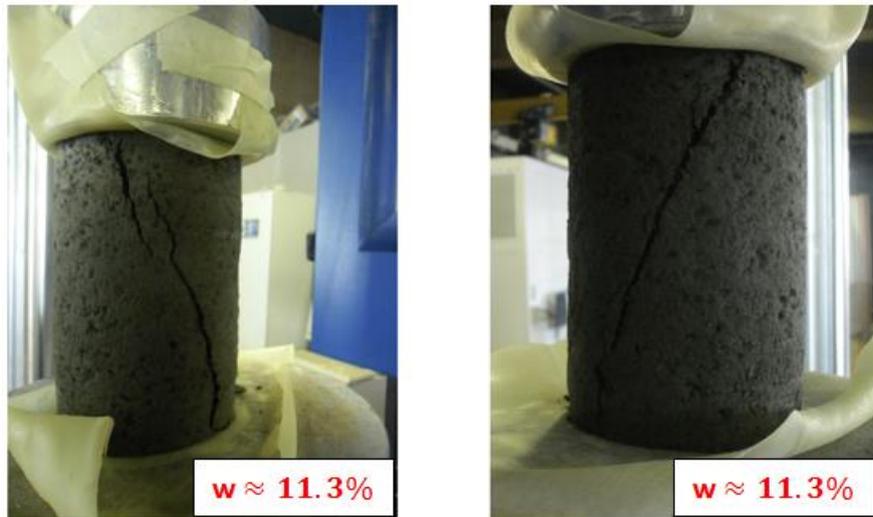


Figure III-28 : Rupture de l'éprouvette

III.5.3 Analyse des résistances à la compression simple

III.5.3.a Influence du temps d'équilibrage des échanges hydriques :

Comme présenté précédemment, nous avons réalisé deux séries d'essais sur des éprouvettes de sable limoneux de Gavet. Celles-ci ont été préparées et compactées de manières identiques, puis amenées à la teneur en eau souhaité par échange avec l'air ambiant (chemin de séchage), puis recouverte d'un film plastique et déposées en salle climatisée. A partir de cette étape, deux durées différentes ont été respectées pour que les échanges hydriques au sein des éprouvettes puissent atteindre un équilibre:

- La première série d'éprouvettes réalisée en mai 2015 respecte un temps d'homogénéisation de 1 à 3 jours. Les résultats de cette série correspondent aux courbes pointillées sur la Figure III-29.
- La seconde série d'éprouvettes réalisée en septembre 2015 respecte un temps d'homogénéisation de 7 à 8 jours, identique à celui observé lors des essais Proctor avec mesure de succion (cf paragraphe III.3). Les résultats des essais effectués sur cette série d'éprouvettes correspondent aux courbes continues de la Figure III-29.

La Figure III-29 montre que les courbes charge-déformation obtenues pour ces deux séries d'éprouvettes sont très différentes :

- A teneurs en eau comparables, les éprouvettes de sable limoneux de Gavet ayant subi une durée d'homogénéisation de 7 à 8 jours présentent généralement des rigidités et des résistances à la compression très supérieures aux éprouvettes pour lesquelles un temps d'équilibrage de 1 à 3 jours a été respecté. Ce résultat montre que les 3 jours d'attente ne sont pas suffisants pour atteindre un équilibre des échanges hydriques au sein des éprouvettes. Nos mesures après essais montrent que le sol sur la partie extérieure de l'éprouvette est plus sec qu'au centre de l'éprouvette. Notons toutefois que les résultats des essais de la première série réalisés aux teneurs en eau de 12 % et 12.4 % ont pu être

utilisés dans la suite de l'analyse car ces échantillons correspondent à l'état initial de référence pour lequel l'écrasement se fait tout de suite après la fabrication des échantillons, sans séchage.

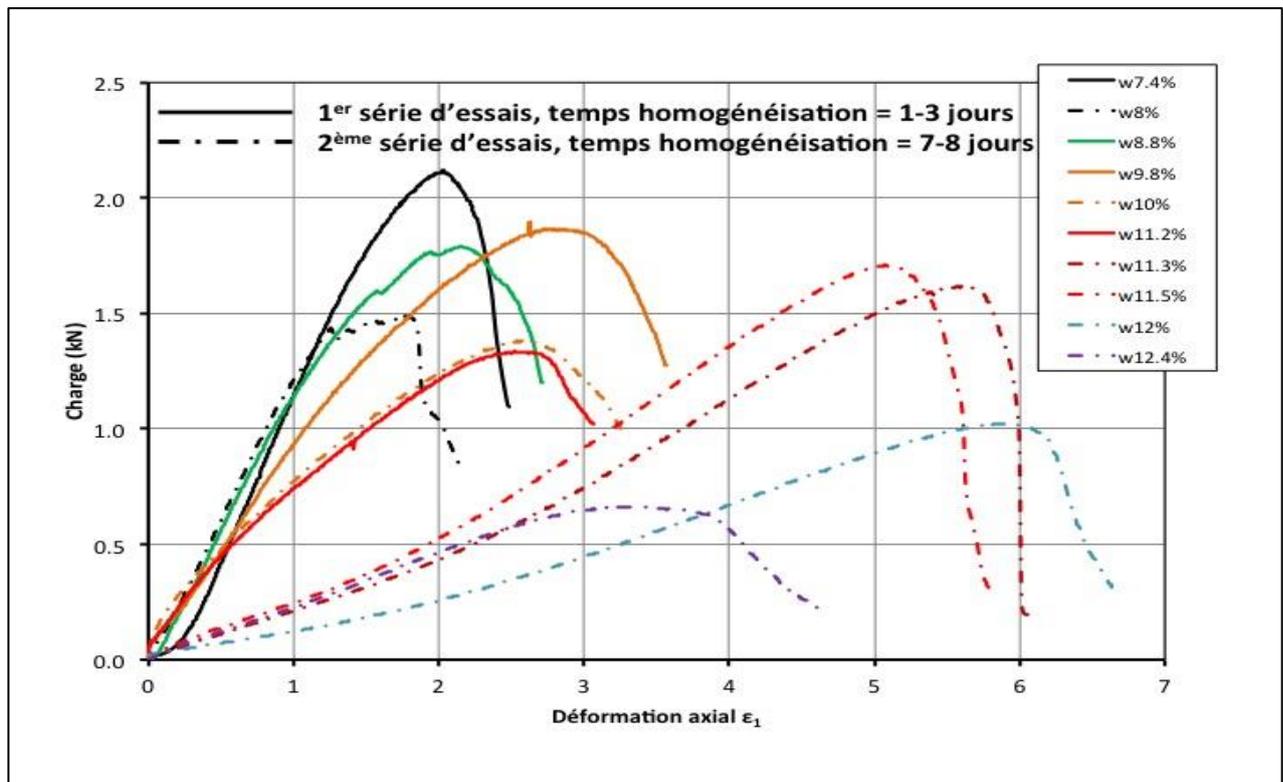


Figure III-29 : Résultats des deux séries d'essai de compression simple réalisées sur le sable limoneux de Gavet compacté à 25 coups/couche avec deux temps d'homogénéisation.

La Figure III-30 présente les résultats des essais de compression simple qui ont été retenus pour l'analyse. On observe :

- Du côté sec de l'Optimum ($w < w_{OPM} = 11.8 \%$), le matériau apparaît d'autant plus raide que sa teneur en eau est faible. De même, sa résistance à la compression augmente lorsque sa teneur en eau diminue. Notons que le mode de rupture des éprouvettes dans ce domaine des teneurs en eau est le même pour les 4 éprouvettes testées : passage par un pic puis fort radoucissement qui marque la rupture généralisée de l'éprouvette avec apparition de bandes de glissement très nettes (Figure III-28). La déformation axiale à la rupture est comprise entre 2 et 3 %.
- Au voisinage de l'Optimum ($w = 12 \%$ et 12.4%), le matériau apparaît plus ductile. Les modules tangents (E_{tan}) identifiés sur la partie linéaire des courbes (contrainte axiale/déformation axiale) au voisinage de l'origine des déformations (modules tangents initiaux) sont très inférieurs à ceux mesurés après séchage. De même, les résistances à la compression simple mesurées du côté humide de l'Optimum sont très inférieures à celles observées après séchage.
- Puisque les résistances à la compression mesurées sont comprises entre 150 et 550 kPa, notre matériau est de type consistant à extrêmement consistant selon l'échelle de consistance de Terzaghi et Peck (Tableau III-8).

Rappelons que l'ensemble des résultats décrits précédemment a été obtenu pour des éprouvettes de sol présentant des densités sèches identiques qui ont été contrôlées après essai d'écrasement (Figure III-31). Par conséquent, l'ensemble de ces résultats tend à montrer que le sable limoneux compacté à une teneur en eau proche de l'Optimum présente une amélioration de ses caractéristiques mécaniques (rigidité, résistance au cisaillement) lors de son séchage.

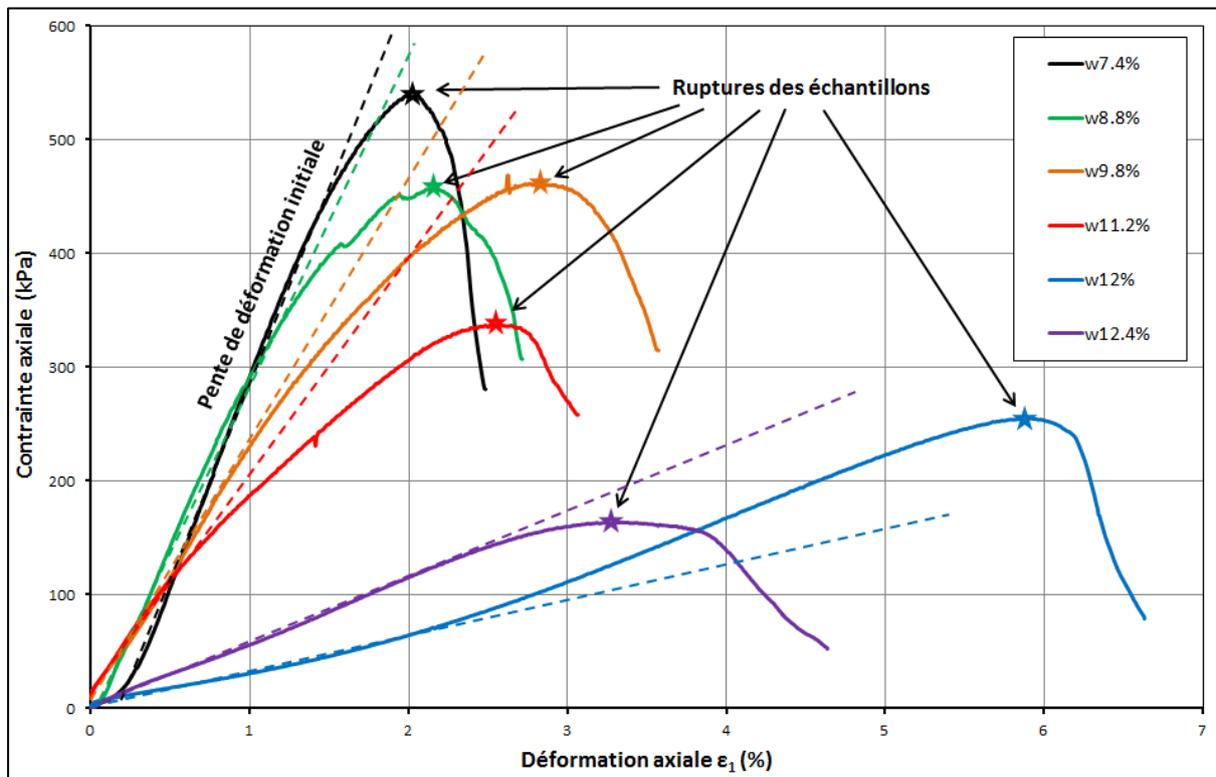


Figure III-30 : Résultats des essais de compression simple réalisés sur sable limoneux de Gavet compacté à 25 coups/couche (temps d'équilibrage de 7 à 8 jours)

A titre de synthèse, la Figure III-32 présente l'évolution de la résistance à la compression R_c et du module de déformation tangent initial (E_{tan}) en fonction de la teneur en eau des éprouvettes au moment de l'essai. On observe les points suivants :

- Une augmentation significative de la résistance à la compression et du module de déformation tangent initial quand la teneur en eau évolue par séchage de la teneur en eau à l'Optimum vers le côté sec.
- L'évolution (augmentation) de la résistance à la compression et du module de déformation tangent initial avec la diminution de la teneur en eau par séchage apparaît plus sensible du côté humide de l'optimum que du côté (pentes de variation plus forte à droite de l'Optimum qu'à gauche).
- A titre indicatif, la résistance du sol situé près de teneur en eau de l'Optimum (12.1%) est environ trois fois inférieure à celle mesurée pour l'échantillon à 7.4 % de teneur en eau, qui est la plus petite valeur de cette série.

De même, le module de déformation initial tangent du sol aux teneurs en eau voisines de celle de l'optimum (12.1%) est environ cinq fois inférieur à celui mesuré sur l'échantillon à 7.4 % de teneur en eau.

En conclusion des résultats précédents, nous pouvons retenir qu'à la fabrication toutes les éprouvettes ont des teneurs en eau très proches, une densité sèche quasi identique et probablement la même structure des pores. Au cours du séchage à l'air libre, la densité sèche reste constante, la variation de volume est négligeable selon les mesures des déformations volumiques. Si l'on suppose que la structure des pores ne change pas au cours de la fabrication et du séchage des éprouvettes, la succion reste le seul paramètre à varier lors de l'évolution de la teneur en eau. La quantité d'eau dans les pores diminue avec une diminution de teneur en eau, ce qui entraîne une diminution de rayon de courbure et une augmentation de succion selon la loi de Jurin. La succion gouverne la rigidité et la résistance à la rupture du matériau.

Les principaux paramètres expérimentaux obtenus dans le cadre des essais portant sur l'étude du comportement du sable limoneux au compactage et présentés au chapitre III de ce rapport sont rassemblés dans le Tableau III-9.

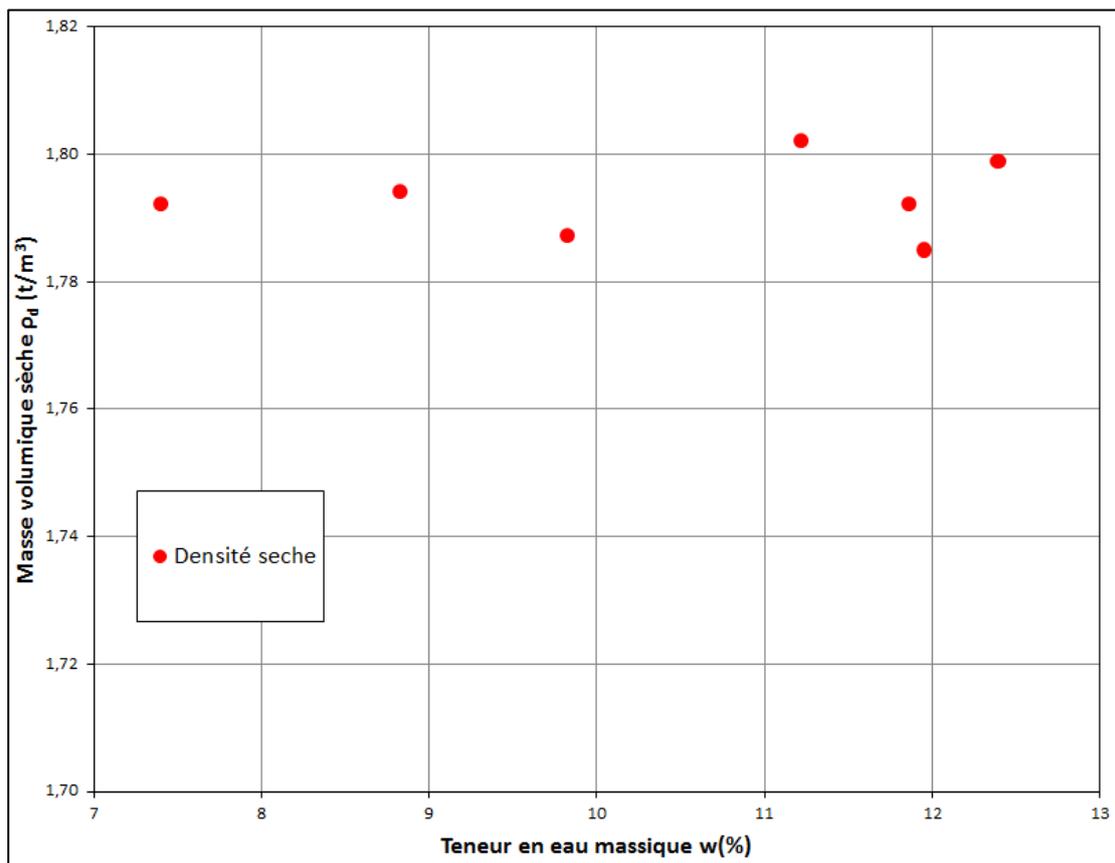


Figure III-31 : Evolution de la densité sèche avec la teneur en eau massique des éprouvettes de sable limoneux de Gavet soumises aux essais de compression simple

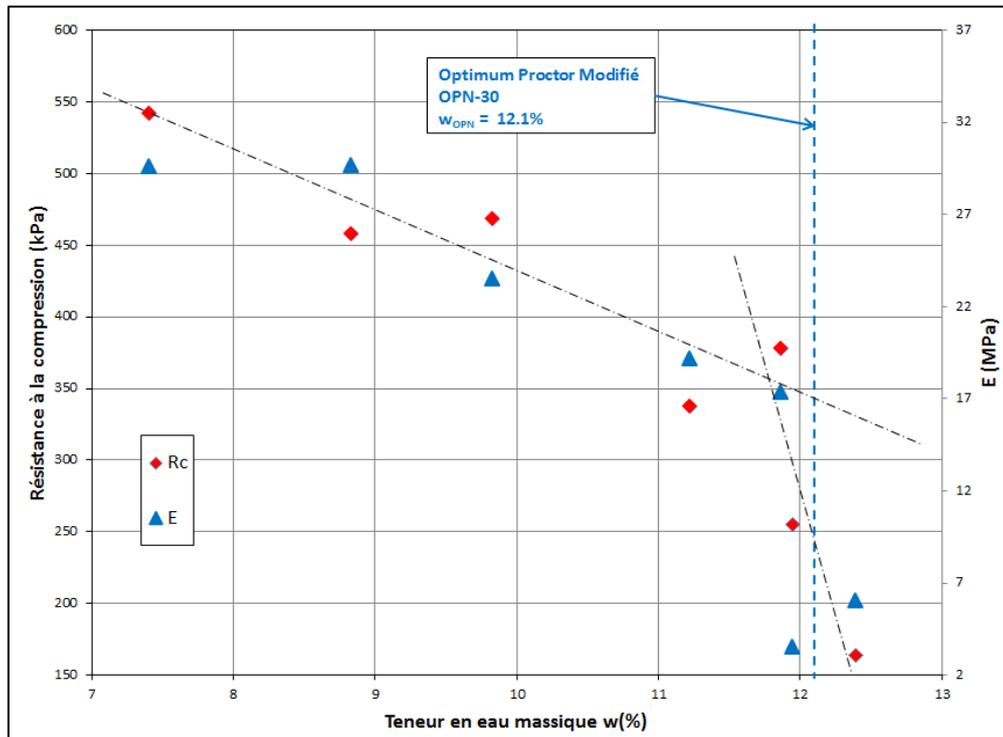


Figure III-32 : Evolution de la résistance à la compression simple et du module de déformation initial tangent en fonction de la teneur en eau massique (cas du sable limoneux de Gavet)

Energie de compactage	Teneur en eau w (%)	Densité sèche (t/m ³)	E _{tan} (MPa)	Rc (kPa)	Echelle de consistance
25 coups/couche E = 271 kJ/m³	7.4 (OP-4.7 %)	1.792	29	542	Extrêmement consistante
	8.8 (OP-3.3 %)	1.794	29	458	Extrêmement consistante
	9.8 (OP-2.3 %)	1.787	23	469	Extrêmement consistante
	11.2 (OP-0.9 %)	1.802	19	337	Très consistante
	11.9 (OP-0.2 %)	1.792	17	378	Très consistante
	12.0 (OP-0.1 %)	1.785	3	255	Très consistante
	12.4 (OP+0.3 %)	1.799	6	164	Consistante

Tableau III-9 : Tableau récapitulatif des essais de compression simple sur sable limoneux Livet-Gavet à densité sèche constante, teneur en eau variable.

III.6 Conclusions

Ce paragraphe fait la synthèse des principaux résultats expérimentaux obtenus en ce qui concerne la caractérisation du comportement du sable limoneux de Gavet (passant à 2 mm) au compactage.

Les essais Proctor et les courbes d'iso-succion :

- Pour un niveau d'énergie de compactage donné, la succion est fortement influencée par la teneur en eau du matériau. Elle diminue lorsque la teneur en eau augmente. Pour des énergies de compactage inférieures ou égales à celle du Proctor normal, les variations de la succion avec la teneur en eau sont indépendantes du niveau d'énergie de compactage appliquée.
- Il existe une double influence de la teneur en eau et de l'énergie de compactage sur les courbes d'iso-succion. Celle-ci est toutefois plus ou moins marquée selon la teneur en eau et le niveau d'énergie considérée.
- Pour des énergies de compactage inférieures ou égales à celle du Proctor Normal, les courbes d'iso-succion sont peu influencées par l'énergie de compactage (courbes d'iso-succion verticales dans le plan ρ_d-w). Ceci est d'autant plus vrai que si le matériau est compacté du côté sec de l'Optimum.
- Pour des énergies de compactage supérieures à celle du Proctor Normal, les courbes d'iso-succion sont influencées par l'énergie de compactage. Cette influence sera accentuée lorsque le matériau est compacté du côté humide de l'Optimum (courbure des courbes d'iso-succion dans le sens des teneurs en eau décroissantes dans le plan ρ_d-w).
- Il existe probablement un seuil d'énergie de compactage du côté sec, au-dessus duquel se produit une modification significative du réseau poral caractérisée par la disparition des pores inter-agrégats (macro pores) et la prédominance de pores intra-agrégats (micropores).

L'essai de poinçonnement IPI

- Pour une énergie de compactage donnée, l'IPI est généralement maximal au voisinage de l'Optimum
- Une augmentation de l'énergie de compactage du côté sec de l'Optimum entraîne généralement une augmentation de l'IPI.
- Un compactage côté humide de l'Optimum avec une énergie supérieure à l'énergie de l'essai Proctor Normal peut entraîner une diminution de l'IPI.
- Une augmentation de la densité sèche du sable limoneux de Gavet entraîne une augmentation de son IPI.
- En revanche, il ne semble pas exister de relation directe entre les valeurs d'IPI et les valeurs de succion mesurées au sein du matériau compacté.

L'essai de compression simple

- Dans le cas des échantillons de sable limoneux de Gavet fabriqués par compactage à teneurs en eau voisines de celle de l'Optimum, puis séchés par échange avec l'air ambiant jusqu'à une teneur en eau donnée avant écrasement, nous constatons une augmentation significative de la rigidité du matériau et de sa résistance au cisaillement avec le séchage.
- Il est important de respecter un temps suffisant d'équilibrage des échanges hydriques au sein de l'échantillon après séchage (au moins une semaine pour le sable limoneux de Gavet) pour avoir des résultats représentatifs d'échantillons avec des teneurs en eau homogènes.

Les principaux paramètres expérimentaux obtenus sont présentés dans le Tableau III-10 ci-dessous :

Energie de compactage	Essais Proctor – Iso-succion	Essai IPI	Essai de compression simple
Compacté à 15 coups/couche (PN-40) E = 162 kNm/m ³	$\rho_{OP} = 1.78 \text{ (t/m}^3\text{)}$ $w_{OP} = 12.6 \%$ SOP ~ 24 kPa	-	-
Compacté à 25 coups/couche (PN-30) E = 271 kNm/m ³	$\rho_{OP} = 1.82 \text{ (t/m}^3\text{)}$ $w_{OP} = 12.1 \%$ SOP = 33 kPa	IPI = 13~16 Classe (GTR) : A _{1m}	R _c = 164~542 kPa E _{1%} = 6~29 MPa R _c et E augmentent avec w Le sol est de type consistant à extrêmement consistant
Compacté à 55 coups/couche (Proctor Normal) E = 591 kNm/m ³	$\rho_{OPN} = 1.87 \text{ (t/m}^3\text{)}$ $w_{OPN} = 11.2 \%$ SOPN ~ 50 kPa	IPI = 24~31	-
Compacté à 85 coups/couche (PN+30) E = 922 kNm/m ³	$\rho_{OP} = 1.98 \text{ (t/m}^3\text{)}$ $w_{OP} = 10.8 \%$ SOP = 34 kPa	IPI = 28~37	-

Tableau III-10 : Récapitulatif des grandeurs mesurées lors des essais de compactage du sable limoneux de Gavet

Chapitre IV : Etude des propriétés de rétention d'eau du sable limoneux de Gavet

IV.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'étudier les propriétés de rétention d'eau du sable limoneux de Gavet. L'ensemble des essais présentés dans ce chapitre ont été réalisés sur le sable limoneux de Gavet passant à 2 mm. Comme lors des essais de référence décrits au paragraphe II, deux états de ce matériau sont considérés. D'une part des essais de rétention sont réalisés sur le matériau à l'état de pâte préparé avec une teneur en eau voisine de celle de sa limite de liquidité. D'autre part, des essais de rétention sont menés sur le matériau compacté. Ces essais de rétention comprennent généralement un cycle de drainage – imbibition toutefois quelques essais n'ont été réalisés que sur chemin de drainage.

L'ensemble de ces essais vise à déterminer pour les différents états du matériau considérés les paramètres de rétention d'eau tels que : la succion d'entrée d'air s_{EA} , la limite de retrait w_{SL} , la succion de retrait s_{SL} .

L'objectif de ces essais est aussi d'étudier l'influence du compactage sur la courbe de rétention d'eau obtenue lors de cycle de drainage – imbibition. Pour cela, différents niveaux d'énergie de compactage ont été considérés dans le cas d'éprouvettes fabriquées dans un moule CBR sur la base de la méthode de compactage Proctor, en faisant varier le nombre de coups de dame par couche : 25 coups par couche (OPN-30), 55 coups par couche (OPN), 85 coups par couche (OPN+30). L'ensemble de ces essais de rétention d'eau ont été associés à des essais de caractérisation au porosimètre au mercure afin de pouvoir analyser les propriétés de rétention du matériau en relation avec la distribution de son réseau poral.

Pour compléter le travail d'analyse concernant l'influence de la microstructure du matériau sur la courbe de rétention d'eau, une seconde campagne expérimentale a été réalisée. Celle-ci comprend des essais de rétention d'eau et des essais de porosimétrie au mercure sur des éprouvettes préparées avec la même énergie de compactage mais à partir de teneurs en eau initiale différentes, généralement situées de part et d'autre de la teneur en eau à l'optimum.

IV.2 Essai de rétention d'eau

IV.2.1 Principe de l'essai

L'essai de rétention d'eau est utilisé pour quantifier la capacité d'un sol partiellement saturé à attirer et retenir l'eau qui se trouve à son contact. Lors de cet essai, le sol est soumis à un cycle de drainage - imbibition à partir d'un état initial saturé. Lors de ce cycle, des paliers de succion

croissante (drainage), puis décroissante (mouillage) sont appliqués. Différentes méthodes décrites ci-après peuvent être utilisées pour imposer ces paliers de succion. A chaque palier, et après un temps suffisant pour atteindre l'équilibre des échanges hydriques entre l'échantillon et le milieu environnant, la teneur en eau massique du matériau est mesurée. Les courbes de rétention d'eau sont tracées en représentant l'évolution du degré de saturation du matériau (S_r) ou de la teneur en eau massique (w) en fonction du logarithme de la succion imposée (cf chapitre I). Ces courbes permettent d'identifier des grandeurs caractéristiques du potentiel de rétention d'eau du sol étudié comme la succion d'entrée d'air ou la succion de limite de retrait.

La succion dans un sol est difficile à mesurer et à contrôler. Pour une courbe de rétention d'eau complète, la valeur de succion peut varier de quelques dizaines de kPa à plusieurs centaines de MPa ; ceci en fonction de la nature du matériau étudié (sable, limon, argile, ...). Il existe plusieurs techniques pour contrôler la succion du sol comme la méthode par plaque tensiométrique, la méthode par translation d'axe, la méthode osmotique, la méthode par échange de phase vapeur. Ces méthodes sont relativement complémentaires dans le sens où elles permettent de contrôler une large gamme de succion (de quelques kPa à quelques centaines de MPa), et sont donc bien adaptées à la caractérisation des sols, depuis les sols grossiers jusqu'aux sols fins. Ces différentes méthodes ont des mises en œuvre plus ou moins longues et nécessitent le respect de temps d'équilibrage. Toutes ces méthodes ont un objectif commun de chercher à contrôler l'échange d'eau dans les échantillons du sol vers un équilibre de succion souhaité.

IV.2.1.a Méthodes de contrôle "mécanique" de la succion

Il existe deux méthodes courantes de contrôle de la succion par voie mécanique dans un échantillon de sol : la méthode par plaques tensiométriques et la méthode de translation d'axe.

Pour ces deux méthodes, on utilise toujours une pierre poreuse en céramique à haute pression d'entrée d'air fixée à l'embase de la cellule. Cette pierre poreuse doit être saturée en eau au préalable de l'essai et le demeurer tout au long de l'essai. À l'état saturé, cette céramique a la capacité de résister à la pénétration de l'air dans les pores (pour l'essai de translation d'axe) ou la désaturation (pour l'essai par plaque tensiométrique). Il existe plusieurs types de pierre poreuse avec les valeurs de pression d'entrée d'air différentes (50 kPa, 100 kPa...). Ces valeurs qui dépendent de la taille des capillaires (pores) peuvent être calculées par la loi de Jurin.

La saturation de la pierre poreuse est une étape importante dans la procédure expérimentale : il faut s'assurer qu'il n'y a pas de bulles d'air coincées dans le réseau poral de la céramique et que la phase fluide (eau) soit continue.

Il existe différentes techniques pour saturer une céramique à haute pression d'entrée d'air. Dans notre cas, nous avons adopté la procédure suivante. Après séchage de la pierre poreuse, celle-ci est trempée dans l'eau désaérée pendant 1 jour. Ensuite, l'eau désaérée est injectée sous faible pression au travers de la céramique. La circulation de l'eau se fait dans un sens (de bas vers le haut) pour faire sortir les bulles d'air du réseau poral. La pression d'eau appliquée est de 5 à 10 kPa pour éviter le décollage de la pierre poreuse de l'embase de la cellule. Un contrôleur de pression – volume de type GDS (Global Digital System) est utilisé. Le débit d'eau est mesuré et enregistré en continu. Lorsque celui-ci devient stable, la saturation est considérée comme

effective. Le temps nécessaire pour saturer une pierre poreuse de 100 kPa de pression d'entrée d'air est environ 4h (sous 5 kPa de pression d'eau appliquée).

- **Contrôle par plaque tensiométrique**

Le principe du contrôle de la succion par plaque tensiométrique est présenté Figure IV-1. Cette technique repose sur l'application d'une pression d'eau négative dans la pierre poreuse et dans l'échantillon quand la pression d'air au sein de l'échantillon de sol reste égale à pression atmosphérique. Pour générer une pression d'eau négative, il est possible d'utiliser la gravité : la base inférieure de la pierre poreuse sur laquelle repose l'échantillon de sol est connectée à un récipient placé à un niveau inférieur par le biais d'un tube saturé en eau désaérée. La pression d'eau négative imposée correspond en valeur absolue à la pression exercée par une colonne d'eau dont la hauteur est égale à la différence du niveau d'eau dans le récipient et la surface de la pierre poreuse. Il faut noter que la saturation du tube doit être maintenue au cours de l'essai (la phase fluide doit être continue). De même, il est important d'empêcher les échanges d'eau sous forme de vapeur entre l'échantillon de sol et le volume d'air ambiant. Pour cela, l'échantillon de sol est placé dans une cellule qui permet de limiter ces échanges. Cette méthode est souvent utilisée pour imposer les faibles succions (0 à 30 kPa). L'équilibre de succion est considéré comme atteint quand le niveau d'eau dans le récipient ne varie plus. L'échantillon est alors récupéré pour mesurer le degré de saturation à la fin d'essai. Le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre dépend du type de sol et du volume de l'échantillon.

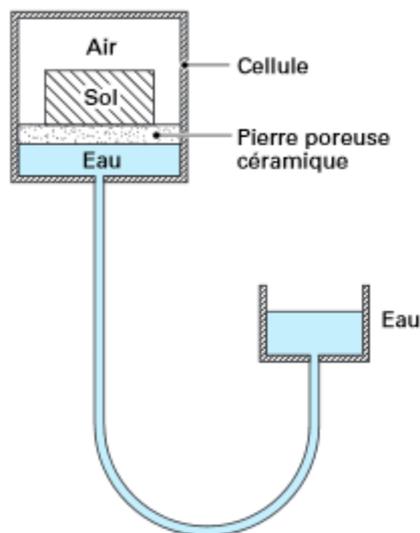


Figure IV-1 Principe de la plaque tensiométrique (DELAGÉ & CUI, 2000)

Pour atteindre une valeur de succion plus élevée, Delage et Cui (DELAGÉ & CUI, 2000) ont proposé un système avec une pompe à vide (Figure IV-2). Cette technique permet d'imposer une succion maximale de l'ordre de 80 kPa à partir de laquelle apparaissent les phénomènes de cavitation.

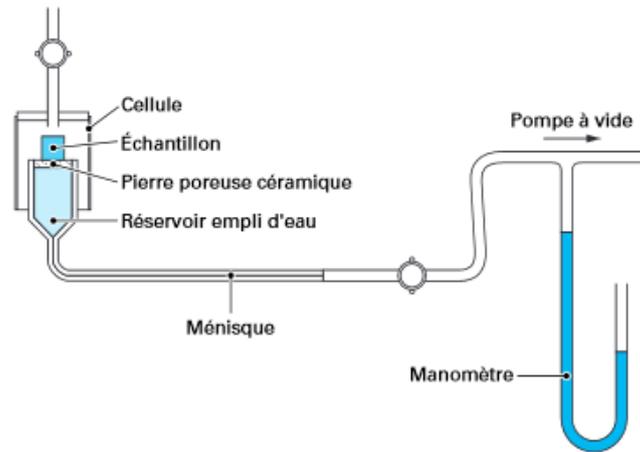


Figure IV-2 Principe de la plaque tensiométrique à l'aide d'une pompe à vide (DELAGÉ & CUI, 2000)

- **Contrôle par "translation d'axes"**

La Figure IV-3 présente la technique de translation d'axe utilisant une cellule de Richards. Le principe de cette méthode est de créer mécaniquement une différence de pression entre l'eau et l'air contenus dans les pores du matériau. Contrairement à la méthode de contrôle par plaque tensiométrique, la pression d'eau est ici gardée constante et égale à la pression atmosphérique alors que la pression d'air imposée dans les pores de l'échantillon est positive. Cette pression d'air doit rester inférieure à la capacité d'entrée d'air de la pierre poreuse sinon l'air va pénétrer dans la pierre poreuse et causer une discontinuité de la phase fluide. La succion maximale pouvant être appliquée à l'aide de cette méthode est fonction de la pression d'entrée d'air de la céramique et des capacités du dispositif de pressurisation de l'air. Généralement, cette méthode permet d'atteindre des succions de l'ordre de 1.5 MPa.

Notons que cette technique présente certaines limites (BAKER & FRYDMAN, 2009). En particulier, certains praticiens reprochent à cette méthode de ne pas reproduire les conditions naturelles de l'état hydrique d'un sol partiellement saturé pour lequel la pression d'air est égale à la pression atmosphérique et la pression d'eau est négative.

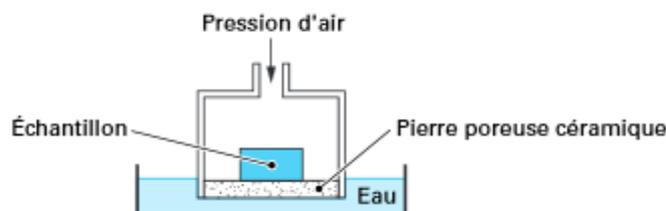


Figure IV-3 Cellule de Richards pour le contrôle de succion par translation d'axe (DELAGÉ & CUI, 2000)

IV.2.1.b Technique de contrôle osmotique

La technique osmotique utilisée pour contrôler la succion dans les sols s'inspire de techniques utilisées dans le domaine de la biologie. Elle nécessite l'utilisation d'une membrane semi-

perméable qui laisse passer les molécules d'eau mais pas les molécules de plus grandes tailles, en l'occurrence des molécules de Poly-Ethylène Glycol (PEG) avec une masse molaire M pouvant aller de 1000 à 20000 g/mol.

Le principe de la méthode consiste à envelopper un échantillon de sol dans une membrane semi-perméable (l'échantillon est toujours en contact avec la membrane) puis de l'immerger dans une solution aqueuse de PEG. Un échange d'eau entre l'échantillon et la solution de PEG va s'établir jusqu'à l'équilibre osmotique. La succion osmotique à l'origine du mouvement des particules d'eau au travers de la membrane augmentera avec la concentration en PEG de la solution.

La Figure IV-4 tirée des travaux de Delage et Cui (DELAGE & CUI, 2000) représente les résultats d'essais réalisés par plusieurs auteurs sur différentes solutions de PEG (Masse molaire de PEG variant de 1500 à 20000 g/mol). Il apparaît une relation quasi-linéaire entre la racine carrée de la succion et la concentration massique de PEG pour des succions allant jusqu'à 9 MPa, quelle que soit la masse molaire de la solution de PEG utilisée.

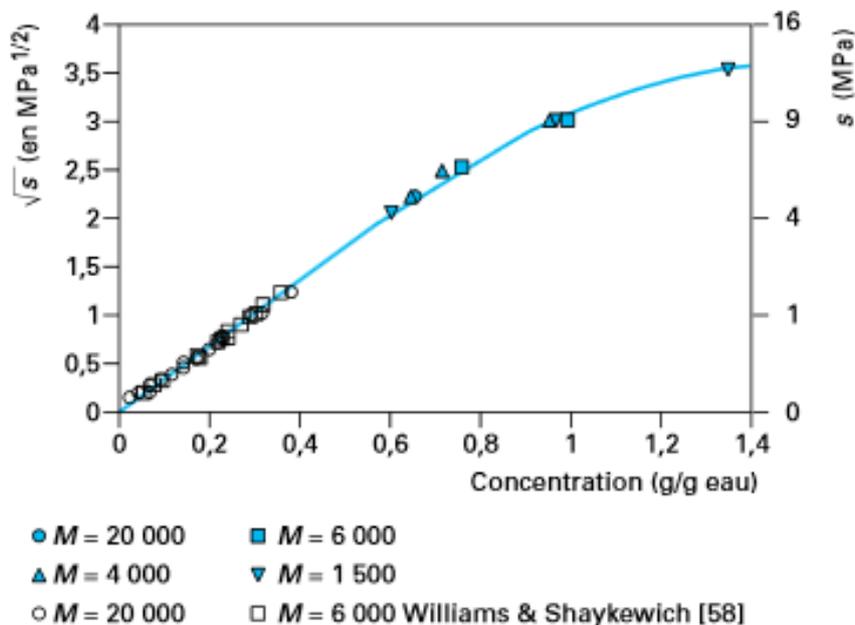


Figure IV-4 Technique osmotique : relation entre succion et concentration de PEG (DELAGE & CUI, 2000)

La mise en œuvre de la technique osmotique pour la détermination de la rétention d'eau se fait suivant le principe de la Figure IV-5. L'échantillon du sol est placé dans une membrane semi-perméable. Dans le cas de nos essais, l'échantillon a une forme cylindrique et pour assurer le contact entre le sol et la membrane, des élastiques sont placés autour de l'échantillon. Pour les échantillons plus petits, il est possible de mettre plusieurs échantillons dans une membrane à condition que le contact sol-membrane soit assuré.

L'échantillon placé dans la membrane est ensuite immergé dans une solution de PEG et le processus d'échange d'eau entre le sol et la solution PEG commence. Le temps nécessaire pour l'équilibre de succion dépend des paramètres tels que : la concentration de PEG, le volume de l'échantillon, le type de sol.

Il faut noter d'une part que le volume de la solution de PEG doit être suffisamment important pour que la concentration de la solution ne varie pas au cours de l'essai en raison des transferts d'eau de la solution vers l'échantillon, ou vice-versa. D'autre part, l'homogénéité de la solution doit être assurée tout au long de l'essai. Ainsi la solution doit être agitée régulièrement pour éviter toute déposition des molécules de PEG au cours du temps.

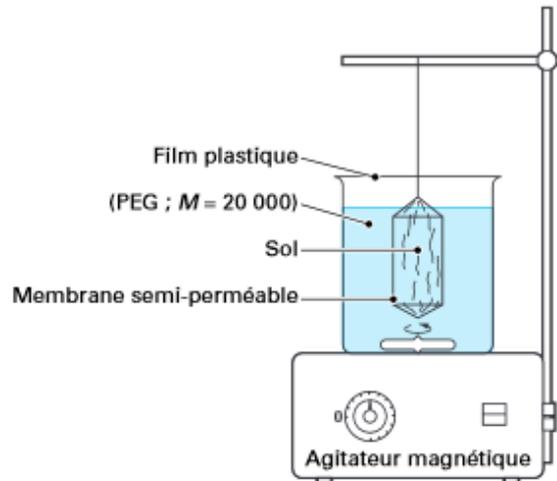


Figure IV-5 Mise en œuvre de la technique osmotique (DELAGE & CUI, 2000)

La Figure IV-6 présente les résultats d'essais de calibration d'une solution PEG 20000 réalisés par Indarto (Indarto, 1991) comparé avec les résultats de la littérature : une courbe unique a été trouvée, qui montre la relation entre la succion et la concentration de PEG. Indarto a aussi présenté une cellule osmotique où l'échantillon est placé dans une bague fermée et séparée avec la PEG par une membrane de dialyse.

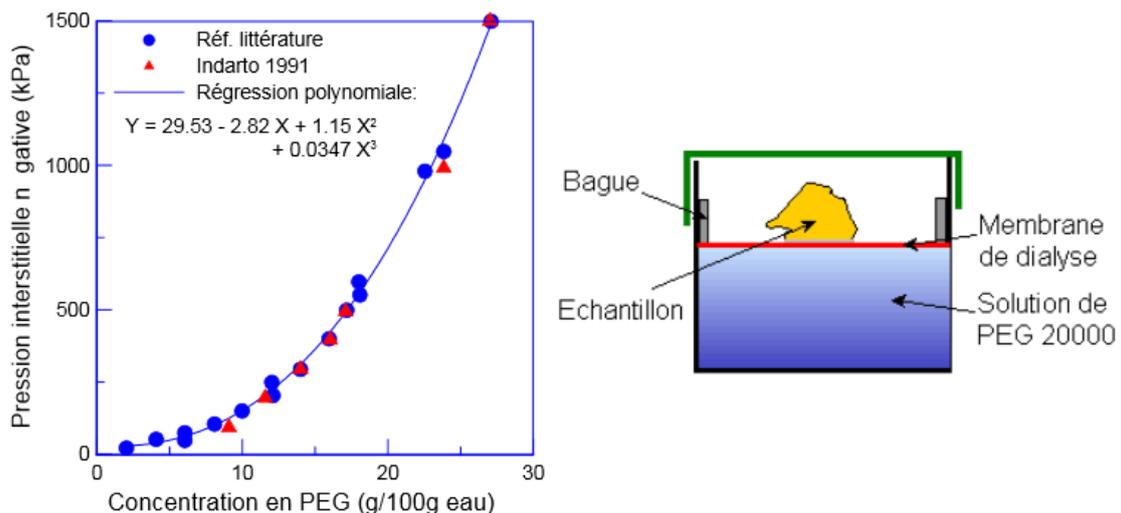


Figure IV-6 Courbe d'étalonnage du polyéthylène-glycol 20000 et schéma de principe d'une cellule osmotique (INDARTO, 1991).

IV.2.1.c Technique de contrôle par phase vapeur

La technique de contrôle de succion par phase vapeur est basée sur la loi de Kelvin. Selon cette loi, il existe une relation entre la succion du sol et l'humidité relative de l'air. La Figure IV-7

représente le dispositif d'un essai de contrôle de la succion par phase vapeur. Pour gérer l'humidité relative, une solution saturée de sel est stockée au fond du dessiccateur, la température de la solution doit rester à 20° C au cours de l'essai. L'échantillon du sol est placé dans le dessiccateur, sans contact avec la solution de sel et l'étanchéité du dessiccateur doit être assurée. L'échange de l'eau entre le sol et l'air (dans le dessiccateur) a lieu jusqu'à l'équilibre de succion. Cette technique permet d'atteindre des succions très élevées de plus de 300 MPa. La valeur de succion dépend de l'humidité relative fonction du type de sel utilisé. Le Tableau IV-1 donne les succions et humidités relatives correspondantes pour plusieurs types de sels (DELAGÉ & CUI, 2000).

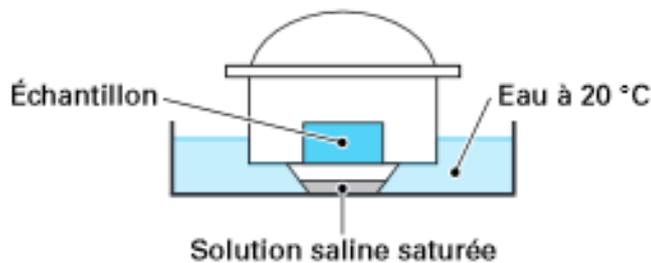


Figure IV-7 Contrôle de succion par phase vapeur, à l'aide d'un dessiccateur et d'une solution saline saturée (DELAGÉ & CUI, 2000)

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

Tableau IV-1 Relation humidité relative-succion-nature du sel (en solution aqueuse saturée) (DELAGÉ & CUI, 2000)

Le plus grand inconvénient de cette méthode est que l'échange de l'eau par phase vapeur est assez lent, il peut prendre plusieurs mois, selon la nature du sol et la taille de l'échantillon. Pour réduire le temps d'équilibrage, on peut réduire la taille de l'échantillon utilisée.

IV.2.1.d Les corrélations

Sur la base d'un nombre assez conséquent de travaux expérimentaux traitant des propriétés de rétention d'eau des sols, plusieurs auteurs ont proposé des corrélations reliant certaines caractéristiques de la courbe de rétention d'un sol à ses paramètres intrinsèques. Ces auteurs distinguent généralement le cas des pâtes (matériaux normalement consolidés) de celui des sols compactés (matériaux surconsolidés).

- **Pour les sols sous forme de pâte**

En 1975 Biarez et Favre, cité par Fleureau (FLEUREAU, et al., 2002)) ont proposé une corrélation qui fournit une estimation du chemin de drainage dans le plan ($e, \log(s)$) à partir des limites de liquidité et de plasticité du sol. Cette corrélation relie ces deux teneurs en eau caractéristiques du matériau à deux valeurs de succion déduites des observations expérimentales telles que :

$$\begin{aligned}w &= w_L \text{ ou } e = (\gamma_s \gamma_w) w_L \quad \text{pour } s = 7 \text{ kPa} \\w &= w_P \text{ ou } e = (\gamma_s \gamma_w) w_P \quad \text{pour } s = 1000 \text{ kPa}\end{aligned}$$

Les essais de drainage de Fleureau (FLEUREAU & KHEIRBEK-SAOUD, 2002) représentés Figure IV-8 ont confirmé la pertinence de cette corrélation sur le chemin de drainage de 9 sols de natures différentes présentant des limites de liquidité w_L variant entre 27 % et 160 %.

Toujours pour les pâtes, Fleureau (FLEUREAU, 2011) a proposé une corrélation (Figure IV-9) qui donne pour les chemins de drainage la variation de l'indice des vides ($e_L - e_{SL}$) du matériau entre sa limite de liquidité et sa limite de retrait en fonction de la limite de liquidité du matériau:

$$(e_L - e_{SL}) = 0.024w_L - 0.40; (r^2 = 0.96)$$

- **Pour les sols compactés**

Dans le cas des sols compactés, Fleureau (FLEUREAU, et al., 2002) a proposé des corrélations qui donnent la pente C_{ms} (respectivement la pente D_{ms}) des chemins d'humidifications dans le plan ($e, \log(s)$) (respectivement dans le plan ($w, \log(s)$)) en fonction de la limite de liquidité du matériau. Fleureau distingue le cas des matériaux compactés à l'Optimum Proctor Normal (OPN) de ceux compactés à l'Optimum Proctor Modifié (OPM).

Pour le chemin d'humidification à partir de l'Optimum Proctor Normal, Fleureau propose :

$$\begin{aligned}C_{ms} &= \frac{-\Delta e}{\Delta[\log(u_c)]} = 0.029 - 0.0018w_L + 5 \times 10^{-6}w_L^2; r^2 = 0.97 \\D_{ms} &= \frac{-\Delta w}{\Delta[\log(u_c)]} = -0.54 - 0.030w_L + 3.3 \times 10^{-6}w_L^2; r^2 = 0.85\end{aligned}$$

Pour le chemin d'humidification à partir de l'Optimum Proctor Modifié, Fleureau propose :

$$\begin{aligned}C_{ms} &= \frac{-\Delta e}{\Delta[\log(u_c)]} = +0.004 - 0.0019w_L; r^2 = 0.74 \\D_{ms} &= \frac{-\Delta w}{\Delta[\log(u_c)]} = -1.46 - 0.051w_L; r^2 = 0.40\end{aligned}$$

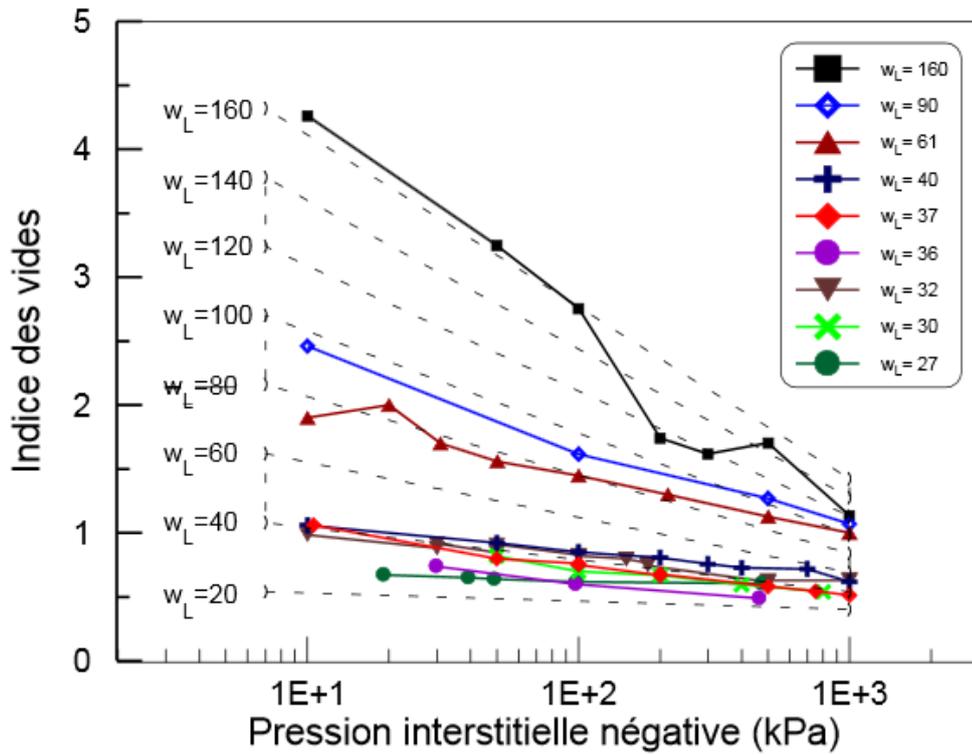


Figure IV-8 Représentation des chemins de drainage des matériaux saturés sur le diagramme de compressibilité déduit des corrélations en fonction de la limite de liquidité. (FLEUREAU & KHEIRBEK-SAOUD, 2002)

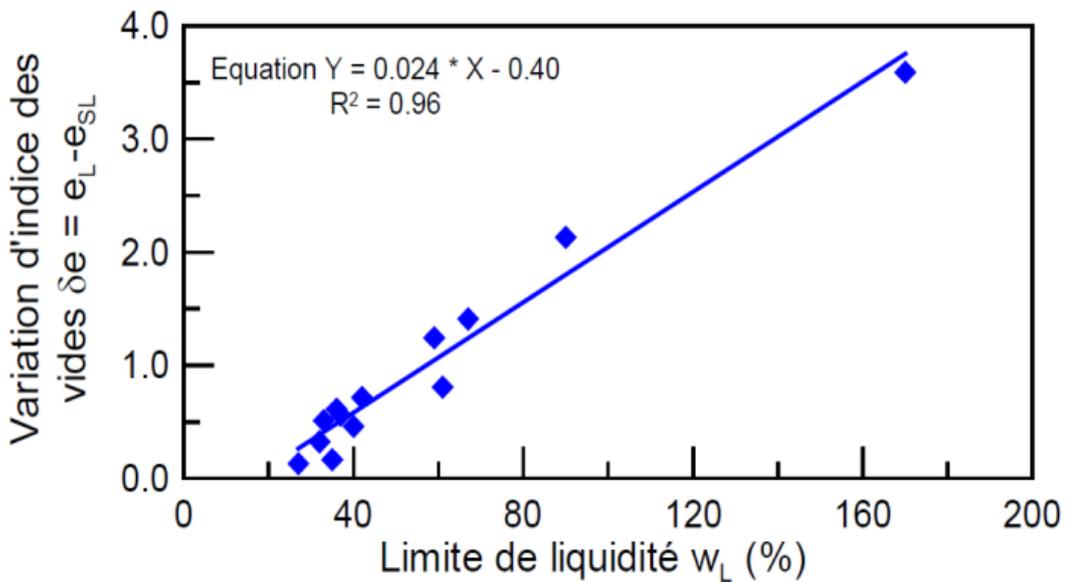


Figure IV-9 Variation d'indice des vides $e_L - e_{SL}$ en fonction de limite de liquidité w_L par Fleureau (FLEUREAU, 2011), cité par Li (LI, 2015)

IV.2.2 Préparation des échantillons de sol

IV.2.2.a Les différentes étapes de l'essai

Nos essais de rétention d'eau comprennent différentes étapes qui sont détaillées ci-après :

- **Pour les essais de drainage :**
 - La fabrication de l'échantillon de sol à tester : soit l'échantillon est fabriqué à l'état de sa teneur en eau égale à la limite de liquidité, soit l'échantillon est fabriqué par compactage manuel dans le moule CBR. La teneur en eau de préparation des échantillons et l'énergie de compactage imposée varieront au cours de nos essais.
 - La saturation du matériau : dans le cas des échantillons de sol compactés, ceux-ci sont taillés, placés dans une bague oedométrique, puis saturés à l'intérieur d'une cellule oedométrique par immersion durant 2 semaines. Durant cette procédure de saturation, les variations de volume de l'échantillon (gonflement) sont empêchées. A noter que dans le cas de la pâte préparée à une teneur en eau proche de la limite de liquidité, celle-ci est considérée comme saturée.
 - La préparation des solutions osmotiques et des solutions salines.
 - La préparation des petits échantillons de sol à tester : dans le cas de la pâte, celle-ci est mise en place à la spatule dans des bagues PVC (cf paragraphe IV.2.2.b). Ces bagues permettent de maintenir l'échantillon en place. Dans le cas du matériau compacté, les petits échantillons de sol à tester sont taillés dans les échantillons de plus grande taille saturés en cellule oedométrique. Ces petits échantillons de quelques cm³ sont ensuite placés dans les solutions osmotiques, ou à l'intérieur d'un dessiccateur, ou bien encore sur le système de plaque tensiométrique.
 - Le respect d'une durée suffisante permettant l'obtention de l'équilibre des échanges hydriques entre le matériau et le milieu environnant (durée comprise entre 6 et 8 semaines selon le type d'essais).
 - La mesure finale de la teneur en eau, du volume et du degré de saturation des échantillons.

- **Pour les essais d'imbibition :**
 - La fabrication de matériau à différents niveaux d'énergie de compactage dans le moule CBR.
 - La taille des petits échantillons à tester puis leur séchage pendant 24 h ou 48 h dans une étuve à la température de 105° jusqu'à l'absence de variation de leur masse.
 - La préparation des solutions osmotique et dessiccateur.
 - La mise en place des échantillons séchés dans les solutions osmotiques ou dessiccateur.
 - Le respect d'une durée suffisante permettant l'obtention de l'équilibre des échanges hydriques entre le matériau et le milieu environnant (durée comprise entre 6 et 8 semaines selon le type d'essais).
 - La mesure finale de la teneur en eau, du volume et du degré de saturation des échantillons.

IV.2.2.b Méthodes de fabrication des échantillons :

Lors de nos essais de rétention d'eau, le sable limoneux de Gavet passant à 2 mm a été étudiés sous deux états : un état de pâte et un état compacté. Pour l'état compacté, plusieurs niveaux d'énergie de compactage ont été appliquées.

- **Pour le matériau à l'état de pâte :**

Le sable limoneux est dans un premier temps séché dans l'étuve à 105°C, puis mélangé avec une quantité d'eau déminéralisée calculée pour avoir une teneur en eau finale proche de la limite de liquidité de 29 %. Le mélange est effectué par un malaxeur électronique à 400 cycles/minute pendant 10 minutes pour 1 kg de sable sec. Une fois malaxé, le matériau est à l'état de pâte liquide.

On a fabriqué plusieurs bagues en plastique (PVC), de même taille soit de 44 mm de hauteur et de 9.5 mm de diamètre (volume = 14438 mm³) (Figure IV-10). On remplit la bague soigneusement avec la pâte et un couteau mince. On n'appuie pas sur la pâte pour éviter de créer une pression de pré-consolidation. Quand la bague est remplie, on l'arase par une règle en métal. Cette bague permet de maintenir l'échantillon à l'état « liquide » en place. Dans le cas des essais à la plaque tensiométrique, cette bague nous aide aussi à mesurer le volume de l'échantillon en fin d'essai. Elle permet ainsi d'évaluer le volume de retrait de l'échantillon au cours de l'essai.

L'eau utilisée pendant la fabrication est de l'eau déminéralisée à laquelle nous avons ajoutée quelques gouttes de pénicilline (pour 1 litre d'eau on ajoute 6 ml de pénicilline, soit une concentration de 0.2 g/l) pour empêcher la prolifération des bactéries au sein des échantillons durant les 6 à 8 semaines d'essais.

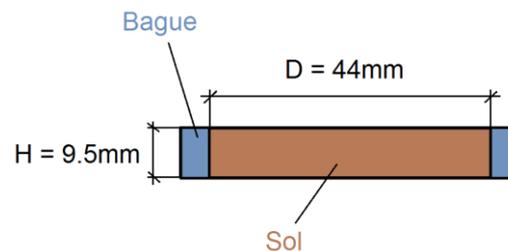


Figure IV-10 La bague utilisée pour l'essai sur la pâte

- **Pour le matériau compacté à 25, 55, 85 coups/couche :**

Les échantillons sont compactés à l'intérieur d'un moule CBR selon la même procédure Proctor que celle utilisée lors des essais triaxiaux et œdométriques présentés au chapitre II. Différentes teneurs en eau initiales et énergies de compactage ont été considérées. Après compactage, l'échantillon de Proctor est sorti du moule, filmé et gardé dans une salle climatisée pendant 24 heures pour homogénéisation de la teneur en eau.

Pour les essais de drainage, après 24 heures d'homogénéisation, l'échantillon est posé sur un disque rotatif de 71.6 mm de diamètre et taillé soigneusement par une scie à fil. Les chutes de matériau restant après la taille sont utilisées pour calculer la teneur en eau initiale. L'échantillon

taillé (diamètre : 71.6 mm, hauteur 20 mm) est ensuite placée dans une bague œdométrique avec deux papiers filtres en bas et en haut, plus une bande de papier filtre autour pour accélérer la saturation. On bloque l'échantillon par le système œdométrique pour éviter le gonflement au cours de la saturation. L'échantillon est ensuite immergé dans l'eau déminéralisée pendant deux semaines (Figure IV-11.).

Après la phase de saturation, l'échantillon est sorti de la cellule œdométrique. Il est ensuite découpé soigneusement à l'aide d'un couteau en plusieurs petits échantillons de quelques cm³ (masses comprise entre 15 et 20 grammes), d'épaisseurs de l'ordre de 6 à 8 mm, et dont la surface doit être plane pour améliorer et accélérer l'absorption d'eau. Ces échantillons sont ensuite enveloppés dans les membranes semi-perméables puis immergés dans les solutions osmotiques, ou bien directement placés au sein des dessiccateurs.

Dans le cas des essais d'imbibition, les petits échantillons de quelques cm³ sont taillés après le compactage Proctor puis séchés à l'étuve à 105°C jusqu'à obtenir une masse constante avant d'être placés en solution osmotique ou dessiccateur.

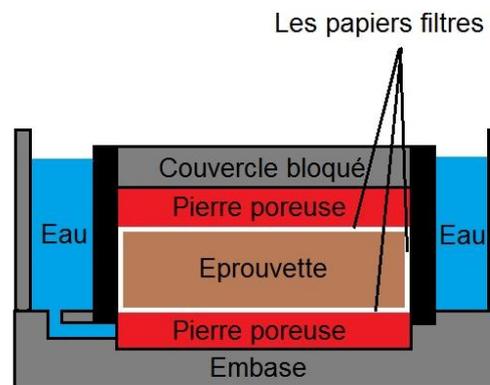


Figure IV-11 Principe de saturation de l'éprouvette dans la cellule œdométrique

Matériaux	Etat du matériau testé	W _{massique} (%)	E _{compactage} (kNm/m ³)
Sable limoneux Livet-Gavet passant à 2 mm	Pâte	29	0
	Compacté à 25 coups/couche à l'Optimum Proctor	11.9	271
	Compacté à 55 coups/couche à l'Optimum Proctor	11.2	597
	Compacté à 85 coups/couche à l'Optimum Proctor	10.7	922

Tableau IV-2 Teneurs en eau de préparation et énergies de compactage des échantillons de sable limoneux de Gavet soumis à l'essai de rétention d'eau

IV.2.3 Les différentes procédures d'essais

Pour nos campagnes d'essais, nous avons choisi les méthodes de contrôle de la succion suivantes :

- Pour la pâte, à faible succion (de 0 à 30 kPa), la méthode de la plaque tensiométrique a été utilisée. De 80 kPa à 5 MPa de succion on utilise la méthode osmotique et pour les valeurs de succion supérieures à 5 MPa, la méthode par échange de phase vapeur (solutions salines) a été utilisée.
- Pour le matériau compacté, seule la méthode osmotique a été employée pour les valeurs de succion inférieures à 5 MPa alors que la méthode par échange de phase vapeur a été utilisée pour les succions supérieures à 5 MPa.

IV.2.3.a Système de plaque tensiométrique :

- *Le dispositif d'essai*

Le principe de cette méthode est de créer une pression négative d'eau dans la céramique et l'échantillon par le contrôle de la hauteur d'une colonne d'eau négative sous gravité.

Le dispositif expérimental est décrit sur la Figure IV-12.

Une pierre poreuse en céramique, à 100 kPa de pression d'entrée d'air a été collée dans un moule cylindrique. La colle assure l'étanchéité entre les parois du moule et la céramique. Pour saturer la céramique, on trempe le moule avec la céramique dans l'eau pendant 24 h. La partie en-dessous de la céramique se connecte avec un tube de mesure en polyéthylène.

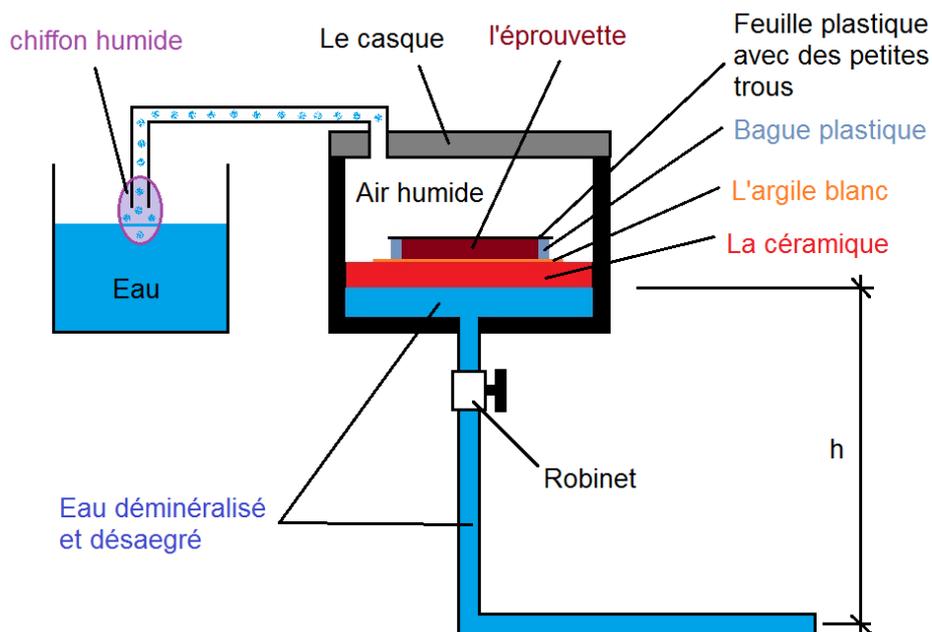


Figure IV-12 Dispositif expérimental d'essai de plaque tensiométrique

Pour que ce dispositif fonctionne, l'eau doit constituer une phase continue (sans bulle d'air) entre l'échantillon, la pierre poreuse en céramique et le tube de mesure. Ainsi de l'eau distillée désaérée fabriquée par agitation sous vide d'air pendant 2 heures est utilisée pour la saturation du dispositif. Pour parfaire la saturation de la céramique, on injecte de l'eau distillée et désaérée dans le tube de mesure à l'aide d'un contrôleur pression – volume (type GDS) sous une pression de 10 kPa pendant 24 heures. Ainsi l'eau traverse la céramique du bas vers le haut en chassant les bulles d'air.

Après saturation de la céramique et pour améliorer le contact et les échanges hydriques entre le sol et la céramique, on place une fine couche de kaolin (argile blanche) sur la céramique avant de poser directement la bague contenant le sol sur la céramique saturée.

Afin d'éviter l'évaporation de l'eau contenu dans l'échantillon par échange avec l'air ambiant, l'échantillon de sol contenu dans la bague est recouvert d'un film plastique avec des petits trous pour éviter de mettre l'air en dépression. Puis on ferme le moule avec un couvercle étanche connecté avec un tube muni à son extrémité d'un tissu humide. Ce dispositif permet de maintenir une humidité relative constante dans le moule.

Après la préparation de l'échantillon et du moule, on fixe le moule et positionne l'extrémité du tube de mesure en bas d'une règle fixée à une hauteur h . La hauteur h du dispositif fixée par le manipulateur permet d'imposer une pression capillaire dans l'échantillon posé sur la céramique. La hauteur maximale est -3 m, correspondant à une succion de 30 kPa. Après la fixation du tube de mesure, on ouvre le robinet pour démarrer l'essai de rétention. Celui-ci sera considéré comme terminé lorsque plus aucune goutte d'eau sort du tube.

- **Mesure des variations volumiques**

A la fin d'essai de rétention, l'échantillon est récupéré soigneusement avec la bague. Nous avons mesuré la hauteur de l'échantillon en cinq points équidistants sur deux diamètres de l'anneau faisant un angle de 90° comme l'indique la Figure IV-13. Pour un échantillon, nous avons donc 9 points de mesure.

Le tassement dû au retrait observé pour chaque essai est relativement faible (< 1 mm). En prenant la valeur moyenne des mesures, on peut calculer approximativement la variation de volume de l'échantillon.

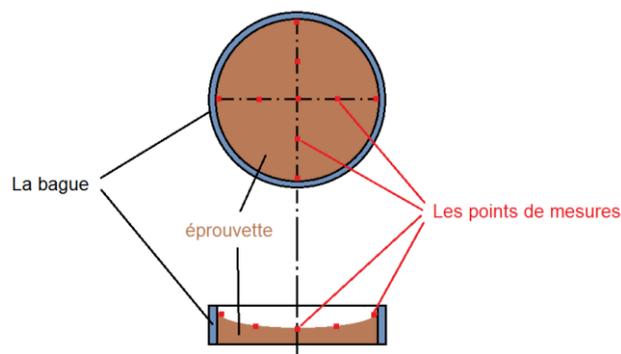


Figure IV-13 Positions des points de mesure des variations de hauteur de l'échantillon

IV.2.3.b La méthode osmotique :

- *Le dispositif de l'essai osmotique*

Le dispositif expérimental utilisé pour nos essais de drainage-humidification par la méthode osmotique est représenté sur la Figure IV-14:

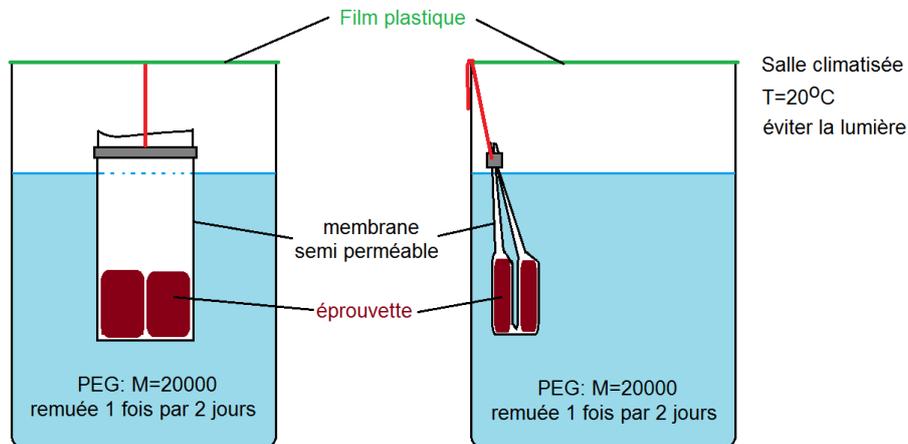


Figure IV-14 Dispositif expérimental de l'essai osmotique à l'ENTPE

Au préalable des essais, il est nécessaire de préparer de 8 à 10 solutions de PEG avec un volume de 1 à 1.5 litre dans des bécards. Chaque solution a une valeur de concentration PEG différente, correspondant à une valeur de succion donnée. Pour éviter l'évaporation de l'eau des solutions, les bécards sont toujours recouverts par un film plastique après préparation. Durant les essais, les solutions sont remuées 1 fois tous les 2 jours pour assurer l'homogénéité des concentrations de PEG.

Après la fabrication des échantillons de sol (cf paragraphe IV.2.2), le rouleau de membrane semi-perméable est découpé en tronçon de 25 cm de longueur. Les échantillons sont placés dans la membrane (de 2 à 4 échantillons par membrane). Les deux extrémités de la membrane sont obturées à l'aide d'une pince d'étanchéité en plastique. Puis la membrane, maintenue par un fil, est trempée dans la solution de PEG.

Les bécards contenant les échantillons de sol immergés dans les solutions de PEG sont conservés dans une salle climatisée à 20°C pendant l'essai. Le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre des échanges hydriques est d'environ 6 semaines.

A la fin de l'essai, les poches contenant les échantillons sont sorties à l'aide d'un fil, la membrane est découpée et les échantillons sont récupérés soigneusement. Pour éviter l'évaporation d'eau, on effectue immédiatement les mesures de teneur en eau et de volume des échantillons à la sortie de la membrane.

Pour chaque palier de succion, on a 2 à 4 échantillons selon l'essai. Un premier échantillon est pesé et séché pour déterminer la teneur en eau finale, les autres échantillons sont paraffinés à l'aide d'une paraffine coulée à 70° C afin de pouvoir mesurer le volume de l'échantillon par pesée hydrostatique.

- ***Les problèmes bactériens et fongiques sur les essais osmotiques :***

Lors des premiers essais de rétention d'eau utilisant la méthode osmotique, nous avons rencontré des problèmes liés au développement de bactéries et champignons à l'intérieur des solutions de PEG. Ainsi, nous avons constaté l'apparition de muqueuses brunes ou blanches formées autour de la membrane et à l'intérieur de l'échantillon après 2 semaines d'essais (Figure IV-15). La solution prend une couleur jaune. Ce phénomène est apparu le plus souvent sur les solutions à faible succion avec faible concentration de PEG. Ces essais n'ont pas été considérés pour la suite de l'analyse.

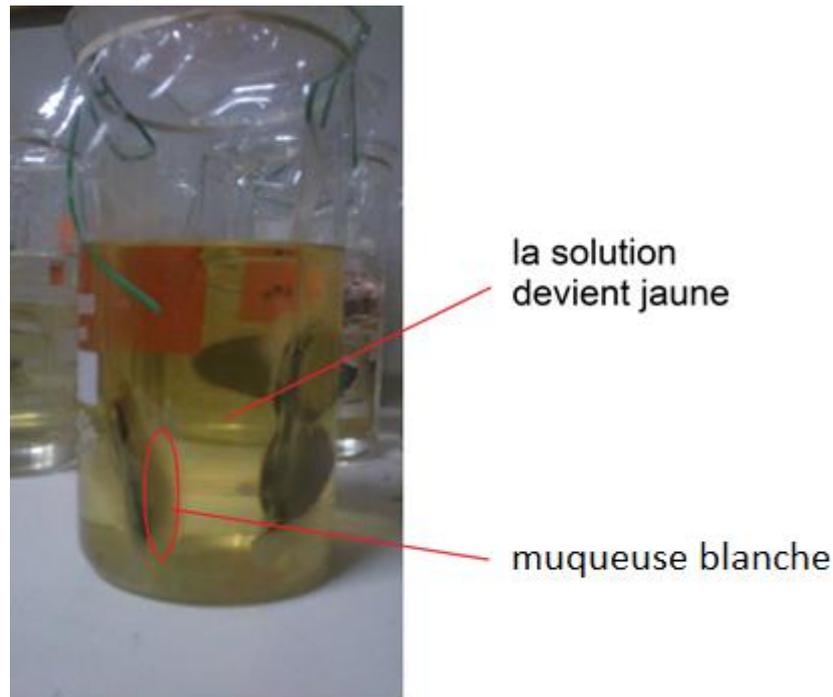


Figure IV-15 Problèmes bactériens dans la solution PEG.

Nous avons réalisé que ce phénomène devait traduire le développement de bactéries ou de champignons, et nous avons essayé plusieurs méthodes pour résoudre ce problème.

Tout d'abord, nous avons essayé d'ajouter de l'eau de javel à faible concentration dans la solution, mais la javel altère la membrane semi-perméable. Par la suite, nous avons essayé de passer les échantillons de sol dans un autoclave à 100° C pour tuer les bactéries, mais cette procédure s'est avérée très chronophage compte tenu du nombre élevé d'échantillons à tester.

La dernière méthode testée consiste à rajouter de la pénicilline dans la solution de PEG pour tuer les bactéries. Cette méthode a été retenue car facile et efficace. La solution de pénicilline a été préparée à la concentration de 0.2 g/l et gardée dans un réfrigérateur. Pour un volume total de 1000 ml de solution de PEG préparée avec de l'eau déminéralisée, on ajoute 6 ml de pénicilline. Par ailleurs, rappelons que l'eau utilisée dans le mélange du sable et la saturation des échantillons est de l'eau déminéralisée.

Après avoir immergé les membranes avec les échantillons dans la solution de PEG, les béchers sont recouverts d'un film plastique et conservés dans une salle climatisée à l'abri de la lumière

afin d'éviter la prolifération des bactéries. Cette procédure nous a permis d'obtenir des solutions de PEG qui restent claires tout au long de la durée des essais ; c'est-à-dire jusqu'à 8 semaines.

IV.2.3.c La méthode par échange de phase vapeur

- ***Dispositif d'essais avec solutions salines saturées***

Pour les valeurs de pression capillaire plus élevées (> 5 MPa), on utilise la technique par échange de phase vapeur pour contrôler la succion. Le dispositif d'essai utilisé lors de notre étude est identique à celui présenté par Fleureau (FLEUREAU & KHEIRBEK-SAOUD, 2002).

Les solutions salines ont été préparées par mélange de sel avec de l'eau déminéralisée. La quantité du sel utilisée est toujours supérieure à la quantité nécessaire pour la saturation afin d'assurer que la solution soit toujours saturée. L'humidité relative d'une solution dépend de la température. Par conséquent en cours d'essais, les solutions salines placées dans les dessiccateurs sont toujours gardées dans une salle climatisée à température constante de 20°C. L'étanchéité des dessiccateurs au niveau de leur couvercle est assurée par une couche de graisse de silicone. Les transferts hydriques se font ici en phase vapeur et sont plus lents qu'avec les méthodes mécaniques ou osmotiques. Dans le cas du sable limoneux de Gavet, le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre des échanges hydrique a été évalué à environ 5 à 6 semaines (cf paragraphe ci-dessous).

Une fois l'équilibre atteint pour une pression capillaire donnée, on mesure la teneur en eau et le volume total de l'échantillon. Comme dans le cas de la méthode osmotique, la mesure du volume des échantillons se fait par paraffinage et pesée hydrostatique. A noter que pour un palier de succion donné, quatre échantillons de sol sont placés dans le dessiccateur : deux servent à la mesure de la teneur en eau, les deux autres sont utilisés pour la mesure du volume réalisé par pesée hydrostatique après paraffinage des échantillons de sol.

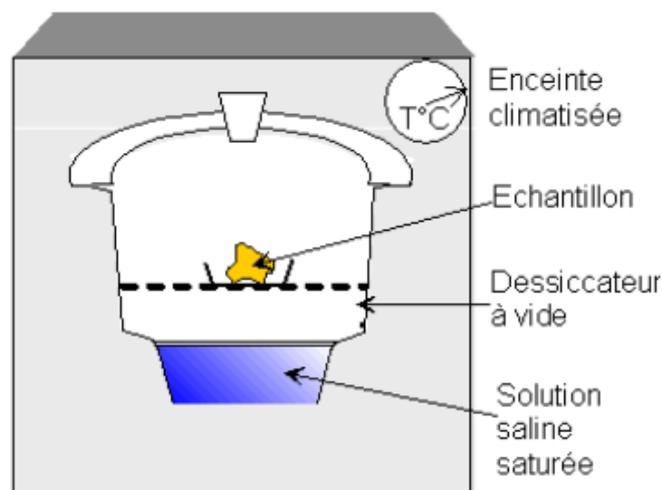


Figure IV-16 Principe du contrôle de la succion dans un échantillon de sol à l'aide de la méthode par échange de phase vapeur (FLEUREAU & KHEIRBEK-SAOUD, 2002)

- ***Détermination du temps d'équilibre des échanges hydriques***

Dans le cas des essais par échange de phase vapeur, nous avons lors d'un essai sur la pâte, mesuré pour chaque solution saline, l'évolution de la masse des échantillons au cours du temps. Ces pesées s'effectuaient une fois par semaine. En observant l'évolution de la masse des échantillons, on peut déterminer le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre pour des échantillons de taille identique. Les Figure IV-17 et Figure IV-18 montrent que pour les différentes solutions salines, la masse des échantillons ne varie que très peu à partir de la 5^{ème} semaine et devient quasi constante à partir de la 6^{ème} semaine, tant sur chemin de drainage que sur chemin d'imbibition. Cette durée de 6 semaines sera considérée suffisante pour atteindre l'équilibre hydrique au sein de nos échantillons et sera retenue pour l'ensemble des essais de rétention par phase vapeur.

A noter que des résultats identiques ont été obtenus avec les échantillons de sol compacté. Dans ce cas, les pesées effectuées au 5^{ème} et 6^{ème} semaine ont montré une faible variation de la masse d'eau dans l'échantillon entre ces deux semaines ; ce qui a permis de considérer également un temps d'équilibre de 6 semaines pour ces échantillons.

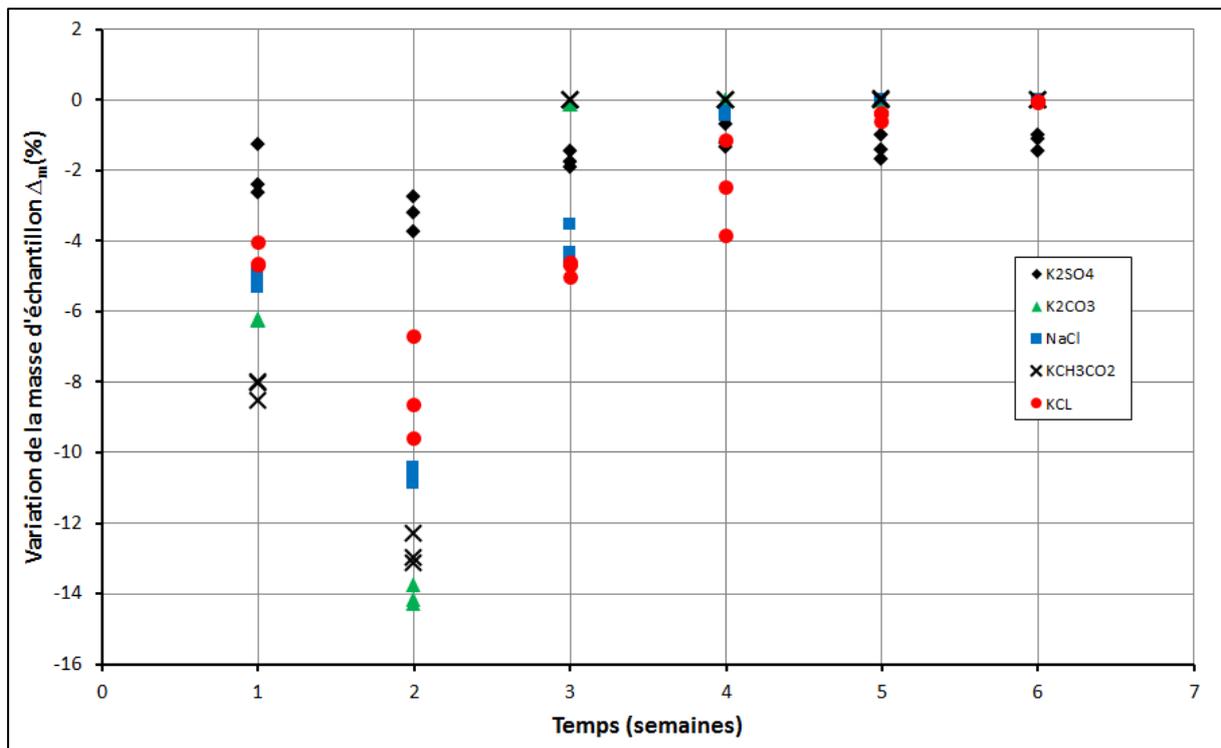


Figure IV-17 Essai drainage sur la pâte : variation de la masse d'eau contenue dans les échantillons au cours du temps

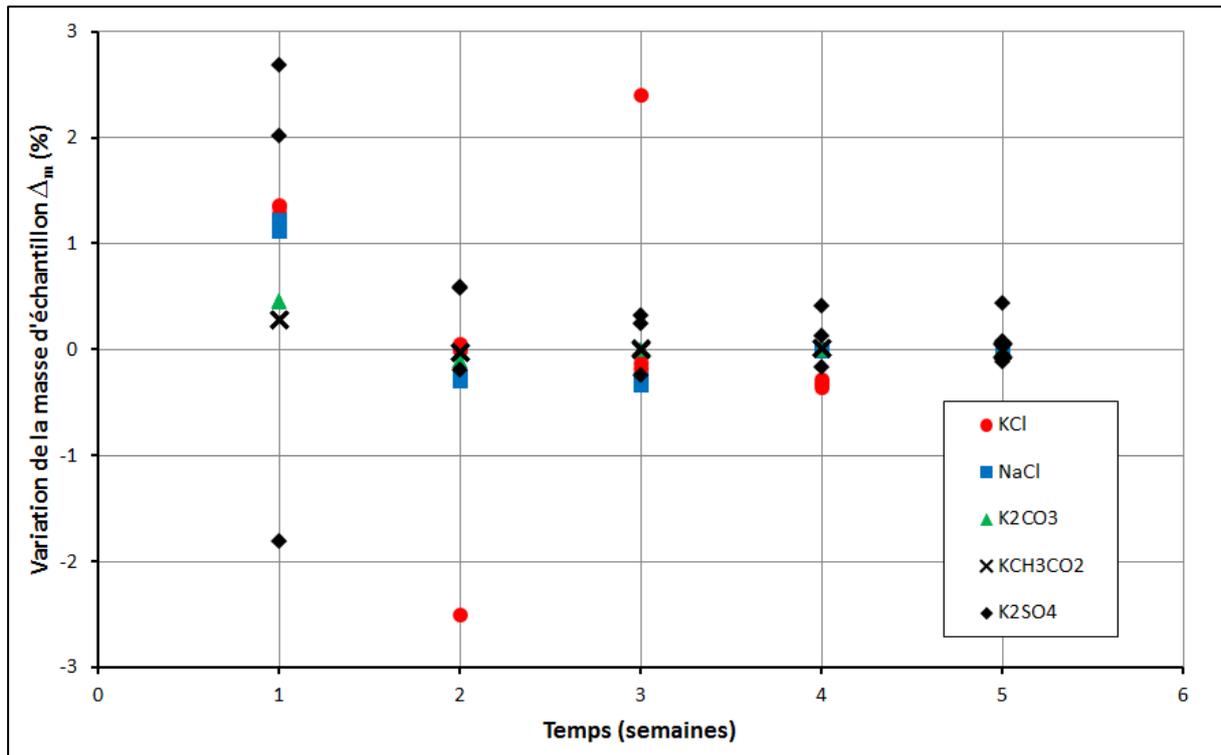


Figure IV-18 Essai d'imbibition sur la pâte : variation de la masse d'eau contenue dans les échantillons au cours du temps

IV.2.4 Programme expérimental

Le Tableau IV-3 présente les principales caractéristiques des différents essais de rétention d'eau réalisés sur le sable limoneux de Gavet dans le cadre de cette thèse. Comme indiqué précédemment, ce matériau a été testé à l'état de pâte (préparation à la teneur en eau égale à la limite de liquidité) et sous forme compacté. Pour le matériau compacté, différentes teneurs en eau de préparation (teneur en eau lors du compactage) et différentes énergies de compactage ont été imposées. La plupart des essais de rétention comprennent un cycle de drainage – imbibition, quelques-uns n'ont été réalisés que sur chemin de drainage faute de temps. Les valeurs de succion imposées lors de ces différents essais sont également rassemblées dans le Tableau IV-3. Enfin notons que des essais de rétention supplémentaires ont été réalisés pour caractériser la partie initiale des courbes de rétention (détermination de la succion d'entrée d'air s_{EA}) et seront présentés au paragraphe IV.6.1 .

Type de matériau	Teneur en eau de fabrication	Indice des vides initial (avant essai de rétention)	Palier de succion imposée en drainage (kPa)	Palier de succion imposée en imbibition (kPa)
Pâte	29.0%	≈ 0.78	54 - 110 - 248 - 688 - 1760 - 2750 - 3960 - 37800 - 137800	248 - 440 - 990 - 1760 - 4200 - 22400 - 37800 - 182100
Compacté OPN-30	11.8%	≈ 0.64	54 - 110 - 248 - 440 - 688 - 990 - 1760 - 2750 - 3960 - 5390 - 22400 - 37800 - 137800 - 182100	10 - 28 - 54 - 110 - 248 - 440 - 990 - 1760 - 2750 - 3960 - 22400 - 37800 - 182100
Compacté OPN	11.2%	≈ 0.54	54 - 110 - 440 - 688 - 990 - 1760 - 4200 - 22400 - 37800 - 137800 - 182100	10 - 28 - 110 - 440 - 1126 - 4200 - 22400 - 37800 - 137800 - 182100
Compacté OPN+30	10.7%	≈ 0.52	54 - 110 - 248 - 440 - 688 - 990 - 1760 - 4200 - 22400 - 37800 - 137800 - 182100	10 - 28 - 54 - 110 - 440 - 688 - 1126 - 4200 - 22400 - 37800 - 137800 - 182100

Tableau IV-3 Caractéristiques des essais de rétention d'eau réalisés sur le sable limoneux de Gavet

IV.3 Analyse des résultats des essais de rétention d'eau

Dans le cas général, un changement de pression d'interstitielle négative dans un échantillon, fait varier en même temps les paramètres tels que : la teneur en eau, l'indice des vides, le degré de saturation.

Une représentation globale proposée par Biarez et Fleureau ((BIAREZ & FAVRE, 1975), (FLEUREAU, et al., 1993) est souvent utilisée pour analyser les essais de rétention d'eau. Cette représentation, qui comprend 5 graphiques comme illustré à la

Figure *IV-20*, représentent les variations de l'indice des vides en fonction de la teneur en eau (e,w), du degré de saturation en fonction de la teneur en eau (Sr,w), de l'indice des vides en fonction de la succion (e,s), du degré de saturation en fonction de la succion (Sr,s), et de la teneur en eau en fonction de la succion (w,s). Cette disposition particulière permet d'identifier simultanément la limite de retrait du sol, w_{SL} , dans le plan (e,w), la succion de retrait s_{SL} et la succion d'entrée d'air s_{EA} en drainage et humidification dans le plan (e,s). Les trois derniers graphiques sont regroupés verticalement et utilisent l'échelle logarithmique en succion.

Les trois plans (e,w), (e,s), et (w,s) permettent de reconstruire éventuellement l'espace tridimensionnel (e,w,s) et d'identifier la surface de rétention du comportement hydrodynamique.

IV.3.1 Essai de drainage-imbibition sur la pâte ($w = w_l$)

La Figure IV-19 présente les résultats des essais de drainage (rouge) et imbibition (bleu) réalisés sur le sable limoneux de Gavet à l'état de pâte. Sur cette figure, nous avons par ailleurs reporté les résultats d'un essai de chargement œdométrique (vert) (cf paragraphe II.3) et d'un essai de consolidation isotrope (marron) (cf paragraphe II.4) réalisés sur cette même pâte. A noter que pour ces deux essais, l'axe des abscisses de la Figure IV-19 correspond à la contrainte verticale effective (σ'_v) pour l'essai œdométrique, et à la pression effective de consolidation (p') pour l'essai de consolidation isotrope.

La Figure IV-19 montre que les courbes de drainage et d'imbibition du sable limoneux à l'état de pâte sont constituées de deux portions de droite de pentes distinctes dans le plan (e, s). Pour les faibles niveaux de succion (inférieurs à 2 MPa), le drainage [resp. l'imbibition] du matériau entraîne un retrait [resp. un gonflement] du matériau. Au-delà de ce niveau de succion (2MPa), le cycle de drainage – imbibition s'effectue sans variation de volume du matériau ; ce qui caractérise le dépassement de la limite de retrait.

En comparant avec les résultats de l'essai œdométrique et de l'essai de consolidation isotrope (CI) du sol saturé, il apparaît que la ligne de drainage présente une pente ($C_m = 0.094$) dans le plan ($e, \log(s)$) assez proche des pentes de la ligne de compression œdométrique ($C_c = 0.083$) et de la ligne de consolidation isotrope ($C_{CI}=0.12$) ; ceci malgré des indices des vides initiaux différents pour ces trois essais (valeurs comprises entre 0.61 et 0.89).

Ce résultat tend à confirmer que le chemin de drainage ou de séchage d'un sol à l'état non saturé est parallèle aux chemins œdométrique et de consolidation isotrope à l'état saturé, avec des déformations plastiques irréversibles. Dans le cas du sable limoneux de Gavet, au-delà de 2 MPa de succion, les chemins de drainage et d'imbibition deviennent réversibles, indiquant un comportement élastique. Ces résultats nous suggèrent une équivalence entre la succion dans le sol et la contrainte mécanique appliquée à l'état saturé ou quasi-saturé.

Nous avons par ailleurs reporté sur la Figure IV-19 les résultats donnés par la corrélation de Biarez et Favre (BIAREZ & FAVRE, 1975) (cf paragraphe IV.2.1.d). On observe une bonne concordance entre la première phase de drainage avec cette corrélation. La pente de première phase de drainage C_m est presque la même que celle de la corrélation ($C_m = 0.094$, $C = 0.096$), avec un faible décalage de $\Delta e \sim 0.05$. La ligne de corrélation se trouve au-dessus de la ligne de drainage.

Par ailleurs, la corrélation de Fleureau (FLEUREAU, 2011) qui donnent la variation de l'indice des vides sur chemin de drainage à partir de la limite de liquidité du matériau est également en bon accord avec les résultats expérimentaux obtenus sur le sable limoneux à l'état de pâte, comme l'attestent les résultats présentés Tableau IV-4.

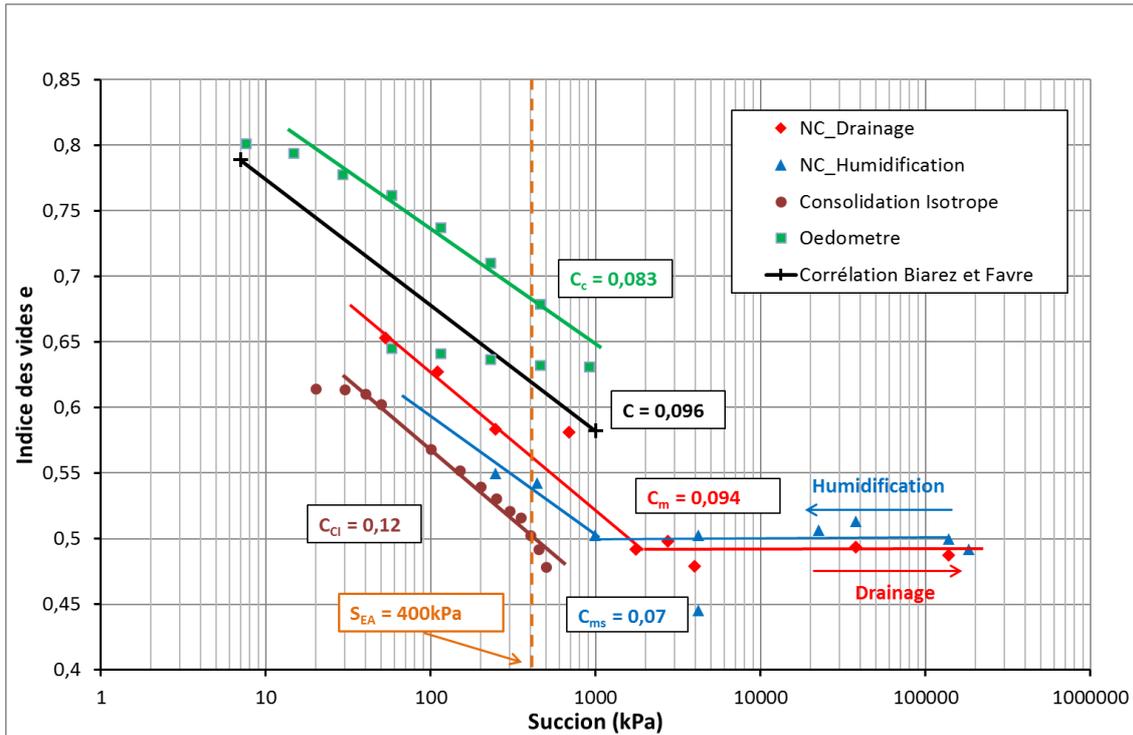


Figure IV-19 Essais de drainage du sable limoneux Livet-Gavet passant à 2 mm à état de pâte : évolution de l'indice des vides en fonction de la succion.

$w_L(\%)$	e_L	e_{SL}	Δe (essai de drainage)	Δe (Corrélation Fleureau, 2011)
29	0.79	0.5	0.29	0.32

Tableau IV-4 Variation d'indice des vides mesurée expérimentalement et donnée par la corrélation de Fleureau (2011)

Afin de déterminer les valeurs de la limite de retrait w_{SL} , de la succion de retrait s_{SL} , de la succion d'entrée d'air s_{EA} en drainage et $s_{EAresat}$ en resaturation qui sont des paramètres caractéristiques de rétention d'eau des sols non saturés, les résultats de l'essai de rétention sur pâte sont donnés **Figure IV-20** dans la représentation de Biarez et Fleureau (BIAREZ & FAVRE, 1975), (FLEUREAU, et al., 1993)).

Sur la **Figure IV-20a**, l'indice des vides en fonction de la teneur en eau ou plan (e, w), permet l'identification de la limite de retrait du sol w_{SL} . Le drainage en rouge fait diminuer très rapidement e (contractance) pour arriver à une asymptote horizontale. Inversement, l'humidification en bleue fait augmenter e (gonflement) à partir de cette asymptote. La ligne de saturation d'équation $e = w \cdot \gamma_s / \gamma_w$, notée LDS, est superposée en ligne bleue continue avec les résultats des mesures. L'intersection de cette ligne LDS avec l'asymptote horizontale des mesures donne la limite de retrait du sol, w_{SL} , à environ 18 %. w_{SL} est logiquement plus faible que la limite de plasticité ($w_p = 21.4 \%$) et la limite de liquidité ($w_L = 29 \%$). Le plan (e, w) contient la courbe de retrait du sol.

La **Figure IV-20b** donne l'évolution de l'indice des vides en fonction du logarithme de la succion ($e, \log(s)$). Cette représentation est à utiliser conjointement avec la figure précédente. La réduction très rapide de e en drainage se traduit par une décroissance linéaire avec $\log(s)$ pour arriver aussi à un palier horizontal. L'intersection de ces deux lignes donne la succion de retrait s_{SL} égale à 2 MPa et correspondant à une stabilisation de l'indice des vides. L'humidification à partir de 150 MPa indique une quasi-réversibilité entre le drainage le long de ce palier horizontal. Pour des succions inférieures à s_{SL} , les points de mesure ne sont pas assez nombreux sur chemin d'imbibition pour en déduire une courbe de corrélation mais il semble au vue des premiers points que le processus drainage – humidification reste raisonnablement irréversible (hystérésis). La superposition de la corrélation Biarez et Favre (BIAREZ & FAVRE, 1975) indique une bonne concordance de pente comme vu précédemment.

La **Figure IV-20c** qui donne le degré de saturation en fonction la teneur en eau (S_r, w) est placée juste en-dessous de la **Figure IV-20a**, pour faciliter la lecture. On observe deux parties sensiblement linéaires dont le point d'intersection donne également la limite de retrait du sol, w_{SL} , à environ 18 %. En drainage, on obtient un palier horizontal constant correspondant à un état quasi-saturé avant w_{SL} , et une désaturation très rapide du sol associée à une faible variation d'indice des vides en dessous de w_{SL} .

La **Figure IV-20d** présente l'évolution du degré de saturation en fonction du logarithme de la succion ($S_r, \log s$). Cette représentation appelée « courbe de rétention » est à utiliser conjointement avec les trois figures précédentes. En drainage, on obtient d'un état constant quasi-saturé jusqu'à une succion d'entrée d'air s_{EA} de l'ordre de 400 kPa puis une désaturation très rapide du sol vers une valeur constante résiduelle de très faible degré de saturation (inférieure à 10 %) et de forte succion (supérieure à 4 MPa). La linéarisation des points de mesures en deux portions de droite avant la rapide désaturation permet l'indentification de s_{EA} , séparant le domaine saturé au domaine non saturé. s_{EA} est un paramètre important de la courbe de rétention. Un autre chemin est obtenu en imbibition, se situant à gauche du chemin de drainage et créant une boucle d'hystérésis de saturation entre ces deux chemins. Le chemin d'imbibition arrive à un autre état constant quasi-saturé appelé succion d'entrée d'air à la resaturation $s_{EAresat}$ à 250 kPa. Comme vu précédemment, les chemins de drainage et d'imbibition présentent une quasi réversibilité à succion plus élevée que la succion de retrait s_{SL} dans le plan ($e, \log(s)$), mais ils sont largement distincts dans le plan ($S_r, \log(s)$) par rapport à la ligne verticale $s = s_{SL}$. Dans ce plan, la réversibilité s'observe uniquement avec des succions plus élevées que 10 MPa.

Enfin, la **Figure IV-20e** donne la teneur en eau en fonction du logarithme de la succion ($w, \log(s)$) aussi appelée « courbe de rétention en teneur en eau ». Cette représentation indique aussi une boucle d'hystérésis entre les chemins de drainage et d'imbibition, avec un décalage de la courbe d'humidification vers la gauche de la courbe de drainage. De même, la réversibilité est observée avec des succions supérieures à 10 MPa. Cette figure indique un bon accord entre le début du chemin de drainage et la corrélation de Biarez et Favre basée sur la valeur de la limite de liquidité w_L .

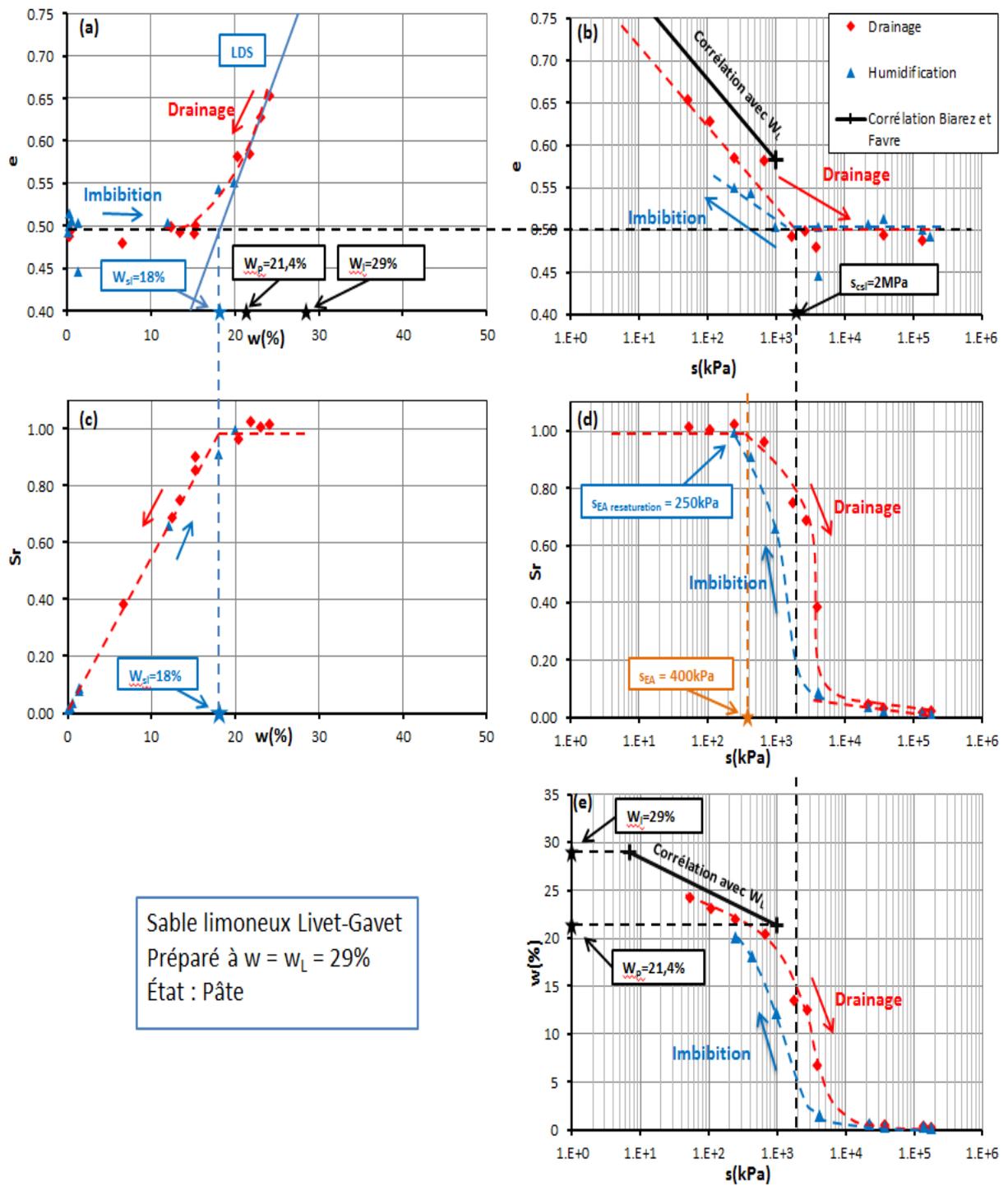


Figure IV-20 Comportement du sable limoneux Livet-Gavet préparé à l'état de pâte ($w = w_L$) sur chemin de drainage-imbibition

IV.3.2 Essai de drainage-imbibition sur le sable limoneux compacté à 25 coups par couche à la teneur en eau de l'optimum

La Figure IV-21 présente l'ensemble des résultats des essais œdométriques, des essais de consolidation isotrope et des essais de drainage-imbibition sur le sable limoneux compacté à 25 coups par couche à la teneur en eau de l'optimum ($w_{OP25}=11.8\%$). On retrouve les résultats semblables à ceux de la pâte. En drainage (points rouges), avec l'augmentation de la succion, l'indice des vides diminue (retrait) jusqu'à un palier stable vers 0.5. Une linéarisation raisonnable des deux parties de la courbe et leur intersection donne la succion de retrait, $s_{SL}=6.5$ MPa. Contrairement aux résultats d'essais de drainage, le nuage des points d'imbibition donne une faible variation de l'indice des vides avec la diminution de succion (e varie de 0.43 à 0.53). Ceci traduit un faible gonflement du matériau au cours de l'imbibition. Pour des succions inférieures à la succion de retrait, on note une forte irréversibilité entre le drainage et l'humidification. Pour des succions supérieures à s_{SL} , les points sont assez proches avec e variant de 0.43 à 0.5.

Si l'on compare le chemin de drainage avec les courbes de chargement œdométrique (vert) et de consolidation isotrope (marron) du sol compacté à 25 coups par couche, le chemin de drainage se situe au-dessus de ces courbes. La pente de drainage est presque égale à la pente de l'essai de consolidation isotrope ($C_{25} = 0.095$; $C_{CI} = 0.1$) et légèrement inférieure à celle de l'essai œdométrique ($C_c = 0.16$). A noter que la pente de la consolidation isotrope ($C_{CI} = 0.1$) à laquelle s'apparente la pente de la courbe de drainage est plus petite que la pente œdométrique ($C_c = 0.16$) car la présence d'un déviateur lors de l'essai œdométrique favorise les déformations de cisaillement ; ce qui est connu dans la littérature géotechnique.

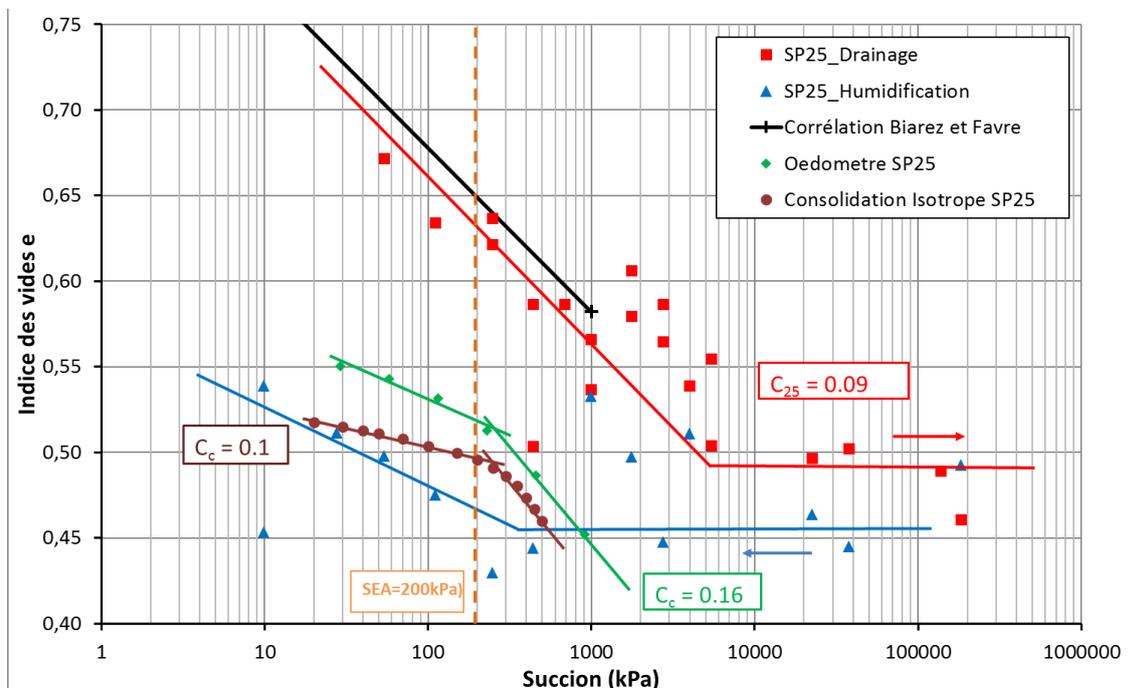


Figure IV-21 Comportement du sable limoneux Livet-Gavet passant à 2 mm, compacté à 25 coups/couche, de l'essai de drainage-imbibition : évolution de l'indice des vides en fonction de la succion.

La Figure IV-21 montre par ailleurs comme pour la pâte que la pente de la courbe de drainage est en bon accord avec celle proposée par la corrélation (ligne noire) de Biarez et Favre (BIAREZ & FAVRE, 1975).

La **Figure IV-22** a pour objectif de nous permettre de déterminer les valeurs de la limite de retrait w_{SL} , de la succion de retrait s_{SL} , de la succion d'entrée d'air s_{EA} en drainage et $s_{EAresat}$ en resaturation du matériau compacté à 25 coups.

La Figure IV-22a montre que la limite de retrait w_{SL} du matériau compacté à 25 coups (intersection de la droite horizontale $e=cste$ avec la ligne de saturation) est de l'ordre de 18 %. Cette valeur est égale à celle obtenue avec la pâte.

Le chemin de drainage-imbibition présenté **Figure IV-22d** dans le plan (S_r , $\log s$) conduit en revanche à des résultats différents de ceux obtenus sur la pâte. Sur la courbe de drainage, on note une très faible désaturation pour les faibles succions ($s < 200$ kPa). Dans ce domaine, le degré de saturation est compris entre 1 et 0.88. A partir d'une succion de 200 kPa qui correspond à la succion d'entrée d'air (s_{EA}), on observe une forte chute de S_r jusqu'à une valeur de 0.1 correspondant à la succion de retrait s_{SL} égale à 6.5 MPa. Ensuite, S_r tend vers 0 indiquant une désaturation quasi-complète de l'échantillon en fin d'essai de drainage.

Les courbes drainage-imbibition sont presque superposées à fortes succions, mais témoignent en revanche d'une forte hystérésis pour des succions inférieures à 4 MPa. La forme de la courbe d'imbibition est différente et avec la diminution de succion, elle se décale de plus en plus vers la gauche de la courbe de drainage avant de remonter près de la ligne de saturation $S_r = 1$. Bien que l'essai d'imbibition n'ait pas été conduit jusqu'à des très faibles niveaux de succion, nous pouvons estimer que la succion d'entrée d'air en re-saturation est de l'ordre de quelques kPa, donc très inférieure à la succion d'entrée d'air ($s_{EA} = 200$ kPa) observée sur chemin de drainage.

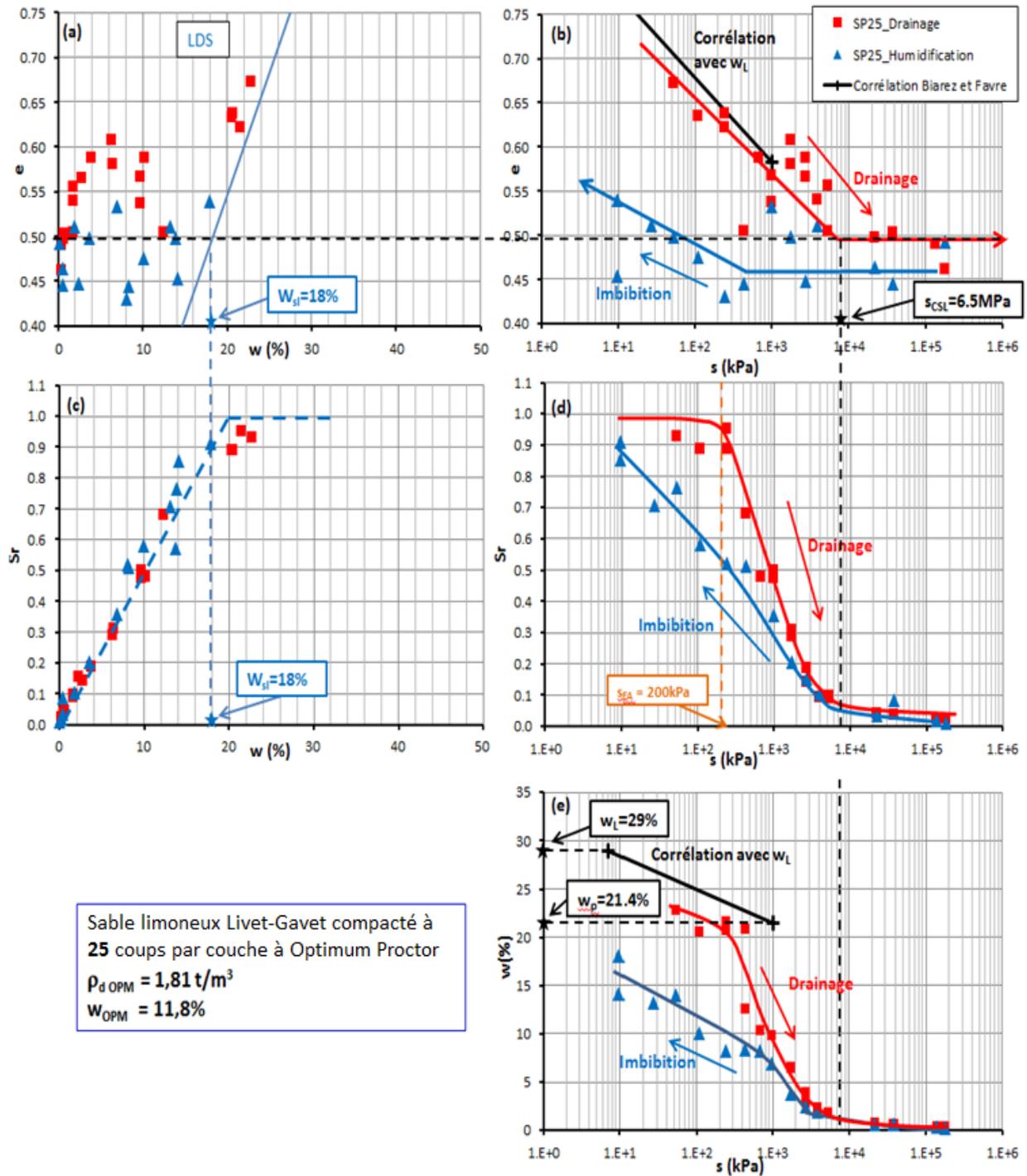


Figure IV-22 Comportement du sable limoneux Livet-Gavet, compacté à 25 coups/couche à $w_{OP25} = 11.8\%$, lors de l'essai de drainage-humidification.

IV.3.3 Essais de drainage-imbibition sur le sable limoneux compacté à 55 et 85 coups par couche à la teneur en eau de l'optimum

La Figure IV-23 et la Figure IV-24 présentent les résultats obtenus lors des essais de rétention d'eau réalisés sur le sable limoneux de Gavet compacté respectivement à 55 coups par couche (OPN) à w_{OPN} égale 11.2 %, et à 85 coups par couche (OPN+30) à w_{OP85} égale 10.7 %.

Sur ces deux matériaux compactés, un comportement semblable au matériau compacté à 25 coups par couche est observé. Une diminution importante de l'indice des vides (retrait) se produit au cours de l'essai de drainage pour les suctions inférieures à la succion de retrait (s_{SL}), au-delà de laquelle aucune variations significative de volume n'est perçue. Pour ces deux matériaux compactés, notons qu'une même valeur de limite de retrait w_{SL} , de l'ordre de 15 %, est observée. Les suctions de retrait sont respectivement de 3 MPa et 4 MPa pour le matériau compacté à 55 coups/couche et celui compacté à 85 coups/couche.

Comme pour les autres matériaux, notons que le comportement du matériau peut être considéré comme réversible pour les suctions supérieures à la succion de retrait. En revanche, la courbe de rétention du matériau ($S_r, \log(s)$) présente une forte hystérésis pour les succion inférieures à s_{SL} . Logiquement, les points d'imbibition se trouvent toujours en-dessous des points de drainage dans le plan ($S_r, \log(s)$).

La linéarisation des deux premières partie de la courbe de rétention permet de déterminer la succion d'entrée d'air. Celles-ci sont pour le sable limoneux compacté à 55 coups par couche $s_{EA} = 400$ kPa et à 85 coups par couche $s_{EA} = 700$ kPa. Comme pour les précédents matériaux étudiés, on retrouve des suctions d'entrée d'air à la ressaturation $s_{EAresat}$ (de l'ordre de quelques kPa) bien inférieures à la succion d'entrée d'air obtenues sur chemin de drainage

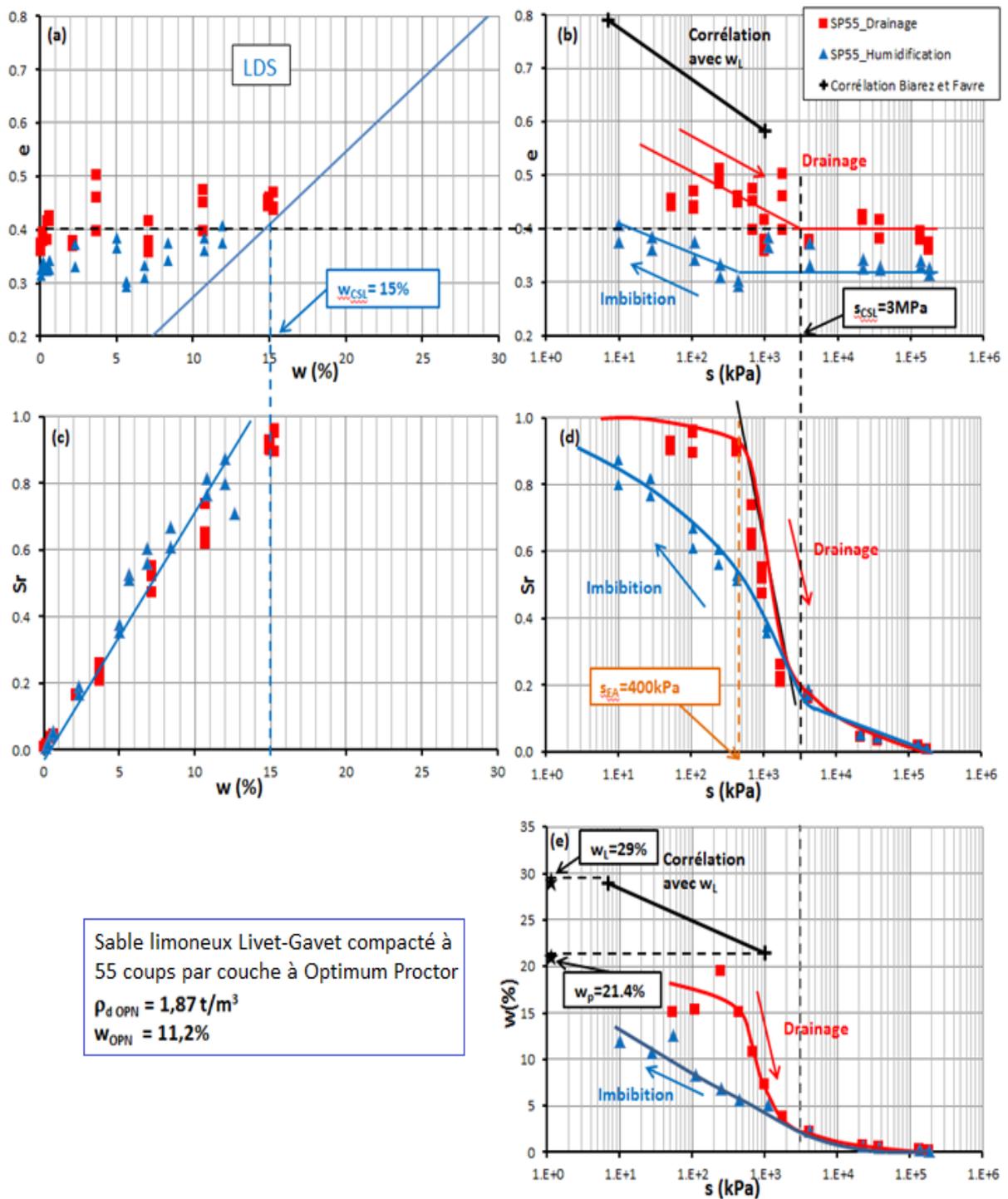


Figure IV-23 Comportement du sable limoneux Livet-Gavet compacté à 55 coups/couche à w_{OPN} lors de l'essai de drainage-humidification

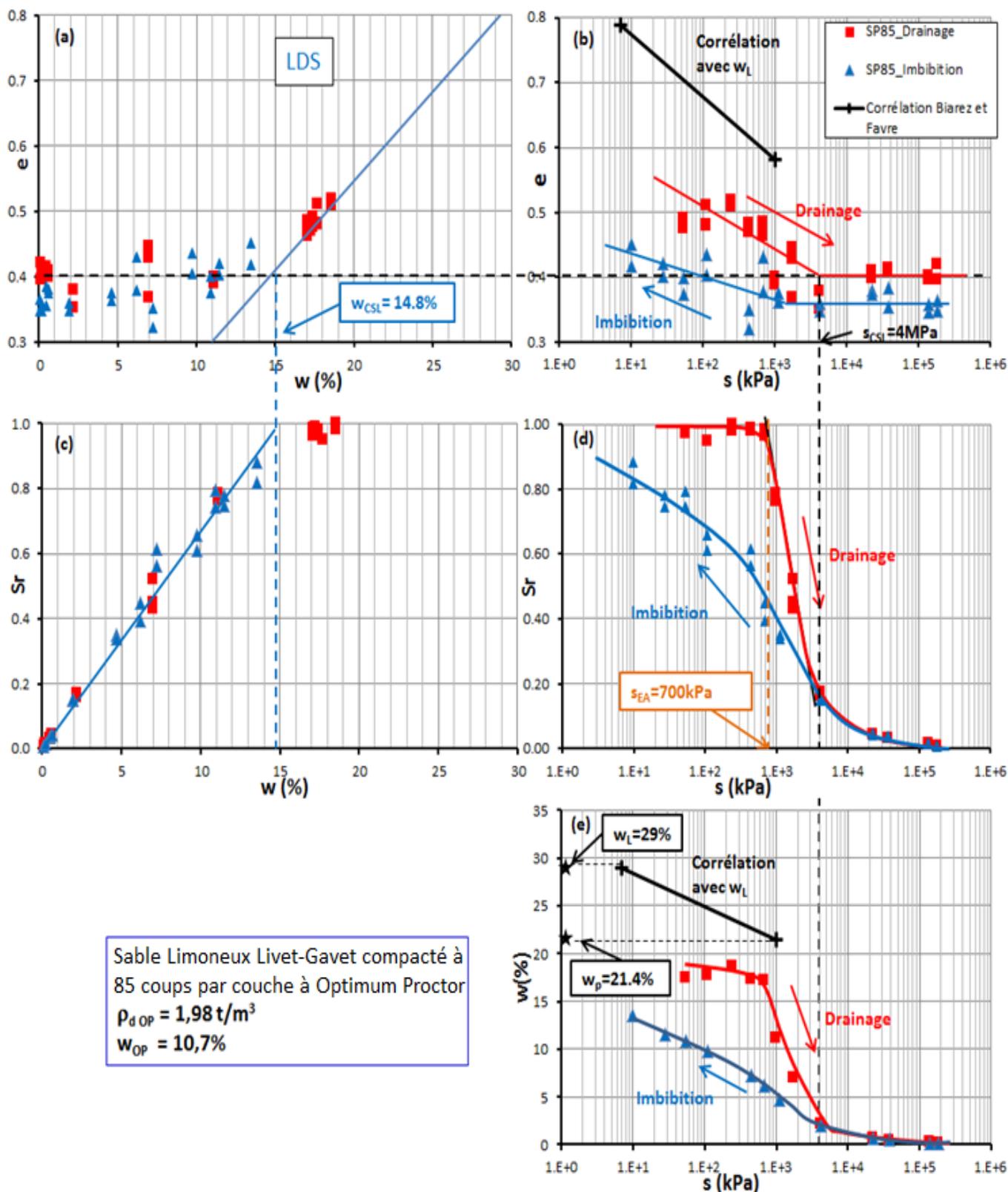


Figure IV-24 Comportement du sable limoneux Livet-Gavet, compacté à 85 coups/couche à w_{OP85} , lors de l'essai de drainage-humidification

IV.3.4 Influence des paramètres de compactage sur les propriétés de rétention du matériau

IV.3.4.a Influence de l'énergie de compactage sur les variations de volume du matériau lors d'un cycle de drainage - imbibition

La Figure IV-25 montre l'influence de l'énergie de compactage sur le chemin de drainage dans le plan semi-logarithmique (e , $\log(s)$). Rappelons que pour ces échantillons, les teneurs en eau de compactage sont celles correspondantes à l'optimum. A faible énergie de compactage à 25 coups/couche, le chemin de drainage est assez proche de celui de la pâte avec un même palier de retrait $e = 0.5$ et une succion de retrait plus élevée. Il peut paraître surprenant que la courbe de drainage de la pâte se trouve en dessous de celle du matériau compacté à 25 coups/couche; et plus particulièrement que l'indice des vides initiale de la pâte soit inférieur à celui du matériau compacté à 25 coups. Nous ne sommes pas en mesure d'identifier d'éventuels biais expérimentaux qui auraient entraîné des erreurs systématiques sur la mesure de l'indice des vides de nos échantillons. En revanche, notons que des résultats similaires ont été observés par Taibi (TAIBI, 1994) sur les matériaux argileux du barrage de Vieux-Pré avec des caractéristiques d'Atterberg assez proches du sable limoneux de Gavet ($w_L = 32 \%$, $IP = 13 \%$).

Avec l'augmentation de l'énergie de compactage, on observe alors différents paliers de retrait; ceux des matériaux compactés à 55 et 85 coups/couche se trouvent en-dessous de celui de la pâte, indiquant logiquement un état plus dense. Les indices des vides observés au retrait varient entre 0.35 et 0.42, les succions de retrait sont plus élevées que celle de la pâte et les limites de retrait plus faibles (w_{SL} compacté 55 et 85 coups/couche = 15% < w_{SL} pâte = 18%).

Les succions de retrait des matériaux compactés sont comprises entre 2 MPa et 6.5 MPa, indiquées par l'ellipse en pointillé sur la Figure IV-25, et ne semblent pas suivre une règle spécifique. Les chemins de la première phase de désaturation (à gauche de s_{SL}) sont sensiblement parallèles avec des pentes variant de 0.053 à 0.095. A faible énergie de compactage à 25 coups/couche, la pente de drainage est parallèle à celle de la pâte ($C_{25cps}=0.095$ et $C_{pâte}=0.094$) et conforme aux corrélations avec w_L . Pour les fortes énergies de compactage (OPN et OPN+30), on note une légère diminution de la pente de drainage. Il semble que la vitesse de désaturation dépend de l'énergie de compactage lors de la préparation du matériau.

Les résultats des essais d'imbibition présentés dans la Figure IV-26 nous montrent un faible gonflement pour tout niveau de compactage. Lors de l'humidification, les courbes de la pâte et des sols compactés restent parallèles mais toujours décalées l'une par rapport à l'autre. Les pentes de gonflement sont presque identiques (autour de 0.52 à 0.55, sauf pour le matériau compacté à OPN à 55 coups/couche) et nous montre une même vitesse de ré-saturation. Le gonflement du sable limoneux Livet-Gavet est peu influencé par l'énergie de compactage.

On note aussi un bon accord de la phase d'humidification avec les corrélations de Fleureau (FLEUREAU, et al., 2002) sur les matériaux compactés, sauf pour l'OPN à 55 coups/couche. Les pentes obtenues lors des essais sur les matériaux compactés à 25 et 85 coups/couche sont

quasiment identiques avec les corrélations empiriques ($C_{h25} = 0.052$ ou $C_{ms25} = 0.051$ et $C_{ch85} = 0.055$ ou $C_{ms85} = 0.051$).

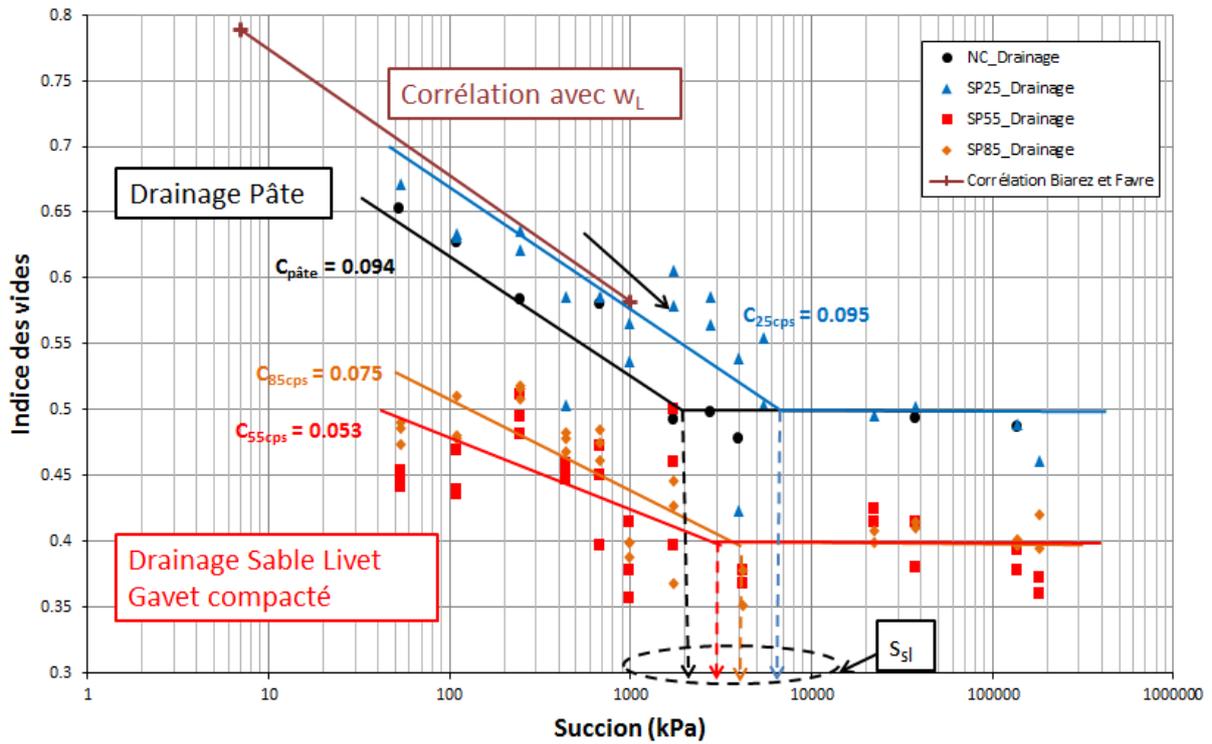


Figure IV-25 Evolution de l'indice des vides en fonction de la succion pour les essais de drainage sur sable limoneux de Gavet.

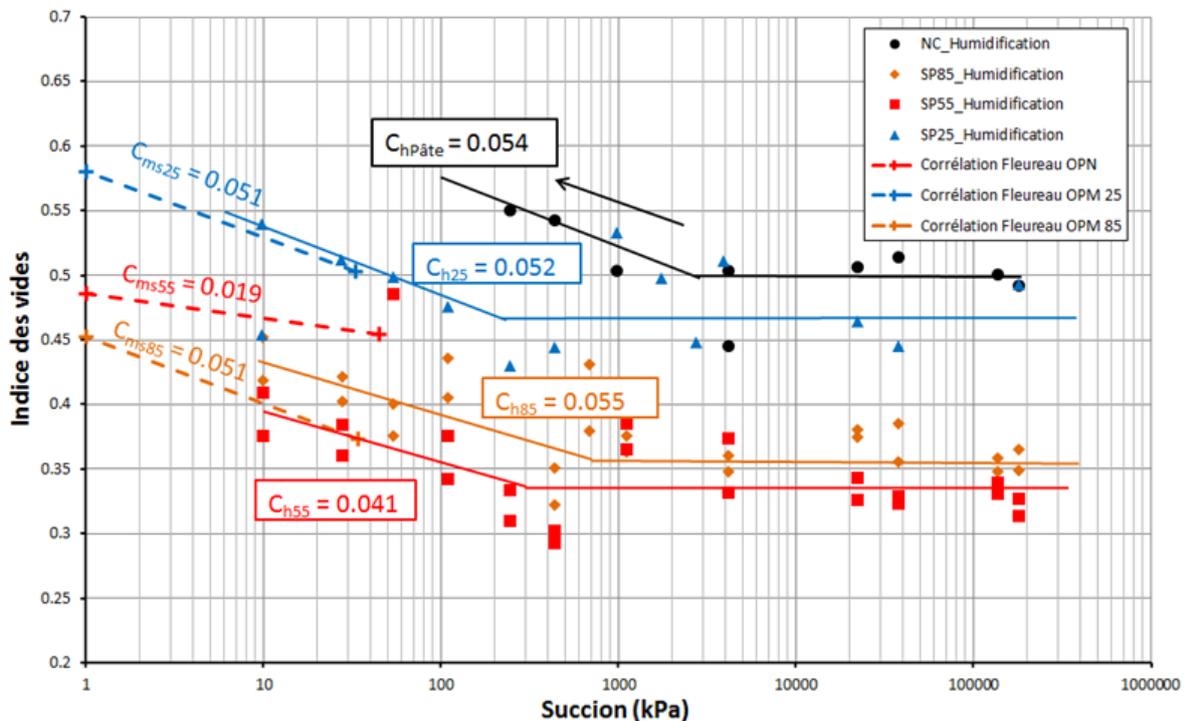


Figure IV-26 Evolution de l'indice des vides en fonction de la succion pour les essais d'imbibition sur sable limoneux de Gavet.

IV.3.4.b Influence de l'énergie de compactage sur les variations de teneur en eau sur chemin d'imbibition

La Figure IV-27 donne pour l'ensemble des essais d'humidification l'évolution de la teneur en eau massique en fonction du logarithme de la succion. Les matériaux s'humidifient de façon identique jusqu'à $s = 4$ MPa, puis w augmente rapidement. On note que la teneur en eau de la pâte augmente plus vite que celle des matériaux compactés. La résaturation des matériaux compactés semble être peu influencée par l'énergie de compactage puisque les courbes de résaturation se regroupent dans un fuseau assez étroit. Les corrélations de Fleureau donnent des pentes plus faibles que celles des expériences; néanmoins ces lignes de corrélation se trouvent assez proche des lignes de résaturation.

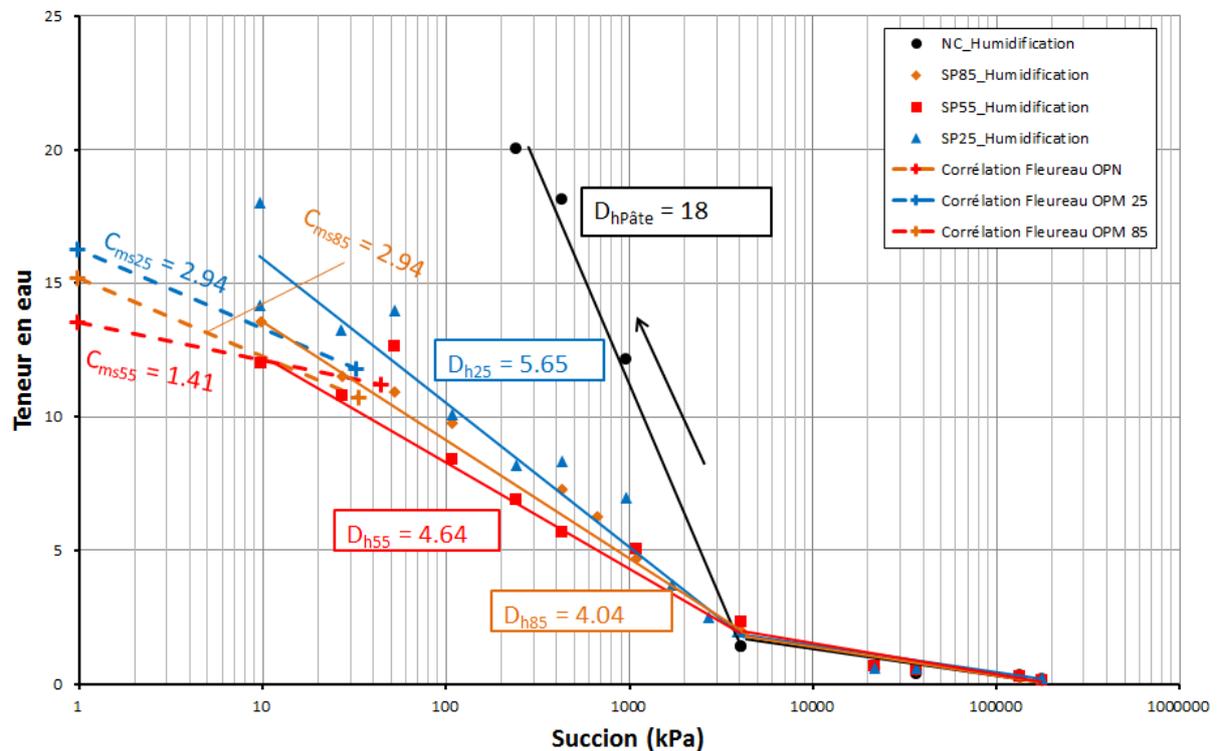


Figure IV-27 Evolution de la teneur en eau en fonction de la succion lors des essais d'imbibition sur sable limoneux de Gavet (état de pâte et état compacté)

IV.3.4.c Influence de l'énergie de compactage sur les valeurs de succion d'entrée d'air

Nous avons surposé sur la Figure IV-28 les courbes de rétention obtenues dans le cas du sable limoneux de Gavet compacté à différents niveaux d'énergie de compactage. Sur cette figure, il semble que l'hystérésis soit pratiquement indépendante de l'énergie de compactage.

Pour faciliter l'observation et l'analyse, les résultats sont présentés séparément en deux parties; le drainage en Figure IV-29 et l'humidification en Figure IV-32. Rappelons que pour cette analyse la succion d'entrée d'air est déterminée de manière conventionnelle dans le plan (Sr,

log(s)) par l'intersection de la partie initiale quasi-saturée et de la linéarisation des premiers points lors de la désaturation très rapide du sol.

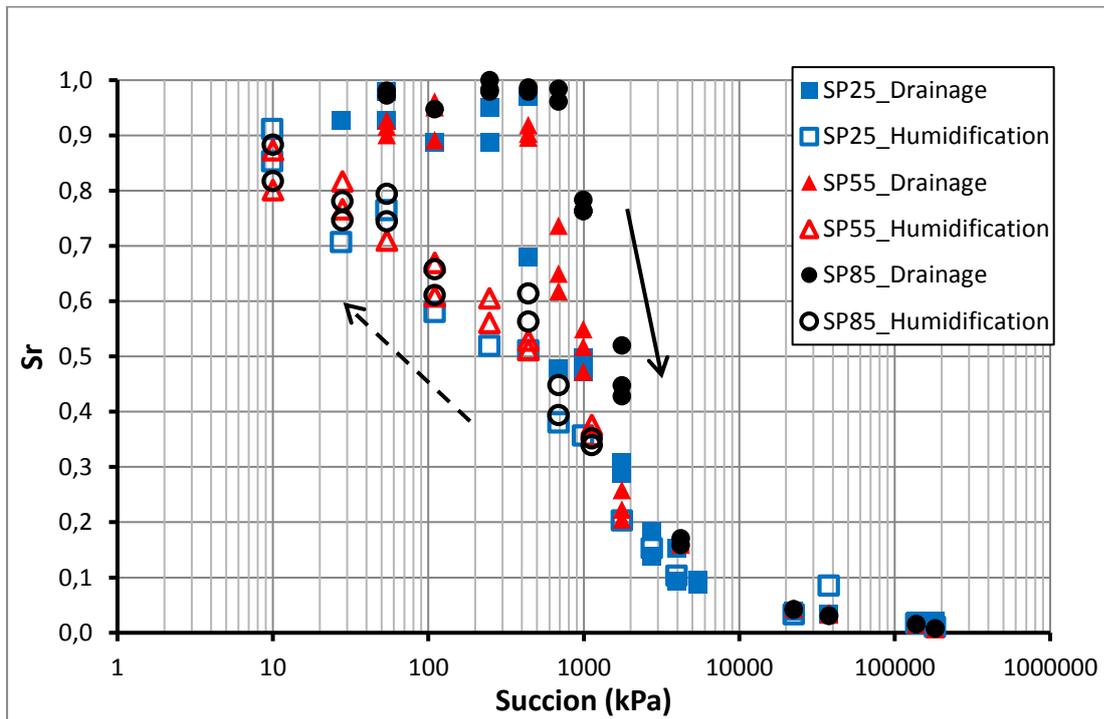


Figure IV-28 Comparaison des courbes de rétention obtenues sur chemins de drainage – humidification pour le sable limoneux de Gavet compacté sous différentes énergies

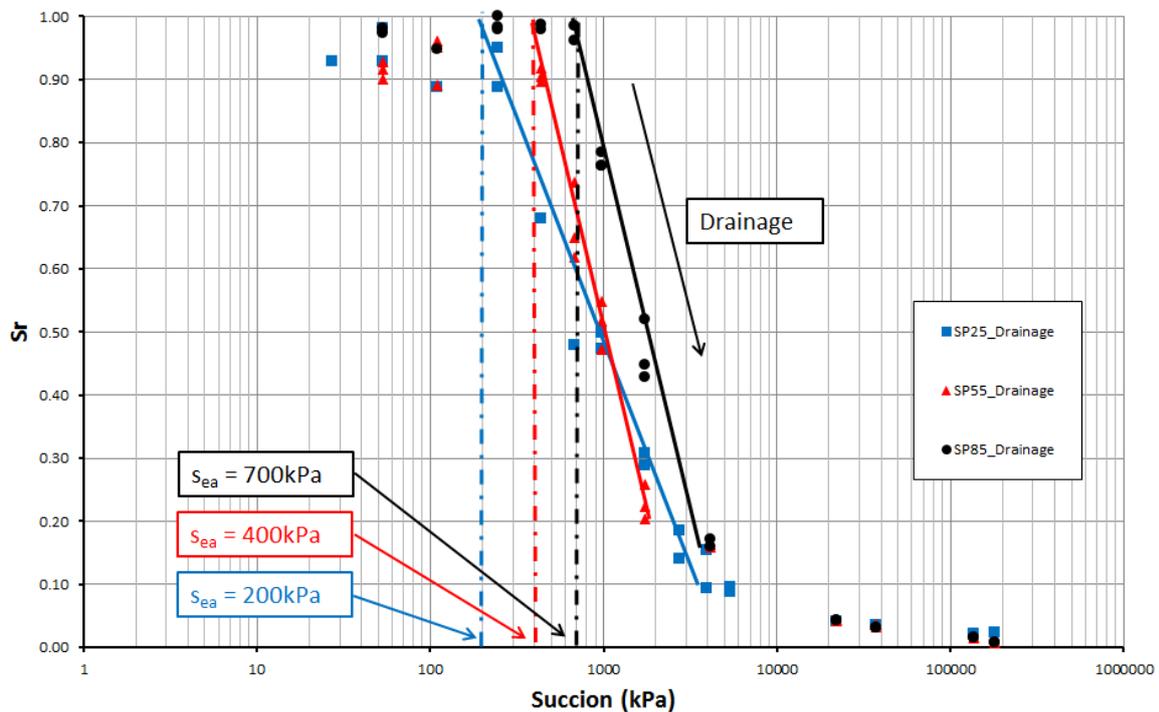


Figure IV-29 Courbes de drainage obtenues sur le sable limoneux de Gavet compacté à différents niveaux d'énergie.

D'une manière générale, les courbes de rétention obtenues sur chemin de drainage pour le sable limoneux de Gavet (Figure IV-29) présentent des formes assez similaires quelle que soit l'énergie de compactage. Dans le plan (S_r , $\log(s)$), ces courbes tendent toutefois à se décaler légèrement vers la droite (sens des succions croissantes) lorsque l'énergie de compactage augmente.

Pour des niveaux de succion inférieurs à leur valeur respective de succion d'entrée d'air, les trois matériaux testés présentent des degrés de saturation compris entre 0.88 et 1. Les matériaux sont donc dans le domaine saturé ou quasi-saturé. Notons toutefois une différence de comportement entre les différents matériaux. Le matériau compacté à 85 coups/couche se trouve très proche de la ligne de saturation $S_r = 1$ jusqu'à l'obtention de sa succion d'entrée d'air. En revanche, les points de mesure des matériaux compactés à 25 et 55 coups/couche se situent en-dessous de la ligne de saturation lorsque la succion imposée est inférieure à leur valeur de succion d'entrée d'air définie de manière conventionnelle. Il est possible que pour ces échantillons l'air ait à ce stade déjà pénétré le réseau poral de ces matériaux.

Rappelons que la succion d'entrée d'air, s_{EA} , est identifiée de manière conventionnelle à 200 kPa pour un compactage à 25 coups/couche, 400 et 700 kPa respectivement pour des compactages à 55 et 85 coups/couche. La Figure IV-30 montre que pour le sable limoneux de Gavet compacté à w_{OPN} , la succion d'entrée d'air augmente quasi-linéairement avec l'énergie de compactage. Puisque la taille des pores est probablement réduite par l'augmentation de l'énergie de compactage (pour des teneurs en eau initiale égales à w_{OPN}), la succion résultante de la loi de Jurin tend à augmenter avec l'énergie de compactage. Un fort compactage ferme les pores et rend plus difficile la pénétration de l'air dans les matériaux compactés. Néanmoins, il est nécessaire d'étudier la répartition des pores dans l'échantillons pour mieux comprendre ce phénomène.

A titre indicatif, nous avons placé sur la Figure IV-30 le point représentatif du matériau à l'état de pâte. Assez logiquement, celui-ci ne vérifie pas la corrélation observée pour le matériau compacté du fait d'une structure certainement très différente de celle des matériaux compactés. L'existence de l'eau adsorbée aux grains de limon à l'état de pâte et l'état initial totalement saturé peuvent aussi empêcher l'air de pénétrer dans un mélange de sable limoneux saturé; ce qui peut expliquer une forte succion d'entrée d'air du sable limoneux à l'état de pâte saturée.

La Figure IV-31 présente l'évolution des pentes de la courbe de drainage dans la partie de désaturation très rapide (entre les valeurs de succion d'entrée d'air et de succion de retrait) en fonction de la succion d'entrée d'air du matériau considéré. Ainsi nous observons une évolution quasi linéaire des pentes de drainage en fonction de la succion d'entrée d'air. Plus la succion d'entrée d'air ou la densité au compactage est grande, plus la désaturation du matériau se fera pour une gamme reserrée de succions. Si l'on se réfère à la loi de Jurin, ce comportement semble montrer que l'augmentation de la densité de compactage dans le cas du sable limoneux préparé à w_{OPN} tend à uniformiser la taille des pores constituant le réseau poral du matériau testé.

A partir de valeurs de degré de saturation de l'ordre de 0.1, les courbes de drainage des différents matériaux se rejoignent, pour ensuite continuer à diminuer vers un palier de

saturation stable proche de 0 où le sol est fortement désaturé. Les points de mesure sont très proches, presque superposés, à partir de $s = 5$ MPa.

Pour la phase d'imbibition, la Figure IV-28 témoigne d'une forte hystérésis entre les chemins de drainage et d'imbibition quel que soit le niveau d'énergie de compactage. Pour une même valeurs de succion, les degrés de saturation mesurés sur chemin d'imbibition sont systématiquement (et logiquement) en-dessous de ceux mesurés sur chemin de drainage. La Figure IV-32 rassemblent uniquement la partie « imbibition » des courbes de rétention du sable limoneux de Gavet compacté. Dans le cas de ce matériau compacté à w_{OPN} , cette représentation montre qu'il peut être raisonnable de considérer l'indépendance de cette courbe de rétention sur chemin d'humidification par rapport à l'énergie de compactage appliquée lors de la préparation des échantillons.

Le Tableau IV-5 regroupe l'ensemble des paramètres identifiés de drainage et d'humidification, ainsi que les valeurs des pentes de drainage et d'imbition décrites précédemment pour les différentes états de compactage étudiés (C : pente de drainage, C_h : pente d'humidification, C_{ms} : pente d'humidification donnée par les corrélations de Fleureau).

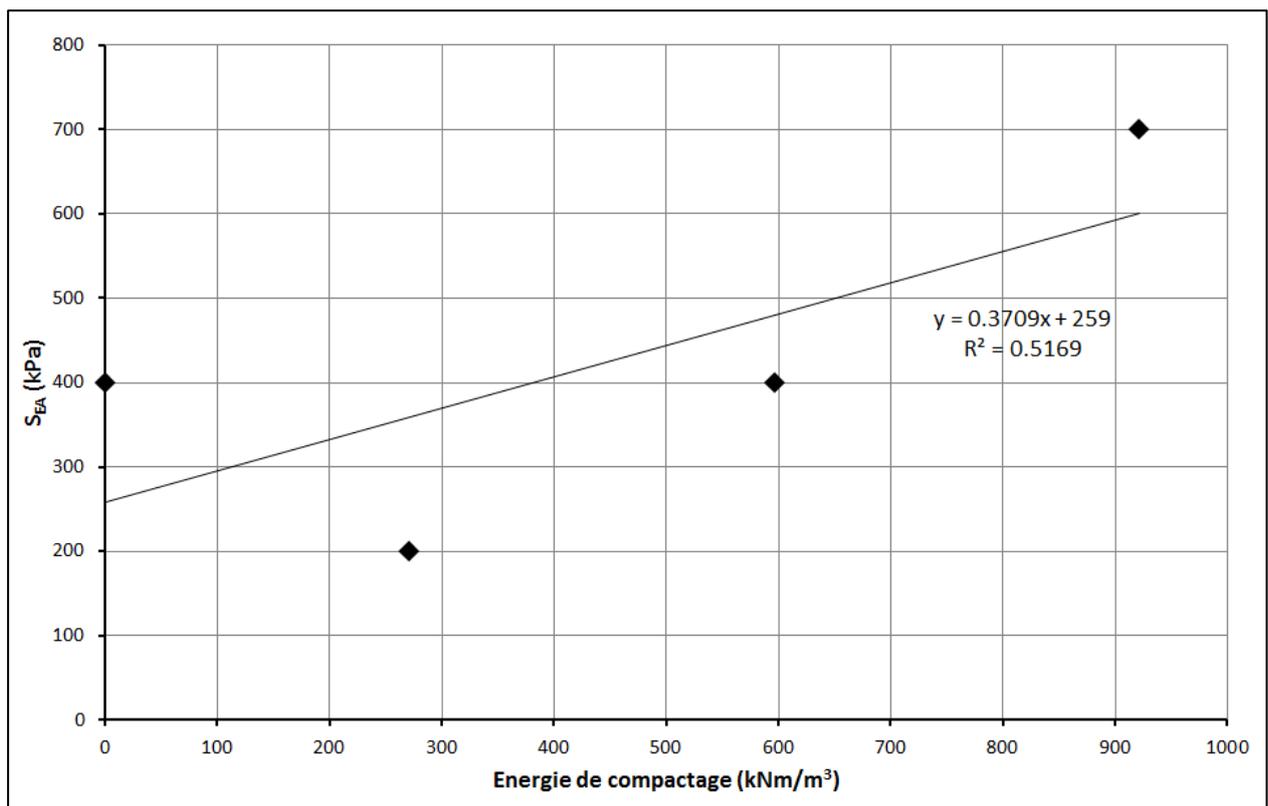


Figure IV-30 *Succion d'entrée d'air en fonction de l'énergie de compactage du sable limoneux de Gavet*

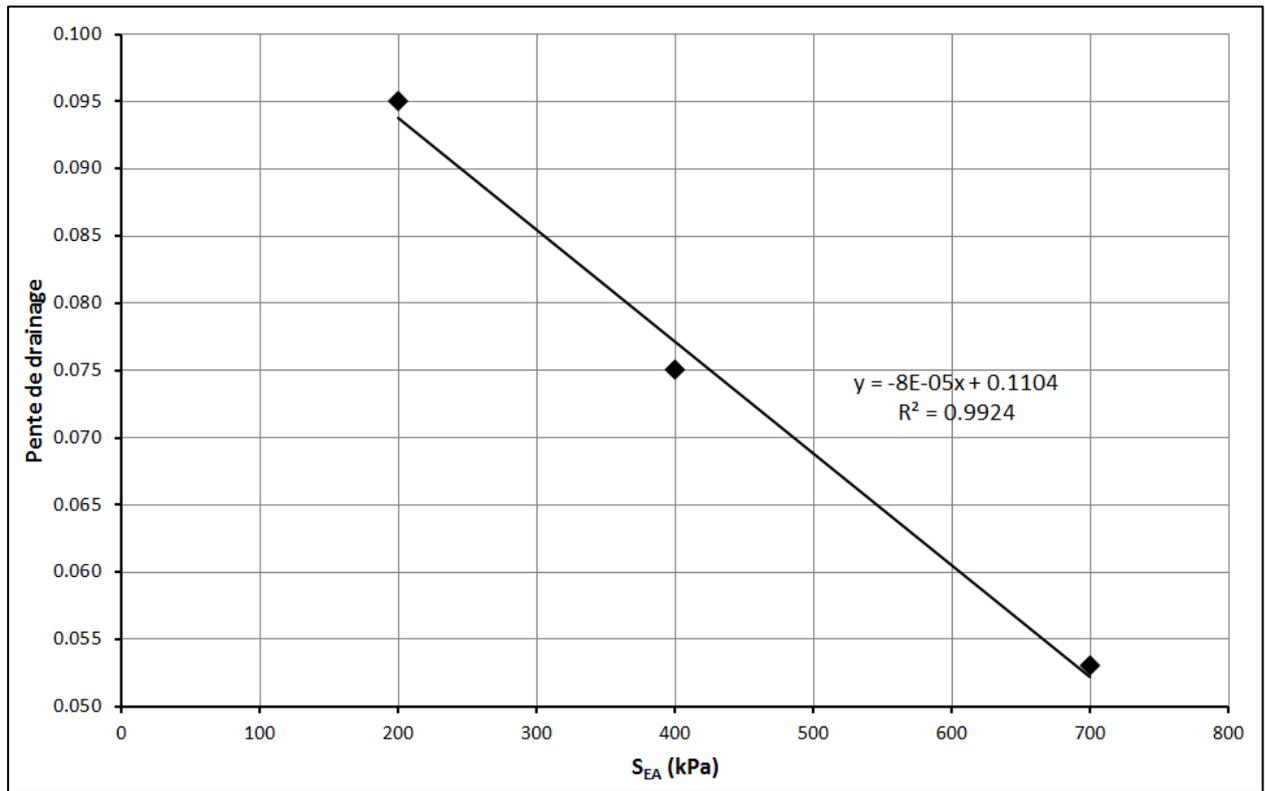


Figure IV-31 Pente de drainage en fonction de la suction d'entrée d'air du sable limoneux Gavet compacté

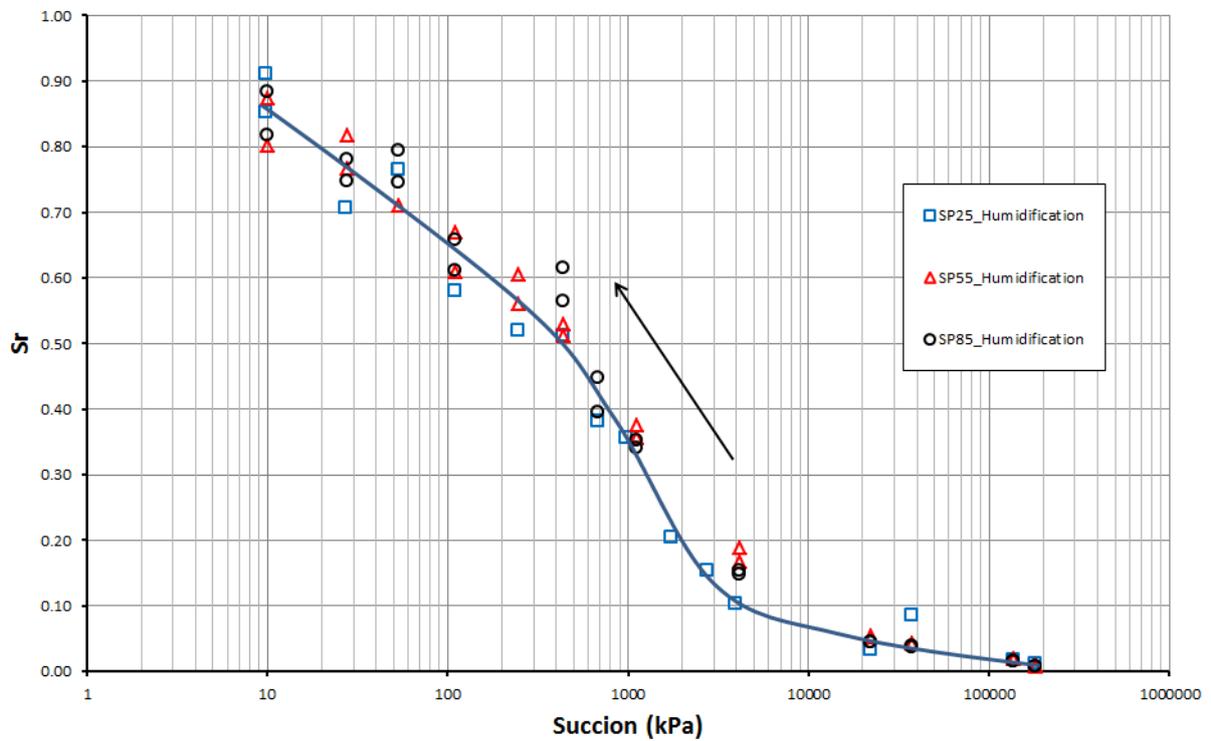


Figure IV-32 Résultat des essais d'imbibition sur le sable limoneux Livet-Gavet compacté

Matériau	Energie de compactage (kJ/m ³)	w _{SL} (%)	e _{SL}	s _{SEA} (kPa)	s _{SSL} (MPa)	Pente de drainage C	Pente d'humidification C _h / C _{ms}
Pâte	0	18.0	0.50±0.02	400	2.0	0.094	0.054
25 cps/couche	271	18.0	0.50±0.04	200	6.5	0.095	0.052 / 0.051
55 cps/couche	597	15.0	0.40±0.04	400	3.0	0.075	0.041 / 0.019
85 cps/couche	922	14.8	0.40±0.02	700	4.0	0.053	0.055 / 0.051

Tableau IV-5 : Tableau récapitulatif des essais de drainage-imbibition réalisés sur le sable limoneux de Gavet préparé à différentes énergies de compactage

IV.3.4.d Relation entre succion d'entrée d'air et hystérésis de la courbe de rétention

La Figure IV-33 représente l'hystérésis de saturation ΔS_r et l'hystérésis de teneur en eau Δw en fonction de la succion pour chaque énergie de compactage (25, 55 et 85 coups/couche) du matériau compacté. ΔS_r (Δw) est la différence de degré de saturation S_r (de teneur en eau w) entre le chemin drainage et celui d'imbibition à succion constante.

Dans le plan (ΔS_r , $\log(s)$), les courbes ont une même allure pour tous les matériaux compactés. Elles commencent à partir de 50 kPa de succion comme les courbes de rétention en saturation. Une augmentation de la succion se traduit par une augmentation de ΔS_r vers un pic maximal, puis ΔS_r décroît fortement vers zéro pour des succions supérieures à 3 MPa. Cette valeur de 3 MPa de succion caractérise le point initial d'hystérésis à forte succion. Pour les trois niveaux d'énergie étudiés, les maximums de ΔS_r se trouvent toujours proches de la succion d'entrée d'air s_{SEA} déterminée précédemment dans le diagramme (S_r , $\log(s)$), donc il semble que la succion d'entrée d'air peut être identifiée par le maximum local d'hystérésis de saturation. Les résultats utilisant l'hystérésis de teneur en eau Δw présentés sur le chemin (Δw - $\log(s)$) conduisent à la même conclusion.

La Figure IV-34 représente l'ensemble les résultats des matériaux compactés sur le même graphe d'hystérésis de saturation (ΔS_r , $\log(s)$) (Figure IV-34a) et de teneur en eau (Δw , $\log(s)$) (Figure IV-34b). Il semble que l'énergie de compactage influence le pic d'hystérésis de saturation et de teneur en eau. Le pic de ΔS_r varie entre 0.4 à 0.56 et celui de Δw entre 9.4 % et 13 %. Notons que ΔS_r et Δw atteignent leur minimum à OPN à 55 coups/couche.

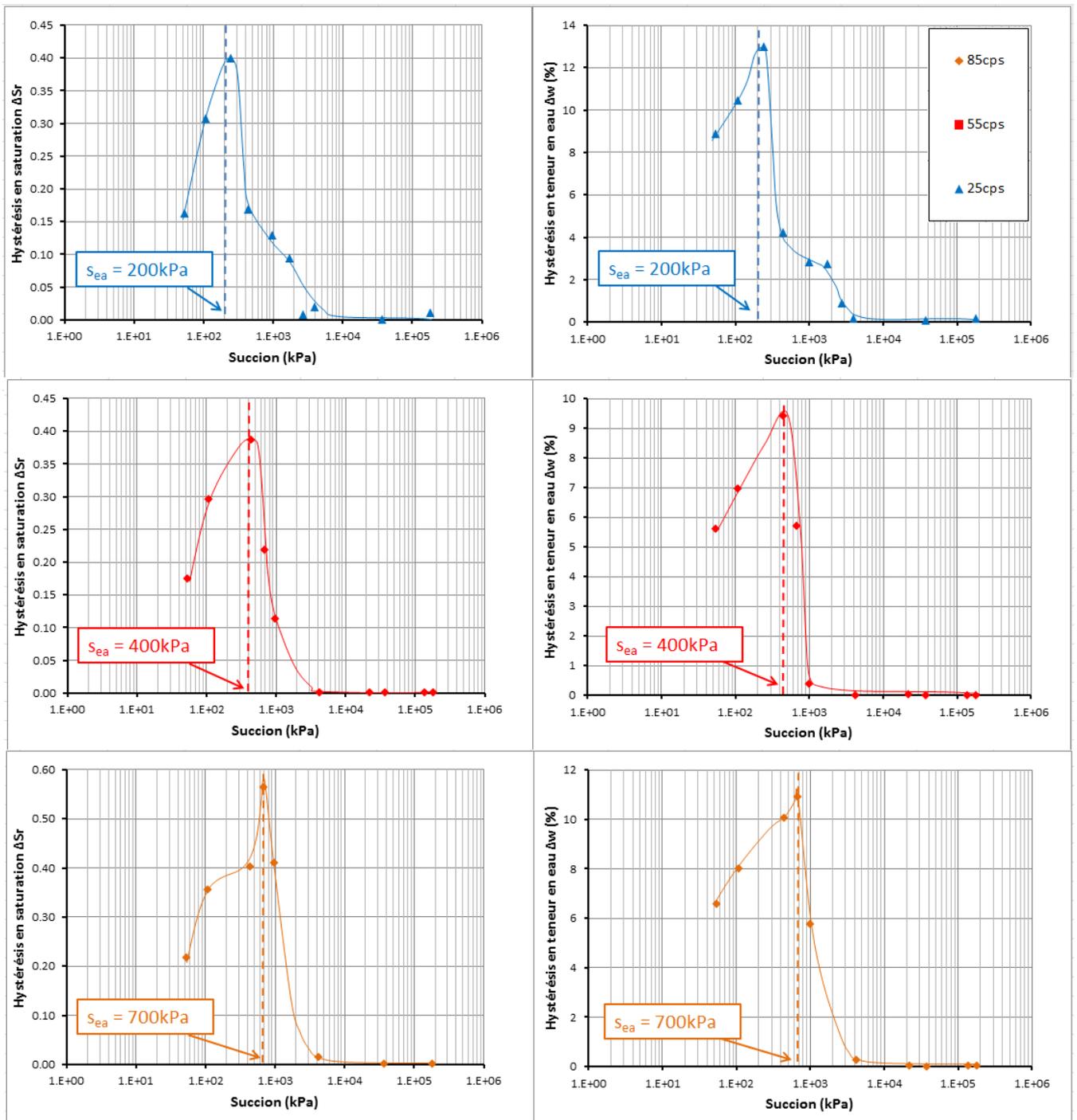


Figure IV-33 ΔS_r et Δw d'hystérésis à suction constante pour les matériaux compactés à l'Optimum Proctor à 3 énergies de compactage (25, 55 et 85 coups par couche)

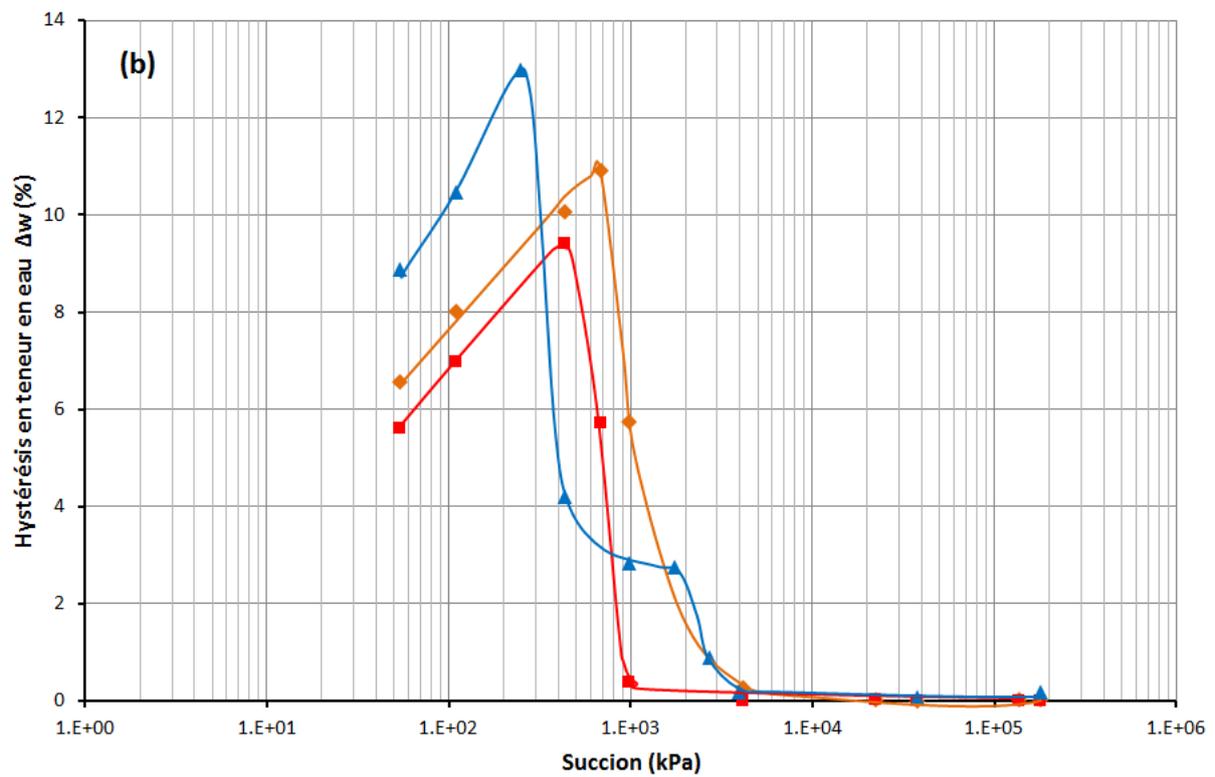
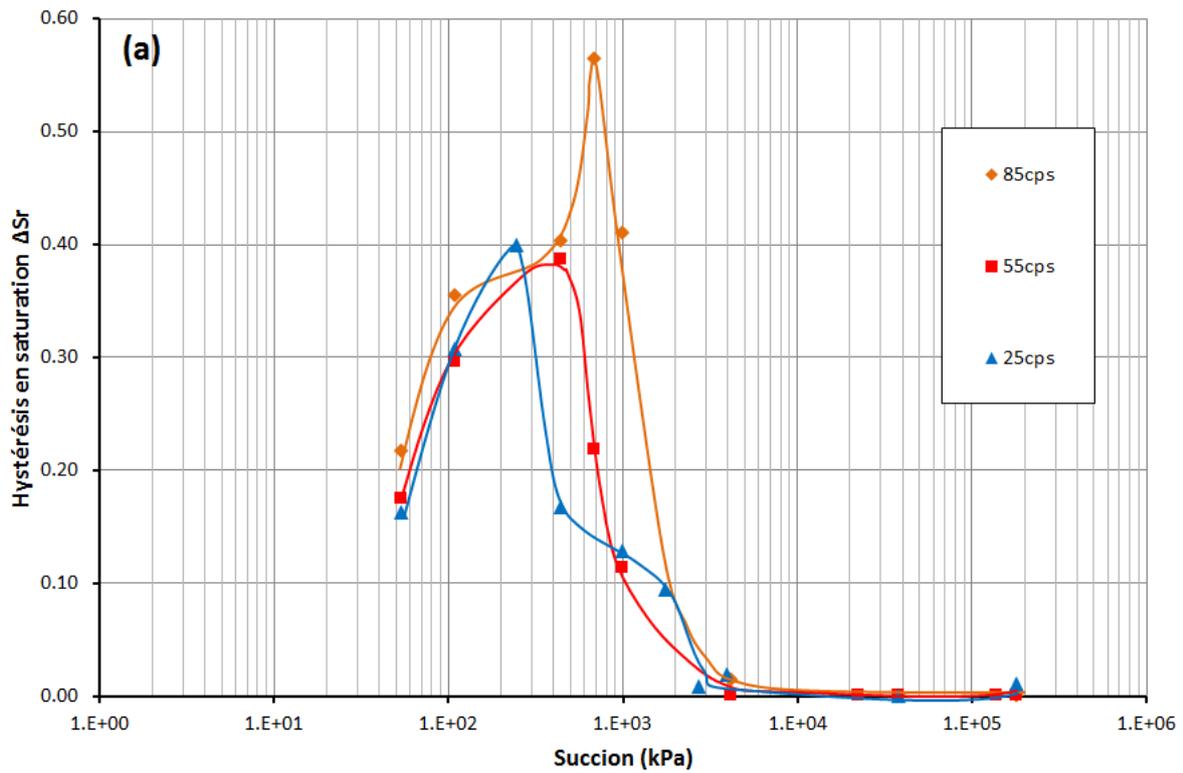


Figure IV-34 Comparaison des valeurs d'hystérésis de saturation (ΔS_r) et de teneur en eau (Δw) mesurées à succion constante pour les matériaux compactés à l'Optimum Proctor à 3 énergies de compactage (25, 55 et 85 coups par couche)

IV.4 Essais de porosimétrie au mercure

En parallèle des essais de rétention d'eau décrits précédemment, une importante campagne d'essais de porosimétrie au mercure a été réalisée sur le sable limoneux de Gavet dans le cadre de cette thèse. La porosimétrie par injection de mercure est l'une des méthodes d'analyse indirecte des milieux poreux, elle permet d'obtenir un spectre de la taille des pores du matériau étudié. En géotechnique, elle est assez couramment utilisée pour caractériser la distribution porale des sols. Dans ce domaine, son utilisation requiert toutefois un certain nombre de précautions (DAIAN, 2007). Dans notre cas, les essais de porosimétrie au mercure doivent nous permettre d'analyser finement la distribution porales de nos échantillons de sable limoneux, en fonction de leur mode de préparation. Sur la base de cette analyse porale, nous chercherons à interpréter les courbes de rétention décrites précédemment (cf §IV.2).

Pour cette campagne d'essais au porosimètre mercure, la préparation des échantillons a été faite à l'ENTPE et la réalisation des essais a été menée au Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE) à Grenoble, avec AutoPore IV Series 9500 de Micromeritics.

IV.4.1 Principe et dispositif expérimental

Le principe de la porosimétrie par injection de mercure est de faire pénétrer le mercure dans les pores de l'échantillon en appliquant une pression croissante. Le mercure est un métal liquide non mouillant vis-à-vis de la plupart des solides ; c'est-à-dire qu'il ne pénètre pas spontanément dans le réseau poral comme pourrait le faire l'eau par exemple. En raison d'une tension de surface très élevée, pour forcer le mercure à pénétrer dans le sol, il faut appliquer une pression. Lorsque l'on augmente progressivement la pression d'injection du mercure (généralement par paliers), le mercure entre dans les pores de plus en plus fins. Cette méthode est presque l'inverse de l'essai drainage où le liquide doit vaincre une tension superficielle de plus en plus forte lorsque la taille des capillaires diminue.

Pour interpréter l'essai et avoir accès à la distribution porale, il est nécessaire de connaître la relation entre la pression d'injection et la taille des pores injectés. Dans la plupart des cas, on suppose les pores ayant la forme de troncs de cylindre de diamètre D . La relation entre pression d'injection et diamètre des pore est alors donnée par la loi de Laplace:

$$D = - \frac{4 \cdot \gamma \cdot \cos\theta}{P_c}$$

Avec : P_c : pression capillaire (différence de pression de part et d'autre du ménisque) :

γ : tension superficielle du mercure dans le vide (=0.485 N/m)

θ : angle de mouillage du mercure (de l'ordre de 130°)

Ainsi lors de l'essai d'injection de mercure, à la pression P_c donnée, les pores de diamètres supérieurs à D sont remplis de mercure. A partir de la mesure du volume injecté à chaque palier de pression et sur la base de certaines hypothèses (DAYAN, 2007), il est possible d'établir la distribution de tailles des pores dans le matériau

IV.4.2 Procédure d'essai :

La Figure IV-35 présente la procédure de l'essai de porosimétrie par injection de mercure. Dans un premier temps, l'échantillon doit être parfaitement séché. La température de séchage recommandé dépend du type du sol. En particulier, il est important que ce séchage soit suffisamment doux pour ne pas endommager la structure poreuse du matériau, en particulier par des fissurations dues au retrait dans le cas des sols argileux. L'échantillon est ensuite placé dans le pénétromètre et mis sous vide afin d'éliminer la présence de bulles d'air. Ensuite, le pénétromètre est rempli par le mercure et la pression d'injection est augmentée progressivement par paliers. Pour les faibles pressions, le mercure est poussé dans le matériau par une pression d'air. Pour les fortes pressions, il est poussé à l'aide d'une pression d'huile. Compte tenu de la pression d'injection croissante, le mercure pénètre dans les pores de plus en plus petits. Le volume de mercure injecté dans le sol est mesuré à chaque palier de pression après stabilisation. Pour une pression d'injection (P_c) donnée, on suppose qu'au moment de la stabilisation, tous les pores de diamètres supérieurs à D tel que $D = -\frac{4\gamma \cos\theta}{P_c}$ sont saturés de mercure. Les pressions d'injection peuvent être comprises entre quelques kPa et 400 MPa, ce qui donne accès à une gamme de diamètres de pores comprise entre 400 μm et 3 nm.

Les résultats d'essai de porosimétrie au mercure nous donnent le volume du mercure pénétré dans l'échantillon en fonction de la pression appliquée. Les logiciels donnent généralement le volume de mercure par unité de masse du matériau (mL/g)

A la fin des paliers d'injection, il est possible de compléter l'essai par une phase d'extraction du mercure en appliquant des paliers de pressions décroissantes jusqu'à la pression atmosphérique. Il est connu que le cycle d'injection – extraction du mercure n'est généralement pas réversible et qu'une quantité de mercure reste généralement piégée à l'intérieur de l'échantillon à la fin de l'extraction.

IV.4.3 Les matériaux testés :

Les échantillons de sable limoneux de Gavet soumis aux essais de porosimétrie par injection de mercure diffèrent dans leur mode de préparation. Notre objectif est d'étudier dans un premier temps l'influence de l'énergie de compactage et de la teneur en eau au moment du compactage sur la distribution porale du matériau compacté, puis dans un second temps d'analyser les propriétés de rétention de ces matériaux compactés en relation avec les distributions porales observées.

Pour ces essais de porosimétrie au mercure et comme lors des paragraphes précédents, le sable limoneux de Gavet passant à 2 mm est utilisé et trois niveaux d'énergie de compactage dans le moule CBR sont considérés :

- Compacté à 25 coups par couche (OPN - 30), soit $E = 271 \text{ kNm/m}^3$
- Compacté à 55 coups par couche (Optimum Proctor Normal), soit $E = 597 \text{ kNm/m}^3$
- Compacté à 85 coups par couche (OPN + 30), soit $E = 922 \text{ kNm/m}^3$.

De plus, nous avons souhaité pour chacun de ces trois niveaux d'énergie de compactage étudier la distribution porale en considérant 3 teneurs en eau différentes de fabrication : une teneur en eau correspondant plus ou moins à la valeur de l'Optimum, une teneur en eau inférieure à celle de l'optimum (échantillon fabriqué du côté sec de l'optimum), une teneur en eau supérieure à celle de l'optimum (échantillon fabriqué du côté humide de l'optimum). Les caractéristiques de fabrication (énergie de compactage, teneur en eau) de l'ensemble des échantillons soumis aux essais de porosimétrie au mercure sont rassemblées dans le Tableau IV-6.

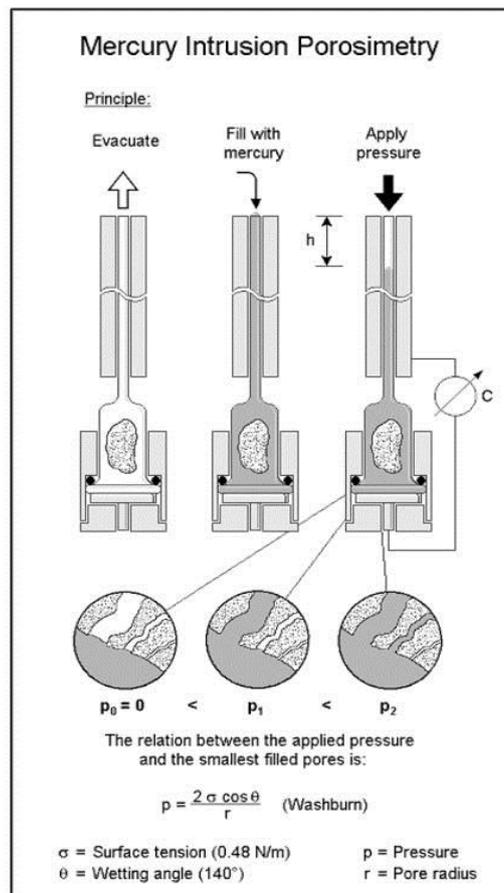


Figure IV-35 Principe d'essai porosimétrie au mercure (PATI, 2010)

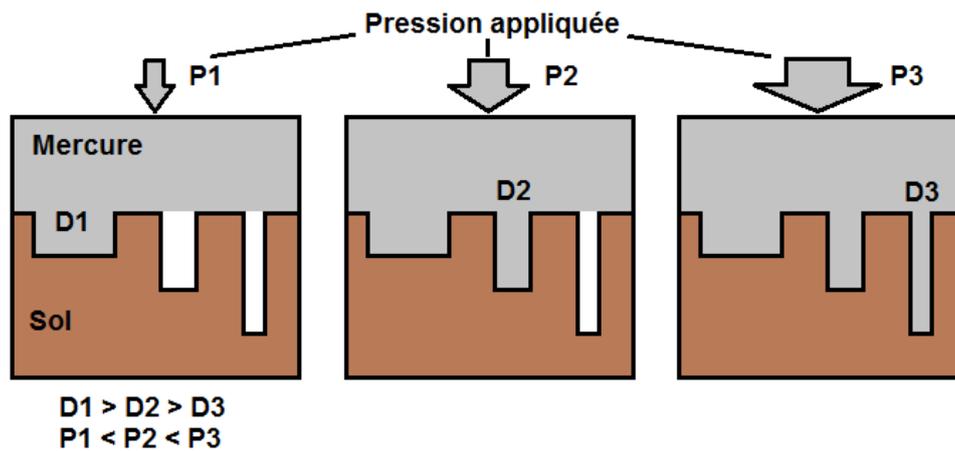


Figure IV-36 Principe de l'essai de porosimétrie au mercure

Matériaux	Energie de compactage	Winitiale	ρ_d initiale
Sable limoneux Livet-Gavet passant à 2 mm	Compacté à 25 coups par couche $E = 271 \text{ kNm/m}^3$	10.8 %	1.78 t/m ³
		12.1 %	1.82 t/m ³
		13.1 %	1.77 t/m ³
	Compacté à 55 coups par couche $E = 597 \text{ kNm/m}^3$	8.4 %	1.79 t/m ³
		10.6 %	1.87 t/m ³
		11.9 %	1.86 t/m ³
		12.8 %	1.84 t/m ³
	Compacté à 85 coups par couche $E = 922 \text{ kNm/m}^3$	9.3 %	1.95 t/m ³
		10.7 %	1.98 t/m ³
		11.9 %	1.95 t/m ³

Tableau IV-6 Caractéristiques de fabrication des différents échantillons de sable limoneux de Gavet testés au porosimètre mercure.

IV.4.4 Préparation des échantillons :

Le matériau après séchage a été préparé à la teneur en eau souhaitée par malaxage et compacté dans le moule CBR (Figure IV-37). Entre deux couches de matériau, trois papiers filtres Whatman 42 sont positionnés pour mesurer la succion. Cette méthode a été décrite dans le chapitre 3 de cette thèse consacrée aux essais Proctor, IPI et courbes d'iso-succion. Une fois mesurée la densité sèche à la fin du compactage, l'éprouvette est sortie du moule CBR,

enveloppée dans un film plastique transparent, puis laissé au repos pendant une semaine dans une salle climatisée pour obtenir l'équilibre de succion.

Après une semaine, l'éprouvette est coupée en plusieurs morceaux. D'une part, les papiers filtres placés dans l'éprouvette sont récupérés pour la mesure de succion. D'autre part :

- Deux échantillons de forme parallélépipédique d'environ 2 cm^3 de volume ($V=2 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$) sont taillés dans un morceau du sol de la 2^{ème} couche pour les essais de porosimétrie. Ces échantillons sont ensuite séchés en étuve à 30° C jusqu'à ce que la masse reste constante. Ce séchage doux est une condition préalable à l'essai de caractérisation au porosimètre mercure.
- Trois échantillons de sol sont prélevés pour déterminer la teneur en eau finale de l'éprouvette,
- Plusieurs échantillons sont prélevés pour l'essai de rétention d'eau.
- Enfin une partie de l'éprouvette est de nouveau entourée de film plastique et gardée en réserve dans une salle climatisée en cas de problème lors des essais.

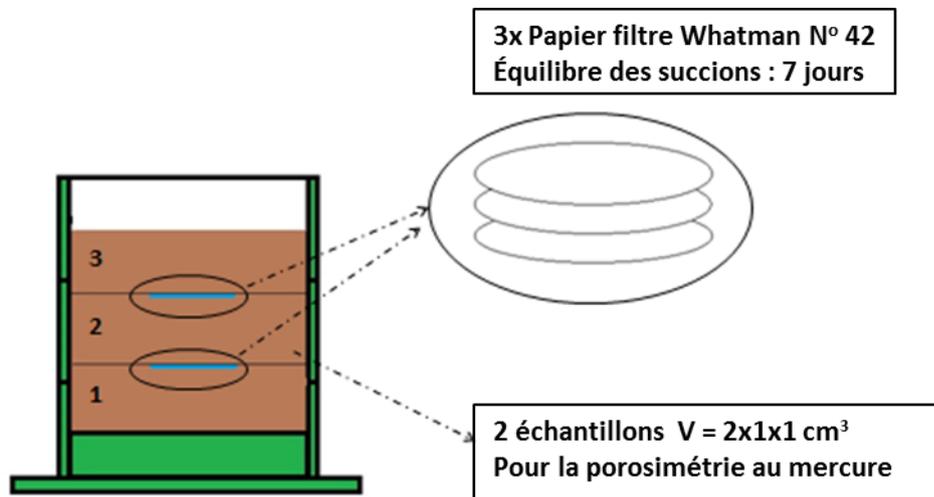


Figure IV-37 Principe de préparation des échantillons testés au porosimètre mercure

IV.5 Analyse des résultats des essais de porosimétrie au mercure

IV.5.1 Echantillons préparés à énergie de compactage constante et teneur en eau variable

Les figures (Figure IV-38, Figure IV-39, Figure IV-40) présentent l'ensemble de résultats des essais de porosimétrie au mercure réalisés sur des échantillons de sable limoneux de Gavet préparés à même énergie de compactage mais à différentes teneurs en eau.

Tout d'abord on étudie les résultats pour le matériau compacté à 25 coups/couches. La Figure IV-38 donne les volumes incrémentaux d'intrusion du mercure en fonction du diamètre des

pores. La petite figure incrustée à droite donne la position des échantillons de sol testés dans le diagramme Proctor.

Pour la teneur en eau de compactage de 12.1 % ($w_{op25}+0.3$ %), qui peut être considérée comme très proche de celle de l'Optimum ($w_{op25} = 11.8$ %), la courbe rouge donne une distribution bimodale avec deux pics principaux. Le pic de diamètre de 0.59 μm correspond aux pores intra-agrégats (ou micropores) et celui de 6 μm aux pores inter-agrégats (macropores). La limite du diamètre séparant ces deux familles de pores peut être fixée à 1.5 μm .

Du côté sec de l'Optimum, la courbe noire correspondant à la teneur en eau de compactage de 10.8% ($w_{op25}-1.0$ %) a la même forme que celle des échantillons préparés à la teneur en eau de l'Optimum. On observe aussi une distribution bimodale avec deux pics principaux à 0.389 μm et à 8.8 μm . L'amplitude du pic des micropores du côté sec est inférieure à celui de l'optimum, alors que l'amplitude du pic des macropores est plus grande.

Du côté humide de l'Optimum ($w = 13.2$ % = $w_{op25}+1.4$ %), la courbe bleue présente une distribution unimodale avec un seul pic correspondant à un diamètre de pores de l'ordre de 0.78 μm caractéristique de micropores. Notons que l'amplitude de ce pic est supérieure à l'amplitude des pics observés dans le domaine des micropores pour les matériaux préparés du côté sec et à l'optimum. Il semble donc que le volume occupé par les micropores soit plus important dans le cas du matériau préparé du côté humide comparativement aux deux autres matériaux.

Pour une même énergie de compactage, la Figure IV-38 montre par ailleurs que le diamètre des micropores tend à augmenter lorsque la teneur en eau de compactage du matériau augmente (décalage vers la droite sur la Figure IV-38 des diamètres mesurés au pic dans le domaine de micropores lorsque la teneur en eau de préparation augmente). Si l'on suppose qu'à partir d'un certain état de désaturation, ce sont les micropores qui régissent la valeur de succion dans le matériau, on peut imaginer sur la base de la loi de Jurin que pour un même degré de saturation pris à cet état, la succion dans le matériau sera décroissante lorsque la teneur en eau de compactage du matériau augmente. En d'autres termes et pour une même énergie de compactage, la courbe de rétention du matériau doit se décaler vers la droite dans le plan (S_r , $\log(s)$) (sens des succions croissante) en même temps que la teneur en eau de compactage diminue.

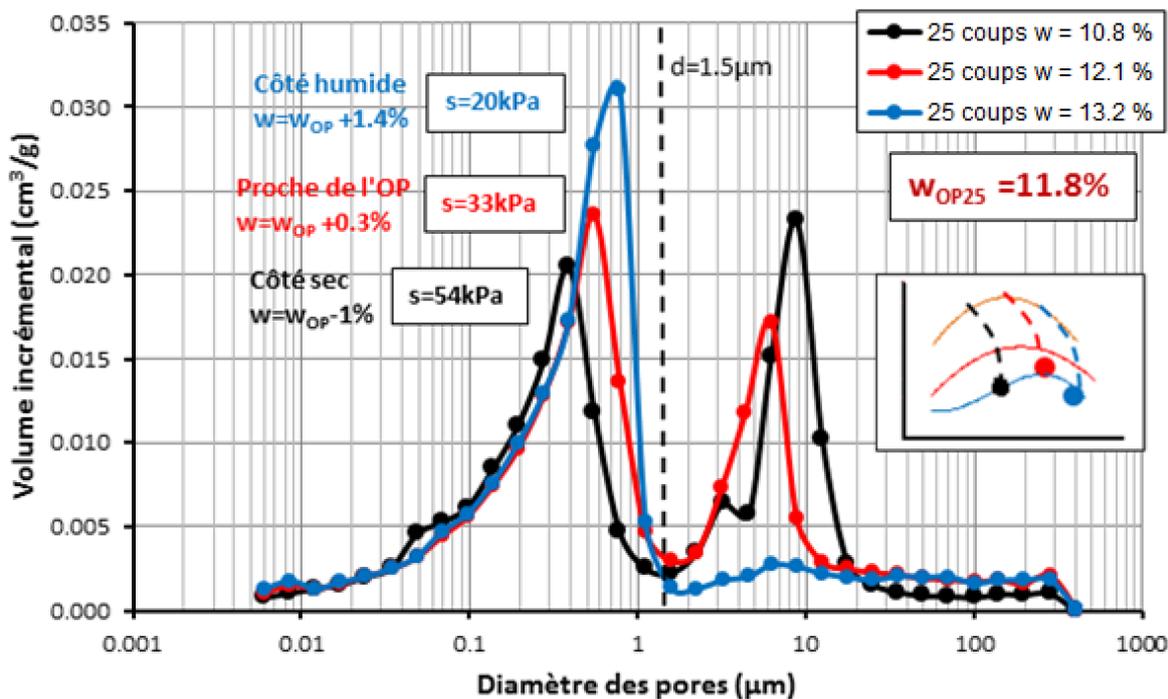


Figure IV-38 Evolution des volumes incrémentaux de mercure injecté en fonction du diamètre des pores (cas du sable limoneux de Gavet compacté à 25 coups/couche).

La Figure IV-39 donne pour le matériau compacté à 55 coups/couches les volumes incrémentaux d'intrusion du mercure en fonction du diamètre des pores. Pour ce niveau d'énergie de compactage, quatre teneurs en eau de compactage ont été considérées. Les résultats obtenus sont très similaires à ceux décrits précédemment.

Ainsi du côté sec de l'optimum ($w = 8.5 \% = w_{op}-2.7 \%$ et $w = 10.6 \% = w_{op}-0.6 \%$), les résultats indiquent une double porosité du matériau avec deux pics principaux correspondant au domaine des micropores et à celui des macropores. Pour le domaine des pores intra-agrégats (micropores), le diamètre au pic est de $0.389 \mu\text{m}$ pour $w = 8.5\%$ et de $0.5 \mu\text{m}$ pour $w = 10.6 \%$. Pour le domaine des pores inter-agrégat (macropores), le diamètre au pic est de $3 \mu\text{m}$ pour ces deux teneurs en eau de compactage. Avec l'augmentation de la teneur en eau de compactage, on observe entre ces deux échantillons une diminution de la quantité de macropores et une augmentation de la quantité de micropores.

Du côté humide de l'optimum ($w = 11.8 \% = w_{op}+0.6 \%$ et $w = 12.8 \% = w_{op}+1.6 \%$), les courbes bleue et violette ont la même forme et sont quasi superposables. Elles ne présentent qu'un seul pic situé le domaine des micropores et correspondant au diamètre de $0.55 \mu\text{m}$. L'amplitude de ce pic est supérieure aux amplitudes des pics observés du côté sec. Ainsi la tendance observée du côté sec est confirmée : l'augmentation de la teneur en eau de compactage tend à réduire la quantité de macropore (voire les faire disparaître à droite de l'optimum) et augmenter la quantité de micropores.

Notons enfin que comme pour le matériau compacté à 25 coups/couches, nous observons dans le domaine des micropores, des diamètres de pores au pic qui tendent à croître lorsque la teneur en eau de compactage augmente (léger décalage vers la droite observé sur la Figure IV-39 des

diamètres mesurés au pic dans le domaine de micropores lorsque la teneur en eau de préparation augmente). Comme indiqué précédemment et sur la base de la loi de Jurin, ce comportement devrait aller de pair avec un décalage vers la droite dans le plan ($S_r, \log(s)$) (sens des succions croissante) de la courbe de rétention du matériau lorsque la teneur en eau de compactage diminue.

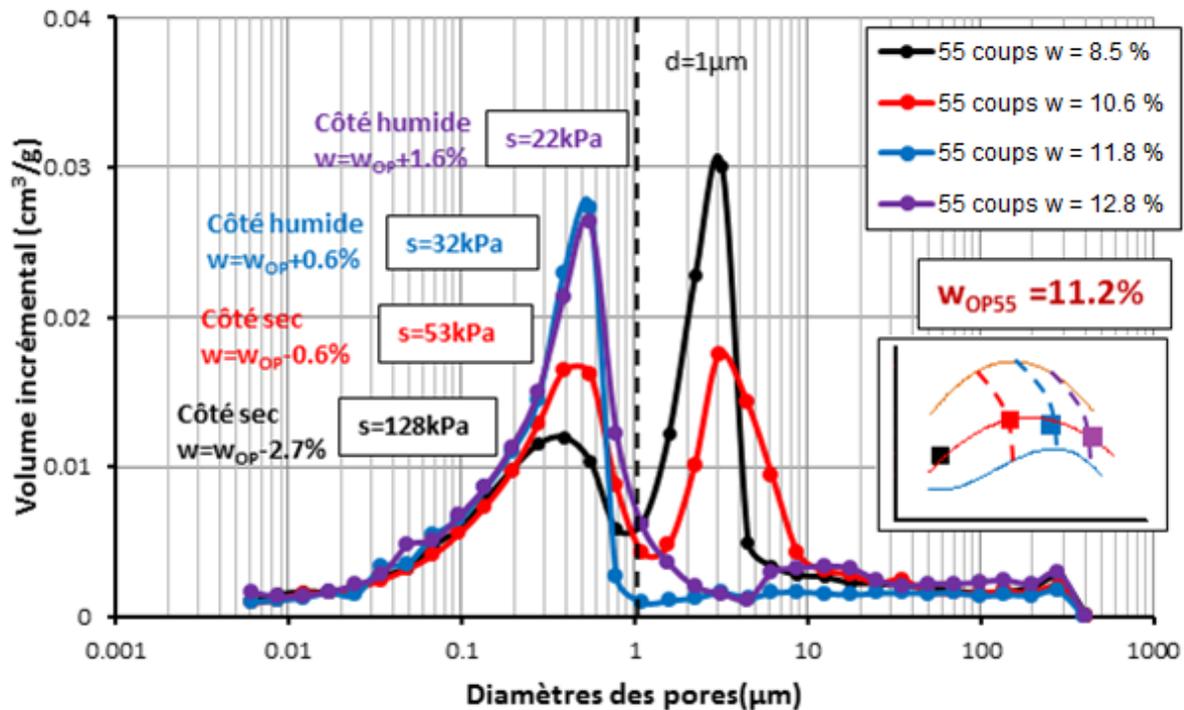


Figure IV-39 Evolution des volumes incrémentaux de mercure injectés en fonction du diamètre des pores (cas du sable limoneux de Gavet compacté à 55 coups/couche).

Les résultats obtenus pour la troisième énergie de compactage (85 coups/couche) confirment les observations précédentes (Figure IV-40).

Ainsi, on retrouve deux pics principaux pour le matériau préparé du côté sec de l'optimum ($w = 9.3\% = w_{op85} - 1.4\%$), l'un dans le domaine des micropores correspondant à un diamètre poral de $0.389\ \mu\text{m}$, l'autre dans le domaine des macropores correspondant à un diamètre de pores de $3\ \mu\text{m}$. En revanche du côté humide de l'optimum ($w = 12.0\% = w_{op85} + 1.3\%$), un seul pic est observé correspondant à des micropores de diamètre $0.55\ \mu\text{m}$.

Les résultats obtenus dans le cas du matériau préparé à la teneur en eau voisine de l'optimum (courbe rouge) sont peu classiques. Ainsi deux pics principaux sont observés dans le domaine des micropores. Ce résultat n'a pu être expliqué et pourrait être dû à un biais expérimental. Nous n'avons pas eu la possibilité de reproduire cette mesure de porosimétrie sur un échantillon fabriqué dans des conditions identiques.

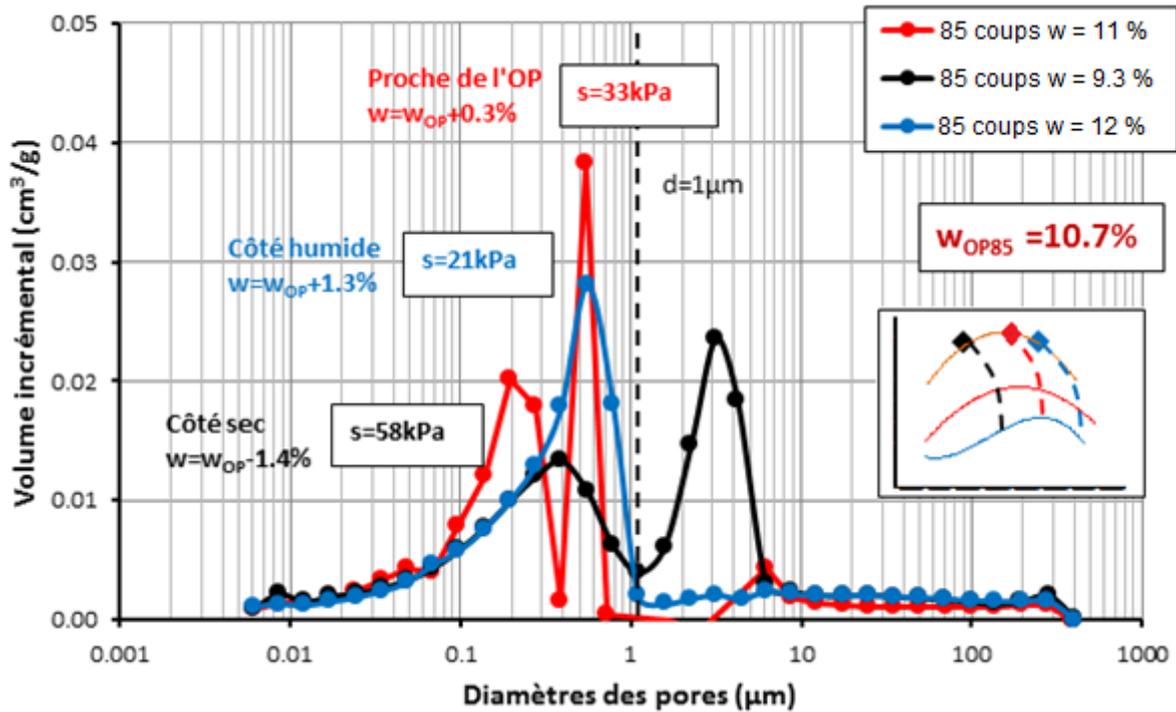


Figure IV-40 Evolution des volumes incrémentaux de mercure injectés en fonction du diamètre des pores (cas du sable limoneux de Gavet compacté à 85 coups/couche).

Le Tableau IV-7 regroupe toutes les données et résultats des essais de porosimétrie par injection de mercure réalisés pour les trois niveaux d'énergie de compactage sur le sable limoneux de Gavet. On y trouve en particulier les diamètre représentatifs des micropores et macropores pour les différents échantillons.

Energie de compactage	w (%) selon OP	w (%)	Micropores		Macropores	
			d_{picMax} (µm)	Amplitude	d_{picMax} (µm)	Amplitude
25 coups par couche 271 kJ/m ³	W _{OP} -1.0%	10.8	0.39	0.020	8.8	0.023
	W _{OP} +0.3%	12.1	0.55	0.024	6.0	0.017
	W _{OP} +1.4%	13.2	0.78	0.031	6.0	0.003
55 coups par couche 597 kJ/m ³	W _{OPN} -2.7%	8.5	0.39	0.012	3.0	0.031
	W _{OPN} -0.6%	10.6	0.50	0.016	3.0	0.017
	W _{OPN} +0.6%	11.8	0.55	0.028	3.0	0.001
	W _{OPN} +1.6%	12.8	0.55	0.027	10.0	0.003
85 coups par couche 922 kJ/m ³	W _{OP} -1.4%	9.3	0.39	0.014	3.0	0.024
	W _{OP} +0.3%	11	0.55	0.038	6.0	0.004
	W _{OP} +1.3%	12	0.55	0.028	8.0	0.002

Tableau IV-7 Tableau de récapitulation des essais porosimétriques au mercure sur sable Limoneux Livet-Gavet à différentes énergies de compactage

IV.5.2 Echantillons préparés à teneur en eau constante et énergie de compactage variable

Pour compléter la base de données décrites précédemment, nous avons réalisé des essais de porosimétrie par injection de mercure sur des échantillons de sable limoneux de Gavet préparés à une teneur en eau sensiblement constante et compactés à trois niveaux d'énergie différents. Cette expérience a été réalisée pour deux gammes de teneur en eau différentes : l'une comprise entre 10.6 % et 11 % correspondant à w_{OPN} pour les énergies de compactage de 55 et 85 coups/couche, l'autre comprise entre 11.5 % et 12.1 %, donc située du côté humide de w_{OPN} des énergies de compactage de 55 et 85 coups/couche. La Figure IV-41 et la Figure IV-42 présentent les résultats de ces deux séries d'essais.

Pour les matériaux préparés à une teneur en eau comprise entre 10.6 % et 11 %, nous observons que l'augmentation du niveau de l'énergie de compactage tend à progressivement refermer les macropores présents dans le matériau. Ainsi le passage d'une énergie de 25 coups / couche (courbe bleu) à une énergie de 55 coups / couche (courbe rouge) entraîne une diminution du volume de macropores accompagnée d'une légère diminution de leur diamètre. Dans le même temps, les micropores apparaissent peu modifiés par cette variation d'énergie de compactage.

Le passage d'une énergie de compactage de 55 coups/couche (courbe rouge) à une énergie de compactage de 85 coups/couche (courbe orange) entraîne la fermeture complète des macropores et une augmentation du volume des micropores.

Pour la deuxième gamme de teneur en eau (w compris entre 11.5 % et 12.1 %), une tendance identique est observée (Figure IV-42). Si une distribution bimodale des diamètres de pores est observée pour les échantillons compactés à faible niveau d'énergie (25 coups / couche, courbe bleu), celle-ci disparaît au profit d'une distribution unimodale lorsque le niveau d'énergie de compactage passe à 55 coups/couche et 85 coups/couche. Pour ces deux plus fortes énergies, seul un pic dans le domaine des micropores est observé et correspond à un diamètre de pores de l'ordre de $0.55 \mu\text{m}$ commun aux trois énergies de compactage.

Par conséquent, les résultats décrits précédemment confirment le rôle de l'énergie de compactage sur la structure du sol : si les micropores (diamètre, volume) sont peu influencés par l'énergie de compactage, en revanche les macropores, lorsqu'ils existent, tendent à se refermer lorsque l'énergie de compactage augmente.

IV.5.3 Analyse des courbes d'intrusion et d'extrusion de mercure en fonction de l'énergie de compactage

Les Figure IV-43, Figure IV-44, Figure IV-45 donnent pour les trois niveaux d'énergie de compactage (25, 55 et 85 coups / couche) les résultats des essais de porosimétrie au mercure en terme de volume cumulé de mercure présent dans l'échantillon. Sur ces différentes figures, les mesures obtenues au cours des chemins d'intrusion (flèche montante) et d'extrusion (flèche descendante) sont présentées. A noter que les résultats d'extrusion sont limités aux pores inférieurs à environ $8 \mu\text{m}$ qui est une limite des porosimètres au mercure.

En observant la Figure IV-43 correspondant aux résultats sur matériau compacté à 25 coups par couche, on note que :

- Les échantillons ont une porosité initiale assez proche (de l'ordre de 0.33). Le volume maximum d'intrusion de mercure est quasiment identique pour les trois échantillons.
- Le chemin d'intrusion du côté humide a un seul point d'inflexion situé au diamètre d'environ 1 μm ; ce qui traduit une distribution unimodale de la distribution porale.
- Les chemins d'intrusion de l'Optimum Proctor et du côté sec ont deux points d'inflexion. Le premier se situe vers 1 μm , et le deuxième vers un plus grand diamètre de 10 μm ; ce qui se traduit par une distribution bimodale de la distribution porale. En dehors de ces deux points d'inflexion, les différentes courbes ont une allure très similaire entre elles au cours des phases d'intrusion et d'extrusion.
- Les chemins d'extrusion ne possèdent pas de point d'inflexion, probablement à cause de la limite technique de 8 μm .
- En accord avec les résultats obtenus dans le cas des sols fins et présentés dans la bibliographie, les chemins d'intrusion et d'extrusion du mercure ne sont pas réversibles.

Concernant la Figure IV-44 représentant les résultats sur matériau compacté à 55 coups par couche, on note que :

- Mis à part l'échantillon préparé à la teneur en eau de 11.8 % (courbe bleu), les échantillons compactés à 55 coups/couche aux différents teneurs en eau ($w_{OP}-0.6\%$, $w_{OP}-1\%$, $w_{OP}+2.7\%$) présentent des porosités très proches, de l'ordre de 0.33.
- Seuls les matériaux compactés du côté humide de l'optimum présentent des courbes d'injection avec un seul point d'inflexion qui traduit la distribution unimodale du réseau poral.
- Les courbes d'injection des deux matériaux compactés au voisinage de l'Optimum Proctor et du côté sec présentent deux points d'inflexion. Ces courbes caractérisent donc une distribution bimodale du réseau poral.
- Si l'on compare le second point d'inflexion des courbes d'injection des matériaux compactés à 25 et 55 coups/couche, on s'aperçoit que ce point se décale dans la direction des diamètres de pores décroissants lorsque l'on passe de 25 coups à 55 coups/couche. En d'autres termes, pour les trois échantillons compactés à 55 coups / couche, le réseau des micropores présente un diamètre nominal (pic dans la représentation des volumes incrémentaux d'injection) inférieur à ceux observés pour les micropores des échantillons compactés à 25 coups/couche.

Enfin en ce qui concerne la Figure IV-45 donnant les courbes d'injection du matériau compacté à 85 coups par couche, on note que :

- Les trois échantillons compactés à trois teneurs en eau différentes ($w_{OP}-1.4\%$, $w_{OP}+0.3\%$, $w_{OP}+1.7\%$) présentent des porosités initiales comprises entre 0.26 et 0.32 ; la porosité minimale étant retrouvée pour l'échantillon compacté à la teneur en eau proche de l'optimum.
- Pour ce fort niveau d'énergie de compactage, seul l'échantillon fabriqué du côté sec de l'optimum présente une courbe d'injection avec deux points d'inflexion caractérisant la distribution bimodale de son réseau poral

- La courbe d'injection du matériau fabriqué à une teneur en eau voisine de l'optimum ($w_{OP}+0.3\%$, courbe rouge) présente un point singulier entre les diamètres de 0.4 mm et 0.6 mm qui reste inexpliqué et qui correspond au double pic observé sur la Figure IV-40.

En conclusion de cette analyse des courbes de volumes cumulés de mercure injectés, nous pouvons faire plusieurs remarques :

- Etant donné que la pénétration du mercure dans l'échantillon immergé se fait naturellement par contamination à partir de la surface, il est courant dans le cas des sols fins et pour les faibles pressions d'injection qu'une grande partie des pores situés au cœur de l'échantillon et potentiellement injectables ne soit pas explorés par le mercure. Dans le cas du sable limoneux de Gavet, il ne semble pas que ce problème de contamination opère puisque dès les faibles pressions, un volume conséquent et croissant de mercure pénètre dans l'échantillon.
- Les courbes de volumes cumulés de mercure injectés sont en bon accord avec les courbes des volumes incrémentaux injectés analysée dans le paragraphe précédent et généralement obtenues par différenciation logarithmique ; ce qui atteste de la fiabilité du logiciel utilisé pour l'interprétation des essais de porosimétrie au mercure.
- Mis à part pour les échantillons compactés à 85 coups /couche, les porosités initiales des échantillons de sol compactés déduites des essais au porosimètre au mercure ne permettent pas de retrouver une gradation des porosités initiales conforme à celles des courbes de compactage Proctor.

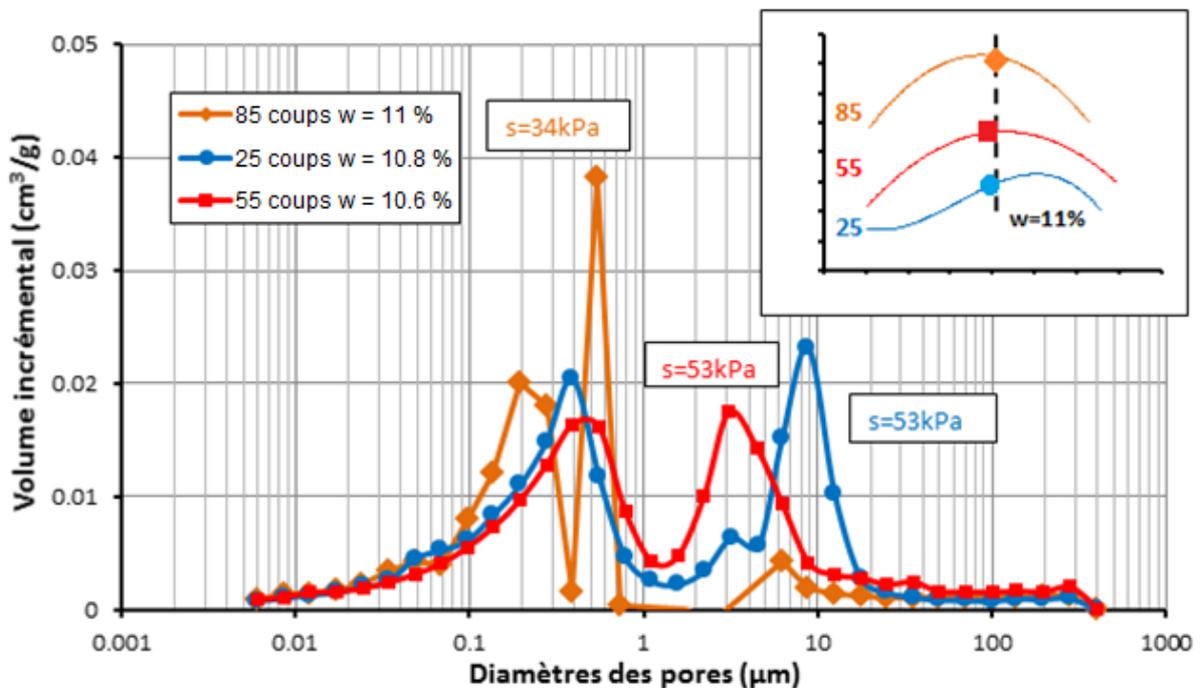


Figure IV-41 Evolution des volumes incrémentaux de mercure injectés en fonction du diamètre des pores (cas du sable limoneux de Gavet compacté, $w \sim 11\%$).

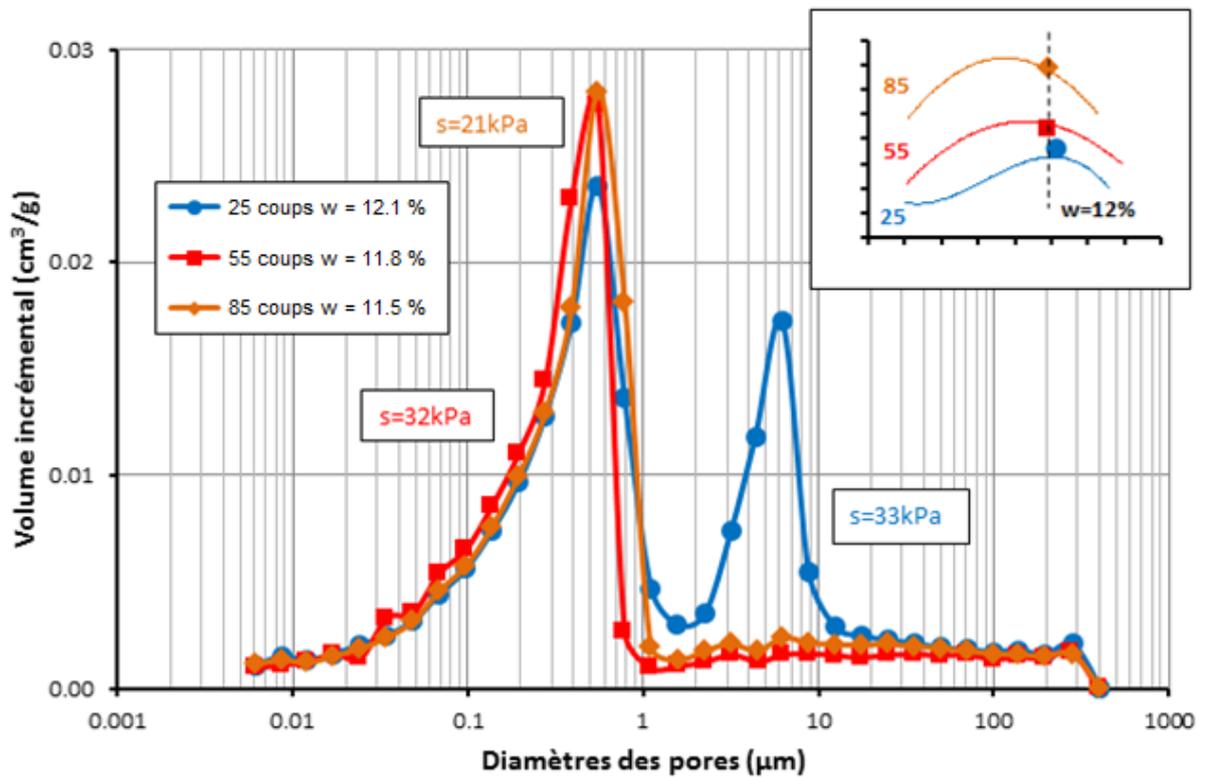


Figure IV-42 Evolution des volumes incrémentaux de mercure injectés en fonction du diamètre des pores (cas du sable limoneux de Gavet compacté, $w \sim 12\%$).

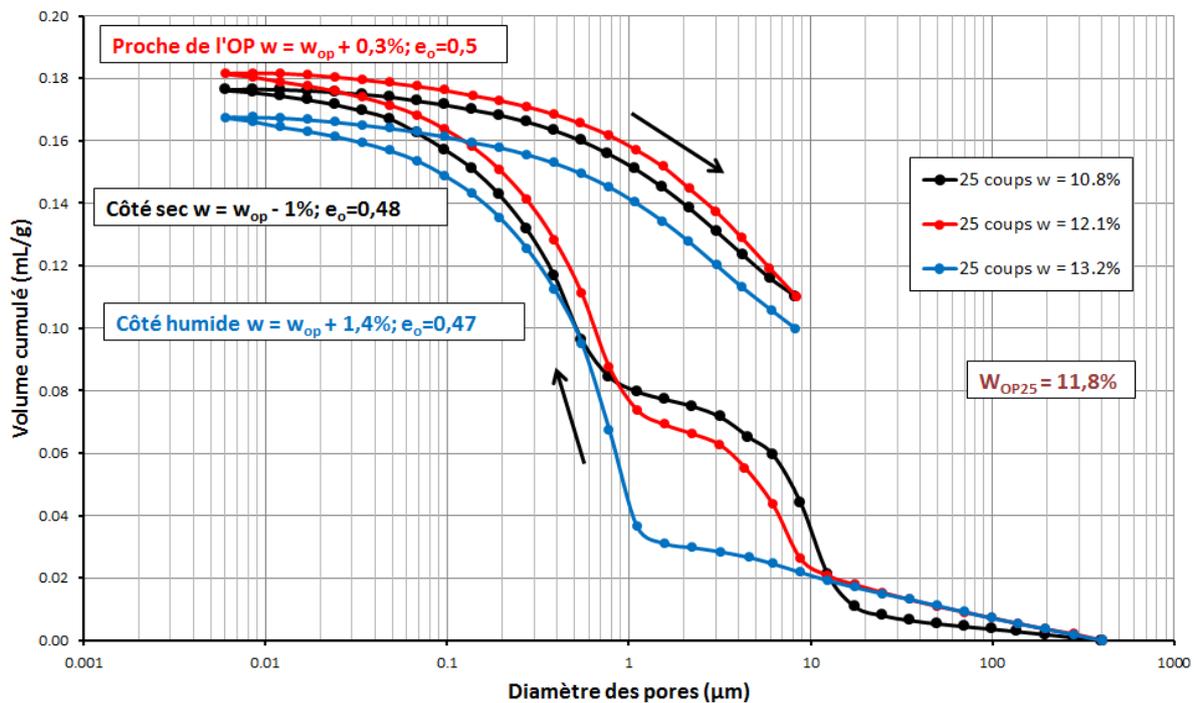


Figure IV-43 : Evolution du volume cumulé de mercure au cours des phases d'intrusion et d'extrusion en fonction du diamètre de pores (cas du sable limoneux de Gavet compacté à 25 coups/couche et teneur en eau initiale variable)

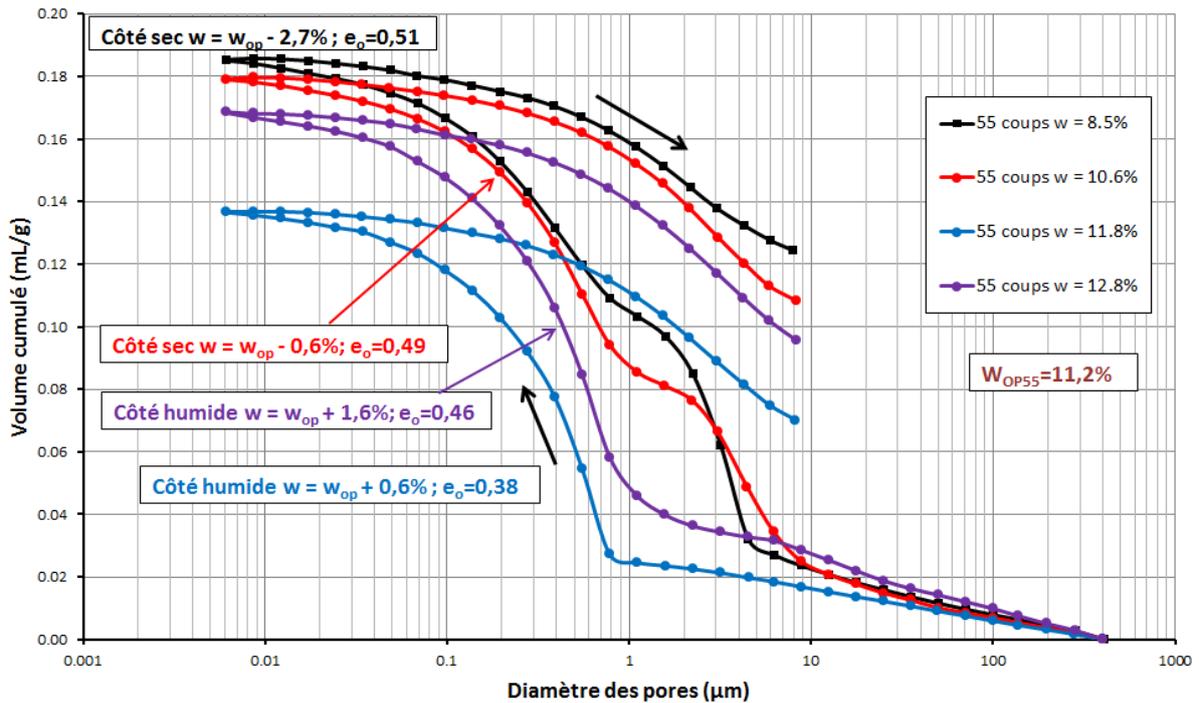


Figure IV-44 : Evolution du volume cumulé de mercure au cours des phases d'intrusion et d'extrusion en fonction du diamètre de pores (cas du sable limoneux de Gavet compacté à 55 coups/couche et teneur en eau initiale variable)

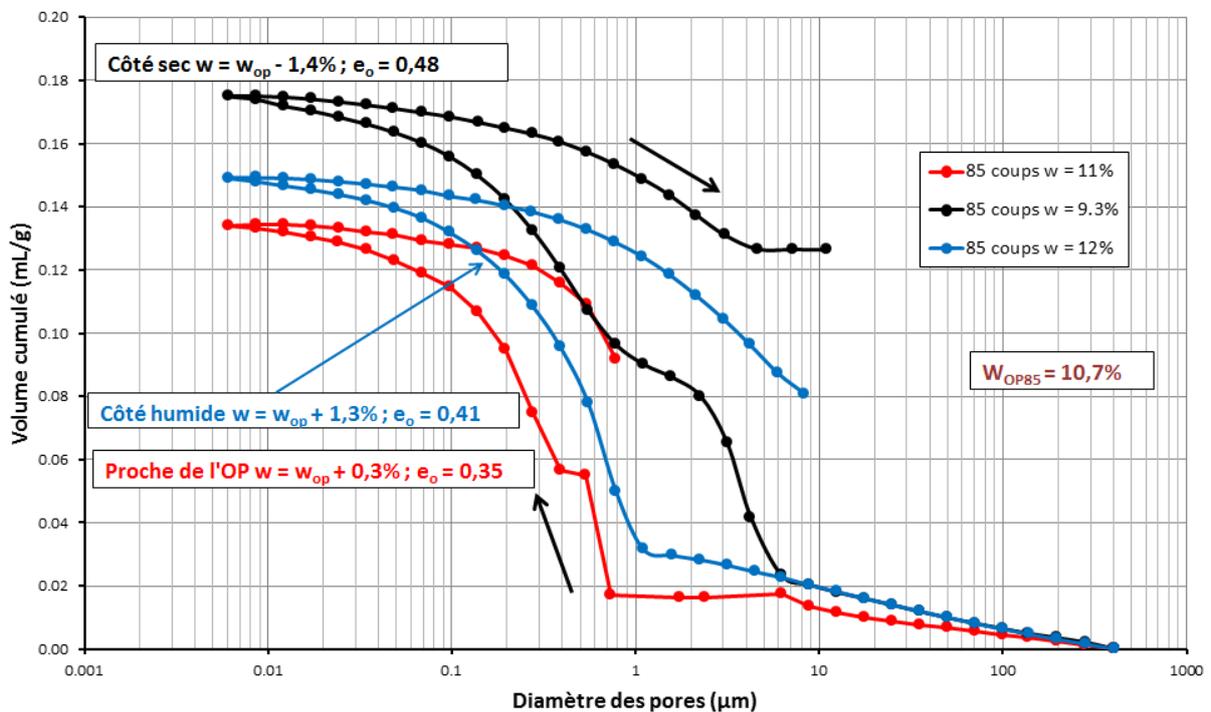


Figure IV-45 : Evolution du volume cumulé de mercure au cours des phases d'intrusion et d'extrusion en fonction du diamètre de pores (cas du sable limoneux de Gavet compacté à 85 coups/couche et teneur en eau initiale variable)

Le Tableau IV-8 représente la quantité des pores occupés par le mercure à la fin d'essai d'intrusion pour chaque matériau. On note que la plupart des essais indique qu'au moins 97 % des pores sont occupés. Pour notre matériau on peut considérer que tous les pores sont remplis par le mercure à la fin d'essai d'intrusion.

Energie de compactage	w (%)	e _o	volume cumulé (ml/g)	e occupé	volume des pores occupé par mercure (%)
25 coups par couche 271 kJ/m ³	10.8	0.4688	0.176	0.4793	102
	12.1	0.4859	0.181	0.4934	102
	13.2	0.4341	0.167	0.4553	105
55 coups par couche 597 kJ/m ³	8.5	0.4874	0.185	0.5037	103
	10.6	0.4743	0.179	0.4872	103
	11.8	0.3626	0.137	0.3716	102
85 coups par couche 922 kJ/m ³	12.8	0.4477	0.169	0.4583	102
	9.3	0.4637	0.175	0.4760	103
	11.0	0.4042	0.134	0.3648	90
	12.0	0.3909	0.149	0.4056	104

Tableau IV-8 : Volume poral injecté par le mercure pour chaque énergie de compactage et différentes teneurs en eau (cas du sable limoneux de Gavet compacté).

IV.6 Relations entre propriétés de rétention et distribution porale du matériau

IV.6.1 Influence de la distribution porale sur la succion d'entrée d'air

IV.6.1.a Résultats de la première campagne expérimentale

Vanapalli (Vanapalli et al, 1999) a décrit une courbe de drainage en trois zones principales : la zone quasi saturée, la zone transitoire ou le sol commence à se désaturer et la zone résiduelle de non-saturation (Figure IV-46). La succion d'entrée d'air correspond au premier point d'inflexion de la courbe et indique la valeur frontière de la zone quasi-saturée et la zone transitoire. En d'autres termes, la succion d'entrée d'air est la succion à partir de laquelle le sol commence à se désaturer.

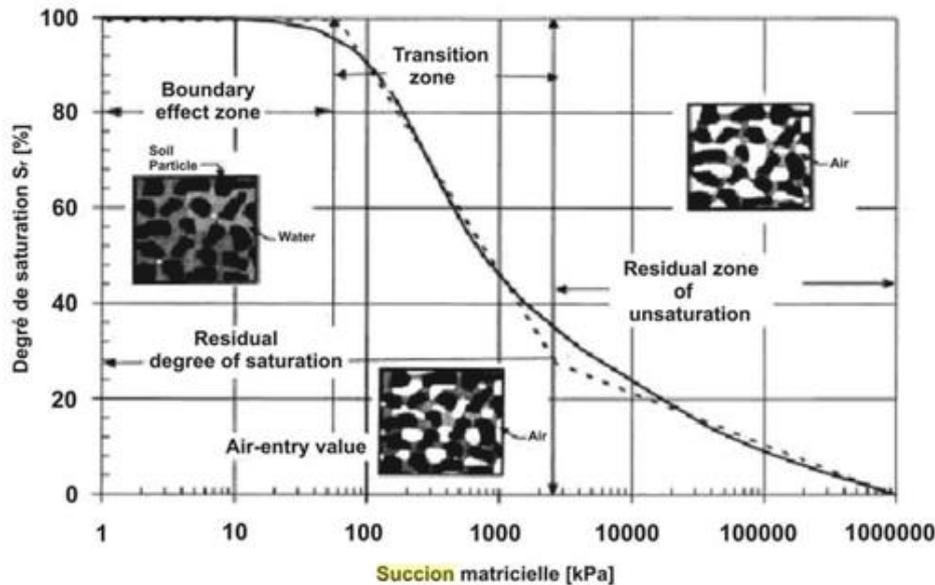


Figure IV-46 Définition des zones caractéristiques de la courbe de rétention (VANAPALLI, et al., 1999)

Dans les paragraphes précédents de cette thèse, la succion d'entrée d'air est déterminée de manière conventionnelle en linéarisant la courbe de rétention dans la zone de transition et en considérant la succion d'entrée d'air égale à la succion au point d'intersection de cette partie linéarisée et la ligne horizontale de saturation $S_r = 1$.

En observant les courbes de rétention d'eau obtenues lors de nos essais réalisés sur le sable limoneux de Gavet, on note toutefois que dans certains cas le sol commence à se désaturer à des niveaux de succion inférieurs à la valeur de succion d'entrée d'air déterminée de manière conventionnelle. Ce comportement est en particulier visible sur la Figure IV-47 pour les deux courbes de rétention du matériau préparé aux teneurs en eau de l'optimum (w_{OP25} et w_{OP55}) et compacté sous 25 et 55 coups par couche (courbes bleu et rouge). Dans de tels cas, la courbe de rétention obtenue sur chemin de drainage présente au début de la phase de transition deux pentes distinctes qui semblent témoigner d'un changement de comportement lors du processus de drainage du matériau. Toujours sur la Figure IV-47, ce type de comportement n'est pas rencontré dans le cas de l'échantillons de sable limoneux préparé à w_{OP85} et compacté sous 85 coups/couche (courbe noire). Dans ce dernier cas, et aux incertitudes de mesure près, la courbe de drainage ne présente qu'un point d'inflexion en début de phase de transition et la valeur de succion d'entrée d'air déterminée de manière conventionnelle paraît pertinente.

Afin d'expliquer ces deux types de comportement, nous avons étudié les courbes de distribution porale de ces trois échantillons obtenues au porosimètre mercure. Nous nous sommes aperçus que le matériau compacté à 85 coups par couche, dont la courbe de rétention ne présentait qu'une seule pente dans la zone de transition, avait une distribution porale unimodale (courbe noire de la Figure IV-48). En revanche, les matériaux compactés à 25 et 55 coups/couche présentait des distributions porales bimodales (courbes bleu et rouge de la Figure IV-48). Ces dernières pourraient expliquer la double pente des courbes de rétention, avec l'existence de deux succions d'entrée d'air : l'une correspondant au macropores, l'autre correspondant aux micropores.

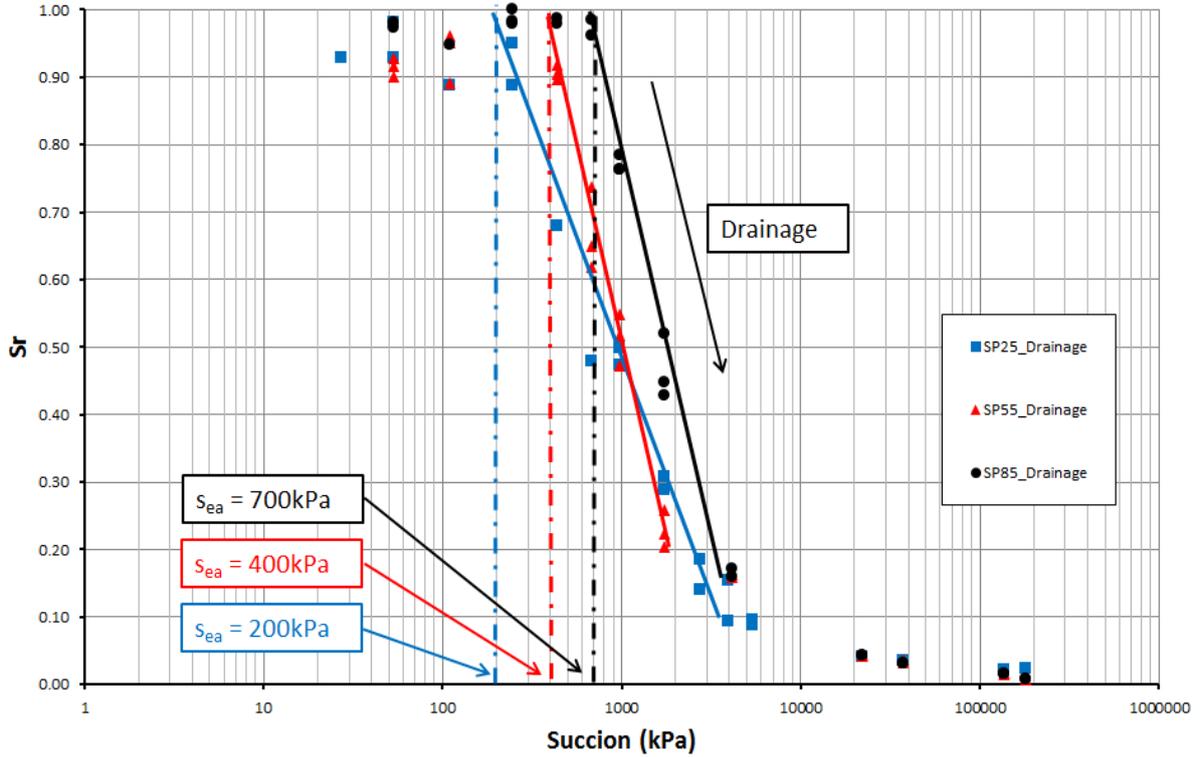


Figure IV-47 Courbes de drainage obtenues sur le sable limoneux de Gavet compacté à différents niveaux d'énergie.

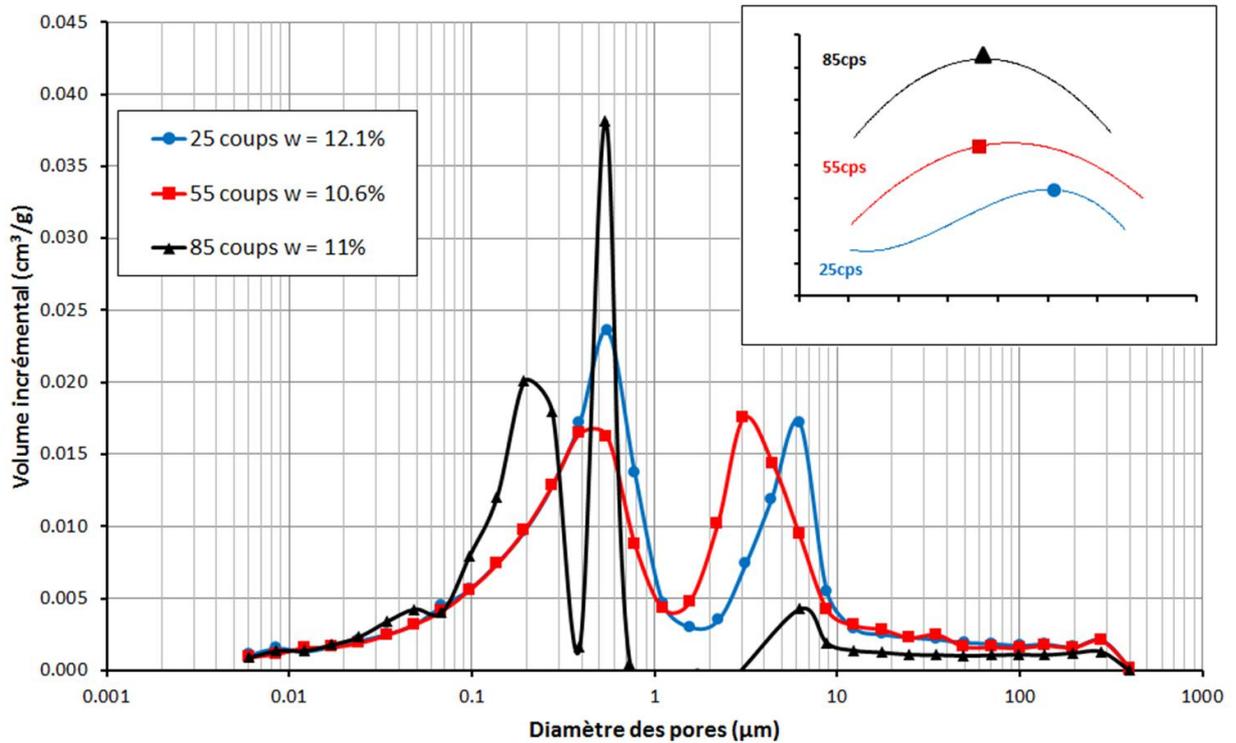


Figure IV-48 Evolution des volumes incrémentaux de mercure injectés en fonction du diamètre des pores pour des échantillons préparés à w_{OP} et compactés sous différents niveau d'énergie (cas du sable limoneux de Gavet)

IV.6.1.b Résultats de la seconde campagne expérimentale

Pour aller plus loin sur ce sujet et afin d'étudier la relation entre la forme de la courbe de rétention dans la zone de transition obtenue sur chemin de drainage et la structure porale du sol, nous avons réalisé une nouvelle campagne d'essais couplant des essais de rétention et des mesures au porosimètre au mercure.

Les nouveaux échantillons testés ont été compactés aux trois niveaux d'énergie utilisés jusqu'à présent : 25, 55 et 85 coups/couche. Pour un même niveau d'énergie, nous avons confectionné des échantillons du côté sec de l'optimum ou à l'optimum (censés présenter une distribution porale bimodale selon les observations faites aux paragraphes précédents) et des échantillons du côté humide de l'optimum (censés présenter une distribution porale unimodale selon les observations précédentes).

Lors de cette nouvelle campagne d'essais, il est à noter que les essais de rétention n'ont pas toujours été conduit au-delà de la zone de transition afin de gagner du temps pour leur interprétation et parce que la présente étude s'intéresse à la forme des courbes de rétention dans la zone de transition.

La Figure IV-49 représente les courbes de drainage et de porosimétrie au mercure du sable limoneux de Gavet préparé aux teneurs en eau de 12.1 % (correspondant à la teneur en eau à l'optimum) et 13.2% (côté humide de l'optimum) pour une énergie de compactage correspondant à 25 coups/couche.

Pour la teneur en eau à l'optimum (courbe rouge), la distribution porale est bimodale et la courbe de rétention du matériau sur chemin de drainage présente deux pentes dans la zone de transition. Une première succion d'entrée d'air peut être déterminée par l'intersection de la première droite (droite de plus faible pente) avec la droite horizontale de saturation ($S_r=1$). Dans le cas présent, cette première succion d'entrée d'air vaut 20 kPa et pourrait correspondre à la pénétration de l'air dans les macropores. D'après l'essai de porosimétrie associé, ceux-ci ont un diamètre nominal de l'ordre de 6 μm pour le matériau considéré ; ce qui correspond sur la base de la loi de Jurin à une succion de 24 kPa. Cette valeur est par conséquent compatible avec la valeur de 20 kPa déterminée graphiquement.

Toujours pour le matériau préparé à la teneur en eau de l'optimum (courbe rouge), une seconde succion d'entrée d'air peut être déterminée de manière conventionnelle par l'intersection de la seconde droite (droite de plus forte pente) avec la droite horizontale de saturation ($S_r=1$). Dans le cas du matériau considéré, cette succion d'entrée d'air (S_{EA}) vaut 200 kPa. Cette seconde succion d'entrée d'air pourrait correspondre à la pénétration de l'air dans les micropores puisque ceux-ci ont un diamètre nominal de 0.5 μm ; ce qui correspond à une succion de 290 kPa selon la loi de Jurin, compatible avec la valeur de 200 kPa trouvée graphiquement.

Si l'on conduit un raisonnement similaire pour le matériau préparé du côté humide de l'optimum (courbe bleu sur la Figure IV-49), on mesure cette fois ci graphiquement qu'une seule valeur de succion d'entrée d'air qui correspond à la succion d'entrée d'air conventionnelle (S_{EA}). En effet, aux incertitudes de mesure près, nous pouvons considérer que la courbe de rétention de ce matériau dans le domaine de transition ne présente qu'une seule

portion pouvant être linéarisée. La succion d'entrée d'air ainsi déterminée est de l'ordre de 400 kPa. Dans le même temps, l'analyse au porosimètre au mercure montre que ce matériau présente une distribution porale unimodale composée principalement de micropores de taille nominale 0.7 μm ; ce qui correspond à une succion de 210 kPa selon la loi de Jurin, du même ordre de grandeur que la valeur de 400kPa trouvée graphiquement.

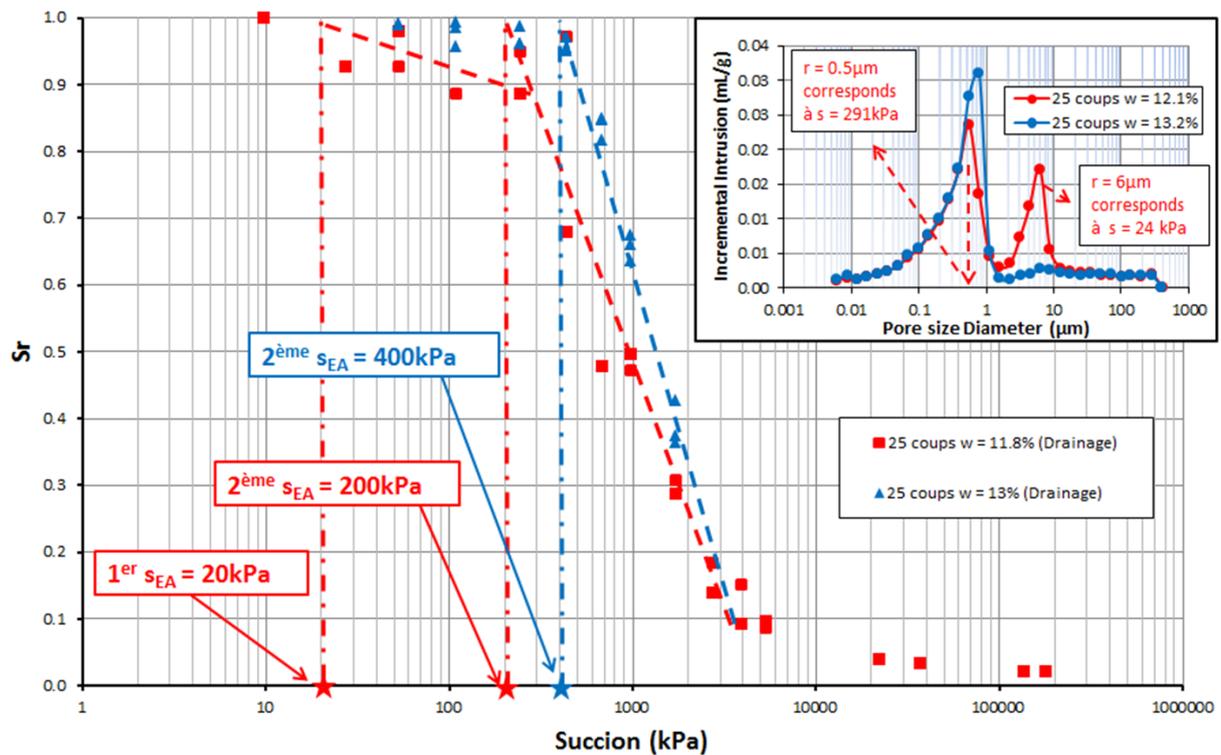


Figure IV-49 Résultats des essais de drainage et essais porosimétriques au mercure sur le sable limoneux de Gavet compacté à 25 coups/couche et à teneur en eau de 12.1 et 13.2 %.

Afin de vérifier la validité de ce raisonnement, nous allons le confronter à trois nouveaux résultats issus de la seconde campagne d'essais de rétention.

Tout d'abord la Figure IV-50 présente la courbe de rétention sur chemin de drainage et la distribution porale d'un échantillon de sable limoneux de Gavet compacté à 55 coups par couche, à une teneur en eau de 12.8 % située du côté humide de l'optimum. Pour ce matériau, la courbe de rétention dans le domaine de transition présente une seule portion rectiligne qui témoigne d'une désaturation subite du matériau à partir d'une succion d'entrée d'air conventionnelle (s_{EA}) de l'ordre de 400 kPa. La distribution porale de ce matériau mesurée au porosimètre au mercure est de type unimodale. Elle présente un pic situé dans le domaine des micropores correspondant à un diamètre de pores de 0.5 μm . Sur la base de la loi de Jurin, la succion correspondant à la pénétration de l'air dans ces micropores est de l'ordre de 290 kPa, ce qui est du même ordre de grandeur que la succion d'entrée d'air déterminée graphiquement (400 kPa).

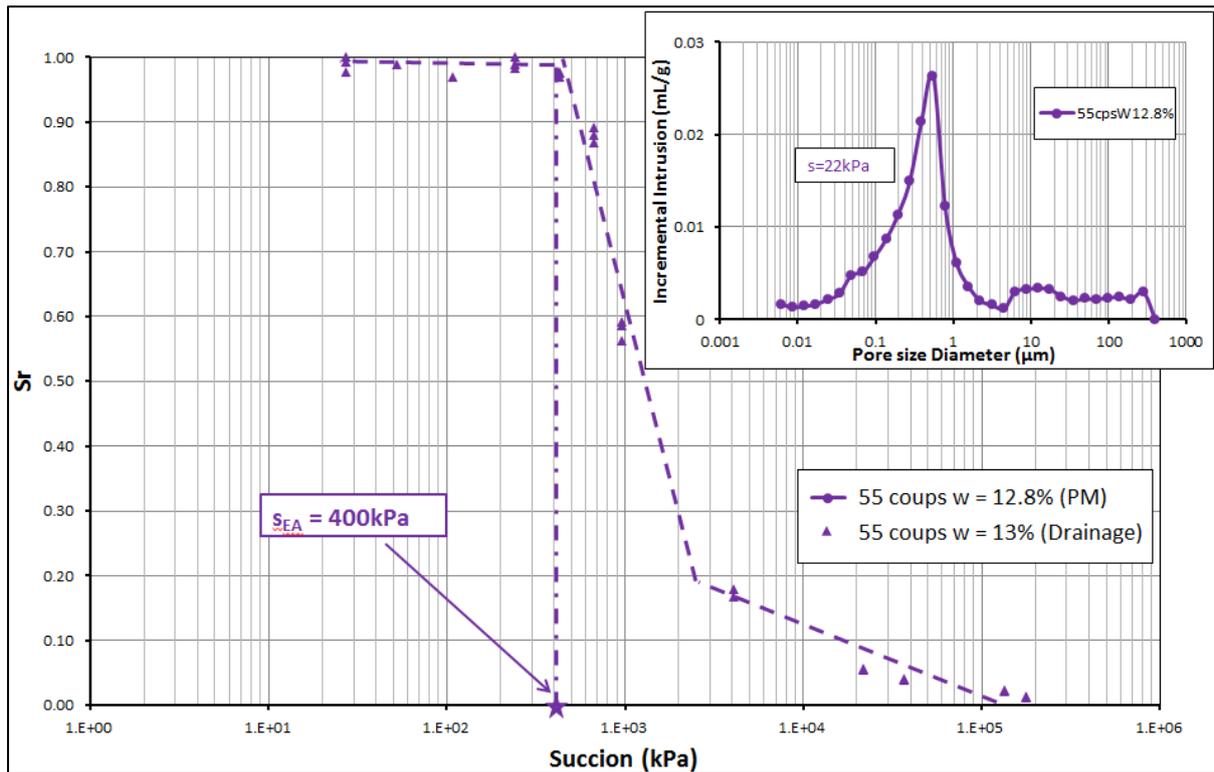


Figure IV-50 Résultats des essais de drainage et essais porosimétriques au mercure sur le sable limoneux de Gavet compacté à 55 coups/couche et à teneur en eau de 12.8 %.

La Figure IV-51 présente deux nouveaux résultats obtenus sur le sable limoneux de Gavet qui confirment le précédent raisonnement. Les deux échantillons étudiés ont été préparés à deux teneurs en eau différentes : l'une situé du côté sec de l'optimum (courbe noire), l'autre du côté humide (courbe bleu), puis ont été compactés sous 85 coups/couche.

Comme observé précédemment, l'échantillon dont la distribution porale est bimodale (fabriqué côté sec de l'optimum, courbe noire) présente dans la zone de transition une courbe de rétention avec deux parties pouvant être linéarisées. La première suction d'entrée d'air qui correspond à l'intersection de la première partie rectiligne (plus faible pente) avec la droite horizontale de saturation ($S_r=1$) est de 50 kPa. Cette suction d'entrée d'air correspond selon nous à la pénétration de l'air dans les macropores du matériau. En effet le diamètre nominal de ces macropores est de 3 μm selon les résultats des essais de porosimétrie au mercure ; ce qui correspond à une suction de l'ordre de 50 kPa selon la loi de Jurin. La seconde suction d'entrée d'air (s_{EA}) déterminée à partir du point d'intersection de la seconde partie rectiligne de la courbe de rétention (plus forte pente) et de la droite horizontale de saturation ($S_r=1$) est de l'ordre de 800 kPa. Selon notre raisonnement, cette suction d'entrée d'air correspond à la pénétration de l'air dans les micropores du matériau. Ceux-ci ont une taille nominale (valeur de pic) de 0.35 μm selon les essais de porosimétrie ; ce qui correspond à une valeur de suction de l'ordre de 410 kPa, du même ordre de grandeur que la suction (s_{EA}) déterminé graphiquement (800 kPa).

Dans le cas du matériau préparé du côté humide de l'optimum (courbe bleu sur la Figure IV-51), la courbe de rétention dans le domaine de transition présente une seule portion

rectiligne qui témoigne d'une désaturation subite du matériau à partir d'une succion d'entrée d'air conventionnelle (s_{EA}) de l'ordre de 700 kPa. La distribution porale de ce matériau mesurée au porosimètre au mercure est de type unimodale avec un pic situé dans le domaine des micropores correspondant à un diamètre de pores de 0.5 μm . Sur la base de la loi de Jurin, la succion correspondant à la pénétration de l'air dans ces micropores est de l'ordre de 290 kPa, donc du même ordre de grandeur que la succion d'entrée d'air déterminée graphiquement (700 kPa).

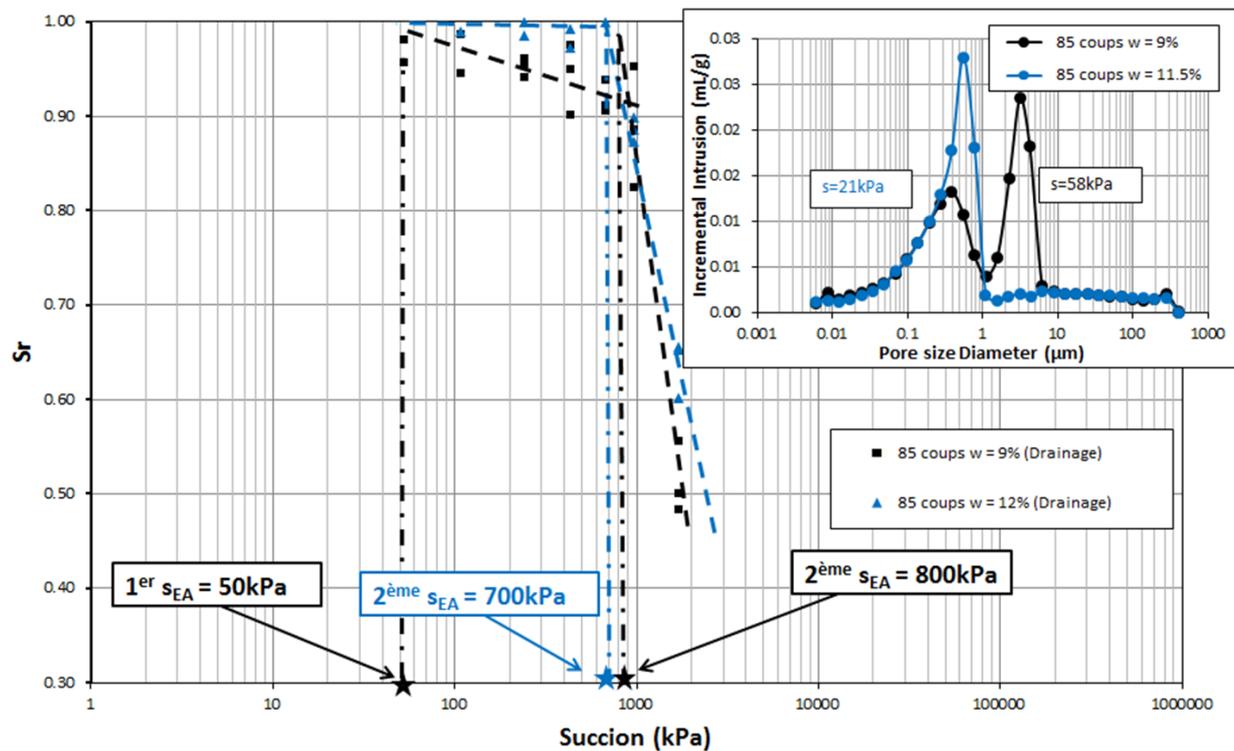


Figure IV-51 Résultats des essais de drainage et essais porosimétriques au mercure sur le sable limoneux de Gavet compacté à 85 coups/couche et à deux teneurs en eau (côté sec et côté humide de l'optimum).

En conclusion des observations précédentes, il nous semble légitime d'affirmer que la forme de la courbe de rétention du sable limoneux de Gavet sur chemin de drainage dans le domaine de transition est directement liée à la distribution porale du matériau. Dans le cas d'une distribution porale unimodale pour laquelle seuls des micropores sont présents, la courbe de rétention du matériau présente une désaturation subite à partir d'une succion d'entrée d'air (s_{EA}) correspondant à la succion de pénétration de l'air dans ces micropores. Dans le cas d'une distribution porale bimodale, la courbe de rétention du matériau présente une double linéarité dans la zone de transition. Ainsi le matériau témoigne d'une première désaturation à partir d'une première succion d'entrée d'air correspondant à la succion à partir de laquelle l'air pénètre dans les macropores. En poursuivant le drainage du matériau, celui-ci présente une seconde succion d'entrée d'air (s_{EA}) caractéristique de sa désaturation subite et correspondant à la pénétration de l'air dans les micropores.

Le Tableau IV-9 présente une synthèse des différentes succions d'entrée d'air mesurées expérimentalement (courbe de rétention) et calculées à partir des distributions porales issues des essais au porosimètre mercure.

Energie de compactage	Teneur en eau (%)	1ère succion d'entrée d'air (kPa)		2ème succion d'entrée d'air (kPa)	
		Rétention d'eau	Porosimétrie au mercure	Rétention d'eau	Porosimétrie au mercure
25 coups	≈12.1	≈20	≈30	200	≈250
25 coups	13.2	-	-	400	≈300
55 coups	≈13	-	-	400	≈300
85 coups	9	50	50	800	≈400
85 coups	12	-	-	700	250

Tableau IV-9 Comparaison les succions d'entrée d'air obtenues par essais de rétention d'eau et par porosimétrie au mercure.

IV.6.2 Construction de la courbe de rétention (drainage) à partir de la courbe d'injection de mercure

En se basant sur la courbe de volume d'intrusion cumulé de mercure en fonction du diamètre des pores appelé le chemin (V/M_s , d) (Figure IV-52), nous allons montrer que l'on peut en déduire la courbe de rétention d'eau (drainage) du matériau sur la base de quelques hypothèses et en considérant la loi de Jurin. Le principe est décrit ci-après.

Considérons sur la courbe de volume cumulé de mercure un point quelconque (V^*/M_s , d^*) (Figure IV-52). Le diamètre de pores correspondant à ce point (d^*) nous permet à l'aide de la loi de Jurin de remonter à la valeur de succion (s^*) nécessaire sur chemin de drainage pour drainer l'eau des pores correspondant à ce diamètre (d^*). Traçons dans le plan (V/M_s , d) une ligne horizontale correspondant à V^*/M_s égal constante. Au cours de l'essai de porosimétrie par injection de mercure, il convient de remarquer que le volume V^* correspond au volume de mercure injecté et que le volume ($V_v - V^*$) représente le volume de vide restant à injecter, par conséquent encore rempli d'air. Pour l'essai de rétention d'eau sur chemin de drainage, l'état initial des échantillons étant saturé, c'est l'air qui pénètre dans le sol (volume V^*) et c'est l'eau qui est chassée des pores (volume ($V_v - V^*$)) (cf Figure IV-52). Le degré de saturation (S_r) du matériau peut alors être déterminé connaissant le volume des vides (donné par la porosité initiale du matériau) et le volume d'eau contenu dans l'échantillon. Ainsi la courbe de rétention du matériau sur chemin de drainage peut être déduite des volumes cumulés d'intrusion de mercure.

Cette simple construction s'appuie sur deux hypothèses. L'hypothèse principale suppose que le mercure est injecté dans un matériau sec et remplisse tous les pores en fin d'intrusion ; ce qui correspond pour la courbe de rétention en eau sur chemin de drainage à une saturation parfaite du matériau à faibles succions et à une désaturation totale à fortes succions. Cette hypothèse est raisonnablement valable dans la cas de notre matériau car les pores des sables limoneux sont assez gros pour être tous injectés (Tableau IV-8) contrairement aux matériaux argileux. L'autre hypothèse est que le réseau de pores injectés par le mercure lors de l'essai de

porosimétrie soit représentatif du réseau poral du matériau lors de l'essai de rétention d'eau. En d'autres termes, la distribution porale ne doit pas être modifiée lors des deux essais.

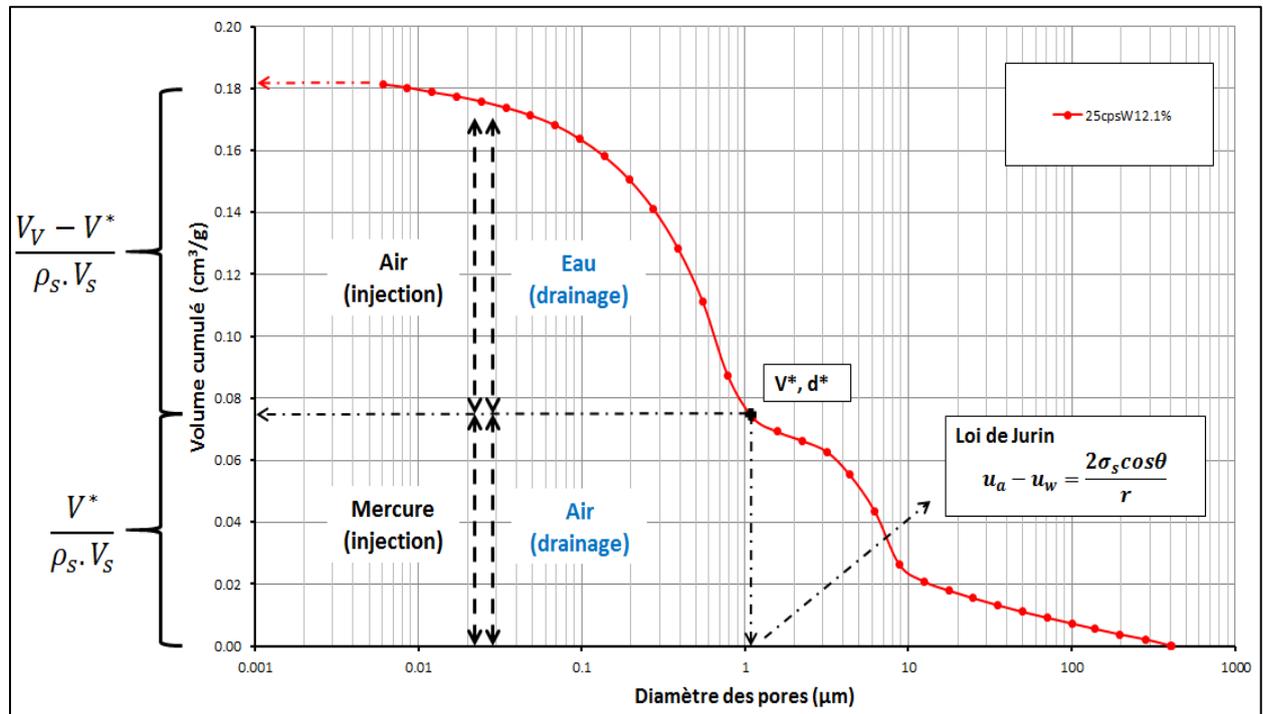


Figure IV-52 Volume d'intrusion cumulé de mercure en fonction de diamètre des pores

Les Figure IV-53, Figure IV-54 et Figure IV-55 présentent pour des échantillons de sable limoneux de Gavet compactés sous différentes énergies de compactage et à partir de différentes teneurs en eau initiales une comparaison entre les courbe de rétention d'eau (chemin de drainage) obtenue expérimentalement et celles calculés à partir des volumes cumulés de mercure injectés lors des essais de porosimétrie. D'un point de vue qualitatif, les courbes de rétention calculées présentent globalement des profils assez proches de ceux observés expérimentalement. Toutefois d'un point de vue quantitatif, pour un degré de saturation donné, le niveau de succion dans le matériau est toujours plus faible dans le cas de la courbe de rétention déduite des essais de porosimétrie que dans celui de la courbe expérimentale. Cette différence est d'autant plus forte pour les faibles niveaux de succion et tend à disparaître pour les forts niveaux de succion. Une explication à cette différence pourrait être que les volumes de mercure injectés à faible pression sont trop importants pour être représentatifs du réseau poral du matériau, et qu'ils conduisent par conséquent à une surestimation des diamètres des plus gros pores. En particulier, il conviendrait de vérifier si les volumes de mercure injectés à faibles pressions ne sont pas en partie mobilisés pour remplir les aspérités de surface des échantillons de sable limoneux.

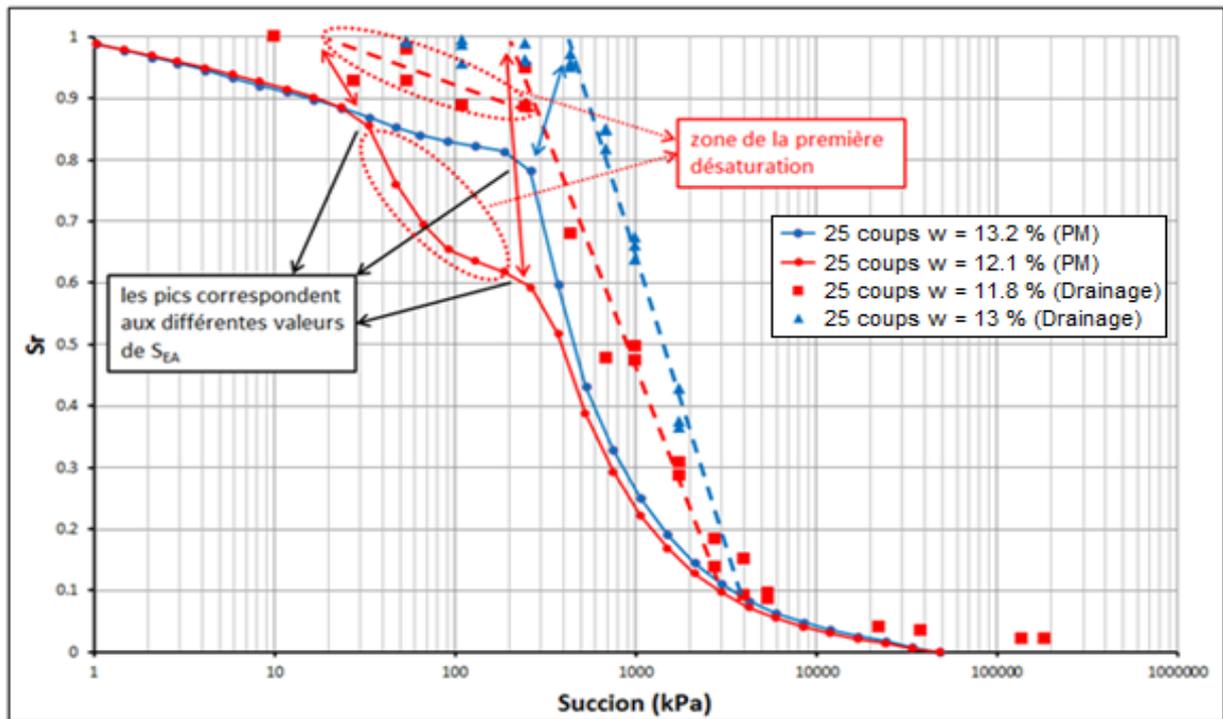


Figure IV-53 Courbes de rétention déduites des mesures expérimentales de succion et courbes de rétention calculés à partir des volumes cumulés de mercure injectés (cas du sable limoneux de Gavet compacté à 25 coups/ couche et à deux teneurs en eau différentes)

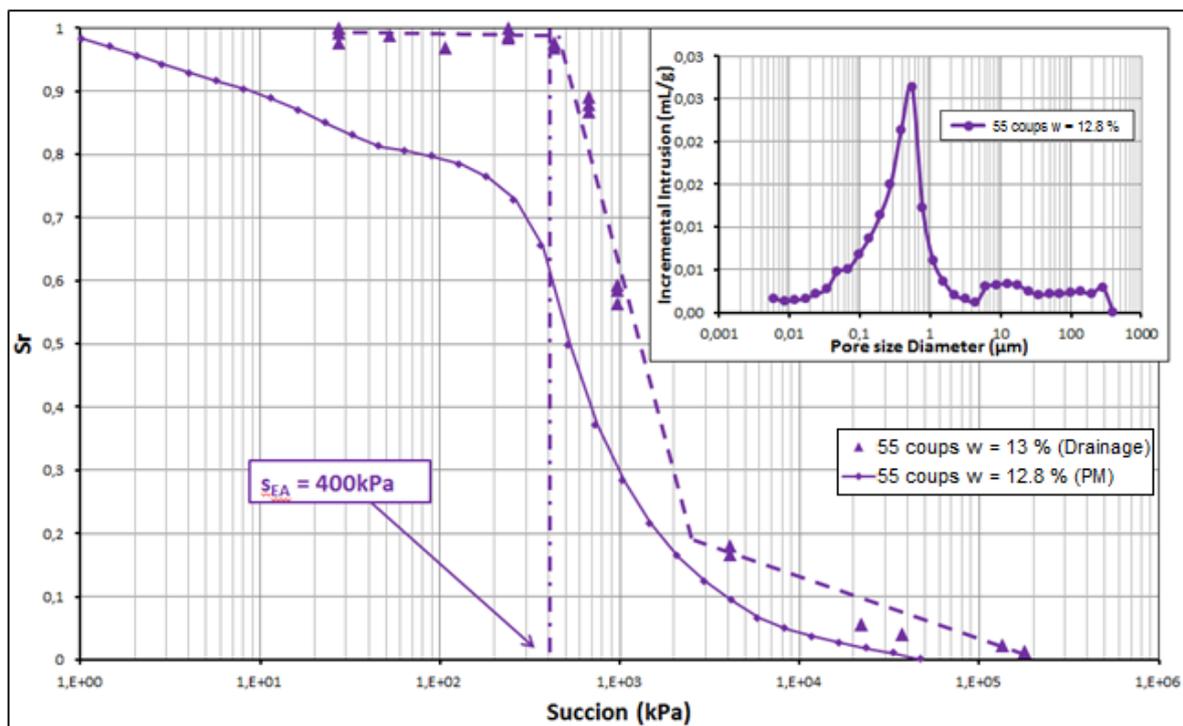


Figure IV-54 Courbes de rétention déduites des mesures expérimentales de succion et courbes de rétention calculées à partir des volumes cumulés de mercure injectés (cas du sable limoneux de Gavet compacté à 55 coups/ couche et à une teneur en eau)

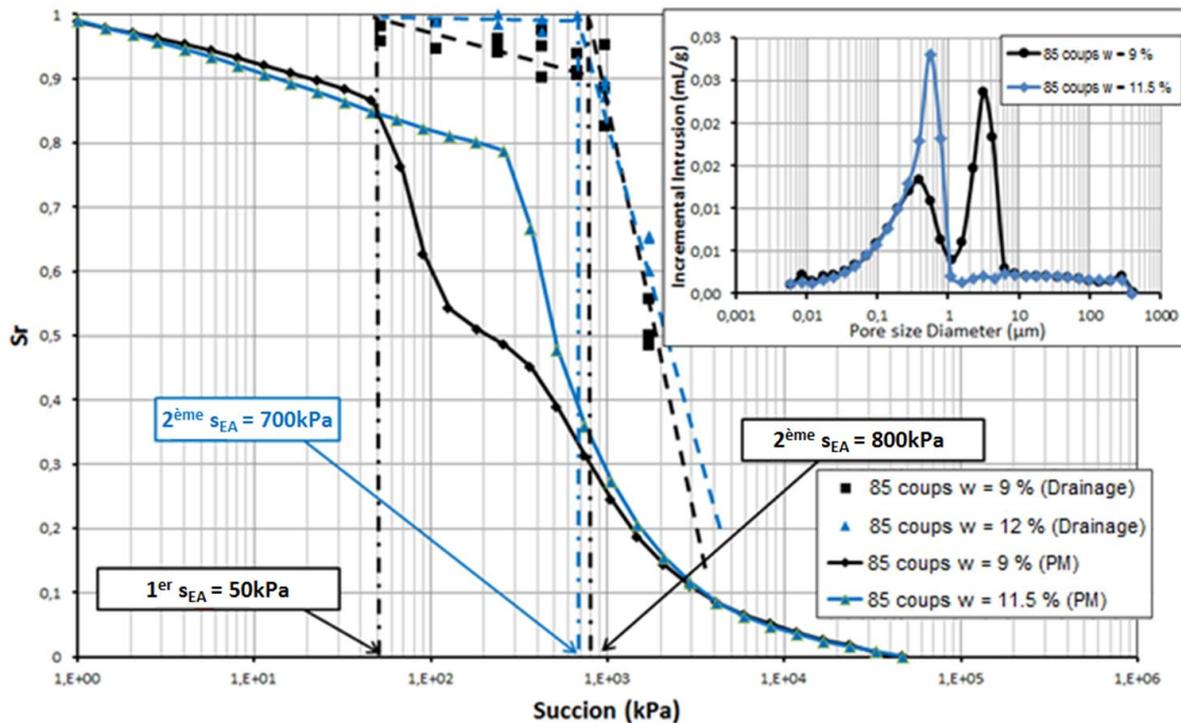


Figure IV-55 Courbes de rétention déduites des mesures expérimentales de succion et courbes de rétention calculées à partir des volumes cumulés de mercure injectés (cas du sable limoneux de Gavet compacté à 85 coups/ couche et à deux teneurs en eau différentes)

IV.7 Conclusions

Les essais présentés dans ce chapitre ont permis d'étudier les propriétés de rétention d'eau du sable limoneux de Gavet passant à 2 mm, que ce soit sous forme de pâte préparée à une teneur en eau égale à la limite de liquidité ou bien à l'état compacté. Dans le cas du matériau compacté, l'influence de la teneur en eau lors du compactage et de l'énergie de compactage sur les propriétés de rétention d'eau du matériau ont pu être analysées. Ces résultats obtenus à l'échelle macroscopique ont pu dans un second temps être interprétés à la lumière des résultats d'essais de porosimétrie au mercure réalisés sur ces mêmes échantillons. Les principaux résultats obtenus dans ce chapitre sont :

- Le sable limoneux de Gavet à l'état de pâte ou à l'état compacté présente sur chemin de drainage (resp. sur chemin d'imbibition) un comportement avec deux phases distinctes : une phase de désaturation (resp. resaturation) du matériau avec réduction (resp. augmentation) de l'indice des vides pour des succions inférieures à une valeur s_{SL} fonction du matériau (s_{SL} : succion de limite de retrait), et une phase de désaturation (resp. resaturation) sans variation de volume pour des succions supérieures à s_{SL}
- Les différentes représentations ($S_r, \log(s)$), ($e, \log(s)$), ($w, \log(s)$) obtenues lors du cycle de drainage – imbibition sur pâte ainsi que sur le matériau compacté témoignent d'un comportement réversible de ces matériaux pour les succions supérieures à s_{SL} et d'un comportement non-réversible (hystérésis) pour des succions inférieures à s_{SL} .

- Dans le plan $(e, \log(s))$, la pente des courbes de drainage correspondant à la phase de désaturation avec retrait ($s < s_{SL}$) pour la pâte comme pour le matériau compacté est comparables à celle mesurée sur chemin de consolidation isotrope (plan $(e, \log(p'))$) pour le matériau considéré. En revanche pour le matériau compacté, elle s'écarte quelque peu de la valeur du coefficient de compressibilité (C_c) mesuré sur chemin oedométrique.
- Dans le cas d'échantillons compactés à la teneur en eau de l'optimum, les courbes de rétention obtenues sur chemin de drainage dans le plan $(S_r, \log(s))$ tendent à se décaler vers la droite (sens des suctions croissantes) lorsque l'énergie de compactage augmente. En conséquence, la succion d'entrée d'air (s_{EA}) déterminée de manière conventionnelle augmentent avec l'énergie de compactage. Dans le même temps, la pente de la courbe de drainage (plan $e, \log(s)$) diminue lorsque la succion d'entrée d'air (s_{EA}) augmente.
- Pour ces mêmes échantillons préparés à la teneur en eau de l'optimum, la succion de limite de retrait (s_{SL}) apparaît peu influencée par l'état de compactage du matériau. En particulier, aucune tendance marquée d'évolution de s_{SL} en fonction de l'énergie de compactage n'a été relevée. De même, la succion de limite de retrait des matériaux compactés est du même ordre de grandeur que celui de la pâte.

Les essais de porosimétrie par injection de mercure ont pour leur part montré que :

- Pour un même niveau d'énergie de compactage, la distribution porale des échantillons de sable limoneux dépend fortement de la teneur en eau de compactage. Ainsi les échantillons préparés du côté humide de l'optimum présentent tous une distribution unimodale attestant de l'unique présence de micropores (diamètre compris entre 0.1 mm et 1 mm). En revanche, les échantillons préparés du côté sec de l'optimum présentent une distribution porale bimodale témoignant de la coexistence de micropores (diamètre compris entre 0.1 mm et 1 mm) et de macropores (diamètre compris entre 1 mm et 10 mm) dans le matériau compacté.
- Pour une teneur en eau prise au voisinage de la teneur en eau à l'optimum, l'augmentation de l'énergie de compactage tend à faire diminuer le nombre de macropores (fermeture des macropores) et à augmenter le nombre de micropores.
- Une relation entre distribution porale et succion d'entrée d'air a été identifiée. Ainsi dans le cas d'échantillons présentant une distribution porale bimodale, il est possible d'identifier à partir des courbes de rétention deux valeurs de succion d'entrée d'air : la première correspondant à l'entrée de l'air dans les macropores, la seconde (dite conventionnelle) correspondant à la pénétration de l'air dans les micropores. En revanche, seule une succion d'entrée d'air (dite conventionnelle) correspondant à la désaturation des micropores est observée dans le cas des matériaux à distribution porale unimodale. Ces observations expérimentales sont en bon accord avec la loi de Jurin qui relie la succion au diamètre des pores.
- Enfin, une méthode pour retrouver la courbe de rétention d'eau du matériau sur chemin de drainage à partir de la courbe de volumes cumulés de mercure injecté a été proposée. Cette méthode est basée sur les hypothèses de la loi de Jurin. Elle donne pour le sable limoneux de Gavet des résultats satisfaisants pour les forts niveaux de succion.

Conclusion générale

À l'issue de ce travail, il est utile de résumer les conclusions les plus importantes de cette étude consacrée à l'étude des propriétés hydromécanique du sable limoneux de Gavet.

Les travaux présentés au chapitre II ont permis dans un premier temps de caractériser physiquement le matériau étudié. Le matériau de Gavet a été identifié comme un sable limoneux de type A1 dans la classification GTR. Dans un second temps, des essais oedométriques et des essais triaxiaux de révolution (consolidés drainés et consolidés non drainés) réalisés sur le matériau saturé ont permis de déterminer les paramètres de référence du comportement mécanique de ce matériau. Ces données sont indispensables à tout travail de modélisation du comportement rhéologique de ce matériau. Pour ces essais de référence, comme pour l'ensemble des essais qui seront menés par la suite sur le matériau partiellement saturé, le sable limoneux de Gavet a été étudié sous deux états : l'un correspondant à un état de pâte préparée à une teneur en eau égale à la limite de liquidité (matériau normalement consolidé), l'autre à un état compacté (matériau surconsolidé). Ces essais de référence ont permis d'obtenir les paramètres essentiels pour la caractérisation du comportement mécanique du matériau saturé. Ils ont par ailleurs montré que ce même matériau pris dans des états initiaux différents (pâte ou compacté) pouvaient présenter un comportement très différent sur chemin déviatorique. Ainsi le matériau normalement consolidé est du type liquéfiable contractant alors que le matériau surconsolidé est de type non-liquéfiable dilatant.

Le chapitre III a été consacré à l'étude du comportement du sable limoneux de Gavet au compactage. Ainsi plusieurs courbes de compactage Proctor du matériau ont été établies pour quatre niveaux d'énergie différents : OPN-40 coups/couche, OPN-30 coups/couche, OPN, OPN+30 coups/couche. Lors de ces essais de compactage, une mesure de la succion au sein des échantillons a été réalisée de manière systématique à l'aide de la méthode du papier filtre. Pour une même énergie de compactage, ces mesures ont permis d'analyser l'évolution de la succion du matériau le long de la courbe de compactage. En croisant les résultats obtenus pour différentes énergies de compactage, ces essais ont permis d'établir des courbes d'iso-succion entre échantillons de sol de densités et de teneurs en eau différentes.

Les résultats montrent que la succion dans l'éprouvette compactée est influencée à la fois par l'énergie de compactage et la teneur en eau. Ainsi pour un niveau d'énergie de compactage donné, la succion diminue lorsque la teneur en eau augmente. En ce qui concerne les courbes d'iso-succion établies dans le diagramme Proctor, celles-ci apparaissent peu influencées par le niveau d'énergie de compactage (courbes d'iso-succion verticales dans le plan ρ_d-w) lorsque ce niveau d'énergie est inférieur ou égal à celui du Proctor Normal. Ceci est d'autant plus vrai si le matériau est compacté du côté sec de l'Optimum. En revanche ces mêmes courbes apparaissent influencées par l'énergie de compactage pour des énergies de compactage supérieures à celle du Proctor Normal. Dans ce cas, les lignes d'iso-succion présentent une courbure dans le sens des teneurs en eau décroissante dans le plan (ρ_d-w) d'autant plus

accentuée que le matériau est compacté du côté humide de l'Optimum. Ce comportement en accord avec des résultats présentés dans la bibliographie a pu être rattaché à la distribution porale des matériaux étudiés : distribution bimodale avec coexistence de macropores et de micropores (cf chapitre IV) du côté sec, distribution unimodale constituée de micropores du côté humide (cf chapitre IV). Ainsi pour expliquer ce comportement, il convient de supposer que ce sont les micropores qui pilotent la succion et que toute augmentation d'énergie de compactage aura d'abord pour effet la fermeture des macropores avant d'affecter la taille des micropores.

En complément des essais de mesure de succion, des mesures d'Indice de Portance Immédiat et de résistance à la compression simple (R_c) ont été réalisées sur le matériau compacté à différents niveaux d'énergie et différentes teneurs en eau initiales. Les essais de portance IPI ont montré que pour une énergie de compactage donnée, l'IPI est généralement maximal au voisinage de l'Optimum. Par ailleurs, si une augmentation de l'énergie de compactage du côté sec de l'Optimum entraîne généralement une augmentation de l'IPI, un compactage côté humide de l'Optimum avec une énergie supérieure à l'énergie de l'essai Proctor Normal peut entraîner une diminution de l'IPI. Par ailleurs, aucune relation directe entre les valeurs d'IPI et les valeurs de succion mesurées au sein du matériau compacté n'a pu être identifiée.

En ce qui concerne les résistances à la compression simple, dans le cas d'échantillons de sable limoneux de Gavet fabriqués par compactage à teneurs en eau voisines de celle de l'Optimum, puis séchés par échange avec l'air ambiant jusqu'à une teneur en eau donnée avant écrasement, il a été observé une augmentation significative de la rigidité du matériau et de sa résistance au cisaillement avec le séchage malgré l'invariance de densité des échantillons.

Enfin le chapitre IV de cette thèse a été consacré à l'étude des propriétés de rétention d'eau du sable limoneux de Gavet. Des essais de rétention d'eau comprenant des cycles de drainage – imbibition ont été réalisés sur le matériau à l'état de pâte et sur le matériau compacté. Là encore, différentes énergies et différentes teneurs en eau de compactage ont été considérées. Ces essais ont permis de déterminer pour les différents états du matériau considérés les paramètres de rétention d'eau tels que : la succion d'entrée d'air s_{EA} , la limite de retrait w_{SL} , la succion de retrait s_{SL} . Au-delà, ils ont aussi permis d'étudier l'influence du compactage sur la courbe de rétention d'eau obtenue lors de cycle de drainage – imbibition. Ces essais de rétention d'eau ont dans un second temps été analysés à la lumière des résultats d'essais de porosimétrie au mercure. Ceux-ci ont tout d'abord confirmé que la distribution porale du matériau compacté dépendait fortement de sa teneur en eau lors du compactage. Ainsi les échantillons préparés du côté humide de l'optimum présentent tous une distribution unimodale attestant de l'unique présence de micropores (diamètre compris entre 0.1 mm et 1 mm). En revanche, les échantillons préparés du côté sec de l'optimum présentent une distribution porale bimodale témoignant de la coexistence de micropores (diamètre compris entre 0.1 mm et 1 mm) et de macropores (diamètre compris entre 1 mm et 10 mm) dans le matériau compacté. Les essais de porosimétrie au mercure ont également permis de relier les propriétés de rétention du matériau à sa distribution porale. Ainsi une relation entre distribution porale et succion d'entrée d'air a pu être identifiée. Au-delà, une méthode pour retrouver la courbe de rétention d'eau du

matériau sur chemin de drainage à partir de la courbe de volumes cumulés de mercure injecté a été proposée.

Bibliographie

- AITCHISON, G. D., 1965. *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas*. London: Butterworths.
- ALONSO, E. E., GENS, A. & HIGHT, D. W., 1987. General report. Special problem soils. *9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 1087-1146.
- BAKER, R. & FRYDMAN, S., 2009. Unsaturated soil mechanics Critical review of physical foundations. *Engineering Geology*, Volume 106, pp. 26-39.
- BARDEN, L. & SIDES, G., 1970. Engineering behavior and structure of compacted clays. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Analysis*, Volume 96, pp. 1171-1200.
- BIAREZ, J. & FAVRE, J. L., 1975. Parameters fitting and statistical analysis of data in soil mechanics. *In Proc of 2nd Int. Conf. on Applications of Statistics and Probability in Soil Mechanics.*, Volume 2, pp. 249-264.
- BLIGHT, G. E., 1967. Effective Stress Evaluation for Unsaturated Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(2), pp. 125-148.
- BOUTONNIER, L., 2007. *Comportement hydromécanique des sols fins proches de la saturation cas des ouvrages en terre : coefficient B, déformations instantanées et différées, retrait / gonflement*. Grenoble(Institut National Polytechnique de Grenoble): Thèse de Doctorat.
- BOYTON, S. & DANIEL, D. E., 1985. Hydraulic conductivity tests on compacted clay. *Journal of geotechnical engineering*, 111(4), pp. 465-478.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J., CRISPEL, J. J., MIEUSSENS, C. & NARDONE, A., 1987. La reconstitution des éprouvettes en laboratoire : Théorie et pratique opératoire. *Rapport de recherche LPC*, Issue 145.
- CASTRO, G., 1969. *Liquefaction of sands*. Cambridge, MA 02138(Division of Engineering and Applied Physics, Havard University): Ph.D. Thesis.
- CHALERMYANONT, T. & ARRYKUL, S., 2005. Compacted sand-bentonite mixtures for hydraulic containment liners. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 27(2), pp. 313-323.
- COLLINS, K. & MCGOWN, A., 1974. The form and function of microfabric features in a variety of natural soils. *Géotechnique*, 24(2), pp. 223-254.
- COUSSY, O. & DANGLA, P., 2002. Approche énergétique du comportement des sols non saturés. *Mécanique des sols non saturés*, pp. 137-174.

- CUISINIER, O. & LALOUI, L., 2004. Fabric evolution during hydro-mechanical loading of compacted silt. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28(6), pp. 483-499.
- CUI, Y.-J. & DELAGE, P., 1996. Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt. *Géotechnique*, 46(2), pp. 291-311.
- CUI, Y.-J. & DELAGE, P., 2003. Sol non saturés : Applications au calcul des ouvrages. *Technique de l'ingénieur*, 1(C303), pp. 1-27.
- DAIAN, J. F., 2007. *Porométrie au mercure : le modèle XDQ*. Grenoble: Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement.
- DAOUD, F. Z., 1996. *La perméabilité des sols fins compactés*. Nancy(Ecole Normal Supérieure de Géologie de Nancy): PhD Thesis.
- DE GREGORIO, V. B., 1990. Loading systems, sample preparation, and liquefaction. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(5), pp. 805-821.
- DELAGE, P., AUDIGUIER, M., CUI, Y. J. & HOWAT, M. D., 1996. Microstructure of a compacted silt. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(1), pp. 150-158.
- DELAGE, P. & CUI, Y.-J., 2000. L'eau dans les sols non saturés. *Technique de l'ingénieur*, 1(C301), pp. 1-20.
- ESCARIO, V. & SAEZ, J., 1986. The shear Strength of Partially saturated soils. *Géotechnique*, 36(3), pp. 453-456.
- FAWCETT, R. & COLLIS-GEOGRE, N., 1967. A Filter paper Method for Determining the Moisture Characteristics of Soil. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, Volume 7, pp. 162-167.
- FERBER, V., 2005. *Sensibilité des sols fins compactés à l'humidification apport d'un modèle de microstructure*. Nantes(Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes): Thèse de Doctorat.
- FINGE BOUSAID, Z., 2004. *Contribution à l'étude du comportement non drainé des sables laches surconsolidés et anisotropes*. Vaulx en Velin(L'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat): Thèse de Doctorat.
- FLEUREAU, J.-M. & KHEIRBEK-SAOUD, S., 2002. *Retrait et gonflement des sols soumis a un cycle de drainage-humidification*, Paris: Ecole Centrale de Paris.
- FLEUREAU, J.-M., KHEIRBEK-SAOUD, S., SOEMITRO, R. & TAIBI, S., 1993. Behavior of clayey soils on drying-wetting paths. *Cannadian Geotechnical Journal*, 30(2), pp. 287-296.
- FLEUREAU, J. M., 2011. *Mécanique des Sols Non Saturés*. Paris: Ecole Centrale de Paris.

FLEUREAU, J.-M. et al., 2002. Aspects of the behaviour of compacted clayey soils on drying and wetting paths. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(6), pp. 1341-1357.

FREDLUND, D. G., XING, A., FREDLUND, M. D. & BARBOUR, S. L., 1995. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), pp. 440-448.

GENS, A., ALONSO, E. E., SURIOL, J. & LLORET, A., 1995. Effect of structure on the volumetric behavior of a compacted soil. *Proc., 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils*, pp. 83-88.

GREACEN, E. L., WALKER, G. R. & COOK, P. G., 1987. Evaluation of the Filter Paper Method for Measuring Soil Water Suction. *International Conference on Measurement of Soil and Plan Water Status*, pp. 137-143.

GUEDDOUDA, M. K., 2011. *Comportement hydro-mécanique des sols compactés : Application à la conception d'une barrière ouvragée "sable de dune-betonite"*. Chetouane (Université ABOUBAKR Belkaid-TLEMEN): Thèse de Doctorat.

HAMBLIN, A. P., 1981. Filter Paper Method for Routine Measurement of Field Water Potential. *J. Hydrol*, Volume 53, pp. 355-360.

HARRISON, B. & BLIGHT, G., 1998. The Effect of Filter Paper and Psychrometer Calibration Techniques on Soil Suction Measurements. *Proceedings of the Second International Conference on Unsaturated Soils*, Volume 1, pp. 362-367.

HO, D. Y. F. & FREDLUND, D., 1982. Increase in strength due to suction for two Hong Kong soils. *Proceedings, ASCE Geotechnical Conference on Engineering and Construction in Tropical and Residual Soils*, pp. 263-295.

HOLTZ, R. D. & KOVACS, W. D., 1991. *Introduction à la géotechnique*. Montréal: Éditions de l'École polytechnique de Montréal.

HU, R. L., YEUNG, M. R., LEE, C. F. & WANG, S. J., 2011. Mechanical behavior and microstructural variation of loess under dynamic compaction. *Engineering geology*, 59(3), pp. 203-217.

IBRAIM, E., 1998. *Différents aspects du comportement des sables à partir des essais triaxiaux : des petites déformations à la liquéfaction statique..* Lyon (Institut National des Sciences Appliquées de Lyon): Thèse de doctorat.

INDARTO, 1991. *Comportement mécanique et compactage des matériaux de barrages*. Paris (Ecole Centrale Paris): Thèse de Doctorat.

JUANG, C. & HOLTZ, R., 1986. A probabilistic permeability model and the pore size density function. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 10(5), pp. 543-553.

- KOLBUSZEWSKI, J. J., 1948. General investigation of the fundamental factors controlling loose packing of sands. *Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mechanics et Foundation Engineering*, Volume 7, pp. 47-49.
- KONRAD, J. M., 1990. Minimum undrained strength of two sands. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(6), pp. 932-947.
- KRAHN, J. & FREDLUND, D. G., 1972. On total, matric and osmotic suction. *Soil Science*, 114(5), pp. 339-348.
- KUERBIS, R. & VAID, Y. P., 1988. Sand sample preparation - the slurry deposition method. *Soils and Foundations*, 28(4), pp. 107-118.
- LADD, R. S., 1978. Preparing test specimens using undercompaction. *Geotechnical Testing Journal*, 1(1), pp. 16-23.
- LAMBE, T. W., 1958. The structure of compacted clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 84(2), pp. 1654/1-1654/34.
- LCPC, 1973. *Essais de Laboratoire et en place de mécanique des sols - Aide mémoire*. Paris: Ministère de l'Aménagement du territoire, de l'équipement, du logement et du tourisme, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- LCPC, 1987. *Essais Oedométriques - Méthode d'Essai LPC N.13*. Paris: Ministère de l'urbanisme, du logement et des transports - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- LCPC, 1995. *Méthode d'essai LPC : Essais oedométriques*. Paris(Laboratoire central des ponts et chaussées): Ministère de l'Urbanisme, du Logement et des Transports.
- LECLERCQ, J. & VERBRUGGE, J. C., 1985. *Propriétés géomécaniques des sols non saturés, Compte rendu du colloque sur le travail du sol*, Gembloux: Faculté des Sciences Agronom.
- LEONG, E., HE, L. & RAHARDJO, H., 2002. Factors Affecting the Filter Paper Method for Total and Matric Suction Measurements. *Geotechnical Testing Journal*, 25(3), pp. 322-333.
- LI, Z.-S., 2015. *Etudes des propriétés hydromécaniques des sols argileux non saturés proches de la saturation*. Paris(Ecole centrale des arts et manufactures "Ecole Centrale Paris"): Thèse de Doctorat.
- LLORET, M. et al., 2003. Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes. *Géotechnique*, 53(1), pp. 27-40.
- MARINHO, F. & OLIVEIRA, O., 2006. The Filter Paper Method Revisited. *Geotechnical Testing Journal*, 29(3), pp. 250-258.
- MASWOWE, J., 1985. *Stress paths for a compacted soil during collapse due to wetting*. London(Imperial College of Science and Technology): Ph. D. Thesis.

MITCHELL, J. K. & SOGA, K., 1976. *Fundamentals of Soil Behaviour*. New York: John Wiley & Sons.

MIURA, S. & TOKI, S., 1982. A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation - strength properties of sand.. *Soils and Foundations*, 22(1), pp. 61-77.

MOHKAM, M., 1983. *Contribution à l'étude expérimentale et théorique du comportement des sables sous chargement cycliques*. Grenoble (L'Université Scientifique et Médicale et l'Institut National Polytechnique de Grenoble): Thèse de Doctorat.

MORVAN, M., 2010. *Comportement des sols partiellement saturés sous chargements hydro-mécaniques : Approche théorique par le concept de bounding surface et approche expérimentale*. Vaulx en Velin(Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat): Thèse de Doctorat.

MOUSSAI, B., 1993. *Etude en laboratoire du compactage statique et de la perméabilité des sols fins argileux*. Lyon(Institut National des Sciences Appliquées de Lyon): Thèse de Doctorat.

MUNOZ-CASTELBLANCO, J., 2011. *Comportement hydromécanique d'un loess naturel*. Champs-sur-Marne(Ecole des Ponts ParisTech - Université Paris-Est): Thèse de Doctorat.

MUNOZ-CASTELBLANCO, J., PEREIRA, J. M., DELAGE, P. & CUI, Y.-J., 2010. Suction measurements on a natural unsaturated soil : A reappraisal of the filter paper method. *5th International Conference on Unsaturated Soils*, Volume 1, pp. 707-712.

Norme Américain, 2008. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. *ASTM D 5298-03*.

Norme Française , 1998. Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache. *NF P 94-068*.

Norme Française, 1990. Granulats - Essai au bleu de méthylène - Méthode à la tache. *NF P 18-592*.

Norme Française, 1991. Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau. *NF P 94-054*.

Norme Française, 1991. Sols : reconnaissance et essais : Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire - Méthodes de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau. *NF P94-053*.

Norme Française, 1992. Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. *NF P 11-300*.

Norme Francaise, 1992. Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation. *NF P94-057*.

Norme Francaise, 1994. Sols : reconnaissance et essais - Essais à l'appareil triaxial de révolution - Appareillage - Préparation des éprouvettes - Essai non consolidé non drainé - Essai consolidé non drainé avec mesure de pression interstitielle - Essai consolidé drainé. *NF P94-074*.

Norme Francaise, 1996. Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation. *NF P94-056*.

Norme Francaise, 1997. Sols : reconnaissance et essais - Essai oedométrique - Partie 1 : essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec chargement par paliers.. *NF P 94-090-1*.

Norme Francaise, 1997. Sols : reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.. *NF 94-078*.

Norme Francaise, 1999. Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié. *NF P 94-093*.

Norme Francaise, 2005. Reconnaissance et essais géotechniques. Essai de sol au laboratoire. Partie 3 : Détermination de la masse volumique des grains - Méthode du pycnomètre. *P94-512-3*.

PARCEVAUX, P., 1980. *Etude microscopique et macroscopique du gonflement de sols argileux*. Paris(Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris): Ph. D Thesis.

PATI, A. R., 2010. *Effects of Rebar Temperature and Water to Cement Ration on Rebar-Concrete Bond Strength of Concrete Containing Fly Ash*. Texas: University of North Texas.

PRAPAHARAN, S., ALTSCHAEFFL, A. G. & DEMPSEY, B. J., 1985. Moisture curve of compacted clay : Mercury intrusion method. *ASCE Journal of geotechnical engineering*, 111(9), pp. 1139-1143.

RIDLEY, A., 1995. Discussion on 'Laboratory Filter paper Suction Measurements' by Sandra L. Houston, William N. Houston, and Anne-Marie Wagner. *Geotechnical Testing Journal*, 18(3), pp. 391-396.

ROMERO, E., 1999. *Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay*. Barcelona(Universitat Politècnica de Catalunya): Thèse de doctorat.

SERRATRICE, J.-F., 1995. Comportement d'une argile compactée. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Septembre - Octobre, Issue 200, pp. 13-30.

SERRATRICE, J. F., 2013. Identification des sols argileux, limoneux et sableux du plateau deltaïque du Var à partir de sondages au piézocone. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, pp. 65-94.

SIMMS, P. H. & YANFUL, E. K., 2002. Predicting Soil-Water Characteristic Curves of Compacted Plastic Soils from Measured Pore-Size Distributions.. *Geotechnique*, 52(4), pp. 269-278.

SLADEN, J. A. & HANDFORD, G., 1987. A potential systematic error in laboratory testing of very loose sands. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 24, pp. 462-466.

TAIBI, S., 1994. *Comportement mécanique et hydraulique des sols soumis à une pression interstitielle négative - Etude expérimentale et modélisation*. Paris(Ecole Centrale de Paris): Thèse de Doctorat.

TARANTINO, A. & DE COL, E., 2008. Compaction behaviour of clay. *Géotechnique*, 58(3), pp. 199-213.

TERZAGHI, K. & PECK, R. B., 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New York: John Wiley & Sons.

VANAPALLI, S. K., FREDLUND, D. G. & PUFFAHL, D. E., 1999. Influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. *Geotechnique*, 49(2), pp. 143-159.

VERDUGO, R. & ISHIHARA, K., 1996. The steady state of sandy soils. *Soils and Foundations*, 36(2), pp. 81-91.

WAN, A. W., GRAY, M. N. & GRAHAM, J., 1995. On the relations of suction, moisture content and soils structure in compacted clays. *Proceedings of the first international conference on unsaturated soils, UNSAT'95*, Volume 1, pp. 215-222.

Annexe I : Essai œdomètre modifié

A-I.1 Principe de l'essai

Il existe de nombreuses limites dans l'œdomètre classique :

- La saturation de l'échantillon est effectuée par la méthode traditionnelle : les échantillons sont trempés dans la cellule œdométrique classique pendant longtemps. Il n'y a pas la circulation d'eau donc il peut exister nombreuses petites bulles d'air emprisonnées dans les particules du sol et ils ne peuvent pas échapper au cours d'essai.
- Le système œdomètre classique ne nous permet pas de mesurer et vérifier la saturation de l'échantillon au cours d'essai.
- Les essais avec succion contrôlée ne peuvent pas être réalisés avec la cellule œdométrique classique.

Comme dans la conclusion générale, nous avons indiqué quelques programmes expérimentaux pour poursuivre cette étude et améliorer les résultats des essais œdométriques classique. Ils comprennent :

- Essais œdométriques avec mesure des pressions d'eau interstitielles : ces essais nous permettent d'étudier la variation de coefficient Skempton B à différent niveau de pression de consolidation, et vérifier l'état de saturation de l'échantillon au cours d'essai.
- Essais œdométriques à succion contrôlée par échange osmotique.

Il est nécessaire de développer un nouveau système œdométrique qui nous permet de résoudre les limites de la cellule œdomètre classique

A-I.2 Dispositif expérimental :

Pour effectuer ces essais, à l'ENTPE, nous avons conçu une nouvelle cellule œdométrique en se basant sur la cellule œdométrique classique, comme l'indique la figure A I-1

Ce système œdométrique modifié comprend :

- La cellule œdométrique modifiée : toutes les pièces sont fabriquées en acier inoxydable.
 - 1^{er} Embase : une plaque céramique de 50kPa (amovible) est fixée sur cette embase. L'eau peut circuler en dessous de la céramique. Il y a 2 ports : l'un pour imposer pression d'eau interstitielle (à l'aide un GDS) et faire circuler d'eau dans la saturation de l'échantillon, l'autre pour la mesure de pression d'eau (par un capteur de pression).
 - 2^{ème} Embase : Le rôle de cette embase est de tenir la bague œdométrique et la bloquée sur 1^{er} embase par 4 vis.

- La bague : la bague a les mêmes dimensions que la bague d'essai œdomètre classique et au cours d'essai, elle est toujours bloquée dans 2 embases, l'étanchéité est toujours assurée par deux joints toriques avec de la graisse silicone.
- Une pierre poreuse de 2 mm d'épaisseur posée sur l'échantillon.
- Une cellule métallique
- Un tube de drainage, lié avec une membrane Latex (ou néoprène) : la membrane a un roue comme un joint torique, assure l'étanchéité entre la 2^{ème} embase et la cellule métallique.
- Un casque pour fermer la cellule.
- Un capteur sans contact d'étendue de mesure 12 mm pour mesurer le tassement de l'échantillon et le support de capteur.
- 3 Contrôleurs GDS pour :
 - Faire circuler d'eau dans l'échantillon au cours de la saturation.
 - Imposer la pression verticale sur la membrane.
 - Mesurer le volume d'eau sortant de l'échantillon.
- Un capteur de pression pour mesurer la pression d'eau interstitielle.
- Une centrale acquisition et l'ordinateur.
- Un réservoir de CO₂.

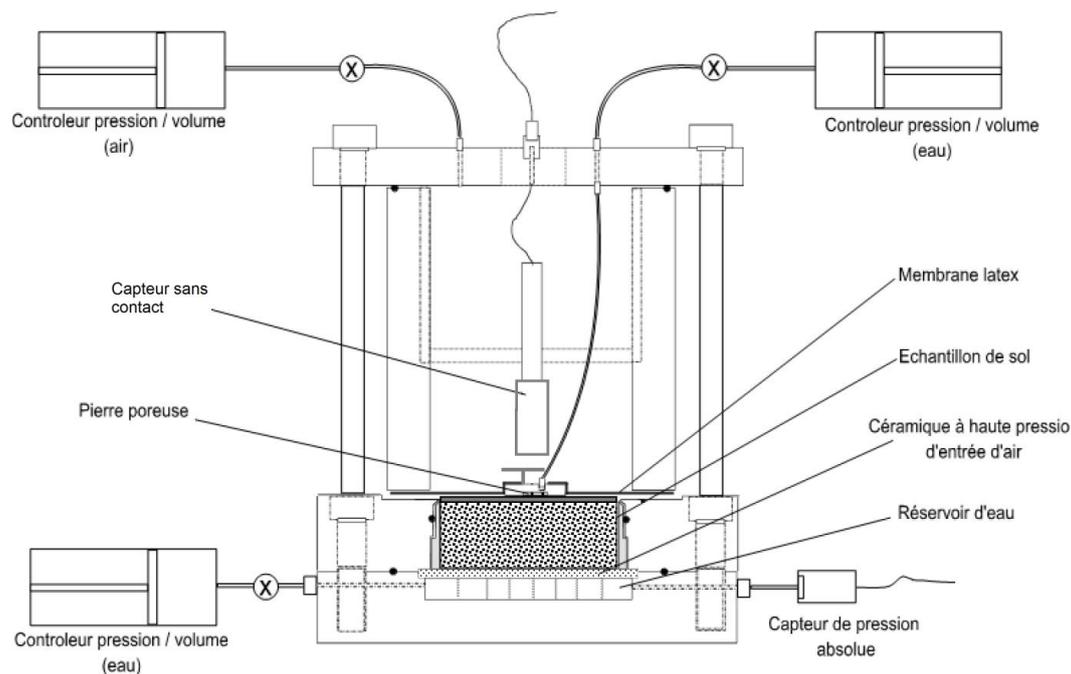


Figure A I-1 Dispositif de la cellule œdométrique modifié à l'ENTPE

A-I.3 Procédure expérimentale de l'ENTPE :

A-I.3.1 Essais œdomètre classique sur la pâte Livet – Gavet mélangé à limite de liquidité.

Pour vérifier la nouvelle cellule, on a réalisé un essai œdométrique classique sur le matériau Livet Gavet mélangé à limite de liquidité (l'état de pâte)

La fabrication de l'échantillon :

Les échantillons sont fabriqués comme les échantillons pour l'essai œdométrique classique sur la pâte présenté dans le deuxième chapitre.

La préparation de la cellule :

La préparation de la cellule se compose nombreux étapes suivantes :

- La saturation et la mise en place de la céramique et la pierre poreuse.
- La mise en place de la bague et échantillon.
- Le blocage de deux embases avec la céramique, la bague et la pierre poreuse.
- La membrane avec le tube de drainage est ensuite posée (soigneusement) sur l'échantillon, on a utilisé la graisse de silicone pour améliorer le contact et l'étanchéité.
- L'installation de la cellule et le capteur sans contact de déplacement, la vérification de capteur sans contact par l'acquisition.
- L'installation du casque et fermeture de la cellule.
- La cellule est ensuite remplie par d'eau, et mise en contact avec les contrôleurs GDS.

Saturation de l'échantillon

- Après le remplissage de la cellule par l'eau, une pression de 20kPa a été appliquée sur la membrane.
- On a utilisé un contrôleur GDS connecté avec l'embase pour faire circuler l'eau désaéré dans l'échantillon, la pression d'eau est de 10kPa. Le temps de saturation est environ 2-3 jours. Le volume d'eau injecté, le tassement au cours de la saturation sont enregistré par l'ordinateur.

Démarrage et enregistrement des données :

La pression de consolidation est contrôlée par l'ordinateur, à l'aide un logiciel. Les niveaux des chargements sont 25 - 50 – 100 – 200 – 400 – 500 kPa.

Détermination l'état final de l'échantillon :

A la fin de l'essai, on fait sortir l'échantillon de la bague et sécher dans l'étuve pour mesurer la teneur en eau finale et l'indice des vides initiale.

Les essais pour vérifier l'étanchéité de la cellule :

La cellule est remplie d'eau avant de démarrer l'essai, et la pression de consolidation a été appliquée par un contrôleur GDS, par faire varier la pression d'eau dans la cellule. Donc, si on bloque tous le système et changer la pression d'eau, en observant la variation de volume d'eau injecté dans la cellule, on peut vérifier l'étanchéité de la cellule et estimer le tassement de l'échantillon.

La figure présente le chargement et la variation de volume d'eau injecté dans la cellule, généralement, l'étanchéité est assurée, mais il existe toujours des erreurs causées par :

- L'élasticité de membrane à pression élevée.
- Il existe des petites bulles d'air coincés dans les trous des vis ... quand la pression d'eau augmente, ces bulles d'air se dissolvent dans l'eau et faire varier le volume mesuré par le GDS.

Donc on a décidé d'installer un capteur sans contact comme présenté dans la partie précédente. Le capteur nous permet de mesurer le tassement de l'échantillon même s'il y a une fuite à faible débit dans la cellule, ça n'influence pas les résultats de l'essai.

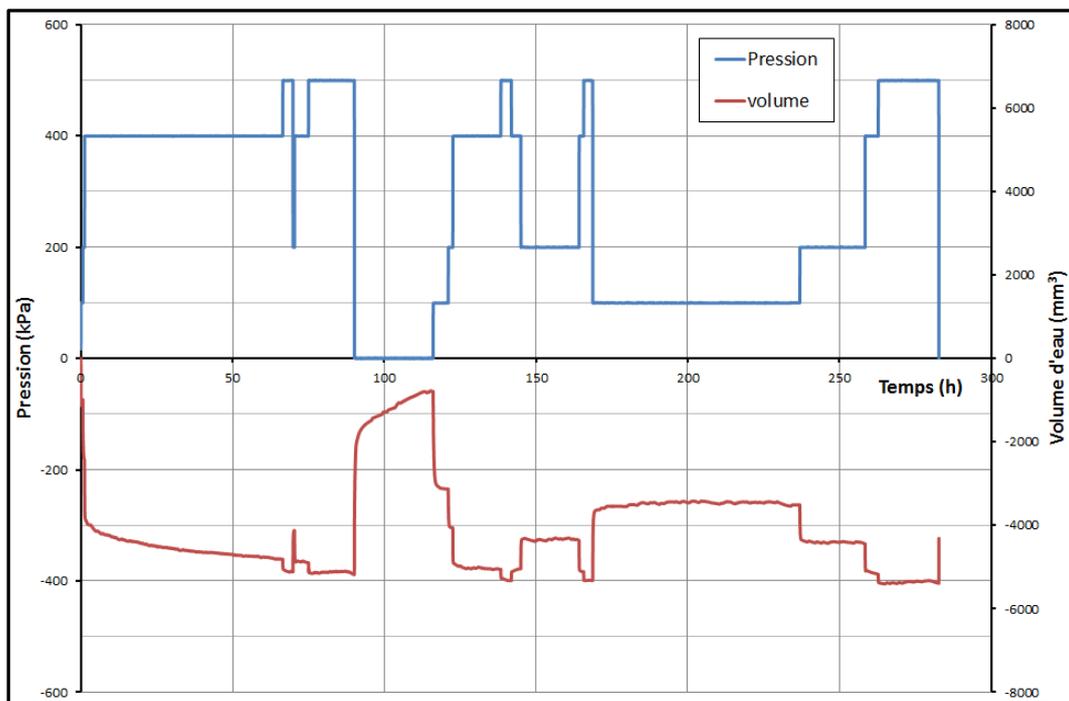


Figure A I-2 L'essai pour vérifier l'étanchéité de la cellule

- **Quelques résultats sur la nouvelle cellule œdométrique :**

Essais œdométrique classique sur la pâte :

Le résultat de l'essai sur la pâte est présenté dans la figure A I-4, en comparant avec les résultats sur la cellule œdométrique classique. On observe que le résultat donné par la nouvelle cellule est différent avec les valeurs de C_c et C_s plus élevées. Ces différences peuvent être causées par la saturation de l'échantillon. Il est nécessaire de réaliser plusieurs essais pour avoir la répétabilité et vérifier l'exactitude des résultats, tels que :

- Les essais œdométriques classiques sur les matériaux compactés à l'optimum.
- Les essais pour vérifier l'état de la saturation de l'échantillon.

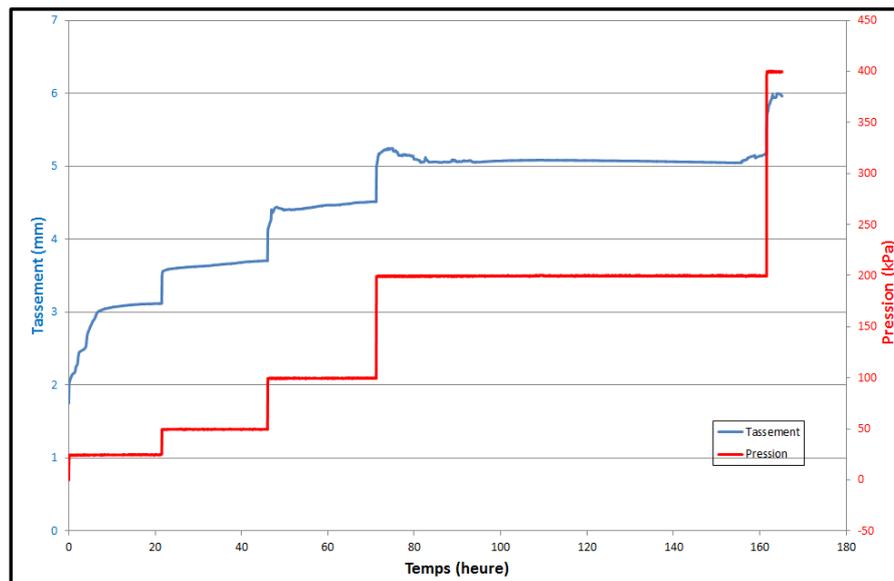


Figure A I-3 : Evolution du tassement et pression appliquée au cours d'essai œdométrique modifié

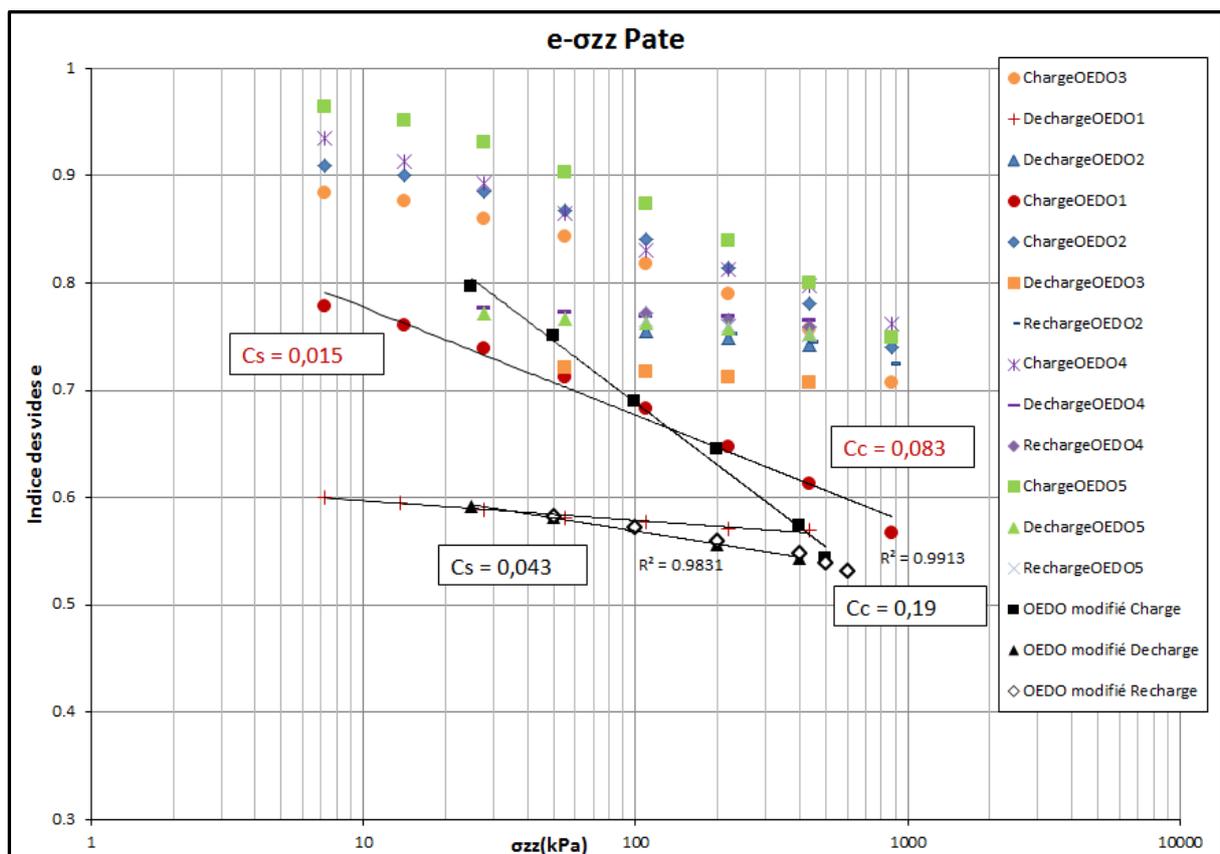


Figure A I-4 : Résultat d'essai œdométrique modifié, en comparant avec les essais œdométrique classique sur la Pâte Livet Gavet

A-I.3.2 Essais œdomètre classique sur la bille de verre :

Il faut noter que pour l'essai œdométrique classique présenté ci-dessus, la saturation par CO₂ et la mesure de coefficient Skempton n'ont pas été réalisés.

Afin de vérifier l'état de saturation de l'échantillon et l'étanchéité de la cellule, on a décidé de faire un essai de mesure coefficient Skempton B à différents niveaux de consolidation sur les billes de verre.

La fabrication de l'échantillon :

Les billes de verre de 1 mm de diamètre ont été choisies pour faciliter la fabrication et saturation pour cet essai. A la préparation, la bague est remplie soigneusement par les billes de verres à l'aide une cuillère.

La préparation de la cellule : comme pour l'essai sur le sol compacté à 25cps/couche, mais au début, la céramique et la pierre poreuse n'ont pas été séchées.

La saturation de l'échantillon :

- La saturation par CO₂ : un tube de réservoir CO₂ a été branché dans l'embase, et on a fait circuler le CO₂ dans l'échantillon pendant 4 heures avec une pression très faible 0.2kPa.
- La saturation par l'eau désaérée : à la fin de la saturation par CO₂, on applique une pression de consolidation de 20kPa et faire circuler l'eau désaérée avec une pression de 10kPa.

Démarrage et enregistrement des données :

- La pression de consolidation est contrôlée par l'ordinateur, à l'aide un logiciel. Les niveaux des chargements sont 50 – 100 – 200 – 400kPa.
- A la fin de chaque niveau de chargement, on effectue un mesure de B : le tube de drainage est fermé, on augmente la pression de consolidation par 50kPa, la variation de pression interstitielle est mesurée par un capteur de pression.

Résultats des essais sur la bille de verre :

La figure présente le résultat de mesure de B après la saturation des billes de verre (Pression de consolidation est environ 10.6kPa), on observe clairement la variation de pression interstitielle quand la pression appliquée évolue, avec un décalage environ 10.6kPa. Dans ce cas le coefficient B mesuré est égale à 1 : l'échantillon est saturé.

En raison de contraintes de temps et des difficultés inattendues se produisent au cours de l'essai, ces essais ne sont pas encore finalisées. Il y a quelques remarques :

Pour les essais n'utilisent pas le CO₂ dans la saturation de l'échantillon le coefficient B mesuré est de 0.1 à 0.3.

Pour les essais utilisant le CO₂ pour la saturation, le coefficient B mesuré est de 0.8 à 1. Ce résultat nous confirme que la saturation par CO₂ est très importante et indispensable pour avoir un échantillon saturé.

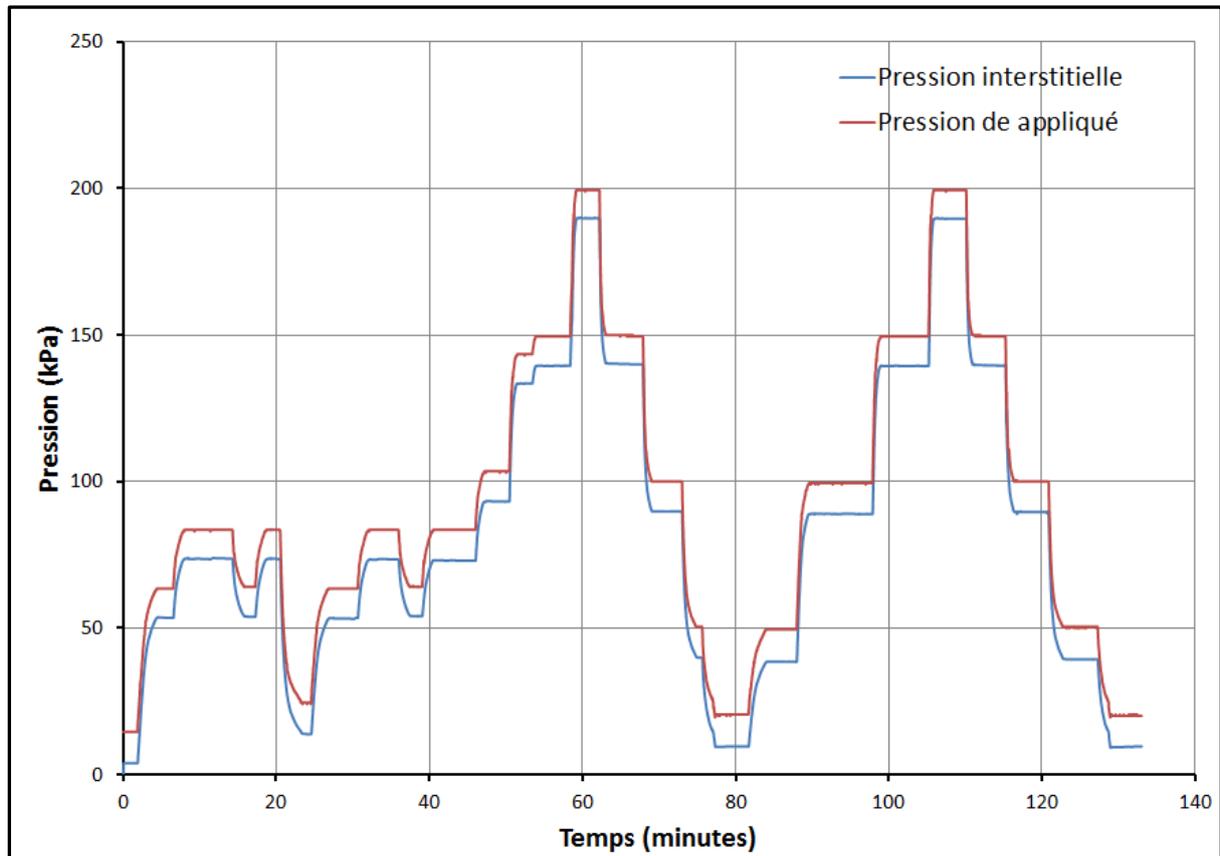


Figure A I-5 : La mesure de coefficient Skempton pour l'essai œdométrique modifié sur les billes de verre

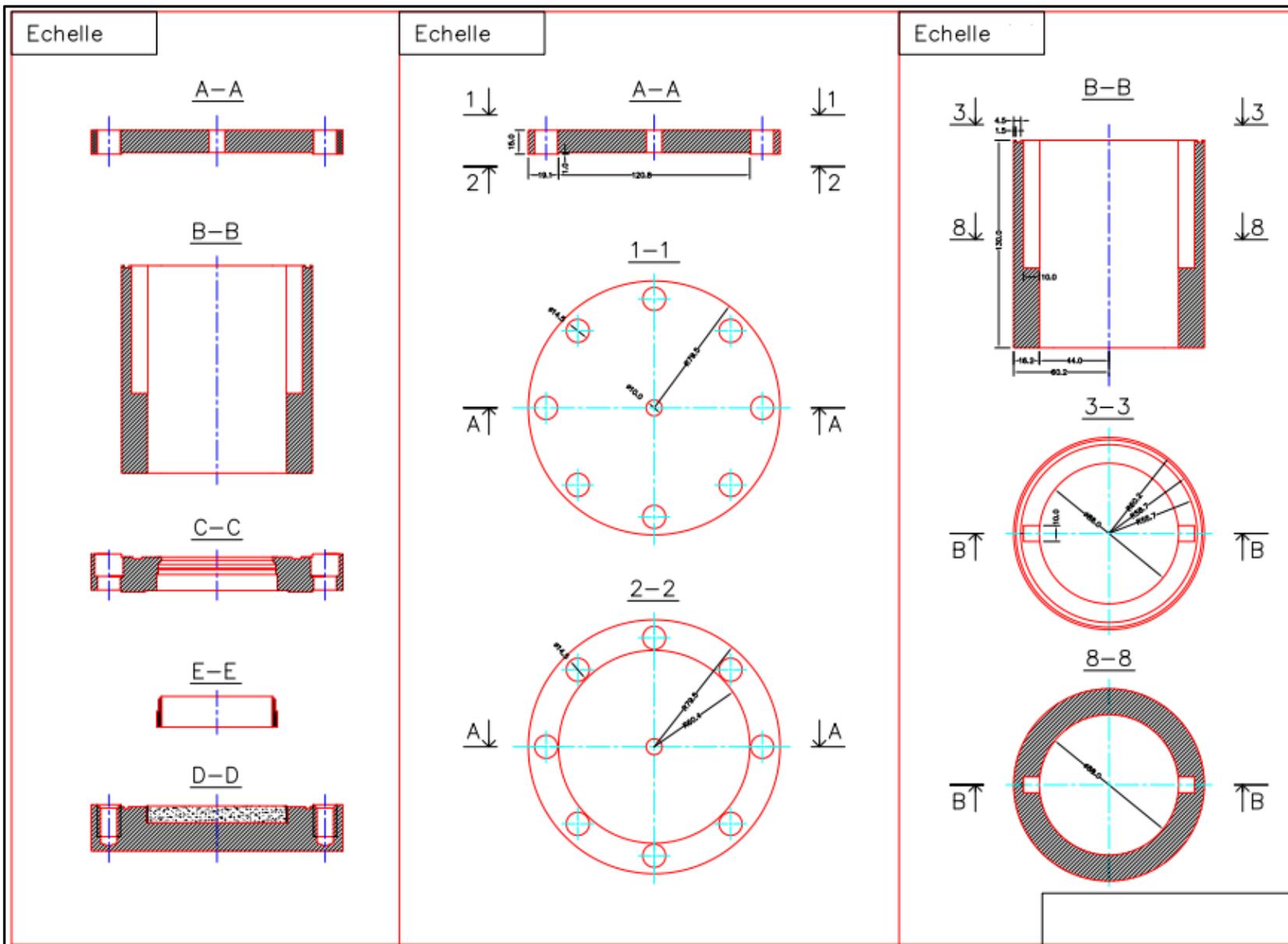


Figure A I-6 Les dimension du moule œdométrique modifié

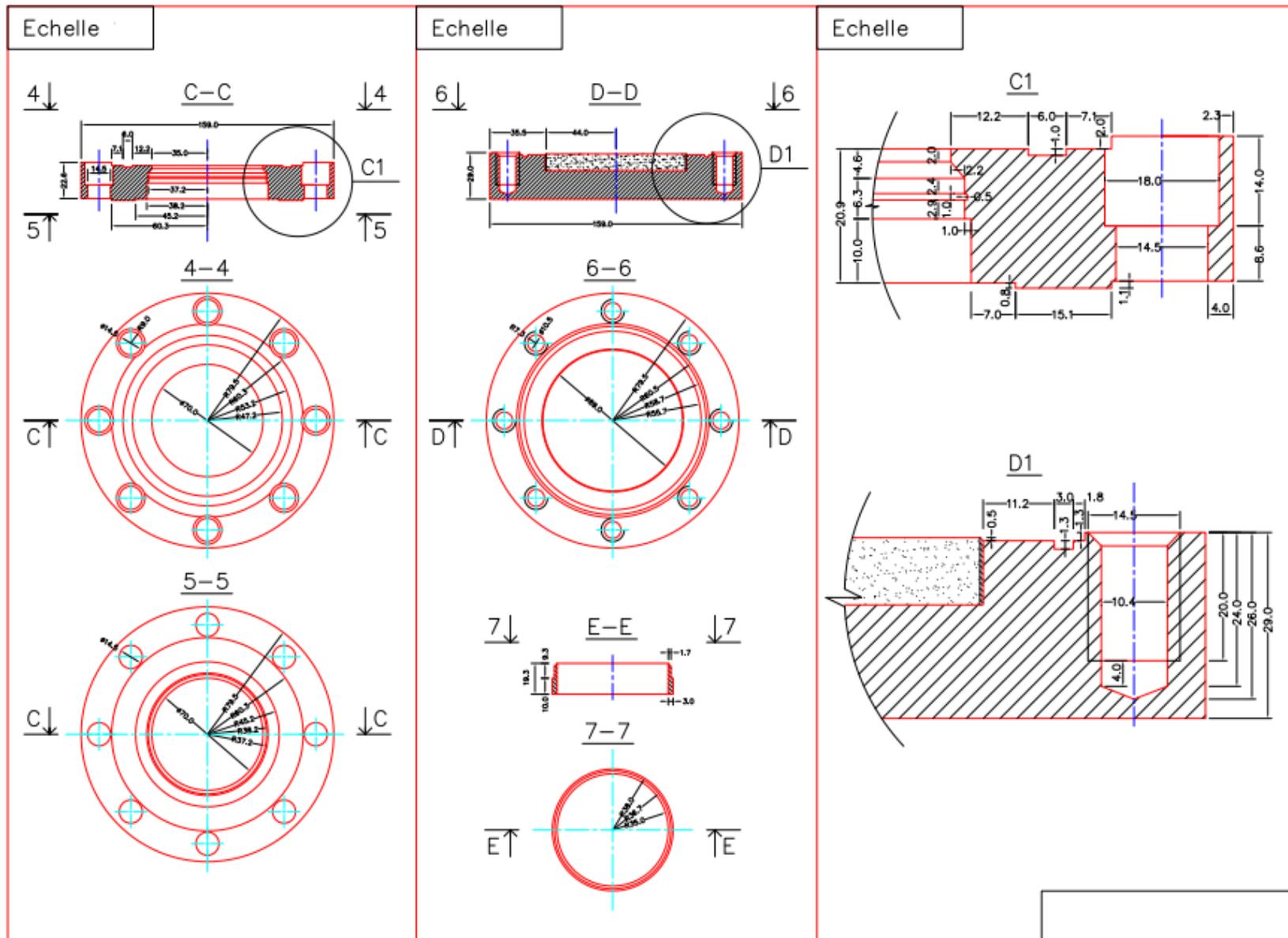


Figure A I-7 Les dimension du moule œdométrique modifié

Annexe II : Résultats numériques des essais de rétention d'eau

A-II.1 Résultats numériques des essais de rétention d'eau

Essai de rétention d'eau Matériau Livet-Gavet passant à 2 mm Etat compacté 25 coups par couche à Optimum Proctor dans la moule CBR $w_{op25} = 11.8\%$					
Type	Méthode	Succion (kPa)	Sr	e	w(%)
Drainage	osmotique 8 semaines	53.90	0.93	0.67	22.83
		110.00	0.89	0.63	20.55
		247.50	0.95	0.62	21.62
		990.00	0.47	0.57	9.81
		1760.00	0.31	0.58	6.53
		2750.00	0.18	0.59	3.95
		3960.00	0.15	0.42	2.37
		5390.00	0.09	0.55	1.77
	osmotique 6 semaines	247.5	0.89	0.64	20.67
		440.0	0.68	0.50	12.52
		687.5	0.48	0.59	10.27
		990.0	0.50	0.54	9.77
		1760.0	0.29	0.61	6.38
		2750.0	0.14	0.56	2.87
		3960.0	0.09	0.54	1.84
		5390.0	0.10	0.50	1.77
	Dessiccateur 6 semaines	22400.0	0.04	0.50	0.73
		182100.0	0.02	0.46	0.37
		37800.0	0.03	0.50	0.63
		137800.0	0.02	0.49	0.38
	Humidification	Dessiccateur 6 semaines	22400.0	0.03	0.46
182100.0			0.01	0.49	0.19
37800.0			0.08	0.45	0.56
		9.9	0.91	0.54	17.99

		9.9	0.85	0.45	14.16	
		27.5	0.71	0.51	13.24	
		53.9	0.76	0.50	13.95	
		110.0	0.58	0.48	10.09	
	osmotique	247.5	0.52	0.43	8.17	
	6 semaines	440.0	0.51	0.44	8.32	
		990.0	0.36	0.53	6.96	
		1760.0	0.20	0.50	3.70	
		2750.0	0.15	0.45	2.51	
		3960.0	0.10	0.51	1.93	
Essai de rétention						
Matériau Livet-Gavet passant à 2 mm						
Etat Compacté 55 coups par couche à Optimum Proctor dans la moule CBR						
$W_{op55} = 11.2\%$						
Type	Méthode	Succion (kPa)	Sr	e	w(%)	
Drainage	Osmotique 6 semaines	1760.00	0.26	0.40	3.75	
		1760.00	0.20	0.50	3.75	
		1760.00	0.22	0.46	3.75	
		687.50	0.74	0.40	10.71	
		687.50	0.65	0.45	10.71	
		687.50	0.62	0.47	10.71	
		110.00	0.95	0.44	15.32	
		110.00	0.89	0.47	15.32	
		110.00	0.96	0.44	15.32	
		53.90	0.92	0.45	14.99	
		53.90	0.90	0.45	14.99	
		53.90	0.93	0.44	14.99	
		990.00	0.52	0.38	7.17	
		990.00	0.47	0.41	7.17	
	990.00	0.55	0.36	7.17		
	440.00	0.90	0.45	15.05		
	440.00	0.92	0.45	15.05		
	440.00	0.90	0.46	15.05		
			37800	0.04	0.38	0.50
			37800	0.03	0.41	0.50
			4200	0.16	0.37	2.21
			4200	0.16	0.38	2.21
			22400	0.04	0.42	0.67
		22400	0.04	0.41	0.67	
		182100	0.01	0.37	0.09	

	Dessiccateur	182100	0.01	0.36	0.09
	6 semaines	137800	0.02	0.38	0.22
		137800	0.02	0.39	0.22
Humidification	Dessiccateur 6 semaines	37800.00	0.04	0.33	0.51
		37800.00	0.04	0.32	0.51
		4200.00	0.19	0.33	2.29
		4200.00	0.17	0.37	2.29
		22400.00	0.05	0.33	0.65
		22400.00	0.05	0.34	0.65
		182100.00	0.01	0.33	0.10
		182100.00	0.01	0.31	0.10
		137800.00	0.02	0.33	0.24
		137800.00	0.02	0.34	0.24
				10.00	0.80
	osmotique 6 semaines	10.00	0.87	0.37	11.98
		28.00	0.77	0.38	10.77
		28.00	0.82	0.36	10.77
		110.00	0.67	0.34	8.37
		110.00	0.61	0.38	8.37
		247.00	0.56	0.33	6.85
		247.00	0.61	0.31	6.85
		440.00	0.53	0.29	5.66
		440.00	0.51	0.30	5.66
		1126.40	0.38	0.37	5.03
		1126.40	0.36	0.39	5.03

Essai de rétention							
Matériau Livet-Gavet passant à 2 mm							
Etat compacté 85 coups par couche à Optimum Proctor dans la moule CBR							
$W_{op85} = 10.7\%$							
Type	Méthode	Succion (kPa)	Sr	e	w(%)		
Drainage	osmotique 6 semaines	1760	0.43	0.45	7.00		
		1760	0.45	0.43	7.00		
		1760	0.52	0.37	7.00		
		688	1.01	0.46	17.10		
		688	0.98	0.47	17.10		
		688	0.96	0.49	17.10		
		110	1.01	0.48	17.73		
		110	0.95	0.51	17.73		
		110	1.01	0.48	17.73		
		54	0.98	0.49	17.45		
		54	1.01	0.47	17.45		
		54	0.97	0.49	17.45		
		248	0.98	0.52	18.59		
		248	0.98	0.52	18.59		
		248	1.00	0.51	18.59		
		990	0.78	0.39	11.14		
		990	0.76	0.40	11.14		
		990	0.76	0.40	11.14		
		440	0.99	0.48	17.28		
		440	0.98	0.48	17.28		
		440	1.01	0.47	17.28		
				37800	0.03	0.41	0.47
				37800	0.03	0.41	0.47
				4200	0.17	0.35	2.19
				4200	0.16	0.38	2.19
			Dessiccateur 6 semaines	22400	0.04	0.41	0.62
				22400	0.04	0.40	0.62
				182100	0.01	0.42	0.11
182100	0.01			0.39	0.11		
137800	0.02			0.40	0.22		
137800	0.02			0.40	0.22		
Humidification	Dessiccateur 6 semaines	37800	0.04	0.38	0.51		
		37800	0.04	0.35	0.51		
		4200	0.15	0.36	1.94		
		4200	0.15	0.35	1.94		
		22400	0.04	0.38	0.60		

		22400	0.04	0.37	0.60
		182100	0.01	0.35	0.09
		182100	0.01	0.36	0.09
		137800	0.02	0.35	0.20
		137800	0.02	0.36	0.20
	osmotique 6 semaines	10	0.88	0.42	13.51
		10	0.82	0.45	13.51
		28	0.78	0.40	11.50
		28	0.75	0.42	11.50
		54	0.74	0.40	10.90
		54	0.79	0.37	10.90
		110	0.61	0.44	9.74
		110	0.66	0.40	9.74
		440	0.56	0.35	7.23
		440	0.61	0.32	7.23
		688	0.45	0.38	6.21
		688	0.39	0.43	6.21
		1126	0.35	0.36	4.67
		1126	0.34	0.38	4.67

Essai de rétention					
Matériau Livet-Gavet passant à 2 mm					
état compacté 85 coups par couche à w=13% (côté humide) dans la moule CBR					
w de préparation = 13%					
Type	Méthode	Succion (kPa)	Sr	e	w(%)
Drainage	osmotique 6 semaines	53.90	0.99	0.55	20.13
		53.90	1.00	0.55	20.13
		53.90	0.99	0.55	20.13
		110.00	0.99	0.57	22.29
		110.00	0.99	0.56	22.29
		110.00	0.96	0.58	22.29
		247.50	0.96	0.55	21.11
		247.50	0.96	0.55	21.11
		247.50	0.99	0.54	21.11
		440.00	0.95	0.60	22.89
		440.00	0.97	0.59	22.89
		440.00	0.96	0.60	22.89
		687.50	0.82	0.49	14.72
		687.50	0.85	0.47	14.72
		687.50	0.85	0.04	14.72

		990.00	0.64	0.50	11.68
		990.00	0.66	0.48	11.68
		990.00	0.68	0.47	11.68
		1760.00	0.37	0.54	7.22
		1760.00	0.43	0.46	7.22
		1760.00	0.38	0.53	7.22

Essai de rétention						
Matériau Livet-Gavet passant à 2 mm						
Etat compacté 55 coups par couche à w=13% (côté humide) dans la moule CBR w de préparation = 13%						
Type	Méthode	Succion (kPa)	Sr	e	w(%)	
Drainage	osmotique 6 semaines	10.00	1.01	0.51	19.11	
		10.00	1.01	0.52	19.11	
		10.00	1.04	0.50	19.11	
		28.00	0.99	0.52	18.86	
		28.00	0.98	0.53	18.86	
		28.00	1.00	0.52	18.86	
		54.00	1.04	0.47	18.06	
		54.00	0.99	0.50	18.06	
		54.00	1.01	0.49	18.06	
		110.00	1.01	0.49	18.19	
		110.00	0.97	0.51	18.19	
		110.00	1.00	0.50	18.19	
		247.00	0.98	0.48	17.25	
		247.00	0.99	0.48	17.25	
		247.00	1.00	0.47	17.25	
		440.00	0.98	0.45	16.01	
		440.00	0.97	0.45	16.01	
		440.00	0.97	0.45	16.01	
		688.00	0.87	0.42	13.48	
		688.00	0.89	0.41	13.48	
	688.00	0.88	0.42	13.48		
	990.00	0.59	0.38	8.23		
	990.00	0.56	0.40	8.23		
	990.00	0.59	0.38	8.23		
		Dessicateur	37800.00	0.04	0.41	0.60
			37800.00	0.04	0.42	0.60
			4200.00	0.18	0.35	2.32
	4200.00		0.17	0.38	2.32	

	6 semaines	22400.00	0.05	0.41	0.82
		22400.00	0.06	0.40	0.82
		182100.00	0.01	0.42	0.18
		182100.00	0.01	0.40	0.18
		137800.00	0.02	0.40	0.32
		137800.00	0.02	0.40	0.32

Essai de rétention					
Matériau Livet-Gavet passant à 2 mm					
Etat compacté 85 coups par couche à w=9% (côté sec) dans la moule CBR w préparation 9%					
Type	Méthode	Succion (kPa)	Sr	e	w(%)
Drainage	osmotique 6 semaines	1760.00	0.50	0.40	7.24
		1760.00	0.48	0.41	7.24
		1760.00	0.56	0.36	7.24
		687.50	0.94	0.44	15.05
		687.50	0.91	0.45	15.05
		687.50	0.90	0.45	15.05
		110.00	0.95	0.61	21.04
		110.00	0.99	0.58	21.04
		53.90	1.02	0.43	16.17
		53.90	0.98	0.45	16.17
		53.90	0.96	0.46	16.17
		247.50	0.96	0.56	19.66
		247.50	0.95	0.56	19.66
		247.50	0.94	0.57	19.66
		990.00	0.82	0.47	14.11
		990.00	0.88	0.44	14.11
		990.00	0.95	0.40	14.11
		440.00	0.90	0.57	18.94
		440.00	0.97	0.53	18.94
		440.00	0.95	0.54	18.94

Essai de rétention

Matériau Livet-Gavet passant à 2 mm					
Etat		compacté 85 coups par couche à w=13% (côté humide) dans la moule CBR w de préparation = 13%			
Type	Méthode	Succion (kPa)	Sr	e	w(%)
Drainage	osmotique 6 semaines	1760.00	0.65	0.36	8.56
		1760.00	0.60	0.39	8.56
		1760.00	0.65	0.36	8.56
		687.50	1.02	0.45	16.87
		687.50	1.00	0.46	16.87
		110.00	1.00	0.44	15.95
		110.00	1.01	0.43	15.95
		110.00	0.99	0.44	15.95
		53.90	1.03	0.43	16.29
		53.90	1.01	0.44	16.29
		53.90	1.02	0.44	16.29
		247.50	1.00	0.47	17.14
		247.50	0.98	0.48	17.14
		990.00	0.89	0.38	12.26
		990.00	0.87	0.38	12.26
		990.00	0.90	0.37	12.26
		440.00	1.01	0.41	15.27
		440.00	0.99	0.42	15.27
		440.00	0.97	0.43	15.27

A-II.2 Quelques images des essais de rétention d'eau:



Figure A II-1 Le problème de bactérie dans la solution PEG



Figure A II-2 La fabrication et mise en place des petites éprouvettes pour l'essai rétention d'eau par méthode osmotique



Figure A II-3 : Les éprouvettes paraffinés et la pesée hydrostatique pour mesure le volume et degré de saturation