



**HAL**  
open science

# Étude expérimentale des sols proches de la saturation : application aux remblais en matériaux fins

Benjamin Pelizzari

► **To cite this version:**

Benjamin Pelizzari. Étude expérimentale des sols proches de la saturation : application aux remblais en matériaux fins. Matériaux. Université Grenoble Alpes, 2017. Français. NNT : 2017GREAI066 . tel-01718605

**HAL Id: tel-01718605**

**<https://theses.hal.science/tel-01718605>**

Submitted on 27 Feb 2018

**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.

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

### **DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE**

Spécialité : **Génie civil**

Arrêté ministériel : -

Présentée par

**Benjamin Pelizzari**

Thèse dirigée par **Olivier Plé**  
et encadrée par **Simon Salager**

préparée au sein **du laboratoire 3SR - Sol, Solide, Structure, Risque**  
et de **l'école doctorale IMEP2**

# **Étude expérimentale des sols proches de la saturation : Appli- cation aux remblais en matériaux fins**

Thèse soutenue publiquement le **12 Octobre 2017**,  
devant le jury composé de :

**Pascal Villard**

Professeur, Université Grenoble Alpes, Président

**Pierre Breul**

Professeur, Université Blaise Pascal, Rapporteur

**Moulay Saïd El Youssoufi**

Professeur, Université de Montpellier, Rapporteur

**Antonin Fabbri**

Chargé de recherche, ENTPE, Examineur

**Olivier Plé**

Professeur, Université de Savoie Mont Blanc, Directeur de thèse

**Simon Salager**

MCF, Université Grenoble Alpes, Encadrant de Thèse

**Luc Boutonier**

Responsable service Ouvrages et Bâtiments, Egis Géotechnique, Invité



---

# Remerciements

---

À toi, si tu te reconnais...

Je souhaite tout d'abord remercier les membres du jury, ainsi que mes encadrants Olivier et Simon pour l'aide qu'ils m'ont apportée au cours de mon travail.

Je veux aussi passer un grand merci à ma famille pour le soutien et les dépannages réguliers en pièces détachées et bricolages de dernière minute

Je passe aussi mes salutations à tous ceux avec qui j'ai fait route pendant toutes ces années, qui m'ont fourni un socle sur lequel m'appuyer pendant les temps durs.

Et, pour finir, j'ai une pensée pour ma mère, qui avait, encore une fois, raison...

---

# Table des matières

---

<b>Nomenclature</b>	<b>X</b>
<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>1 Théorie et pratique de la mécanique des sols non saturés</b>	<b>5</b>
<i>Des molécules d'eau à la rétention des sols en passant par la succion</i>	
1.1 Thermodynamique des films d'interface et des phases présentes dans le sol . . . . .	6
1.1.1 Études des différents domaines de saturation . . . . .	6
1.1.2 La phase d'eau libre, la succion et force de van der Waals . . . . .	7
1.1.3 Problématique de la nucléation appliquée aux sols . . . . .	10
1.1.4 Équilibre de phases à faible saturation . . . . .	11
1.2 Méthodes de mesure de la succion . . . . .	12
1.2.1 La tensiométrie, mesure directe de pression interstitielle . . . . .	12
1.2.2 La psychrométrie, mesure indirecte par l'humidité relative . . . . .	13
1.2.3 La méthode papier filtre . . . . .	14
1.3 Méthodes de contrôle de la succion . . . . .	15
1.3.1 La translation d'axe . . . . .	15
1.3.2 Méthode de contrôle par phase vapeur . . . . .	16
1.3.3 Méthode de contrôle osmotique . . . . .	17
1.4 Bilan des différentes méthodes de mesure et contrôle . . . . .	17
1.4.1 Portée des méthodes de mesure/contrôle de la succion . . . . .	18
1.4.2 Erreur des différentes méthodes de contrôle/mesure de la succion . . . . .	18
1.5 Étude de la rétention des sols . . . . .	20
1.5.1 Principe d'une courbe de rétention . . . . .	20
1.5.2 Mesure et contrôle de la succion pour réalisation de courbes de rétention .	22
1.5.3 Modélisation et interprétation des courbes de rétention . . . . .	22
1.6 Discussion sur les biais apportés par les méthodes de contrôle . . . . .	25
1.6.1 Effet de la translation d'axe sur les phases gazeuse et liquide . . . . .	25
1.6.2 Effet de la translation d'axe sur la nucléation . . . . .	26
1.7 Conclusions . . . . .	29
<b>2 Planche de compactage pour la caractérisation du comportement des marnes à la mise en œuvre</b>	<b>31</b>
<i>Planche de compactage in situ et essais</i>	
2.1 Conception des ouvrages en terre . . . . .	32
2.1.1 Normes, influences locales et type de matériau . . . . .	32
2.1.2 Appropriation classique des propriétés hydromécaniques des matériaux dans le cadre de la prescription du compactage . . . . .	33
2.1.3 Matériau exploité pour la planche de compactage . . . . .	35
2.2 Définition de la planche de compactage . . . . .	35
2.2.1 État de l'art et principales problématiques rencontrées au compactage . .	36
2.2.2 Modalités choisies pour la planche . . . . .	39

2.2.3	Mode opératoire pour la réalisation de la planche . . . . .	41
2.3	Observations d'ordre général sur la planche de compactage . . . . .	42
2.3.1	Désignation des plots de la planche . . . . .	42
2.3.2	Bilan visuel de la planche par plot . . . . .	43
2.4	Caractérisation des variables d'état hydromécanique de la planche de compactage	46
2.4.1	Carottages de la planche de compactage . . . . .	46
2.4.2	Mesures de résistance au pénétrogramme dynamique manuel PANDA . . . . .	47
2.4.3	Étude de l'effet du compactage sur les perméabilités . . . . .	54
2.4.4	Étude de l'effet du compactage sur les densités . . . . .	56
2.4.5	Étude de l'effet du compactage sur la répartition de la porosité . . . . .	57
2.4.6	Étude de l'effet du compactage sur la succion . . . . .	61
2.4.7	Croisement des résultats initiaux dans les domaines de rétention . . . . .	63
2.5	Conclusions et hypothèses de travail . . . . .	66
<b>3</b>	<b>Étude Proctor de l'effet du compactage sur les matériaux fins</b>	<b>67</b>
	<i>Compactage en laboratoire, rétention et portance</i>	
3.1	Recherche de l'optimum de compactage . . . . .	68
3.1.1	L'essai Proctor . . . . .	68
3.1.2	L'essai de compactage statique . . . . .	71
3.2	Étude de l'évolution des composantes hydromécaniques au compactage . . . . .	71
3.2.1	Essai Proctor sur les marnes de la planche . . . . .	71
3.3	Analyse du comportement hydromécanique du matériau . . . . .	76
3.3.1	Variation de la succion au cours du compactage . . . . .	76
3.3.2	Analyse des chemins de compactage à l'aide de domaines de rétention . . . . .	76
3.4	Réponse mécanique par essais de portance . . . . .	87
3.4.1	Présentation de différents essais et comportements précédemment identifiés	87
3.4.2	Étude de la réponse des marnes de l'A304 à l'IPI . . . . .	89
3.5	Conclusions et comportements observés . . . . .	94
<b>4</b>	<b>Étude et développement d'une cellule triaxiale pour simuler l'effet du compactage</b>	<b>97</b>
	<i>Développement de matériel expérimental et compactage</i>	
4.1	Description de l'essai triaxial de révolution . . . . .	98
4.1.1	Adaptation pour l'étude des pressions interstitielles et de la succion . . . . .	99
4.1.2	Adaptation pour la mesure des changements de volume . . . . .	101
4.2	Développement d'un appareil triaxial pour mesure de succion et changement de volumes . . . . .	106
4.2.1	Problématiques à résoudre . . . . .	106
4.2.2	Vérification mécanique et adaptation à la fabrication . . . . .	107
4.2.3	Adaptation pour la mesure de la succion . . . . .	110
4.2.4	Calibration de la corrélation d'images . . . . .	112
4.3	Simulation du sur-compactage au sein d'une cellule triaxiale . . . . .	115
4.3.1	Étude en contraintes du compactage in situ . . . . .	115
4.3.2	Essai de sur-compactage à l'appareil triaxial . . . . .	118
4.4	Conclusion . . . . .	128
	<b>Conclusions</b>	<b>131</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>135</b>
	<b>Annexes</b>	<b>143</b>

---

# Table des figures

---

1.1	Point triple d'interface pour un sol . . . . .	6
1.2	Différents domaines de saturation . . . . .	7
1.3	Forme et équilibre du ménisque d'interface air/eau (DAÏAN 2012) . . . . .	9
1.4	Diagramme de phase de l'eau . . . . .	9
1.5	Film adsorbé dans un sol, cas 1 : domaine saturé, cas 2 : Domaine sec . . . . .	11
1.6	Concept d'un mini-tensiomètre haute performance (RIDLEY et BURLAND 1993) . . . . .	12
1.7	Psychromètre à effet Pelletier de chez Wescor . . . . .	14
1.8	Courbe de rétention proposée par la norme ASTM pour filtre Watman 42 . . . . .	14
1.9	Placement d'un papier filtre entre deux autres de protection dans un sol . . . . .	15
1.10	Principe de la translation d'axe . . . . .	16
1.11	Principe de la méthode par contrôle de phase vapeur . . . . .	16
1.12	Principe de la méthode osmotique . . . . .	17
1.13	Bilan de la portée des différentes mesures et contrôles . . . . .	18
1.14	Fuseau d'erreur de mesure pour la méthode papier filtre . . . . .	19
1.15	Exemple de courbe de rétention (FLEUREAU et al. 1993) . . . . .	21
1.16	Domaine de saturation selon BOUTONNIER (2007) . . . . .	24
1.17	Courbe de vidange des pores contre nucléation . . . . .	27
1.18	État de l'espace poreux modèle en fonction de la pression d'air à l'interface ( $r = 0.291; 0.347; 0.582\mu m$ ) pour une succion de $500kPa$ . . . . .	28
1.19	Taille minimum du pore caché pouvant nucléer en fonction du pore d'entrée . . . . .	29
2.1	Matériau de la planche de compactage . . . . .	36
2.2	Sédimentographie de la marne de l'A304 . . . . .	36
2.3	Principe du feuilletage . . . . .	38
2.4	Principe du matelassage . . . . .	38
2.5	Compacteurs utilisés pour la réalisation de la planche . . . . .	40
2.6	Mise en œuvre du matériau pour séchage . . . . .	42
2.7	Pulvimixage du matériau régalié . . . . .	42
2.8	État après compactage du plot 1BMVP5 . . . . .	43
2.9	État après compactage du plot 2BMV5 . . . . .	44
2.10	Écaillage du plot 2BMV5 au-dessus des blocs . . . . .	44
2.11	Fissuration après dessiccation du plot 2BMV5 . . . . .	44
2.12	État de surface du plot 7PHV5 . . . . .	45
2.13	État de surface du plot 8PHVP5 . . . . .	46
2.14	Mode opératoire des carottages sur les plots de la planche . . . . .	47
2.15	Présentation du Panda et utilisation . . . . .	48
2.16	Exemple de pénétrogramme sur la planche de compactage . . . . .	49
2.17	Exemples de pénétrogrammes issus d'un même plot (lissés) . . . . .	50

2.18	Graphique type récapitulatif par plot de compactage, première couche uniquement (normalement compacté en noir et sur compacté en magenta) . . . . .	50
2.19	Valeurs moyennes et minimums des pénétrogrammes par plot . . . . .	52
2.20	Pénétragramme du dépôt 18P2 avant extraction du matériau . . . . .	54
2.21	Matériel de mesure de perméabilité . . . . .	55
2.22	Principe de la mesure au gammadensimètre . . . . .	56
2.23	Valeurs moyennes des densités sèches mesurées sur carottes . . . . .	58
2.24	Exemple de résultat de porométrie mercure (DAÏAN 2007) pour une argilite . . . . .	59
2.25	Répartition volumique des tailles de pores pour le plot 7 (pulvimixé, humide, V5) . . . . .	60
2.26	Valeurs moyennes de succion par plot . . . . .	62
2.27	Domaine succion, densité, saturation (deux angles différents) . . . . .	64
2.28	Corrélation entre les différentes variables d'état par plot de compactage . . . . .	65
3.1	Schéma des moules type pour essai Proctor AFNOR 1999 . . . . .	68
3.2	Courbes types d'un essai Proctor avec domaine (Chapitre 1) de saturation . . . . .	69
3.3	Proctor à différentes énergies et courbes d'iso succion (ROMERO, GENS et LLORET 1999) . . . . .	72
3.4	Comparaison entre compactages Proctor et statique (OLIVIER 1986) . . . . .	73
3.5	Courbe Proctor de la marne de l'A304 pour séchage naturel et séchage 110°C . . . . .	74
3.6	Comparaison entre Proctor préparé en laboratoire et Proctor exécuté du chantier . . . . .	75
3.7	Comparaison entre Proctor préparés en laboratoire et mesures sur carottes de la planche . . . . .	76
3.8	Évolution de la succion au cours du compactage pour matériaux séchés naturellement (mouture laboratoire) . . . . .	77
3.9	Courbes de saturation en fonction de la succion pour les 3 densités de référence . . . . .	78
3.10	Comportement des pores au sur-compactage, cas 1 : augmentation de volume du pore adjacent, cas 2 : augmentation de volume du pore liaison . . . . .	79
3.11	Courbes de saturation en fonction de la teneur en eau pour les 3 densités de référence . . . . .	80
3.12	Courbes d'indice des vides en fonction de la teneur en eau pour les 3 densités de référence . . . . .	81
3.13	Courbes d'indice des vides en fonction de la succion pour les 3 densités de référence . . . . .	82
3.14	Courbes de teneur en eau en fonction de la succion pour les 3 densités de référence . . . . .	83
3.15	Courbes de saturation (séchage naturel) en fonction de la succion, comparées aux points de rétention obtenus avec séchage à 110°C . . . . .	84
3.16	Courbes d'indice des vides (séchage naturel) en fonction de la succion, comparées aux points de rétention obtenus avec séchage à 110°C . . . . .	85
3.17	Mesures sur les carottes de la planche de compactage comparées à l'enveloppe des courbes de rétention . . . . .	86
3.18	Courbes CBR/w et CBR/succion pour différents mélanges de sables et d'argile (PURWANA 2013) . . . . .	88
3.19	Courbe montrant l'hystérésis de la réponse au cisaillement à différents degrés de compactage . . . . .	89
3.20	Courbes de chargement lors de l'essai IPI pour le matériau séché naturellement (a) côté sec (b) côté humide . . . . .	90
3.21	Courbes de chargement lors de l'essai IPI pour le matériau séché à 110°C (a) côté sec (b) coté humide . . . . .	90
3.22	Régressions sur les valeurs d'IPI en fonction de la teneur en eau et de la succion . . . . .	91
3.23	Comparaison des points IPI chantier (passant à $\phi 20mm$ ) et laboratoire (passant à $\phi 5mm$ ) . . . . .	92
3.24	Comparaison des courbes IPI pour des succions égales (a) 440kPa, naturel (b) 2200kPa, 110°C . . . . .	92
3.25	Régressions sur les valeurs du Panda (Planche) en fonction de la teneur en eau . . . . .	93

3.26	Comparaison des courbes IPI pour des densités égales (a) $1.5kg \cdot cm^{-3}$ , $110^{\circ}C$ (b) $1.6kg \cdot cm^{-3}$ , $110^{\circ}C$ (c) $1.5kg \cdot cm^{-3}$ , naturel . . . . .	94
4.1	Plan de principe d'une cellule triaxiale . . . . .	98
4.2	Embase triaxiale avec capteur tensiométrique (SIMMS et GRABINSKY 2009) . . . . .	100
4.3	Échantillon pour essais triaxiaux avec capteur latéral monté sur membrane . . . . .	100
4.4	Principe d'adaptation de la translation d'axe sur un échantillon triaxial . . . . .	101
4.5	Principe d'adaptation du contrôle de phase de vapeur sur un échantillon triaxial (BLATZ et GRAHAM 2000) . . . . .	102
4.6	Principe d'une mesure de variation de volume par double paroi . . . . .	103
4.7	Principe d'une estimation de variation de volume par capteur à effet Hall . . . . .	104
4.8	Mesure de changement de volume par va-et-vient laser . . . . .	105
4.9	Photos d'échantillon dans une cellule triaxiale (GACHET et al. 2007) . . . . .	105
4.10	Principe optique de la cellule triaxiale pour corrélation d'images avec deux appareils . . . . .	107
4.11	Maillage de la cellule triaxiale pour étude Cast3m . . . . .	109
4.12	Chargement de la cellule (a) et conditions limites (b) pour Cast3m . . . . .	109
4.13	Contraintes de Von Mises de la cellule triaxiale (pression interne de $2MPa$ ) . . . . .	109
4.14	Déformation de la cellule triaxiale en mètre (pression interne de $2MPa$ ) . . . . .	110
4.15	Cellule triaxiale finalisée . . . . .	110
4.16	Incorporation du tensiomètre dans l'embase de la cellule . . . . .	111
4.17	Mesure de pression interstitielle dans l'échantillon lors du déconfinement . . . . .	112
4.18	Dispositif de prise d'image pour la cellule triaxiale (avec échantillon) . . . . .	113
4.19	Photos des cibles de calibration dans la cellule triaxiale . . . . .	113
4.20	Étapes de traitement d'images pour la mesure . . . . .	114
4.21	État du sol sous la bille d'un compacteur DANDJINOU 1988 . . . . .	116
4.22	Mesures tridimensionnelles au passage d'une bille (RINEHART et MOONEY 2009) et mesures à plusieurs profondeurs (vibrant et statique) (RINEHART, MOONEY et BERGER 2008) . . . . .	116
4.23	Plan de chargement de l'échantillon . . . . .	118
4.24	Étapes de découpe d'un échantillon pour la cellule triaxiale . . . . .	118
4.25	Échantillon endommagé présentant un cisaillement partiel . . . . .	119
4.26	Étapes de post-traitement des photos d'essais . . . . .	120
4.27	Méthode de définition de l'échelle d'une photo . . . . .	120
4.28	Schéma de principe de la méthode d'estimation du volume par tranche . . . . .	121
4.29	Chargement appliqué à l'échantillon exprimé en contrainte, décomposé selon déviateur, confinement, et pression moyenne) . . . . .	123
4.30	Déformation verticale de l'échantillon mesuré par LVDT et corrélation d'images . . . . .	123
4.31	Déformations volumiques de l'échantillon . . . . .	124
4.32	Mesure de succion au cours de l'essai . . . . .	125
4.33	Superposition de la photo initiale et de la photo finale de l'essai . . . . .	125
4.34	Chargement de l'échantillon représenté dans le domaine de Mohr-Coulomb . . . . .	126
4.35	Chargement isotrope de l'échantillon représenté dans le domaine de Mohr-Coulomb . . . . .	126
4.36	Mesure de déplacement du deuxième essai (avec glissement du LVDT) . . . . .	127
4.37	Mesure de l'évolution de la succion sous cycle de chargement isotrope . . . . .	127
4.38	Photos traitées du cisaillement de la partie haute du troisième échantillon . . . . .	128

---

# Liste des tableaux

---

1.1	Exemple succion en fonction de la solution saturée à 20°C (GREENPAN 1977) . . . .	17
1.2	Exemples d’erreurs de mesure et de contrôle de succion (RIDLEY et BURLAND 1993; AGUS et SCHANZ 2007; DELAGE et CUI 2000) . . . . .	20
1.3	Composition d’une mole d’air et constante de dissolution dans l’eau (de Henry) (SANDER 2015) . . . . .	25
1.4	Exemple d’un cas de nucléation avec effet de la translation d’axe . . . . .	28
2.1	Classification des sols fins selon GTR (LCPC et SETRA 2000) . . . . .	34
2.2	Sous-classes hydriques selon le GTR (LCPC et SETRA 2000) . . . . .	34
2.3	Propriétés physiques de la marne support d’étude . . . . .	36
2.4	Sous-classes d’états hydriques au sens du GTR pour un matériau A2 . . . . .	39
2.5	Données sur les deux compacteurs de la planche . . . . .	40
2.6	Nombre de passes recommandées par le GTR pour un matériau à l’état naturel . . .	41
2.7	Désignation des planches par paramètres . . . . .	43
2.8	Comparaison des valeurs moyennes des pénétrogrammes . . . . .	53
2.9	Perméabilités mesurées sur planche de compactage . . . . .	55
2.10	Comparaison des valeurs de densités . . . . .	58
2.11	Porosités mesurées par porométrie mercure sur carottes de la planche . . . . .	60
2.12	Comparaison des valeurs de succion pour la variation du paramètre ”sur compactage”	62
3.1	Données de compactage Proctor selon la norme (AFNOR 1999) . . . . .	69
4.1	Résumé et erreurs moyennes des méthodes estimées pour un échantillon de 200cm <sup>3</sup> (GEISER, LALOU et VULLIET 2000) . . . . .	106
4.2	Paramètres matériaux utilisés pour la simulation de la cellule . . . . .	108
4.3	Écarts de mesure sur les deux grilles à différentes hauteurs de presse . . . . .	114
4.4	Valeurs maximales de contrainte au passage d’un compacteur et estimation (RINEHART, MOONEY et BERGER 2008; RINEHART et MOONEY 2009) . . . . .	117
4.5	Détermination de l’échelle pour chaque photo sur un essai . . . . .	121



---

# Nomenclature

---

## Symboles latins

$A$	Constante de Hamaker	$[J]$
$c$	Concentration	$[mol/l]$
$d$	Épaisseur du film adsorbé	$[m]$
$D_{moy}$	Diamètre moyen de l'échantillon triaxial	$[m]$
$E_b$	Barrière énergétique de la CNT	$[J]$
$e$	Indice des vides	$[-]$
$e_{max}$	Indice des vides maximum à teneur en eau donnée donné	$[-]$
$G$	Module de cisaillement	$[Pa]$
$h$	Constante de dissolution (Henry)	$[Pa]$
$h_{Ech}$	Hauteur de l'échantillon triaxial par corrélation	$[m]$
$HR$	Humidité relative	$[\%]$
$Ic$	Indice de consistance	$[-]$
$Ip$	Indice de plasticité	$[-]$
$k$	Perméabilité	$[m \cdot s^{-1}]$
$M$	Masse molaire	$[g \cdot mol^{-1}]$
$n$	Concentration molaire	$[mol \cdot m^{-3}]$
$n$	Indice des vides	$[-]$
$n$	Indice de réfraction optique	$[-]$
$P_{atm}$	Pression atmosphérique	$[Pa]$
$Q_d$	Résistance en pointe du pénétromètre	$[Pa]$
$R$	Constante des gaz parfaits	$[J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}]$
$R_c$	Résistance à la compression simple	$[N]$
$r$	Rayon de pore	$[m]$
$r_c$	Rayon critique de nucléation	$[m]$
$S_{Ech}$	Surface de l'échantillon triaxial par corrélation	$[m^3]$
$Sr$	Degré de saturation	$[\%]$
$Sr_e$	Degré de saturation à l'arrivée des pressions positives	$[\%]$
$s$	Succion	$[Pa]$
$T$	Température	$[-]$
$u$	Pression d'une phase	$[Pa]$
$u_{atm}$	Pression atmosphérique	$[Pa]$
$u_{int}$	Pression interne liée aux forces de van der Waals	$[Pa]$
$W$	Énergie nécessaire à la création d'une bulle	$[J]$
$w$	Teneur en eau massique	$[\%]$
$Vol_{Ech}$	Volume de l'échantillon triaxial par corrélation	$[m^3]$
$w_l$	Limite de liquidité	$[\%]$
$w_p$	Limite de plasticité	$[\%]$
$w_{sat}$	Teneur en eau à la saturation	$[\%]$
$x$	Fraction molaire dans une phase	$[-]$

## Symboles Grecs

$\alpha$	Coefficient d'entrée d'air du modèle de Genuchten	[—]
$\gamma$	Coefficient d'entrée d'air du modèle de Brooks et Corey	[—]
$\psi$	Potentiel énergétique	[Pa] ou [ $J \cdot m^{-2}$ ]
$\rho_d$	Masse volumique sèche	[ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$\rho_s$	Masse volumique des grains	[ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$\rho$	Masse volumique	[ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$\sigma$	Tension superficielle	[ $kN \cdot m^{-1}$ ]
$\theta$	Angle d'adsorption (contact sol/eau)	[°]
$\theta$	Angle de réfraction optique	[°]
$\theta$	Température en Celsius	[°C]

## Indices et repaires généraux

$\bigcirc_a$	Se rapporte à une phase d'air	[—]
$\bigcirc_{air}$	Se rapporte à une valeur à l'entrée d'air	[—]
$\bigcirc^g$	Se rapporte à une phase gazeuse	[—]
$\bigcirc_i$	Se rapporte à un indice générique	[—]
$\bigcirc^l$	Se rapporte à une phase liquide	[—]
$\bigcirc_{opn}$	Se rapporte à une valeur à l'optimum Proctor normal	[—]
$\bigcirc_{opm}$	Se rapporte à une valeur à l'optimum Proctor modifié	[—]
$\bigcirc_s$	Se rapporte à une phase sol	[—]
$\bigcirc^{sat}$	Se rapporte à la valeur saturante (pression)	[—]
$\bigcirc_{sat}$	Se rapporte à la valeur à saturation	[—]
$\bigcirc_w$	Se rapporte à une phase d'eau	[—]



---

# Introduction

---

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'ANR TerreDurable (BOUTONNIER et al. 2012b), regroupant pour collaboration des laboratoires de recherche universitaires (3SR, ENTPE, LOMC), des praticiens (Valerian et VINCI), un bureau d'étude (Egis géotechnique) et une institution nationale (l'IFSTTAR). Le Projet s'attache à analyser des sols fins (argile, marne, limon) et à étudier leur comportement dans le cadre de la construction de remblais et déblais. TerreDurable porte aussi bien sur l'état naturel du sol (support d'ouvrages) que sur l'état remanié (compacté).

La réalisation des ouvrages en terre est soumise à des normes spécifiques en fonction des pays et des ouvrages construits. Pour la France, le Guide des Terrassements Routiers (GTR) fait référence. Malgré des améliorations par rapport au référentiel précédent (CORTÉ et al. 1992) - Recommandation pour les Terrassements Routiers (RTR) - il demeure certaines restrictions, en particulier sur l'utilisation de certains matériaux. Cette évolution (1976-1992) avait déjà permis d'affiner la classification des sols (types de roches, produits d'origine organique). apparaissent alors des bornes légales sur l'état hydrique (s,h,...) découlants d'essais, ou encore la prise en compte de certaines tranches granulométriques du matériau dans sa préparation au compactage. Les évolutions plus récentes, et la sensibilisation croissante aux problématiques environnementales, couplées à des enjeux de rentabilité, mènent les prescripteurs à de nouveaux challenges, repoussant les limites de l'existant. Le coût financier et écologique de la mise en dépôt d'un matériau inexploitable au GTR, et l'acheminement d'un substitut pour le chantier interrogent l'extension des limites réglementaires. Les sols fins (de classe "A" pour le GTR92), telles les marnes étudiées ici, représentent le cœur du problème. De plus, le problème reste posé en termes de bilan économique et écologique si des prescriptions mènent à ne pas utiliser le matériau ou à le traiter. Pour finir, un certain nombre de pathologies, après ou pendant la densification, peuvent parfois apparaître, du fait de la mauvaise maîtrise du compactage ou des propriétés du matériau, défauts rarement pris en compte par le GTR92 jusqu'alors.

Les retours d'expérience des praticiens amènent des interrogations sur les usages de chantier et sur les effets que des défauts de compactage (feuilletage, matelassage, orniéage) génèrent. Les paramètres de compactage (compacteur, humidité, etc.) représentent donc les clés de la maîtrise des remblais à l'échelle des chantiers, clés qui nécessitent, dès lors, une interprétation par le spectre de la mécanique des sols non saturés.

La réalisation des ouvrages en matériaux fins amène ainsi la problématique des sols fins non saturés. Ce domaine aborde notamment la succion, pression négative du fluide interstitiel présent dans le sol, et générant des comportements différents de ceux observés sur le même matériau saturé. L'étude de la succion présente des complications liées à sa mesure. Sa prise en compte dans les simulations est souvent soumise à l'interprétation de différents modèles. De plus, le lien entre les problématiques ouvrages (réels comme expérimentaux) in-situ et la succion, surtout lors du compactage n'est que trop peu mis en évidence. Il faut faire la relation, pour ces sols, entre compactage, défauts et variables d'état.

Conséquence de ces observations, le travail de recherche présenté s'articule autour de trois grands axes expérimentaux dans le but d'accéder aux relations entre les conditions de réalisation de l'ouvrage et l'état du matériau obtenu après compactage. L'étude porte sur la marne grise de l'A304 (projet d'autoroute de la DREAL Champagne-Ardenne).

Le premier chapitre présente les éléments clés de la mécanique des sols non saturés exploités tout au long de la thèse et communs à tous les chapitres, couplé à une analyse critique des méthodes expérimentales existantes. Les parties suivantes s'attacheront à décrire les résultats expérimentaux obtenus, soutenus par une bibliographie propre à chacune des parties.

Le deuxième chapitre présente la réalisation d'une planche de compactage grandeur nature, sortant du cadre du GTR. Les paramètres choisis s'inspirent des observations des praticiens, des usages européens et d'une bibliographie orientée chantier. La planche est composée de 10 plots de compactage, chacun présentant un jeu de paramètres différents. Les variations portent sur le type de compacteur, l'énergie de compactage, la teneur en eau et la mouture de réalisation. De manière à obtenir les variables d'état de la planche, une série de carottages effectuée permet d'accéder à des mesures de teneur en eau, de degré de saturation, de succion et de densité. De plus, la résistance mécanique du compactage est étudiée au travers d'essais pénétrométriques.

De manière à cadrer les résultats de la planche, des compactages Proctor couplés à des Indices Portant Immédiats (IPI) sont réalisés, et accompagnés d'une bibliographie sur le compactage en laboratoire. Ce troisième chapitre complète l'expertise faite de la planche et renforce les hypothèses proposées. Les méthodes de préparation du sol avant compactage subissent une attention particulière qui mène à des conclusions sur les disparités expérimentales observées en chantier. Alors que le Proctor nous fournit des indications sur l'état du matériau après compactage dynamique, l'IPI permet de caractériser la résistance à l'enfoncement d'un piston. Ces résultats de laboratoire seront comparés aux pénétromètres de la planche. Des courbes de rétention sont établies à partir des compactages effectués pour mieux comprendre l'évolution du matériau et offrir un cadre plus structuré aux résultats de la planche.

Le quatrième chapitre présente le développement d'un prototype de cellule triaxiale, appuyé sur une bibliographie consacrée. L'originalité du travail réside dans la réalisation d'une cellule adaptée pour la corrélation d'images et la mesure de succion, pour mettre en relation précisément la variation volumique de l'échantillon à sa densité et à sa saturation. Dans un premier temps, la conception de l'appareil est présentée. Des essais sont alors réalisés à l'aide de la cellule pour simuler le passage d'un compacteur, dont les paramètres sont calés sur ceux de la planche. Les expérimentations utilisent des éprouvettes préalablement compactées à l'énergie Proctor normale, à différentes teneurs en eau initiales. Les différentes mesures permettent de revenir aux variables d'état. Ces dernières permettent de conclure sur les phénomènes apparus au cours du compactage et l'état du sol.



---

# Théorie et pratique de la mécanique des sols non saturés

---

*Des molécules d'eau à la rétention des sols en passant par la succion*

## Sommaire

---

1.1	Thermodynamique des films d'interface et des phases présentes dans le sol . . .	6
1.2	Méthodes de mesure de la succion . . . . .	12
1.3	Méthodes de contrôle de la succion . . . . .	15
1.4	Bilan des différentes méthodes de mesure et contrôle . . . . .	17
1.5	Étude de la rétention des sols . . . . .	20
1.6	Discussion sur les biais apportés par les méthodes de contrôle . . . . .	25
1.7	Conclusions . . . . .	29

---

La mécanique des sols concerne l'étude des deux phases le composant : l'eau et le squelette granulaire. La mécanique des sols non saturés amène une troisième phase : l'air. Cet ajout mène à la complexification des mesures des variables d'état du sol (densité, saturation, pression interstitielle). L'objectif est d'introduire dans ce chapitre les bases de la mécanique des sols non saturés, comprenant les éléments communs et nécessaires à l'ensemble du rapport. Chaque chapitre contiendra alors une bibliographie propre à ses besoins de compréhension. Ce parti pris a été préféré à la rédaction d'un chapitre bibliographique unique. Ce premier chapitre s'attachera à définir les phases et leur comportement individuel comme d'interface. Dans un deuxième temps seront étudiés les moyens de mesurer et de contrôler la succion. S'ensuivra une introduction à la problématique de rétention des sols. Enfin, le chapitre se terminera par une étude critique sur les mesures et les contrôles de la succion.

## 1.1 Thermodynamique des films d'interface et des phases présentes dans le sol

Dans cette section, trois phases seront étudiées : l'eau, l'air et le sol. Toutes les problématiques de la mécanique des sols sont liées aux interactions et au comportement propre à chacune de ces phases. Elles peuvent être mises en évidence en un seul point : le point triple, présenté en figure 1.1. On voit alors que la phase liquide n'est pas aussi simple. Elle se divise elle-même en trois zones aux comportements différents : le liquide, le film adsorbé, et le film d'interface. Chacune de ces zones présente un comportement différent lié à des actions mécaniques et chimiques jouant des rôles majeurs, et influençant le comportement du sol à l'échelle macroscopique. Les trois zones de l'eau seront plus ou moins en présence selon l'état de saturation du sol. Leurs effets sur le squelette seront alors dépendants du domaine de saturation du sol.

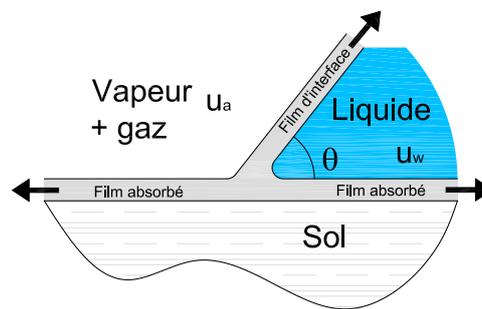


FIGURE 1.1 – Point triple d'interface pour un sol

### 1.1.1 Études des différents domaines de saturation

La non-linéarité des phénomènes de couplage présents dans les sols saturés a toujours poussé les praticiens à isoler chaque comportement dans son domaine d'influence. Ils se répartissent généralement sur une gamme large, allant d'un sol totalement sec à un sol totalement saturé, comme présenté en figure 1.2. La séparation classique des domaines se fait comme suit (SALAGER 2007; CHALAK 2016) :

- Domaine hygroscopique : Il y a seulement de l'eau en surface des grains. Les pores sont globalement vides. La phase d'air à travers le sol est continue. Il y a un équilibre entre l'eau et la vapeur dans l'air. Pour autant, des transferts liquides d'eau peuvent avoir lieu au sein des films adsorbés (KÉBRÉ 2013).
- Domaine pendulaire : La saturation est plus importante que précédemment, des ponts apparaissent entre les grains. L'eau peut percoler à travers les ponts et des échanges entre vapeur dans l'air et l'eau s'effectuent. On voit apparaître des clusters (plusieurs pores reliés) d'eau et d'air. Ce sont les pont d'eau qui contrôlent la cohésion du matériau (RICHEFEU, EL YOUSOUFI et RADJAI 2006)
- Domaine funiculaire : La phase liquide devient continue. Les clusters d'air ont été réduits à des bulles enfermées dans des pores. Les transferts se font par filtration liquide.
- Domaine saturé : La phase gazeuse est dissoute dans l'eau, et le sol est totalement saturé. Il n'y a plus d'air visible.

Ces domaines, communément utilisés dans la mécanique des sols, présentent un problème principal pour l'étude du compactage, et surtout des sols proches de la saturation. Il n'existe pas de domaine à part entière où les pressions d'eau sont supérieures à la pression de l'air, et où le sol n'est pas saturé. Pendant la saturation, des bulles sont enfermées dans le fluide interstitiel,

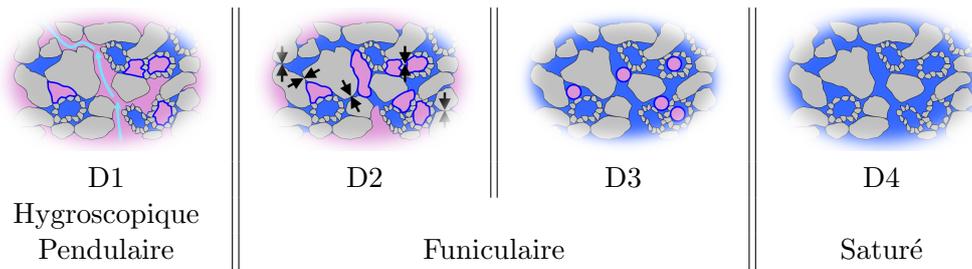


FIGURE 1.2 – Différents domaines de saturation

et doivent être prises en compte dans le comportement du sol. De même, les pressions peuvent augmenter (compactage, remplissage de barrage) menant à des pressions positives alors que l'air est encore prisonnier. Dans ce cadre, il est préférable d'utiliser la dénomination proposée par BOUTONNIER (2007) :

- Domaine D1 : la phase d'air est continue à travers le sol. Lors d'une désaturation, l'entrée d'air aurait déjà eu lieu dans le sol (domaines hygroscopique et pendulaire).
- Domaine D2 : l'air est occlus sous forme de clusters. Dans ce domaine, l'eau accroît les forces de contact inter-granulaires. Les pressions d'eau sont inférieures à celles de l'air (domaine funiculaire).
- Domaine D3 : les clusters d'air ne sont plus que des bulles d'air. Les pressions d'eau peuvent alors être supérieures à celles de l'air extérieur. Les bulles agiront alors comme des ressorts influençant la compressibilité du fluide interstitiel (domaine funiculaire).
- Domaine D4 : le sol est complètement saturé et les bulles d'air sont dissoutes dans le fluide interstitiel (domaine saturé)

Ce choix de domaines de saturation s'applique bien à la mécanique des sols dans le cadre des terrassements. Les transitions des domaines sont en fait basées sur les différents domaines de comportement observables sur les essais Proctor, présentés en chapitre 3.

Cette définition des domaines, surtout dans le cas saturé, permet de prendre en compte un comportement plus détaillé du fluide interstitiel dans la zone quasi-saturée. L'eau est généralement considérée comme incompressible. Or, la présence de bulles permet de définir le fluide interstitiel comme compressible. Un incrément de pression permettra de faire varier la taille des bulles, le fluide aura donc une compressibilité liée à la taille et à la pression des bulles. WHEELER (1986) avait établi les premières idées appliquées à la mécanique des sols non saturés concernant le sujet des bulles et de leur lien à la compressibilité du fluide. L'équation liant bulles et compressibilité permet d'arriver à un fluide interstitiel compressible considéré comme une seule phase, et de résoudre des problèmes de mécanique des sols non saturés en n'utilisant que deux phases, au lieu de trois généralement (MAHMUTOVIC et al. 2014).

### 1.1.2 La phase d'eau libre, la succion et force de van der Waals

L'eau interstitielle joue un rôle majeur dans les sols non saturés. Son état dans le sol est lié à deux facteurs. D'une part, la forme du squelette granulaire dans lequel elle est, puis la pression de l'air qui l'entoure. La loi de Jurin/Laplace définit le lien entre la pression de chaque côté de l'interface air/eau (film d'interface, Fig. 1.1) et la géométrie enfermant le liquide. Cette loi est simplement mise en évidence par la remontée de l'eau dans un tube fin plongé dans un volume d'eau. La remontée d'eau (liée à une dépression dans le liquide) est directement liée au rayon du tube  $r$  par l'équation 1.1. Cette loi s'applique principalement dans les domaines proches de

la saturation, le domaine funiculaire (D2, D3), où le rayon  $r$  peut être assimilé au diamètre du pore. Ici,  $u_a$  est la pression de l'air,  $u_l$  la pression du liquide,  $r$  le rayon du tube et  $\theta$  l'angle de contact entre le tube et l'eau au point triple (Fig. 1.1). Pour les sols, il est généralement considéré que  $\cos(\theta)$  vaut 1. Cela correspond au comportement parfaitement mouillant du sol.  $\sigma_w$  représente la tension superficielle de l'eau.

$$u_a - u_w = \frac{2 \cdot \sigma_w \cdot \cos(\theta)}{r} \quad (1.1)$$

Ici apparaît une nouvelle variable d'état macroscopique de la mécanique des sols non saturés, à savoir la différence de pression entre l'eau et le sol, nommée succion matricielle et notée  $s$  (Eq. 1.2). La succion totale peut être décomposée entre la succion matricielle représentant la pression du fluide interstitiel et les effets chimiques, qui peuvent provenir de certains éléments dans le sol (sels par exemple). Ce sont des effets osmotiques.

$$s = u_a - u_w \quad (1.2)$$

La tension superficielle de l'eau  $\sigma_w$  représente la traction admissible à l'interface eau/air. Cette dernière est souvent représentée par un trait. Pour autant, il s'agit plutôt d'un phénomène progressif sur plusieurs couches de molécules. La densité de molécule dans l'eau liquide est très forte, et définie par deux éléments : d'une part, les forces de répulsion tendant à éloigner les molécules d'eau les unes des autres, et d'autre part, les forces de van der Waals, menant à une attraction entre molécules. Cet équilibre peut être retranscrit à travers l'équation. 1.3

$$u_w = nRT - u_{int} \quad (1.3)$$

où  $u_{int}$  représente le potentiel d'attraction des molécules, assimilé ici à une pression, générée par les forces de van der Waals (interaction électrique de faible intensité).  $n$  est la concentration molaire du fluide,  $R$  la constante des gaz parfaits et  $T$  la température en Kelvin

En revanche, l'air présente une densité très faible de molécules, et une densité de molécules d'eau encore plus faible. Seules les forces de répulsion sont à l'œuvre. Cette quantité de molécules est définie par l'humidité relative (Eq. 1.4), rapport entre la pression relative des molécules d'eau dans l'air ( $x_w^g \cdot u_a$  ici présenté comme le produit du pourcentage de molécule d'eau dans l'air et sa pression), en rapport à la pression de vapeur saturante ( $u_w^{sat}$ ). Cette différence de densité de molécule doit être progressivement équilibrée par la transition entre l'eau liquide et la vapeur dans l'air. Au fur à mesure de l'avancée à travers l'interface, la densité des molécules va se réduire, mais pas sans générer un déséquilibre mécanique tendant à courber l'interface, d'où la forme de ménisque observable. Pour finir, ce ménisque, tel un pont, doit être en équilibre mécanique, et transmet donc sa force résultante au sol, tel que montré en figure 1.3.

$$HR = \frac{x_w^g \cdot u_a}{u_w^{sat}} \quad (1.4)$$

Cet équilibre d'interface peut aussi être vu comme l'égalité de deux potentiels chimiques. La densité des molécules d'eau, définie par la pression, est en équilibre avec le nombre de molécules d'eau dans l'air  $\psi_w$ , menant à la loi de Kelvin (Eq. 1.5), et qui donne le lien entre succion et humidité relative de l'air. La succion définie ici est globale, et subit les effets des dissolutions de sels (osmotiques).

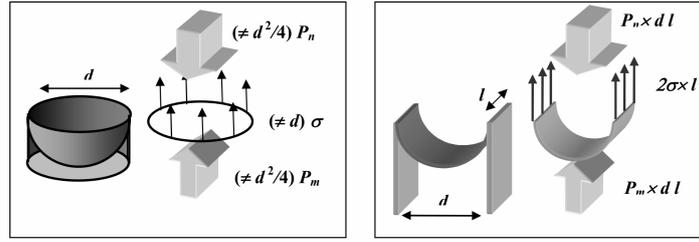


FIGURE 1.3 – Forme et équilibre du ménisque d'interface air/eau (DAÏAN 2012)

$$u_a - u_w = \psi_w = \frac{\rho_w^l \cdot R \cdot T}{M_w} \cdot \ln(HR) \quad (1.5)$$

où  $\rho_w^l$  est la densité de l'eau et  $M_w$  est la masse molaire de l'eau.

La littérature présente régulièrement des valeurs de succion qui peuvent aller au-delà de 20MPa (BAKER et FRYDMAN 2009). À ces valeurs, la plupart des sols sont quasiment secs. À l'opposé, une faible succion implique un sol fortement saturé. L'état de saturation d'un sol à une succion donnée est fortement lié à sa géométrie et à sa minéralogie. Un sable lâche sera pratiquement désaturé à une succion inférieure à 100kPa, alors que certaines argiles seront toujours quasi-saturées à des succions pouvant atteindre quelques mégapascals. Il ressort ici la problématique majeure de la mécanique des sols non saturés, à savoir une forte dépendance au matériau et à sa structure poreuse. La saturation et la succion seront fortement influencées par ces deux éléments.

De telles valeurs de succion impliquent des valeurs de pression d'eau négatives. Or, en regardant de plus près le diagramme de phase de l'eau présenté en figure 1.4, si la pression de l'eau à 20°C descend en dessous de 2.3kPa, l'eau se gazéifie, excepté l'eau adsorbée qui est liée physiquement au sol.

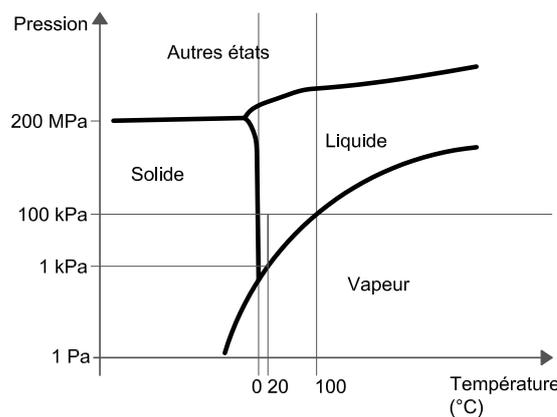


FIGURE 1.4 – Diagramme de phase de l'eau

La vaporisation de l'eau est donc partiellement empêchée dans les sols, permettant d'atteindre les pressions négatives observées. L'eau est donc en tension, maintenue en place par les forces de van der Waals. Ce potentiel d'attraction  $u_{int}$  atteint 134.9MPa pour une eau à 20°C. La

vaporisation de l'eau passe par le phénomène de la nucléation, qui peut être empêché dans les sols.

### 1.1.3 Problématique de la nucléation appliquée aux sols

Lors de la transition du domaine D4 vers les domaines moins saturés, l'apparition de bulles d'air ou de vapeur a lieu par la relaxation de l'air dissout ou par cavitation. Il existe à travers la littérature un lot important de théories présentant les phénomènes de nucléation. Elles ne sont pour autant pas forcément appliquées à la mécanique des sols, et commencent progressivement à émerger. Dans le cadre de ce travail, la « Classical Nucléation Théorie (CNT) » sera retenue. La nucléation (CAUPIN et HERBERT 2006 ; LUGLI et ZERBETTO 2007) est un changement de phase. Pour pouvoir le réaliser, deux actions simultanées sont nécessaires :

- la gazéification du volume de fluide nécessaire à la création de la bulle
- la production d'une interface entre phase liquide et phase gazeuse (de même composition que celle du point triple).

L'énergie nécessaire à la production de ces deux phases est résumée dans l'équation 1.6.

$$W = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_c^3 \cdot (u_w^l - u_w^{sat}) + 4 \cdot \pi \cdot r_c^2 \cdot \sigma_w \quad (1.6)$$

Où  $r_c$  est le rayon de la bulle, aussi appelé rayon critique. Cette équation peut être décomposée en l'addition de deux termes, le premier correspond à l'énergie utile permettant le changement de phase liquide-gaz, le deuxième correspond à l'énergie requise pour pouvoir former l'interface sphérique entre les deux phases. La compétition entre les deux termes crée une barrière énergétique à la nucléation qui doit être dépassée, présentée par l'équation 1.7 (CAUPIN et HERBERT 2006). Cette barrière provient de l'équilibre nécessaire entre l'énergie utile pour vaporiser un volume d'eau et l'énergie requise pour créer son interface. Même une fois cette pression atteinte, la nucléation n'est que probable : elle est intimement liée au potentiel de Gibbs, définissant l'agitation des molécules, et au temps offert, qui feront basculer l'état de liquide à vapeur.

$$E_b = \frac{16 \cdot \pi}{3} \cdot \frac{\sigma_w^3}{u_w^l - u_w^{sat}} \quad (1.7)$$

La valeur du rayon critique est déduite de la loi de Laplace. La pression de la bulle a une pression égale à la pression référence. Dans le cadre de l'eau pure, c'est la pression de vapeur saturante à la température donnée qui est utilisée, comme en équation 1.8. Si la nucléation est le résultat de la résurgence d'un gaz dissout dans le fluide, dont la pression de vapeur saturante n'existe pas à 20°C, la pression de référence sera alors la pression partielle de ce gaz dans l'environnement extérieur (LIGER-BELAIR 2014).

$$r_c = \frac{2 \cdot \sigma_w}{u_w^l - u_w^{sat}} \quad (1.8)$$

Ce rayon est critique dans le sens où, s'il ne peut exister (espace trop petit), la bulle ne peut se former et le fluide sera métastable. La nucléation ne se déclenche que si la pression dans le pore descend suffisamment pour atteindre un rayon critique de taille inférieure au pore. Cela n'est plus vrai dans le cadre d'une relation de non-mouillage/fluide sol ( $\cos(\theta) \rightarrow 0$ ). Dans ce cas, la nucléation peut économiser la création d'une partie de l'interface en se calant contre le sol. Elle est alors facilitée et coûte moins cher en énergie (RASMUSSEN, GOR et NEIMARK 2012).

### 1.1.4 Équilibre de phases à faible saturation

Dans le cadre des faibles saturations, à savoir le domaine hygroscopique (D1), les interactions capillaires telles que la loi de Jurin ne sont pas définies, les pores étant vides. En revanche, cela ne signifie pas l'absence d'eau. En regardant le point triple (Fig. 1.1), il existe un film adsorbé présenté en figure 1.5, cas 2. Il existe par ailleurs de l'eau liée chimiquement au sol qui demande de fortes températures pour être retirée (au moins  $500^{\circ}C$ ) (BAKER et FRYDMAN 2009).

De la même manière qu'au niveau du ménisque, il existe un équilibre chimique et mécanique entre le film de surface et l'air. Le sol est souvent considéré comme mouillant ( $\cos(\theta) = 1$ ), ce qui signifie que les molécules d'eau sont attirées par les molécules composant le sol. Il s'agit ici encore des forces de van der Waals, jouant sur l'interaction sol/eau. En considérant une surface plate infinie, et en faisant la somme de toutes les forces en présence de chaque molécule d'eau et de sol, on peut obtenir une force d'attraction résultante, ainsi que l'épaisseur globale des molécules d'eau attirées par le sol, et en déduire l'épaisseur du film (MAUGIS 1980). Un lien est alors établi entre l'épaisseur du film et les forces d'attraction sous forme d'un potentiel énergétique, comme présenté en équation 1.9.

$$\psi_s = \frac{A}{6 \cdot \pi \cdot d^3} \quad (1.9)$$

Où  $A$  est la constante de Hamaker ( $A = -6 \cdot 10^{-20} \text{ Joules}$  pour le couple eau/sol (FRYDMAN et BAKER 2009)), et  $d$  l'épaisseur du film adsorbé, qui peut mesurer entre  $10^{-10}$  et  $10^{-9}m$  (LEÃO et TULLER 2014). Ce film est en équilibre chimique avec la phase de vapeur dans l'air. L'équilibre chimique est exprimé par l'égalité du potentiel  $\psi_s$  d'adsorption du sol (Eq. 1.9) et du potentiel de vapeur dans l'air  $\psi_w$  exprimé par la loi de Kelvin (Eq. 1.5).

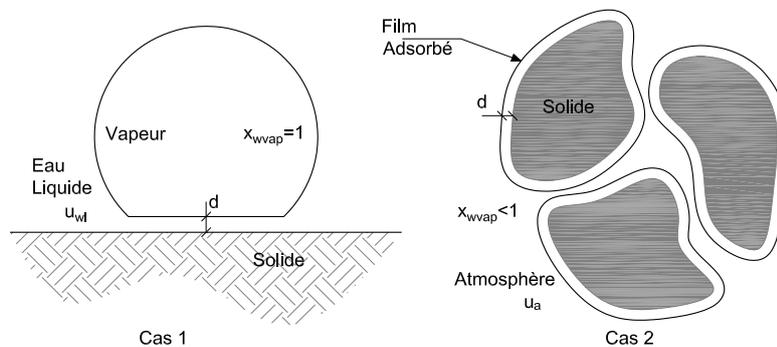


FIGURE 1.5 – Film adsorbé dans un sol, cas 1 : domaine saturé, cas 2 : Domaine sec

La notion de film adsorbé peut aussi entrer en jeu dans le cas saturé. Une bulle de gaz présente dans le sol, grandissant par variation de la pression du fluide l'entourant, peut arriver au contact du sol. Un film se créera alors entre le sol et la phase gazeuse (sous condition d'adsorption). L'épaisseur de ce film sera elle aussi dictée par la constante de Hamaker, comme présenté en figure 1.5, cas 1.

La circulation de l'eau dans les sols dans les domaines désaturés est assurée par deux modes. Le premier est l'échange avec l'air présent dans le sol, menant à des transferts par air humide et équilibre chimique. Les molécules d'eau se déplacent alors en utilisant l'air comme médium. Le deuxième mode de transport utilise les films adsorbés. L'eau circulera à travers les films (KÉBRÉ

2013).

## 1.2 Méthodes de mesure de la succion

Toute étude expérimentale se heurte à la problématique de quantification des phénomènes observés, cette dernière n'étant pas toujours évidente. La mesure de la succion est un exercice compliqué. En s'attachant à la mesure directe de la pression de l'eau interstitielle, apparaît immédiatement la problématique de la continuité de la mesure. En effet, l'eau étant en tension, un espace trop important mènera à la discontinuité par nucléation, et donc à une perte de mesure. L'autre approche reste la mesure indirecte. L'équilibre entre humidité relative de l'air et pression de l'eau dans le sol permet une estimation de la valeur de succion. Chaque méthode présente ses avantages et ses inconvénients, menant à des choix parfois compliqués lors des études expérimentales.

### 1.2.1 La tensiométrie, mesure directe de pression interstitielle

Le tensiomètre, ou méthode tensiométrique, est une mesure directe de la pression de l'eau. Le chapitre 1.1.2 rappelle deux éléments. D'une part, que l'eau nucléée en dessous de  $u_w^{sat}$  ( $2.3kPa$ ), sauf si elle est dans un espace suffisamment petit pour bloquer l'apparition d'une bulle. Si l'espace entre le sol et l'appareil de mesure est trop grand, il y aura discontinuité par nucléation. La mesure ne sera pas empêchée, mais indirecte (transmission par phase de vapeur), donc fortement ralentie.

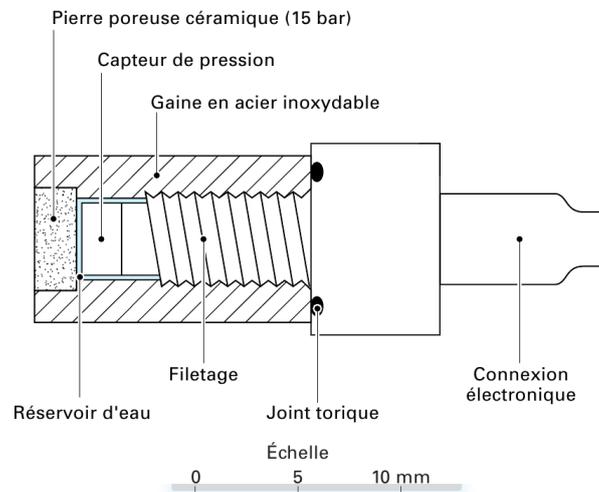


FIGURE 1.6 – Concept d'un mini-tensiomètre haute performance (RIDLEY et BURLAND 1993)

Pour parer à ce défaut, plutôt que d'utiliser un capteur de pression seul, ce dernier va être couplé à un matériau poreux indéformable, saturé, permettant de conserver la continuité comme présenté en figure 1.6. Pour descendre plus bas que le seuil de nucléation (MARINHO et CHANDLER 1995; LOURENÇO et al. 2008), la pierre poreuse intermédiaire doit posséder une taille de pore suffisamment petite. Les pierres sont d'ailleurs souvent référencées par leur pression d'entrée d'air. De même, la réserve d'eau entre pierre et capteur doit être minimisée.

Le tensiomètre classique utilise une pierre à faible entrée d'air ( $1bar$ ) correspondant plus ou moins au seuil de nucléation de l'eau ( $1bar$ ). Ces tensiomètres sont destinés aux sables. La

méthode de contrôle de l'entrée d'air (ASTM 1999) des pierres poreuses utilise la loi de Laplace (Eq. 1.1) et un fluide à haute volatilité (leur tension superficielle plus faible facilite l'entrée d'air, et mène donc à des pressions d'essai plus faibles). La perméabilité des pierres poreuses est mesurée à l'aide de gaz purs (AFNOR 1987). Avant la démocratisation des capteurs de pression à ponts de jauge, les mesures étaient faites à l'aide de colonnes d'eau (BRULL 1977 ; SORMAIL 1969). Il est à noter que l'apparition de bulles dans le réseau de capillaire pour ces systèmes ou une discontinuité sol/pierre poreuse n'empêchent pas totalement la mesure. L'équilibrage du capteur pourra toujours se faire par phase de vapeur, mais avec des temps de réaction fortement augmentés.

Dans le cadre de la mesure de succions plus importantes, les pierres utilisées montrent des entrées d'air de l'ordre de  $3 - 4\text{MPa}$  jusqu'à  $15\text{MPa}$ . Couplées avec des capteurs de pression relative de haute capacité, elles permettent de mesurer des valeurs de succion du même ordre (RIDLEY et BURLAND 1993). En revanche, la réactivité du capteur est beaucoup plus longue en raison des faibles perméabilités de ces pierres. Dans le cadre des argiles et marnes, la faible vitesse de réaction est plus souvent due à la perméabilité du sol lui-même qu'à la pierre. Dans les sables, la mesure physique de succions supérieures à  $100\text{kPa}$  est impossible par une méthode directe, la plupart des sables n'ayant à ce stade plus de phases continues d'eau, mais des films adsorbés.

La saturation elle-même du système pierre poreuse/capteur est un problème récurrent. La méthode classique vise à mettre le tensiomètre d'abord sous vide, puis à le placer en présence d'eau à forte pression pendant plusieurs jours (pour les hautes entrées d'air). De nos jours, le vide est d'abord remplacé par du dioxyde de carbone avant la mise en eau. Ce dernier a la faculté de se dissoudre très facilement dans l'eau, ce qui permet une saturation facile sans utiliser une forte pression qui pourrait endommager le capteur. D'autres proposent de préalablement soumettre le tensiomètre à de la vapeur d'eau avant la surpression. Des méthodes utilisant des bains à ultrasons ont aussi été employées. Ces dernières permettent de briser les bulles d'air encore prisonnières du système (PEDROTTI, TARANTINO et BOECK 2014).

### 1.2.2 La psychrométrie, mesure indirecte par l'humidité relative

À la vue des défauts de la méthode directe, les méthodes indirectes ont alors été étudiées. En appliquant directement la loi de Kelvin (Eq. 1.5), il est possible d'obtenir la valeur de la succion par la mesure de l'humidité relative de l'air entourant ou au cœur du sol. Pour ce faire, un psychromètre est utilisé. Il existe deux familles de psychromètres :

- l'effet Pelletier : deux thermocouples placés dans une chambre poreuse en équilibre avec l'environnement sont utilisés. L'un sert de référence pendant que l'autre est traversé par un courant le refroidissant. L'objectif est de mesurer la différence de tension entre les deux en maintenant une température constante dans l'espace confiné. Cette différence de potentiel permet de revenir à l'humidité relative (Fig. 1.7). L'étalonnage est en général réalisé par contrôle de phase vapeur (Chap. 1.3.2)
- le point de rosée : il s'agit de deux fils électriques nus espacés, enroulés en spirale autour d'un système poreux contenant une solution de chlorure de lithium. La solution absorbe l'eau dans l'air, augmentant la conduction des fils jusqu'à l'évaporation d'une partie de l'eau absorbée. Cette eau est immédiatement réabsorbée par rétroaction jusqu'à un équilibre absorption/évaporation. La température des fils est alors mesurée pour calculer le point de rosée et revenir alors à l'humidité relative. Ce système est autonome, mais doit en général être calibré à l'aide du précédent.



FIGURE 1.7 – Psychromètre à effet Pelletier de chez Wescor

Il est extrêmement difficile selon les appareillages d'obtenir une mesure au-delà de 95% d'humidité relative, soit une succion aux alentours de  $7\text{MPa}$  (DELAGE et CUI 2000).

### 1.2.3 La méthode papier filtre

La mesure de succion peut être exécutée de deux manières, soit par transfert direct de l'eau, soit par l'intermédiaire de l'humidité relative. La mesure au papier filtre (CHANDLER et GUTIERREZ 1986) utilise les deux. Les échanges entre le papier et le sol se passeront soit par adsorption depuis le sol, soit par échange sans contact par phase de vapeur (LIKOS et LU 2002). Une fois la succion du papier filtre en équilibre avec celle du sol, sa teneur en eau est mesurée. La valeur ainsi trouvée est comparée à une courbe de rétention calibrée comme présenté en figure 1.8. Cette dernière est obtenue comme pour les psychromètres, à l'aide d'un contrôle par phase de vapeur (Chap. 1.3.2).



FIGURE 1.8 – Courbe de rétention proposée par la norme ASTM pour filtre Watman 42

La procédure (ASTM 2010) de mesure consiste à placer un papier filtre, soit dans l'échantillon de sol comme en figure 1.9 (succion matricielle), soit placée en présence du sol, mais sans contact direct (succion globale) dans un récipient fermé. Le temps concédé par les normes à l'équilibrage est de 7 jours. Le filtre est alors pesé humide, puis étuvé, et pesé sec (ARSENIE 2009) pour déterminer sa teneur en eau. Pour améliorer la précision de la méthode, il est recommandé d'établir une courbe de calibration pour chaque lot de papiers filtres (BICALHO et al. 2010) à l'aide d'une méthode par contrôle de phase vapeur. (Chap. 1.3.2). Dans le cadre du projet TerreDurable (BOUTONNIER et al. 2012b), pour harmoniser toutes les mesures entre tous les

praticiens, il a été choisi de se référer à l'étalonnage ASTM (ASTM 2010).

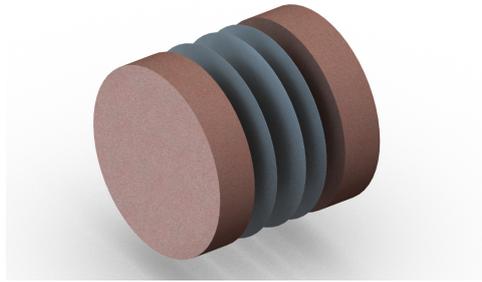


FIGURE 1.9 – Placement d'un papier filtre entre deux autres de protection dans un sol

Les variations de température durant l'équilibrage posent de grands problèmes, car les cycles d'absorption/désorption des papiers filtres présentent une hystérésis. De plus, la pesée demandée par les normes (ASTM 2010) est au déci-milligramme. Cette mesure est gênée par les changements rapides de teneur en eau des filtres à l'air libre pendant la pesée.

La calibration à caractère logarithmique mène à une erreur variable en fonction de la succion mesurée. AGUS et SCHANZ (2007) montrent que pour toutes les mesures de succion, l'erreur tend à augmenter en fonction de l'augmentation de l'hystérésis de température. La méthode papier filtre est donc souvent considérée comme un bon indicateur, mais pas comme une mesure précise de la succion.

### 1.3 Méthodes de contrôle de la succion

La succion est considérée comme une variable d'état dans la plupart des modèles hydromécaniques. Durant un essai simple de mécanique des sols, la succion va évoluer au cours de l'essai. Or, il est nécessaire, pour comprendre l'influence de chacune des variables d'état, de bloquer les autres durant un essai. C'est ici qu'entrent en jeu les méthodes de contrôle de la succion. Elles vont permettre de fixer la succion à une valeur choisie par l'opérateur pendant que d'autres chargements (thermique, mécanique) sont appliqués. Il est aussi généralement plus facile de contrôler la succion. Il existe trois méthodes principales : la translation d'axe, le contrôle par phase de vapeur et le contrôle par osmose.

#### 1.3.1 La translation d'axe

La translation d'axe repose sur un décalage de la pression d'air. Elle s'applique plutôt aux domaines proches de la saturation. Dans la nature, la pression de l'air est un élément oscillant autour de la pression atmosphérique à  $101.325\text{kPa}$ . Dans le cadre expérimental, cette valeur est désormais manipulable pour obtenir des valeurs de succion plus importantes sans changer la pression de l'eau dans l'échantillon. Le contrôle s'effectue par l'intermédiaire de deux éléments. En tête d'échantillon, une pierre poreuse à faible entrée d'air est placée. La surpression d'air sera appliquée en ce point. Le système est souvent appelé plaque de Richard (DAIAN 2012). Les valeurs standards de surpression sont de l'ordre de  $500\text{kPa}$  (ROMERO 1999). Le deuxième contrôle s'effectue à la base, à travers une pierre poreuse à haute entrée d'air (supérieure à la pression appliquée) pour éviter la désaturation. La pression de l'eau au sein de l'échantillon est alors placée à la valeur souhaitée pour fixer la succion. Le système est résumé en figure 1.10.

Cette méthode a aussi permis d'étendre l'utilisation des tensiomètres. La pression de l'air est augmentée sans drainage possible, puis l'essai est exécuté en mesurant la pression d'eau au

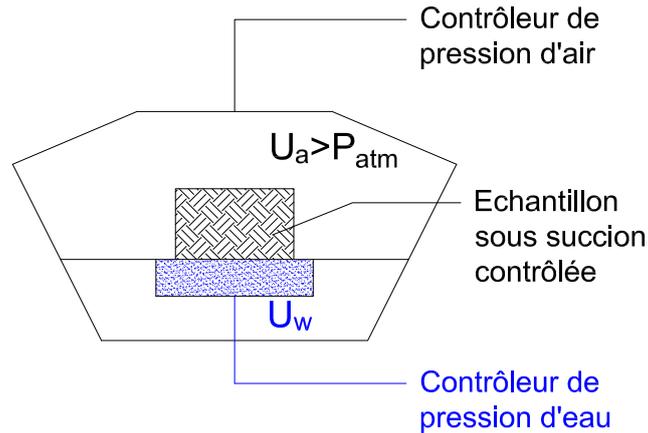


FIGURE 1.10 – Principe de la translation d'axe

lieu de la contrôler. Là où la mesure était coupée pour une succion autour de  $80 - 100kPa$ , elle le sera aux alentours de  $500kPa$ .

### 1.3.2 Méthode de contrôle par phase vapeur

Cette méthode est plutôt destinée aux domaines de faibles saturations. L'objectif est de contrôler la succion par l'intermédiaire de la loi de Kelvin (Eq. 1.5). De la même manière que pour la calibration des papiers filtres, on utilise des solutions salines à des concentrations données (Tab. 1.1). Ces dernières fournissent dans un environnement confiné une humidité relative (CAMP DEVERNAY 2008) (Fig. 1.11). Le problème de l'utilisation de concentration donnée est qu'il subsiste une erreur importante quant à la succion finale appliquée, due aux erreurs relatives de pesée du sel et de l'eau. De plus, une très faible erreur sur la concentration amène des erreurs très importantes sur la succion. Pour éviter cela, il est recommandé d'utiliser des solutions à saturation, faciles à réaliser. Il suffit d'assurer la présence de sels non dissouts dans l'eau. Un grand nombre de sels à saturation ont été référencés (GREENPAN 1977), donnant un accès à un large panel de succion.

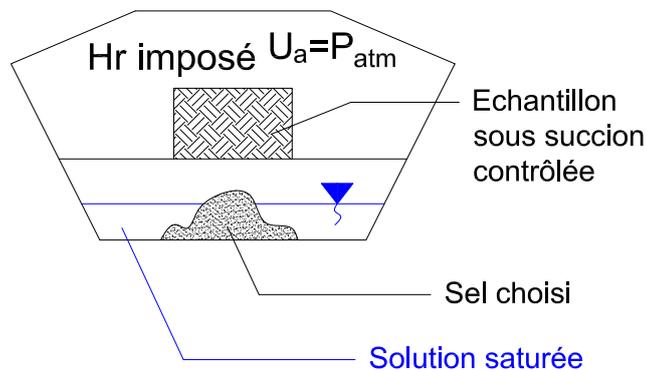


FIGURE 1.11 – Principe de la méthode par contrôle de phase vapeur

Sel	HR	Succion (Eq. 1.5)
-	%	MPa
Chlorure de magnésium	33.07	150.0
Nitrate de magnésium	54.38	82.3
Chlorure de Sodium	75.47	38.0
Chlorure de potassium	85.11	21.8
Nitrate de Potassium	94.62	7.47

TABLE 1.1 – Exemple succion en fonction de la solution saturée à 20°C (GREENPAN 1977)

Le principal défaut de cette méthode est le temps d'homogénéisation de la succion dans l'échantillon, qui dépend fortement de la vitesse des transports d'air en son sein (MAINGUY, COUSSY et BAROGHEL-BOUNY 2001), ce qui n'est pas toujours évident à prédire, particulièrement pour les argiles dont les perméabilités sont très faibles.

### 1.3.3 Méthode de contrôle osmotique

La méthode osmotique consiste à utiliser une solution de molécules organiques de Poly-Ethylène Glycol (PEG) (DELAGE et CUI 2000). L'échantillon de sol est entouré d'une membrane permettant le passage de l'eau, mais pas celui du PEG. Une fois immergée dans le fluide, la différence de concentration de chaque côté de la membrane crée une dépression dans le fluide interstitiel du sol. La dépression est d'autant plus grande que la concentration en PEG est grande (Eq. 1.10). La gamme de travail est très large, pouvant aller de 0 à 12MPa de succion. Cette méthode est souvent utilisée pour établir des courbes de rétention d'eau (FLEUREAU et al. 1993).

$$s = 11 \cdot c^2 \quad (1.10)$$

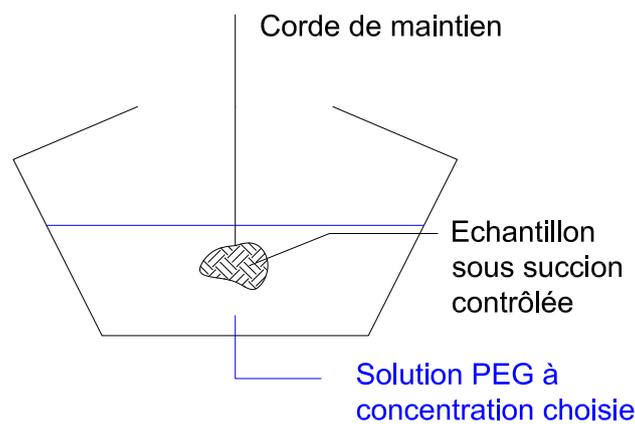


FIGURE 1.12 – Principe de la méthode osmotique

## 1.4 Bilan des différentes méthodes de mesure et contrôle

La multitude de ces méthodes de mesure et de contrôle existe pour une seule raison : elles ne fournissent pas une mesure ou une précision suffisante selon les domaines observés. Certaines sont

d'ailleurs inutiles dans certains domaines de saturation. La connaissance initiale du matériau à étudier est donc primordiale pour pouvoir adapter le dispositif expérimental à son étude. Dans un deuxième temps, la problématique des erreurs de mesures doit être posée. Les éléments présentés ici mèneront aux choix faits pour la réalisation des futurs essais.

### 1.4.1 Portée des méthodes de mesure/contrôle de la succion

DAÏAN (2007) fournit selon les matériaux et les succions visées un ordre d'idée du dispositif adapté à la mesure. La figure 1.13, ici complétée, montre la répartition de l'utilisation des dispositifs en accord avec les succions visées pendant l'étude. Il apparaît clairement l'impossibilité de pouvoir mesurer avec un seul dispositif toute l'étendue du comportement hydrique de certains matériaux.

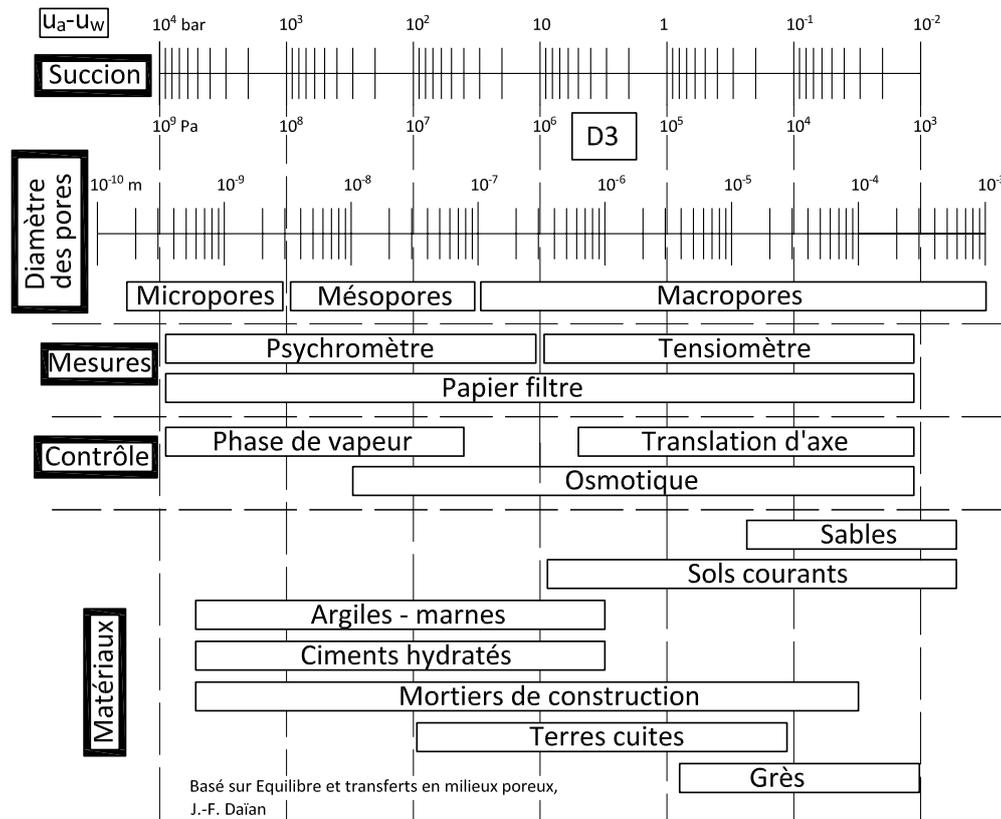


FIGURE 1.13 – Bilan de la portée des différentes mesures et contrôles

### 1.4.2 Erreur des différentes méthodes de contrôle/mesure de la succion

L'erreur de mesure en tensiométrie dépend du capteur de pression utilisé. Plus la portée d'un tensiomètre est importante, moins sa précision relative sera bonne. La mesure d'un capteur de pression relative de bonne facture d'une portée de  $500\text{kPa}$  (soit  $-100\text{kPa} \leq u_w \leq 400\text{kPa}$ ) présente une erreur relative de 0,2%, soit  $\pm 1\text{kPa}$ . La tension de sortie du capteur sera linéaire sur cette plage. Cette valeur implique un bon contrôle de la température ambiante; dans le cas contraire, une correction doit être nécessaire. Les tensiomètres hautes performances, descendant à des valeurs de succion en dessous de  $u_w = -100\text{kPa}$ , reposent généralement sur la partie non linéaire de la courbe d'étalonnage des capteurs, menant à une erreur généralement plus impor-

tante.

La psychrométrie repose sur la précision de la mesure de l'humidité relative. Cette dernière est très sensible à la température. Une variation de  $\pm 0.5^\circ C$  peut amener à des erreurs de l'ordre de  $\pm 100 kPa$  pour des succions de  $800 kPa$ . L'erreur diminue à  $\pm 5 kPa$  pour une succion de  $2000 kPa$  (AGUS et SCHANZ 2007). Cette évolution de l'erreur est due au logarithme de la loi de Kelvin (Eq. 1.5). Apparaît le deuxième défaut : l'erreur produite par ce type de mesure en approchant de la saturation s'accroît fortement de par la difficulté d'obtenir une valeur d'humidité relative proche des 100%. Certains systèmes permettent des mesures plus précises avec une mesure intégrée de la température.

La méthode papier filtre pose aussi problème dans le cadre de variations de température. Les variations génèrent des cycles de drainage humidification du papier filtre. Or, la courbe d'étalonnage proposée par la norme ASTM ne donne le comportement du papier que pour une humidification simple. Il est donc difficile d'attester des erreurs engendrées par ces cycles. L'autre erreur va venir globalement de la pesée. La balance requise au déci-milligramme va générer une erreur de pesée qui se traduira par une erreur de  $\pm 2 kPa$  pour une succion de  $100 kPa$  et  $\pm 10 kPa$  pour une succion de  $\pm 1000 kPa$ . L'erreur sur le résultat n'est pas linéaire dû à l'échelle logarithmique de la courbe d'étalonnage. En prenant en compte une légère humidification/séchage du papier pendant la pesée ( $\pm 0.1 mg \rightarrow \pm 0.5 mg$ ), l'erreur atteint alors  $\pm 8 kPa$  pour une succion de  $100 kPa$  et  $\pm 50 kPa$  pour une succion de  $\pm 1000 kPa$ . La figure 1.14 montre les fuseaux d'erreur estimés. Augmenter le nombre de papiers filtres peut limiter l'erreur, dans la limite de la taille de l'échantillon disponible.

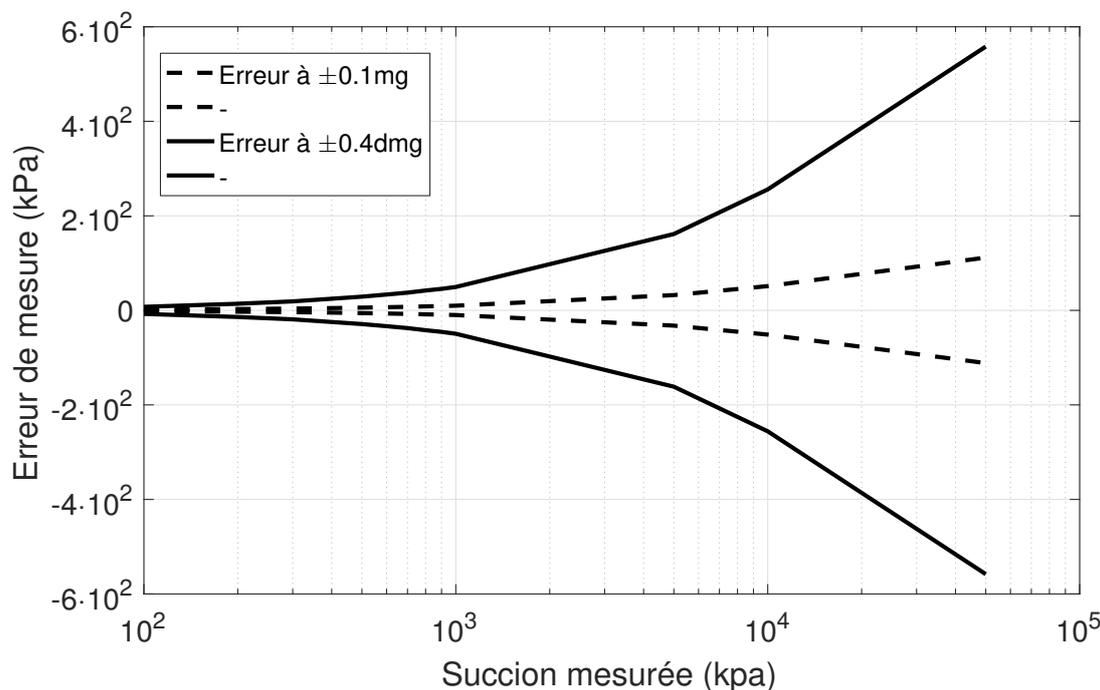


FIGURE 1.14 – Fuseau d'erreur de mesure pour la méthode papier filtre

L'erreur subie par la translation d'axe est liée aux méthodes de contrôle de la pression. Les contrôleurs classiques trouvés sur le marché atteignent généralement des précisions de contrôle en pression autour de  $\pm 1 kPa$ . Il est conseillé de rajouter des capteurs de pression locaux au plus proche de l'échantillon pour contrer les erreurs dues aux tubulures (dilatation par exemple). Le

contrôle de succion obtenue avoisine donc  $\pm 2kPa$  dans la configuration avec capteurs déportés.

Le contrôle de la phase vapeur est plus difficile. Jouant sur les concentrations de sel dissout dans la phase liquide, puis ensuite envoyé vers le sol, un faible écart de concentration peut engendrer une forte variation de l'humidité relative. Les conséquences en termes de succion tendent donc à être importantes. Le contrôle peut être complété par un psychromètre. Pour contourner le problème de la concentration, des solutions saturées peuvent être utilisées, en revanche les valeurs de succion obtenues seront dictées par le type de sel utilisé, limitant les valeurs de succion utilisables.

La méthode osmotique dépend de la concentration de PEG. La succion étant liée au carré (Eq. 1.10) de la concentration de PEG, l'erreur a tendance à augmenter rapidement pour les faibles concentrations, et donc les faibles succions. Une succion autour de  $440kPa$  nécessite une concentration de  $0.2g$  pour un gramme d'eau, soit  $200g$  pour un litre d'eau. Une erreur à  $0,1g$  près mène à une erreur de succion largement inférieure à  $1kPa$ .

Finalement, la figure 1.2 présente un bilan sur les différentes méthodes de mesure et de contrôle.

Méthode	Erreur	Note
<b>Méthodes de Mesure</b>		
Tensiomètre	$\pm 1kPa$	pour un capteur relatif de portée $0 - 500kPa$ pour un capteur $0 - 3500kPa$ $s = 800kPa; 2000kPa$ et $\Delta\theta = \pm 0.5^\circ C$ $100kPa \leq s \leq 50000kPa$
Tensiomètre HC	$\pm 15kPa$	
Psychromètre	$\pm 100kPa; \pm 2kPa$	
Papier filtre	$\pm 1kPa \rightarrow \pm 100kPa$	
<b>Méthodes de Contrôle</b>		
Translation d'axe	$\pm 2kPa$	$-500kPa \leq s \leq 500kPa$
Phase vapeur	variable ( $\Delta\theta, \Delta c_{sel}$ )	$s \geq 4MPa$
Osmose	$\leq 1kPa$	$0MPa \leq s \leq 12MPa$

TABLE 1.2 – Exemples d'erreurs de mesure et de contrôle de succion (RIDLEY et BURLAND 1993; AGUS et SCHANZ 2007; DELAGE et CUI 2000)

## 1.5 Étude de la rétention des sols

### 1.5.1 Principe d'une courbe de rétention

L'étude de la mécanique des sols, et plus particulièrement dans le cadre non saturé, mène au besoin de connaître le comportement de rétention du matériau. La courbe de rétention représente les variables d'état à instant donné d'un séchage ou d'une humidification : sa teneur en eau, sa succion, sa saturation et sa densité. Ces quatre variables sont étroitement liées de par les comportements de retrait et gonflement. Chaque type de sol ayant sa propre structure granulaire, une affinité différente à l'eau mène à des comportements très différents (DELAGE et CUI 2000; FLEUREAU et al. 1993). Le séchage et le gonflement sont à dissocier et présentent une hystérésis.

Les courbes de séchage et d'humidification présentent une hystérésis. Celle-ci est principalement liée à des contraintes géométriques. L'eau reste enfermée dans des pores de taille plus importante cachés derrière des pores de plus petite taille, menant à une valeur de saturation différente pour la même succion, selon que le sol soit en cours de séchage ou d'humidification.

Cette hystérésis est fortement visible au regard de la succion, par rapport à l'indice des vides, la saturation et la teneur en eau, comme présenté en figure 1.15. En revanche, dans le cadre de la mécanique des sols, l'hystérésis n'est généralement pas visible pour l'indice des vides et pour la saturation, exprimés en fonction de la teneur en eau.

Il est possible d'observer la valeur d'entrée d'air de l'échantillon, point important pour la transition entre les domaines de saturation (domaine D2 vers domaine D1 au séchage). Elle est généralement prise comme le point de croisement de la tangente de la partie la plus verticale de la courbe de séchage et de la ligne de saturation à 100%. Elle donne les valeurs nécessaires aux modélisations que sont la succion d'entrée d'air  $s_{air}$  et la saturation à l'entrée d'air  $Sr_{air}$ .

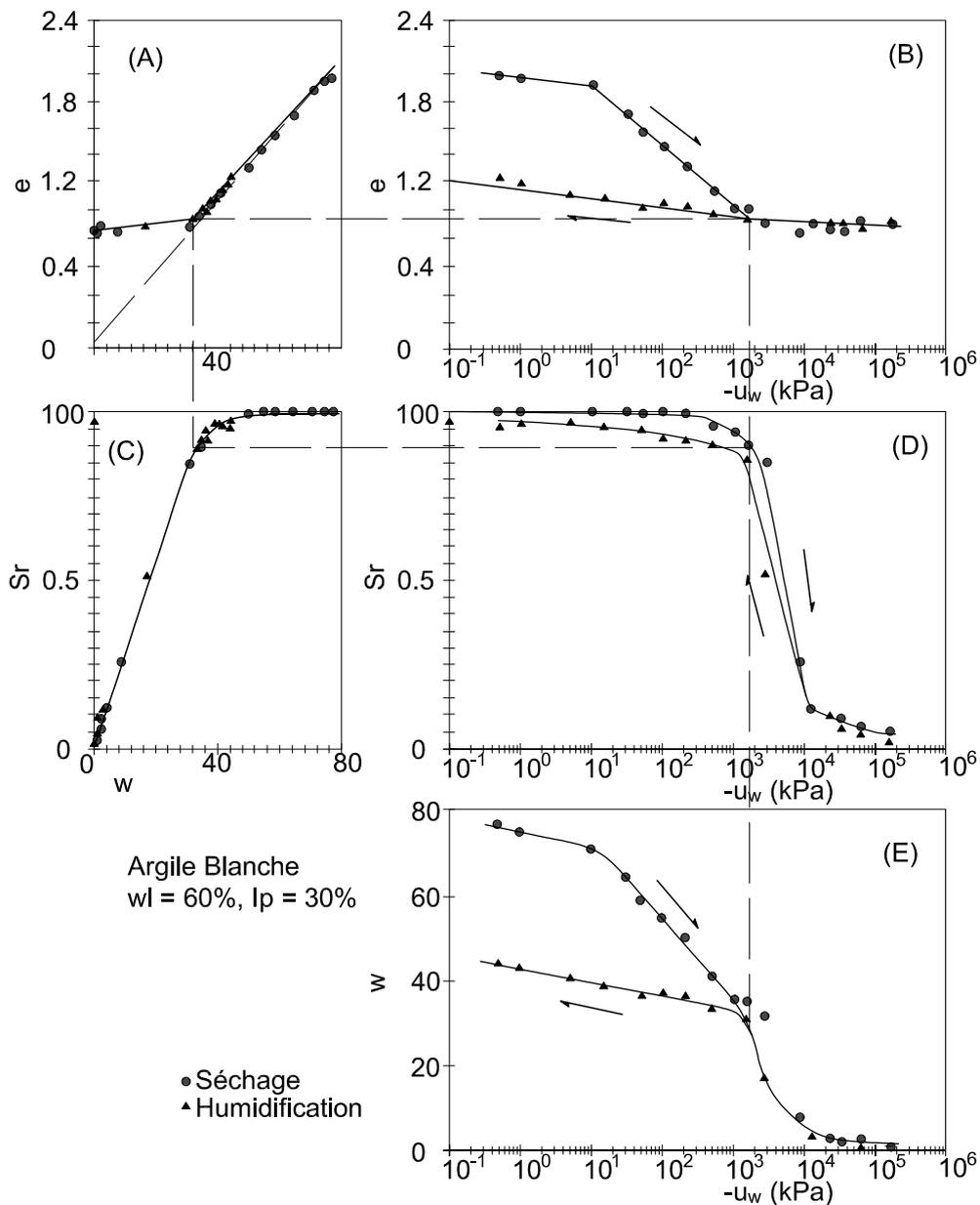


FIGURE 1.15 – Exemple de courbe de rétention (FLEUREAU et al. 1993)

Au fur et à mesure du séchage ou de l'humidification, le sol va soit se rétracter, soit gonfler (LIKOS et al. 2003). Une partie de la courbe est commune aux deux phénomènes, mais ils se séparent une fois du côté humide de l'entrée d'air du matériau pour les matériaux argileux, avec des comportements très différents selon le chemin.

Il est parfois difficile de complètement resaturer un matériau. La transition entre les domaines D1 et D2 va permettre d'enfermer de l'air dans l'échantillon qui ne parviendra pas à s'échapper ou à se dissoudre totalement dans l'eau. Ce phénomène peut aussi bien être observé sur des sables (KHADDOUR 2015) que sur des argiles.

### 1.5.2 Mesure et contrôle de la succion pour réalisation de courbes de rétention

Ces courbes sont d'usage réalisées à partir de boues. Pour autant, ce matériau n'est pas forcément représentatif de celui présent sur chantier, dans un état soit compacté par le temps (cas quasi œdométrique), soit artificiellement (compacteur) (FLAVIGNY et DENDANI 1984). La courbe peut être réalisée à l'œdomètre, ou cellule de gonflement, équipé d'un contrôle de succion (osmotique ou phase vapeur). La densité sera alors connue par les variations de hauteur de l'échantillon (mouillage uniquement).

Dans les cas de mesures autres qu'œdométriques, la mesure du degré de saturation est nécessaire. L'échantillon est d'abord préparé à la succion voulue (séchage naturel, contrôle osmotique ou phase de vapeur). Dans le cas d'un séchage naturel, la succion devra être mesurée. La méthode classique pour mesurer la densité est la pesée hydrostatique. L'objectif est d'utiliser le principe d'Archimède pour déterminer le volume total de l'échantillon. Une fois l'échantillon à succion ou teneur en eau ciblée, il est pesé humide sur une balance classique. Il est ensuite pesé une fois immergé. Pour que l'eau de la pesée hydrostatique n'entre pas dans le matériau, l'échantillon peut être préalablement paraffiné. Pour diminuer les erreurs possibles liées au volume de paraffine ajouté à l'échantillon et à sa densité, l'eau peut être substituée par un fluide non mouillant comme le pétrole désaromatisé (Kerdane) et l'échantillon plongé sans paraffine. Cette méthode apporte aussi l'avantage de ne pas risquer de sécher l'échantillon lors de la trempe dans la paraffine. L'échantillon est alors pesé une fois séché à l'étuve. De ces trois mesures est tirée la densité sèche (et indice des vides) du matériau, sa teneur en eau et son degré de saturation.

L'erreur de la méthode peut largement être maîtrisée, même sur des échantillons de 10 à 15g en utilisant une balance de précision (déci-milligramme). Avec un tel équipement, les erreurs de mesure seront totalement négligeables ( $Erreur \leq 1/1000$ ) pour la densité sèche, la teneur en eau et le degré de saturation. Les écarts rencontrés ne seront donc dus qu'à la dispersion du matériau et autres effets interférant avec la mesure (température par exemple). Il faut en revanche faire très attention aux pertes de matériau lors de la pesée, qui peuvent mener à des disparités importantes.

### 1.5.3 Modélisation et interprétation des courbes de rétention

La problématique de la mécanique des sols non saturés appelle à définir une équation pour la courbe de rétention, pour pouvoir être par la suite intégrée à des modèles. Dans ce cadre, l'objectif est souvent d'obtenir une courbe continue, allant d'une saturation nulle vers une saturation égale à 1.

### Interprétations classiques

Plusieurs modèles cherchent à simuler les courbes de rétention, de manière à pouvoir les appliquer dans des simulations numériques.

BROOKS et COREY (1964) ont présenté un des premiers modèles de représentation de la courbe de rétention (Eq. 1.11). Ce modèle se base sur la valeur de succion relative à la succion d'entrée d'air ( $s_{air}$ ). Le coefficient  $\gamma$  est lui un paramètre matériau. Le modèle fonctionne plutôt bien pour les degrés de saturation bas, mais pose problème à forte saturation.

$$Sr = \left( \frac{s}{s_{air}} \right)^\gamma \quad (1.11)$$

GENUCHTEN (1980) présente un modèle prenant mieux en compte la partie saturée de la courbe de rétention, permettant donc une meilleure approche sur tous les domaines. Les coefficients  $n$  et  $m$  de l'équation 1.12 gèrent la forme de la courbe. Le coefficient  $\alpha$  est lui relié soit à l'entrée d'air, soit au diamètre dominant des pores (YANG et YOU 2013).

$$Sr = (1 + (\alpha \cdot s)^n)^{-m} \quad (1.12)$$

Ces deux modèles sont relativement faciles d'emploi de par leur équation unique sur toute la courbe de rétention. Pour autant, chaque domaine de saturation possède un comportement propre, d'où la nécessité de pousser la modélisation de la rétention plus loin. Certains modèles sont capable de prendre en compte la température du sol pour modéliser sa rétention (SALAGER et al. 2006). D'autre interprétations sont nécessaires pour les modélisation aux éléments discrets, où les pont entre les grains peuvent directement être simulés (SOULIÉ et al. 2006).

### Interprétation adaptée aux terrassements, domaines D1 à D4

Dans l'objectif de l'étude des terrassements, MAHMUTOVIC et al. (2014) ont modifié l'interprétation de la courbe de rétention de manière à l'adapter aux domaines D1 à D4 (BOU-TONNIER 2007), en y ajoutant la problématique de la compressibilité du fluide interstitiel et de l'enfermement de bulles d'air dans le sol.

La courbe de rétention est ici divisée en quatre équations représentant chacune un domaine de rétention (D1 à D4). Dans le domaine D1, la formule de BROOKS et COREY (1964) est utilisée, car ayant fait ses preuves pour les faibles saturations (Eq. 1.13). Elle est juste modulée par  $Sr_{air}$  de manière à garder la continuité avec les équations suivantes. L'importance de la courbe de rétention apparaît ici, la saturation à l'entrée d'air  $Sr_{air}$  étant le point de continuité entre les domaines D1 et D2.

$$Sr = \left( \frac{u_a - u_w}{u_a - u_{air}^l} \right)^\gamma \cdot Sr_{air} \quad (1.13)$$

Dans le domaine D2, l'air commence à être emprisonné dans le fluide interstitiel. L'entrée d'air est donc passée. Le fluide est toujours dans des pressions négatives. La saturation est alors simulée par l'équation 1.14 avec  $Sr_e$  le degré de saturation à l'arrivée des pressions positives et  $u_{air}^l$  la pression du fluide interstitiel à l'entrée d'air.

$$Sr = Sr_e - \frac{u_w}{u_{air}^l} \cdot (Sr_e - Sr_{air}) \quad (1.14)$$

Une fois arrivé dans les pressions positives, l'air, toujours présent dans le sol, est sous forme de bulles, qui vont alors moduler la compressibilité du fluide interstitiel. Cette hypothèse permet de simplifier la modélisation dans ce domaine gérant la phase liquide comme une seule phase

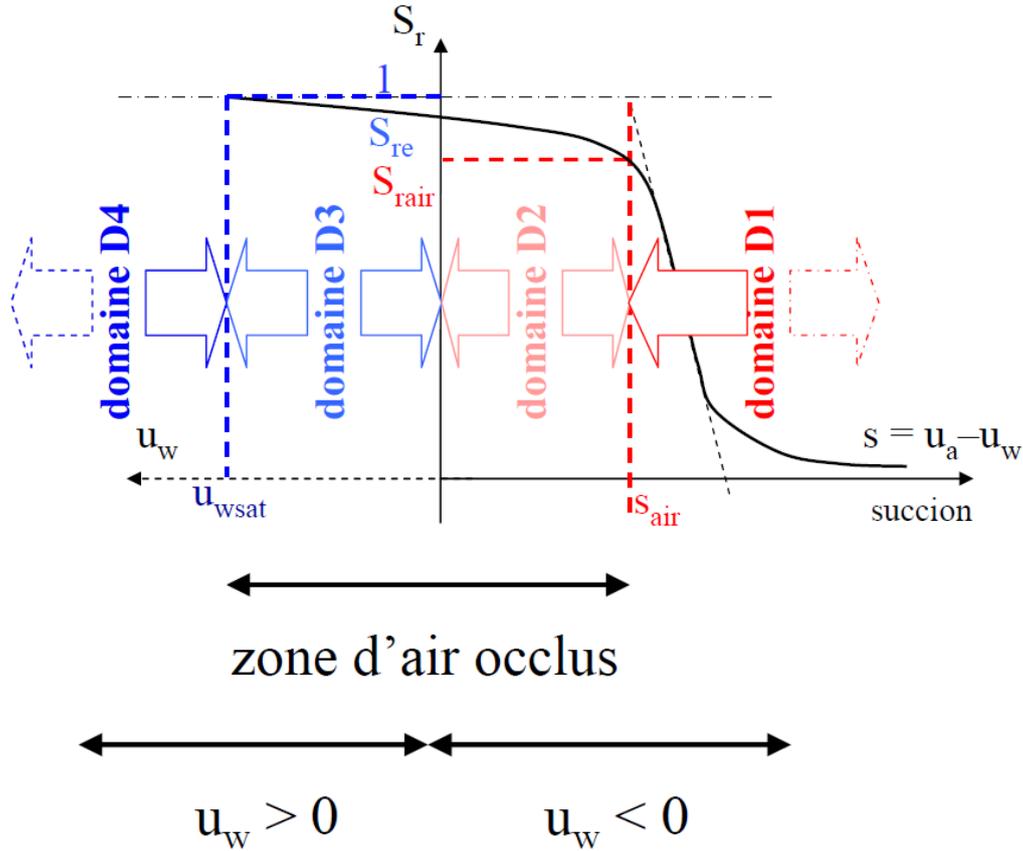


FIGURE 1.16 – Domaine de saturation selon BOUTONNIER (2007)

avec un coefficient de compressibilité variable. Ici ressort la valeur de pression relative entre fluide et bulles ( $s_{bm}$ ), la pression atmosphérique  $u_{atm}$  et la constante de dissolution (Henry) de l'air dans l'eau  $h_a$ . Ce comportement peut alors être décrit par l'équation 1.15.

$$Sr = \frac{1}{1 - h_a + \left( \frac{1 + Sr_e + h_a \cdot Sr_e}{Sr_e} \right) \cdot \left( \frac{s_{bm} + u_{atm} - u_{wg}}{u_w + s_{bm} + u_{atm} - u_{wg}} \right)} \quad (1.15)$$

Arrivé à une certaine pression, le milieu se sature et toutes les bulles d'air sont dissoutes dans l'eau, d'où l'équation 1.16. La saturation du sol est alors totale. En cas de desaturation, les bulles réapparaîtront progressivement par nucléation.

$$Sr = 1 \quad (1.16)$$

L'intérêt de ce modèle est la prise en compte des bulles d'air emprisonnées lors du compactage du sol, mais aussi son apparition lors de la désaturation du matériau. Les modèles classiques sont généralement plus tournés vers des matériaux peu saturés. Le modèle permet un passage du cas saturé au cas sec sans discontinuité, tout en amenant la présence de bulles dans le matériau, cas classique des terrassements. Il utilise beaucoup de paramètres, mais la plupart d'entre eux sont directement lisibles sur une courbe de rétention expérimentale, ce qui permet un paramétrage sans régression. Il apparaît donc important de connaître les biais que pourrait amener une méthode de mesure sur l'existence de bulles.

## 1.6 Discussion sur les biais apportés par les méthodes de contrôle

Dans le cadre de la mécanique des sols non saturés, plusieurs débats tournent autour de l'état de l'eau dans le sol, plus particulièrement pour des succions importantes. BAKER et FRYDMAN (2009) amènent à se poser la question de la définition de la succion comme une pression. Dans ce cadre, leur regard sur la succion se rapproche plus d'un potentiel chimique. Ils critiquent fortement la translation d'axe qui modifie le comportement global de l'eau dans l'échantillon, empêchant fortement sa nucléation. À partir de ces observations, il est intéressant de se pencher sur l'évolution du comportement de l'eau sous l'effet de la translation d'axe, à travers son effet sur différentes variables.

### 1.6.1 Effet de la translation d'axe sur les phases gazeuse et liquide

La loi de Dalton (Eq. 1.17) régit le mélange entre la phase de vapeur et les différents composants présents dans l'air, dont la table 1.3 donne les principaux composants.

$$u_{atm} = u_a^g + u_{vap}^g = u_{N_2}^g + u_{O_2}^g + u_{Ar}^g + u_{CO_2}^g + u_w^g = (x_{N_2}^g + x_{O_2}^g + x_{Ar}^g + x_{CO_2}^g + x_w^g) \cdot u_{atm} \quad (1.17)$$

Avec  $u_i^g$  la pression partielle de chaque composant du mélange et  $x_i^g$  la proportion de molécules dans l'air de chaque composant. En considérant qu'il n'y a pas d'autre composant dans l'air, l'équation 1.18 représentant la loi des mélanges est respectée.

gaz	$r_i$	$h_i$ (kPa)
Azote ( $N_2$ )	0.7808	$3.35 \cdot 10^7$
Oxygène ( $O_2$ )	0.2095	$1.57 \cdot 10^7$
Argon ( $Ar$ )	0.0934	$1.46 \cdot 10^7$
Dioxyde de carbone	$3.82 \cdot 10^{-4}$	$2.77 \cdot 10^3$

TABLE 1.3 – Composition d'une mole d'air et constante de dissolution dans l'eau (de Henry) (SANDER 2015)

$$\sum_{i=1}^n x_i^g = x_{N_2}^g + x_{O_2}^g + x_{Ar}^g + x_{CO_2}^g + x_w^g = 1 \quad (1.18)$$

Ces deux équations permettent de définir la composition de l'air en fonction de la pression totale de l'atmosphère et de l'humidité relative. La composition de l'air influence directement la composition de l'eau. Les éléments présents dans l'air sont dissolus dans le fluide interstitiel selon la loi de Henry, présentée en équation 1.19.

$$u_i^g = u_{atm} \cdot x_i^g = h_i \cdot x_i^l \quad (1.19)$$

Avec  $k_i$  la constante de Henry du composant  $i$ . La pression de vapeur saturante de la phase liquide de l'eau est donc régie par la loi de la tonométrie (Eq. Reftometry), dérivée de la loi de Raoult.

$$u_l^{sat} = \sum_{i=1}^n x_i^l \cdot u_i^{sat} \quad (1.20)$$

Où  $u_i^{sat}$  est la pression de vapeur saturante du fluide. Si la pression de vapeur saturante du composant n'existe pas à la température d'analyse (ici  $25^\circ C$ ), c'est sa pression partielle dans le gaz adjacent qui sera considérée en place (LIGER-BELAIR 2014).

En couplant les équations 1.18 et 1.4, il est possible de calculer la proportion de chaque élément dans l'air, et de calculer sa dissolution dans l'eau.

$$x_i^g = r_i \cdot \left( 1 - \frac{Hr \cdot u_w^{sat}}{u_{atm}} \right) \quad (1.21)$$

$$x_i^l = \frac{u_{atm} \cdot x_i^g}{h_i} = \frac{u_{atm}}{h_i} \cdot \left( 1 - \frac{Hr \cdot u_w^{sat}}{u_{atm}} \right) \quad (1.22)$$

Les équations 1.19 et 1.21 permettent alors d'établir la fraction de chaque composant dans le fluide interstitiel.

$$\begin{aligned} u_l^{sat} &= \sum_{i=1}^{n-1} \left[ x_i^l \cdot u_i^{sat} \right] + x_w^l \cdot u_l^{sat} \\ &= \sum_{i=1}^{n-1} \left[ x_i^l \cdot u_i^{sat} \right] + \left[ 1 - \sum_{i=1}^{n-1} x_i^l \right] \cdot u_l^{sat} \end{aligned} \quad (1.23)$$

En utilisant l'équation 1.20, il est alors possible de calculer la pression de vapeur saturante du fluide interstitiel en fonction de deux variables : la pression d'air (influencée par la translation d'axe) et l'humidité relative (influencée par la succion). Cette équation n'est valable que s'il n'y a pas d'autre constituant dans le fluide, et donc en supposant que l'équation 1.24 est vérifiée.

$$\sum_{x=1}^n x_i^l = 1 \quad (1.24)$$

Au final, les équations montrent que la pression ou l'humidité relative n'ont que très peu d'incidence sur la pression de vapeur saturante (ordre de  $10^{-4}$ ) du fluide interstitiel, en particulier comparé à la température (le passage de  $20$  à  $25^\circ C$  entraîne une augmentation de  $39\%$  de  $u_w^{sat}$  par exemple). Il est donc raisonnable en toute circonstance d'utiliser la pression de vapeur saturante de l'eau, quelle que soit la pression d'air.

### 1.6.2 Effet de la translation d'axe sur la nucléation

La nucléation dans un sol est en compétition avec un phénomène de vidange guidé par la loi de Jurin/Laplace (Eq. 1.1). Ces deux lois permettent de définir, pour un rayon donné, deux pressions de fluide interstitiel différentes permettant la purge. La figure 1.17 présente, à une pression succion donnée, le diamètre du pore vidé pour chacun des phénomènes. Il apparaît alors que la nucléation est toujours en retard par rapport à la vidange orchestrée par la loi de Jurin/Laplace. Les deux phénomènes apparaissent quasiment ensemble, passée une valeur de  $10MPa$ . Pour autant, cela n'implique pas l'absence de nucléation dans le sol.

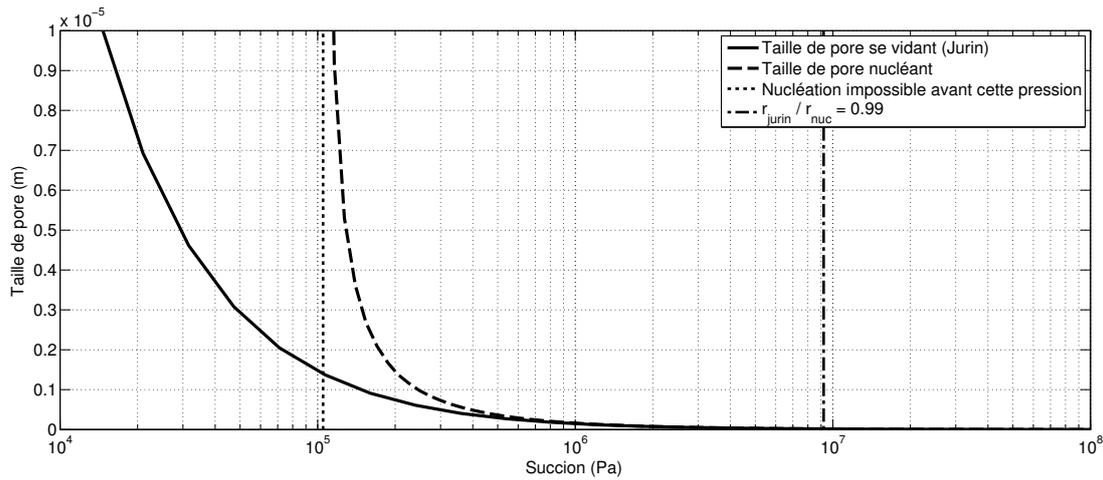


FIGURE 1.17 – Courbe de vidange des pores contre nucléation

Un sol est un agencement de pores de tailles variables, et répartis de manière aléatoire. Or, dans ce cas, les pores de plus grande taille ne se videront que s'ils sont en contact direct avec l'air. Si un pore saturé de plus petite taille bloque le passage, le pore plus grand ne se videra que quand la pression sera suffisamment basse pour vider le petit. En revanche, le pore le plus grand peut présenter de la nucléation avant la vidange du plus petit pore.

La nucléation ne dépend que de deux éléments : la pression de l'eau et la taille du pore. La vidange est, quant à elle, gouvernée par ces deux variables et par une troisième : la pression de l'air extérieur (la désaturation est gouvernée par la succion). Le pore de petite taille sera donc toujours vidangé pour cette même valeur de succion, quelle que soit la pression d'air. En revanche, pour une succion donnée, la pression du fluide interstitiel variera avec la pression d'air, et fera varier le rayon critique de nucléation. Si la pression d'air monte suffisamment haut, il est alors possible d'empêcher la nucléation dans les pores, et donc de modifier le degré de saturation de l'échantillon. La table 1.18 et la figure 1.4 illustrent pour l'exemple une succession de pores. La taille et la forme de pores choisis pour l'exemple sont deux pores de rayon  $0.291\mu m$  (tube) reliant l'extérieur à deux pores sphériques de rayon  $0.347\mu m$  et  $0.582\mu m$ . Ces diamètres sont couramment rencontrés dans les argiles. En appliquant à cette série de pores la surpression classique de la translation d'axe, la nucléation disparaît à mesure que la pression augmente, alors que la succion  $s = u_a - u_w$  reste la même dans chaque cas. La courbe de saturation du sol est donc changée comme la compressibilité du fluide interstitiel équivalent. Ce phénomène pose problème dans l'étude des matériaux de terrassement où la compressibilité du fluide va jouer un rôle important. Les résultats d'essais vont donc influencer le paramétrage des modèles prenant en compte la compressibilité des fluides (MAHMUTOVIC et al. 2014 ; WHEELER 1986).

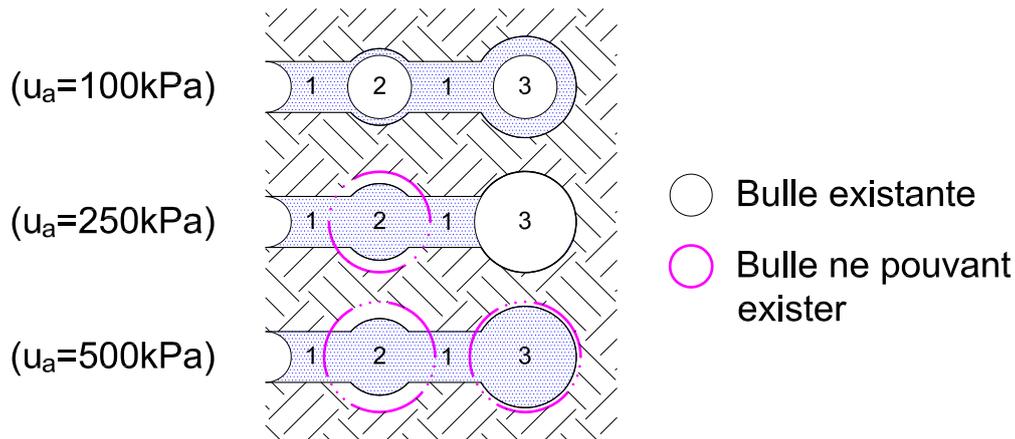


FIGURE 1.18 – État de l'espace poreux modèle en fonction de la pression d'air à l'interface ( $r = 0.291; 0.347; 0.582\mu\text{m}$ ) pour une succion de  $500\text{kPa}$

<i>Ref</i>	$R_p$ <i>m</i>	$u_{atm}$ <i>Pa</i>	<i>succion</i> <i>Pa</i>	$u_w$ <i>Pa</i>	$r_c$ <i>m</i>	Nucléation
-	-	-	-	-	-	-
1	$2,91 \cdot 10^{-7}$					-
2	$4,37 \cdot 10^{-7}$	$1,00 \cdot 10^5$	$5,00 \cdot 10^5$	$-4,00 \cdot 10^5$	$3,62 \cdot 10^{-7}$	oui
3	$5,82 \cdot 10^{-7}$					oui
1	$2,91 \cdot 10^{-7}$					-
2	$4,37 \cdot 10^{-7}$	$2,50 \cdot 10^5$	$5,00 \cdot 10^5$	$-2,50 \cdot 10^5$	$5,77 \cdot 10^{-7}$	-
3	$5,82 \cdot 10^{-7}$					oui
1	$2,91 \cdot 10^{-7}$					-
2	$4,37 \cdot 10^{-7}$	$5,00 \cdot 10^5$	$5,00 \cdot 10^5$	0	$6,33 \cdot 10^{-5}$	-
3	$5,82 \cdot 10^{-7}$					-

TABLE 1.4 – Exemple d'un cas de nucléation avec effet de la translation d'axe

La figure 1.19 présente la nucléation de pores cachés, sous la forme de courbes limites. Chaque courbe représente la taille minimale du pore caché pour qu'il puisse nucléer (exprimé en pourcentage du pore le liant à l'extérieur). Chaque courbe représente une valeur de translation d'axe. En dessous de la courbe, le pore peut nucléer ; en dessus, il ne peut pas. Il est clairement visible que dans la zone de pores dominants de certaines argiles ( $0.1\mu\text{m}$ ), la translation d'axe a des effets largement néfastes sur la nucléation par un fort accroissement de la taille nécessaire pour faire nucléer un pore.

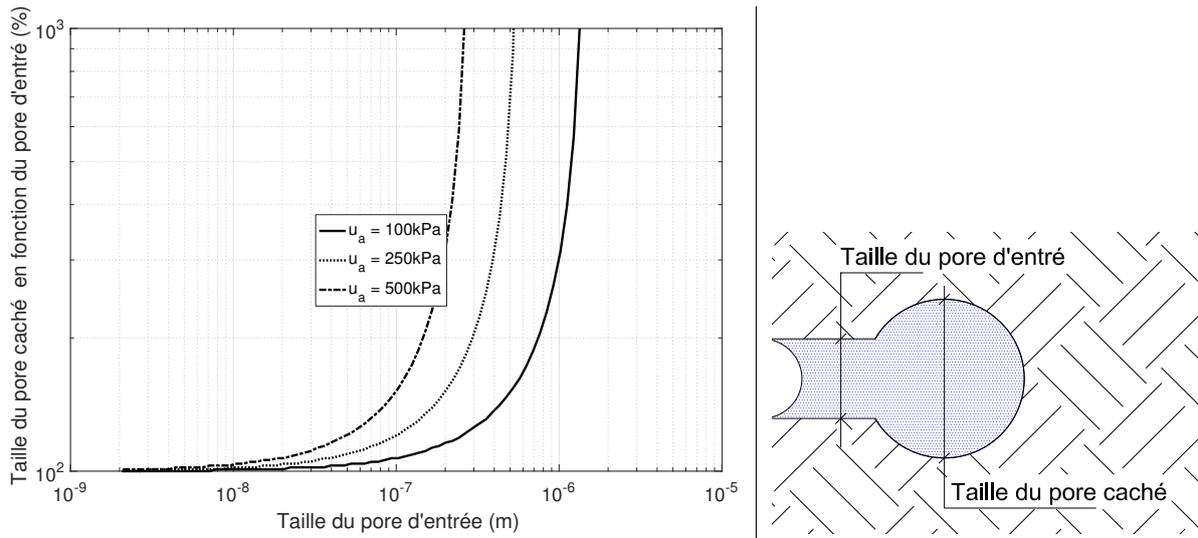


FIGURE 1.19 – Taille minimum du pore caché pouvant nucléer en fonction du pore d'entrée

## 1.7 Conclusions

La mécanique des sols non saturés est gérée par des interactions complexes entre les différentes phases se trouvant dans le sol. Des équilibres chimiques et physiques mènent à la génération de pressions négatives du fluide interstitiel. Cette pression interstitielle aura alors des conséquences mécaniques sur le comportement macroscopique du sol qui seront discutées dans les chapitres suivants. La variabilité du comportement mécanique du sol en fonction de sa valeur de succion mène à la création de domaines de saturation. Chaque domaine établit une réponse différente du sol (hydrique et mécanique). Les domaines secs (D1, hygroscopique ou pendulaire) présentent principalement des interactions de grains avec des phénomènes hydriques moins prévalent. Les domaines plus proche de la saturation, correspondant plus aux problématiques de terrassement (D2, D3, funiculaire), présentent de l'air enfermé qui jouera sur la compressibilité du fluide interstitiel.

C'est d'ailleurs dans ces domaines que la nucléation va jouer un rôle clé dans la désaturation du matériau, avec la génération de bulles (air/vapeur) dans le sol, mais seulement dans les pores de taille suffisamment grande comparé au rayon critique de nucléation. Ce dernier ne dépend, lui, que de la pression du fluide interstitiel et de la pression de vapeur saturante. C'est ce lien entre géométrie de pore et rayon critique qui permet d'observer des pressions fortement négatives dans le fluide interstitiel. Cette traction est liée aux forces de van der Waals entre molécules, permettant la mise en traction de l'eau.

La diversité des méthodes de mesures de succion mène à des choix difficiles, qui sont gouvernés principalement par les conditions expérimentales rencontrées. Il est nécessaire, pour pouvoir fournir des résultats pertinents, de connaître non seulement les portées de mesure de chaque méthode, mais aussi les erreurs de mesures relatives qu'elles peuvent amener.

La modélisation des sols nécessite l'étude de ses états de saturation et de son comportement de retrait gonflement. Les courbes de rétention permettent d'anticiper les points clés du comportement du sol, plus particulièrement l'entrée d'air. Cette dernière est généralement établie comme la séparation entre domaines D1 et D2, passant donc d'une phase d'air continue dans le sol à l'enfermement progressif de l'air dans la matrice liquide. Plus la pression du fluide

augmente, plus l'air va prendre la forme de bulles, finissant par la dissolution totale du fluide interstitiel.

Au-delà des erreurs et des problématiques de portée, il est aussi nécessaire de se pencher sur les biais que certaines méthodes de mesure ou de contrôle peuvent amener lors de l'étude d'un matériau. La nucléation est régie par la pression du fluide interstitiel et non la succion elle-même. De là, un écart de comportement apparaît pour une succion donnée dans le cadre de la translation d'axe. Plus la pression d'air appliquée sera grande, moins la pression de l'eau sera haute pour une succion donnée. Une augmentation de la pression mène alors à une augmentation du rayon critique, et empêche donc partiellement, voire totalement, la nucléation. Il y aura alors des conséquences à une succion donnée sur la compressibilité du fluide interstitiel équivalent, tel que décrit dans certains modèles de comportement. Ce problème est d'autant plus important que les domaines de l'air occlus sont ceux correspondant aux problématiques de terrassement et de compactage des sols fins.

---

# Planche de compactage pour la caractérisation du comportement des marnes à la mise en œuvre

---

*Planche de compactage in situ et essais*

## Sommaire

---

2.1	Conception des ouvrages en terre . . . . .	32
2.2	Définition de la planche de compactage . . . . .	35
2.3	Observations d'ordre général sur la planche de compactage . . . . .	42
2.4	Caractérisation des variables d'état hydromécanique de la planche de compactage	46
2.5	Conclusions et hypothèses de travail . . . . .	66

---

Les terrassements routiers sont relativement bien cadrés par les normes. Malheureusement, ces dernières ne couvrent pas tous les domaines où des problèmes peuvent être rencontrés, particulièrement concernant la mise en œuvre des sols fins. Matelassage, feuilletage et orniérage présentent des défis à relever pour les terrassiers. Ces derniers sont généralement résolus par l'ajout d'adjuvants, alors que des moyens plus économiques pourraient être utilisés. Dans ce cadre, une planche de compactage court terme a été réalisée, dans le but d'analyser le comportement des marnes pendant leur compactage. Pour ce faire, plusieurs plots ont été construits suivant différents paramètres, puis une série complète d'essais a été réalisée sur ces derniers. Dans ce chapitre seront exposées les problématiques menant au choix des paramètres de la planche, appuyées par une étude bibliographique. Un bilan visuel, puis chiffré, sera alors présenté par l'exploitation des essais réalisés.

## 2.1 Conception des ouvrages en terre

La réalisation des ouvrages en terre est l'épine dorsale du développement des infrastructures. Sa pratique varie énormément selon les pays. Les variations sont intimement liées aux conditions météorologiques des régions concernées. La problématique est donc de savoir comment réaliser le chantier dans un objectif de maîtrise des ouvrages. Pour ce faire, les matériaux en présence doivent être identifiés et classés, puis un mode et des conditions de compactage doivent être établis.

### 2.1.1 Normes, influences locales et type de matériau

La réalisation des ouvrages en terre n'est pas une opération facile. Au-delà des problématiques mêmes de maîtrise des actions de compactage s'ajoutent des problématiques d'aléa sur les matériaux, des problématiques de moyens matériels, d'environnement et d'écologie. Cette dernière, couplée à la problématique des moyens, demande aujourd'hui aux prescripteurs d'ouvrage de mettre en place des matériaux qui, d'usage, auraient été mis en dépôt. La plupart des matériaux grenus ne présentent pas vraiment de problème pour la réalisation des remblais (sauf érodabilité et gel), et ne seront de toute manière pas ou peu considérés pour la réalisation de barrages-poids.

Selon les pays, différentes approches existent pour la réalisation des terrassements routiers, plus particulièrement pour les matériaux fins. En France ou au Royaume-Uni, les matériaux fins sont en général mis en place à l'aide d'un compactage normal (peu de passes de compacteur), et à une teneur en eau moyenne. Cette pratique convient bien aux environnements relativement humides. Dans des cas présentant des complications, des liants hydrauliques ou aérauliques (ciment, chaux) seront ajoutés. Des renforcements par géotextiles sont aussi envisageables, ces derniers permettent d'ailleurs de contrer d'autres problématiques tel que les cavités ou la répartition de charge sur des inclusions rigides (HUCKERT et al. 2016; VILLARD, HUCKERT et BRIAN, CON 2016). La pratique espagnole est tout autre : le compactage est beaucoup plus fort (compacteurs plus imposants et plus de passes), et appliqué sur un matériau sec. Cette méthode permet d'obtenir des densités plus importantes et se prête bien aux environnements relativement secs. En revanche, en cas de forte humidification du remblai (pluies importantes), un fort gonflement, voire un effondrement, peuvent apparaître. À l'opposé, les pays scandinaves jouent de patience dans la réalisation des remblais. Ici, pas de compactage, mais de la consolidation naturelle. Les ouvrages sont mis en place à des teneurs en eau naturelle importantes, avec des successions de couches drainantes et de matériaux fins. Entre plusieurs mois et un an sont alors laissés à l'ouvrage pour effectuer son tassement. Des interventions ont lieu par la suite pour régler les hauteurs d'assise aux valeurs voulues. Cela fait ressortir ici l'importance de l'étude des matériaux fins, secs ou humides, pour comprendre de manière plus approfondie les effets du compactage, quel que soit leur état initial, et mieux comprendre leur évolution au cours de celui-ci.

Dans le cadre de la réalisation des barrages, les pratiques se tournent plutôt vers une mise en place de matériaux humides. L'objectif du barrage-poids est de mettre en œuvre une barrière étanche. Les prescripteurs recherchent alors l'homogénéité plutôt que les performances mécaniques, comme ce serait le cas dans les ouvrages routiers. Des disparités dans le matériau compacté peuvent mener à des gradients hydrauliques pouvant générer des désordres. Certaines dispositions structurelles peuvent être prises en compte pour améliorer les performances de l'ensemble, plus particulièrement sous la forme de noyaux de barrage en argile humide entouré de matériau plus grossier pour le protéger de l'érosion. L'utilisation d'un matériau plus humide tend à diminuer les performances (densité, résistance), mais à améliorer l'homogénéité de ces variables sur l'épaisseur de couche compactée (LEFLAIVE et SCHAEFFNER 1980).

### 2.1.2 Appropriation classique des propriétés hydromécaniques des matériaux dans le cadre de la prescription du compactage

Contrairement aux ouvrages de construction où le matériau de réalisation peut être adapté aux besoins, les terrassements doivent adapter les méthodes de mise en œuvre aux matériaux disponibles, et aux besoins de l'ouvrage à réaliser. Pour ce faire, il faut connaître le matériau à utiliser dans ses moindres détails. Un large panel d'essais existe pour caractériser aussi bien ses valeurs intrinsèques que son comportement mécanique (MAGNAN 1997).

Les valeurs intrinsèques permettent de décrire le matériau sol. Elles donnent des indications sur sa forme (taille de grains, aplatissement...) et sur son affinité à l'eau. Chacune de ces caractéristiques mène à la connaissance du matériau, à sa classification. Une fois un matériau analysé, le prescripteur pourra alors fournir les éléments nécessaires à sa mise en œuvre.

#### La granulométrie

La granulométrie représente la répartition des grains composant le sol par taille. Elle est généralement exécutée par tamisage à sec, les tamis utilisés étant définis par une norme (AFNOR 1996), en fonction de la taille maximale du grain du matériau étudié. Cette méthode fonctionne bien pour les matériaux de taille supérieure à  $80\mu m$ . Pour la partie inférieure, il faut recourir à une sédimentographie (AFNOR 1992), où le fractile de moins de  $80\mu m$  sera dé-floculé dans de l'eau, et le volume de dépôt sera mesuré à intervalles réguliers. Le temps de constitution du dépôt est directement relié au diamètre des particules qui sont parvenues à se déposer.

La granulométrie est d'une importance capitale dans le cadre des terrassements, car c'est par elle qu'apparaît le premier point de classement du matériau à compacter. En effet, le Guide des Terrassements Routiers (GTR), (LCPC et SETRA 2000) donne comme premier indicateur de classement les passants à différents tamis. Il existe selon cette norme française six grandes familles de sols. Les sols fins classifiés A, possédant au moins 35% de passant à  $80\mu m$  et un diamètre maximum de  $50mm$ . La classe B représente les sols sableux et graveleux avec fines. Leur passant à  $80\mu m$  est inférieur à 35% et leur diamètre maximum est inférieur à  $50mm$ . La classe C comporte de gros éléments, mélangés avec une faible proportion de sol A ou B (passant à  $80\mu m$  inférieur à 12%). La classe D représente les sols insensibles à l'eau, qui ne possèdent donc pas de cohésion, et donc très peu de matériaux fins. La classe R comprend tous les matériaux rocheux, dont certains peuvent se fracturer au compactage et générer des fines (craies, calcaires). La dernière classe, F, représente les matériaux organiques ou les sous-produits industriels.

La blocométrie, selon les normes européennes, se traite de manière analogue aux prescriptions du GTR. Si la fraction de matériau grossier reste très inférieure à celle de matériau fin, on peut alors considérer que le comportement global est celui du matériau fin. Cela est vrai pour des matériaux dont les blocs sont insensibles à l'eau et non poreux. Des critères granulométriques permettent de définir cette limite, qui est implicitement utilisée dans les critères de classement des matériaux du GTR (limite entre les matériaux A et B).

#### Limite d'Atterberg et de méthylène

La limite d'Atterberg s'applique aux fractions de sol fin, et plus particulièrement aux sols argileux ou marneux. L'objectif de l'essai est de trouver deux limites du comportement du matériau.

La première est la limite de plasticité  $w_p$ . La procédure demande la réalisation de rouleaux de  $5mm$  de diamètre avec le matériau étudié. Le rouleau est réalisé sur un marbre et doit approcher  $10cm$  de longueur. Ces rouleaux sont effectués à des teneurs en eau décroissantes. Au premier

rouleau présentant une fissuration au diamètre de 5mm, sa teneur en eau est mesurée : il s'agit de la limite recherchée.

La deuxième limite est celle de liquidité  $w_l$ . Deux méthodes existent : celle à la coupelle (AFNOR 1993) consiste à placer le matériau à différentes teneurs en eau dans une coupelle. Une rainure est alors exécutée au cœur de la coupelle à l'aide d'un outil standardisé. Des chocs sont appliqués jusqu'à fermeture de la rainure. Un graphique nombre de coups/teneur en eau est réalisé, la limite de liquidité  $w_l$  correspondra à la teneur en eau à 25 chocs. La deuxième méthode (AFNOR 1995) consiste à placer de l'argile dans un récipient. On mesure alors la profondeur d'enfoncement d'un cône (30°, 80g, hauteur supérieure à 35mm) tombant dans l'argile d'une hauteur normalisée pour des teneurs en eau différentes ( $w$ ). Après régression linéaire ( $w$ , enfoncement) pour les points obtenus, la limite de liquidité est la valeur pour un enfoncement de 17mm.

L'indice de plasticité ( $I_p$ ) correspond à l'écart entre la limite de liquidité ( $w_l$ ) et la limite de plasticité ( $w_p$ ). Il est le deuxième critère de la classification GTR pour les matériaux fins et définit la sous-classe (table 2.1).

Appellation	A1	A2	A3	A4
Type de sols	Loess, Silts	Limons, Marnes	Argile marneuse plastiques	Argile marneuse très plastique
$I_p$	jusqu'à 12	12 à 25	25 à 40	40 ou plus

TABLE 2.1 – Classification des sols fins selon GTR (LCPC et SETRA 2000)

Les limites d'Atterberg peuvent aussi servir à déterminer l'état hydrique d'un matériau. En effet, le guide des terrassements routiers prévoit une série de sous-classes concernant la teneur en eau du matériau avant compactage. Elles utilisent l'indice de consistance du matériau, défini comme en équation 2.1. Ce dernier permet de définir la malléabilité du matériau en fonction de sa teneur en eau. Les sous-classes s'étendent de l'état très sec à l'état très humide et définiront les paramètres adaptés pour le compactage. Elles sont présentées en table 2.2.

$$I_c = \frac{w_l - w}{I_p} \quad (2.1)$$

Appellation	ts	s	m	h	th
Type de sols	très sec	sec	medium	humide	très humide
$I_c$	jusqu'à 0.9	0.9 à 1.05	1.05 à 1.15	1.15 à 1.3	1.3 ou plus

TABLE 2.2 – Sous-classes hydriques selon le GTR (LCPC et SETRA 2000)

Pour déterminer l'argilosité d'un sol et son affinité à l'eau, une autre méthode existe : la valeur au bleu de méthylène (AFNOR 1998), couramment utilisée pour vérifier la présence d'argile dans les fines des granulats destinés au béton. Cette méthode a été par la suite proposée pour la détermination des taux d'argiles dans les sols (NGOC LAN 1981), et de manière à être appliquée au GTR. L'essai consiste à trouver le volume de bleu adsorbé à saturation par l'argile pour une masse donnée de sol coupée à la granulométrie souhaitée. Cela s'observe par la réalisation de tâches du mélange sol/eau/bleu sur du papier filtre. La saturation est observée par l'apparition

d'une auréole bleue autour de la tâche.

Cette méthode a vite été adoptée par les chantiers de terrassement, car le résultat dépend moins de l'opérateur. En revanche, il est facile d'observer des faux virages. Une auréole se forme, mais disparaît au bout de quelques minutes. Les 5 minutes données par la norme ne sont pas suffisantes pour l'observation de matériaux trop plastiques. Sans une vérification plus adéquate, une argile A1 peut donc être facilement confondue avec une A3, ce qui peut engendrer des difficultés sur chantier. Certains terrassiers, Vinci par exemple, ont donc préféré abandonner l'essai pour se rabattre sur la limite d'Atterberg.

### 2.1.3 Matériau exploité pour la planche de compactage

L'étude porte sur une marne (du Gaulois maërl). La définition géologique de cette dernière ne prend racine que récemment. A l'origine, elle était principalement utilisée pour ses propriétés agricoles de correction d'acidité. Bernard Palissy (*Discours admirables de la nature des eaux et fontaines, tant naturelles qu'artificielles, des métaux, des sels et salines, des pierres, des terres, du feu et des émaux, 1580*), au XVI<sup>e</sup> siècle, définit la marne comme une couche de sol extraite à des profondeurs variables, par la construction de puits, prônant toujours son usage en agriculture. Les dictionnaires que sont Furetière ou L'Encyclopédie ne fournissent à leurs parutions que peu de détails complémentaires, classant la marne entre la craie et l'argile. Entre 1777 et 1781, Barthélemy Faujas de Saint-Fond, géologue fondateur du Muséum National d'Histoire Naturelle, donne une définition plus poussée, faisant apparaître sa composition, mélange d'argile et calcaire, mais aussi décrivant la présence de fossiles. Il met en avant plusieurs degrés de teneur en calcaire, et propose des méthodes d'identification visuelle, comme chimiques, par l'observation de l'effervescence dans l'acide<sup>1</sup>. Aujourd'hui, une marne se définit par une teneur en  $CaCO_3$  comprise entre 35% et 65%. Elle est de plus classée selon son origine géologique.

Il s'agit ici d'une marne grise du Pliensbachien/Toarcien (PONSART 2010 ; L'ATELIER DES TERRITOIRES 2011). Elle a été extraite durant la réalisation du déblai D9B (TOARC D) de l'A304 (Charleville-Mézières), puis placée dans le dépôt 17P2. Ce dépôt étant destiné à devenir un merlon visuel, il a été compacté selon les règles de l'art. L'extraction du matériau s'est effectuée sur le matériau compacté, et de manière frontale. Le matériau brut présente des mottes de taille allant jusqu'à 600mm, avec quelques mottes exceptionnelles de taille plus conséquente (Fig. 2.1). Des blocs rocheux peuvent aussi être rencontrés parfois, et un certain nombre de cailloux sont présents. Il s'agit ici des restes des alternances du Toarcien, compactées de couches de calcaires (fracturés) à bélemnites DUPONT 1859 et de marnes grises. Quelques nodules ferreux peuvent y être trouvés.

Une fois les mottes brisées, la granulométrie de la marne s'apparente à celle d'un matériau fin. La figure 2.2 présente la sédimentographie réalisée sur le matériau. Ayant plus de 80% de passant au tamis de 80 $\mu$ m (100% pour les mottes elles-mêmes), il s'agit, au regard du GTR, d'un matériau fin de type A. La table 2.3 présente les valeurs descriptives de la marne. Son  $I_p$  de 24 la classe comme matériau A2 selon le GTR. La densité des grains a été obtenue au pycnomètre.

## 2.2 Définition de la planche de compactage

La planche de compactage se doit d'être un reflet des différents usages et pratiques, retranscrite depuis les normes, tout en permettant de pousser plus loin les limites existantes. Dans

---

1. Nous remercions Guillaume Comparato, doctorant en Histoire, LUHCIE, Université de Grenoble-Alpes, pour ce complément historique

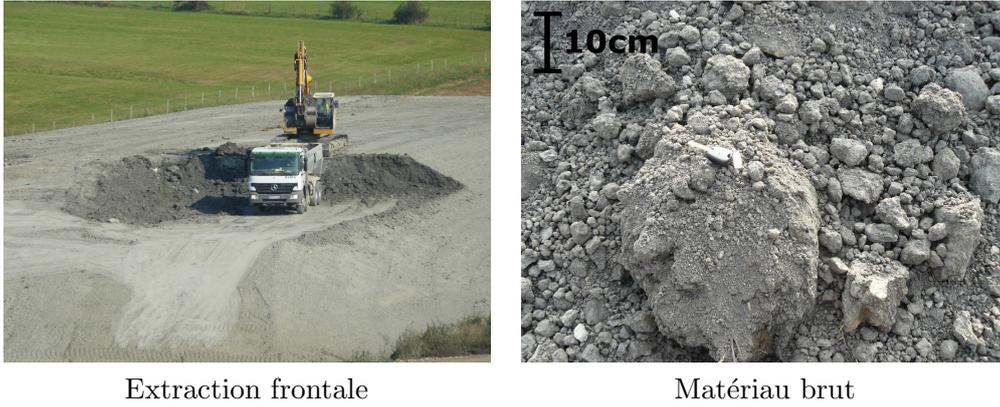


FIGURE 2.1 – Matériau de la planche de compactage

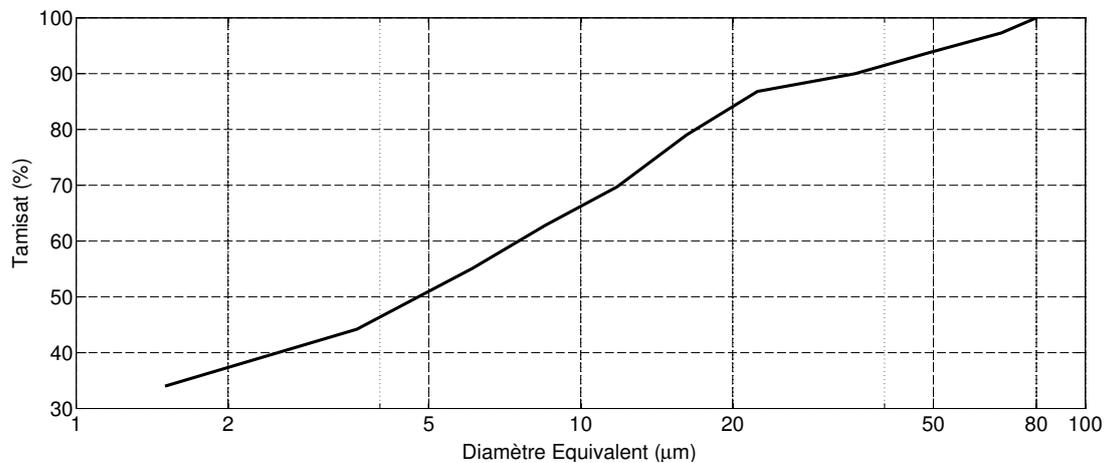


FIGURE 2.2 – Sédimentographie de la marne de l'A304

Propriété	valeur
Limite de liquidité $w_l$	46%
Limite de plasticité $w_p$	22%
Indice de plasticité $I_p$	24%
Humidité naturelle $w_n$	20%
Densité des grains $\rho_s$	$2.665g \cdot cm^{-3}$

TABLE 2.3 – Propriétés physiques de la marne support d'étude

ce cadre, il est d'abord nécessaire de faire un état des lieux des phénomènes problématiques rencontrés lors de la mise en œuvre de matériaux fins. Dès lors, les variations de paramètres de la planche découleront des observations faites dans l'objectif de pouvoir étudier ces phénomènes.

### 2.2.1 État de l'art et principales problématiques rencontrées au compactage

Au-delà des normes françaises et des différentes pratiques selon les pays où les compactages sont réalisés apparaissent une série de phénomènes qui peuvent poser problème lors de la réalisation des ouvrages. Les trois principaux problèmes sont les suivants : l'orniérage, le

feuilletage, et le matelassage. Ils peuvent être séparés en deux familles : les phénomènes liés directement au compactage et ceux liés à la circulation des véhicules. Certains éléments d'information proviennent de réunions et discussions régulières entre les différents intervenants du projet, les praticiens étant le plus souvent à l'origine des observations. Une compilation de ces observations a progressivement été construite pour apparaître dans le futur guide méthodologique de TerreDurable (BOUTONNIER et al. 2012a).

L'orniérage apparaît plus particulièrement après le compactage, lorsque les véhicules doivent passer sur le remblai alors qu'il vient d'être compacté. Il s'agit donc d'un état fini. Ce phénomène apparaît plus particulièrement sur les matériaux fins humides. Dans cette configuration, le matériau est suffisamment plastique, il se déforme sous le passage des roues des véhicules et forme des ornières. Ce phénomène est problématique, non seulement pour l'état final du remblai, mais aussi pour la praticabilité du site lors de la réalisation des travaux. Les recommandations à ce sujet sont relativement vagues. Elles passent d'abord par un séchage du matériau avant compactage ou par l'utilisation d'adjuvant permettant de renforcer sa structure (LI 2015).

Le matelassage et le feuilletage sont deux comportements particuliers qui peuvent apparaître au compactage. Ce sont donc des phénomènes qui apparaissent durant le passage de la bille du compacteur.

Le feuilletage (Fig. 2.3) se caractérise par une rupture sur un plan quasi horizontal du sol lors du compactage. Il est généré par le cisaillement appliqué par la bille du compacteur et accentué par collage à cette dernière. TOMI (1998) attribue le feuilletage à la faible cohésion sur les matériaux compactés secs (s). Le rôle joué par l'état sec du matériau est aussi mis en évidence lors du traitement à la chaux ou au séchage naturel des matériaux fins (RIGOT 1984). Ce phénomène peut donner des modules de résistance suffisants selon les normes, car il n'engendre pas un défaut de portance vertical, mais une faiblesse au cisaillement. Il est donc souvent invisible aussi bien à l'œil qu'aux essais classiques de restitution des ouvrages, mais peut-être accentué par des passes complémentaires de compacteur (sur compactage ou fortes énergies) (QUIBEL 1978). Son effet sur le comportement à long terme n'est pas connu. Certains ouvrages endommagés semblent mettre en évidence des facteurs liés au feuilletage dans la rupture observée avec :

- un angle de frottement résiduel selon les plans du feuilletage, mettant en péril les ouvrages généralement dimensionnés avec l'angle effectif
- une perméabilité plus faible au travers du feuilletage, engendrant des risques de gradient de pression dans le sol (cas des barrages)

Le feuilletage n'est observable que sur les matériaux fins secs ou certaines graves (DANDJINO 1988). Les normes, quelles que soient leurs origines, ne fournissent que très peu d'informations à son sujet. L'usage des praticiens montre qu'il semble relativement facile d'éviter ce phénomène en utilisant des compacteurs pieds dameurs au lieu de compacteurs lisses.

Le matelassage (fig . 2.4) est lui aussi peu documenté. Il apparaît principalement sur des matériaux fins, relativement plastiques (A2, A3), et présentant des teneurs en eau relativement élevées (LEFLAIVE et al. 1974). Lors du passage de la bille du compacteur, le matériau reprend sa hauteur initiale comme si le compactage n'avait eu aucun effet. Le matériau se présente donc comme élastique. Contrairement au feuilletage, le matelassage est relativement facile à repérer : il se présente comme une vague à la surface du sol. Une théorie (MAHMUTOVIC et al. 2014) attribuerait ce phénomène à la présence d'air occlus dans le matériau, qui serait comprimé au passage de la bille et reprendrait son état initial à la relaxation de contraintes. Les normes ne font pas forcément état de son existence, sauf la norme anglaise, qui préconise le séchage du matériau préalablement à son compactage. SETRA-LCPC (1982) recommande le traitement et la diminution de l'énergie de compactage pour pallier au phénomène. L'utilisation d'un com-

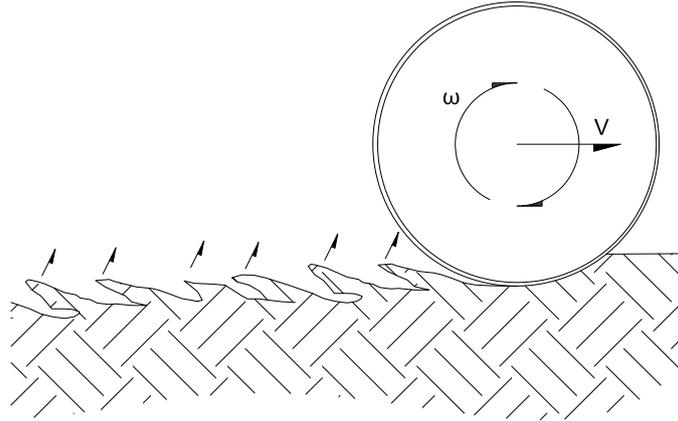


FIGURE 2.3 – Principe du feuilletage

plexe drainant peut permettre la dissipation des pressions interstitielles dans certains cas (PAIG et BLIVET 1973). L'ajout d'énergie de compactage ne permet pas d'étouffer le problème : il a tendance à dégrader le matériau par l'augmentation répétée des pressions interstitielles, ce dernier étant quasi saturé (QUIBEL 1978).

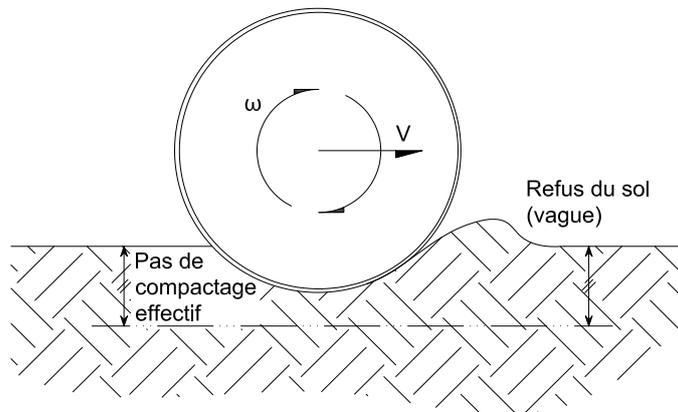


FIGURE 2.4 – Principe du matelassage

Dans le cas de la mise en œuvre de matériaux fins relativement plastiques se pose la problématique des mottes. Il s'agit ici d'un problème de variabilité de la mouture, qui apparaît principalement dans le cadre de l'extraction. Quand le matériau est extrait, que ce soit de manière frontale ou autre, il présente une forte variabilité sur la taille des mottes qui le composent, d'où la notion de mouture. Il est relativement difficile d'anticiper l'effet que va avoir la présence de ces mottes sur le remblai une fois terminé, mais aussi l'effet sur les optimums de compactage qui pourront alors être atteints. ELSBURY et al. (1990) montrent que l'utilisation d'un pulvimixeur. Il s'agit d'un appareil comprenant des bras rotatifs équipés de lames et dents. Directement descendu dans le matériau brut, l'engin permet de briser les mottes. Il permet de fournir un matériau plus homogène une fois compacté (teneur en eau et densité). Il faut faire attention toutefois à l'effet séchant du pulvimixeur (FERRIER et al. 1980). Ils complètent en

montrant que le compactage au rouleau lisse ne remanie pas les mottes, mais les écrase les unes contre les autres. Cette problématique, croisée avec les objectifs de compactage estimés en laboratoire, se manifeste sous les deux formes suivantes :

- comment réaliser un essai de compactage de laboratoire permettant la prise en compte des mottes, et surtout leur effet sur le résultat final du compactage ? Les normes donnent en général une mouture à étudier non représentative du matériau en l'état sur chantier.
- comment contrôler l'homogénéité du matériau après compactage si les mottes constituant sa mouture ne sont pas maîtrisées en densité initiale et teneur en eau ?

Ces deux aspects sont d'autant plus importants et problématiques qu'ils sont très peu pris en compte par les normes. En effet, une taille de motte calibrée est généralement recommandée pour la réalisation des essais de compactage en laboratoire. De même, le temps d'homogénéisation de la teneur en eau est en général dicté par les normes. À l'opposé, sur chantier, les matériaux sont en général mis en œuvre bruts d'extraction, menant donc à une différence extrêmement importante entre la réalité sur site et les actions de laboratoire. Dans ce cadre, la mouture du matériau de laboratoire est toujours beaucoup plus petite que celle du matériau de chantier, alors que son temps d'homogénéisation est toujours plus important que celui laissé lors de la réalisation des travaux.

### 2.2.2 Modalités choisies pour la planche

Les modalités choisies découlent toutes des observations précédentes. L'objectif est de mettre en évidence des phénomènes à la mise en œuvre, et surtout d'observer les effets du compactage et du sur-compactage des marnes.

Dans un premier temps, au regard des différentes pratiques internationales, il est intéressant de regarder l'effet de la teneur en eau. Les essais seront réalisés dans le cadre réglementaire. Les humidités testées seront donc exprimées comme dans le GTR (LCPC et SETRA 2000). Trois états hydriques ont été choisis : sec (s), médium (m) et humide (h). Leur définition est présentée en table 2.4. Le côté sec représente les pratiques du sud de l'Europe, alors que le compactage à teneur en eau médium résulte typiquement de la pratique française. Le côté humide intéresse plutôt les constructions de barrage-poids. Qui plus est, le matériau s (sec) tend au feuilletage, alors que h (humide) tend au matelassage.

Sous-classes GTR	Référence Proctor	Référence IC	Référence IPI
A2 th	$w_n \geq 1.3 \cdot w_{opn}$	$Ic \leq 0.9$	$IPI \leq 2$
A2 h	$1.1 \cdot w_{opn} \leq w_n \leq 1.3 \cdot w_{opn}$	$0.9 < Ic \leq 1.05$	$2 < IPI \leq 5$
A2 m	$0.9 \cdot w_{opn} \leq w_n \leq 1.1 \cdot w_{opn}$	$1.05 < Ic \leq 1.2$	$5 < IPI \leq 15$
A2 s	$0.7 \cdot w_{opn} \leq w_n \leq 0.9 \cdot w_{opn}$	$1.2 < Ic \leq 1.4$	-
A2 ts	$w_n \leq 0.7 \cdot w_{opn}$	$Ic > 1.4$	-

TABLE 2.4 – Sous-classes d'états hydriques au sens du GTR pour un matériau A2

Le deuxième paramètre testé est la mouture, pour effectuer des observations sur la capacité des compacteurs à effacer l'histoire du matériau. Les mottes peuvent générer des problèmes à la mise en œuvre en limitant la densification du matériau. Deux moutures sont testées :

- brut d'extraction : les tailles de mottes sont directement liées à la procédure d'extraction et présentent des tailles pouvant aller jusqu'à 600mm (0/600) de diamètre avec quelques mottes parfois plus importantes.
- pulvimixé : les mottes du matériau sont brisées à l'aide d'un pulvimixeur. La mouture obtenue possède alors des mottes allant jusqu'à 50mm (0/50)

Le troisième paramètre est le type de compacteur. Le but est de pouvoir juger de l'effet de chacun d'entre eux, surtout vis-à-vis de la mouture. Deux compacteurs sont utilisés : le rouleau lisse V5 et le rouleau pied dameur VP5 comme présenté sur la figure 2.5. De plus, le premier d'entre eux est notamment connu pour favoriser l'apparition des phénomènes de feuilletage et matelassage.

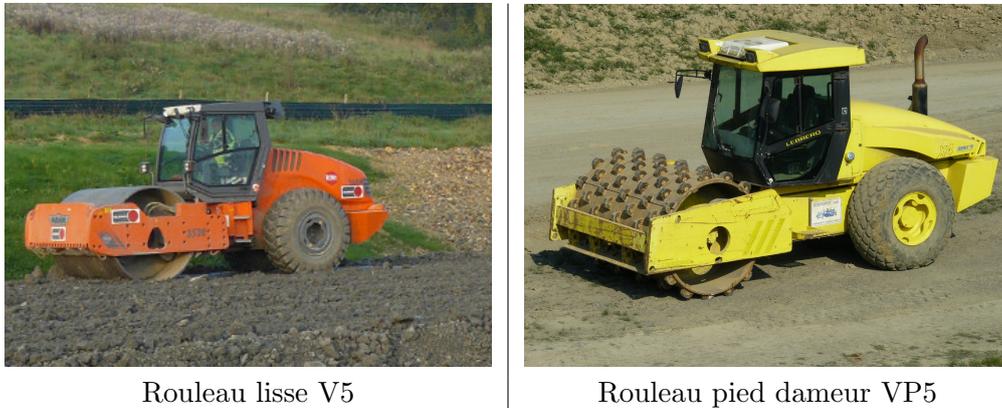


FIGURE 2.5 – Compacteurs utilisés pour la réalisation de la planche

Pour pouvoir comparer de manière raisonnable les deux compacteurs, il faut que leurs propriétés soient aussi proches que possible. Les données concernant les compacteurs figurent en table 3.4. Leurs charges sur bille, leurs excentriques de vibration et leurs fréquences sont suffisamment proches pour justifier la comparaison.

	Lisse V5	Pied dameur VP5
Marque	Hamm	Bomag
Masse totale	19580kg	19650kg
Masse sur essieux actifs	12490kg	13.350kg
Charge linéaire effective	56.3kg · cm <sup>-1</sup>	60kg · cm <sup>-1</sup>
Diamètre de bille	1.6m	1.5m + 2 · 0.1m/pied dameur
Largeur de bille	2.16m	2.13m
Fréquences des vibrations	27/30Hz	26/31Hz
Amplitudes des vibrations	2.00/1.19mm	1.9/1.00mm
Force centrifuge	331/242kN	326/240kN

TABLE 2.5 – Données sur les deux compacteurs de la planche

La quatrième et dernière modalité testée est choisie pour tenir compte des pratiques locales. Pour ce faire, deux énergies de compactage ont été appliquées : 4 passes qualifiées de compactage normal (NC), et 12 passes qualifiées de compactage forcé (FC). L'intérêt de pousser le nombre de passes de compacteur à une valeur aussi extrême est de pouvoir faire apparaître du feuilletage sur les plots secs (s) et du matelassage sur les plots humides (h), l'intensification de l'énergie étant un facteur aggravant. Le choix des quatre passes est issu du GTR. La table 2.6 présente le nombre de passes recommandées par ce dernier pour les matériaux de la planche. Le guide des terrassements routiers tend à prohiber l'utilisation des matériaux à des teneurs en eau trop extrêmes. L'énergie de compactage moyenne sera préférée sur des matériaux proches de la condition m de teneur en eau. De plus, l'accroissement de l'énergie sur certains matériaux fins a tendance à améliorer leur réponse mécanique (HANSBO et PRAMBORG 1980). De manière

à obtenir un compactage optimal, le matériau sera donc ramené à une teneur en eau proche de l'état m. Il y aurait donc traitement pour les matériaux humides et humidification par injection pour les matériaux secs selon la norme.

Classe	Recommandation de compactage	Passes V5/VP5
A2 h	Compactage faible	4/2
A2 m	Compactage moyen	6/3
A2 s	Compactage intense	7/4
	moyenne	4

TABLE 2.6 – Nombre de passes recommandées par le GTR pour un matériau à l'état naturel

En rapport à l'énergie de compactage, deux autres paramètres doivent rester constants lors des compactages : la vitesse des compacteurs et l'épaisseur de couche. L'augmentation de la vitesse aura tendance à diminuer la densité finale, l'augmentation de l'épaisseur mènera à des fonds de couche moins compacts. (KHAY et MOREL 1980).

### 2.2.3 Mode opératoire pour la réalisation de la planche

La planche de compactage est réalisée sur deux supports différents pour des raisons de superficie disponible, ainsi que pour ne pas contraindre le chantier en activité en parallèle. Le premier support est une couche protectrice de matériaux (limon) compactés servant de protection de l'arase de la plateforme réalisée dans l'attente de la couche de forme. Le deuxième support est le dépôt 18P2 d'où est extrait le matériau. Un plan d'implantation est disponible en annexe.

Le matériau est extrait du dépôt de manière frontale à la pelle mécanique pour être soit chargé dans les camions (planche sur couche support), soit directement régalé (dépôt). Le matériau une fois sur site est alors régalé à l'aide d'un bulldozer. Lors des premiers essais, les épaisseurs après régalage et après compactage sont levées à l'aide d'une station GPS ou d'un théodolite (selon disponibilité), de manière à améliorer le contrôle de l'épaisseur finale des couches. Le matériau est régalé sur une largeur égale à 4 fois celle des billes de compacteur, sauf planches 7 et 8, par manque de temps, qui ne font que deux largeurs de bille.

Le matériau extrait possède une humidité relativement proche de l'optimum Proctor, soit un matériau m. De manière à obtenir les deux autres teneurs en eau visées, deux procédures sont mises en place. Pour obtenir le matériau s, une scarification est faite et le matériau est laissé à l'air pour faciliter les échanges avec l'extérieur (Fig. 2.6). Les conditions météo, soleil et léger vent, ont fortement facilité le séchage. Malgré cela, le temps nécessaire au séchage dépasse la journée. Pour éviter une ré-humidification nocturne, la planche est refermée en fin de journée à l'aide d'une passe de rouleau lisse, pour être re-scarifiée le lendemain. Pour obtenir un matériau h, il a été fait appel à une arroseuse-enfouisseuse qui a injecté l'eau directement dans le régalage. Plusieurs heures ont été laissées au sol pour l'homogénéiser. Si nécessaire, le matériau régalé est pulvimixé (Fig. 2.7).

Une fois le matériau régalé et à humidité voulue, il est compacté. Les plots sont préparés par lot de deux, de même humidité et de même mouture. Le compactage a alors lieu, les deux engins (lisse et pied dameur) se faisant face, chacun sur sa moitié de planche, et exécutant leurs 4 passes sur toute la largeur. Les passes sont exécutées en aller-retour. Les plots 1 à 6 sont réalisés en 3 couches d'une épaisseur de 30cm. Les trois derniers plots sont réalisés en une seule



Bulldozer avec herse



Matériau scarifié

FIGURE 2.6 – Mise en œuvre du matériau pour séchage



FIGURE 2.7 – Pulvimixage du matériau régalaé

couche, directement dans le dépôt. Ce dernier ayant été préalablement compacté, il est raisonnable d'estimer qu'il a un comportement proche des couches réalisées pour les autres planches. Une augmentation de la résistance du sol support mène à une augmentation des densités observables (VALEUX et MOREL 1980), il est donc indispensable de garder un support aussi constant que possible. Sur la couche finale, 8 passes sont ajoutées sur deux largeurs de bille, de manière à atteindre la deuxième énergie de compactage. Le compactage a eu lieu dans les règles de l'art avec une vitesse aux alentours de  $2.5\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ , disques à l'appui, et en évitant de serpenter lors des passes.

## 2.3 Observations d'ordre général sur la planche de compactage

### 2.3.1 Désignation des plots de la planche

Les plots de la planche sont désignés selon leur ordre de réalisation et leurs modalités. Ils sont référencés sous la forme suivante : le chiffre de départ annonce le numéro de plot dans l'ordre de compactage. Ensuite, la lettre B ou P est indiquée pour mouture Brute ou Pulvimixée. Est alors donné l'état hydrique (S, M ou H) suivi du compacteur utilisé (V5 pour le lisse et VP5 pour le pied dameur). Pour finir, le nombre de passes est alors donné (4 ou 12). 1BMVP5-12 pour l'exemple. Le référencement est compilé en table 2.7.

Dans le reste du document, les plots seront désignés sous ces noms.

No de planche	Mouture	Taux d'humidité	Compacteur	Nb de passes sur couche finale
1 à 10	B ou P	S, M, H	V5 ou VP5	4 ou 12
	Brut d'extraction	Sec	Lisse	4 passes
	Pulvimixé	Medium	Pied dameur	12 passes
		Humide		

TABLE 2.7 – Désignation des planches par paramètres

### 2.3.2 Bilan visuel de la planche par plot

#### Plot 1BMVP5

Les empreintes laissées par le rouleau pied dameur présentent une érosion aux angles, comme présentée sur la figure 2.8, montrant que le matériau est proche de sa limite de plasticité. Les mottes les plus petites restent visibles dans les empreintes du compacteur. La dessiccation qui s'est opérée au cours des jours suivants a d'ailleurs aggravé l'effet d'érosion des empreintes. Le matériau compacté à l'aide du pied dameur paraît toujours plus sec que celui compacté au rouleau lisse.



FIGURE 2.8 – État après compactage du plot 1BMVP5

#### Plot 2BMV5

La surface du compactage est relativement lisse, pouvant présumer d'un manque d'accroche entre deux couches successives de compactage. En revanche, on peut voir les traces de passage de la bille. Ces zones de transition (parfois quelques cm) entre deux lignes de passage du compacteur laissent supposer une épaisseur de couche non homogène. Cela provient probablement d'un mauvais régalage, difficile à contrôler par topographie.

La surface présente des écailles qui ressemblent fortement à du feuilletage, mais ces dernières n'apparaissent que sur une épaisseur de l'ordre du centimètre, et en présence d'un bloc rocheux sous-jacent. Cela montre clairement l'effet cisailant par tranche du compacteur, généralement responsable du feuilletage, résultant de la rotation des contraintes sous la bille (DANDJINOU 1988). Aucun feuilletage réel n'a pu être observé sur les plots.

En raison de la forte dessiccation, la surface lisse du compactage présente une forte fissuration due aux conditions météorologiques (fort vent et ensoleillement). Une journée complémentaire d'ensoleillement a accentué l'effet de la fissuration. Après trois jours, les fissures présentent entre 0.5 et 2cm d'ouverture pour une profondeur active entre 2 et 3cm. L'entraxe des fissures approche les 50cm. Il est donc important de prendre en compte les temps entre deux interventions



FIGURE 2.9 – État après compactage du plot 2BMV5



FIGURE 2.10 – Écaillage du plot 2BMV5 au-dessus des blocs

de compactage, un week-end ensoleillé pouvant mener à une fissuration relativement importante du remblai, possible chemin de circulation de l'eau, donc relativement dommageable dans le cadre de la réalisation de barrages.



FIGURE 2.11 – Fissuration après dessiccation du plot 2BMV5

**Plot 3BSVP5**

La qualité du matériau est plus faible en surface, avec des manques aux angles des traces du pied dameur. L'état est encore plus dégradé que celui de la planche 1BMVP5. En revanche, la dessiccation semble avoir eu moins d'effet sur l'érosion globale des empreintes, le matériau étant déjà côté sec.

#### Plot 4BSV5

L'état final ressemble fortement à la planche 2BMV5, sauf pour la couleur du matériau, plus pâle à cause de sa plus faible humidité. Le plot a très peu fissuré au cours du temps, en raison sûrement de l'humidité plus faible.

#### Plots 5PMV5 et 6PMVP5

Les résultats de ces deux plots ne présentent pas de grandes différences avec les plots 1 et 2, excepté pour la fissuration, qui n'a pas eu lieu en raison des conditions météorologiques moins clémentes.

Une zone significative du plot 6 a présenté un manque (flash) après compactage sur la zone sur compactée. Celui-ci est sûrement dû à la proximité du bord du plot avec le talus du dépôt, couplé à un manque d'apport au réglage.

#### Plot 7PHV5

Une fois humidifié, le matériau présente tout de suite une plus forte plasticité. La surface de compactage présente les traces du passage des pneus du compacteur (quelques millimètres de profondeur). La résistance de surface est donc relativement faible. L'affaissement relatif de la couche en fonction du nombre de passages du compacteur est important, comme montré en figure 2.12. La surface de compactage n'est pas plane, indiquant une hétérogénéité de l'épaisseur de couche (présence de flashes), comportement moins visible sur les autres planches.

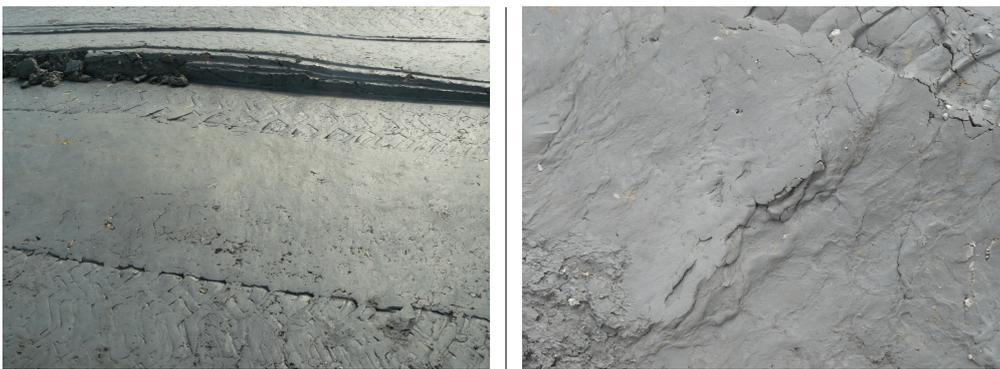


FIGURE 2.12 – État de surface du plot 7PHV5

Ce plot, au sur compactage, a présenté du matelassage sur certaines portions. Lors des passes répétées de la bille, le matériau a atteint un état proche de la saturation, ce qui a dès lors rendu le compactage impossible. La remontée du sol après le passage de la bille était clairement visible, sous forme de vague. La surface est restée lisse et n'a pas présenté de résurgence d'eau,

accentuant la notion de compactage à teneur en eau constante.

### Plots 8PHVP5 et 9BHVP5

Les empreintes du pied dameur sont nettes et propres, comme visible sur la figure 2.13 (sauf endroits légèrement plus secs). La mouture n'est plus apparente : elle a été effacée au compactage par la plasticité du matériau. Quelques traces de pneu sont visibles en surface. La non-uniformité des teneurs en eau est aussi visible en surface.



FIGURE 2.13 – État de surface du plot 8PHVP5

Le plot 9PBHVP5 présente encore plus d'hétérogénéité d'humidité visible. Aucun pulvimi-  
 mixage n'ayant eu lieu, les mottes de taille importante n'ont pu être humidifiées correctement.

### Plots 10BHVP5

Ce plot, initialement prévu dans le jeu de paramètres, n'a pu être réalisé. Le rouleau lisse ne  
 pouvait en effet circuler sur le matériau régalé sans que la bille se mette à glisser. Le compactage  
 n'était donc pas possible dans des conditions de sécurité adéquates.

## 2.4 Caractérisation des variables d'état hydromécanique de la planche de compactage

La planche a été caractérisée par l'intermédiaire d'essais sur chantier et d'essais de labora-  
 toire, exécutés sur des carottes prélevées après réalisation. Les essais de chantier incluent des  
 perméabilités simples anneau, des mesures de densité au gamma-densimètre, des teneurs en eau,  
 et des pénétrogrammes dynamiques PANDA. Les carottes ont subi des mesures de densité, de  
 degré de saturation, et de succion papier filtre.

### 2.4.1 Carottages de la planche de compactage

Dans l'objectif d'acquérir un maximum de paramètres, chaque plot se divise en deux parties :  
 une normalement compactée, et une autre sur compactée. Chacune d'entre elles a subi trois  
 carottages. Les objectifs expérimentaux de ces carottes sont les suivants :

- Mesurer la teneur en eau à plusieurs profondeurs de la couche compactée
- Mesurer la succion à plusieurs profondeurs de la couche compactée

- Mesurer la densité à plusieurs profondeurs de la couche compactée
- Mesures de perméabilité à l'eau et à l'air (effectuées par le LOMC<sup>2</sup>)

Les carottages ont été effectués avec les moyens à disposition. Le carottier est un tube acier, de  $100\text{mm}$  de diamètre intérieur et de  $500\text{mm}$  de longueur, équipé sur le côté de charnières permettant de l'ouvrir en deux et de récupérer la carotte. Le carottier est graissé avant chaque carottage pour faciliter la récupération et limiter les effets de bord. Le prélèvement s'effectue par fonçage à l'aide d'une pelle mécanique, la récupération du carottier à l'aide de sangles attachées au godet de la pelle. Une fois la carotte extraite, elle est filmée et placée dans un tube PVC pour être protégée des chocs et des variations d'humidité. La procédure est présentée en figure 2.14.



FIGURE 2.14 – Mode opératoire des carottages sur les plots de la planche

Les carottes fissurent parfois lorsqu'elles sont extraites du carottier. La rupture a lieu au milieu ou à l'interface entre les deux couches, rappelant que l'interface entre deux couches n'est pas toujours bonne.

#### 2.4.2 Mesures de résistance au pénétrogramme dynamique manuel PANDA

Le pénétrogramme manuel dynamique PANDA (pénétrogramme Autonome Numérique Dynamique Assisté par ordinateur) a été utilisé pour caractériser le comportement mécanique in situ de la planche de compactage. Chaque plot, sur sa partie normalement compactée ou sur compactée, a subi au moins trois mesures PANDA.

##### Présentation du PANDA

Le PANDA se présente sous la forme d'un jeu de tiges à visser qui vont être enfoncées dans le sol. Une tête de frappe est montée sur les tiges 2.15. À chaque coup de marteau porté par l'utilisateur sont enregistrées les valeurs d'enfoncement et d'énergie d'impact. L'énergie est alors retranscrite sous la forme d'une contrainte résistante du sol. Les résultats d'essais se présentent sous la forme de pénétrogrammes, présentant une résistance en pointe, calculée en fonction de la profondeur. Du point de vue du contrôle de compactage, des critères sont définis en fonction du type de matériau. Ils se présentent sous la forme de fuseaux, où le pénétrogramme doit se trouver pour valider le compactage (BACCONET, GOURVÈS et ZHOU 1995).

Le pénétrogramme manuel dynamique est un outil particulièrement apprécié pour sa facilité et sa rapidité d'utilisation. À l'origine développé pour le contrôle de tranchée, il s'est démocratisé sur les chantiers de terrassement au cours des dernières années. Il est un bon indicateur de la réponse mécanique d'un remblai. Il permet aussi de caractériser des l'épaisseur des dépôts archéologiques en milieu urbain (GALINIÉ et al. 2003). Dans le cas du PANDA, plusieurs pointes ( $2\text{cm}^2$  et  $4\text{cm}^2$ ) sont à disposition pour la réalisation des essais selon le matériau étudié.

2. Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, UMR CNRS 6294, thèse d'ANDRIANATREHINA (2016)



FIGURE 2.15 – Présentation du Panda et utilisation

La sollicitation sur le sol correspond à un cisaillement couplé à un poinçonnement, son résultat va donc dépendre de deux composantes : la densité et la succion. Le comportement exact du penetromètre dans les matériaux granulaires reste pour autant difficile à définir exactement, de par les interactions de contact entre les grains (QUEZADA et al. 2014). Dans le cas des sables, les essais en chambre de calibration ont montré que tout incrément de succion mène à un incrément de résistance, en conservant toujours la même densité (RUSSEL et KHALILI 2014). De même, une augmentation de la densité fournira une résistance supérieure. Des résultats équivalents ont aussi été obtenus en chambre de calibration sur des sols résiduels (ATHAPATHTHU et al. 2007). COLLINS et MILLER (2014) présentent des résultats analogues sur des pénétrogrammes couplés avec des mesures de succions, cette fois-ci in situ. Des pertes de résistance suite à des pluies importantes ont été observées par ATHAPATHTHU et al. (2007), impliquant donc une perte de résistance par saturation du matériau, et donc perte de succion.

### Méthode d'exploitation des résultats

La présence importante de blocs dans le matériau pose quelques problèmes pour le post-traitement des essais. Les cailloux génèrent des pics de résistance conséquents, lorsqu'ils sont poussés par la pointe du pénétrogramme. Les blocs plus larges vont soit bloquer le pénétrogramme, soit être poussés, augmentant artificiellement la résistance de pointe mesurée.

Dans le cadre de la planche, les essais pénétrométriques bruts sont traités à l'aide d'une moyenne glissante. Une hauteur proche de 5cm a été choisie pour le lissage. Cette profondeur correspond à 5 points de mesure pour les matériaux les plus raides, et descend à 3 points pour les matériaux plus humides. Elle permet de faire disparaître les plus petites irrégularités de la courbe. Le deuxième problème à résoudre est de faire disparaître les blocs des courbes brutes. Pour pallier à ce problème en toute objectivité, les points dépassant un critère de résistance, basés sur la valeur moyenne des points précédents, ont été éliminés (3 fois la moyenne des 5 points précédents). L'intérêt de l'objectivité de ces critères est de pouvoir traiter des futurs pénétrogrammes dans le cadre du projet avec une influence minimale de l'opérateur. Dans le cas de cette étude, une série de pénétrogrammes a été exécutée après avoir laissé certains plots aux intempéries. Le critère permet donc de traiter ces mesures de la même manière que les précédentes. L'inconvénient est que certaines anomalies ne parviennent pas à être effacées.

La figure 2.16 présente un pénétrogramme type réalisé sur la planche. Celui-ci ne montre pas de problème de bloc. Il est facile de détecter sur la version lissée les trois couches réalisées, se finissant chacune à  $-0.26$ ,  $-0.47$  et  $-0.82m$  de profondeur, soit des couches respectives de 26cm, 21cm et 35cm. Le pénétrogramme d'une couche compactée présente une évolution identique à celle généralement observée pour les densités (FLAVIGNY et DENDANI 1984; HOLTZ et KOVACS



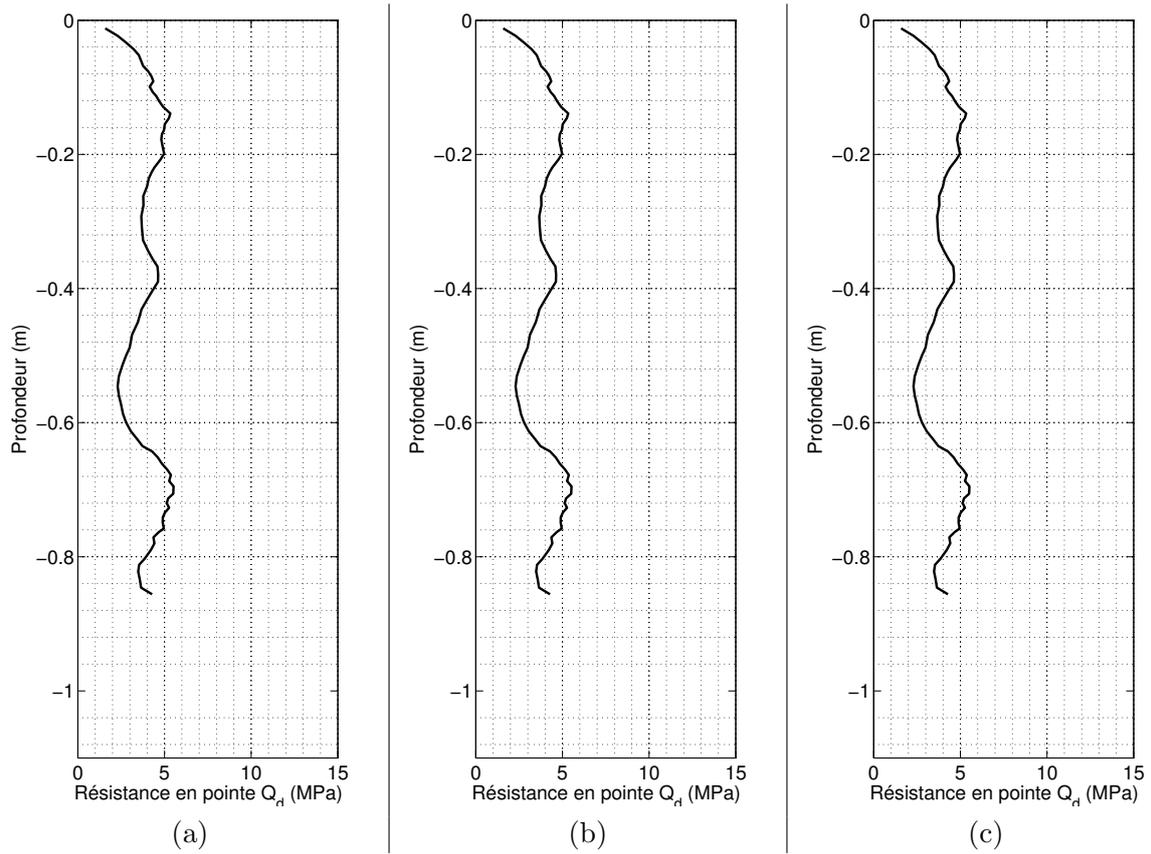


FIGURE 2.17 – Exemples de pénétrogrammes issus d’un même plot (lissés)

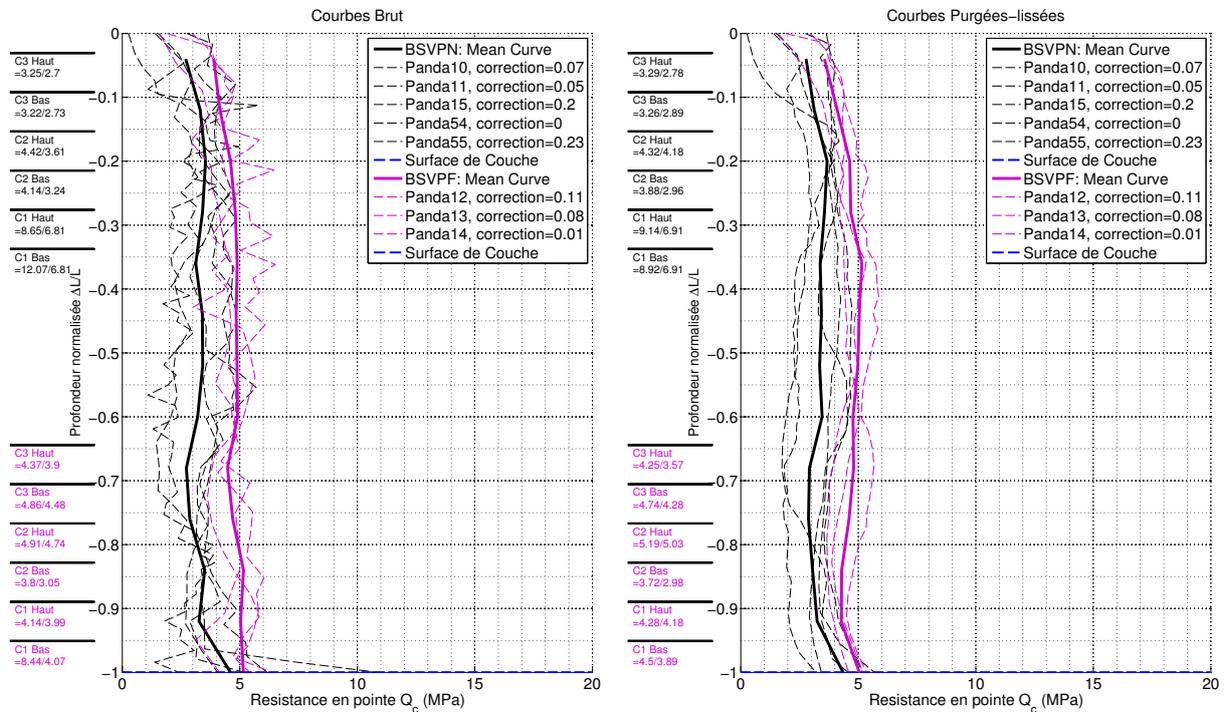


FIGURE 2.18 – Graphique type récapitulatif par plot de compactage, première couche uniquement (normalement compacté en noir et sur compacté en magenta)

à droite les courbes lissées. Les courbes pointillées présentent chaque pénétrogramme effectué sur le plot, alors que la courbe pleine représente la courbe moyenne. Le noir représente le matériau compacté normalement, le magenta représente le matériau sur compacté. Les valeurs sur le côté du graphique présentent les valeurs moyennes et minimales (moyenne/minimum) de chaque demi-couche de compactage (C1 à C3). Dans ce cas d'exemple, le sur compactage apparaît clairement comme un gain de résistance mécanique.

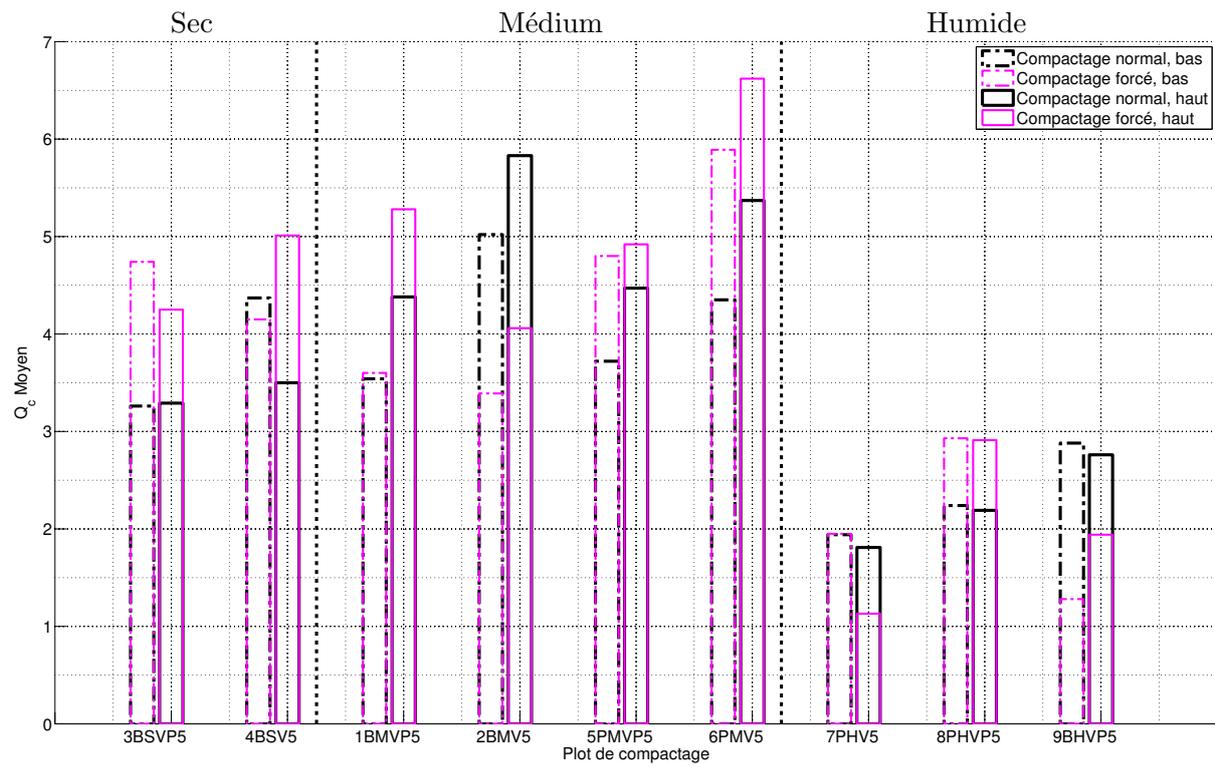
Pour chaque plot de compactage, une double page récapitulative, présentée en annexe 1, donne les résultats de tous les essais effectués, y compris toutes les mesures pénétrométriques. De manière à pouvoir faciliter les comparaisons, et en raison de la forme typique des mesures pénétrométriques d'une couche, quatre valeurs ont été extraites. D'abord, les valeurs moyennes sur la première et la deuxième moitié de la couche compactée, puis la valeur minimum sur les deux mêmes portions. Ce sont ces graphiques qui serviront de référence pour l'étude. Il est à noter que le sur compactage n'a eu lieu que sur la dernière couche de compactage (0 à -1). L'intérêt des valeurs minimales est qu'elles sont obligatoirement représentatives du matériau compacté, et non d'un bloc poussé, et permettent donc de mieux juger la couche.

### Conclusions extraites des résultats

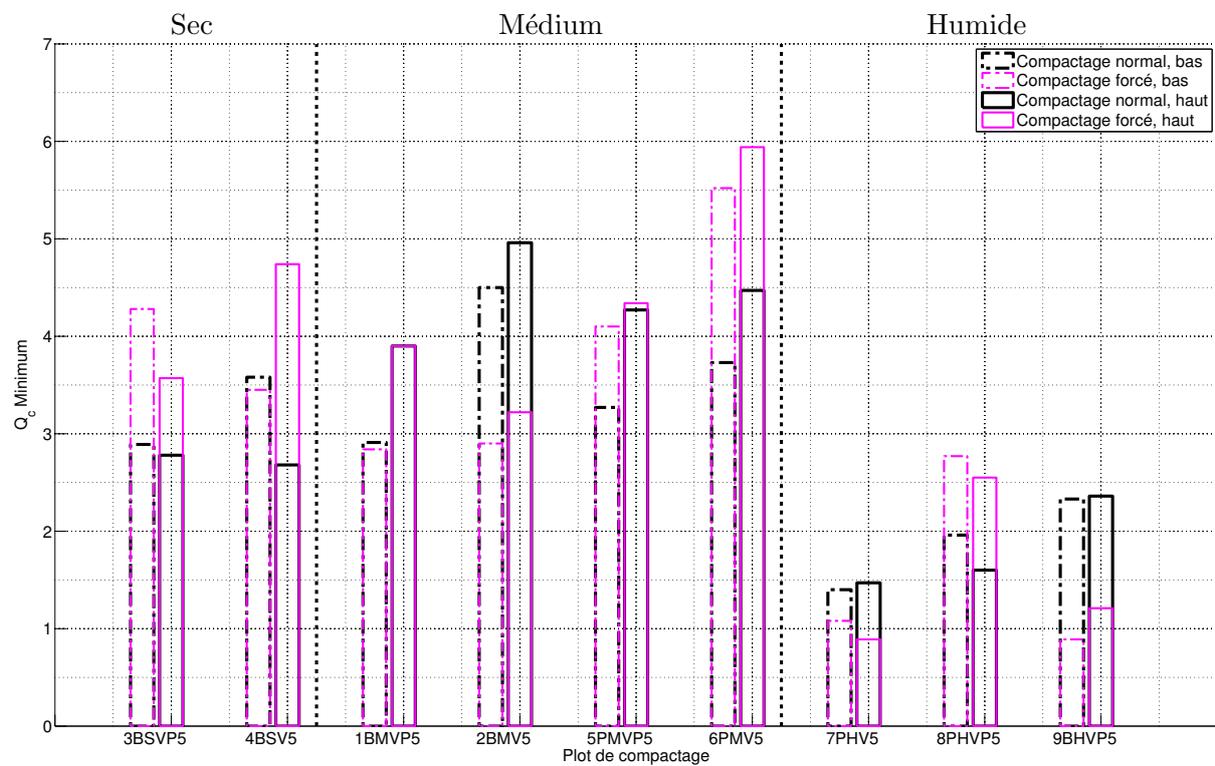
La table 2.8 (p. 53) et la figure 2.19 (52) présentent les valeurs de résistance en pointe moyennes et minimales de la courbe moyenne des pénétrogrammes d'un plot, séparé entre la partie haute et la partie basse de la couche compactée. Ces valeurs sont extraites de la courbe moyenne de chaque plot, présentée en annexe 1. Deux représentations sont données selon les préférences de lecture : un histogramme et un tableau. Le magenta représente le sur compactage (forcé) et le noir le compactage normal. Les pointillés représentent la base de couche, le trait plein le haut.

Du point de vue des teneurs en eau, de faibles résistances pour les milieux humides sont observées. La résistance du matériau médium sont les plus fortes. Celle du matériau sec se trouve entre les deux, mais reste relativement proche du matériau médium. Les matériaux humides présentent des résistances en pointe autour de  $2MPa$ , avec une courbe très linéaire, indiquant une forte homogénéité de la résistance tout au long de la couche. À l'opposé, les matériaux médiums présentent des différences de résistance importantes entre surface et fond de couche, faisant ressortir le manque de compactage en fond de couche. Leur résistance moyenne avoisine les  $4$  à  $5MPa$ . Les matériaux secs présentent dans une moindre mesure ces écarts avec une résistance moyenne autour de  $3.5MPa$ . L'homogénéité du matériau humide oriente son usage vers les barrages, une résistance en pointe de  $2MPa$  étant suffisante pour ce type d'ouvrage. Les deux autres teneurs en eau seront plus orientées routier et ferroviaire pour leurs portances accrues.

La visibilité de l'effet de la mouture sur les résistances est relativement effacée en raison du manque de résistance des mottes. La résistance reste autour de  $4MPa$  pour le matériau médium au VP5 alors qu'un léger gain de  $0.5MPa$  peut être observé au rouleau lisse sur ce même matériau. Une légère perte ( $0.5MPa$ ) est observable du côté humide. Si les mottes avaient été plus résistantes, elles n'auraient pas pu être écrasées par le compactage et auraient gardé leur histoire. Les carottes auraient alors produit des points de rupture en plus grand nombre et les pénétrogrammes auraient présenté des alternances plus marquées sur leur pression de pointe. La figure 2.20 présente deux pénétrogrammes réalisés avant l'extraction du matériau. La résistance en pointe alterne entre  $2$  et  $5MPa$ , ce qui correspond globalement aux résistances vues sur la planche. L'extraction et le pulvimixage ont pu par ailleurs apporter une diminution de cette



Valeurs moyennes (MPa)



Valeurs minimales (Mpa)

FIGURE 2.19 – Valeurs moyennes et minimums des pénétrographes par plot

<i>Mouture</i>	<i>Humidité</i>	<i>Compacteur</i>	<i>N°</i>	<i>Position</i>	<i>Moyenne (MPa)</i>		<i>Minimum (MPa)</i>	
					<i>Normal</i>	<i>Forcé</i>	<i>Normal</i>	<i>Forcé</i>
Brut	medium	VP5	1	Haut	4.38	5.28	3.90	3.90
				Bas	3.54	3.60	2.91	2.84
Brut	medium	V5	2	Haut	5.83	4.06	4.96	3.22
				Bas	5.02	3.39	4.50	2.90
Brut	sec	VP5	3	Haut	3.29	4.25	2.78	3.57
				Bas	3.26	4.74	2.89	4.28
Brut	sec	V5	4	Haut	3.50	5.01	2.68	4.74
				Bas	4.37	4.15	3.58	3.45
Pulvimixé	medium	VP5	5	Haut	4.47	4.92	4.27	4.34
				Bas	3.72	4.80	3.27	4.10
Pulvimixé	medium	V5	6	Haut	5.37	6.62	4.47	5.94
				Bas	4.35	5.89	3.73	5.52
Pulvimixé	humide	V5	7	Haut	1.81	1.13	1.47	0.89
				Bas	1.94	1.95	1.40	1.08
Pulvimixé	humide	VP5	8	Haut	2.19	2.91	1.60	2.55
				Bas	2.24	2.93	1.96	2.77
Brut	humide	VP5	9	Haut	2.76	1.94	2.36	1.21
				Bas	2.88	1.28	2.33	0.89

TABLE 2.8 – Comparaison des valeurs moyennes des pénétrogrammes

résistance par déconfinement du matériau lors de l'extraction. La figure 2.20 (b) permet d'anticiper la présence des blocs avant extraction par l'augmentation de la résistance en pointe sur une plage de profondeur.

Les différences dans l'efficacité des compacteurs sont aussi bien visibles. Les dix premiers centimètres des plots exécutés au pied dameur présentent une résistance plus faible que le rouleau lisse, en général  $1MPa$  d'écart, en raison des empreintes laissées. Les couches du pied dameur sont en principe plus homogènes, incitant son usage en barrage malgré des résistances plus faibles, sauf du côté humide. Globalement, le rouleau pied dameur fournit un compactage plus homogène. Cela se remarque par des fuseaux de pénétrogrammes beaucoup plus restreints que ceux fournis par le rouleau lisse (c.f. annexe 1).

Le sur compactage des matériaux du côté sec a permis une augmentation de la résistance mécanique (gain de 1 à  $2MPa$ ). L'effet du type de compacteur est renforcé, avec peu de changement de résistance en fond de couche au V5, alors que le VP5 l'améliore nettement, de l'ordre de  $1.5MPa$ . En revanche, du côté humide, une perte de résistance mécanique entre 0.7 et  $1,5MPa$  apparaît. Le matériau médium se place plutôt comme dans une zone de transition, avec des gains (plots 1, 5 et 6) et des pertes au sur compactage (plot 4).

En utilisant un paramètre complémentaire, il est possible de clarifier par des hypothèses les résultats présentés par les plots médiums et humides. Le pulvimixage apporte aux matériaux une granulométrie de mottes plus fine. Ce dernier, couplé à la vibration, dont l'utilité initiale est plus propre aux matériaux granulaires, permet de les réarranger dans une configuration plus dense que ce qu'elle aurait été sur le matériau brut avant compactage. Le gain en densité est donc plus important lors de celui-ci. Cette hypothèse est confirmée en partie par des résistances plus importantes sur les plots médiums pulvimixés ( $N^{\circ}5,6$ ) que sur les plots médiums bruts ( $N^{\circ}1,2$ ). Cela apporte une explication possible pour le gain de résistance du plot  $N^{\circ}8$ , qui est le

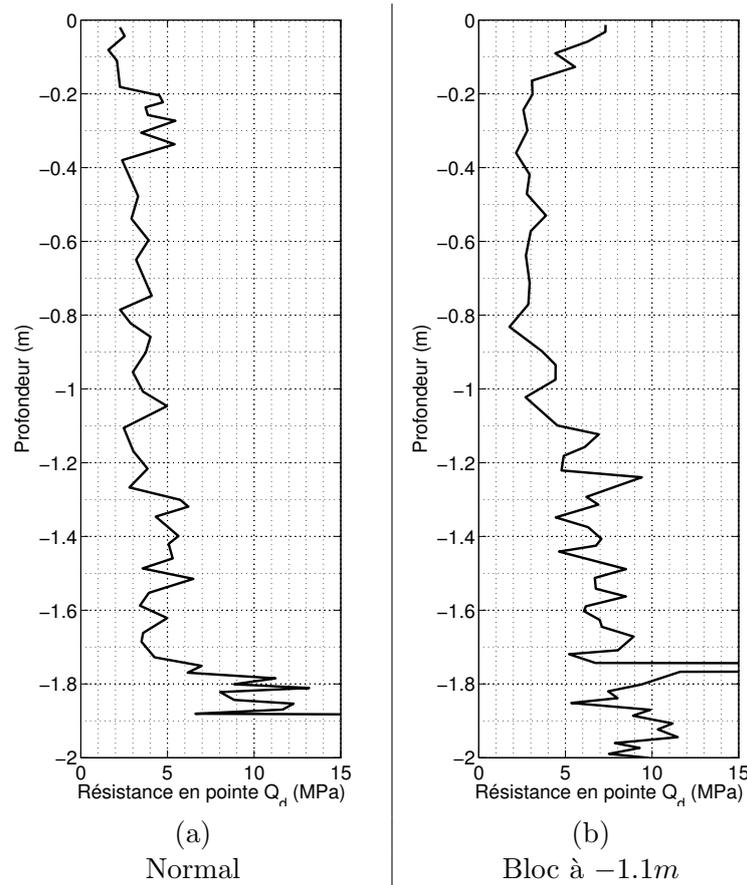


FIGURE 2.20 – Pénétragramme du dépôt 18P2 avant extraction du matériau

seul plot humide à gagner en résistance au sur compactage. L'utilisation du pulvimixeur a aussi tendance à entraîner un séchage du matériau, le rapprochant du comportement d'un matériau médium. Une très forte perte de teneur en eau (4 points) est d'ailleurs observée sur les carottes de ce plot. L'injection d'eau a aussi pu être mal menée.

Un point de départ présentant un minimum de vides avant compactage présente un volume d'air enfermé moins important, donc une meilleure densité accessible. Les matériaux humides, se trouvant dans le domaine de saturation D3, où l'air est occlus, impliquent donc un plus faible compactage pour le matériau brut. La différence entre matériaux bruts et matériaux pulvimixés se voit peu pour le rouleau dameur. En revanche, de fortes divergences apparaissent en utilisant un rouleau lisse. La combinaison pulvimixage/rouleau lisse est d'ailleurs particulièrement efficace. Il semblerait que le malaxage effectué par le rouleau VP5 reproduise en partie l'effet du pulvimixage.

Le matelassage du plot 7 peut lui aussi être imputé à l'enfermement de l'air occlus du côté humide. Il implique une forte perte de résistance. À noter qu'une perte de résistance importante a été vue sur le plot 9, là où le pied dameur est plus efficace. Le matelassage n'est peut-être pas visible en surface au pied dameur, mais apparaîtrait en fond de couche.

### 2.4.3 Étude de l'effet du compactage sur les perméabilités

Sur chantier, les perméabilités de surface des planches ont été mesurées à l'aide d'un perméamètre simple anneau. Le principe de l'essai, régi par la norme française (AFNOR 2012), vise à

foncer un tube métallique fermé en tête par une plaque, de manière à ce que sa liaison avec les sols soit bien étanche. Avant le fonçage du perméamètre, la surface du plot a été raclée à la pelle mécanique de façon à obtenir une surface plane, et éviter les biais de mesure liés à la différence de finition entre compacteurs. De manière à mesurer une perméabilité à charge variable, la plaque de tête est équipée d'un évent permettant de soustraire l'air du système, et d'une entrée pour l'eau, reliée à une burette graduée. Une nuit est laissée au perméamètre pour saturer le plus possible de sol et pouvoir alors faire la mesure. Pour limiter le gonflement que le sol pourrait subir dans le perméamètre, du gravier grossier est déposé pour charger le sol, sur un papier-filtre.



FIGURE 2.21 – Matériel de mesure de perméabilité

Les mesures effectuées sur chantier sont présentées dans la table 2.9. Seuls les plots normalement compactés ont été mesurés. Les trois plots humides n'ont pu être caractérisés faute de temps.

<i>Mouture</i>	<i>Valeurs en <math>m \cdot s^{-1}</math></i>			<i>N°</i>	<i>Chantier</i> $k_w$
	<i>Humi.</i>	<i>Comp.</i>			
Brut	m	VP5		1	$7.1 \cdot 10^{-10}$
Brut	m	V5		2	$470.0 \cdot 10^{-10}$
Brut	s	VP5		3	$35.0 \cdot 10^{-10}$
Brut	s	V5		4	$41.0 \cdot 10^{-10}$
Pulvi.	m	VP5		5	$8.0 \cdot 10^{-10}$
Pulvi.	m	V5		6	$10.0 \cdot 10^{-10}$

TABLE 2.9 – Perméabilités mesurées sur planche de compactage

L'effet de la teneur en eau peut être observé en regardant le compactage au VP5. Le matériau plus sec s'est moins déformé, et a laissé des macropores potentiellement plus importants et favorisant la perméabilité du matériau, qui s'est vue multipliée par cinq ( $7.1 \cdot 10^{-10} m \cdot s^{-1} \rightarrow 35.0 \cdot 10^{-10} m \cdot s^{-1}$ ).

Les conclusions précédentes mènent à dire que le pied dameur possède la capacité de remanier le matériau, sans la nécessité d'intervention du pulvimixeur. La perméabilité au pied dameur est quasiment la même, quelle que soit la mouture (brut à  $7.1 \cdot 10^{-10} m \cdot s^{-1}$  et pulvimixé à  $8.0 \cdot 10^{-10} m \cdot s^{-1}$ ). Les plots compactés au V5 avec matériau pulvimixé présentent une perméabilité analogue ( $10.0 \cdot 10^{-10} m \cdot s^{-1}$ ), renforçant les observations faites au PANDA sur l'efficacité du couple Pulvimixeur/rouleau lisse V5. La perméabilité du plot 2 ( $470.0 \cdot 10^{-10} m \cdot s^{-1}$ ) semble présenter une anomalie. La valeur enregistrée peut potentiellement être attribuée à la fissuration que le plot a présentée.

Les matériaux compactés au pied dameur (les autres paramètres restent constants) présentent des perméabilités plus fortes que ceux compactés au rouleau lisse. Le rouleau lisse montre une

tendance à mieux fermer le sol en surface.

Globalement, les perméabilités se corrént relativement bien aux résistances en pointes. Là où sont observées les résistances les plus faibles, seront observées les perméabilités les plus faibles.

#### 2.4.4 Étude de l'effet du compactage sur les densités

L'objectif majeur du compactage est la densification du matériau. La résistance mécanique d'un matériau étant directement corrélée à sa densité, le compactage permet un gain de résistance par la densification. Dans le cas de la planche de compactage, le matériau part d'une mouture grossière, dont l'agencement ressemble à un milieu granulaire (de taille plus ou moins importante selon la mouture), pour finir en un matériau compacté quasiment continu. Le compactage apporte donc une densification visible à l'œil.

Pour obtenir des mesures de densité, deux méthodes sont utilisées. La première est le gammadensimètre. Il permet d'obtenir une mesure quasi directe de la densité sur chantier. La mesure consiste à introduire, dans un trou vertical préalablement foré, une source radioactive ( $^{137}\text{Cs}$ ) émettrice de photons  $\gamma$  et un détecteur en surface du sol. Le comptage des photons  $\gamma$  transmis à travers le sol par le détecteur permet d'obtenir la masse volumique du sol. Le principe de la mesure est présenté en figure 2.22. Pour chaque point de mesure, trois valeurs sont relevées en effectuant à chaque fois une rotation de  $120^\circ$  de l'appareil. De plus, deux profondeurs de mesures sont utilisées :  $15\text{cm}$  et  $25\text{cm}$ . La nécessité d'une surface plane (besoin d'effacer les empreintes pour le pied dameur) et le peu de temps pour la réalisation de la planche ont poussé à limiter le nombre de mesures. Ces dernières nécessitent une correction (faite ici) par rapport à la teneur en eau réelle du matériau. En conséquence, des tarières pour mesurer les teneur en eau sont réalisées à chaque point de mesure. Chaque plot contrôlé a subi 4 mesures (2 sur compactage normal et 2 sur compactage forcé). La deuxième méthode de mesure adoptée est la pesée hydrostatique sur des prélèvements venant des carottes. La table 2.10 et la figure 2.23 (p. 58) présentent les valeurs de densité mesurées au gammadensimètre et sur les carottes de la planche.

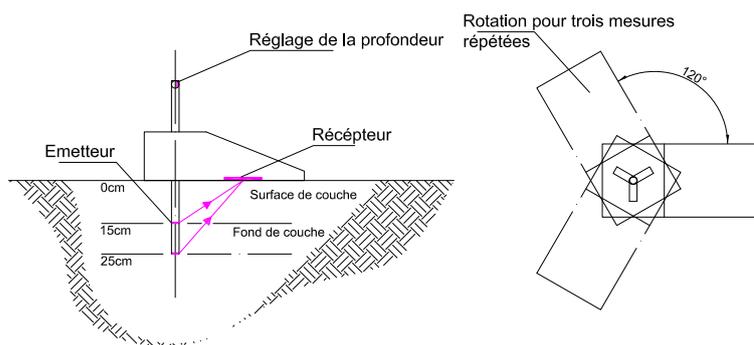


FIGURE 2.22 – Principe de la mesure au gammadensimètre

La première observation montre un écart flagrant, mais anticipé par les praticiens, des valeurs mesurées sur les carottes et celles du gammadensimètre, car ce dernier sous-estime fortement les valeurs de densité mesurées, alors que le carottage tend à les surestimer par compression au fongage. La sous-estimation par rayonnement vient du fait que la surface du récepteur n'est pas en bon contact avec les sols. La surface du compactage n'étant pas forcément lisse, si un

espace existe entre le sol et le récepteur, la mesure de densité peut être fortement sous-estimée (LUBKING et al. 1980). Pour parer aux faiblesses du gammadensimètre, un double gammadensimètre a été créé (STENGEL et al. 1986). Celui-ci présente l'avantage d'effectuer une mesure de manière transversale à l'aide de tiges descendues dans un forage, et évite l'erreur générée par la mesure diagonale du gammadensimètre simple. Il ne s'est pourtant pas démocratisé et est très peu sollicité sur chantier car il demande une foreuse (problème de coût et temps d'intervention) et nécessite une source radioactive plus forte (problème de stockage).

Les teneurs en eau médiums présentent des densités plus importantes que les deux autres teneurs en eau. Le matériau sec perd globalement ( $-0.03g \cdot cm^{-3}$ ). Le matériau humide présente en général des valeurs de densité encore plus faibles que le matériau sec ( $-0.03g \cdot cm^{-3}$ ), mais avec une relative homogénéité sur l'épaisseur de couche, également observée pour le pénétrogramme.

Il est difficile de tirer des conclusions quant à l'effet du pulvimixage. Les mottes présentent une résistance avant compactage proche des planches finales. De même, leur densité initiale est proche de celle finale, ce qui occulte l'effet du compactage sur les densités vis-à-vis de la mouture. Celui-ci n'a donc servi qu'à déformer les mottes de sol pour remplir les espaces entre ces dernières.

En comparant les deux compacteurs, une différence flagrante apparaît : le VP5 donne des densités de surface de compactage plus faibles, surtout sur matériaux médium et sec ( $-0.04g \cdot cm^{-3}$  à  $-0.10g \cdot cm^{-3}$ ), rappelant les résultats de LOUDIEU (1980). En revanche, les densités observées en fond de couche compactée au pied dameur sont meilleures que celles du rouleau lisse ( $+0.04g \cdot cm^{-3}$ ), excepté pour le croisement pulvimixage/rouleau lisse. Celui-ci donne à l'opposé des surfaces très compactes, mais des fonds de couche moins performants. Sur matériau humide, en revanche, le compactage semble plus homogène, quel que soit le compacteur choisi.

Pour synthétiser, le sur compactage se manifeste du point de vue de la densité de deux manières : soit une baisse, soit, à l'inverse, un gain de densité. La baisse est souvent attribuée à l'effet de la vibration et aux surpressions d'eau, qui, une fois un optimum de compactage obtenu, peut tendre à désorganiser les matériaux et à les faire perdre en compacité ( $-0.03g \cdot cm^{-3}$  à  $-0.10g \cdot cm^{-3}$ ). Du côté sec, la densité maximale a déjà été atteinte au compactage normal, les passes supplémentaires ne tendent que très légèrement à la faire baisser ( $-0.01g \cdot cm^{-3}$ ). Le matériau médium montre un comportement double, avec d'un côté un gain en surface, mais une perte de densité en fond de couche. Pour finir, alors que du côté humide, la tendance serait plutôt à la perte de densité par l'intermédiaire du sur compactage, le plot N°8 présente un résultat divergent. Les densités de ce plot valident les observations au pénétrogramme, par l'augmentation des densités menant à une augmentation de résistance en pointe. Les hétérogénéités de teneur en eau du plot (entre 21 à 28% mesuré sur carottes) peuvent expliquer son comportement à l'opposé des autres plots humides.

#### 2.4.5 Étude de l'effet du compactage sur la répartition de la porosité

Comme présenté au chapitre 1.1, la succion est liée à l'agencement granulaire, mais plus exactement à la forme de l'espace inter poral. La porométrie est la mesure de cet espace. Elle a pour but de déterminer les volumes représentatifs de chaque taille de pore rapportés à un volume de sol.

#### Description de la porométrie mercure

Mouture	Humidité	compacteur	N°	niveau	Carottes		Gammadensimètre	
					normal	forcé	normal	forcé
Brut	médium	VP5	1	Haut	1.69	1.74	-	-
				Bas	1.75	1.71	-	-
Brut	médium	V5	2	Haut	1.79	1.78	1.67	1.69
				Bas	1.78	1.71	1.66	1.68
Brut	sec	VP5	3	Haut	1.72	1.72	-	-
				Bas	1.76	1.74	-	-
Brut	sec	V5	4	Haut	1.76	1.74	1.66	1.69
				Bas	1.77	1.74	1.64	1.69
Pulvimixé	médium	VP5	5	Haut	1.73	1.78	-	-
				Bas	1.70	1.74	-	-
Pulvimixé	médium	V5	6	Haut	1.76	1.78	1.67	1.68
				Bas	1.76	1.73	1.66	1.66
Pulvimixé	humide	V5	7	Haut	1.70	1.67	-	-
				Bas	1.70	1.70	-	-
Pulvimixé	humide	VP5	8	Haut	1.58	1.67	-	-
				Bas	1.60	1.67	-	-
Brut	humide	VP5	9	Haut	1.71	1.61	-	-
				Bas	1.73	1.73	-	-

(g/cm<sup>3</sup>) (g/cm<sup>3</sup>) (g/cm<sup>3</sup>) (g/cm<sup>3</sup>)

TABLE 2.10 – Comparaison des valeurs de densités

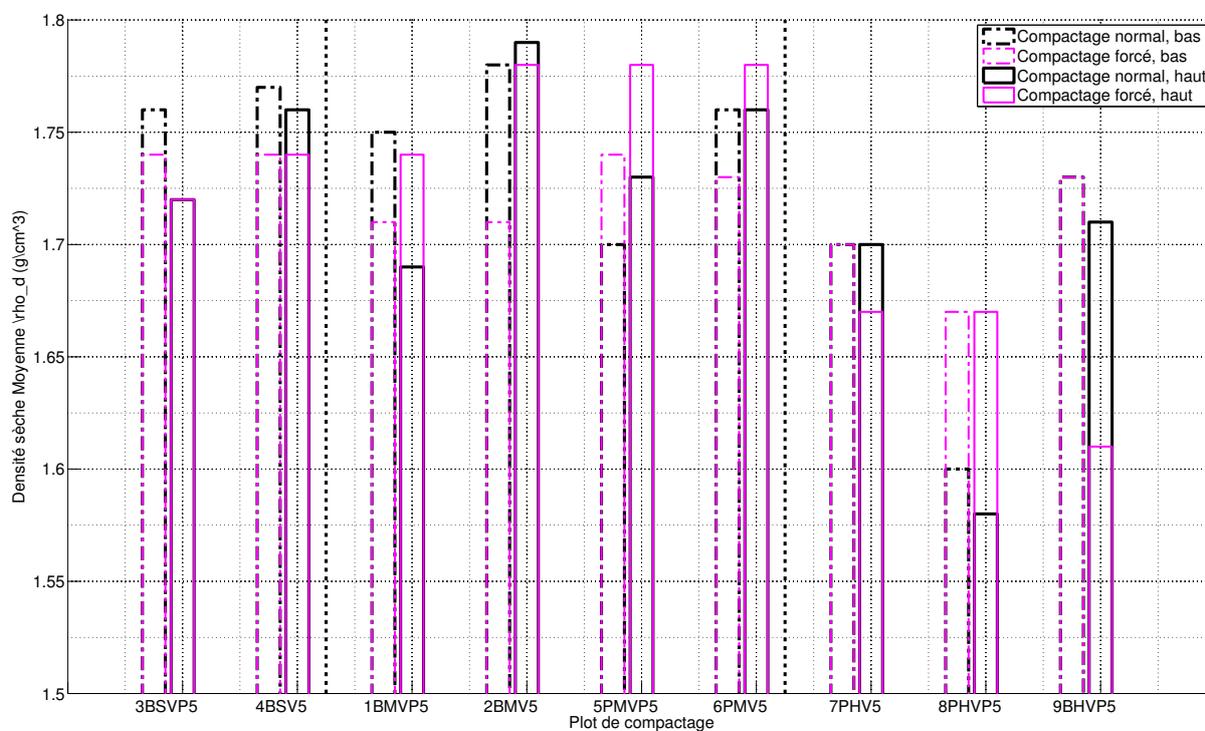


FIGURE 2.23 – Valeurs moyennes des densités sèches mesurées sur carottes

Un échantillon du matériau poreux à étudier est placé dans un fluide non mouillant, généralement du mercure. Le fluide est alors soumis à des incréments de pression. Pour chaque incrément, le volume injecté est mesuré. Or, à une pression donnée, le mercure ne peut entrer que dans une taille de pore donnée. La taille en question est inversement proportionnelle à la pression par la loi de Laplace (Eq. 1.1). Grâce à cette méthode, et en émettant une hypothèse quant à la forme des pores (tubulaires), il est possible d'obtenir une idée de la répartition de leur taille comme présentée en figure 2.24.

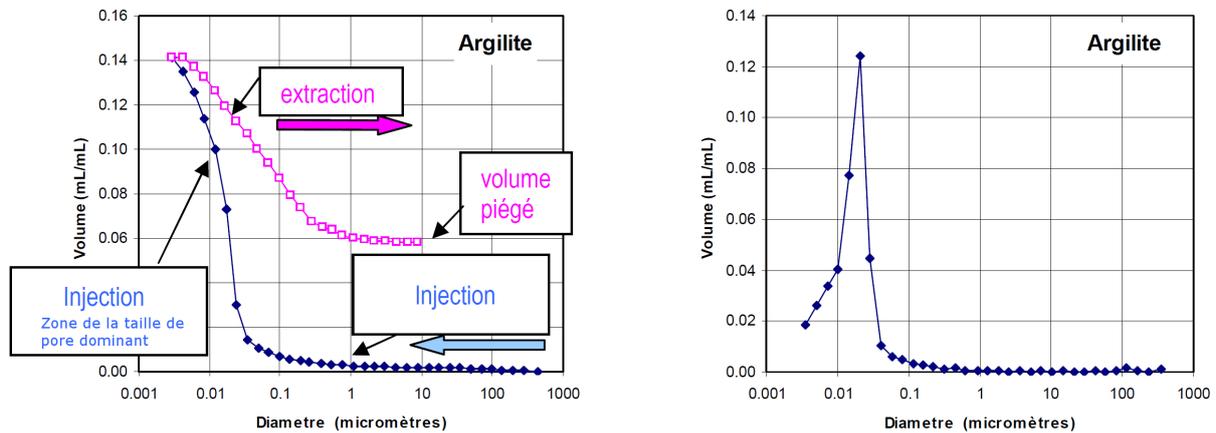


FIGURE 2.24 – Exemple de résultat de porométrie mercure (DAÏAN 2007) pour une argilite

La méthode présente néanmoins certains problèmes et biais que l'on doit connaître. Les matériaux de type sol doivent être préparés avec soin et l'injection doit être très progressive, de manière à éviter l'éclatement de l'échantillon (ou la destruction de son espace poral) due à l'injection de mercure. De plus, l'échantillon doit être sec avant l'essai, menant à un retrait. Le retrait par séchage implique une diminution de l'espace poral : l'échantillon n'est plus totalement représentatif de son état initial. Un autre biais provient des porosités cachées. Il peut s'agir de pores ne voyant les conditions extérieures qu'au travers de pores de plus petites tailles. Ces pores seront lors de l'essai considérés comme des pores de taille inférieure à ce qu'ils sont réellement. Pour connaître l'étendue du phénomène, il est d'usage de procéder à une extraction du mercure par pression décroissante. Le mercure restera enfermé dans ces pores à l'extraction. Le volume des pores cachés peut être estimé en comparant les courbes d'intrusion et d'extraction, .

### Mesures de porosité sur les carottes de la planche

Les mesures de porosité au mercure sont exécutées par le LOMC (Laboratoire Ondes et Milieux complexes, Le Havre) ANDRIANATREHINA 2016. Seules les injections ont été exécutées, le matériel en place ne permettant pas de mesurer l'extraction. L'ensemble des résultats sont présentés en annexe 1.

Deux phénomènes peuvent être mis en évidence par l'intermédiaire des porométries mercure : le premier est la variation du volume total de porosité dans le matériau ; le second est le déplacement de la taille de porosité dominante au sein du matériau compacté.

La valeur totale de l'intrusion nous donne une information sur la variation totale de volume. Toutes deux sont présentées en table 2.11. Globalement, il y a une faible variation de porosité

<i>Valeurs en <math>mlg^{-1}</math> de sol</i>				<i>Compactage Normal</i>	<i>Compactage forcé</i>
<i>Mouture</i>	<i>Humi.</i>	<i>Comp.</i>	<i>N°</i>	<i>Porosité</i>	<i>Porosité</i>
Brut	m	VP5	1	0.144	0.152
Brut	m	V5	2	0.136	0.137
Brut	s	VP5	3	0.133	0.137
Brut	s	V5	4	0.120	0.144
Pulvi.	m	VP5	5	0.139	0.133
Pulvi.	m	V5	6	0.133	0.134
Pulvi.	h	V5	7	0.131	0.149
Pulvi.	h	VP5	8	0.143	0.166
Brut	h	VP5	9	0.162	0.152

TABLE 2.11 – Porosités mesurées par porométrie mercure sur carottes de la planche

sur les carottes de sol médium et sec, avec une légère perte de porosité observée pour les plots 1 (médium, brut, VP5) et 4 (sec, brut, V5). Des pertes plus franches sont en revanche observables pour les plots humides, mis à part le plot 9 (brut, VP5). L'observation des densités corrobore ces observations.

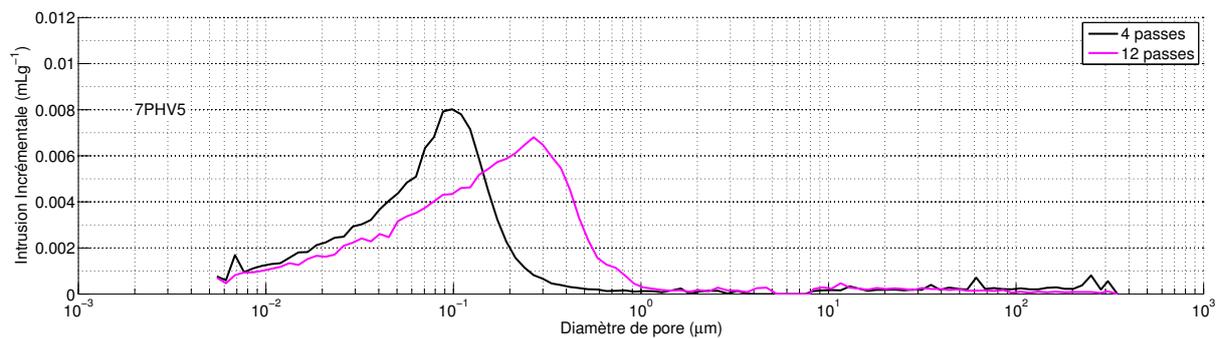


FIGURE 2.25 – Répartition volumique des tailles de pores pour le plot 7 (pulvimixé, humide, V5)

Usuellement, l'augmentation de l'énergie de compactage mène à une diminution de la taille des pores dominants (RICHARD et al. 2001; BRUAND et COUSIN 1995). Ici, en observant les répartitions des porosités, d'autres informations sont accessibles. En regardant le plot numéro 7, où le matelassage est apparu, il y a un déplacement clair de la valeur principale de taille de pores dominants vers une valeur plus forte par l'effet du compactage. La figure 2.25 montre clairement un décalage de la porosité par l'effet du sur compactage d'une valeur de  $0.1\mu m$  vers une valeur de  $0.3\mu m$ .

Les matériaux médiums pulvimixés présentent une très faible variation du volume de vide. Un léger déplacement de la taille de porosité dominante peut être observé au sur compactage. Les matériaux médiums bruts ne présentent pas de décalage probant de la porosité au sur compactage. Ce dernier entraîne une augmentation du volume de porosité pour les plots 7, 8 et 9, dans le cadre des matériaux humides, avec une forte augmentation de la taille des pores dominants pour le plot 7, mais aucune pour les autres.

### 2.4.6 Étude de l'effet du compactage sur la succion

La succion des plots de compactage a été estimée à partir des carottes à l'aide de la méthode du papier filtre. Des tranches ont été effectuées dans des carottes, et des papiers filtres ont été placés entre elles. Les pesées étaient effectuées après au moins une semaine d'homogénéisation. Les résultats des mesures sont présentés dans le tableau 2.12 et sur la figure 2.26 (p. 62).

Un premier résultat est que les plots compactés au pied dameur présentent des succions plus faibles que les plots compactés dans les mêmes conditions au rouleau lisse. Cette information apporte un élément expliquant le fait que les résistances du pénétrogramme pour le pied dameur sont en général plus faibles que les résistances observées pour le rouleau lisse.

Il apparaît que le pulvimixage a peu d'effet sur les valeurs de succion après compactage. De la même manière que pour les autres paramètres, le plot N°8 présente une anomalie, avec des succions très faibles au premier compactage et des succions plus importantes après un sur compactage, probablement dû à l'hétérogénéité du plot.

Du point de vue du sur compactage, le compactage au pied dameur, aussi bien sur matériau sec que médium, tend à garder une succion constante, alors que l'utilisation du rouleau lisse présente une diminution relativement importante de succion pour ces humidités. Le matériau humide présente globalement une forte perte de succion lors du sur compactage. Le plot N°9 sur compacté présente une forte succion sur le fond de couche, probablement due à l'hétérogénéité de ce plot, qui a été humidifié sans pulvimixage.

<i>mouture</i>	<i>Humidité</i>	<i>compacteur</i>	<i>N°</i>	<i>niveau</i>	<i>normal</i>	<i>forcé</i>	$\frac{\sqrt{\text{round}(\text{normal})}}{\sqrt{\text{round}(\text{force})}}$
Brut	médium	VP5	1	Haut	456	533	1
				Bas	424	724	1
Brut	médium	V5	2	Haut	2072	618	2
				Bas	2143	584	2
Brut	sec	VP5	3	Haut	969	1041	1
				Bas	1410	630	2
Brut	sec	V5	4	Haut	1558	624	2
				Bas	1464	721	1
Pulvimixé	médium	VP5	5	Haut	922	1112	1
				Bas	933	1372	1
Pulvimixé	médium	V5	6	Haut	1474	308	2
				Bas	1813	520	2
Pulvimixé	humide	V5	7	Haut	877	100	3
				Bas	796	202	2
Pulvimixé	humide	VP5	8	Haut	71	637	0
				Bas	84	409	1
Brut	humide	VP5	9	Haut	579	180	2
				Bas	679	1561	1

(*kPa*)    (*kPa*)

TABLE 2.12 – Comparaison des valeurs de succion pour la variation du paramètre "sur compactage"

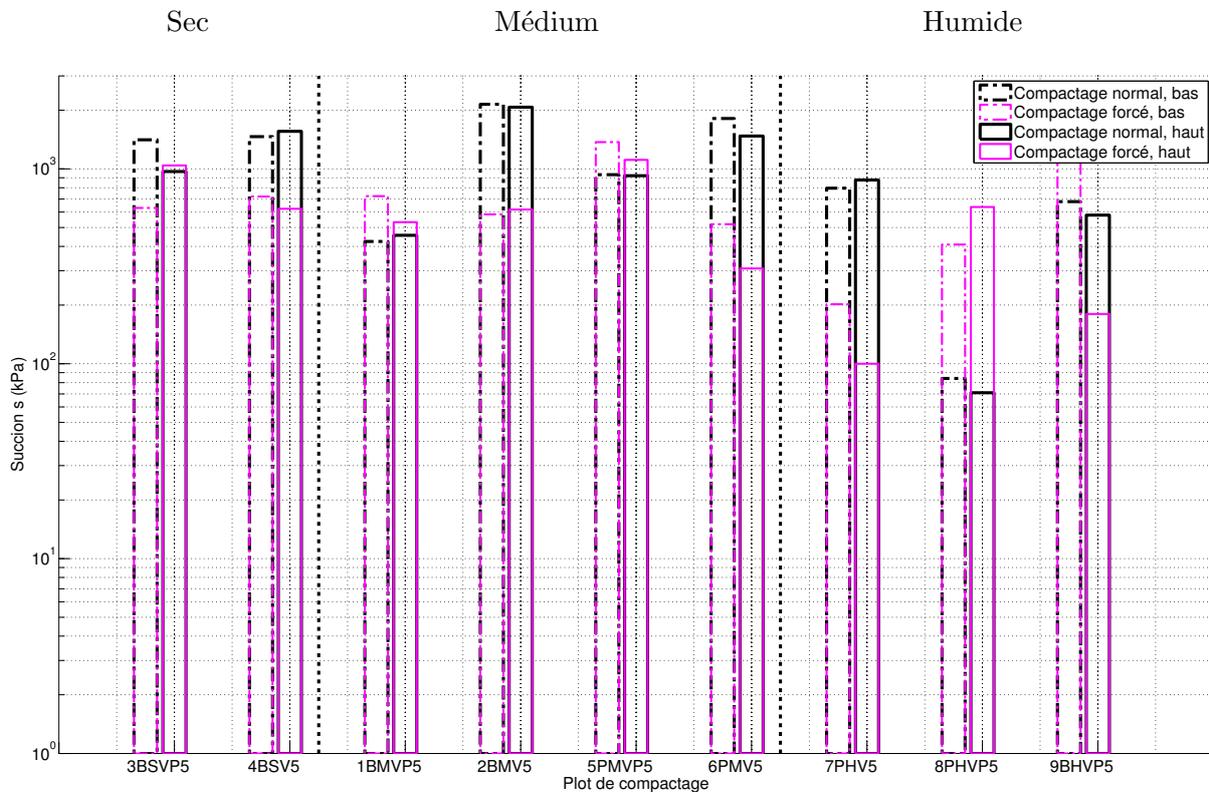


FIGURE 2.26 – Valeurs moyennes de succion par plot

### 2.4.7 Croisement des résultats initiaux dans les domaines de rétention

De manière à avoir une idée générale du comportement de la planche, plus particulièrement à la vue des hétérogénéités présentées dans les paragraphes précédents, tous les résultats ont été réinterprétés à l'aide d'une analyse des domaines de rétention. D'ordinaire, ces domaines sont utilisés à l'observation des phénomènes de séchage et d'humidification. Les graphes suivants sont donc à interpréter d'une manière différente que d'usage.

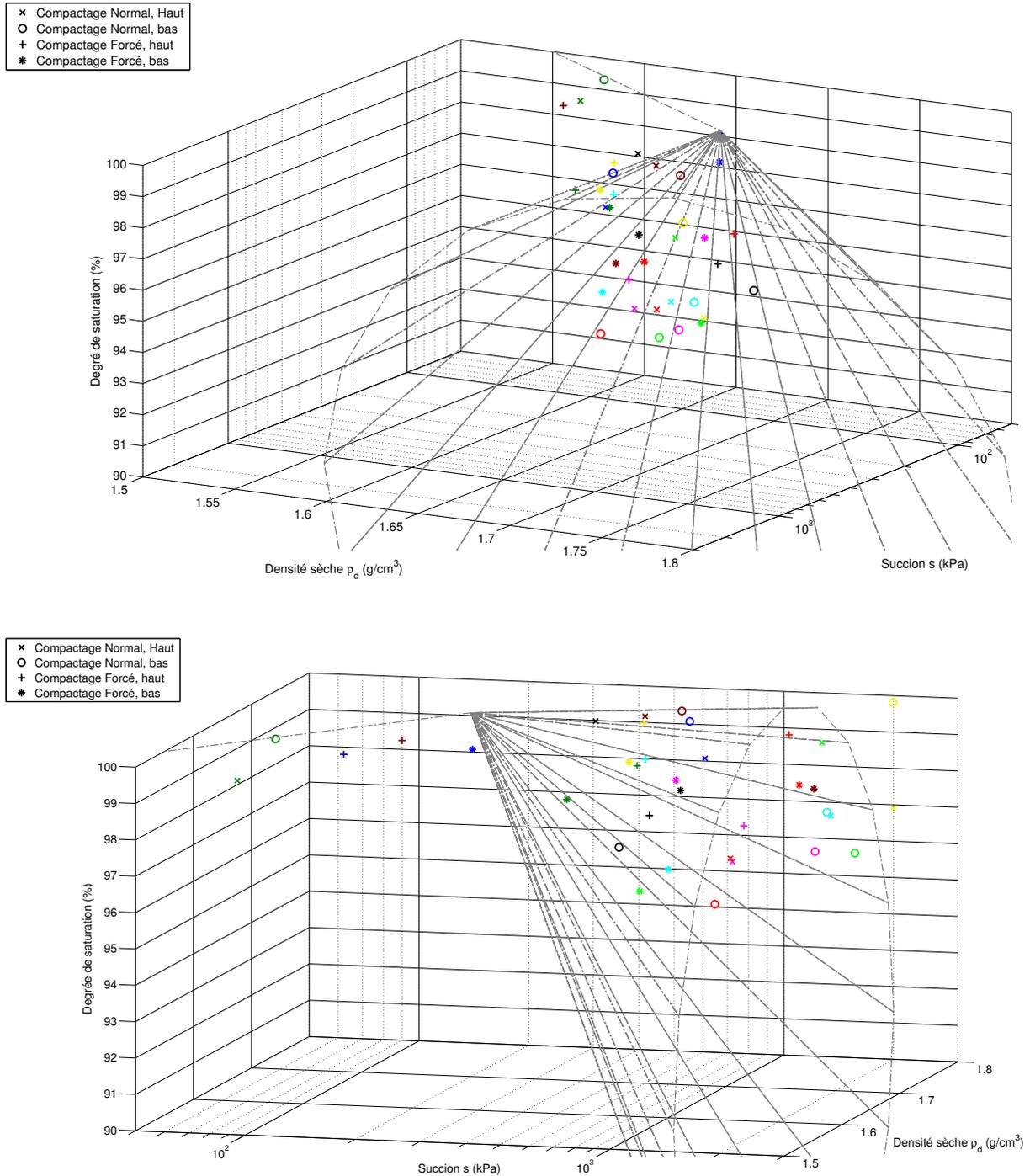
Les données sont d'abord exploitées de manière tridimensionnelle de façon à fournir une approche globale à leur croisement. La figure 2.27 présente tous les résultats précédents dans le domaine densité-succion-saturation.

Il est difficile de faire la part des choses de manière évidente, notamment en raison de la disparité des densités, expliquée par le mode de prélèvement. Tous les plots montrent une saturation forte (supérieure à 90%). Les plots humides (7 à 9) présentent tout de même les plus fortes saturations (proches de 100%). Des saturations aussi importantes sont certainement dues au carottier, ayant entraîné une surdensification du sol. Le premier point clé de l'analyse se trouve à une succion de  $200kPa$ . Les plots humides s'alignent relativement bien sur une droite proche de la saturation partant d'une densité de  $1.55g/cm^{-3}$  vers une densité de  $1.70g/cm^{-3}$ . Passé  $200kPa$ , il y a un éclatement clair des points ne permettant pas de fournir de corrélation. Ceux-ci restent néanmoins enfermés dans un cône.

En représentant tous ces points dans un graphique de rétention (Fig. 2.28), il devient possible de compléter la réflexion. La dispersion des points après une succion de  $200kPa$  est clairement visible dans le domaine succion/saturation. Le domaine teneur en eau/indice des vides confirme la saturation par la proximité des points humides avec la ligne de compacité maximum. La disparité des teneurs en eau apparaît aussi, mais reste relativement bien corrélée aux succions. Ces dernières semblent s'accorder de manière linéaire.

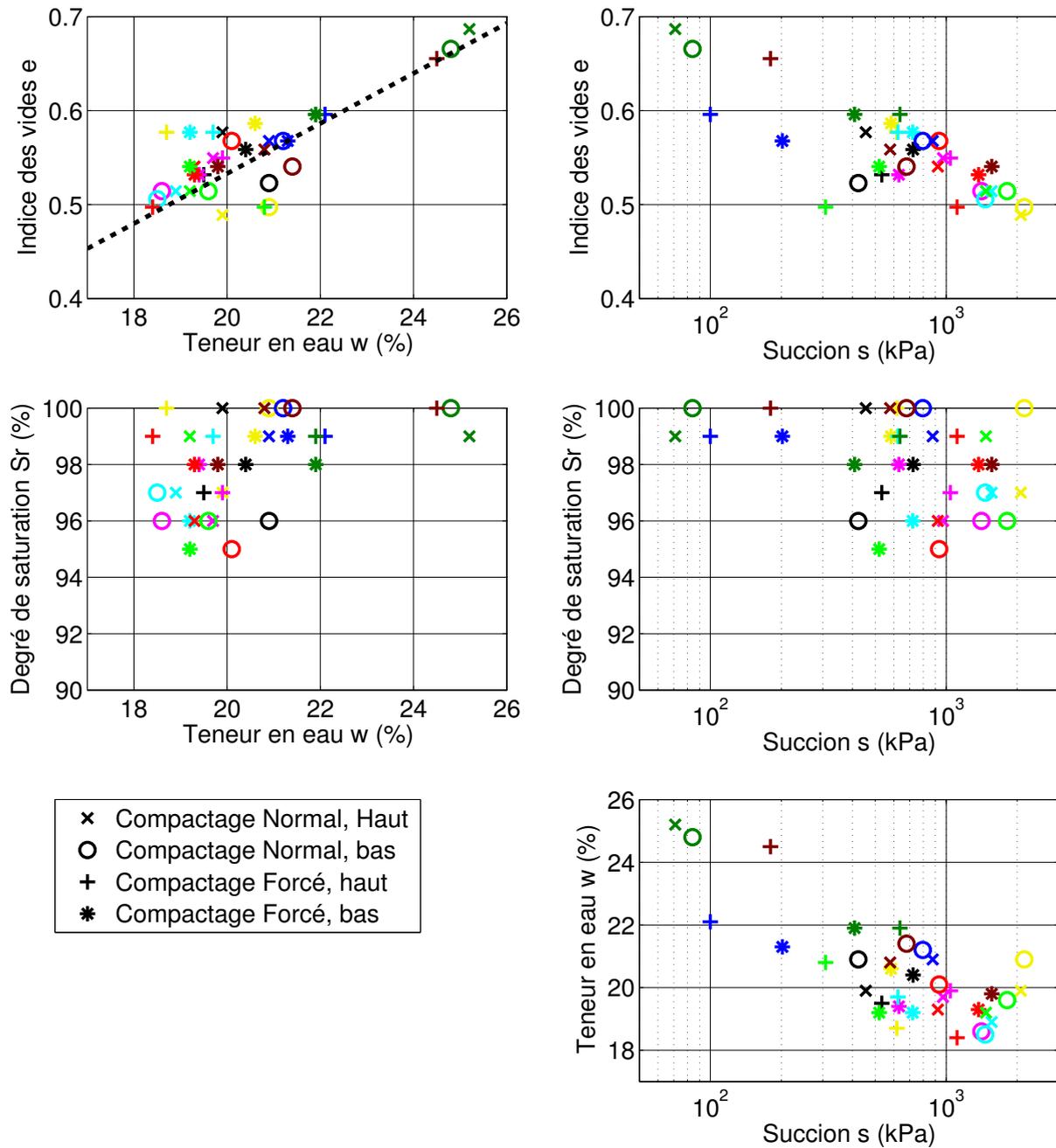
Les écarts entre fond et surface de compactage sont en général plus importants pour les points au V5. Les points au VP5 sont en général mieux groupés, surtout en densité. Les écarts de teneur en eau ne sont pas très importants au regard des plots s et m. En revanche, les plots h présentent des disparités importantes de teneur en eau. Le pulvimixage efface une partie des hétérogénéités de teneur en eau, mais se montre moins efficace sur les plots humides, plus particulièrement le plot 8.

Tous ces résultats, issus du compactage, mènent à la réflexion de leur positionnement. L'ensemble des points est compris entre deux surfaces de rétention limites, dont l'une présenterait une entrée d'air minimum aux alentours de  $200kPa$ . Une infinité de surfaces pourrait alors être dessinée entre ces deux limites, chacune d'entre elles présentant une entrée d'air différente et dépendante de son degré de densification. Ce phénomène apparaîtrait aussi bien dans le domaine  $Sr(w)$  que  $Sr(s)$



Plot 1	Brut	médium	VP5
Plot 2	Brut	médium	V5
Plot 3	Brut	sec	VP5
Plot 4	Brut	sec	V5
Plot 5	Pulvimixé	médium	VP5
Plot 6	Pulvimixé	médium	V5
Plot 7	Pulvimixé	humide	V5
Plot 8	Pulvimixé	humide	VP5
Plot 9	Brut	humide	VP5

FIGURE 2.27 – Domaine suction, densité, saturation (deux angles différents)



Rappel des paramètres plots

Plot 1	Brut	medium	VP5
Plot 2	Brut	médium	V5
Plot 3	Brut	sec	VP5
Plot 4	Brut	sec	V5
Plot 5	Pulvimixé	médium	VP5
Plot 6	Pulvimixé	médium	V5
Plot 7	Pulvimixé	humide	V5
Plot 8	Pulvimixé	humide	VP5
Plot 9	Brut	humide	VP5

FIGURE 2.28 – Corrélation entre les différentes variables d'état par plot de compactage

## 2.5 Conclusions et hypothèses de travail

Les résultats de la planche, malgré une hétérogénéité flagrante liée aux conditions de réalisation sur chantier, fournissent des tendances vis-à-vis de deux domaines. D'une part, les résultats apportent des informations quant aux pratiques du compactage sur chantier. Ils donnent d'autre part des éléments sur la théorie des sols non saturés et leur comportement au compactage.

Du point de vue des praticiens, tournés vers la réalisation des ouvrages, plusieurs éléments de la pratique du compactage émergent. Dans un objectif d'homogénéité, cas souvent recherché pour les barrages, le rouleau pied dameur fournira un compactage homogène, quelle que soit la mouture du matériau. Des résultats encore plus probants peuvent être obtenus avec un rouleau lisse, à condition de lui fournir un matériau pulvimixé. Un des éléments-clés de la planche est l'étude de l'effet du sur-compactage. Ce dernier fournit de bonnes résistances dans le cadre du compactage de matériaux secs, rappelant fortement les pratiques espagnoles. En revanche, en passant sur matériaux humides, le sur-compactage aura pour effet de réduire les résistances mesurées, principalement dues à des densités et succions diminuées.

Pour compléter la problématique de la pratique, un certain nombre d'éléments sont à prendre en compte. D'une part, l'utilisation du pulvimixeur tend à sécher les matériaux, rendant les matériaux médiums plus aptes au sur-compactage. De même, la maîtrise de la teneur en eau par l'injection, souvent reconnue et proposée par le GTR, ne fournit des résultats concluants que dans le cadre de l'utilisation d'un pulvimixeur. Malgré cela, des disparités subsistent, mais bien moindres que sans son utilisation. D'autre part, il est à noter que la relation prescripteur/chantier est gênée par la problématique des épaisseurs de couches, et surtout de leur contrôle sur chantier. L'utilisation de bulldozers équipés de GPS permettrait un meilleur contrôle des épaisseurs de couches, et finalement des énergies appliquées aux matériaux par volume de sol, et donc un meilleur contrôle du résultat du compactage. Ce genre d'engin devrait au moins être généralisé pour la réalisation de planches d'essais.

Du point de vue du comportement hydromécanique, certaines tendances peuvent être extraites. Quelle que soit la teneur en eau du matériau, le compactage a tendance à diminuer l'indice des vides, même si certains changements de porosité peuvent apparaître. En conséquence, le matériau sur-compacté présente des performances mécaniques importantes. Pour autant, des pertes de résistance au sur-compactage sont observées. Elles sont généralement dues à la diminution des valeurs de succion lors du compactage. Il apparaît alors une compétition entre l'incrément de densité et la diminution de la succion, qui définiront alors la résistance mécanique finale du matériau.

En raison de l'hétérogénéité des plots, il est difficile d'observer en détails les évolutions des succions, des teneurs en eau et des densités. Ces résultats conduisent à une étude plus approfondie des phénomènes en jeu, par l'intermédiaire d'une série d'essais de laboratoire. Ces essais permettront de fournir des éléments complémentaires quant à la réponse physique du sol après différents degrés de compactage.

---

# Étude Proctor de l'effet du compactage sur les matériaux fins

---

*Compactage en laboratoire, rétention et portance*

## Sommaire

---

3.1	Recherche de l'optimum de compactage . . . . .	68
3.2	Étude de l'évolution des composantes hydromécaniques au compactage . . . . .	71
3.3	Analyse du comportement hydromécanique du matériau . . . . .	76
3.4	Réponse mécanique par essais de portance . . . . .	87
3.5	Conclusions et comportements observés . . . . .	94

---

Le chapitre précédent a permis d'établir les grandes lignes de la problématique de l'effet du compactage sur la résistance mécanique du sol. La compétition entre la densité sèche croissante et la succion évoluant au cours du compactage influence la résistance finale du matériau. Ces hypothèses doivent maintenant être mises en évidence de manière plus approfondie par des séries de compactages de laboratoire, plus évidents à contrôler que les essais in situ. Ce chapitre s'articulera autour de trois parties : tout d'abord, l'étude du comportement du sol au compactage à travers l'essai Proctor du matériau, couplée avec des mesures de succion, et complétée par des remarques sur le traitement des matériaux avant essai ; seront ensuite présentées des courbes de rétention déterminées dans le domaine quasi saturé du matériau, dont l'objectif est de pouvoir mieux encadrer les résultats observés sur la planche. Pour finir, les résultats des indices portants exécutés sur le matériau compacté seront étudiés et mis en parallèle avec les mesures pénétrométriques sur planche de compactage.

### 3.1 Recherche de l'optimum de compactage

#### 3.1.1 L'essai Proctor

Pour pouvoir fixer des objectifs de compactage in situ, il faut d'abord déterminer la réponse du matériau à cette sollicitation. L'essai Proctor est le plus répandu dans ce domaine. Il consiste en un compactage dynamique du sol, par couches, dans un moule cylindrique. La taille, la masse et la hauteur de chute de la dame de compactage sont normalisées (AFNOR 1999). Deux moules peuvent être utilisés, le moule Proctor et le moule CBR, comme présentés en figure 3.1. L'essai permet de prendre en compte plusieurs niveaux de compactage, dont deux sont normalisés : le Proctor normal, principalement utilisé en France, et le Proctor modifié, présentant 456% de l'énergie normale, présenté en table 3.1. L'intérêt d'avoir plusieurs énergies permet de cadrer le compactage in situ et les variations possibles sur chantier (compactage faible à intense).

L'essai est répété à différentes teneurs en eau. Les résultats sont alors présentés sous la forme d'un graphique teneur en eau/densité sèche. Les points peuvent subir une régression polynomiale de degré 2 (Fig. 3.2), même si les praticiens préfèrent un tracé manuel de la courbe Proctor. Ils indiquent que la densité sèche du côté très sec de l'optimum Proctor peut tendre vers une constante, voire remonter légèrement. La courbe fournit une densité optimale  $\rho_{doptn}$  pour un Proctor normal, ou  $\rho_{doptm}$  pour un Proctor modifié, ainsi qu'une teneur en eau optimale, respectivement  $w_{optn}$  ou  $w_{optm}$ . Les courbes de saturation peuvent être ajoutées pour obtenir une référence complémentaire. Elles sont établies à partir de la densité des grains  $\rho_s$ . Dans le chapitre 1.1, une classification des domaines de saturation a été proposée. Cette dernière est ici représentée par rapport au domaine Proctor (BOUTONNIER 2007) et montre que le compactage des sols in situ se trouve dans des domaines proches de la saturation, surtout du côté humide de l'optimum. Le découpage de domaines de saturation basé sur l'optimum Proctor est retrouvé dans des publications antérieures. LAMBE (1958) cité par CAMP DEVERNAY (2008) considérait déjà deux domaines de comportement du côté sec et du côté humide de l'optimum. Le côté sec présente un état du sol dit « floculé », dû à l'historique des grains de la mouture, qui est toujours visible après compactage. Le côté humide est, quant à lui, appelé « état dispersé ». Cette définition est plus ou moins reprise par CETIN et al. (2007), mais à une échelle plus fine. Les feuillets d'argile sont disposés et orientés de manière aléatoire du côté sec de l'optimum, sans orientation préférentielle. En approchant l'optimum par le côté sec (variation de teneur en eau

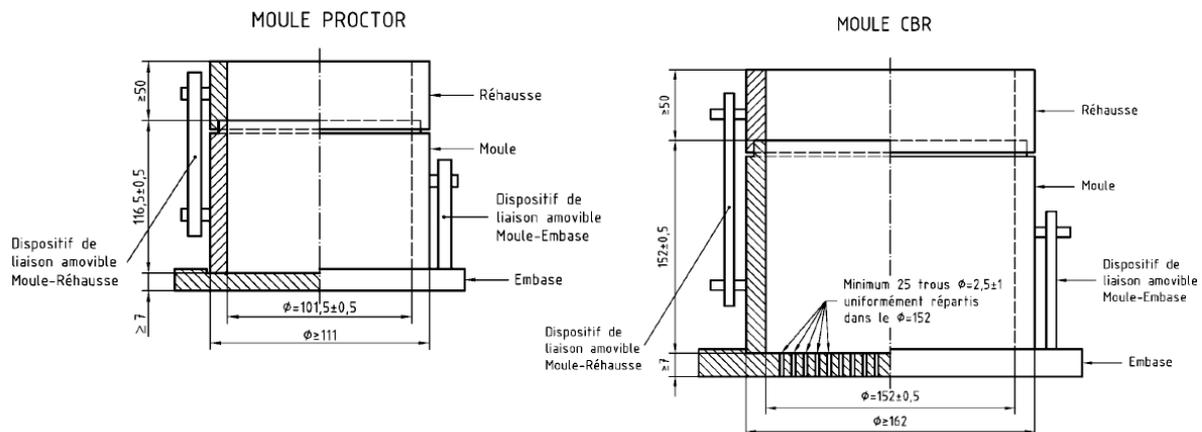


FIGURE 3.1 – Schéma des moules type pour essai Proctor AFNOR 1999

Masse $Kg$	Hauteur de chute $cm$	Coups par couche -	Nb couches -	En de compactage $Kj/m^3$
normal 2.490	30.50	25 (moule Proctor)	3	587
		45 (moule CBR)	3	533
normal 4.540	45.70	25 (moule Proctor)	5	2680
		45 (moule CBR)	5	2435

TABLE 3.1 – Données de compactage Proctor selon la norme (AFNOR 1999)

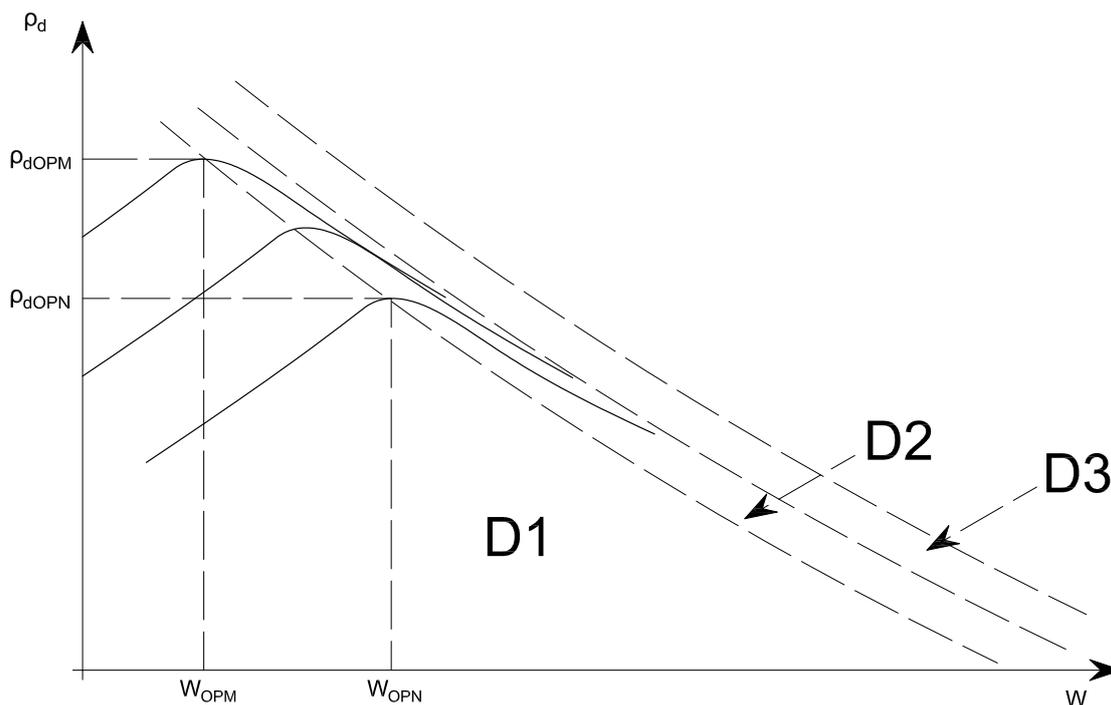


FIGURE 3.2 – Courbes types d'un essai Proctor avec domaine (Chapitre 1) de saturation

avant compactage), les feuillets vont avoir tendance à se mettre tous selon l'orientation parallèle à la surface de compactage. Une fois passé l'optimum, les feuillets resteront globalement dans ces directions.

La préparation du matériau dans le cas des argiles et marnes est primordiale. Ces matériaux ont tendance à générer des mottes de sol une fois humidifiés. Les conseils d'usage montrent que le choix de la mouture avant préparation peut générer des décalages de l'optimum Proctor. Il est préférable de se fixer une mouture constante pour pouvoir comparer raisonnablement les essais. Dans un autre contexte, le temps de repos offert après l'humidification joue lui aussi un rôle clé. Par exemple, certaines argiles d'altération (FERRIER et al. 1980) montrent un décalage de l'optimum de compactage de 4 points du côté humide pour la teneur en eau, et d'une perte de 6% de densité optimum pour une durée d'humidification passant de 2 à 10 jours. Les problématiques de moutures ont par la suite été confirmées par BENSON et DANIEL (1990), ainsi que MAZZIERI et VAN IMPE (2001), qui ont montré qu'une granulométrie bien étalée avec des grains secs per-

met de parfois effacer l'effet de la mouture malgré des mottes importantes. Les mottes les plus petites iront alors combler les vides entre les plus gros agrégats. Pour finir, les agrégats d'argile secs présentent plus de réactivité à l'effet de la mouture de par leur forte résistance mécanique qui empêchera leur déformation (AHMED, LOVELL et DIAMOND 1974). Le problème est moins marqué du côté humide, où les agrégats seront alors fortement déformables (OLSON 1963).

La problématique de déformabilité des agrégats amène la problématique de porométrie du matériau, qui est couplée à la densité. Les espaces inter agrégats mènent à l'existence d'une double porosité dans le matériau. Des mesures à l'aide de microscopes ou de porosimétrie mercure permettent l'identification de l'évolution des tailles de pores au cours du compactage. À mesure que le matériau se densifie, la taille des macropores va diminuer, en laissant les micropores intacts (HEIBROCK, ZEH et WITT 2003). MONTES HERNADEZ (2002) fournit des résultats similaires, montrant aussi une forte diminution de la macroporosité par effet de l'augmentation d'énergie. La teneur en eau de préparation joue aussi un rôle important dans la forme de la porosité. AHMED, LOVELL et DIAMOND (1974) montrent que la porosité résultant du compactage change, les macropores étant plus présents du côté très sec, alors qu'ils disparaissent totalement du côté humide. Cet effet est directement lié à la rigidité des mottes, qui du côté humide se déformeront pour faire disparaître les espaces inter agrégats.

La classification des sols du GTR complète la définition des sols utilisés dans le cadre des compactages par une sous-classe hydrique. Cette sous-classe est rattachée, pour les matériaux fins (A), à la teneur en eau naturelle du matériau par rapport à la teneur en eau de référence du Proctor normal. Le matériau m sera aux alentours de  $w_{opt}$ . Les matériaux h et th seront, eux, plus humides, alors que les matériaux s et ts plus secs. Cet élément est d'une importance capitale, car il fournira les informations nécessaires pour la bonne préparation du chantier (besoin de traitement, matériel, préparation du matériau avant compactage ...).

L'étude de la succion en parallèle des essais de compactage a beaucoup été utilisée. Elle s'opère généralement à l'aide de la méthode papier filtre (Chap. 1.2.3). Le papier filtre de mesure et ses deux papiers de protection sont généralement insérés entre deux couches de compactage directement dans le moule. Ils sont ensuite récupérés pour mesure après que le bloc de sol compacté a passé une semaine dans un sac, pour éviter sa dessiccation et laisser le temps au papier de s'équilibrer. Les résultats montrent peu d'effet de la part du compactage sur la succion du côté sec de l'optimum Proctor pour les argiles (ROMERO, GENS et LLORET 1999), à l'œdomètre par exemple, les courbes d'iso succion restant verticales quelle que soit l'énergie (Fig. 3.3). En revanche, du côté humide de l'optimum, une nette perte de succion est observable en fonction de l'énergie de compactage. Cela a été confirmé globalement par la littérature. BAKER et FRYDMAN (2009) présentent un condensé de résultats de différents auteurs et amènent les conclusions suivantes :

- du côté sec, l'eau se trouve dans les micropores du sol ou est adsorbée. Ces pores ne seront pas touchés par le compactage, ces derniers étant rattachés à la structure des grains et non au squelette granulaire. Le compactage réduira la macroporosité vide sans changer la teneur en eau massique.
- du côté humide, de la même manière, les macropores vont être diminués, augmentant la saturation locale du matériau, et donc diminuant sa succion. Ce comportement est d'ailleurs confirmé par la porosimétrie, qui montre un déplacement du volume total de macroporosité vers le volume de microporosité, jusqu'à la disparition quasi totale de ce premier.

La répartition des domaines de BOUTONNIER (2007) telle que présentée en figure 3.2 est en partie basée sur ces hypothèses. Du côté sec, la succion ne varie pas avec l'énergie de compactage. Ce résultat se retrouve sur des argilites (YANG, LIN et HUANG 2012; TRIPATHY, LEONG

et RAHARDJO 2005). À l'opposé, il y a variation du côté humide sur les matériaux argileux. En revanche, SAWANGSURIYA, EDIL et BOSSCHER (2008) montrent que les sables ne présentent pas de variation du côté humide, résultat confirmé sur des silts (HEITOR, INDRARATNA et RUJIKIATKAMJORN 2014). RAO et REVANASIDDAPPA (2000) montrent dans leur étude que la succion peut être liée à l'indice de plasticité. Pour une teneur en eau donnée, plus l'indice de plasticité est grand, plus la succion après compactage sera importante.

### 3.1.2 L'essai de compactage statique

L'étude du compactage statique est issue principalement de la réalisation des briques de sol (OLIVIER 1986 ; OLIVIER et al. 1997). Le compactage se fait dans un moule cylindrique libre. Un premier cylindre est placé à la base et équipé d'un capteur de force. En tête, un cylindre est foncé progressivement dans le moule, et le déplacement est mesuré pour pouvoir appliquer l'énergie de compactage voulue (directement liée au déplacement appliqué). La comparaison entre cet essai et la fabrication des briques de terre vibro foncées montre que la vibration apporte une différence notable : un décalage de la teneur en eau de 2 à 3 points du côté humide à l'optimum de compactage, pour une même énergie.

Certains chercheurs se sont penchés sur cet essai et l'ont comparé à la méthode Proctor (MESBAH, MOREL et OLIVIER 1999). La figure 3.4 montre clairement que le mode de compactage joue un rôle sur l'optimum obtenu. En effet, pour une énergie de compactage équivalente ( $550kJ/m^3$ ), on obtient une densité et une teneur en eau à l'optimum différentes entre compactages statique et Proctor. Ce résultat a été confirmé plus tard par SIVAKUMAR et WHEELER (2000) et WHEELER et SIVAKUMAR (2000). La différence est souvent attribuée à des pertes d'énergie par frottements entre le sol et le moule. Ces résultats ont été confirmés par DAUD (1996) et KOUASSI et al. (2000).

L'avantage certain de l'essai statique est l'homogénéité de l'échantillon généré. En effet, HEIBROCK, ZEH et WITT (2003) montrent qu'il y a une forte variation de densité entre les fonds du moule Proctor et la surface de ce dernier. L'énergie de compactage reçue par la première couche est en fin de compte plus importante, car elle soutient les couches suivantes compactées. Il y a donc un gradient de densité dans le moule fini. Dans le cadre du compactage statique, le matériau sera plus homogène avec l'apport d'une vibration (MOUSSAÏ 1993).

## 3.2 Étude de l'évolution des composantes hydromécaniques au compactage

La partie précédente nous a fourni les bases sur lesquelles vont pouvoir être analysés les essais Proctor. Pour la suite, la marne de planche de compactage in situ est utilisée dans la réalisation d'essais de compactage comprenant différents modes de préparation et énergies de compactage.

### 3.2.1 Essai Proctor sur les marnes de la planche

Après prélèvement sur le chantier de la planche, la marne est concassée mécaniquement à l'aide d'un hachoir. Ce procédé est accepté pour les matériaux de classe A selon le GTR. Le matériau sortant est quarté au tamis (maille de  $5mm$ ). Le passant est alors préparé à la teneur

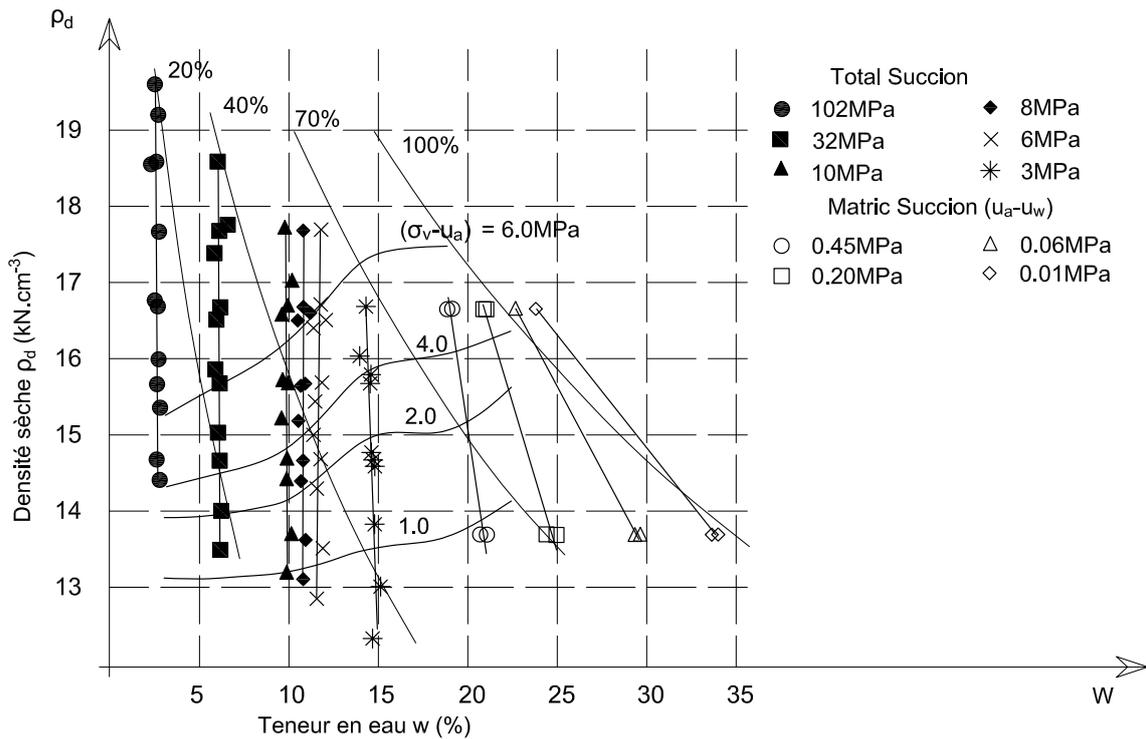


FIGURE 3.3 – Proctor à différentes énergies et courbes d’iso succion (ROMERO, GENS et LLORET 1999)

en eau souhaitée par séchage/humidification. Deux modes de séchage ont été considérés : le premier utilise une étuve réglée à  $110^{\circ}C$  pour sécher le matériau, puis il est réhumidifié ; dans le deuxième cas, le matériau sèche naturellement à l’air sans intervention thermique. Dans les deux cas, une fois le matériau à la teneur en eau souhaitée, il est mis en sac, puis laissé une semaine au repos pour homogénéisation avant compactage. Deux énergies ont été appliquées, normale et modifiée, et seuls des moules CBR ont été utilisés. Suite aux premiers essais (sol séché à  $110^{\circ}C$ ) où un sac était préparé pour un moule, le mode opératoire a été corrigé pour préparer un sac pour deux moules (un normal, un modifié). Cette méthode permet d’avoir un Proctor normal et un Proctor modifié dans des conditions hydriques initiales proches, facilitant ainsi la comparaison. Toutes les mesures de teneur en eau ont été exécutées à l’étuve à  $110^{\circ}C$  de manière à avoir une référence identique et formelle de cette valeur, quelle que soit la préparation initiale. La durée d’usage était de 24 heures pour tous les échantillons.

La figure 3.5 présente les résultats de l’essai Proctor pour les deux modes de séchage. Il apparaît clairement que le mode de séchage joue un rôle dans la valeur de la teneur en eau d’optimum Proctor normal trouvée, le décalant de deux points du côté sec. L’optimum normal pour le séchage naturel se trouve aux alentours de 21% alors que pour le séchage à  $110^{\circ}C$  il se trouve vers 19%. La densité d’optimum est peu influencée, avec des valeurs respectives de  $1.65gcm^{-3}$  et  $1.64gcm^{-3}$ . Un décalage entre les deux modes de préparation peut être observé, avec une proximité plus importante de la courbe de saturation pour le séchage naturel, et ce pour les deux énergies de compactage. Ce résultat importe beaucoup dans le cadre des essais de terrassement, où les essais de contrôle réalisés sur chantier sont souvent faits le plus rapidement

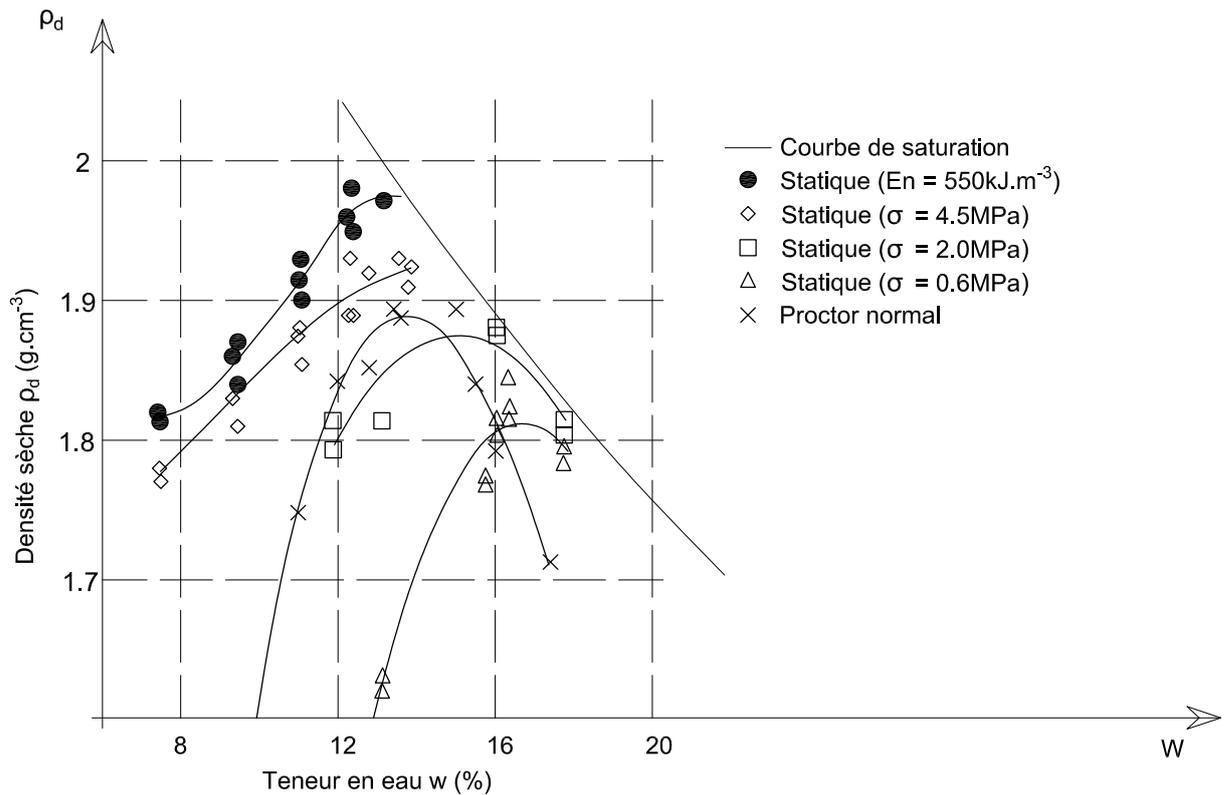


FIGURE 3.4 – Comparaison entre compactages Proctor et statique (OLIVIER 1986)

possible, avec des séchages trop forts menant à des décalages étude/chantier/contrôle. Il s'inscrit dans ce qui a pu être mis en évidence par BLIGHT (2013) sur les sols résiduels. Le décalage est imputé à deux phénomènes : tout d'abord, la température trop forte, qui permet de séparer une partie de l'eau chimiquement liée ; ensuite, une forme de cuisson de la marne, qui mène à la transformation chimique de sa composition, et change donc son comportement relatif à l'eau. Il est à noter que peu d'observations ont été faites sur le sujet. Certains essais faits à température donnée indiquent de fortes variations du comportement du matériau (ABU-ZREIG, AL-AKHRAS et ATTOM 2001), mais peu apportent des éléments quant au mode de préparation.

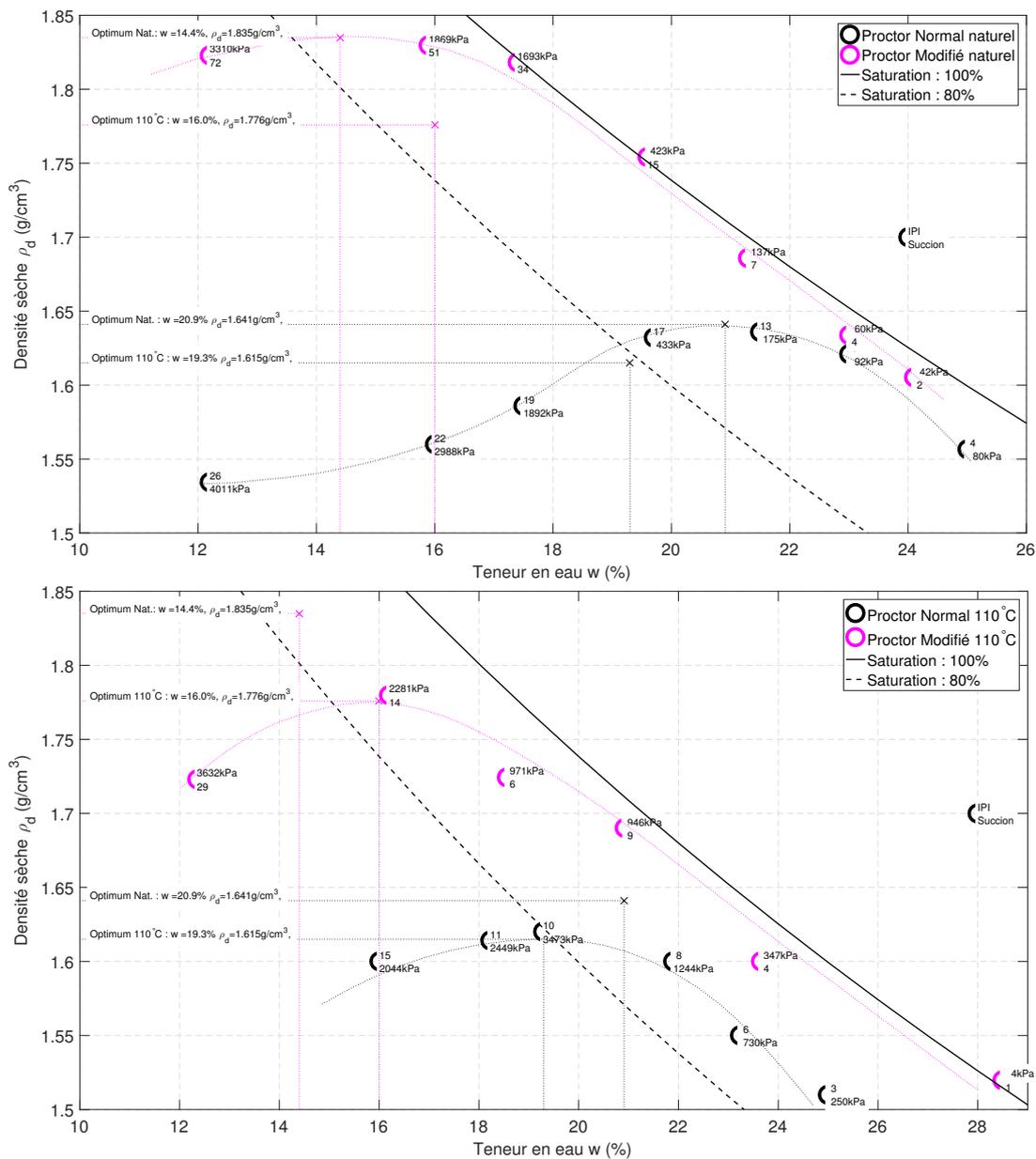


FIGURE 3.5 – Courbe Proctor de la marne de l'A304 pour séchage naturel et séchage 110°C

De même, la taille de la mouture joue un rôle clé dans l'optimum de compactage. Les mesures faites sur des mottes plus importantes (tamis de 20mm) prélevées sur chantier, présentées en figure 3.6, donnent une densité optimale plus faible que la mouture fine de laboratoire, mais sa teneur en eau ayant été obtenue par séchage naturel, il reste une bonne correspondance entre les deux valeurs de teneur en eau à l'optimum. Le potentiel de déformabilité des mottes apparaît bien, avec un Proctor du côté humide très proche de celui préparé en laboratoire, alors que plus on sèche le matériau, moins il arrive à atteindre les densités observées en laboratoire. La disparité des points est plus importante, en raison de la réalisation manuelle de ces Proctors. De même, l'hétérogénéité de la teneur en eau de la planche apparaît aussi avec des écarts allant jusqu'à 1.5 points.

En plaçant le nuage de points de la planche (Fig. 3.7), une forte proximité avec le Proctor modifié est observée. Les échantillons sont tous dans un état quasi saturé (> 90%). La proximité avec le Proctor modifié n'est pas une aberration, étant donné que le compactage chantier est souvent estimé être à une énergie plus importante que le Proctor normal (selon les praticiens). Il est en effet difficile de mesurer directement l'énergie volumique appliquée par le compacteur. La méthode du Q/D incluse dans le GTR (LCPC et SETRA 2000) ne permet que d'estimer cette valeur. Le compactage reçu en chantier dépend fortement de la constance de la vitesse du compacteur et de l'épaisseur de couche compactée. Il faut noter, comme présumé dans le chapitre précédent, que les fortes densités et la quasi-saturation pour toutes les teneurs en eau proviennent de l'effet du carottage qui a engendré de plus fortes densités par fongage.

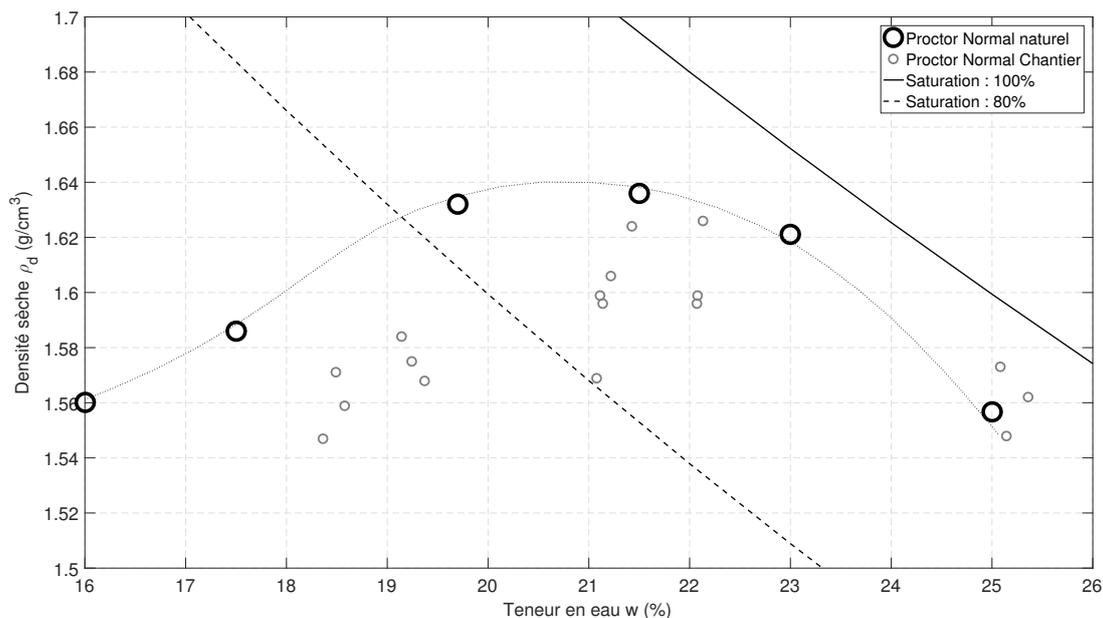


FIGURE 3.6 – Comparaison entre Proctor préparé en laboratoire et Proctor exécuté du chantier

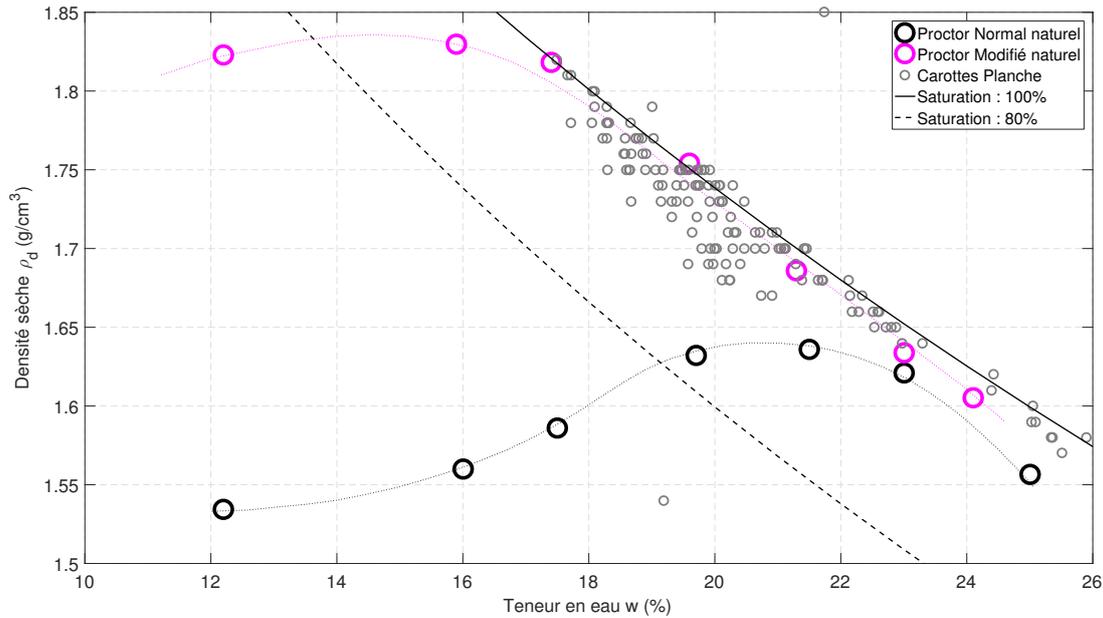


FIGURE 3.7 – Comparaison entre Proctor préparés en laboratoire et mesures sur carottes de la planche

### 3.3 Analyse du comportement hydromécanique du matériau

#### 3.3.1 Variation de la succion au cours du compactage

Pour chaque Proctor, la succion a été mesurée à deux moments clés. D’abord la mesure de la succion de la mouture avant compactage. Cette dernière a été exécutée par méthode papier filtre globale, la mouture avant compactage ne permettant pas d’utiliser la méthode matricielle. Une fois le compactage exécuté, les échantillons compactés sont découpés pour des mesures de teneurs en eau et de succions matricielles afin d’obtenir les valeurs après compactage. La méthode de mesure suit celle présentée dans le chapitre 1.

La figure 3.8 présente l’évolution de la succion en fonction du degré de compactage appliqué, à une teneur en eau donnée. Globalement, la succion tend à baisser par effet du compactage, en partant d’une mouture à forte succion, qui diminue au cours du compactage. Du côté sec de l’optimum Proctor, la succion semble être peu influencée par le compactage et reste forte ( $3000\text{kPa}$ ) (observation facilitée par l’échelle logarithmique). En revanche, la succion du côté humide de l’optimum tend à baisser drastiquement par effet du compactage. Elle était forte sur la mouture ( $2000\text{kPa}$ ) et diminue en dessous de  $400\text{kPa}$  par effet du compactage. La perte est d’autant plus importante que la teneur en eau s’éloigne de celle de l’optimum. La différence de succion entre normal et modifié est plus difficile à observer du côté sec alors que du côté humide, elle est évidente.

#### 3.3.2 Analyse des chemins de compactage à l’aide de domaines de rétention

Les données présentées dans le chapitre 2 concernant la planche de compactage présentaient une forte dispersion entre saturation, succion et densité. Une zone saturée apparaît sous la forme d’une corrélation linéaire, avec, passé un point (entrée d’air), un nuage dispersés de valeurs de succion. Ce nuage représente la disparité des essais de compactage, l’effet du carottage, mais aussi l’existence d’une série de surfaces de saturation correspondant à différents degrés de com-

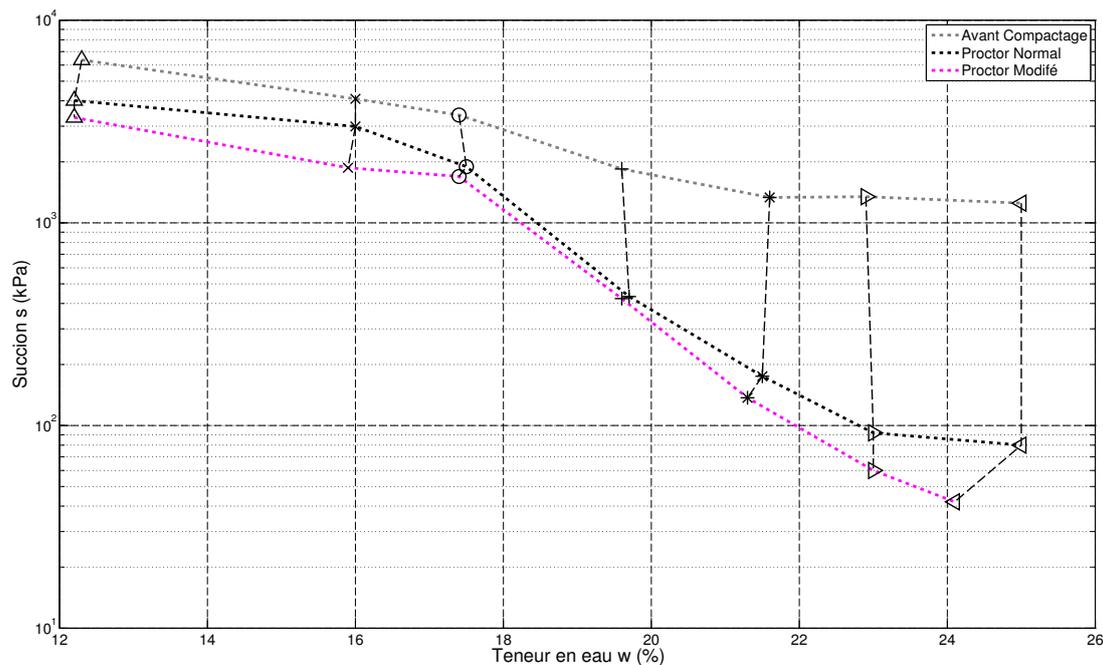


FIGURE 3.8 – Évolution de la succion au cours du compactage pour matériaux séchés naturellement (mouture laboratoire)

pageage. Les mesures réalisées sur les carottes de la planche ne descendaient pas en dessous des 90% de saturation. De manière à mieux interpréter l'état du matériau de la planche, des courbes de rétention ont été réalisées sur des échantillons prélevés sur les Proctor. Seules les parties proches de la saturation des courbes ont été mesurées, pour des Proctor réalisés plutôt du côté humide de l'optimum normal.

Les mesures sont exécutées sur de petits échantillons cubiques ( $\sim 1.5\text{cm}$  de côté). Pour obtenir les courbes de séchage, les échantillons sont placés en dessiccateur, à une humidité relative ambiante de 85% (chlorure de potassium). Cette hygrométrie permet de limiter la vitesse de séchage des échantillons pour une meilleure maîtrise des teneurs en eau visées. La saturation est exécutée par ajout d'eau. La quantité d'eau nécessaire pour atteindre le point visé est progressivement ajoutée à la pipette. Un temps de repos est laissé à l'échantillon dans une atmosphère proche de 100% d'humidité relative pour homogénéisation. Certains échantillons, une fois saturés, sont alors placés en dessiccateur pour obtenir des points pour la courbe de séchage, mais à un degré de saturation plus élevé que les points Proctor initiaux.

Une fois l'échantillon à la teneur en eau ciblée, il est emmailloté dans un film avec un papier filtre de manière à mesurer sa succion. Après une semaine d'homogénéisation, le papier filtre est pesé ; l'échantillon subit alors une pesée hydrostatique (liquide non mouillant) et un séchage pour connaître sa densité, sa teneur en eau et son degré de saturation. Cette méthode a d'abord été éprouvée sur les matériaux préparés à  $110^\circ\text{C}$  d'où un manque de points, puis réitérée sur les matériaux obtenus par séchage naturel.

### Courbes de rétention pour matériau séché naturellement

La figure 3.9 présente les trois courbes de rétention pour un matériau séché naturellement,

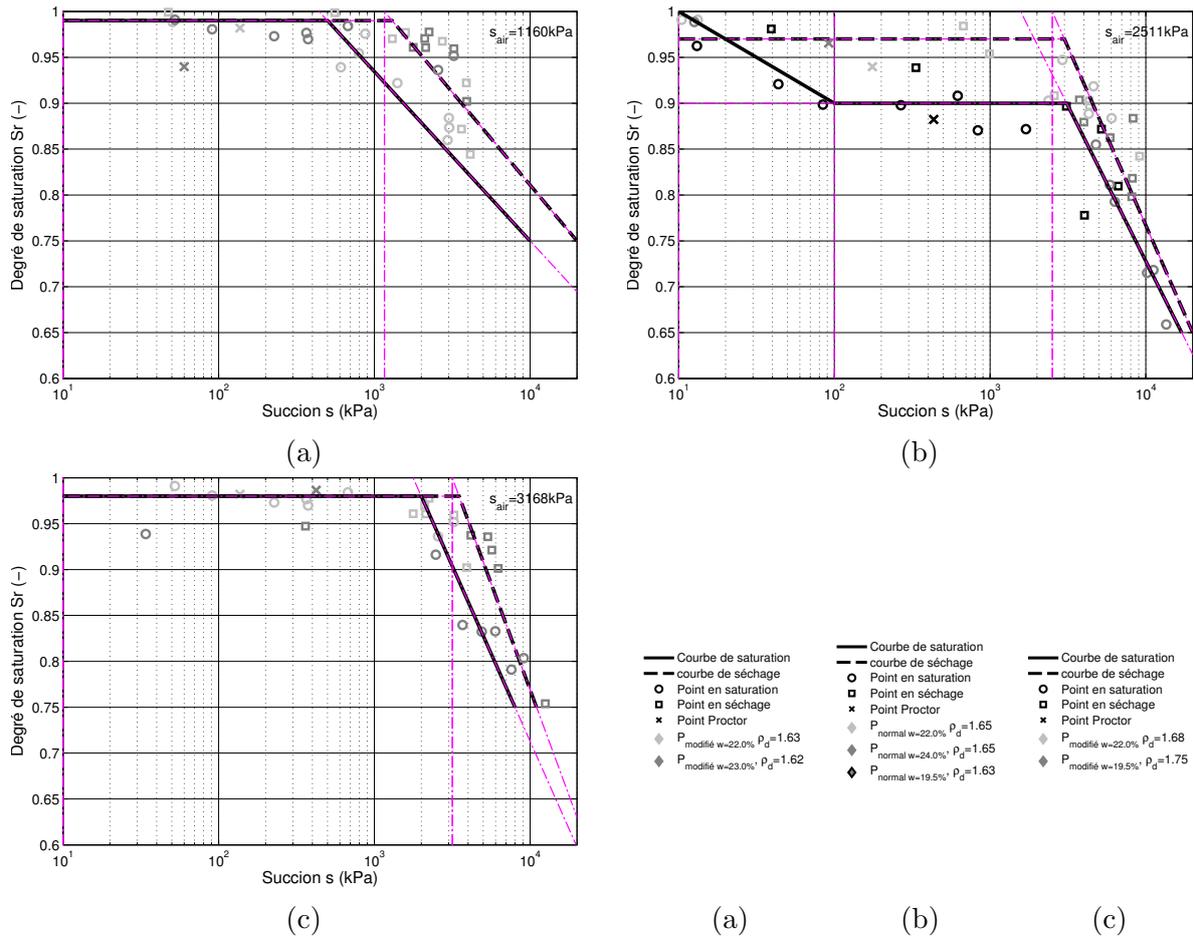


FIGURE 3.9 – Courbes de saturation en fonction de la succion pour les 3 densités de référence

avec des densités initiales différentes. Ce choix est fait sur la base des observations de SIVAKUMAR et WHEELER (2000) montrant que le mode de compactage importe peu : seule la densité initiale compte lorsqu'il s'agit de la rétention. Une séparation a tout de même été gardée entre Proctor normal et modifié pour les densités voisines de  $1.64g/cm^3$ . La pente des droites de saturation augmente à mesure que la densité initiale augmente. La pente est directement liée à la progressivité de la vidange du sol au regard de la succion : plus la vidange est progressive, plus elle suggère des tailles de pores mieux réparties. À mesure que des densités plus fortes sont atteintes, les plus gros pores rétrécissent progressivement, menant ainsi à une taille plus homogène de ces pores. Plus la taille des pores est homogène, plus la désaturation du matériau sera brutale. Cette disparition des porosités les plus grandes est confirmée par l'évolution de la succion d'entrée d'air ( $s_{air}$ ). L'entrée d'air augmente à mesure que la densité initiale augmente ( $1160kPa$ ,  $2511kPa$ ,  $3168kPa$ ). Une densité initiale plus faible conduit à une taille moyenne de pore plus faible. Pour autant, les deux courbes autour de  $1.64g/cm^3$  montrent des entrées d'air différentes, et donc un agencement de pores différent. L'énergie de compactage plus forte aurait potentiellement augmenté la taille du pore moyen par des pressions de fluide interstitiel plus importantes. Les pores sur-compactés seraient donc de plus grande taille pour une densité équivalente. Les pores les plus grands, une fois saturés par le compactage, vont se déformer (rétrécissement) par le travail complémentaire apporté par le sur-compactage. L'eau est donc chassée des pores vers les pores de plus petite taille qui l'entourent ; ceux-ci vont donc se déformer, car ils ne peuvent pas dissiper facilement la surpression (Fig. 3.10). La densité reste en revanche inchangée grâce à un équilibre entre pores augmentant de taille et pores rétrécissant, au détail près des variations des tailles de bulles d'air. Ce comportement de circulation d'eau couplé à la compressibilité des bulles d'air explique le matelassage, l'air reprend une pression plus faible après le passage de la

bille, et donc un volume plus important, et incite le sol à regonfler.

Les courbes de rétention présentent une hystérésis. Elles se resserrent à mesure que la densité initiale augmente. Ce phénomène est lié à la disparition de la porosité de plus grande taille cachée derrière des pores de plus petite taille. Ces derniers ne sont que peu influencés par le compactage. La courbe de rétention pour une densité initiale de  $1.64g/cm^3$  (b) montre des difficultés à atteindre une saturation. Le degré de saturation est bloqué à une valeur de 90%. Ce blocage est dû à l'enfermement de bulles d'air dans le sol, bloquant sa saturation. Ce comportement tend à renforcer les hypothèses proposées par MAHMUTOVIC et al. (2014). Les bulles sont enfermées dans le fluide interstitiel, changeant sa compressibilité et donc le comportement hydromécanique du sol. Ce phénomène n'apparaît pas sur le matériau sur-compacté. Une porosité plus uniforme en termes de taille mènera à diminuer les chances d'enfermer de l'air. Passé en dessous d'une succion autour de  $100kPa$ , le sol change de comportement, se rapprochant d'une boue, et les bulles ont disparu, probablement dissoutes.

La figure 3.11 présente le degré de saturation en fonction de la teneur en eau lors des chemins de drainage et humidification pour chaque densité initiale. Les observations sont proches de celles faites pour la saturation en fonction de la succion, au détail près qu'il n'y a pas d'hystérésis, sauf en cas d'enfermement d'air dans l'échantillon (saturation bloquée à 90%). La pente de la courbe de saturation augmente à mesure que la densité initiale augmente. Plus la taille moyenne de porosité sera faible, plus elle sera saturée à une teneur en eau plus faible.

Les variations d'indice des vides en fonction de la teneur en eau sont présentées en figure 3.12. Il n'y a pas d'hystérésis comme à l'usage, même lorsque les bulles d'air sont emprisonnées. Le comportement avant entrée d'air ne diffère que très peu entre les différents niveaux de compacité, longeant globalement la courbe d'optimum de compacité. En revanche, la courbe post-entrée

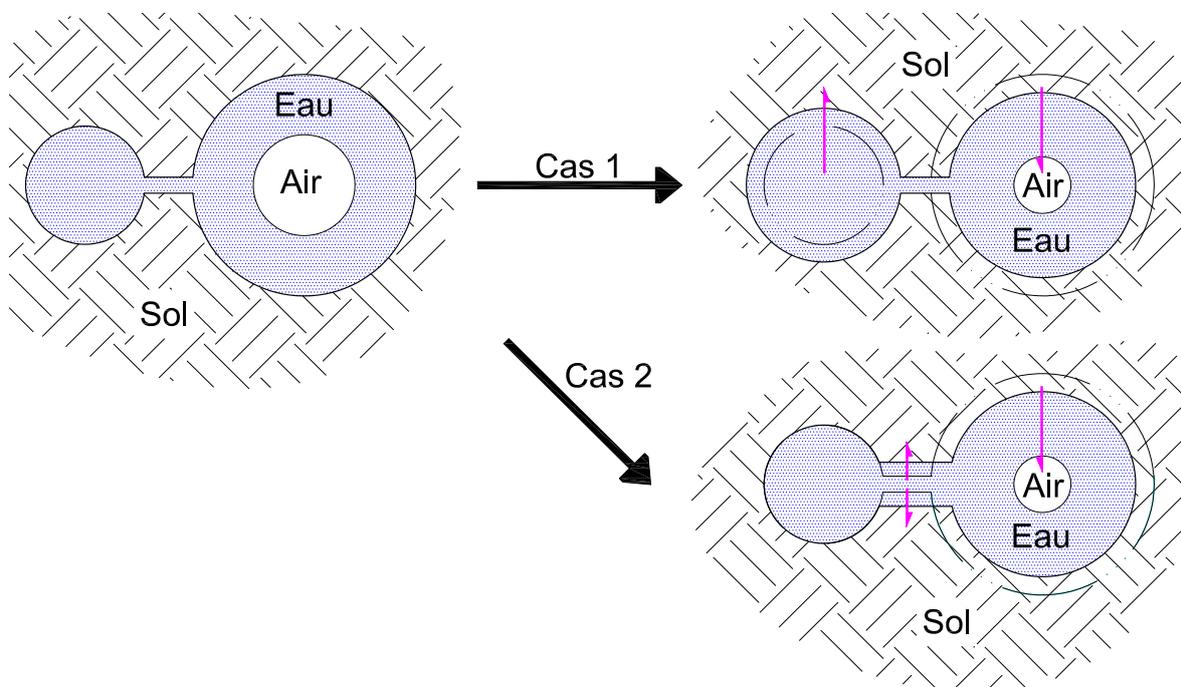


FIGURE 3.10 – Comportement des pores au sur-compactage, cas 1 : augmentation de volume du pore adjacent, cas 2 : augmentation de volume du pore liaison

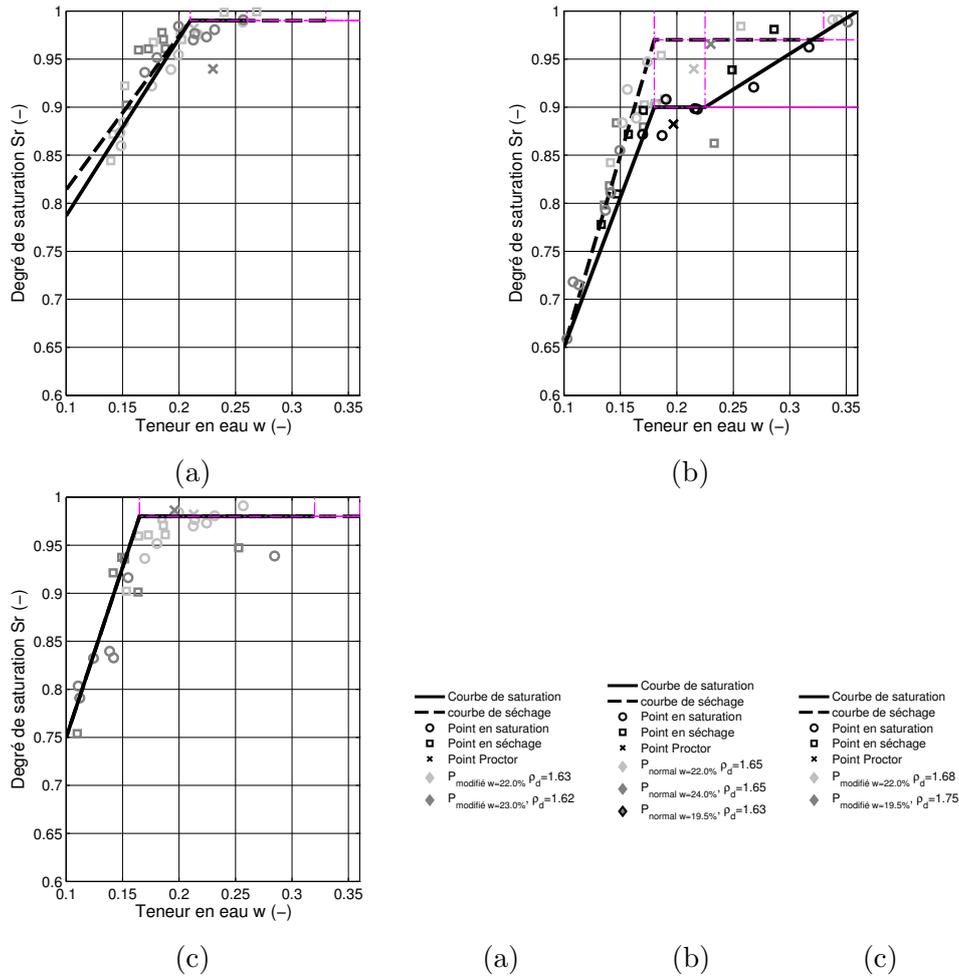


FIGURE 3.11 – Courbes de saturation en fonction de la teneur en eau pour les 3 densités de référence

d'air montre des pentes de plus en plus faibles à mesure que la densité initiale augmente. Ces variations de pente montrent que les matériaux avec une densité initiale plus faible présenteront un retrait plus important pour une variation de teneur en eau donnée. Un retrait trop important sur un volume conséquent peut mener plus facilement à l'apparition de fissures, comme vu pour le plot de compactage  $N^{\circ}4$  : sec de la planche (4BsV5-12 et 4BMV5-4). Plus la densité initiale augmente, plus l'entrée d'air a lieu à une porosité faible ( $e = 0,45; 0,50$  et  $0,58$ ) et une teneur en eau faible ( $w = 16\%, 18\%$  et  $21\%$ ).

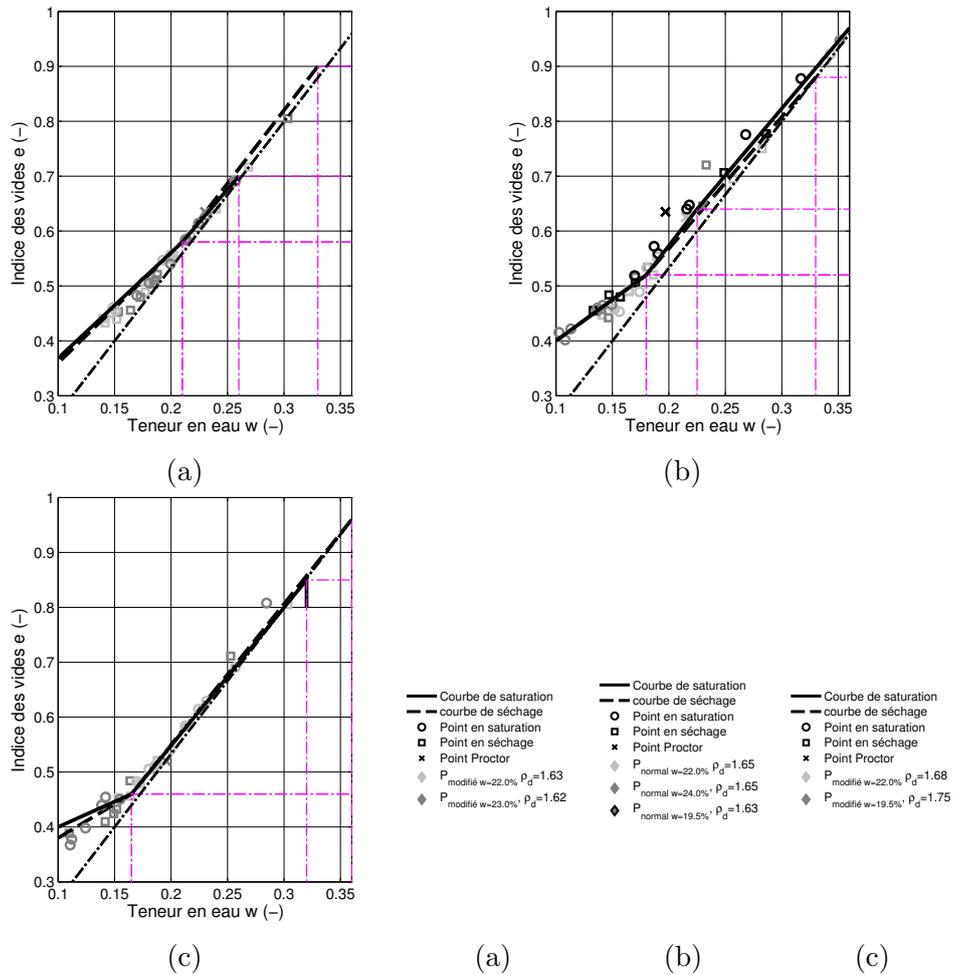


FIGURE 3.12 – Courbes d'indice des vides en fonction de la teneur en eau pour les 3 densités de référence

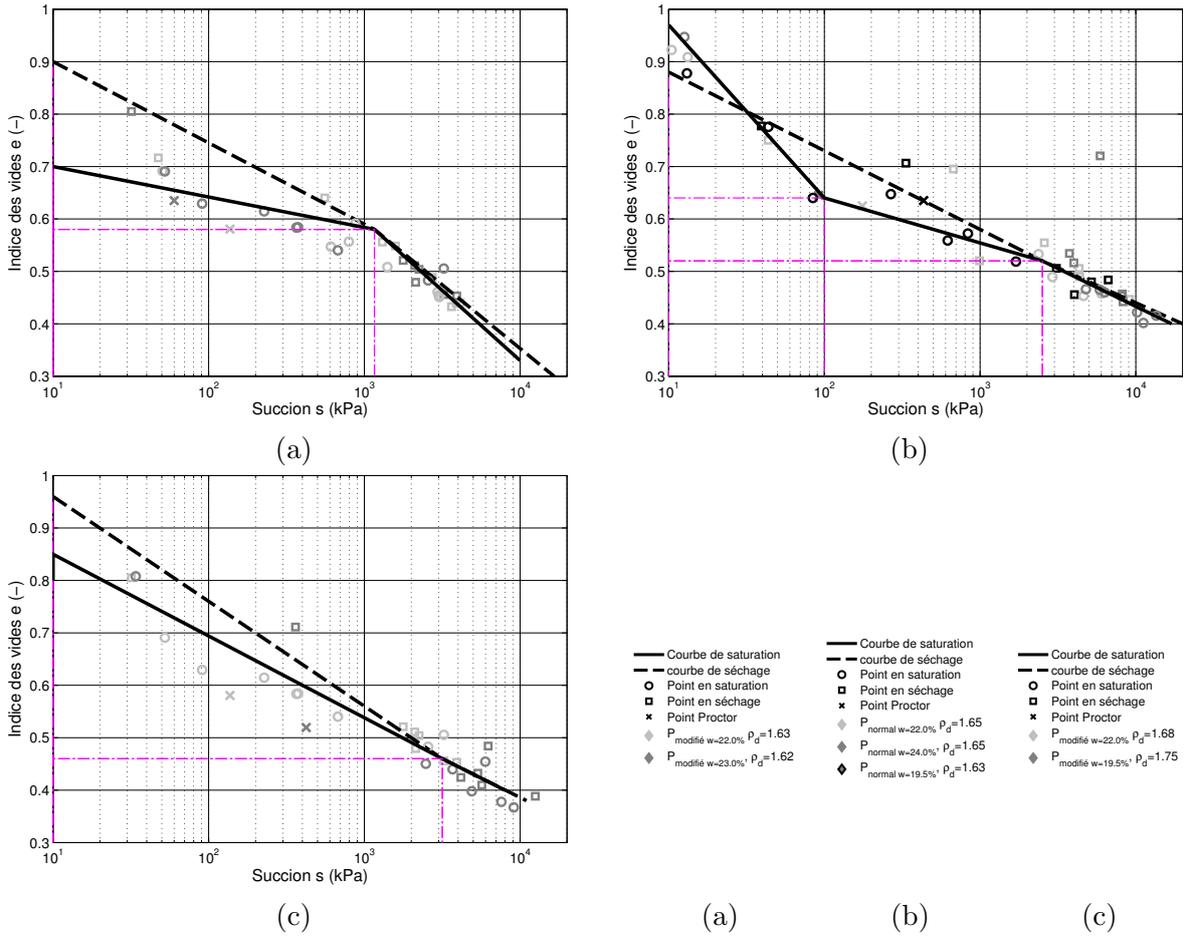


FIGURE 3.13 – Courbes d'indice des vides en fonction de la succion pour les 3 densités de référence

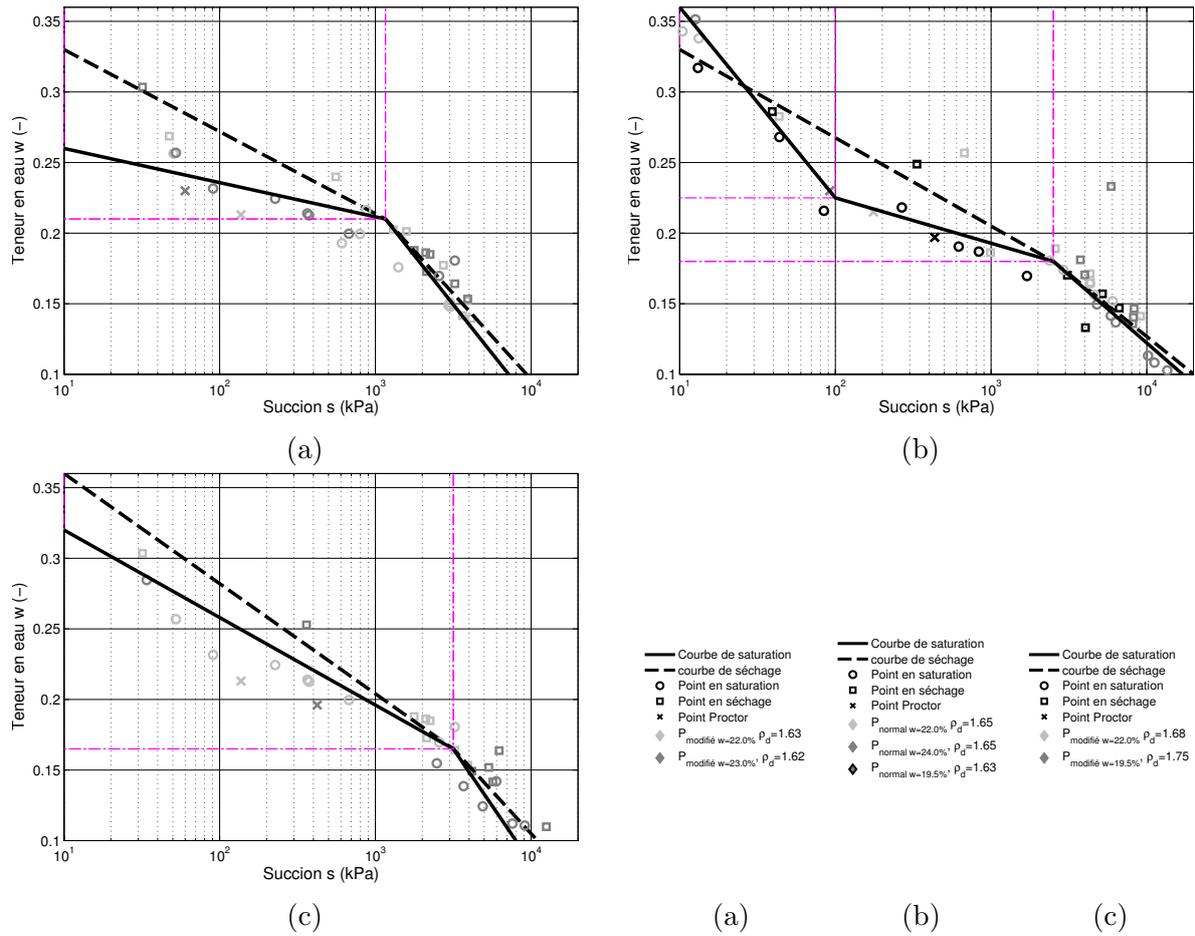


FIGURE 3.14 – Courbes de teneur en eau en fonction de la succion pour les 3 densités de référence

La figure 3.13 présente les variations d'indice des vides en fonction de la succion. On retrouve ici la hiérarchie des indices des vides à l'entrée d'air en fonction de la densité initiale. Les observations post-entrée d'air correspondent à celles faites pour les graphiques dépendant de la teneur en eau. En revanche, la partie avant l'entrée d'air fournit des informations complémentaires. L'hystérésis entre séchage et humidification apparaît de nouveau. Sa taille augmente d'autant que la densité initiale faiblit. Les pentes de la courbe d'humidification et de séchage montrent des pentes plus importantes à mesure que la densité initiale augmente. Une pente plus importante pour l'humidification implique que pour une variation de succion négative donnée, un matériau présentant une densité initiale plus importante entraîne un gonflement plus important, pouvant aboutir à des désordres importants sur un ouvrage. Le matériau présentant des bulles d'air montre un virage de la courbe lors de la dissipation des bulles d'air, changeant le comportement du matériau. Ce dernier approche visuellement le comportement d'une boue.

La figure 3.14 présente la variation de la teneur en eau en fonction de la succion. L'hystérésis est observable, sa taille augmentant à mesure que la densité initiale faiblit. Les pentes avant entrée d'air augmentent à mesure que la densité initiale croît. Le comportement particulier de la courbe de saturation présentant une capture de bulles se retrouve ici. Globalement, à une succion donnée, la teneur en eau dans l'échantillon sera plus forte à mesure que la densité initiale augmente. Cela implique qu'une variation de teneur en eau donnée génère une plus faible variation de succion si la densité initiale est plus importante. Les variations de résistance du matériau en seront donc probablement moins impactées.

### Comparaison des rétentions en fonction de la méthode de préparation

La figure 3.15 présente une comparaison entre les courbes de saturation en fonction de la succion présentée précédemment aux points mesurés sur un matériau séché à  $110^{\circ}\text{C}$ , pour une densité initiale équivalente. Une hystérésis plus importante peut être observée, avec une succion d'entrée d'air plus importante pour les matériaux séchés au four. La raison de cette entrée d'air

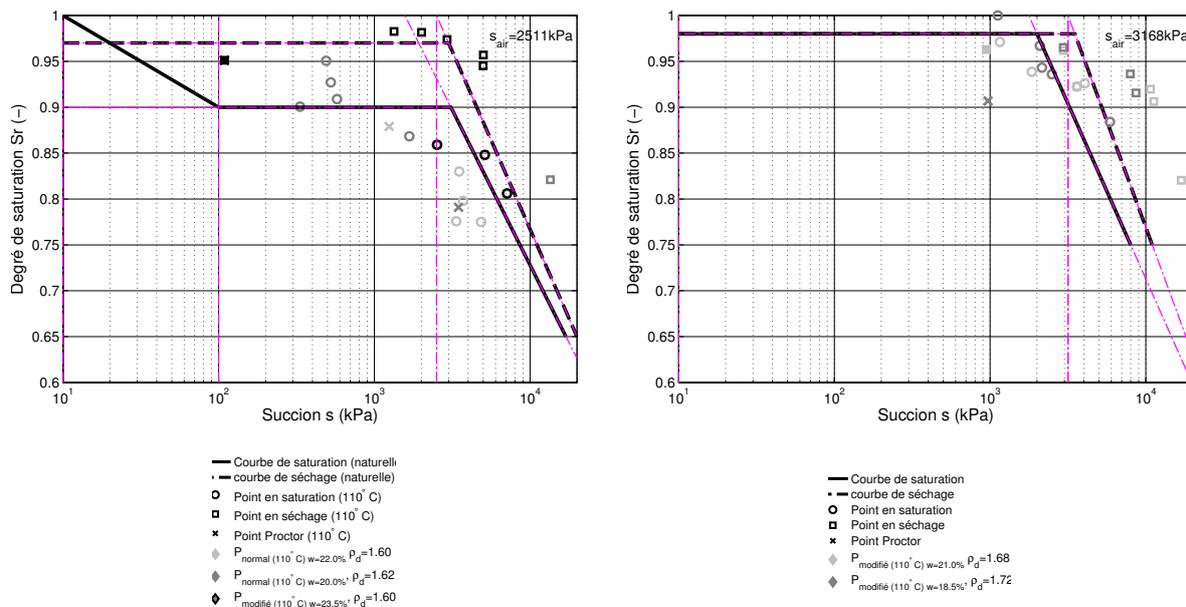


FIGURE 3.15 – Courbes de saturation (séchage naturel) en fonction de la succion, comparées aux points de rétention obtenus avec séchage à  $110^{\circ}\text{C}$

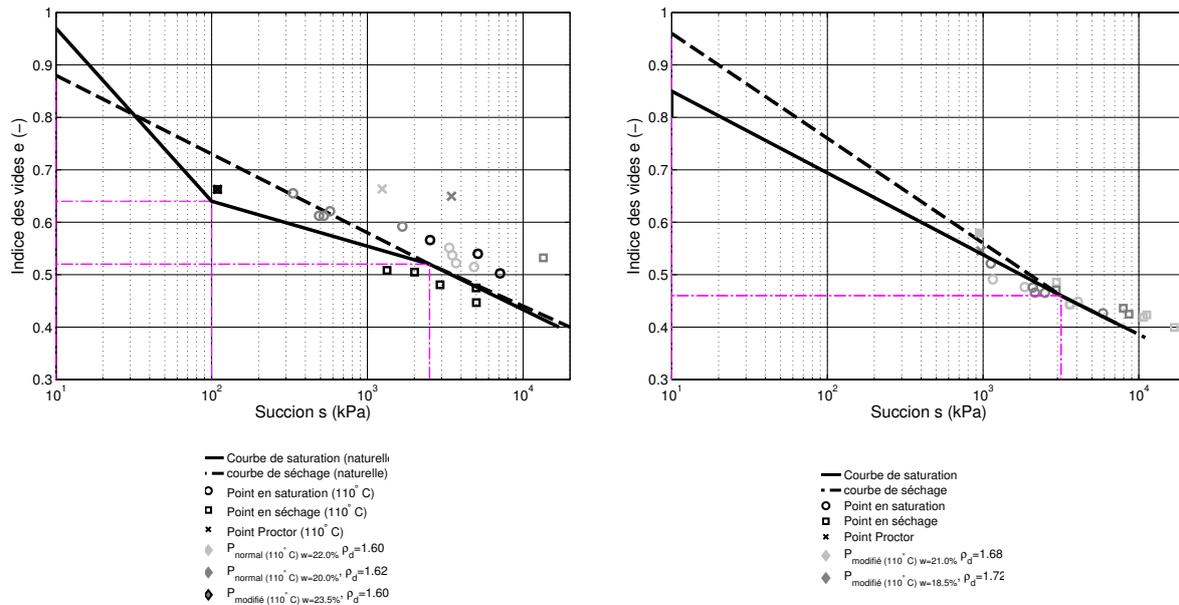


FIGURE 3.16 – Courbes d'indice des vides (séchage naturel) en fonction de la succion, comparées aux points de rétention obtenus avec séchage à  $110^\circ\text{C}$

plus haute peut être liée au graphique présenté en figure 3.16, montrant l'indice des vides en fonction de la succion. Le potentiel de retrait-gonflement semble plus faible, manifesté par une pente moins importante. Cette plus faible réduction d'indice des vides mène à la supposition d'un changement chimique du matériau. Des quantités (faibles) de montmorillonites sont observées pour le matériau naturel. La cuisson du matériau a pu potentiellement désactiver ces dernières, menant à la sous-estimation du retrait/gonflement. Moins de retrait implique une variation moins rapide de la taille des pores de l'échantillon, et donc à une entrée d'air plus tardive. Les comportements vis-à-vis de la teneur en eau sont globalement les mêmes et renforcent l'hypothèse précédente.

### Comparaison des rétentions avec la planche de compactage

L'ensemble des points de la planche se coordonne relativement bien aux courbes de rétention. L'ensemble des points se trouve dans la partie fortement saturée, comme présentée en figure 3.17. L'étude du degré de saturation permet d'avancer l'hypothèse qu'une forte quantité d'air est enfermée dans le sol lors du compactage. En effet, sans l'effet d'enfermement de bulle bloquant la saturation aux alentours de 90% entre des succions de 100 à 2000kPa, une grande partie des points de la planche se seraient retrouvés hors des limites de l'enveloppe.

De même, la saturation en fonction de la teneur en eau encadre bien la planche. De même, la saturation bloquée à 90% entre 17 et 22% de teneur en eau permet de bien englober les points de la planche. L'emprisonnement de l'air lors du compactage semble donc un point clé de la mécanique non saturée appliquée au compactage.

Du point de vue de l'indice des vides, les points se trouvent relativement bien corrélés avec la teneur en eau. En revanche, il y a une légère discordance en fonction de la succion. Notons que l'indice des vides mesuré sur les carottes n'est pas le résultat d'un séchage ou d'une humidification. La succion mesurée est donc la conséquence d'une densification et non d'un changement hydrique. Au contraire, la teneur en eau restant constante lors du compactage, couplé à la quasi-

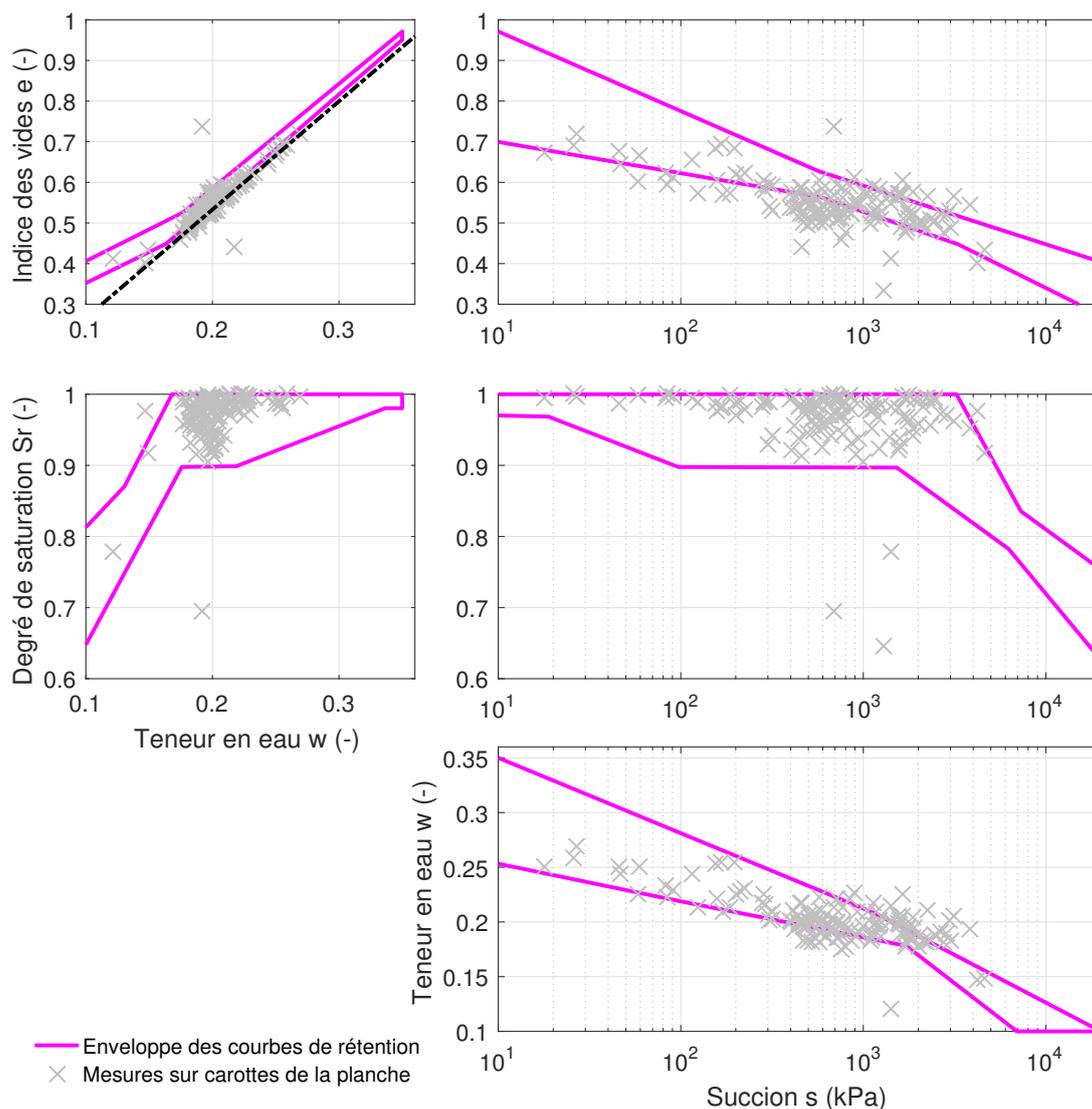


FIGURE 3.17 – Mesures sur les carottes de la planche de compactage comparées à l’enveloppe des courbes de rétention

saturation, permet une meilleure corrélation avec les courbes de saturation. En effet, les points restent proches de la courbe de compacité maximale, tout comme les courbes de saturation.

Pour finir, les points de la planche ne restent pas tous dans l’enveloppe pour la relation teneur en eau / succion. Les points les plus humides sont bien placés relativement à l’enveloppe des rétentions. Ce sont les fortes succions qui semblent ne pas suivre l’enveloppe.

## 3.4 Réponse mécanique par essais de portance

### 3.4.1 Présentation de différents essais et comportements précédemment identifiés

L'essai Proctor n'est, en soi, pas suffisant pour pouvoir prescrire les paramètres de compactage sur chantier. Les risques d'orniérage et les besoins mécaniques mènent à devoir anticiper le comportement du matériau immédiatement après compactage pour permettre la circulation des engins.

L'essai classique issu de la géotechnique routière est l'IPI (Indice de Portance Immédiat), aussi appelé CBR (Californian Bearing Ration) aux États-Unis. Comme son nom l'indique, l'essai s'effectue sur un matériau compacté en moule CBR. Il consiste en l'enfoncement progressif à vitesse constante d'un piston de  $5mm$  de diamètre dans le sol arasé. Les forces requises à la pénétration sont prises à des profondeurs normalisées. L'essai est généralement arrêté à  $10mm$  d'enfoncement. La valeur d'IPI est définie par les forces mesurées à  $2.5mm$  et  $5mm$ , rapportées à une force de référence, comme présentée en équation 3.1.

$$IPI = Max \left[ \frac{F_{2.5}}{13.35} \cdot 100 ; \frac{F_{5.0}}{19.93} \cdot 100 \right] \quad (3.1)$$

Les valeurs de  $13.35kN$  et  $19.93kN$  sont les valeurs conventionnelles fournies par la norme issues d'un matériau de référence (AFNOR 1997).

La valeur de l'IPI dépend fortement de la teneur en eau du matériau, comme présenté en figure 3.18(a). Les matériaux humides présentent une faible résistance comparée à celle des matériaux secs. Sur les sables, à différents degrés d'argilité, et pour de faibles succions, les valeurs de l'IPI sont bien corrélées avec les valeurs issues de la boîte de cisaillement (PURWANA 2013). Le cisaillement de ces sables, comme leur CBR, montrent en fonction de la succion des courbes bilinéaires avec un virage à l'entrée d'air du matériau, comme présenté en figure 3.18(b). Deux régimes de comportement peuvent donc être identifiés, se rattachant aux domaines de saturation tels que présentés par BOUTONNIER (2007). L'entrée d'air a un rôle clé dans la réponse mécanique d'un matériau. L'augmentation du ratio d'argile dans le sable tend à légèrement augmenter l'IPI comme la densité, résultat d'un meilleur arrangement granulaire. L'IPI peut en revanche présenter une rechute de résistance arrivé à une teneur en eau basse. Le point de virage dépendra aussi de l'énergie de compactage : plus l'énergie est forte, plus la perte de portance arrivera à une teneur en eau faible. Pour les argiles, l'énergie de compactage tend à améliorer la résistance du matériau du côté sec. CAMP DEVERNAY (2008) montre en revanche que l'énergie n'influence que peu le côté humide. Il est à noter que les variations d'énergie étaient faibles (Proctor, *Proctor* – 10%, *Proctor* – 20%).

D'autres essais mécaniques peuvent apporter des informations complémentaires sur le matériau. L'essai le plus basique à mettre en œuvre reste la compression simple. Souvent référencé *RC*, il s'agit d'un essai dérivé d'études sur les bétons. Comme pour les essais présentés précédemment, la résistance mécanique diminue fortement avec une augmentation de la teneur en eau, la succion jouant un rôle primordial (CUI, ALZOGHBI et DELAGE 2001 ; CABOT et LE BIHAN 1993). De même que l'IPI, l'essai de compression simple est sensible à la teneur en eau du matériau. La résistance du matériau sera faible à basse teneur en eau, et subira un pic de résistance au niveau de la teneur en eau de l'optimum Proctor. Une fois passé ce seuil, la résistance diminuera. La variation d'énergie de compactage sera peu visible du côté humide de l'essai, mais tendra à augmenter la résistance aux abords de l'optimum Proctor (CAMP, GOURC et PLÉ 2010 ; CUI, ALZOGHBI et DELAGE 2001). CAMP et al. (2007) et PLÉ et al. (2012) montrent que

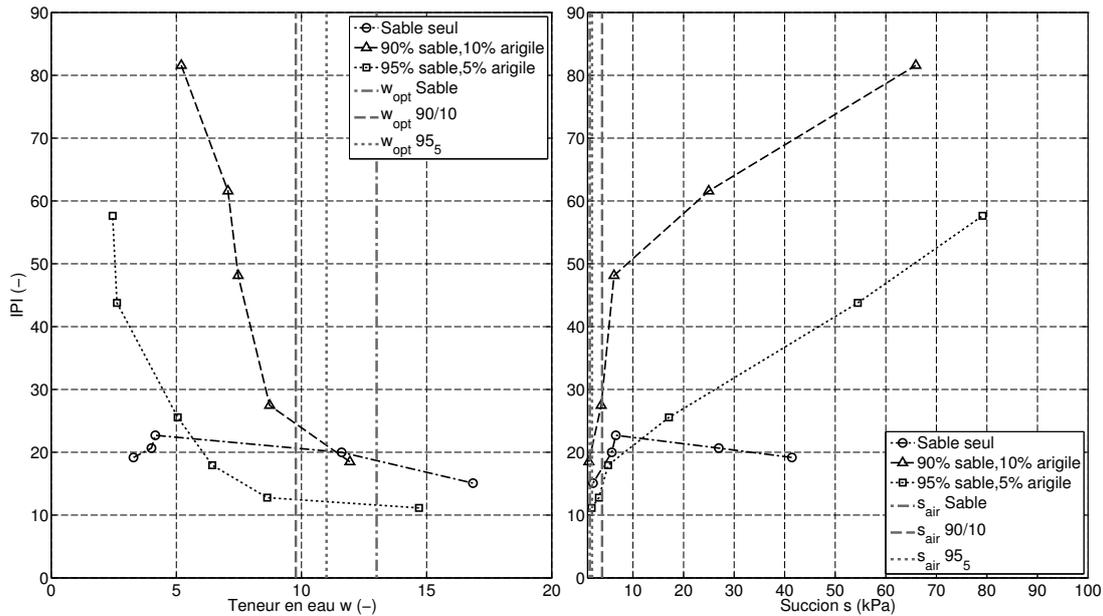


FIGURE 3.18 – Courbes CBR/w et CBR/succion pour différents mélanges de sables et d’argile (PURWANA 2013)

l’augmentation de la teneur en eau mène à des déformations avant rupture plus importantes, mais à des résistances mécaniques de rupture plus faibles.

De manière à affiner ces études, l’essai triaxial prend le relais. Dans l’ensemble, le comportement vis-à-vis de la teneur en eau est le même que celui du *RC*, impliquant des pertes de cohésion non drainée ( $c_u$ ) à mesure que la teneur en eau augmente (CRAIG et GALLAGHER 1997). Des essais sur des kaolinites compactées à  $-4$  et  $-1$  points de  $w_{opt}$ , à différentes énergies et modes de compactage, ont montré que (SIVAKUMAR et WHEELER 2000 ; WHEELER et SIVAKUMAR 2000) :

- quelles que soient les conditions de préparation, si la succion est augmentée, la résistance au cisaillement augmente ( $s = 0; 100; 300kPa$ )
- le mode, l’énergie et la teneur en eau de compactage ne changent pas la ligne d’état critique du matériau
- la ligne de compression normale est différente pour chaque matériau, elle dépend de la préparation
- à densité constante, quel que soit le mode de compactage (statique/dynamique), la ligne de compression normale ne change pas

Ces résultats montrent que la densité, et donc l’agencement de l’espace poral, jouent sur la résistance du matériau. La densité et la succion sont des paramètres essentiels qui pilotent le comportement élastoplastique. En revanche, la ligne d’état critique n’est pas influencée, car l’indice des vides critique est le même, quelle que soit la préparation.

Du point de vue du comportement élastique, plusieurs études ont été faites à l’aide de Bender Elements. L’objectif de l’essai est de générer une onde de cisaillement élastique dans l’échantillon et de mesurer le temps de traversée. Un module de cisaillement élastique  $G_0$  est alors déduit. Sur des sables silteux ou argileux, toute augmentation de la succion entraîne une augmentation de  $G_0$ . De même, plus la teneur en eau de fabrication est haute, plus  $G_0$  diminuera, et ce en n’importe quel point de la courbe de rétention du matériau compacté (SAWANGSURIYA, EDIL et BOSSCHER 2009). L’énergie de compactage joue elle aussi un rôle dans l’élasticité. Toute augmentation de cette dernière mènera à une augmentation de  $G_0$  sur toute la courbe de rétention du matériau (SAWANGSURIYA, EDIL et BOSSCHER 2008). HEITOR, INDRARATNA et RUJIKIAT-

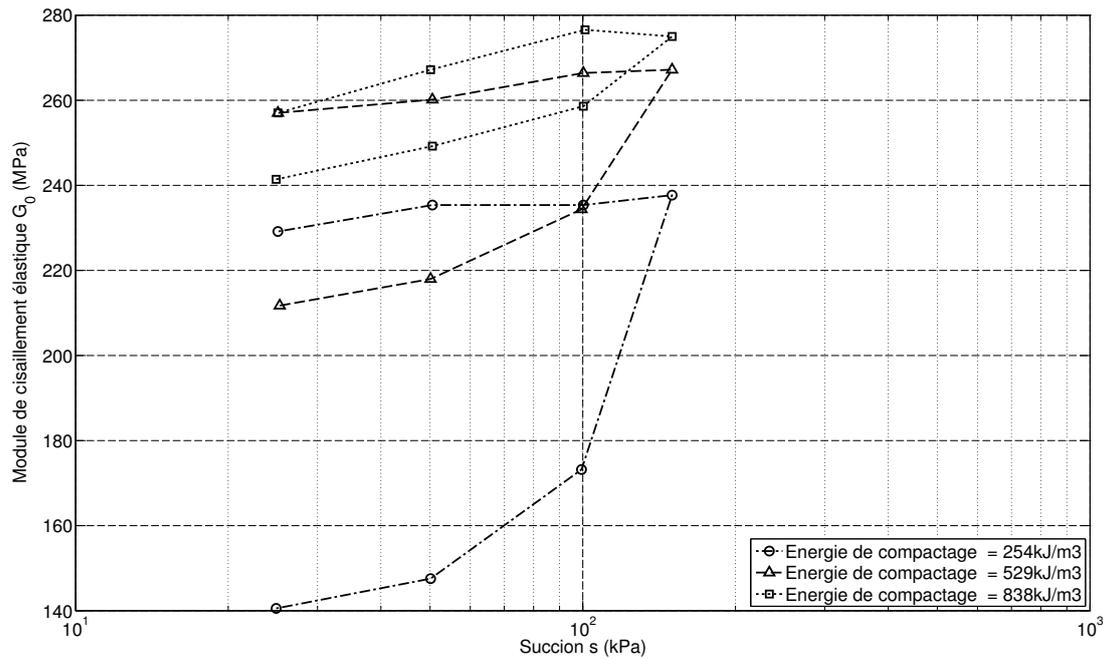


FIGURE 3.19 – Courbe montrant l’hystérésis de la réponse au cisaillement à différents degrés de compactage

KAMJORN (2014) montrent des résultats similaires, mais avec un cycle saturation/désaturation sur des sables silteux. L’hystérésis généralement observée sur la courbe de rétention se répercute sur la valeur de  $G_0$  en fonction de la succion (Fig. 3.19).

### 3.4.2 Étude de la réponse des marnes de l’A304 à l’IPI

Pour chaque point Proctor présenté précédemment, un IPI a été réalisé pour obtenir sa réponse mécanique. Les essais sont réalisés immédiatement après le compactage. Le fond du moule Proctor est enlevé en conservant la périphérie de l’échantillon. L’IPI est exécuté sur le fond du compactage. Le sol compacté est conservé dans le cerclage du moule durant l’essai. La presse se déplace à  $0.021 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Les valeurs de succion présentées découlent des mesures précédentes.

#### Analyse des essais IPI

Les figures 3.20 et 3.21 présentent les courbes IPI pour les deux matériaux, celui préparé à l’étuve et celui séché naturellement. Les courbes ont été séparées entre côté sec et côté humide. Les graphiques montrent clairement que pour une teneur en eau constante, la réponse mécanique n’est pas la même entre Proctor modifié et normal. Deux comportements émergent selon que l’essai se passe du côté sec ou du côté humide de l’optimum Proctor normal.

Dans le cas des essais du côté sec, la variation de succion semble avoir peu de conséquences sur les comportements du matériau. Les pertes relatives de succion observées dans la figure 3.8 ont un faible effet sur le comportement mécanique du matériau, comparé à l’effet de la densification du matériau par l’énergie apportée. Le matériau se densifie fortement, menant à un meilleur squelette granulaire. Les pertes de succion, quant à elles, ne fournissent pas une perte

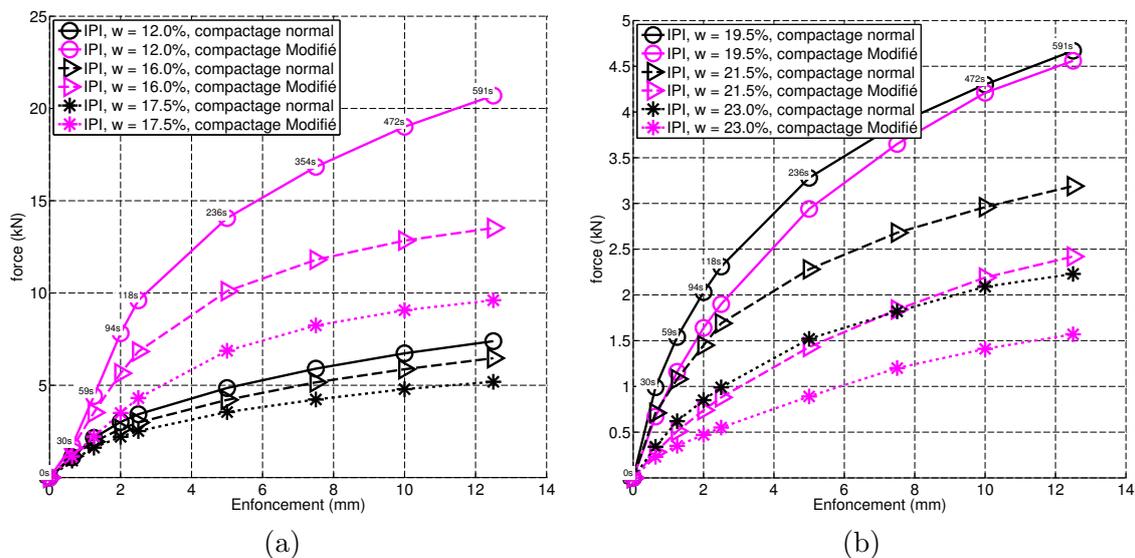


FIGURE 3.20 – Courbes de chargement lors de l’essai IPI pour le matériau séché naturellement (a) côté sec (b) côté humide

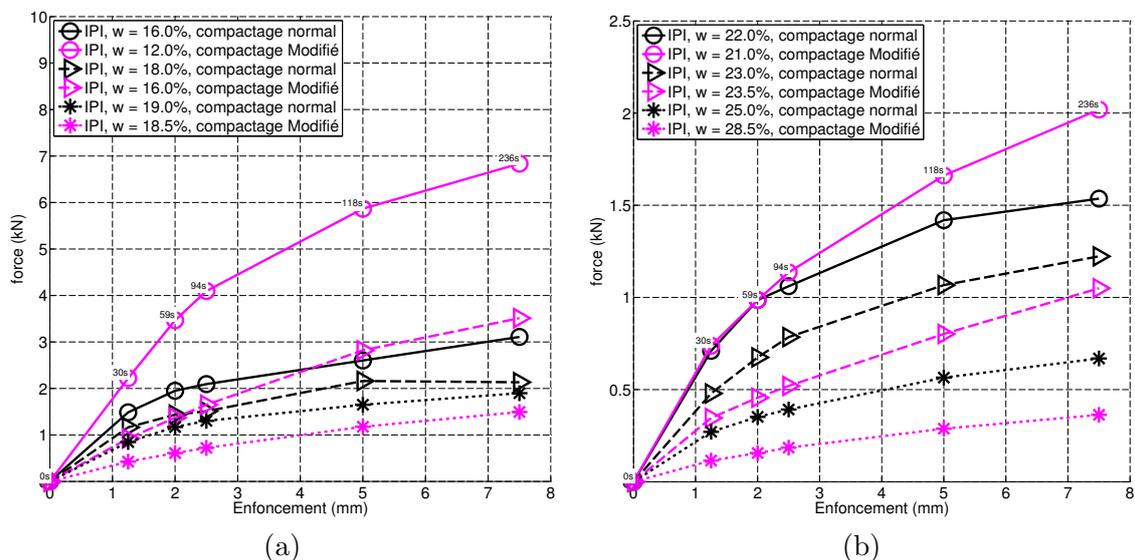


FIGURE 3.21 – Courbes de chargement lors de l’essai IPI pour le matériau séché à 110°C (a) côté sec (b) coté humide

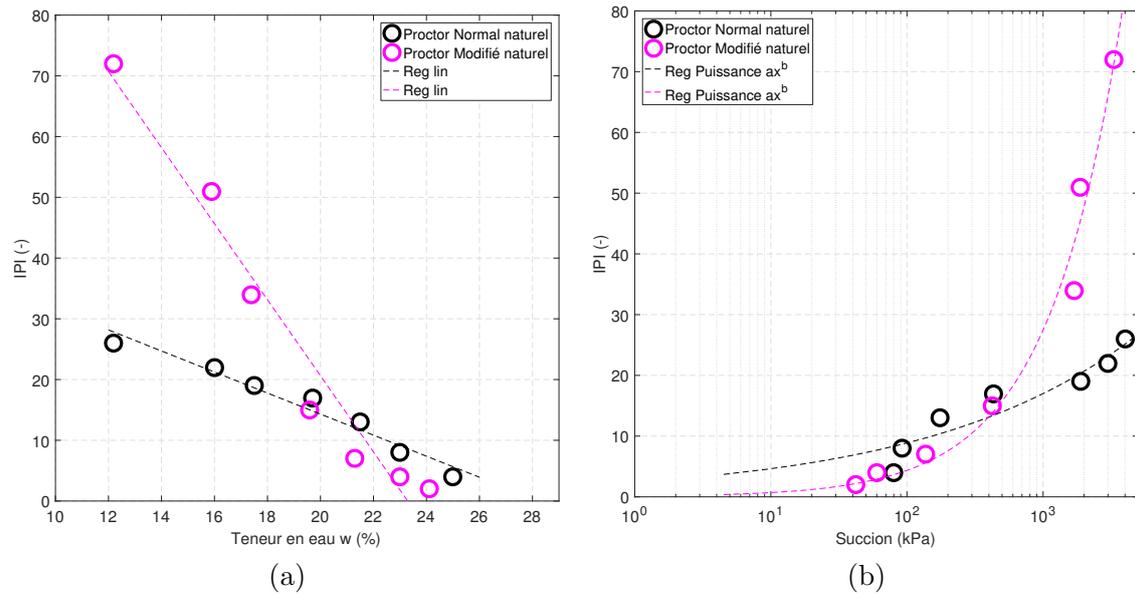


FIGURE 3.22 – Régressions sur les valeurs d'IPI en fonction de la teneur en eau et de la succion

de résistance consécutive pour contrer la densification.

Du côté humide, le matériau est déjà proche de la saturation, plus particulièrement au-delà d'une teneur en eau de 21%. Le sur-compactage tend donc vers une limite maximale de densité à mesure qu'il approche de la saturation, en considérant que les matériaux sont dans une situation non drainée, hypothèse valable par les faibles perméabilités observées. Le compactage est supposé à teneur en eau constante. Dans ce cadre, la plus grande partie de l'énergie apportée par le compactage va être non plus utilisée à la densification, mais à la modification des pressions interstitielles. Cette dernière augmente au cours du compactage, menant à des succions plus faibles. Le matériau ne se densifiant que peu, il ne gagne que peu de résistance mécanique. La diminution de la succion entraîne une forte perte de résistance mécanique dans le matériau, le menant à des portances trop faibles pour supporter le trafic des engins de chantier, impliquant l'orniérage du matériau. La valeur de son IPI est donc diminuée.

La figure 3.22 présente les valeurs d'IPI retenues selon la norme. En traçant les régressions linéaires correspondant aux points issus du Proctor normal et aux points issus du Proctor modifié, une zone de croisement est observable aux alentours d'une teneur en eau de 21%. Le même type de croisement peut être observé avec des régressions exponentielles, mais cette fois-ci en prenant en compte la succion au lieu de la teneur en eau. Le croisement a alors lieu aux alentours de 400 kPa. Dans les deux cas, le croisement correspond aux valeurs observées à l'optimum normal de compactage.

La mesure de l'IPI en fonction de la teneur en eau (Fig. 3.23) ne montre pas de perte de portance observable à mesure que la teneur en eau de l'échantillon diminue. À l'opposé, la planche montre une perte de résistance en pointe du côté sec par rapport à l'optimum Proctor. La différence de comportement vient des différences entre les deux essais. D'un côté, le pénétromètre présente une surface de contact moindre, une forme en pointe, et un chargement dynamique. À l'opposé, l'IPI est quasi-statique (vitesse faible) et utilise une surface plate. Il est à penser que le premier tend à solliciter de manière plus importante la résistance au cisaillement du sol, alors que le second ressentira une résistance au cisaillement, couplée à une résistance à la compression du matériau.

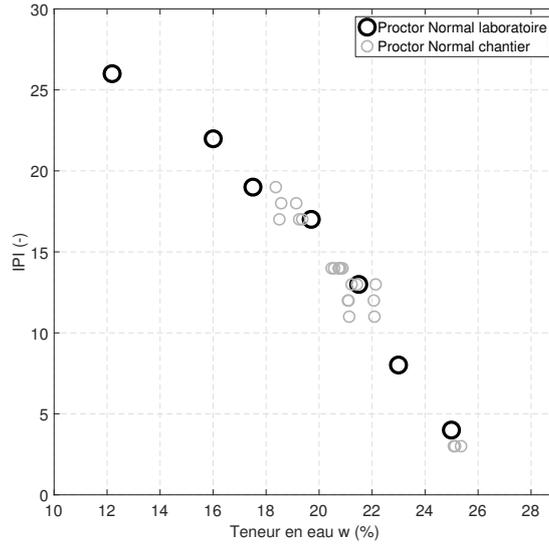


FIGURE 3.23 – Comparaison des points IPI chantier (passant à  $\phi 20mm$ ) et laboratoire (passant à  $\phi 5mm$ )

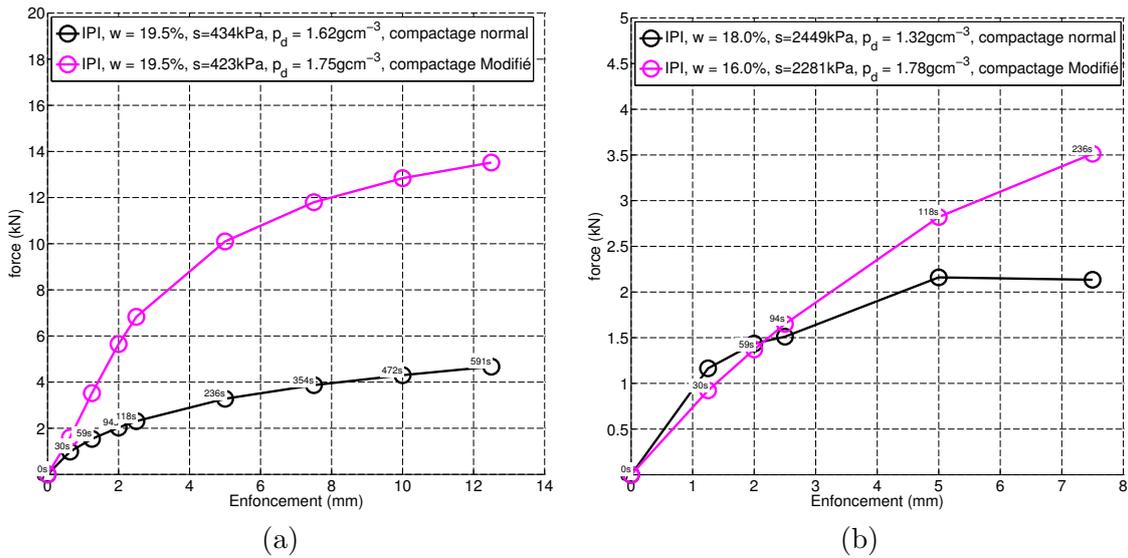


FIGURE 3.24 – Comparaison des courbes IPI pour des succions égales (a)  $440kPa$ , naturel (b)  $2200kPa$ ,  $110^\circ C$

La figure 3.26 montre les courbes IPI précédentes groupées par valeurs de densités proches. Une évolution claire de la résistance corrélée à l'augmentation de la suction apparaît.

De la même manière, en comparant les courbes pour des succions proches, mais des densités différentes (3.24), il apparaît un incrément de résistance couplé à l'augmentation de la densité. Ces résultats soutiennent les raisonnements précédents concernant le comportement du matériau au sur-compactage.

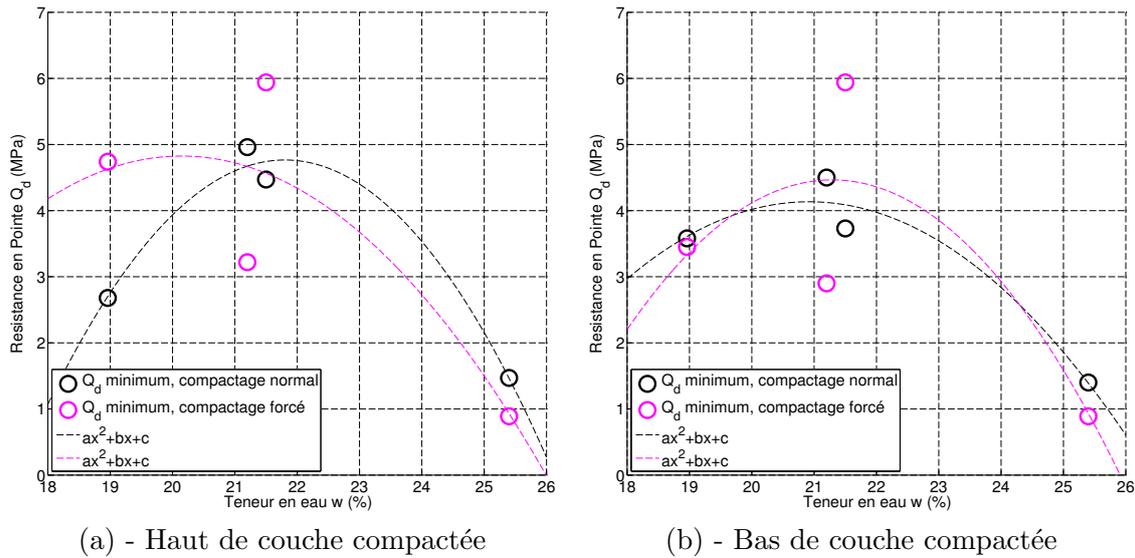


FIGURE 3.25 – Régressions sur les valeurs du Panda (Planche) en fonction de la teneur en eau

### Comparaison aux résultats des essais de chantier

La figure 3.25 présente les valeurs minimales de Panda pour les parties hautes (a) et basses (b) de la couche pour un compactage au V5 (brut et pulvimixé). La baisse de résistance vue pour l'IPI lors du passage du côté sec du matériau réapparaît. Les graphiques présentent bien la zone de transition entre humide et sec, avec le matériau à teneur en eau médium donnant des gains et des pertes par effet du sur-compactage. Le croisement de deux régressions polynomiales fournit aussi une zone où les valeurs de la teneur en eau de l'optimum Proctor sont entre 18.5% et 21.5%.

La bibliographie précédente présente des éléments qui confirment les rôles joués par la succion et la densité dans le cadre des IPI. En regardant les résultats précédents sous d'autres angles, il est possible de confirmer ces tendances, dans un premier temps, en observant le comportement du matériau pour des succions proches, puis en observant sa réponse mécanique pour des densités proches.

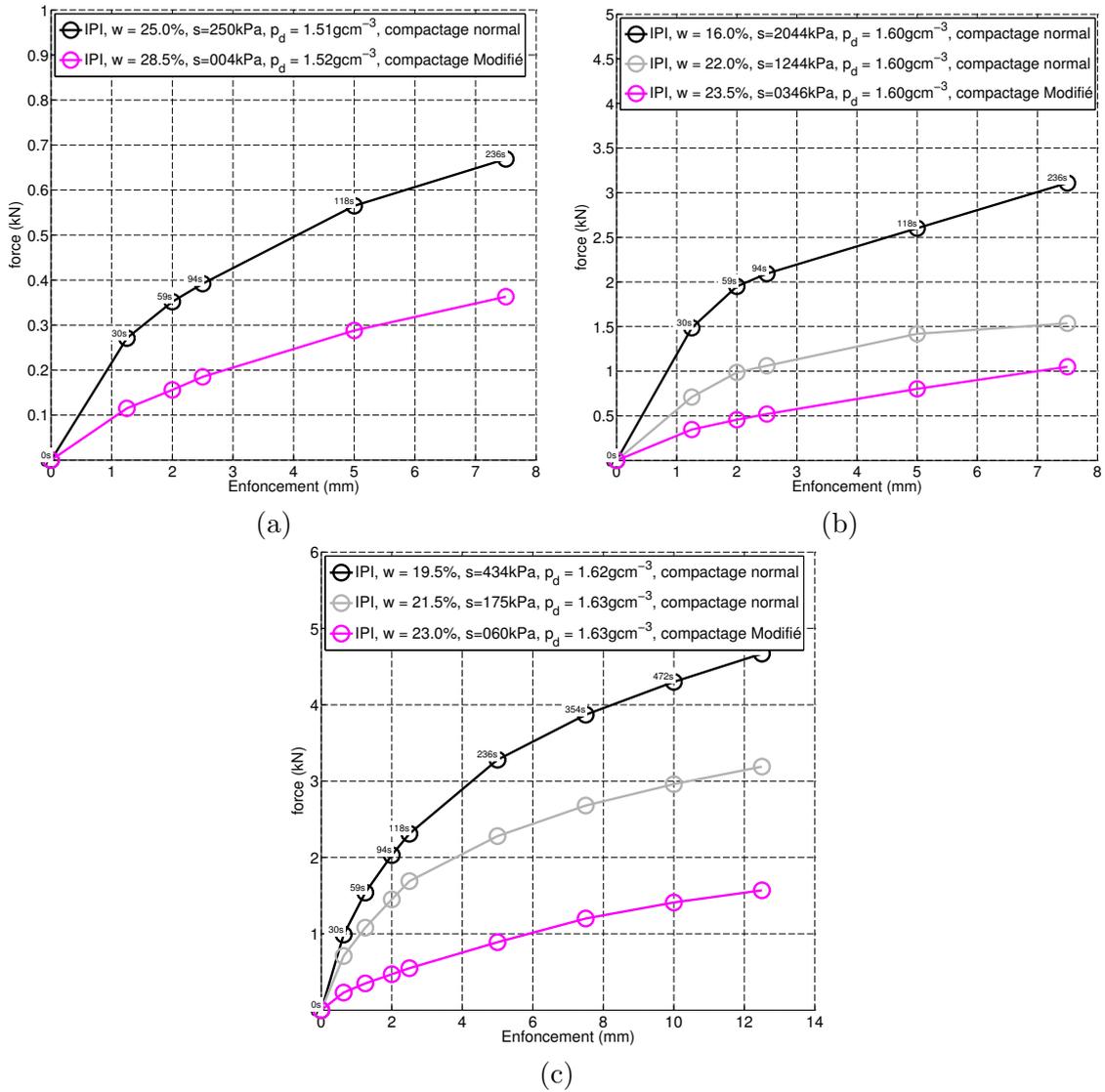


FIGURE 3.26 – Comparaison des courbes IPI pour des densités égales (a)  $1.5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $110^\circ\text{C}$  (b)  $1.6 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $110^\circ\text{C}$  (c)  $1.5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3}$ , naturel

### 3.5 Conclusions et comportements observés

Suite à la réalisation de compactages Proctor, l'analyse des rétentions et des IPI permet de comprendre les conséquences du compactage pour différentes modalités de préparation. Les méthodes de préparation fournissent des éléments quant aux problématiques des modes opératoires utilisés lors de la préparation et du contrôle des terrassements. Les courbes de rétention exécutées sur ces échantillons compactés en laboratoire permettent aussi de tirer des enseignements. Ils permettent d'anticiper l'évolution du matériau une fois en remblai en fonction de son état après mise en œuvre. Cela permet de confirmer et d'expliquer les observations faites sur la planche de compactage.

#### Du point de vue de la préparation des essais de laboratoire

Le résultat d'un essai Proctor dépend fortement de la préparation initiale du matériau avant

son compactage.

C'est le cas tout d'abord au séchage, où la norme préconise un étuvage à 50°C avant la mise à teneur en eau. Cette valeur, motivée par des risques d'altération des argiles par la chaleur, n'est pas toujours respectée sur chantier, pour des impératifs de temps. Or, les résultats montrent qu'une température trop élevée décale la valeur de teneur en eau de l'optimum Proctor de 2 points du côté sec dans le cas des marnes, et ne reflète donc plus le matériau qui va être utilisé sur chantier.

La mouture de la préparation jouera principalement sur la densité sèche d'optimum. Une mouture grossière consommera une partie de l'énergie pour l'arrangement et la déformation de mottes lors du compactage, menant à des macros vides plus importants, et donc à une densité plus faible, principalement du côté sec. Ceci est illustré par les observations faites sur la planche. Les teneurs en eau proches de l'optimum et une granulométrie plus répartie sur chantier mènent à un effacement de l'effet de la mouture.

De même, le mode de séchage influe sur le comportement en rétention. Il n'est plus représentatif de celui du matériau en place. Une diminution du degré de saturation apparaît à teneur en eau identique et une augmentation de la succion d'entrée d'air pour une densité initiale donnée. Cette variation témoigne aussi d'une modification du comportement de retrait/gonflement. Le chauffage intense a mené à une diminution des capacités de gonflement de la marne, probablement par modification chimique.

### **Du point de vue des terrassements**

Le premier problème qui apparaît est le changement du comportement en fonction de la densité initiale. Plus le matériau est compact, plus l'effet d'une humidification mènera à un désordre important, avec un potentiel de gonflement plus fort. À l'opposé, le matériau possédant une faible densité initiale montre un retrait plus important au séchage, qui pourrait mener sur des ouvrages à des dégâts conséquents par fissuration. Dans le cadre d'ouvrages sensibles, exposés à de grandes variations hydriques à long terme, les barrages en particulier, cela implique un bon contrôle de la réalisation des couches successives, et la prise en compte des jours non travaillés où le matériau compacté pourrait se détériorer. Une cure avant reprise ou une protection de l'ouvrage serait alors nécessaire.

La variation de la succion d'entrée d'air en fonction de la densité initiale implique un décalage de la teneur en eau au moment où la fissuration apparaît (PERON et al. 2009a; PERON et al. 2009b). Un matériau avec une densité sèche initiale plus importante aura une succion d'entrée d'air, et donc une fissuration, plus tardives. La teneur en eau de compactage joue aussi un rôle sur la vitesse d'apparition de la fissuration. Un matériau fortement serré (énergie importante), plutôt du côté sec, subit une dessiccation plus lente (gradient moins important entre sol et conditions limites) qu'un matériau du côté humide. Il atteint donc sa limite de retrait plus tardivement qu'un matériau humide, dont la densité sera forcément plus faible. Cela rappelle les résultats de la planche de compactage où les plots secs n'ont présenté aucun désordre, alors que les plots humides ont présenté une forte fissuration de surface.

Du point de vue de la portance du matériau, le sur-compactage mène à deux comportements différents selon le côté de l'optimum Proctor. Du côté sec, le sur-compactage mène à un fort gain de résistance dû à la forte densification et à la succion importante. Cette forte densité initiale est intéressante dans le cadre des terrassements routiers et ferroviaires, où les portances importantes

sont recherchées. En revanche, il sera important de protéger l'ouvrage des apports d'eau. Pour les barrages, une densité initiale plus faible limitera les gonflements à la mise en eau du matériau.

### Du point de vue de la mécanique des sols non saturés

Les essais IPI ont permis de mettre en évidence de manière probante les observations apportées par la planche, plus particulièrement concernant l'effet du sur-compactage et de la compétition entre succion et densité. La séparation des comportements entre côtés humide et sec est retrouvée, avec une zone de virage autour de l'optimum Proctor. Ce virage était observable sur la planche pour une teneur en eau  $m$ , soit autour de l'optimum, l'accroissement de la succion menant à une résistance plus importante, tout comme l'incrément de densité.

Du côté humide, le sur-compactage mène à une densification de plus en plus difficile. L'énergie du compactage est donc dérivée vers le potentiel de l'eau, menant à une perte de succion. Cette perte de succion mise en compétition avec la faible densification, limitée par la proximité de la saturation et l'air occlus, engendre donc une perte de résistance. Les plots de la planche du côté humide présentaient les mêmes phénomènes avec des densités plus faibles et des pertes de succion pour 12 passes de compacteur.

Du côté sec, le matériau se densifie plus facilement à l'aide de l'incrément d'énergie. L'eau, quant à elle, reste globalement dans les micropores et n'est que peu affectée par l'énergie de compactage. La densification et les faibles pertes de succion mènent donc à une forte amélioration de la résistance mécanique du matériau. De même, les plots de compactage in situ montraient un gain de densité avec parfois des pertes de succion, mais une hausse de la résistance mécanique au sur-compactage.

Comme vu sur la planche, l'apport d'une énergie de compactage complémentaire permet toujours de diminuer (ou de maintenir) l'indice des vides du matériau. La densité initiale plus importante du matériau mène à une porosité moins répartie, et globalement de taille moyenne plus faible, justifiée par une entrée d'air plus importante et un virage plus rapide de la saturation. L'effet de l'énergie de compactage complémentaire apportée du côté humide modifie la forme de la porosité, la rendant plus grande par l'effet des pressions interstitielles positives au compactage. L'eau, ne pouvant dissiper la pression interstitielle, déforme les pores de plus petite taille alors que les pores de grande taille se laissent écraser. Cela change la répartition de la porosité sans pour autant modifier l'indice des vides. Ce phénomène, couplé à l'air occlus dans le sol, mène globalement au matelassage. Une observation plus détaillée des variations des pressions interstitielles dans le sol lors du compactage pourrait permettre de confirmer cette problématique. La planche montre des résultats similaires, avec des évolutions de porosité au sur-compactage tout en gardant une porosité relativement fixe, menant même au matelassage d'un des plots humides.

---

# Étude et développement d'une cellule triaxiale pour simuler l'effet du compactage

---

*Développement de matériel expérimental et compactage*

## Sommaire

---

4.1	Description de l'essai triaxial de révolution . . . . .	98
4.2	Développement d'un appareil triaxial pour mesure de succion et changement de volumes . . . . .	106
4.3	Simulation du sur-compactage au sein d'une cellule triaxiale . . . . .	115
4.4	Conclusion . . . . .	128

---

Les chapitres précédents ont apporté des éléments quant au comportement des marnes au sur-compactage. L'objectif est d'aller plus loin, en passant par le développement d'un outil permettant de suivre de plus près l'effet du compactage. Pour ce faire, deux variables doivent être suivies au cours du compactage : la pression interstitielle et le volume de l'échantillon observé. Un appareil triaxial a donc été développé, permettant des mesures de succion par tensiométrie, ainsi que la mesure des changements de volume par corrélation d'images. Ce chapitre démarre par le descriptif d'appareils existants et des méthodes utilisées pour parvenir à ces deux mesures. Sont ensuite présentés le concept de la cellule, ainsi que son processus de conception. Pour finir, une première étude a été réalisée, permettant la prise en main du matériel, et apportant des réponses complémentaires concernant le sur-compactage des marnes. Des échantillons de marne, compactés à l'énergie Proctor normale, sont soumis à des cycles de charge-décharge reproduisant le passage d'un compacteur à l'aide de la cellule triaxiale.

## 4.1 Description de l'essai triaxial de révolution

L'essai triaxial de révolution (Fig. 4.1) se présente sous la forme d'un échantillon cylindrique, généralement d'élancement 2 pour éviter l'influence du frottement de l'embase et de la tête d'échantillon, soumis à un confinement isotrope, généré par un fluide en pression. Le tout est placé sur une presse imposant un déplacement en tête de l'échantillon menant au cisaillement. Les premières générations de cellule utilisaient de l'air pour la mise en pression. Les dangers d'une telle procédure ont rapidement amené les expérimentateurs à utiliser de l'eau ou de l'huile pour le confinement. L'objectif principal de cet essai est de pouvoir mesurer des résistances au cisaillement à différents degrés de confinement et de consolidation, permettant de revenir à l'angle de frottement et à la cohésion de la théorie de Mohr-Coulomb. L'intérêt principal est de pouvoir reproduire les conditions des contraintes in situ subies par le sol. Les essais peuvent être exécutés avec ou sans drainage de l'eau interstitielle.

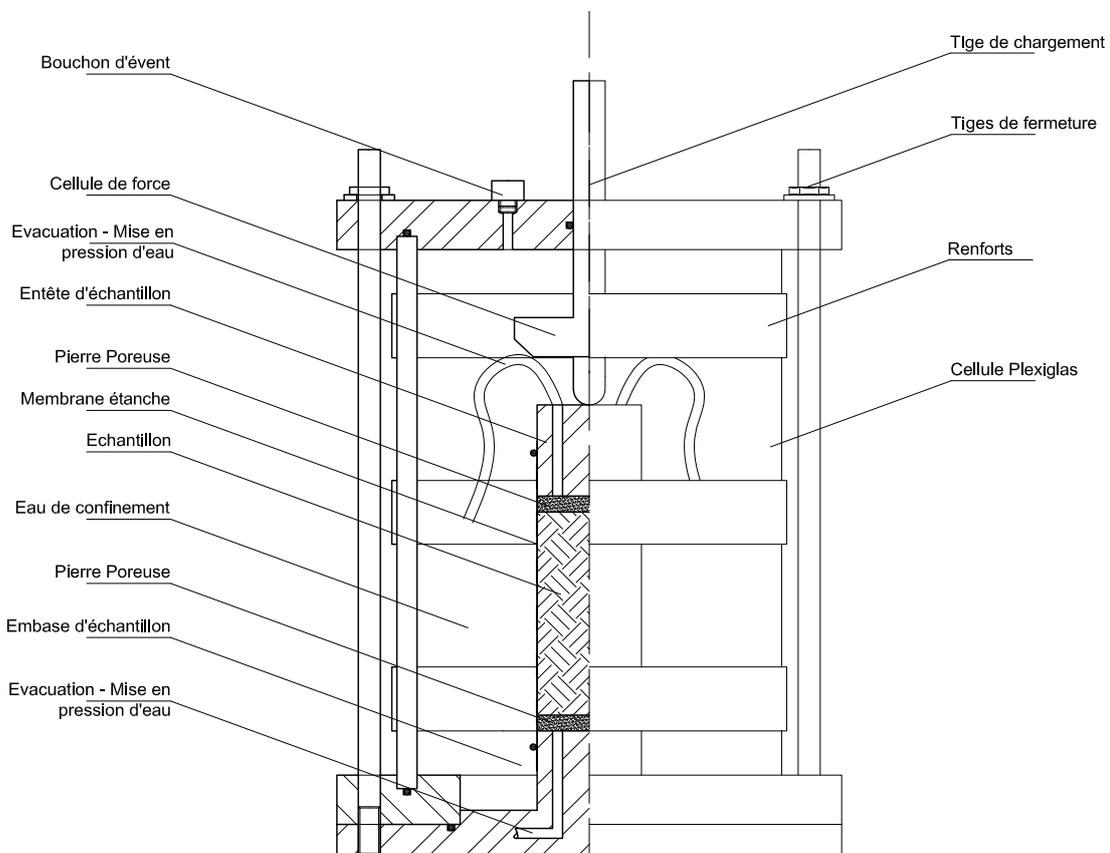


FIGURE 4.1 – Plan de principe d'une cellule triaxiale

La mesure du déplacement n'est en général pas un problème, cette dernière étant réalisée par un capteur LVDT (Linear Variable Differential Transformer) à l'extérieur de l'enceinte de confinement. De plus, la plupart des presses basiques trouvées dans le commerce peuvent fournir des déplacements contrôlés au micromètre près. En revanche, la mesure de force peut poser problème. En effet, si le capteur est placé à l'extérieur de l'enceinte de confinement, le frottement entre l'axe de charge et l'enceinte est à déduire de la mesure. Il est préférable de placer la mesure dans l'enceinte de manière à pallier ce défaut (GEORGOPOULOS 2010). Lors des phases de confinement, il sera aussi préférable d'avoir un bon glissement de l'axe de chargement, la mesure de déplacement se trouvant sur ce dernier. Dans le cas contraire, il sera très difficile

d'établir une courbe correcte de la consolidation verticale de l'échantillon. Ce problème peut être contourné par l'application d'un léger déviateur à l'aide d'un contrôle en force de la presse.

#### 4.1.1 Adaptation pour l'étude des pressions interstitielles et de la succion

Dans le cadre de l'étude des sols non saturés, émerge la nécessité de calibrer les modèles numériques. Il faut donc mesurer ou contrôler les variables d'état des matériaux pour ensuite paramétrer les modèles. La mesure de la pression interstitielle, facile du côté des pressions positives, devient un challenge sur des sols présentant de la succion.

##### Mesures de pression interstitielle et de succion

La mesure de la pression interstitielle repose sur plus d'un élément. Même si elle peut être généralement considérée comme évidente pour les pressions positives, il n'en reste pas moins quelques pièges à éviter pour avoir une mesure fiable et réactive. Bien souvent, la mesure repose sur le capteur de pression placé dans le contrôleur pression/volume permettant la mesure des entrants/sortants en eau de l'échantillon. Cela implique généralement un chemin conséquent pour l'eau dans une tubulure (GEORGOPOULOS 2010). Les pertes de charge jouent alors un rôle important non seulement pour la réactivité de la mesure, mais aussi pour sa précision. Il est préférable de placer toutes les mesures directement au pied ou en tête de l'échantillon, sous la pierre poreuse intermédiaire entre sol et entrées/sorties d'eau. Cela vaut d'autant plus pour la mesure de succion où la nucléation pourrait venir interférer dans les tubulures. La taille de l'échantillon est un des problèmes principaux rencontrés pour l'étude des matériaux à faible perméabilité (argiles, marnes). Plus l'échantillon sera grand, plus les temps d'homogénéisation de pression/succion au sein de l'échantillon seront importants, menant à des essais pouvant durer plusieurs mois.

La mesure de succion dans les cellules triaxiales passe en général par l'intermédiaire d'un de ces deux outils : le tensiomètre et le psychromètre.

Plusieurs solutions existent pour le placement du tensiomètre. Certains utiliseront des tensiomètres adaptés directement dans l'embase de la cellule. La cellule peut aussi utiliser directement la pierre d'embase couplée avec un capteur de pression. L'avantage présenté est une resaturation possible de l'espace entre pierre et capteur par l'intermédiaire des contrôleurs de pression/volume. En revanche, ce type de montage dépassera difficilement des succions de  $80\text{kPa}$ . D'autres préféreront modifier la cellule pour adjoindre dans l'embase un tensiomètre de haute capacité trouvable sur le marché. Cela peut poser problème vis-à-vis des drainages de la cellule, les tensiomètres du marché étant souvent encombrants (SIMMS et GRABINSKY 2009), comme présenté en figure 4.2. Or, une embase plus grande implique un échantillon plus grand, et donc un temps d'homogénéisation des pressions interstitielles plus long. L'installation hors embase est aussi pratiquée, adaptée à la membrane latérale de l'échantillon et mesurant la succion en partie centrale de ce dernier (MUNOZ-CASTELBLANCO et al. 2014; MILATZ et GRABE 2014).

Les psychromètres sont en général placés sur le côté de l'échantillon (Fig 4.3), adaptés à la membrane. Le problème est la limitation que cela induit pour les confinements appliqués à l'échantillon en raison de la fragilité des capteurs. D'autres vont jusqu'à des placements en interne dans l'échantillon, malgré la gêne et les points de fragilité créés par cette procédure (BLATZ et GRAHAM 2000; ZERHOUMI 1995).

Ces appareils de mesure sont difficilement utilisables dans le cadre des études thermiques où leur étalonnage sera totalement dépendant de la température appliquée à l'échantillon. Dans ce cas, une méthode de contrôle de succion sera plus facile à maîtriser.

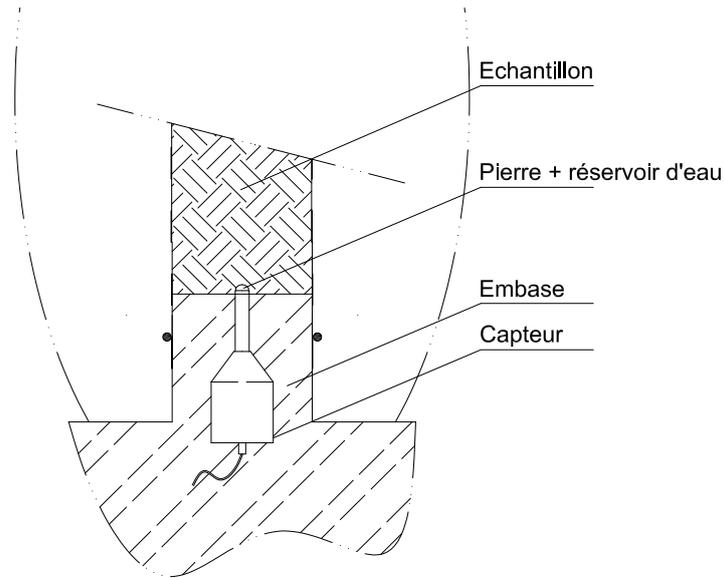


FIGURE 4.2 – Embase triaxiale avec capteur tensiométrique (SIMMS et GRABINSKY 2009)

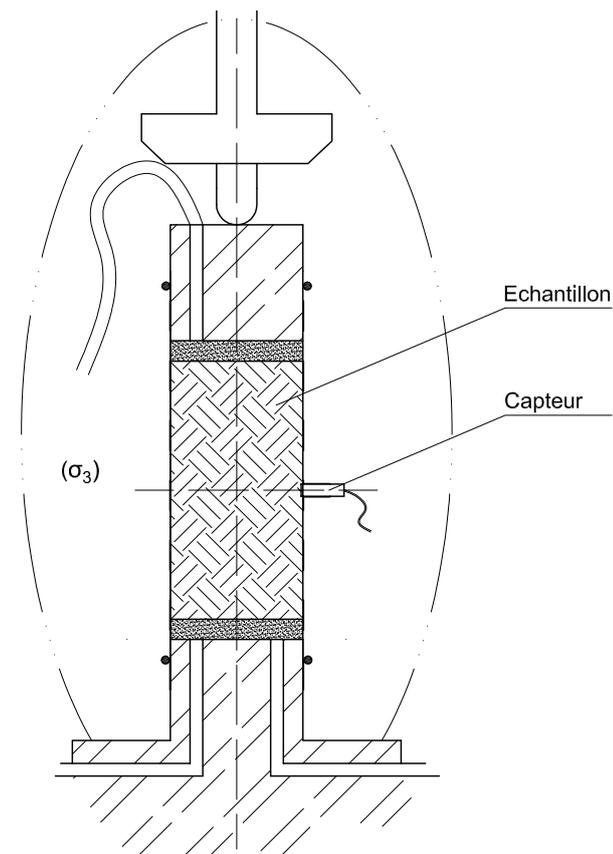


FIGURE 4.3 – Échantillon pour essais triaxiaux avec capteur latéral monté sur membrane

### Contrôle de la succion

Les cellules triaxiales se prêtent bien à deux méthodes de contrôle de succion : la translation

d'axe et le contrôle par phase vapeur, ceux-ci ne demandant pas de fortes modifications.

La translation d'axe est généralement la méthode la plus répandue et la plus appréciée pour sa facilité de mise en œuvre, même si certains débats persistent quant à ses effets sur la nucléation (Chap. 1.3.1). La cellule est équipée d'une pierre poreuse à forte entrée d'air à la base du drainage, et d'un drainage complémentaire en tête pour pouvoir appliquer la surpression d'air (Fig. 4.4). Même si les systèmes de mise en pression de l'air présentaient des complications dans les années 80 (HO et FREDLUND 1982), la démocratisation de la méthode a mené à la création de matériel fortement simplifié. Cette méthode a l'avantage de se prêter facilement aux essais thermiques (SALAGER 2007; ROMERO 1999) sans nécessiter de calibration complémentaire.

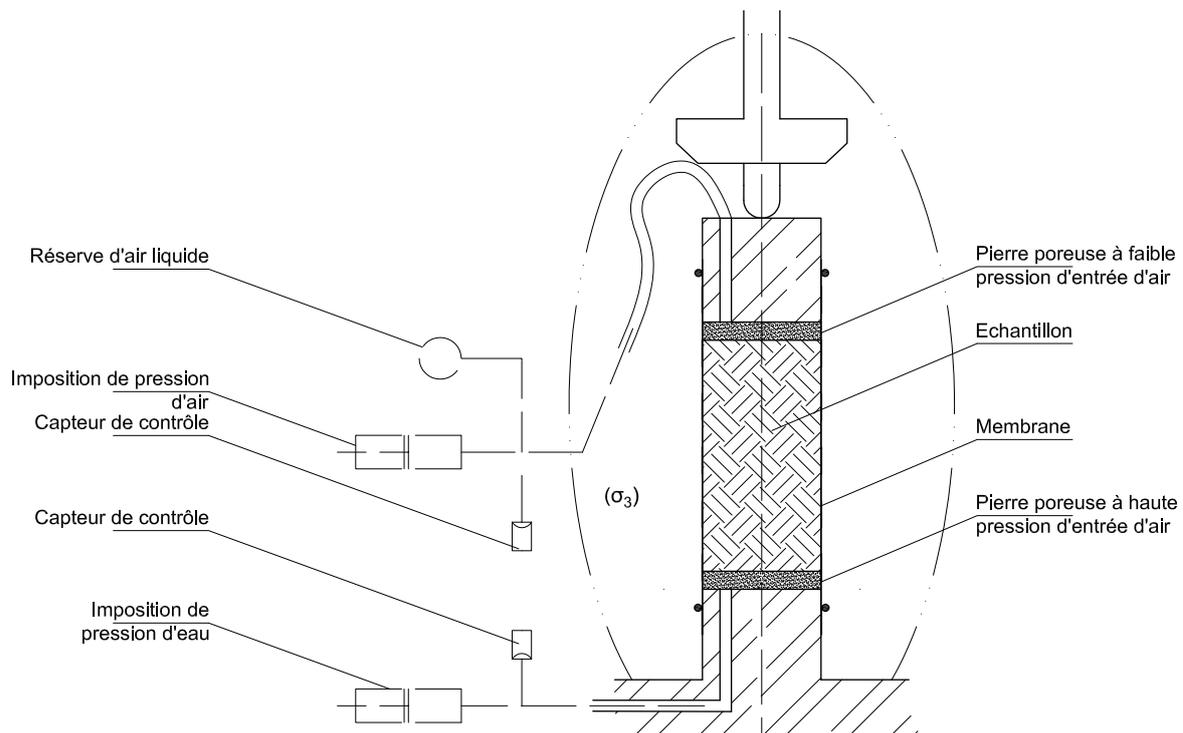


FIGURE 4.4 – Principe d'adaptation de la translation d'axe sur un échantillon triaxial

Le contrôle de succion par phase de vapeur ne demande qu'à attribuer deux entrées à l'air, une en tête et une en pied d'échantillon (Fig. 4.5). L'objectif est de réussir à créer une circulation d'air à une humidité relative contrôlée. Cette méthode présente tout de suite des problèmes pour des matériaux dont la perméabilité à l'air est très faible. Les temps d'homogénéisation seront tout de suite très importants, ce mode de contrôle se prête donc mieux à des limons ou à des sables (NISHIMURA et FREDLUND 2003). Plusieurs psychromètres peuvent être placés autour de l'échantillon pour s'assurer de la bonne homogénéité du matériau lors de l'essai (BLATZ et GRAHAM 2000; BLATZ, CUI et OLDECOP 2009). Cette procédure demande des calibrations plus complexes pour les études thermiques, car la pression de vapeur saturante de l'eau  $u_w^{sat}$  dépend fortement de la température.

#### 4.1.2 Adaptation pour la mesure des changements de volume

Contrairement à l'œdomètre, où les déformations sont unidimensionnelles, l'essai triaxial induit des déformations tridimensionnelles. L'intérêt de connaître du mieux possible ces défor-

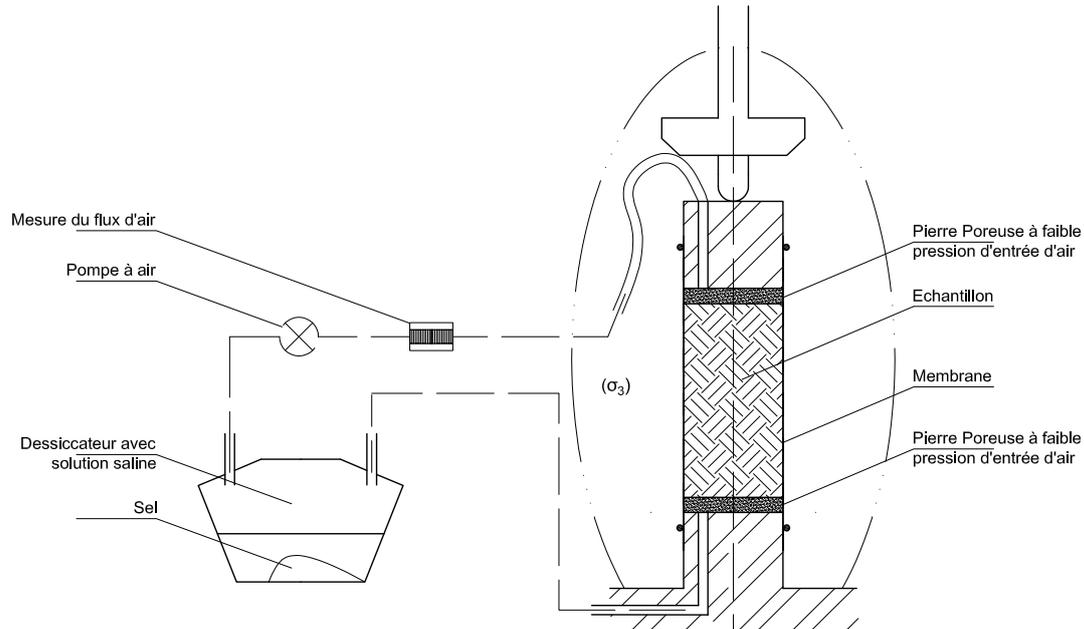


FIGURE 4.5 – Principe d'adaptation du contrôle de phase de vapeur sur un échantillon triaxial (BLATZ et GRAHAM 2000)

mations est de pouvoir établir les modules élastiques et plastiques, ainsi que le coefficient de Poisson du sol dans un état de contrainte donné. Le but est de s'assurer d'avoir la donnée la plus précise possible pour pouvoir appliquer cette dernière dans les modèles, ou simplement calibrer ces derniers. De nombreuses méthodes se sont développées au cours des années pour parvenir à obtenir cette donnée.

Dans le cadre d'un essai saturé, il est relativement facile de mesurer les changements de volume de l'échantillon. En effet, l'eau sortant de l'échantillon lors d'une consolidation ou d'un cisaillement drainé donne une valeur précise, au millimètre cube près. En revanche, les sols non saturés, comprenant une phase d'air et une phase d'eau, voire un fluide interstitiel compressible, ne permettent pas une telle approche.

### Mesure par le confinement

Si la mesure de l'eau sortant de l'échantillon n'est pas possible, il reste l'étude du fluide de confinement. L'eau entrant et sortant dans l'espace de confinement est un bon indicateur des changements de volume ayant lieu dans la cellule, et donc de l'échantillon. Malheureusement, l'utilisation d'une cellule classique pour cette mesure comporte quelques biais. D'une part, des bulles d'air peuvent être facilement emprisonnées dans la cellule. La mesure est alors gênée par le changement de volume des bulles selon le confinement appliqué. La déformation des parois de la cellule mène aussi à des erreurs importantes sur le changement de volume mesuré. Pour finir, toute variation importante de température dans le laboratoire génère des déformations de l'enceinte de confinement, et donc des erreurs de mesure (HEAD et EPPS 1986).

Pour pallier toutes ces problématiques, des modifications importantes ont été apportées aux cellules triaxiales : tout d'abord, la cellule double paroi (Fig. 4.6). La pression étant la

même des deux côtés de la paroi, et en mesurant les variations du (petit) volume de fluide entre l'échantillon et la paroi, une précision beaucoup plus importante est obtenue grâce à la limitation des déformations possibles (WHEELER 1986 ; SIVAKUMAR et WHEELER 1993). Il s'agit en fait d'une variante de la technique de mesure par paroi interne, qui est plus compliquée à mettre en place, car elle demande un utilisateur pour réguler les pressions (BISHOP et DONALD 1961). Cette méthode utilise un cylindre ouvert et deux fluides différents en contact (l'un à l'intérieur du cylindre et l'autre à l'extérieur). La mesure se fait par réglage manuel du niveau du fluide intérieur pour parvenir à la mesure des changements de volume.

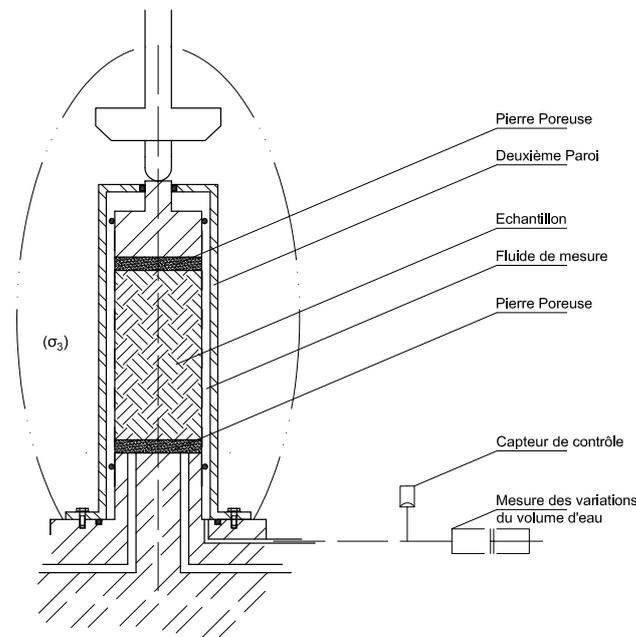


FIGURE 4.6 – Principe d'une mesure de variation de volume par double paroi

### Mesure par fluides sortants de l'échantillon

Reprenant les principes de base de mesure de volume dans les sols saturés, certains se sont intéressés à la mesure de l'air sortant de l'échantillon (ADAMS, WULFSOHN et FREDLUND 1996). Cette méthode se couple très bien à la méthode de contrôle par translation d'axe, les matériels modernes permettant à la fois la mesure des volumes d'air entrant-sortant couplés à un contrôle de la pression. Le problème de cette méthode réside dans les grandes quantités d'air en présence et leur forte sensibilité aux variations de température quand il s'agit de mesurer un volume. De plus, des pertes, certes très faibles, peuvent être observées à travers les tubulures plastiques. Pour compenser les erreurs lors des phases d'essais à faible changement de volume (cisaillement), un système de mise en pression de l'air par de l'eau a été mis en place (GEISER 1999). Cela permet de limiter fortement les volumes d'air pour la mesure.

### Mesure directe sur l'échantillon

Trois grandes méthodes sont généralement utilisées pour mesurer directement les changements de volume. En revanche, ces méthodes ont l'inconvénient d'être plus ou moins ponctuelles, menant à une reconstruction d'un volume par l'estimation de l'effet tonneau visible sur

les échantillons.

La plus basique utilise des capteurs de déplacement locaux type effet Hall (Fig. 4.7), ou des TDR pour mesurer l'accroissement de la circonférence de l'échantillon en une tranche donnée (MUNOZ-CASTELBLANCO et al. 2014; BOYD et SIVAKUMAR 2011). En complément, plusieurs tranches peuvent être instrumentées pour affiner la mesure. Des capteurs peuvent être ajoutés verticalement pour permettre les mesures des déplacements verticaux. Des capteurs à induction peuvent être utilisés pour estimer cette déformation et éviter tout contact avec l'échantillon (SALAGER 2007).

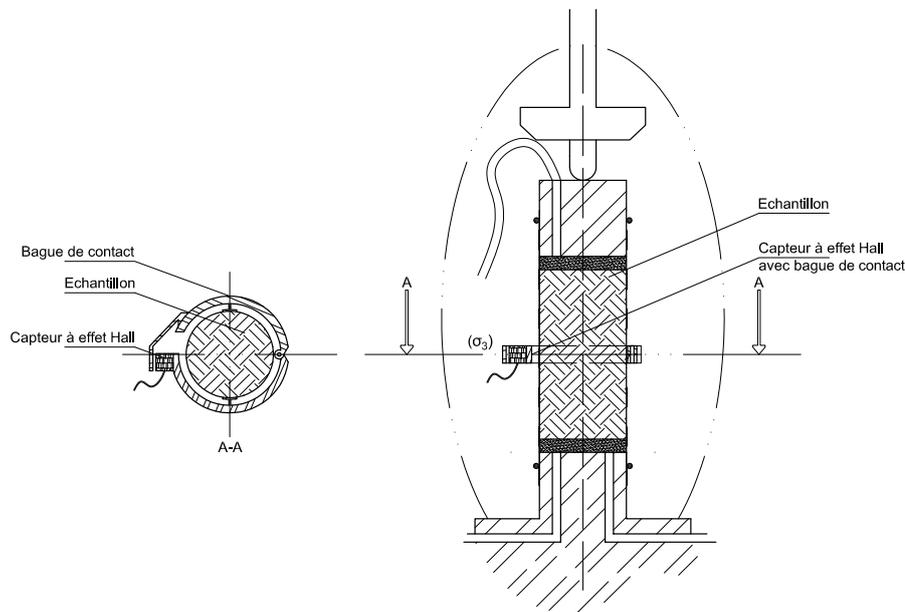


FIGURE 4.7 – Principe d'une estimation de variation de volume par capteur à effet Hall

La dernière méthode consiste en l'utilisation d'un laser, qui mesurera les temps d'aller-retour de la lumière. Le laser est placé à l'extérieur de la cellule de confinement, et passe donc à travers le PVC et l'eau (Fig. 4.8). Cette méthode demande donc une calibration préalable. La mesure s'effectue en plusieurs points, donnant le tonnelage de l'échantillon sur une ligne verticale. Par révolution, il est possible d'estimer le volume à tout moment de l'essai (ROMERO et al. 1997).

### Mesure par analyse d'image

La démocratisation des méthodes d'imagerie dans le cadre de la mesure de champs de déformation a poussé les géotechniciens à leur utilisation sur les cellules triaxiales. Le challenge vient tout particulièrement du fait que la cellule est cylindrique et induit donc des déformations optiques.

Dans une première approche, une caméra a été utilisée pour observer les contours de l'échantillon (GACHET et al. 2007). La photo a été prise à travers la cellule plexiglas transparente, une forte déformation optique a donc été observée. Cette méthode fonctionnait par l'intermédiaire d'une calibration effectuée sur une série de faux échantillons dont les dimensions étaient connues de manière précise (Fig. 4.9). Une courbe de calibration en a été tirée, permettant de corriger

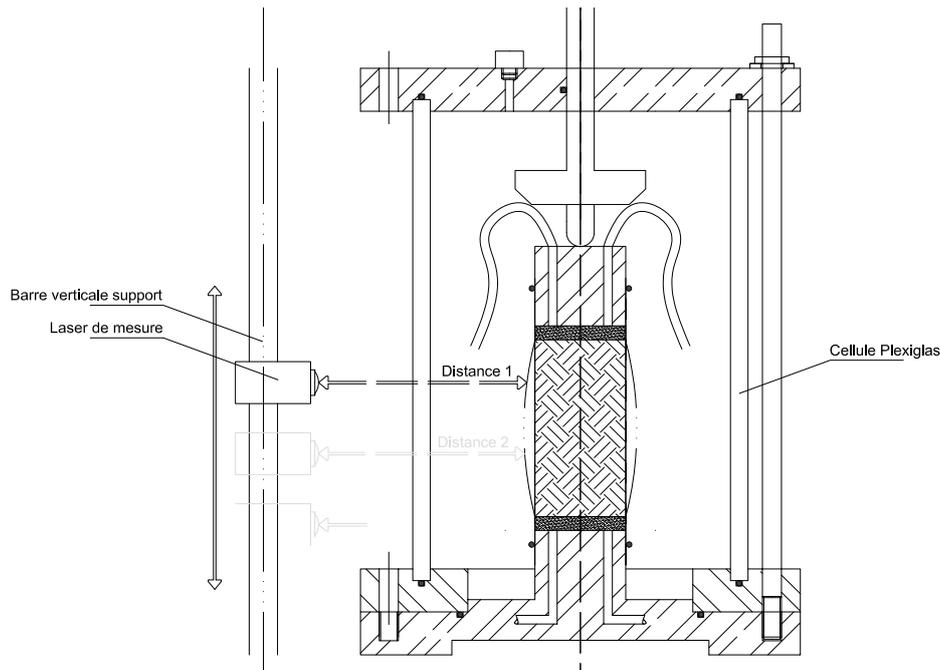


FIGURE 4.8 – Mesure de changement de volume par va-et-vient laser

la photo de l'échantillon pour obtenir ses dimensions réelles. BHANDARI, POWRIE et HARKNESS (2012) ont poussé l'expérience plus loin en estimant les champs de déformation locaux sur l'échantillon, recouvert d'une grille, toujours avec un besoin de correction dû à la circonférence de la cellule. Le principal problème rencontré vient de l'estimation des déformations hors champ (en direction de l'appareil photo) qui ne peuvent être prises en compte. Une corrélation faite à l'aide de deux caméras peut résoudre le problème.

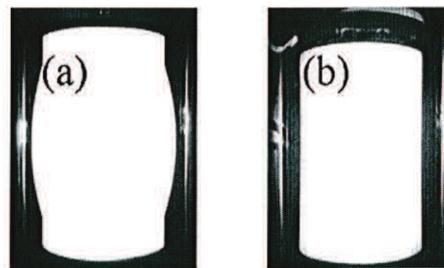


FIGURE 4.9 – Photos d'échantillon dans une cellule triaxiale (GACHET et al. 2007)

Une méthode plus poussée utilise la tomographie rayon X. L'objectif est de pouvoir voir au cœur de l'échantillon. Grâce à cette méthode et à de puissants algorithmes de calcul, il est possible de reconstruire des échantillons complets en trois dimensions, et ce à partir d'une série d'images réalisée par rotation de l'échantillon (KHADDOUR 2015). Cette méthode, très efficace pour l'observation de milieux artificiels (billes de verre) ou de sable, présente néanmoins des complications dans le cadre de l'étude des argiles non saturées. Il est, en effet, dans ce cadre difficile de pouvoir séparer l'eau du sol sur les images, en raison du manque de précision.

## Bilan des différentes méthodes

Dans le cadre de l'étude des sols, il est tout de même intéressant de pouvoir comparer toutes les méthodes, et plus particulièrement leur précision. Le tableau 4.1 présente un bilan rapide des erreurs relatives de la plupart des méthodes, ainsi qu'un rappel de leurs défauts principaux.

Méthode	Défauts	Erreur
Confinement : Cellule Std	Air emprisonné et température	$\pm 0.2\%$
Confinement : Cellule Double Paroi	Dépendance à T	$\pm 0.8\%$
Contôleur Air	Forte dépendance à P,T	$\pm 1.1\%$
Contrôleur Eau/air	Moins forte dépendance à P,T	$\pm 0.11\%$
Capteur Effet Hall/LVDT	Petites déformations, un rayon	Importante
Laser	Calibration compliquée	$\pm 0.007\%$
DIC Tonneau	Calibration compliquée	$\pm 0.1\%$

TABLE 4.1 – Résumé et erreurs moyennes des méthodes estimées pour un échantillon de  $200\text{cm}^3$  (GEISER, LALOUÏ et VULLIET 2000)

## 4.2 Développement d'un appareil triaxial pour mesure de succion et changement de volumes

Cette partie est dédiée à la conception d'une cellule triaxiale permettant la mesure de succion, tout en permettant la mesure des changements de volume de l'échantillon par la corrélation d'images. L'objectif est de créer une cellule capable d'affiner les hypothèses posées par les chapitres précédents.

### 4.2.1 Problématiques à résoudre

Comme présenté précédemment, la problématique de la mesure des changements de volume de l'échantillon n'est pas évidente. Dans ce contexte, le choix s'est porté sur la mesure de champs par la corrélation d'images (DIC pour digital image correlation). L'approche proposée par GACHET et al. (2007) semble intéressante, au sens où elle permet de visualiser les dissymétries (partielles) que l'échantillon pourrait subir, et mener à l'avenir à une observation des bandes de cisaillement. Le problème principal posé par leur système est la déformation générée par la forme cylindrique classique de la cellule. Une évolution s'impose ici de manière à limiter les déformations apportées par les deux diffractions subies par la lumière (eau/plexiglas et plexiglas/air) lors des changements de matière. Des surfaces d'échange planes s'imposent donc de manière à diminuer les effets.

La cellule de révolution possède un avantage certain : sa forme cylindrique lui permet de bien résister à la pression appliquée à l'intérieur, et limite fortement les déformations. L'adjonction de fenêtres plates induit donc un problème de résistance et de déformation de la cellule. Qui plus est, la taille de fenêtre doit être adaptée à la taille de l'échantillon qui sera observé sous peine de perdre une partie de l'image. La figure 4.10 présente la prise en compte des réfractions. Le choix d'un échantillon de  $50\text{mm}$  de diamètre vient, d'une part, d'un équilibre entre les durées d'homogénéisation pouvant être longues dans des marnes et, d'autre part, de la volonté de conserver un échantillon de taille suffisamment représentative. Une seule fenêtre ne serait pas suffisante. L'existence de déplacement hors plan fausse l'analyse d'image. Pour contrer ce problème, il faut

au moins deux appareils photos, pour une mesure tridimensionnelle surfacique, et donc deux fenêtres.

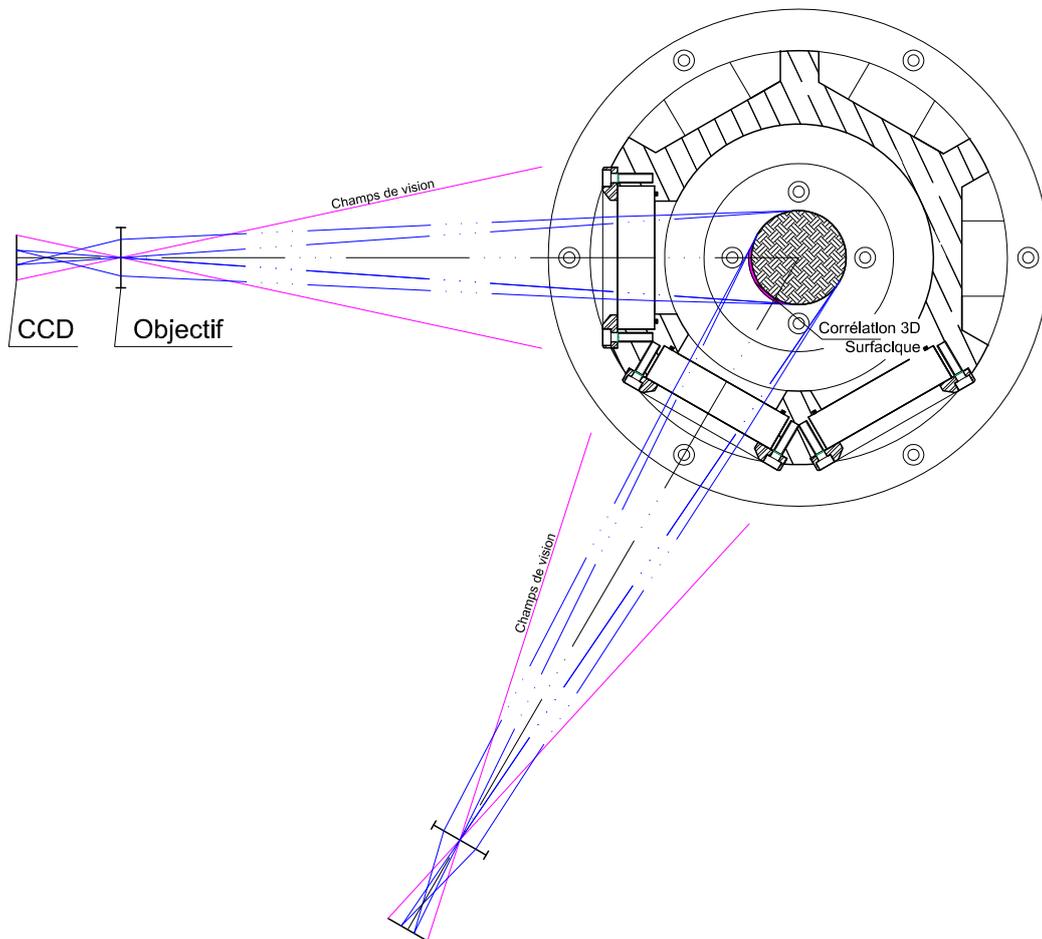


FIGURE 4.10 – Principe optique de la cellule triaxiale pour corrélation d’images avec deux appareils

Le dernier problème est la mesure de succion. L’étude critique du chapitre 1 a montré que l’utilisation de la translation d’axe présente un risque de modification de la réponse hydromécanique, particulièrement par rapport à la nucléation. Au-delà de la simple nucléation, les tailles de bulles peuvent varier drastiquement, et donc la compressibilité du fluide interstitiel. Le chapitre 3 ayant mis en évidence l’enfermement d’air au compactage, la translation d’axe sera donc mise au banc pour nos essais. La cellule sera tout de même conçue pour pouvoir la supporter au besoin, et sera donc équipée d’un tensiomètre classique. Celui-ci ne permettra certes pas d’étudier le matériau du côté sec de l’optimum, mais sera suffisant pour une étude du côté humide.

#### 4.2.2 Vérification mécanique et adaptation à la fabrication

Le montage final présentant trois fenêtres montre donc une série de points possibles de fragilité pouvant mener à des ennuis mécaniques. Le montage des fenêtres plexiglas peut poser problème. Une cellule cylindrique ne subit que de la traction vis-à-vis des contraintes générées

par la montée en pression pour le confinement. Or, l'ajout des fenêtres implique leur poussée vers l'extérieur par le confinement. Ces dernières risqueraient, sous l'effet de la pression, de rompre les assemblages nécessaires à leur maintien. Pour ce faire, une modélisation éléments finis a été réalisée de manière à observer les effets de la pression sur le corps de cellule. La simulation permettra aussi d'obtenir des informations quant aux contraintes de montage des fenêtres. Une déformation trop importante des fenêtres pourrait aussi mener à une modification de leur comportement diffractant et générerait la mesure par prise d'image.

Le concept initial de la cellule propose un cylindre en aluminium usiné de sorte à recevoir les fenêtres en plexiglas à l'intérieur. La simulation a trois objectifs :

- vérifier l'état de contrainte dans l'aluminium, notamment aux points particuliers (angles des supports de fenêtre par exemple) ;
- vérifier les déformations de la cellule : une déformation trop importante des fenêtres mènerait à une déformation de l'image observée ;
- obtenir l'état de contrainte à l'interface fenêtre/corps pour dimensionner les assemblages nécessaires.

Les simulations sont réalisées à l'aide de Cast3m (CEA), logiciel éléments finis. Le corps de la cellule en aluminium, ainsi que les fenêtres, sont modélisés en 3D. Les matériaux sont représentés par des modèles élasto-plastiques parfaits (Tab. 4.2), l'objectif étant que la cellule ne plastifie pas lors de la mise en pression.

Matériau	Module de Young	Limite élastique	Coefficient de Poisson
Aluminium	67500MPa	180MPa	0.4
Plexiglas	2900MPa	80MPa	0.3

TABLE 4.2 – Paramètres matériaux utilisés pour la simulation de la cellule

Le maillage présenté en figure 4.11 a été réalisé par une série d'extrusions verticales. Le format a été simplifié au maximum, s'agissant ici d'un prédimensionnement. Il est composé de 35434 nœuds pour 57664 éléments. L'interface entre les fenêtres et l'aluminium a été considérée parfaite. L'exploitation des états de contraintes à cette interface donne les informations nécessaires au dimensionnement de l'assemblage. L'application du chargement se fait à l'aide de l'opérateur *PRES*. Ce dernier calcule les forces nodales équivalentes d'une pression appliquée sur un objet. Le calcul part de 0 pour se finir à une valeur de pression de 2MPa au sein de la cellule. L'uniformité de la répartition n'est pas forcément optimale, principalement à cause des effets de bords, tels que montrés en figure 4.12-a. Les conditions limites sont appliquées sur les deux lignes rouges de la figure 4.12-b. Les déplacements empêchés sont selon les axes X et Y en tête, et selon X, Y et Z en pied. Les rotations sont laissées libres pour refléter au mieux les montages choisis.

La simulation effectuée à l'aide d'une méthode pas à pas n'a pas présenté de plastification des matériaux. Les contraintes (Fig. 4.13) montrent quelques points faibles, particulièrement aux angles des fenêtres, en particulier pour l'aluminium. Les contraintes (projetées selon la méthode de Von Mises) observées restent pour autant raisonnables, ne dépassant pas 44MPa. Les contraintes dans la partie massive sont suffisamment faibles (inférieures à 20MPa) et permettent la création de poches dans le corps, de manière à alléger la cellule, mais aussi à garder un centre de gravité centré, facilitant la fermeture de cellule.

Les déformations présentées en figure 4.14 subies par la cellule sont faibles. Les déplacements maximums au centre des fenêtres n'excèdent pas 0.2mm. La version finale de la cellule présente

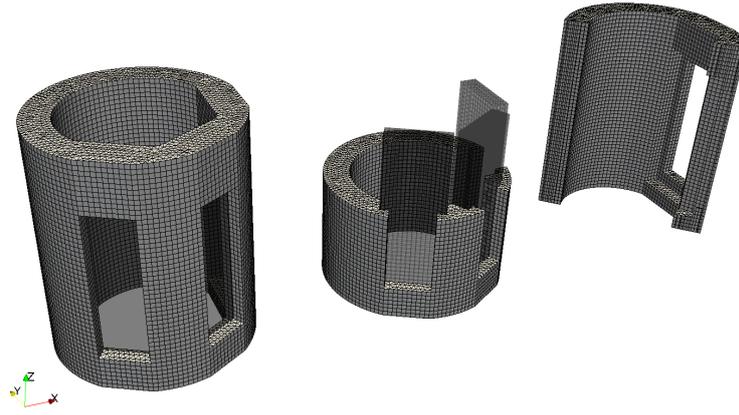


FIGURE 4.11 – Maillage de la cellule triaxiale pour étude Cast3m

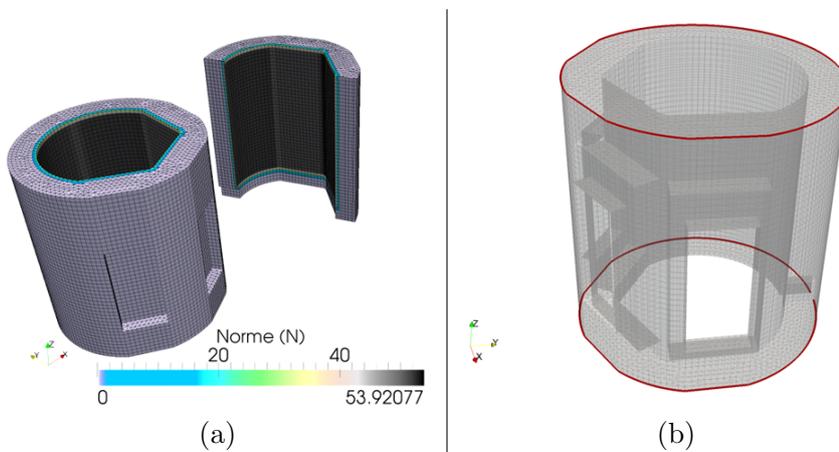


FIGURE 4.12 – Chargement de la cellule (a) et conditions limites (b) pour Cast3m

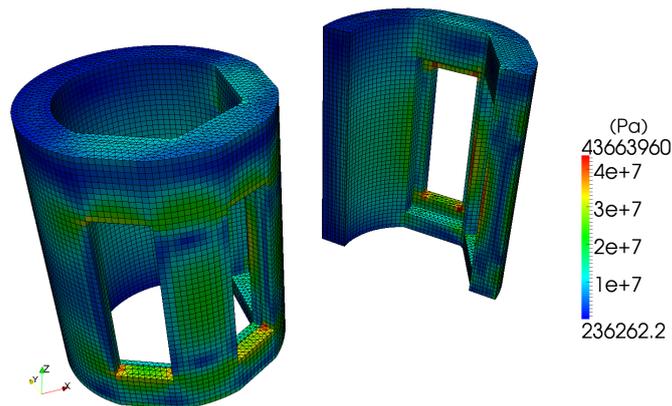


FIGURE 4.13 – Contraintes de Von Mises de la cellule triaxiale (pression interne de  $2MPa$ )

des fenêtres non plus en plexiglas, mais en polycarbonate, qui présente de meilleures propriétés mécaniques. Les déformations ne seront donc pas un problème en soi.

La conception de la cellule a été finalisée en collaboration avec l'usineur (Gastaldin Frères,

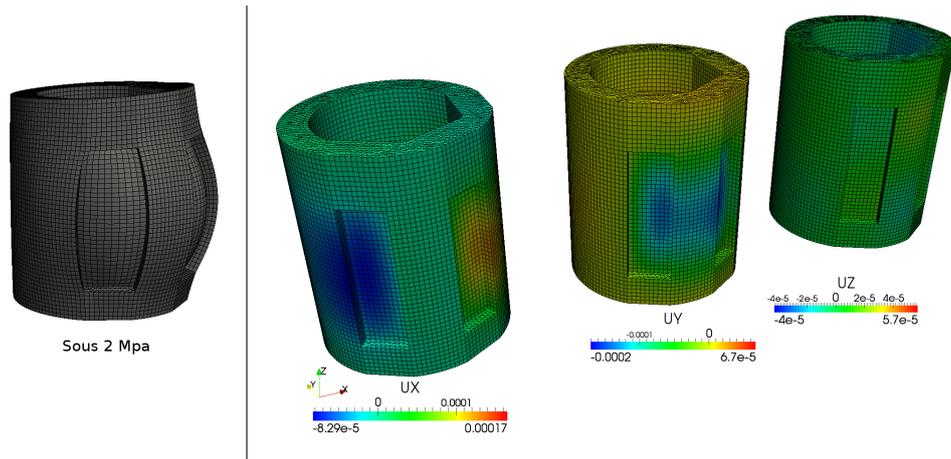


FIGURE 4.14 – Déformation de la cellule triaxiale en mètre (pression interne de 2MPa)

Tullins-Fures, 38). Deux modifications ont été faites par rapport au concept original. La première concerne l'utilisation de tiges de serrage, présentes sur la plupart des cellules triaxiales. Leur présence gêne le champ de vision de l'appareil photo, nécessitant de les placer à des angles compliqués. Il a été décidé de les supprimer au profit d'un assemblage vissé directement sur l'embase, et d'un couvercle fixe supportant le piston. La deuxième modification porte sur les poches pour les fenêtres en polycarbonate. L'usinage de ces dernières à l'intérieur du corps aluminium demandait du matériel non disponible, les poches ont donc été effectuées à l'extérieur. Le plexiglas ne supporte pas des incréments de volume trop importants (car très peu déformable), il est donc impossible de visser directement dans ce dernier. Des plaques ont donc été utilisées pour maintenir les fenêtres à leur place lors de la mise en pression. La cellule une fois terminée est présentée en figure 4.15. Une deuxième fenêtre a été ajoutée plus haut pour observer le bon centrage de l'échantillon vis-à-vis du piston.

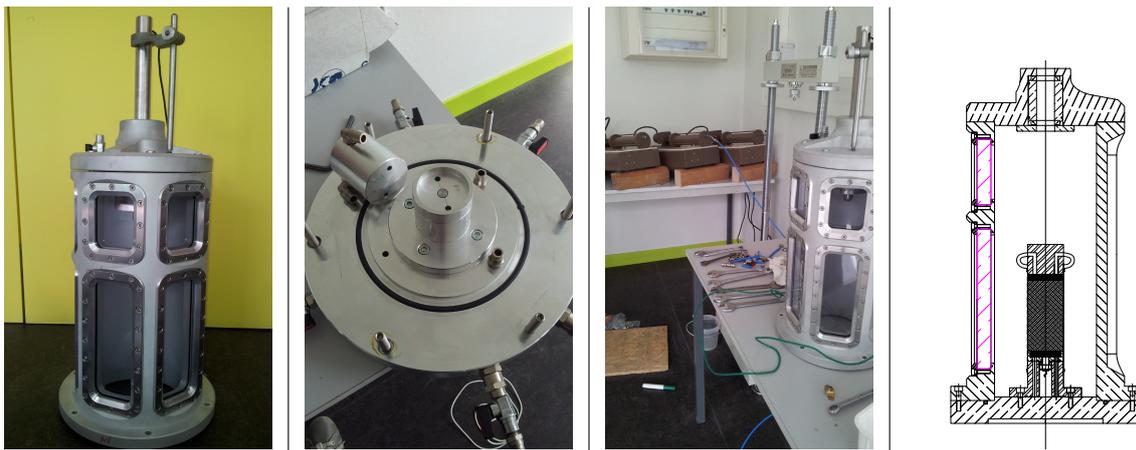


FIGURE 4.15 – Cellule triaxiale finalisée

### 4.2.3 Adaptation pour la mesure de la succion

Pour parvenir à une mesure de succion, le choix s'est porté sur un tensiomètre. Même si sa portée limite est faible (100kPa), il est plus facile à intégrer dans la cellule que d'autres mesures.

Les tensiomètres commerciaux permettent de fournir des amplitudes de mesure plus grandes mais présentent un encombrement trop important, ne permettant pas l'installation dans l'embase en conservant un échantillon de 50mm de diamètre, tout en conservant les fonctionnalités de drainage de l'embase.

Le tensiomètre est présenté en figure 4.16, le choix s'est donc porté sur l'utilisation d'un capteur de pression relative compact de chez Mesurex de portée  $500kPa$  ( $-100$  à  $+400$ ). Le système a été conçu de telle sorte que la pierre poreuse de surface serve à la fois de tensiomètre et de contact avec le sol. Un conduit très fin de drainage a été placé, allant de l'alimentation en eau vers la sortie, tout en passant par le capteur de pression, de manière à pouvoir restaurer l'espace entre mesure et pierre. De manière à minimiser cet espace pour éviter un décrochage à trop basse succion, le capteur a été monté alors qu'il était branché, pour détecter le premier contact avec la pierre et pouvoir légèrement le dévisser. Le point de contact capteur/pierre est trouvé par le premier incrément de contrainte ayant lieu. Dès ce point atteint, le capteur est très légèrement dévissé pour faire retomber sa mesure à zéro. Le filetage de capteur a été monté à l'aide d'une colle permettant l'étanchéité qui garantira le maintien de la distance.

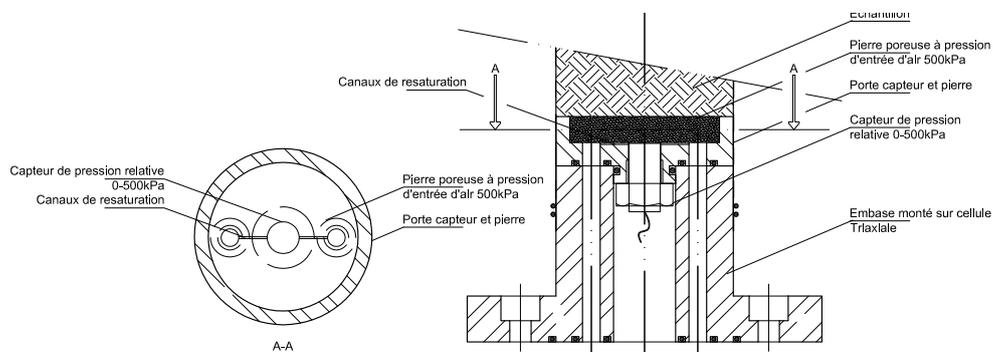


FIGURE 4.16 – Incorporation du tensiomètre dans l'embase de la cellule

Le choix de la pierre poreuse s'est fait en fonction des objectifs expérimentaux. En travaillant plutôt du côté humide de l'optimum Proctor et sur le matériau séché naturellement, les succions observées ne montaient pas au-delà de  $400kPa$ . Une pierre poreuse avec une entrée d'air de  $500kPa$  a donc été choisie pour éviter sa désaturation, même si la mesure est limitée à  $100kPa$ . Le processus expérimental a donc été adapté à cette plage de mesure et sera expliqué dans la partie suivante.

La saturation de la pierre poreuse est une problématique importante. Le choix s'est porté sur la mise sous vide de la cellule triaxiale. Après au moins 24 heures de vide, une contre-pression d'eau ( $25kPa$ ) est appliquée sous la pierre poreuse. Plusieurs cycles d'ouverture du drainage sont exécutés après remontée en pression pour chasser le peu d'air restant dans le réseau sous la pierre. La pression est alors laissée jusqu'à un perlage homogène de l'eau sur la pierre poreuse, indiquant la saturation. De manière à contrôler la bonne tenue du tensiomètre, une partie du fluide du réseau est pompée à l'aide du contrôleur pression volume, et une lecture de tensiomètre est faite. Si la pression se maintient et descend jusqu'à  $-80kPa$ , cela signifie que la pierre est bien saturée et que le tensiomètre est prêt à l'emploi.

Pour avoir une idée de la vitesse de réponse du tensiomètre, un échantillon de sol (com-

compacté manuellement au Proctor normal) est d'abord saturé longuement par contre-pression, puis consolidé-drainé à un confinement ( $\sigma_3$ ) de  $800\text{kPa}$  (valeur arbitraire). De manière à générer de la succion dans le sol, le drainage est d'abord fermé, puis le confinement est relâché. L'échantillon augmente alors de volume, diminuant sa saturation (teneur en eau constante). Cela génère alors de la succion dans l'échantillon. La figure 4.17 présente la mesure exécutée. Le temps global de mesure semble être entre 15 et 20 heures.

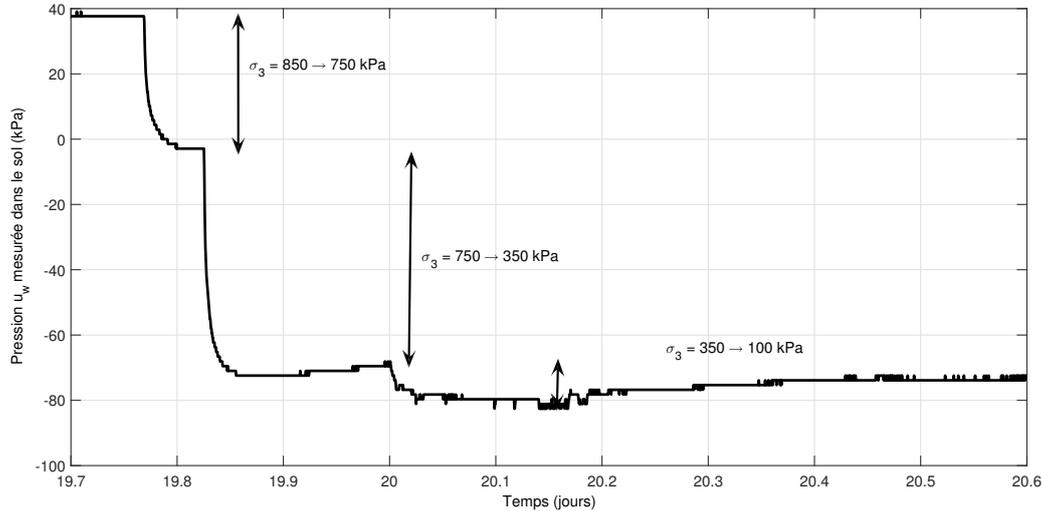


FIGURE 4.17 – Mesure de pression interstitielle dans l'échantillon lors du déconfinement

L'influence des variations de température dans la salle constitue le dernier problème. La salle expérimentale à disposition présente une baie vitrée, simple vitrage exposé plein sud. Il est donc nécessaire de vérifier si la mesure n'est pas influencée excessivement par la température. Deux essais ont été exécutés : un essai avec tensiomètre en contact libre avec un volume d'eau et un autre avec tensiomètre fermé. Globalement, les deux essais ont présenté des variations relativement faibles avec un ordre de grandeur de  $1\text{kPa}$ . L'utilisation de graisse hydrophobe pour fermer le tensiomètre dans le cadre du deuxième essai a généré une succion artificielle ( $\sim 25\text{kPa}$ ), et a mené à la contamination de la pierre poreuse.

#### 4.2.4 Calibration de la corrélation d'images

La corrélation d'images est un outil permettant de faire des mesures de manière efficace sur des échantillons. Couramment utilisée dans bien des domaines, cette méthode nécessite de savoir quelle précision peut être atteinte selon les dispositions utilisées. Cette précision est ici liée à deux problèmes. Le premier est lié à l'appareil photo (objectif et CCD) et à son positionnement (problème de parallaxe), mais aussi à l'effet que va avoir le plexiglas sur la mesure. L'appareil photo est placé sur un trépied en face de la cellule, elle-même sur sa presse (Fig. 4.18). La cellule triaxiale a été initialement prévue pour une utilisation conjuguée avec le système de corrélation d'images 3D surfacique DANTEC Q400 (PLÉ, TOURABI et ABUAISHA 2013). Suite à un problème matériel et à un manque de temps, la décision a été prise de roder la cellule en utilisant une corrélation d'images avec un seul appareil.

Un éclairage extérieur à la cellule est placé de telle sorte à éviter un reflet, l'appareil photo est aussi recouvert d'un tissu noir non réfléchissant pour éviter qu'il ne se reflète dans la vitre. Pour finir, un voile noir est placé autour de l'ensemble pour obturer la lumière naturelle (soleil)



FIGURE 4.18 – Dispositif de prise d'image pour la cellule triaxiale (avec échantillon)

qui varie en fonction du moment de la journée. Pour les essais présentés, la prise de photo est faite manuellement, à l'aide d'un déclencheur déporté, fixé pour éviter de faire bouger l'appareil en cours d'essai. Les essais triaxiaux étant longs, la luminosité sur les photos doit rester la plus constante possible pour limiter les distorsions de résultats lors du post-traitement des photos. Le réglage de l'appareil joue aussi un rôle clé dans la qualité d'image obtenue, l'ouverture et le temps de pose permettant d'améliorer les contrastes observés sur les photos.

De manière à traiter ce problème, des cibles présentant un damier dont les cases mesurent  $3\text{mm}$  par  $3\text{mm}$  sont placées dans la cellule, au niveau de l'axe de l'échantillon. Ces cibles sont prises en photo à plusieurs hauteurs de déplacement pour simuler un essai (cisaillement).

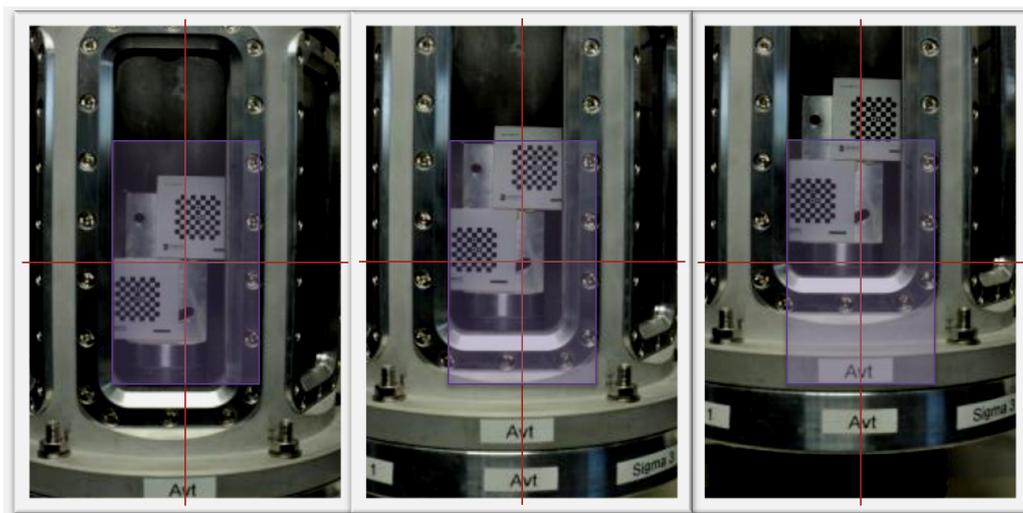


FIGURE 4.19 – Photos des cibles de calibration dans la cellule triaxiale

Les photos sont présentées en figure 4.19. L'appareil photo est placé sur un trépied fixe vis-

à-vis de la cellule, les cibles se déplacent donc par rapport à ce dernier. Le cadre violet présente la zone la plus fiable de la photo. L'objectif à focale fixe de  $55mm$  présente l'inconvénient de déformer l'extérieur de la photo (effet Fisheye), d'où l'importance de bien placer l'appareil vis-à-vis de l'échantillon.

Le traitement des photos est fait en utilisant ImageJ. Les mesures sont exécutées sur chaque ligne de 5 cases noires ( $27mm$ ), verticalement et horizontalement. La mesure est faite à l'aide d'un seuil, le même pour toutes les photos, puis d'une mesure faite en traçant un histogramme sur une ligne (Fig. 4.20). La mesure moyenne pour les deux grilles sur toutes les images est de  $384.78px$ , soit une échelle de  $0.07mm/px$ . La table 4.3 présente les écarts à la moyenne pour les cibles des trois photos présentées en figure 4.19. Globalement, l'écart ne dépasse pas  $\pm 1.5px$ , soit  $\pm 0.1mm$ , sauf pour la grille la plus haute, hors de la zone de fiabilité, où l'effet fish-eye génère une déformation verticale ( $-3.8px$ ) de la mesure. En revanche, la mesure est toujours fiable horizontalement.

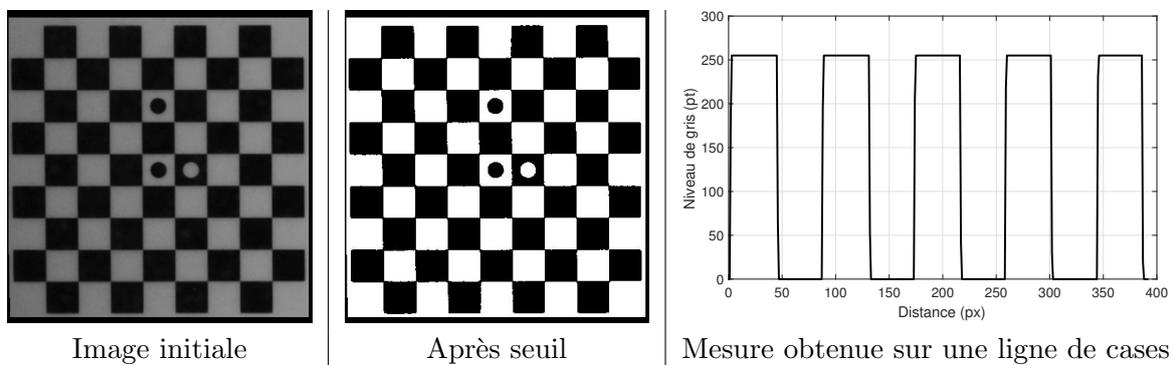


FIGURE 4.20 – Étapes de traitement d'images pour la mesure

Déplacement	Grille basse		Grille haute	
	Verticale	Horizontale	Verticale	Horizontale
1.5cm	0.0	1.2	-3.7	0.9
	0.5	0.5	-3.9	1.0
	0.2	1.0	-3.7	0.7
	0.2	1.0	-3.7	0.9
0.6cm	-0.4	0.3	-0.1	0.7
	-0.6	0.8	0.2	0.3
	-0.6	1.0	-0.6	0.8
	0.0	1.3	-0.6	0.5
1.5cm	-1.5	-1.0	1.2	1.4
	-1.1	-0.5	1.0	1.3
	-1.1	0.3	1.2	1.3
	-1.5	0.5	1.1	1.4
	px	px	px	px

TABLE 4.3 – Écarts de mesure sur les deux grilles à différentes hauteurs de presse

Pour pouvoir effectuer une mesure sur un échantillon, il faut une distance de référence fixe au cours de l'essai. Le choix s'est porté sur une mire en plastique noir, composée d'un centrage sur l'embase de l'essai, avec deux pastilles blanches. L'écart entre les deux pastilles est parfaitement

connu et sert de référence pour tout l'essai. Au cours des différents essais réalisés, la mesure de cette mire est constante, au pixel près, d'une photo à l'autre (pour un placement d'appareil, ce dernier étant déplacé entre deux essais), l'échelle est donc fiable pour toutes les photos au cours d'un essai. La précision peut encore être améliorée, avec un CCD plus performant, ainsi qu'un objectif offrant un zoom plus adapté (sans pour autant mener à des déformations trop importantes). Pour améliorer la qualité de la mesure, il est nécessaire d'augmenter le contraste de la photo. Pour ce faire, un fond noir est placé dans la cellule au moyen de la mire. De même, les membranes des échantillons sont préalablement peintes en blanc. Un mélange de latex vulcanisé et d'acrylique blanc est utilisé comme peinture, directement appliqué sur la membrane. Une fois séchée, la peinture se comporte comme une deuxième peau souple autour de la membrane de l'échantillon.

### 4.3 Simulation du sur-compactage au sein d'une cellule triaxiale

Pour pouvoir parvenir à simuler le compactage d'un matériau à l'aide de l'appareil triaxial, il est nécessaire de s'interroger sur les contraintes générées par un engin de compactage. À partir de mesures in situ, un plan de chargement est déterminé pour s'approcher au mieux des charges réelles. Dès lors, un essai est réalisé sur échantillon pour, d'une part, confirmer le bon fonctionnement de la cellule triaxiale, et d'autre part, apporter des éléments étayant les réflexions sur le compactage.

#### 4.3.1 Étude en contraintes du compactage in situ

Simuler les compactages in situ pose une question déterminante : quel chargement appliquer pour se rapprocher le plus de la réalité du passage de la bille d'un compacteur ? L'objectif est ici de déterminer un mode de chargement, limité par les éléments à notre disposition : le confinement et le déviateur.

#### Effet triaxial d'un compacteur in situ

Le passage d'une bille de compacteur et son effet sur le sol sont complexes. DANDJINOU (1988) présente un certain nombre d'éléments : en premier lieu, l'état du sol à un instant donné sous la bille du compacteur. La figure 4.21 présente le sol sous la bille. Ce dernier se comporte de trois manières différentes : il peut d'une part être en butée, zone qui maintient le sol en place. C'est la zone où le matelassage se manifestera s'il a lieu. Il existe une zone de transition, où le sol passe de butée à poussée. Le sol est principalement en poussée sous la bille, où il subit la charge la plus importante, et donc la densification. Il faut noter que si le sol a une cohésion suffisante, la partie en poussée à l'arrière de la bille peut partiellement rester collée à celle-ci, et aider au déconfinement. C'est aussi ce phénomène qui permettra éventuellement de voir un feuilletage. La taille exacte de chaque zone est complexe et dépend des facteurs suivants :

- la taille de la bille et la charge sur l'essieu,
- l'effet de collage sur la bille, qui peut diminuer la poussée à l'arrière de cette dernière,
- le sens de déplacement par rapport au reste du véhicule (bille poussée ou tirée).

Cette image, vue à un instant donné, amène le deuxième problème pour comprendre l'état de contrainte : la rotation. Au fur et à mesure que la bille avance, un point donné du sol va passer de l'état de butée à celui de poussée pour revenir à la butée, puis au repos. Il y a rotation de contraintes en un point donné du sol.

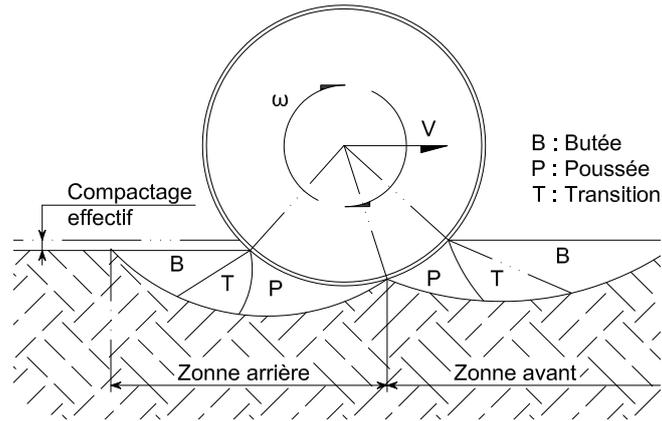


FIGURE 4.21 – État du sol sous la bille d'un compacteur DANDJINOU 1988

De manière à avoir une image plus poussée, RINEHART et MOONEY (2009) ont effectué une série d'essais in situ. Des plaques de pression totale sont placées dans le sol à l'horizontale et, dans certains essais, à la verticale, dans les deux directions. Grâce à ce système, il est possible d'obtenir des éléments sur les contraintes subies par le sol au passage de la bille d'un compacteur. Certains essais comprenaient différents niveaux de plaques horizontales pour pouvoir aussi estimer les déperditions de contraintes en fonction de la profondeur (RINEHART, MOONEY et BERGER 2008). Les plaques possédaient d'ailleurs une vitesse d'acquisition suffisante pour pouvoir aussi observer l'effet des vibrations du compacteur (MOONEY et RINEHART 2009). Des exemples de résultats sont présentés en figure 4.22. Les vibrations ont principalement pour effet de multiplier la contrainte totale maximale subie par le sol. Un facteur de 1.5 à 2 entre les compactages statique et vibrant est observable.

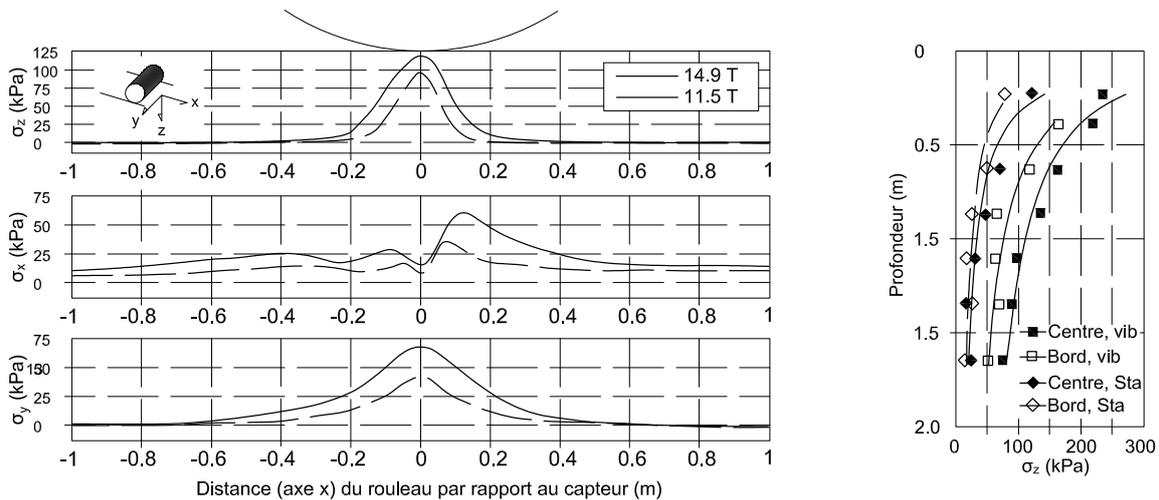


FIGURE 4.22 – Mesures tridimensionnelles au passage d'une bille (RINEHART et MOONEY 2009) et mesures à plusieurs profondeurs (vibrant et statique) (RINEHART, MOONEY et BERGER 2008)

Deux éléments majeurs peuvent être tirés de la figure 4.22. Le premier porte sur l'état de contrainte tridimensionnel. De manière logique, la contrainte monte progressivement à mesure que la bille approche, particulièrement selon l'axe vertical et l'axe de la bille. En revanche, les

contraintes selon l'axe d'avancée du compacteur présentent un déphasage de contraintes. L'augmentation des contraintes selon l'axe X se fait après le passage de la bille au point de la mesure. Ce déphasage suppose un cisaillement du sol avec une forte rotation des contraintes principales lors du passage de la bille. La deuxième observation porte sur le fait que la dissipation de contraintes se fait de manière progressive sous la bille et suit globalement une courbe proche de la relation de Boussinesq.

### Plan de chargement choisi pour l'essai

La cellule triaxiale ne permet pas de dissocier les deux axes horizontaux pour ce qui est de la valeur de contrainte. Elle ne permet donc pas de reproduire le déphasage entre l'axe de roulement et l'axe de la bille, comme observé par (RINEHART et MOONEY 2009). De même, l'application de vibration n'est pas réalisable. L'objectif de la simulation sera donc de se rapprocher le plus possible des conditions réelles.

Les contraintes maximales verticale et horizontale sont estimées par proportionnalité des valeurs observées pour différentes masses d'essieux, le but étant de simuler les compacteurs utilisés pour la planche in situ. La table 4.4 présente les différentes valeurs, ainsi que celles retenues pour les essais.

Origine	Charge linéique ( $kN/m$ )	$\sigma_1$ Stat ( $kPa$ )	$\sigma_3$ Stat ( $kPa$ )	$\sigma_1$ Dyn ( $kPa$ )	$\sigma_3$ Dyn ( $kPa$ )
Publication	31.5	100	40	220	80
Publication	42.4	120	60	270	110
Compacteur A304	55/60	140	80	320	130

TABLE 4.4 – Valeurs maximales de contrainte au passage d'un compacteur et estimation (RINEHART, MOONEY et BERGER 2008 ; RINEHART et MOONEY 2009)

La cellule triaxiale ne permet pas d'atteindre les vitesses observables sur chantier. La rapidité du passage du compacteur et les hypothèses sur le compactage mènent à définir le comportement du sol comme non drainé. Dans ce cas, la durée de l'essai en cellule importe peu du point de vue hydrologique (BOUTONNIER 2007). La montée en charge se fera donc lentement. Cela permet de plus d'éviter des interférences trop fortes entre le maintien de la pression de confinement et le mouvement du piston (incrément de pression notable par l'entrée du piston dans la cellule). Le chargement se fera en deux temps. Au début d'essai, l'échantillon est chargé de manière quasi isotrope à  $25kPa$ . Un léger déviateur est conservé pour éviter l'extension de l'échantillon lors de l'augmentation de pression de la cellule. Le confinement est alors augmenté jusqu'à  $130kPa$ , valeur tirée du tableau 4.4. Pendant cette montée, le léger déviateur est maintenu à l'aide d'un contrôle en force sur le piston. Une fois le palier atteint, le déviateur est alors augmenté pour atteindre une pression verticale de  $320kPa$  (tab. 4.4). Le déchargement se passe en ordre inverse, avec tout d'abord une diminution du déviateur, puis du confinement pour revenir aux valeurs initiales. La figure 4.29 résume ce plan de chargement. Le fait de pouvoir contrôler en force et de ne pas aller trop vite au déchargement permet d'éviter tout espacement entre le piston et l'échantillon. Ce cycle sera répété pour imiter les passages successifs du compacteur. Un temps est laissé entre deux cycles pour la mesure de la succion par le tensiomètre (une journée pour équilibrage de la mesure). À chaque point clé du chargement, une photo est prise pour calculer les variations de volume.

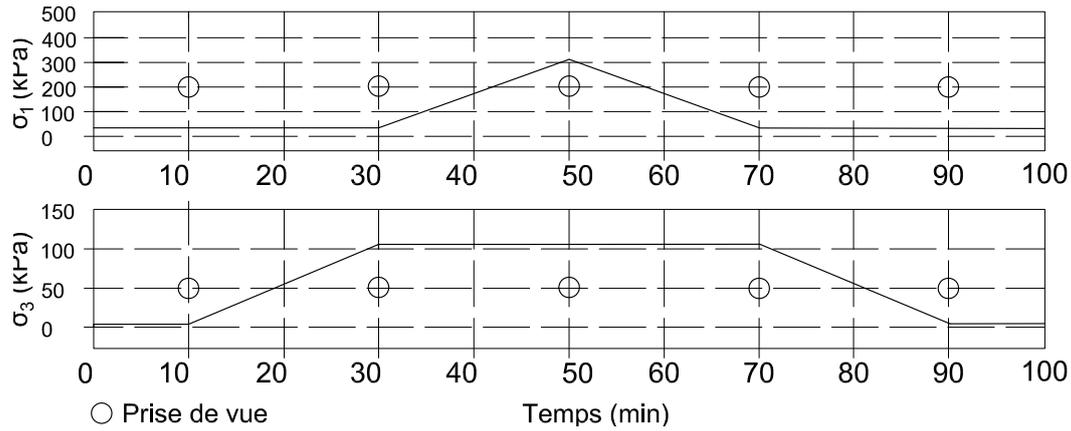


FIGURE 4.23 – Plan de chargement de l'échantillon

### 4.3.2 Essai de sur-compactage à l'appareil triaxial

#### Préparation des échantillons

L'objectif étant de simuler le sur-compactage, l'échantillon de base doit déjà être dans un état compacté avant l'essai. Pour ce faire, le sol est préparé au Proctor normal dans un moule CBR (méthode identique à celle présentée en chapitre 3). Une fois l'échantillon compacté, il est mis en forme pour la cellule triaxiale ( $\phi = 50\text{mm}$   $h = 100\text{mm}$ ). La découpe se fait depuis le bloc compacté, en supprimant d'abord le plus gros de l'excès de sol par découpe. Le bloc restant est placé sur un touret (Fig. 4.24-a et b). Le touret est composé de deux cales et d'une partie rotative, maintenant le sol en place et permettant la réalisation d'un cylindre de 50mm de diamètre. L'échantillon est progressivement détourné à l'aide d'une lame (lissage Proctor) au diamètre souhaité (Fig. 4.24-c). Pour finaliser la hauteur de l'échantillon et s'assurer de la perpendicularité entre le cylindre et sa base, l'échantillon est placé dans un guide (Fig. 4.24-d), puis est coupé à la taille requise (Fig. 4.24-e). Une fois à la bonne taille, il est placé dans la cellule triaxiale. Avant de lancer l'essai, une journée est laissée au tensiomètre pour s'équilibrer.

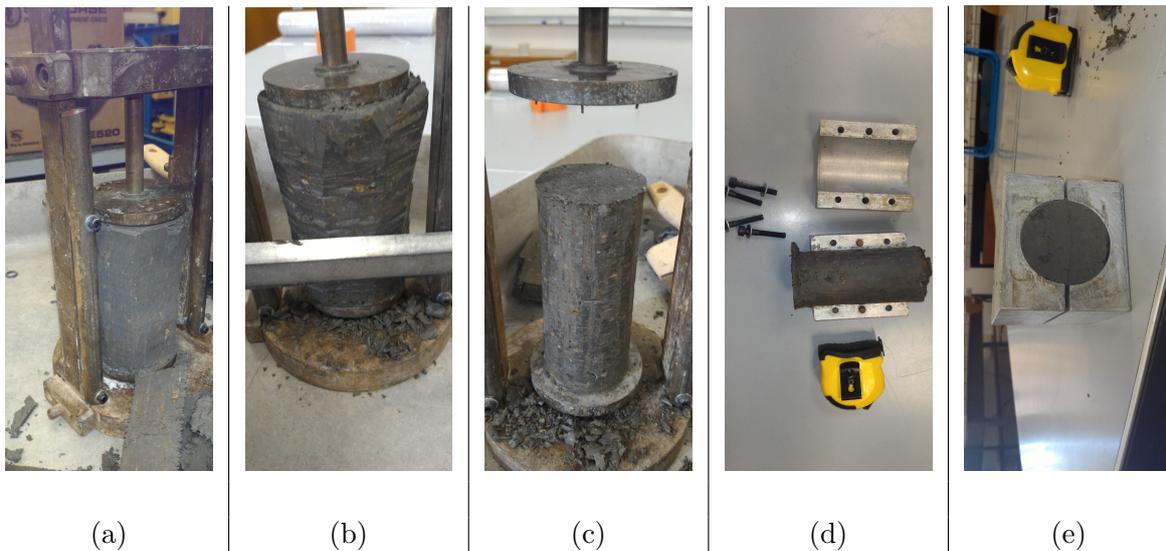


FIGURE 4.24 – Étapes de découpe d'un échantillon pour la cellule triaxiale

La découpe étant manuelle, donc longue ( $\sim 1h$ ), un échantillon de sol est prélevé avant découpe et un autre après découpe, pour vérifier que la perte de teneur en eau n'est pas trop grande. Les échantillons ont montré des pertes de 0.2 point de pourcentage, variations considérées comme raisonnables.

La découpe est un moment clé de l'essai, car si l'échantillon est mal détourné ou présente un défaut, il risque de cisailer sous un chargement plus faible que prévu. La figure 4.25 présente un échantillon dont la tête a été endommagée lors de la préparation. Un cisaillement partiel est observable sur les 4 premiers centimètres.

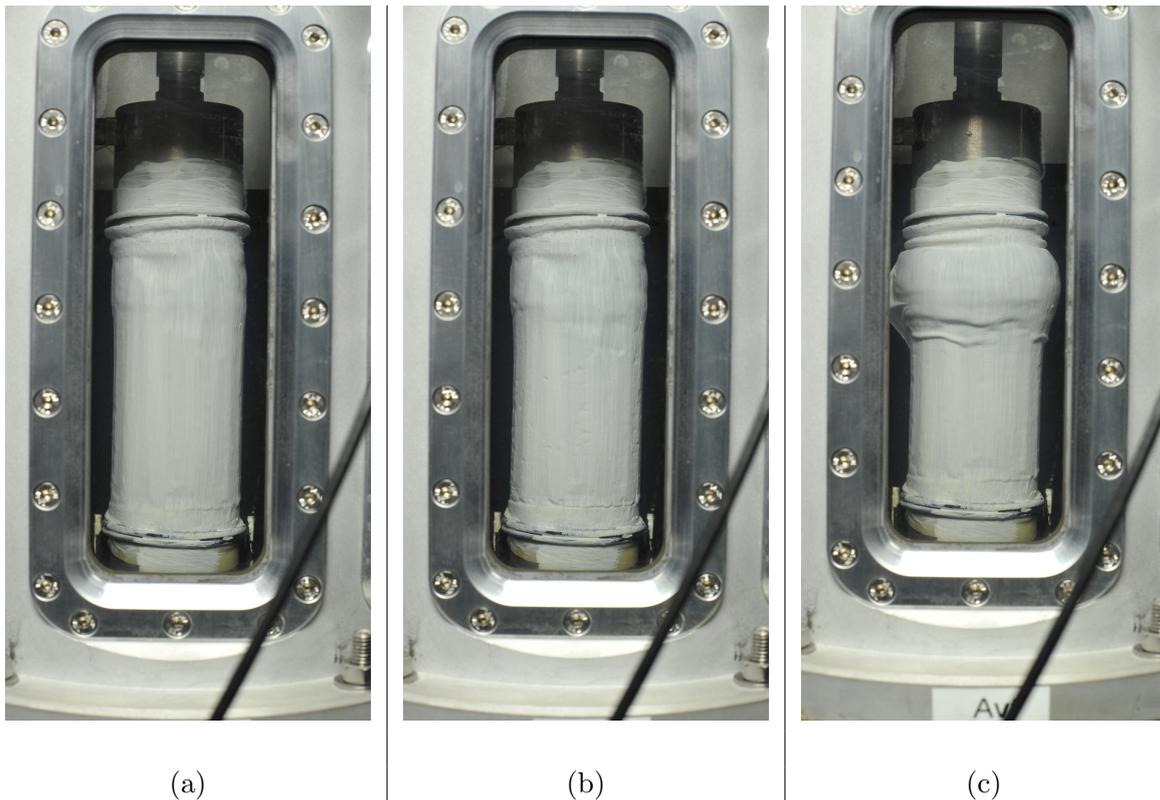


FIGURE 4.25 – Échantillon endommagé présentant un cisaillement partiel

### Méthode de post-traitement pour mesure des changements de volume

La mesure des changements de volume est nécessaire pour l'observation du compactage, car elle permet d'observer la contraction du matériau à chaque passe. La mesure est réalisée à l'aide des photos prises, ces dernières nécessitant un post-traitement pour parvenir aux variations. La figure 4.26 présente les différentes étapes de l'analyse d'image. Dans un premier temps, la photo est d'abord convertie en niveau de gris valant de 0 à 255 (Fig. 4.26[a  $\rightarrow$  b]). Un seuil est ensuite appliqué arbitrairement, mais le même est utilisé pour toutes les images d'un essai. L'éclairage étant le même pour toutes les photos, le seuil utilisé est le même pour chacune d'entre elles. La valeur du seuil est choisie manuellement de manière à obtenir la meilleure transition échantillon-environnement, sans pour autant avoir trop d'artefacts, causés par des petites tâches sur l'image qui nécessitent une correction manuelle (Fig. 4.26[b  $\rightarrow$  c]). Seuls deux niveaux de couleurs restent (0 et 255).

Les transitions entre l'échantillon et l'embase, tout comme la transition avec l'en-tête, sont problématiques, car elles génèrent des difficultés pour la mesure aux conditions limites de l'échantillon. A cet endroit, l'échantillon va réduire de diamètre, sans que son support ne se déforme. Toute mesure sur cette zone ne sera donc pas représentative du volume réel de l'échantillon, qui sera alors retirée de l'analyse. Pour ce faire, la tête et la base de l'échantillon sont découpées à partir de points de référence. Le haut de la photo est une référence fixe pour le post-traitement, la presse déplaçant l'embase de l'échantillon. La partie haute de la photo sera donc coupée à une distance fixe de ce point. Le bas sera, lui, découpé depuis le point haut de la mire qui accompagne le déplacement de la presse. (Fig. 4.26[c → d]). Au cours de l'essai, la tête de l'échantillon, reliée par rotule au piston (cellule de force), reste verticale, ce qui confirme le bon parallélisme relatif entre la base et la tête de l'échantillon. Cette découpe graphique est donc acceptable. Pour finir, la photo est purgée de tous les éléments non nécessaires au post-traitement. En figure 4.26[e]), il ne reste alors plus que l'ombre de l'échantillon, libéré de tout élément d'interférence, prêt pour la mesure.

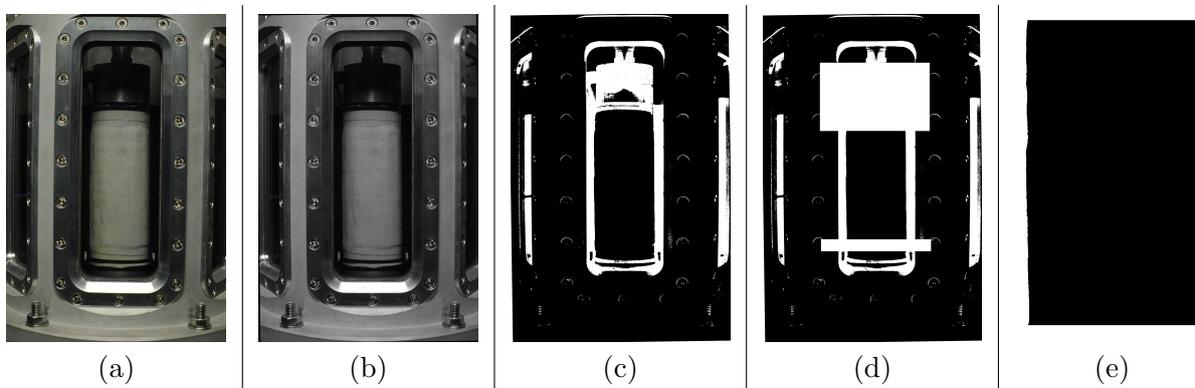


FIGURE 4.26 – Étapes de post-traitement des photos d'essais

La deuxième étape du post-traitement est la détermination de l'échelle. La figure 4.27 présente une image de la base de l'échantillon avec la mire de référence. La distance entre les deux barres noires (entourées en magenta sur la figure 4.27) est parfaitement connue. La distance en pixel entre les deux est mesurée en traçant les niveaux de gris le long d'une ligne (bleue ici). Le nombre de pixels est alors connu de manière exacte. Pour vérification, la mesure a été effectuée sur les 8 photos d'un essai. La table 4.5 présente les mesures pour un essai. L'écart maximum observable moyen est de  $0.61px$ , soit moins de  $0.069mm$ .

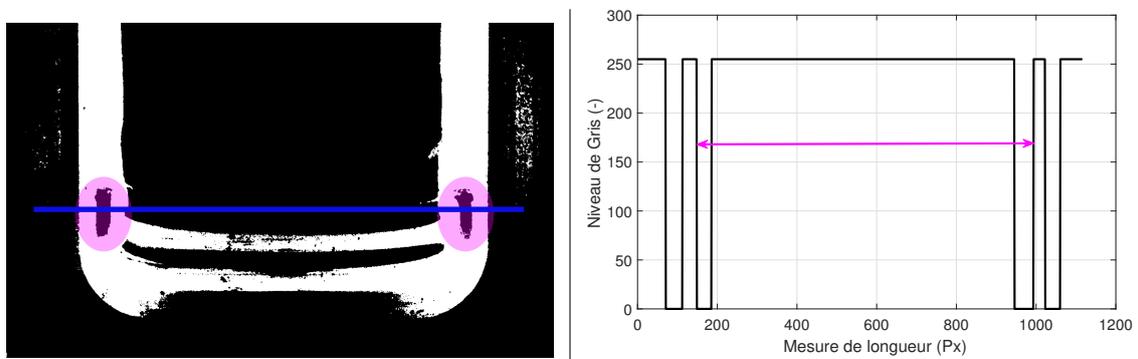


FIGURE 4.27 – Méthode de définition de l'échelle d'une photo

Photo	Taille <i>px</i>	Échelle <i>mm/px</i>
-		
1	848	0.06964
2	847	0.06970
3	848	0.06962
4	848	0.06959
5	847	0.06965
6	847	0.06968
7	848	0.06958
8	849	0.06955

Écart type longueur : 0.61*px*

Moyenne : 847.75*px*

TABLE 4.5 – Détermination de l'échelle pour chaque photo sur un essai

Le volume de l'échantillon est estimé par deux méthodes. La première consiste au calcul d'un diamètre moyen ( $D_{moy}$ ) de l'échantillon (Eq. 4.1). Il est estimé en utilisant la hauteur ( $h_{Ech}$ ) mesurée sur la photo et la surface visible de l'échantillon ( $S_{Ech}$ ). Le volume ( $Vol_{Ech}$ ) est alors considéré comme un cylindre parfait et déduit de la hauteur et du diamètre.

$$D_{moy} = \frac{S_{Ech}}{h_{Ech}} \qquad Vol_{Ech} = \frac{\pi \cdot D_{moy}^2}{4} \cdot h_{Ech} \quad (4.1)$$

La deuxième méthode se présente comme la somme des tranches sur la hauteur complète de la photo traitée (Fig. 4.28). Pour chaque ligne de pixels, un rayon est mesuré en comptant le nombre de pixels noirs. Ils sont alors convertis en rayons ( $D_i$ ). Le volume représente la somme de chaque tranche cylindrique d'épaisseur ( $h_i = 1px$ ). Le volume est alors exprimé en équation 4.2.

$$Vol_{moy} = \sum_{i=1}^n \frac{\pi \cdot D_i^2}{4} \cdot h_i \quad (4.2)$$

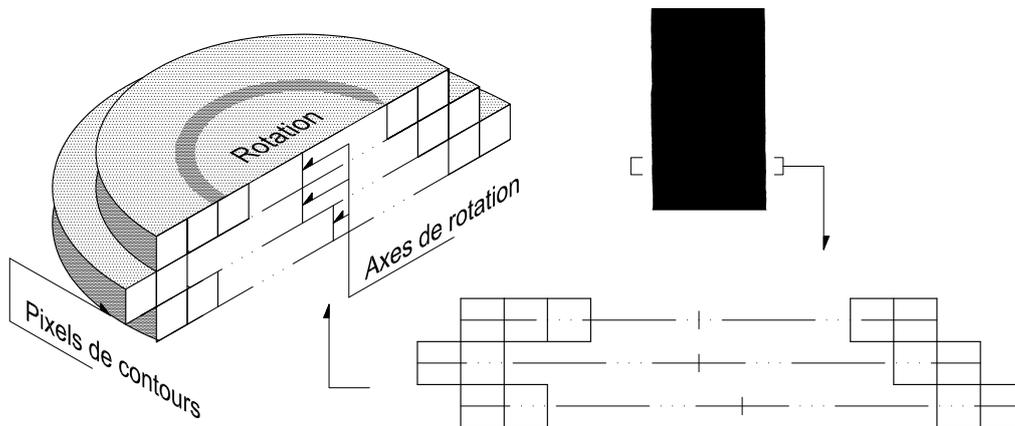


FIGURE 4.28 – Schéma de principe de la méthode d'estimation du volume par tranche

Les deux méthodes donnent globalement les mêmes valeurs. L'intérêt de la deuxième serait de pouvoir ajouter des points d'interpolation pour affiner la mesure (GACHET et al. 2007). De

plus, une estimation du plan de déclenchement de cisaillement (si visible) pourrait être ajoutée par l'intermédiaire de pentes observées sur les bords de l'échantillon.

Du point de vue de l'erreur de mesure, il faut d'abord considérer l'échelle vallant  $0.069\text{mm}/\text{px}$ . L'erreur sur la mesure de la mire est donc, à un pixel près, de  $0.069\text{mm}$ . L'erreur sur la hauteur est donc, elle, de  $0.138\text{mm}$ , soit  $0.138\%$  pour une hauteur proche de  $100\text{mm}$ . L'erreur sur le rayon est elle aussi de  $0.138\text{mm}$ , soit  $0.276\%$  pour un rayon proche de  $50\text{mm}$ . En cumulant l'erreur de la mire, celle du rayon, celle de la hauteur et la propagation par le calcul du volume, l'erreur pour un échantillon de  $200\text{cm}^3$  atteint  $0.69\%$ . Cette erreur est inférieure à celle présentée par GACHET et al. 2007 qui est de  $1.27\%$ , en utilisant la même procédure de calcul. Il est encore possible de diminuer l'erreur par l'utilisation d'un dispositif photographique plus adapté (CCD plus performant et objectif plus adapté à l'objet observé), mais aussi avec une procédure mathématique d'affinement des bords. Il ne faut pas oublier que cette erreur est soumise à une hypothèse importante : l'axi-symétrie de l'échantillon.

### Essai de sur-compactage sur les marnes de l'A304

Un échantillon préparé à une teneur en eau de  $23.5\%$  a été placé dans la cellule triaxiale dans le but de simuler le sur-compactage. Initialement compactée à l'énergie Proctor normale, les cycles successifs simulant le passage d'une bille de compacteur vont permettre de visualiser l'évolution de la succion et du volume au cours de l'essai.

Une fois l'échantillon stabilisé du point de vue des pressions interstitielles, il subit un chargement. L'homogénéisation de la pression interstitielle n'est effectuée qu'après les cycles de chargement. Cette méthode se rapproche au mieux du terrain : lors du passage d'un compacteur, qui dure moins d'une minute en réalité, les pressions n'ont pas le temps de se dissiper entre chargement et déchargement. La figure 4.29 met en évidence le chargement subi par l'échantillon. Plusieurs cycles ont été appliqués, et le détail d'un cycle est présenté. La valeur de pression moyenne (au sens de Mohr-Coulomb) est aussi présentée par la variable  $p$ , comme montré en équation 4.3.

$$p = \frac{\text{Tr}(\sigma)}{3} = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3} \quad \text{et} \quad p' = p - u_w \quad (4.3)$$

Les photos sont prises à des moments clés de l'essai. Le premier cycle étant le plus important, il est photographié : au début de l'essai, après la montée du confinement, après l'augmentation du déviateur, après la baisse du déviateur et, pour finir, après la baisse du confinement. Les cycles suivants ne sont pris en photo qu'avant et après. Notons que les cycles 3 à 5 ont été effectués à la suite pour observer l'effet d'une non-retombée des pressions interstitielles dans l'échantillon entre deux cycles.

Dans un premier temps, il est intéressant de porter un regard sur la fiabilité des mesures par corrélation d'images. La déformation verticale de l'échantillon peut être mesurée de deux manières lors de l'essai : d'une part, avec le capteur LVDT à l'extérieur de la cellule ; d'autre part, avec la corrélation. La figure 4.30 présente l'évolution de la déformation verticale  $\epsilon_h$  (Eq. 4.4). Les deux courbes sont quasi confondues avec un très léger écart sur deux photos. La courbe de corrélation n'est en revanche pas continue, certaines photos (représentées par des croix) n'ayant pas été prises sur l'ensemble de l'essai.

$$\epsilon_h = \frac{\delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h}{h_0} \quad \epsilon_v = \frac{\delta v}{v_0} = \frac{v_0 - v}{v_0} \quad (4.4)$$

Les déformations volumiques  $\epsilon_v$  présentées en figure 4.31-a montrent globalement un comportement contractant du matériau. Exprimées en fonction des déformations verticales (Fig. 4.31-

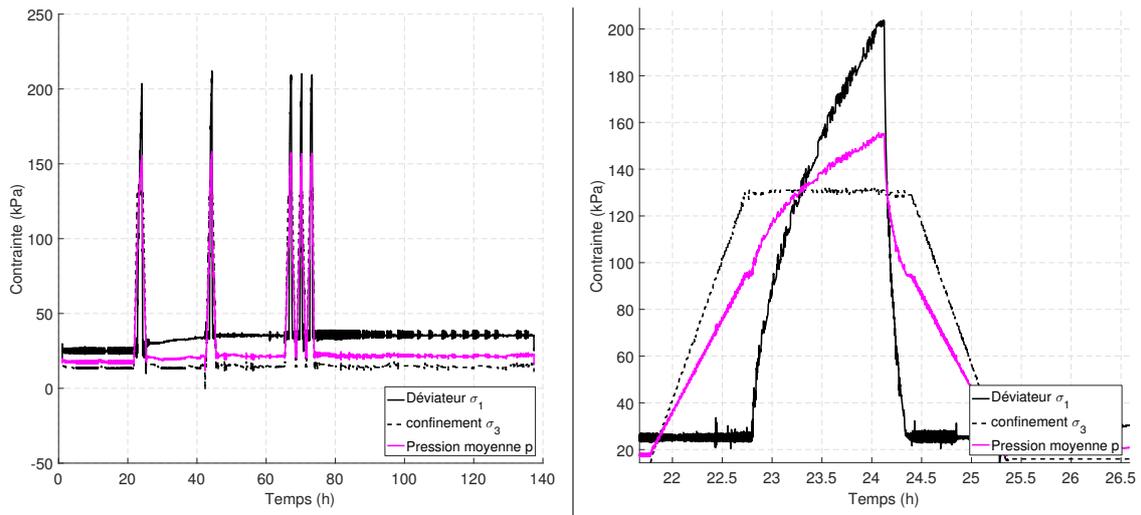


FIGURE 4.29 – Chargement appliqué à l'échantillon exprimé en contrainte, décomposé selon déviateur, confinement, et pression moyenne)

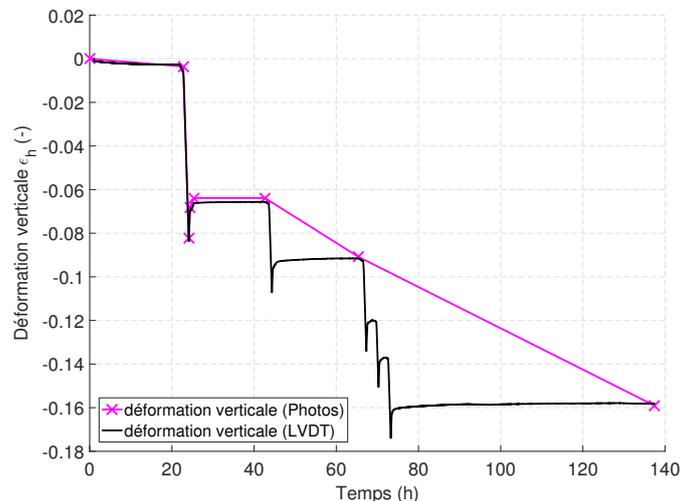


FIGURE 4.30 – Déformation verticale de l'échantillon mesuré par LVDT et corrélation d'images

b), on observe bel et bien une contraction du matériau sous l'effet des cycles de chargements appliqués. Le matériau, sous l'effet du chargement, se contracte; le déviateur appliqué après le confinement génère alors une deuxième contraction, plus importante. Après déchargement, l'échantillon subit un léger gonflement, et conserve une contraction résiduelle, attestant du compactage effectif du matériau. Durant la période d'homogénéisation de la pression interstitielle, la déformation verticale reste constante ( $-0.065$ ) alors que les déformations volumiques présentent une légère augmentation de volume ( $-0.015 \rightarrow -0.012$ ).

L'observation de la succion  $s$  présentée en figure 4.32 dans l'échantillon nous apporte un élément complémentaire pour l'interprétation. Chaque cycle de charge mène d'abord à une forte augmentation de la pression interstitielle. À mesure de l'avancée des cycles, l'augmentation de pression diminue, sûrement en raison de la diminution progressive des déformations volumiques. La compacité accrue de l'échantillon, après chaque cycle, diminue les déformations possibles, et donc la possibilité de mettre en pression le fluide interstitiel par réduction des vides.

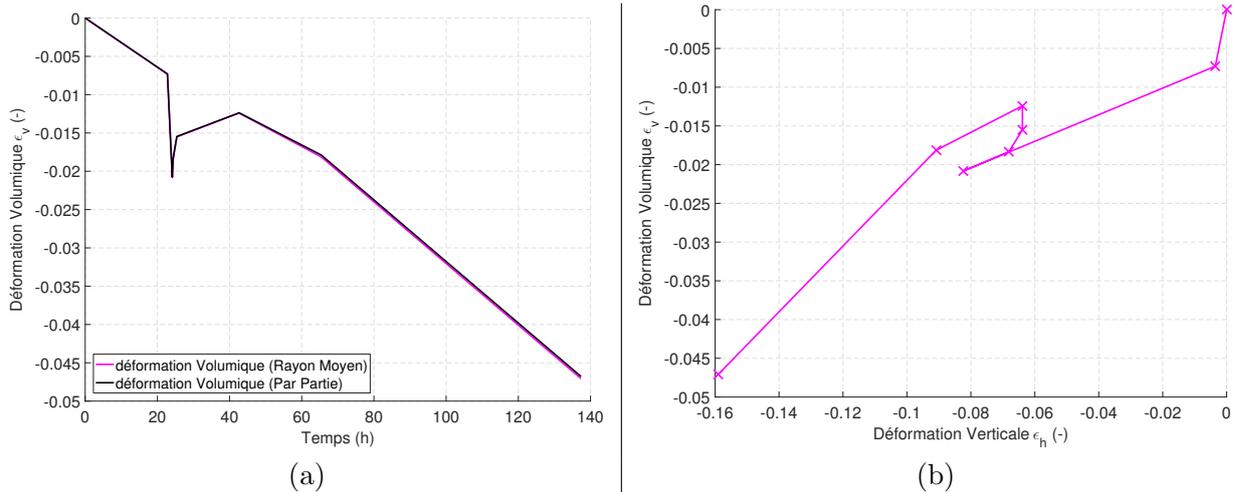


FIGURE 4.31 – Déformations volumiques de l'échantillon

Les cycles de chargement 3, 4 et 5 ont été appliqués dans la foulée, sans laisser le temps à la pression interstitielle de retomber. Il est raisonnable de penser que c'est ce qui se passe dans la réalité d'un chantier de compactage. En effet, l'intervalle de temps entre deux passes de compacteur se comptant en minutes, il est impossible pour la pression interstitielle de se rééquilibrer dans un matériau fin. Les perméabilités ne permettent pas à la pression de se dissiper.

L'échantillon se trouvant du côté humide de l'optimum Proctor, les chapitres précédents tablaient sur une diminution de la succion. Or, la succion augmente après chaque cycle. L'analyse de la retombée des pressions interstitielles peut fournir une première explication. La fréquence du compactage (Proctor ou chantier) étant fortement différente de celle utilisée ici, le fait de laisser les pressions retomber entre deux chargements (ici pour permettre la mesure de la succion) mène à un résultat à l'opposé des attentes. Le Proctor ne laisse pas les pressions retomber entre deux déviateurs. L'hypothèse serait alors que les plus forts incréments de pression interstitielle mèneraient à une déstructuration de l'espace poral, inatteignable dans les conditions expérimentales de la cellule. La deuxième explication peut venir d'un chargement trop important de l'échantillon, menant à son cisaillement. Le comportement de la succion serait alors difficile à prévoir, d'autant plus que le cisaillement a lieu en général en milieu d'échantillon, et non à la base, à savoir le point de mesure expérimental.

Pour étayer la réflexion, l'observation des photos prises sur l'échantillon permet de présupposer un cisaillement de celui-ci. S'il est difficile à voir sur les premières photos, la comparaison entre la photo initiale et finale, une fois superposée, montre un plan possible de cisaillement. La figure 4.33 montre clairement la réduction verticale de l'échantillon, mais aussi un plan possible de glissement, donnant un intervalle-angle de rupture compris entre  $28^\circ$  et  $35^\circ$ . En reportant les intervalles-angles dans le domaine de Mohr-Coulomb ( $q$  fonction de  $p'$ ), présenté en figure 4.34, et en les comparant au chargement subi par l'échantillon, il est clair que les deux premiers cycles montrent un dépassement de la limite de rupture. La cohésion est ici négligée, elle aurait pour effet d'augmenter le domaine avant rupture.

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (4.5)$$

La succion initiale de l'échantillon semble, elle aussi, donner un élément d'interprétation

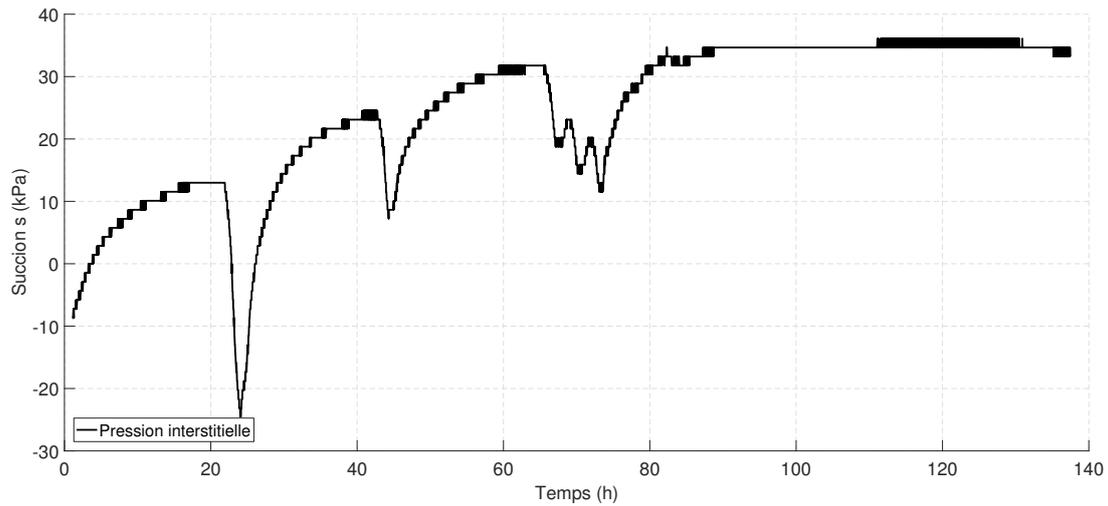


FIGURE 4.32 – Mesure de succion au cours de l'essai

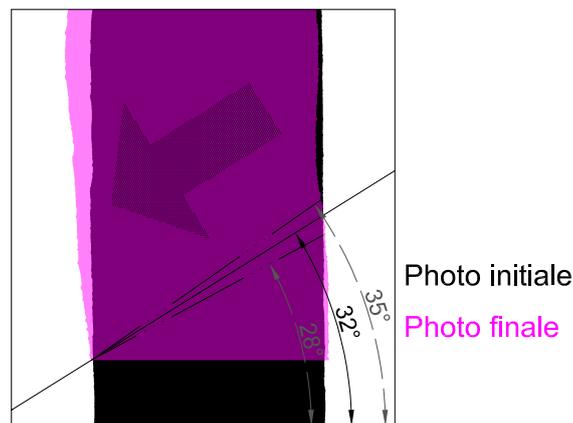


FIGURE 4.33 – Superposition de la photo initiale et de la photo finale de l'essai

quant à l'effet du compactage (chantier ou laboratoire). Le chargement appliqué se rapproche fortement de la limite de rupture en cisaillement de la marne. Or, une succion plus importante implique un décalage vers la droite de la courbe de chargement, soit une augmentation de pression effective moyenne. Ce décalage a pour effet d'éloigner le chargement subi par l'échantillon de la limite de rupture en cisaillement. Un échantillon du côté sec de l'optimum serait donc non cisailé par un compacteur donné, alors qu'un échantillon plus humide pourrait présenter un cisaillement.

### Essai de chargement sans déviateur

Le premier essai fournit des éléments de réflexion, plus particulièrement par rapport à l'effet du cisaillement. L'observation d'une augmentation de succion du côté humide de l'optimum Proctor est contre-indicative des observations faites sur la planche comme sur les essais de laboratoire. De manière à évaluer l'incidence du cisaillement, les essais suivants ont été exécutés sans la phase de montée du déviateur. Chaque essai est réalisé avec un chargement quasi-isotrope, avec un léger déviateur pour permettre de maintenir un bon contact entre le sol et le tensiomètre

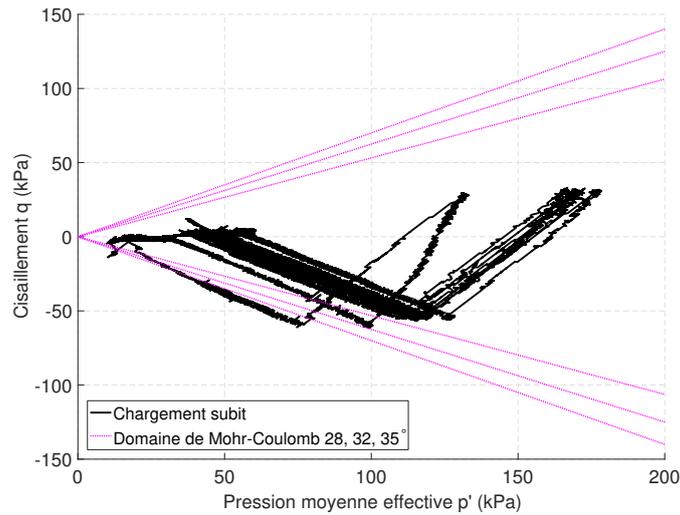


FIGURE 4.34 – Chargement de l'échantillon représenté dans le domaine de Mohr-Coulomb

(Fig. 4.35), et d'éviter un cisaillement en extension. Des deux essais exécutés, les deux ont posé problème, chacun à sa propre manière.

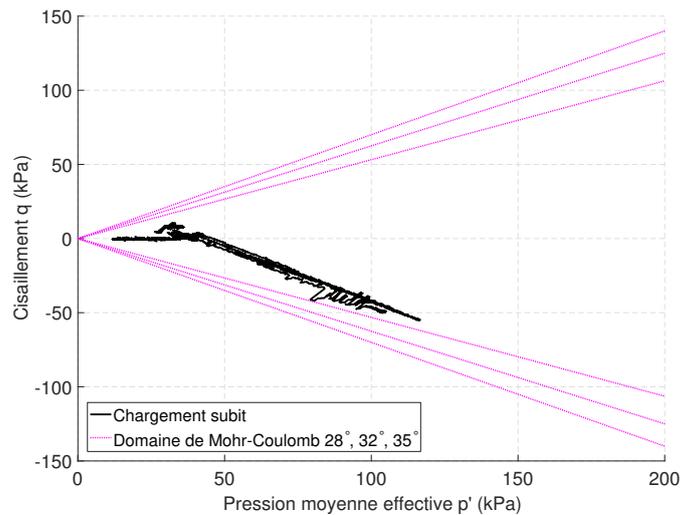


FIGURE 4.35 – Chargement isotrope de l'échantillon représenté dans le domaine de Mohr-Coulomb

Le premier échantillon, un peu plus humide que l'échantillon précédent, a présenté un léger glissement du LVDT au départ. L'échantillon est cette fois-ci un peu plus humide, avoisinant les 24% de teneur en eau, et n'a pas présenté de variations de volume mesurables par la corrélation. Il est à noter que l'échantillon présente un rétrécissement vertical de l'ordre de 1 pixel, soit la résolution de la photo. Une fois la mesure corrigée, les mesures LVDT et par corrélation s'accordent bien (Fig. 4.36).

La mesure de la succion, présentée en figure 4.37, montre en revanche une variation plus proche des résultats attendus. Le cycle de chargement isotrope a mené à une diminution de la succion au sein de l'échantillon, résultats rappelant les observations précédentes.

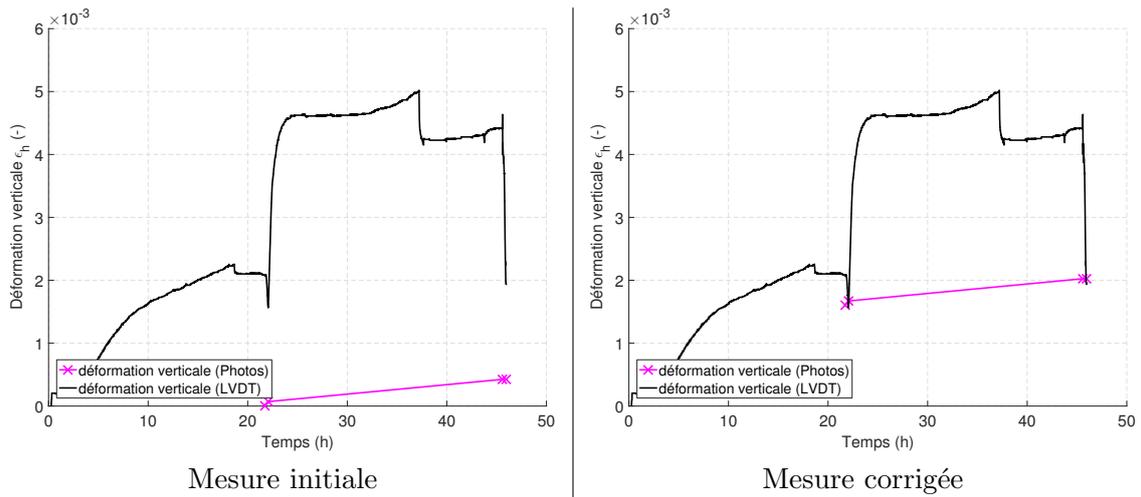


FIGURE 4.36 – Mesure de déplacement du deuxième essai (avec glissement du LVDT)

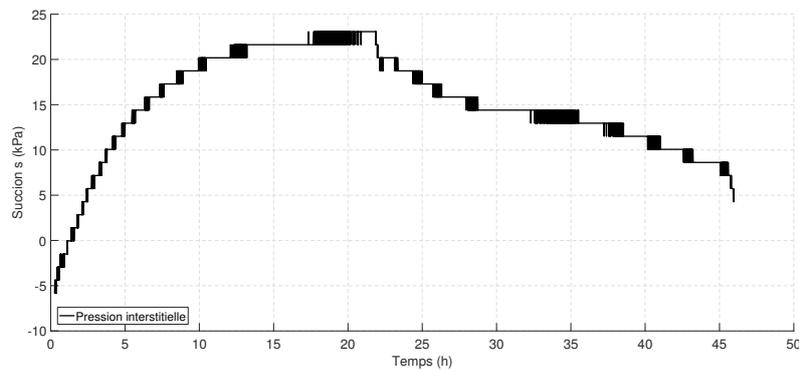


FIGURE 4.37 – Mesure de l'évolution de la succion sous cycle de chargement isotrope

Le deuxième échantillon testé a subi un problème lors de la préparation et a cisailé en tête. Les mesures de corrélation d'images et du LVDT se suivent bien, mais le cisaillement de la partie haute de l'échantillon, comme montré en figure 4.38, ne permet pas une analyse correcte en variations de volume. Dès la photo (3), le cisaillement dépasse l'espace de mesure visible et ne permet pas d'obtenir de mesure.

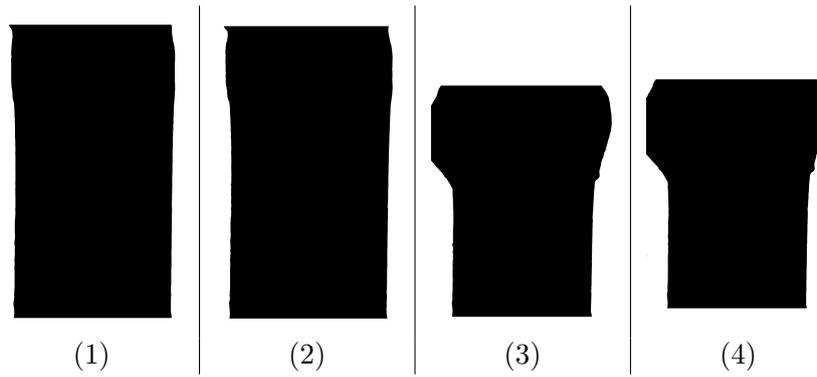


FIGURE 4.38 – Photos traitées du cisaillement de la partie haute du troisième échantillon

## 4.4 Conclusion

Dans le cadre de l'étude expérimentale des sols non saturés, une cellule triaxiale a été développée, s'inspirant et améliorant certains principes existants, dans l'objectif de mesurer les pressions interstitielles négatives, ainsi que les changements de volume d'un échantillon. Au-delà du développement, une première expérimentation a été réalisée dans l'objectif de mieux comprendre l'effet du compactage.

### Du point de vue du développement technique

Au-delà du tensiomètre installé à la base de l'échantillon, la cellule a été créée de sorte à avoir des fenêtres d'observation planes pour faciliter la corrélation d'images sur l'échantillon. L'utilisation de ces fenêtres avec un matériel photo de moyenne gamme permet d'assurer une précision sur la mesure à  $0.07mm$  près pour une longueur, et à  $1.27\%$  sur l'estimation du volume d'un échantillon de  $200mm^3$ .

La méthode de post-traitement par l'ombre de l'échantillon présente néanmoins des limites quant à l'analyse des déformations. Dans un premier temps, une amélioration du post-traitement pourrait passer par l'utilisation d'algorithmes de détection de bords plus poussés, permettant une meilleure précision sur l'interface. Dans un second temps, l'analyse des déformations locales de l'échantillon pourrait permettre de pousser l'étude plus loin sur le comportement du sol, par l'identification possible des bandes de cisaillement. Ces mesures ne peuvent en revanche pas être effectuées à l'aide d'une seule caméra, en raison des mouvements hors champ de l'échantillon. La cellule, déjà équipée de trois fenêtres, permet l'ajout de caméras multiples pour une analyse hors champ. Certains appareillages déjà utilisés sur des argiles (PLÉ, TOURABI et ABUAISHA 2013), tel le Dantec-Q400, pourront amener une dimension supplémentaire à l'analyse, plus particulièrement sur les champs locaux en 3D surfacique.

### Du point de vue du compactage des marnes

La difficulté de simuler le compactage dans une cellule triaxiale vient principalement de la rotation des contraintes sous la bille du compacteur. Qui plus est, l'effet de ce dernier n'est pas axi-symétrique et non totalement reproductible en cellule. À partir de données expérimentales in situ, les contraintes générées par les compacteurs du chantier de l'A304 sont approchées, et des essais sont réalisés sur un échantillon compacté à l'aide d'un Proctor, exécuté du côté humide

de l'optimum (23%).

L'usage en l'état de la cellule triaxiale n'est pas évident. Comme pour tout essai de ce type, la préparation de l'échantillon est une étape clé et difficile, en raison tout d'abord du temps de préparation d'un échantillon, comprenant une semaine d'homogénéisation de la teneur en eau du sol avant compactage (sac de 6kg de sol). La découpe présente le point critique, où une erreur de lame rend un échantillon inexploitable. Les essais sont longs, avec un cycle de chargement-déchargement par jour pour une mesure de succion journalière (20 heures d'homogénéisation du tensiomètre).

Le premier essai montre un défaut de procédure. La forte augmentation des pressions interstitielles dans l'échantillon ne permet pas de reproduire réellement l'activité de compactage de chantier. L'objectif de mesurer la succion entre deux passes de compacteur est incompatible avec le temps nécessaire à la mesure. Les modalités expérimentales sont donc à adapter pour obtenir un essai reproduisant au mieux les conditions in situ. De même, des essais in situ ou en laboratoire de compactage avec un temps de repos apporteraient des éléments complémentaires.

L'étude fournit également un élément d'interprétation sur le compactage complémentaire. Les contraintes apportées par le compacteur sont proches des contraintes nécessaires au cisaillement du sol. Cela implique une complexité dans l'analyse du comportement du sol au compactage, car l'effet du cisaillement implique des difficultés pour la prise en compte de la succion au cours de la densification. De plus, il est intéressant de noter que la succion initiale joue un rôle clé sur la possibilité de cisailier le matériau. Une succion importante permet d'éloigner la courbe de chargement en pression effective de la zone de cisaillement. L'observation des succions lors du compactage montre que le cisaillement mène à une augmentation de la succion mesurée, alors que l'utilisation d'un confinement isotrope seul, sans cisaillement, mène à une diminution de la succion, comme observé in-situ et en laboratoire.



---

# Conclusions

---

Inscrit dans le contexte de l'ANR TerreDurable, ce mémoire suit une partie du projet dont la ligne directrice est résolument orientée vers la pratique. Dans un contexte où les chantiers de terrassement ont un réemploi grandissant des matériaux fins, la maîtrise de leurs mises en œuvre reste souvent difficile, mais aussi limitée par le cadre réglementaire. De plus, le manque de retours d'expériences sur les défauts de compactage comme le matelassage et/ou le feuilletage est un handicap pour la profession qui aimerait anticiper ces phénomènes.

À partir de cet état des lieux, et avec les informations fournies par les praticiens et complétées par bon nombre de données bibliographiques, un plan expérimental a été créé, permettant de s'approcher des conditions réelles d'apparition de ces défauts. Pour le compléter, une approche en amont, basée sur la mécanique des milieux non saturés, a été menée. Pour ce faire, le programme comportait deux volets expérimentaux :

- le premier in situ, par l'intermédiaire de 20 plots de compactage et d'une planche d'essai. Cette dernière a permis la variation de 4 paramètres chantier : la teneur en eau, la mouture, le type de compacteur, et l'énergie de compactage ;
- le deuxième volet comportait une étude en laboratoire, comprenant deux objectifs : le premier était de fournir un cadre « non saturé » aux résultats de la planche de compactage, et le deuxième visait à étudier l'effet du compacteur sur le sol. Pour ce dernier, une étude triaxiale a été menée, et une cellule spécifique réalisée.

Dans l'ensemble, les résultats de la thèse peuvent s'articuler et être croisés autour de trois axes majeurs. Le premier concerne les pratiques de chantier, et les choix à effectuer selon l'objectif de compactage. Le deuxième axe porte sur les problématiques de laboratoire dans un cadre de représentativité des essais effectués vis-à-vis de la réalité du chantier. Pour finir, le troisième axe porte sur des problématiques plus spécifiques de la mécanique des milieux non saturés, à savoir, interactions succion-densité-saturation.

## **De la pratique des terrassements au regard de leurs objectifs**

Dans le cadre de la réalisation d'ouvrages, les objectifs vont être le moteur des choix à opérer vis-à-vis du compactage. Dans le cadre des barrages-poids, c'est l'homogénéité du matériau qui prime, les objectifs de résistance mécanique étant secondaires. Dans ce cadre, la planche montre que l'utilisation d'un matériau du côté humide de l'optimum Proctor est tout indiquée. Une fois compacté, le sol présentera des résistances suffisantes et homogènes sur toute la profondeur de couche. Par contre, l'énergie de compactage se devra de rester faible, sous peine de pertes importantes de résistance mécanique. L'utilisation d'un rouleau lisse entraîne de forts risques de matelassage, ce dernier empêchant tout compactage. Il est à noter que le matelassage n'a pu être empêché par le surcompactage. Une fois le matériau compacté, les jours non travaillés risqueront de poser problème. Toute dessiccation importante de l'ouvrage entraînera une fissuration du matériau. En effet, les faibles densités obtenues impliquent une entrée d'air à teneur en eau plus importante que pour un matériau plus dense. Il faudra rester vigilant quand la teneur en eau sera obtenue à l'aide d'une injection. En effet, sans un pulvimixage conséquent, les teneurs seront fortement disparates, menant à une hétérogénéité de l'ouvrage.

Dans le cas des ouvrages routiers, l'objectif du compactage est la densité de fond de couche, mais aussi la résistance mécanique. Dans ce cadre, le surcompactage d'un matériau sec fournit un résultat plutôt positif, avec une augmentation des deux valeurs à mesure de l'augmentation du nombre de passes de compacteur. Pour autant, de par sa forte densité, le comportement en retrait-gonflement risque de poser problème pour le long terme. La moindre variation hydrique provoquera des gradients de succion plus importants que pour un matériau medium, pouvant

mener l'ouvrage à des désordres. Cette solution semble donc abordable uniquement si l'ouvrage est protégé des intrusions d'eau. Les choix de compactage pour le routier se porteront donc plus vers un matériau humide normalement compacté. Dans ce cas, le surcompactage sera prohibé. Les différences entre rouleaux sont dans l'ensemble celles attendues. Les couches sont plus homogènes au pied dameur, mais présentent des résistances-pics plus faibles qu'au rouleau lisse, où le fond de couche peut laisser à désirer. Il reste à noter les très bonnes performances du couple rouleau lisse-pulvimixeur sur matériau medium, ces dernières pouvant être en partie attribuées au fait que le pulvimixeur tend à sécher légèrement le matériau.

L'analyse de l'effet à long terme du compactage sur les ouvrages découlant de l'analyse des courbes de rétention, une planche de compactage à long terme serait nécessaire pour affiner les conclusions présentées. Dans ce cadre, de meilleures méthodes seraient à mettre en place pour éviter les problèmes rencontrés. D'abord, l'accès à des compacteurs équipés de GPS permettrait un meilleur contrôle de l'épaisseur de couche et dissiperait les errements quant à leur influence sur les résultats expérimentaux. Les méthodes de prélèvement seraient, elles aussi, à revoir. Une méthode de prélèvement par blocs de sol taillés serait probablement moins interférente vis-à-vis des mesures que le carottage foncé. Des essais à long terme, observés sur plusieurs années, permettraient de mieux anticiper les déformations et désordres rencontrés au cours de la vie des ouvrages de terrassement.

### **De la représentativité des essais de laboratoire au regard de la réalité du chantier**

Le suivi des chantiers de terrassement nécessite la réalisation de bon nombre d'essais Proctors et IPI. Or, plusieurs questions peuvent se présenter sur la représentativité de ces essais, et la cohérence avec leurs homologues effectués en amont du chantier. Le temps d'action limité sur chantier et l'avance rapide de ce dernier ne permettent pas toujours le bon respect de prérogatives expérimentales. Or, l'essai Proctor montre une forte dépendance à la préparation du matériau. Un séchage à l'étuve trop fort peut mener à des écarts importants, non seulement sur la teneur en eau d'optimum, mais aussi sur la densité observée. Le séchage du matériau aura aussi une influence sur la courbe de rétention. L'augmentation de la température de séchage mène à un incrément de la succion d'entrée d'air. De même, les comportements de retrait-gonflement seront changés pour un matériau subissant de trop fortes températures. De même, la mouture du matériau influe fortement sur la valeur de la densité à l'optimum. Une mouture grossière n'atteindra pas des densités aussi importantes, faute à l'énergie perdue servant à déformer les mottes lors du serrage du matériau. La pertinence d'un optimum de densité basé sur une mouture de quelques millimètres pose alors problème au regard de celle, bien plus importante, observée sur chantier. En ajoutant à cette problématique les différences induites entre un compactage de laboratoire dynamique et un compactage quasi-statique vibrant de chantier, apparaît alors le problème de prescription de compactage, surtout quand les critères de contrôle découlent des essais de laboratoire.

La plupart des essais présentés confirment les difficultés de saturation des matériaux fins compactés. Cette difficulté de saturation est causée par la présence de bulles d'air occlus, mises en équations par la « Classical Nucleation Theory » (CNT). La CNT apporte un élément de réflexion quant aux usages expérimentaux en mécanique des sols non saturés, principalement au regard de la translation d'axe. Cette dernière mène à une forte sous-estimation des effets liés aux bulles d'air. Les bulles sous translation d'axe sont de tailles réduites, et dans le cadre d'une désaturation, ne peuvent parfois pas se former. Or, dans le domaine proche de la saturation, les bulles d'air influencent la compressibilité de fluide interstitiel et jouent un rôle prépondérant dans les réponses mécaniques du sol. Ces phénomènes incitent à l'abandon de la translation

d'axe dans les domaines proches de la saturation.

### **Du comportement du sol au regard de la mécanique des sols non saturés**

La planche de compactage et les pénétromètres utilisés ont mis en évidence une zone de virage pour la réponse hydromécanique du sol en cas de surcompactage. Du côté humide, le sol perd sa résistance sous l'effet du sur-compactage. À l'opposé, ce dernier aura tendance à augmenter la résistance mécanique du sol. La zone medium se comporte alors comme une zone de transition. Ces résultats sont confirmés et affinés par les essais IPI, où le virage de comportement se trouve à l'optimum Proctor. Le gain du côté sec est lié à la densification apportée par l'énergie de compactage complémentaire, avec une influence faible sur la succion. En revanche, l'énergie complémentaire du côté humide aura tendance à diminuer drastiquement la succion. Cette perte, malgré une densification notable, conduit à une perte de la résistance mécanique. L'eau et les bulles prisonnières du sol jouent un rôle prédominant du côté humide. Le surcompactage va mener d'abord à une déstructuration de l'espace poral, avec une augmentation de la taille moyenne des pores, mais aussi à une réponse élastique du sol par compression - dépression des bulles d'air susceptibles de générer du matelassage. Ces problématiques renforcent le besoin de modèles prenant en compte la présence des bulles d'air dans le fluide interstitiel. La simulation du comportement des sols non saturés au compactage doit tenir compte de ces éléments.

La conception d'une cellule optimisée pour une mesure originale par inter-corrélation d'images a permis d'apporter des éléments complémentaires au regard des chargements subis par le sol. L'observation des contraintes générées par un compacteur de type lisse (parmi les plus lourds du marché), reproduites en cellule triaxiale, amène un nouveau problème. Les chargements appliqués ont conduit à un cisaillement des échantillons lors de la simulation du passage d'un compacteur. Ce cisaillement mène à des interrogations quant à l'effet réel des compacteurs, au regard de leurs tailles et masses actives, et il permettrait, peut-être, d'expliquer certaines disparités de la planche de compactage. La succion initiale du matériau joue alors un rôle important sur la sensibilité du matériau au cisaillement générée par le compacteur. Plus la succion initiale sera importante, moins le matériau risque le cisaillement. Cela montre que l'état initial du matériau mène à une nouvelle séparation de la réponse hydromécanique entre côtés humide et sec de l'optimum. La bonne performance, encore améliorable, sur la mesure de changements de volumes à l'aide de la cellule triaxiale, incite à la création d'une campagne d'essais plus poussés, avec mesure de champs de déplacement 3D surfaciques, qui permettrait peut-être de détecter les plans de rupture. Cette campagne permettrait aussi de nourrir, de façon plus complète, le modèle développé dans le cadre du projet, et ainsi parvenir à une interprétation plus poussée de l'effet du compactage de chantier sur les matériaux fins. La cellule serait alors un outil clé pour la calibration du modèle et permettrait de simuler des ouvrages grandeur nature, selon leur compactage, à partir des données obtenues.

---

# Bibliographie

---

- ABU-ZREIG, M. M., N. M. AL-AKHRAS et M. F. ATTOM (2001). « Influence of heat treatment on the behavior of clayey soils ». In : *Applied Clay Science* 20, p. 129–135.
- ADAMS, B. A., D. WULFSOHN et D. G. FREDLUND (1996). « Air Volume Change Measurement in Unsaturated Soil Testing Using a Digital Pressure-Volume Controller ». In : *Geotechnical Testing Journal* 19.1, p. 12–21.
- AFNOR (1987). "Matériaux métalliques frittés perméables - Détermination de la perméabilité au fluides". Norme internationale ISO 4022 :1987.
- (1992). "Analyse granulométrique, Méthode par sédimentation". Sol : reconnaissance et essais NF P94-057. AFNOR.
- (1993). "Détermination des limites d'atterberg (coupelle/rouleau)". Sol : reconnaissance et essais NF P94-051. AFNOR.
- (1995). "Détermination des limites d'atterberg (cône)". Sol : reconnaissance et essais NF P94-052-1. AFNOR.
- (1996). "Analyse granulométrique, Méthode par tamisage à sec après lavage". Sol : reconnaissance et essais NF P94-056. AFNOR.
- (1997). "Indice CBR après immersion - Indice CBR immédiat - Indice portant immédiat". Sol : reconnaissance et essais NF P94-078. AFNOR.
- (1998). "Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériaux rocheux". Sol : reconnaissance et essais NF P94-068. AFNOR.
- (1999). "Détermination des références de compactage d'un matériau". Sol : reconnaissance et essais NF P94-093. AFNOR.
- (2012). *Détermination du coefficient de perméabilité verticale d'un terrain par essai à l'infiltration  $\frac{1}{2}$ tre à simple anneau, de type fermé - Essai à charge constante et essai à charge variable*. Déchets NF-X 30-420.
- AGUS, S. S. et T. SCHANZ (2007). « Errors in total suction measurements ». In : *Experimental Unsaturated soil mechanics*. T. schanz. Springer, p. 59–70.
- AHMED, S., C.W. LOVELL et S. DIAMOND (1974). « Pores size and strength of compacted clay ». In : *Journal of geotechnical engineering division*, p. 407–425.
- ANDRIANATREHINA, S. R. (2016). « Comportement hydromécanique des sols fins compactés au voisinage de la saturation - Application aux remblais routiers ». Thèse de doct. Université du Havre, LOMC.
- ARSENIE, I. M. (2009). *Interprétation en contraintes effectives du comportement réversible des matériaux granulaires compactés non-saturés sous sollicitation triaxiales cycliques*. Rapp. tech. Projet de fin d'étude. INSA Strasbourg.
- ASTM (1999). *Standard Test Method for Pore Size Characteristics of Membrane Filters Using Automated Liquid Porosimeter*. ASTM E1294-89.
- (2010). *Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper*. D-5298-10.

- ATHAPATHTHU, A. A. R.G. et al. (2007). « A lightweight dynamic cone penetrometer for evaluation of shear strength of natural masado slopes ». In : *Doboku Gakkai Ronbunshuu C* 63.2, p. 403–416.
- BACCONET, C., R. GOURVÈS et S. ZHOU (1995). « Contrôle de compactage au pénétromètre Dynamique ». In : *1er journées Louis Ménéard*. T. 1, p. 183–193.
- BAKER, R. et S. FRYDMAN (2009). « Unsaturated soil mechanics Critical review of physical foundations ». In : *Engineering Geology* 106.1-2, p. 26–39.
- BENSON, C et D DANIEL (1990). « Influence of clods on the hydrolic conductivity of compacted clay ». In : *Journal of Geotechnic Engineering* 116.8, p. 1231–1248.
- BHANDARI, AR, W POWRIE et RM HARKNESS (2012). « A digital image-based deformation measurement system for triaxial tests ». In : *ASTM geotechnical testing journal* 35.2, p. 209–226.
- BICALHO, K. V. et al. (2010). « Evaluation of filter paper calibrations for laboratory estimating of soil suctions ». In : *Unsaturated Soils : Experimental studies in Unsaturated Soils and Expansive Soils*. Scott Sloan. CRC Press-Taylor / Francis Group, 215–220.
- BISHOP, A. W. et I. B. DONALD (1961). « The experimental study of partly saturated soil in the triaxial apparatus ». In : *5th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.* P. 13–21.
- BLATZ, J et J GRAHAM (2000). « A system for controlled suction in triaxial tests ». In : *Géotechnique* 50.4, p. 465–470.
- BLATZ, James A, Yu-Jun CUI et Luciano OLDECOP (2009). « Vapour equilibrium and osmotic technique for suction control ». In : *Laboratory and Field Testing of Unsaturated Soils*. Springer, p. 49–61.
- BLIGHT, G. E. (2013). *Unsaturated Soil Mechanics in Geotechnical Practice*. CRC pres - Balkema.
- BOUTONNIER, L. (2007). « Comportement Hydromécanique des sols fins proches de la saturation. cas des ouvrages en terre : coefficient B, déformation instantanées et différées retrait/gonflement ». Thèse de doct. Ecole INP Grenoble.
- BOUTONNIER, L. et al. (2012a). *Conception des ouvrages en terre en sols fins : Guide méthodologique*. Rapp. tech. Version provisoire B0. TerreDurable.
- BOUTONNIER, L. et al. (2012b). *TerreDurable - Terrassements économiques, écologiques et durables*. Rapp. tech. Agence Nationale de la Recherche - Programme Bâtiments et villes Durables.
- BOYD, J. L. et V. SIVAKUMAR (2011). « Experimental observations of the stress regime in unsaturated clay when laterally confined ». In : *Géotechnique* 61.4, p. 345–363.
- BROOKS, R. H. et A. T. COREY (1964). *Hydrolique Properties of Porous Media*. Rapp. tech. Colorado State University, Fort Collins.
- BRUAND, A. et I. COUSIN (1995). « Variation of textural porosity of a clay/loam soil during compaction ». In : *European Journal of soil science* 46.3, p. 377–385.
- BRULL, A. (1977). *Mesure de la tension de l'eau interstitielle dans les sols*. Rapp. tech. Publication F 35/76. Centre de Recherches Routières (CRR).
- CABOT, L. et J.P LE BIHAN (1993). « Quelques propriétés d'une argile sur la ligne optimal de compactage ». In : *Canadian Geotechnical Journal* 30.1, p. 1033–1040.
- CAMP, S., J.P. GOURC et O. PLÉ (2010). « Landfill clay barrier subjected to cracking : Multi-scale analysis of bending tests ». In : *Applied Clay Science* 48.3, p. 384–392.
- CAMP, S. et al. (2007). « Mechanical behaviour of a clay layer for landfill cap cover application : experimental investigation and numerical modelling ». In : *Theoretical and numerical unsaturated soil mechanics*. Springer, p. 203–209.
- CAMP DEVERNAY, S. (2008). « Comportement sous flexion d'une argile : application à la couverture d'un ISD TFA ». Thèse de doct. Université Joseph Fourier (UJF Grenoble).
- CAUPIN, F. et E. HERBERT (2006). « Cavitation in water : a review ». In : *Physique* 7.

- CETIN, H. et al. (2007). « Soil structure changes during compaction of a cohesive soil ». In : *Engineering Geology* 92, p. 38–48.
- CHALAK, C. (2016). « Micro-macro relations for unsaturated materials and their integration in boundary value problems ». Thèse de doct. Université de Grenoble.
- CHANDLER, R. J. et C. I. GUTIERREZ (1986). « The filter-paper method of suction measurement ». In : *Geotechnique* 36.2. Sous la dir. de TELFORD, p. 265–268.
- COLLINS, R. et A. G. MILLER (2014). « Cone penetration testing in unsaturated soils at two instrumented test sites ». In : *Unsaturated Soils : Research and applications, UNSAT 2014*. N. Khalili, A. Russell et A. Khoshghalb. A.A. Balkema, p. 1489, 1494.
- CORTÉ, J.F. et al. (1992). « Présentation du nouveau guide technique Réalisation des remblais et des couches de forme ». In : *Bull. Liaison P. et Ch* 126, p. 26–28.
- CRAIG, W.H. et E.M.G. GALLAGHER (1997). « Centrifuge modeling of landfill capping systems subject to differential settlement ». In : *14th International conference on soil mechanics and foundation engineering*. Taylor & Francis, p. 1889–1894.
- CUI, Y. J., P. ALZOGHBI et P. DELAGE (2001). « Influence des mécanismes de rétention des polluants sur la résistance au cisaillement d'un sol compacté ». In : *15th International conference on soil mechanics and geotechnical engineering*. Taylor & Francis, p. 1995–1998.
- DAÏAN, J.-F. (2007). *Porométrie au mercure - Le modèle XDQ*. Rapp. tech. Notes explicatives du modèle  $\frac{1}{2}$  XDQ. LTHE - Grenoble.
- (2012). « *Équilibre et transferts en milieu poreux* ». AHL-publication personnelle. Chap. Annexe : repère thermodynamiques, p. 61–78.
- DANDJINO, J. E. (1988). *Feuilleteage des sols au compactage*. Rapp. tech. Université du Havre, CETE Normandie Centre.
- DAUD, F.Z. (1996). « La perméabilité des sols fins compactés ». Thèse de doct. ENS Géologie de Nancy.
- DELAGE, P. et Y.-J. CUI (2000). « L'eau dans les sols non saturés ». In : *Techniques de l'ingénieur. Construction* C301. Sous la dir. d'Éditions TI, p. C301.1 –C301.20.
- DUPONT, E (1859). Ingénieur en Chef au Corps imperial des Mines, Directeur de l'École des Maîtres-Mineurs d'Alais. A. Veirun - imprimeur libraire - grand'Rue, 102.
- ELSBURY, B. R. et al. (1990). « Lessons learned from compacted clay liner ». In : *Journal of Geotechnical Engineering* 116.1, p. 1641–1660.
- FERRIER, H. et al. (1980). « Comportement d'une argile raide au compactage ». In : *Colloque international sur le compactage*. T. 1. ENPC et LCPC, p. 35–46.
- FLAVIGNY, E. et H. DENDANI (1984). « Comportement mécanique d'une argile compactée ». In : *3e colloque Franco-polonais de mécanique des sols appliquée*, p. 264–286.
- FLEUREAU, J.-M. et al. (1993). « Behavior of clayey soils on drying-wetting paths ». In : *Canadian Geotechnical Journal* 30.2, p. 287–296.
- FROUMENTIN, M. et G. MOREL (1981). *Compactage à faible teneur en eau, Compte rendu des essais 80-81*. Rapp. tech. CETE - CER Rouen.
- FRYDMAN, S. et R. BAKER (2009). « Theoretical soil-water characteristic curves based on adsorption, cavitation, and a double porosity model ». In : *International journal of geomechanics* 9.6, p. 250–257.
- GACHET, P. et al. (2007). « Automated digital image processing for volume changes measurement in Triaxial cells ». In : *Geotechnical testing journal* 30.2. Sous la dir. de LASTM INTERNATIONAL.
- GALINIÉ, H. et al. (2003). « Utilisation du pénétromètre dynamique de type Panda en milieu urbain pour l'évaluation et la caractérisation du dépôt archéologique ». In : *Revue d'Archéométrie* 27, p. 15–26.
- GEISER, F. (1999). « Comportement mécanique d'un limon non saturé : Etude expérimentale et modélisation constitutives ». Thèse de doct. EPFL Lausanne.

- GEISER, F., L. LALOUÏ et L. VULLIET (2000). « On volume measurement in unsaturated triaxial test ». In : *Unsaturated Soils for Asia*. Rahardjo, Toll et Leong. Balkema, p. 669–674.
- GENUCHTEN, M. T. van (1980). « A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils ». In : *Soil Science Society of America* 44.5, p. 403–416.
- GEORGOPOULOS, I.-O. S. (2010). « A review on the classical triaxial apparatus : limitations and improvements ». In : *European Journal of environmental and civil engineering* 14.8-9. Sous la dir. de LAVOISIER, p. 1091–1111.
- GREENPAN, L. (1977). « Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions ». In : *Journal of research of the National bureau of standards* 81A.1, p. 89–96.
- HANSBO, S. et B. PRAMBORG (1980). « Compaction Control ». In : *Colloque international sur le compactage*. T. 2. ENPC et LCPC, p. 559–564.
- HEAD, K. H. et R. EPPS (1986). *Manual of soil laboratory testing*. T. 3. Pentech Press London.
- HEIBROCK, G., R. M. ZEH et K. J. WITT (2003). « Tensile strength of compacted clays ». In : *From experimental evidence toward numerical modelling of unsaturated soils*. Springer, p. 395–412.
- HEITOR, A., B. INDRARATNA et C. RUJIKIATKAMJORN (2014). « Role of the compaction energy level on the small strain stiffness of a silty sand soil subjected to wetting and drying ». In : *Unsaturated Soils : Research and applications, UNSAT 2014*. N. Khalili, A. Russell et A. Khoshghalb. A.A. Balkema, p. 749, 754.
- HO, D. Y. F. et D. G. FREDLUND (1982). « A Multistage Triaxial Test for Unsaturated Soil ». In : *American Society for Testing et Materials*.
- HOLTZ, R. D. et W. D. KOVACS (1981). *An introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice-Hall.
- HUCKERT, A. et al. (2016). « Load transfer mechanisms in geotextile-reinforced embankments overlying voids : Experimental and analytical approaches ». In : *Geotextiles and Geomembranes*.
- KÉBRÉ, M. B. (2013). « Gestion des Ressources en Eau dans les Régions Arides : Analyse Expérimentale d'un Sol Type du Burkina Faso et Modélisation Numérique des Transferts d'Eau ». Thèse de doct. Université Montpellier 2 et Université de Ouagadougou.
- KHADDOUR, G. (2015). « Multi-scale characterization of the hydro-mechanical behaviour of an unsaturated sand : water retention and triaxial responses ». Thèse de doct. Université de Grenoble.
- KHAY, M. et G. MOREL (1980). « Compactage des assises de remblai de chaussées au moyen du compacteur pneumatiques : étude expérimentale en vraie grandeur ». In : *Colloque international sur le compactage*. T. 2. ENPC et LCPC, p. 411–418.
- KOUASSI, P. et al. (2000). « A new technic of kneading compaction in the laboratory ». In : *ASTM geotechnical testing journal* 23.1, p. 72–82.
- LAMBE, T.W. (1958). « The structure of compacted clay ». In : *Journal of Soil Mechanics* 84.2, p. 1654–1688.
- L'ATELIER DES TERRITOIRES (2011). *Autoroute A304 - Inventaire de zones humides selon les critères pédologiques*. Rapp. tech. Dans le cadre de la loi sur l'eau. D.R.E.A.L. Champagne Ardennes.
- LCPC et SETRA (2000). *Guide des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme, Guide technique (GTR)*. T. 1, 2. Ministère de l'équipement du logement et des transports français.
- LEÃO, T. P. et M. TULLER (2014). « Relating soil specific surface area, water film thickness, and water vapor adsorption ». In : *Water Resources Research* 50.10, p. 7873–7885.
- LEFLAIVE, E. et M. SCHAEFFNER (1980). « L'importance de l'épaisseur des couches dans le compactage des remblais ». In : *Colloque international sur le compactage*. T. 1. ENPC et LCPC, p. 267–270.

- LEFLAIVE, E. et al. (1974). « Le choix de modalité de compactage ». In : *Bull. Liaison P. et Ch* 72, p. 155–166.
- LI, Zhong-Sen (2015). « Etudes des propriétés hydromécaniques des sols argileux non saturés proches de la saturation ». Thèse de doct. Ecole Centrale de Paris.
- LIGER-BELAIR, G. (2014). « How Many Bubbles in Your Glass of Bubbly? » In : *The Journal of Physical Chemistry B* 118.11. PMID : 24571670, p. 3156–3163. DOI : [10.1021/jp500295e](https://doi.org/10.1021/jp500295e).
- LIKOS, W. J. et N. LU (2002). « Filter paper technique for measuring total soil suction ». In : *Transportation research record* 1786. Sous la dir. de National Research COUNCIL, p. 120–128.
- LIKOS, W. J. et al. (2003). « Measured and estimated suction indices for swelling potential classification ». In : *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 129.7.
- LOUDIEU, D. (1980). « Problème de compactage lors de la construction du barrage de Rillé ». In : *Colloque international sur le compactage*. T. 1. ENPC et LCPC, p. 271–280.
- LOURENÇO, SDN et al. (2008). « Evaluation of suction measurement by the tensiometer and the axis translation technique ». In : *Unsaturated Soils. Advances in Geo-Engineering, E-UNSAT 2008*. Toll et al. Taylor & Francis, p. 213–218.
- LUBKING, P. et al. (1980). « Investigation of the variation of density , rigidity and bearing capacity measuring results on behalf of the acceptance control of sand subbases ». In : *Colloque international sur le compactage*. T. 2. ENPC et LCPC, p. 515–521.
- LUGLI, Francesca et Francesco ZERBETTO (2007). « An introduction to bubble dynamics ». In : *Physical Chemistry Chemical Physics* 9 (20), p. 2447–2456.
- MAGNAN, J.-P. (1997). « Description identification et classification des sols ». In : *Techniques de l'ingénieur. Construction* C208. Sous la dir. d'Éditions TI, p. C208.1 –C208.19.
- MAHMUTOVIC, D. et al. (2014). « A model for weakly unsaturated soils taking into account the three phases (air, water and soil) ». In : *Unsaturated Soils : Research and Applications, UNSAT 2014*. N. Khalili, A. Russell et A. Khoshghalb. A.A. Balkema, p. 307–312.
- MAINGUY, M., O. COUSSY et V BAROGHEL-BOUNY (2001). « Role of air pressure in drying of weakly permeable materials ». In : *Journal of engineering Mechanics* 127.6, p. 582–592.
- MARINHO, F. A. M. et R. J. CHANDLER (1995). *Cavitation and the direct measurement of soil suction*. Presse de l'école nationale des Ponts et chaussées, p. 623–629.
- MAUGIS, D. (1980). « Mécanique et thermodynamique de la phase superficielle ». In : *Cahiers du groupe français de rhéologie* V.5.
- MAZZIERI, F. et P.O. VAN IMPE (2001). « Preparation procedure influence on properties of compacted clay specimens ». In : *15th International conference on soil mechanics and geotechnical engineering*. Taylor & Francis, p. 1995–1998.
- MESBAH, A, JC MOREL et M OLIVIER (1999). « Comportement des sols fins argileux pendant un essai de compactage statique : détermination des paramètres pertinents ». In : *Materials and structures* 32.9, p. 687–694.
- MILATZ, M. et J. GRABE (2014). « Triaxial and simple shear tests on unsaturated sand specimens with negative pore water pressure ». In : *Unsaturated Soils : Research and applications, UNSAT 2014*. N. Khalili, A. Russell et A. Khoshghalb. A.A. Balkema, p. 1617, 1622.
- MONTES HERNADEZ, G. (2002). « Etude expérimentale de la sorption d'eau et du gonflement des argiles par microscopie électronique à balayage environnementale (ESEM) et analyse digitale d'images ». Thèse de doct. Université Louis Pasteur.
- MOONEY, M. A. et R. V. RINEHART (2009). « In Situ Soil response to Vibratory Loading and its Relationship to roller-Measured soil stiffness ». In : *Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 135.8, p. 1022–1031.
- MOUSSAÏ, B. (1993). « Etude en laboratoire du compactage statique et de la perméabilité des sols fins ». Thèse de doct. INSA Lyon.
- MUNOZ-CASTELBLANCO, J.-A. et al. (2014). « New triaxial device for unsaturated soils with local measurment ». In : *Unsaturated Soils : Research and applications, UNSAT 2014*. N. Khalili, A. Russell et A. Khoshghalb. A.A. Balkema, p. 1617, 1622.

- NGOC LAN, T. (1981). « Utilisation de l'essai au bleu de méthylène en terrassement routier ». In : *Bull. Liaison P. et Ch* 111, p. 5–16.
- NISHIMURA, T. et D. G. FREDLUND (2003). « A new triaxial apparatus for high total suction using relative humidity control ». In : *12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, p. 65–68.
- OLIVIER, M. (1986). « Le matériau terre. Essai de compactage statique pour le fabrication de briques de terre compressées ». In : *Bull. Liaison P. et Ch* 146, p. 37–43.
- OLIVIER, M. et al. (1997). « Mode opératoire pour la réalisation d'essais de résistance sur blocs de terre comprimée ». In : *Materials and structures* 30.9, p. 515–517.
- OLSON, R.R. (1963). « Effective stress theory of soil compaction ». In : *Journal of Soil Mechanics* 89.2, p. 27–45.
- PAIG, J. et J.-C. BLIVET (1973). « Remblais à talus vertical armé avec un géotextile synthétique ». In : *Bull. Liaison P. et Ch* 64, p. 8–13.
- PEDROTTI, M., A. TARANTINO et F. BOECK (2014). « experience gained from the conditioning of high capacity tensiometers ». In : *Unsaturated Soils : Research and applications, UNSAT 2014*. N. Khalili, A. Russell et A. Khoshghalb. A.A. Balkema, p. 1651, 1657.
- PERON, H. et al. (2009a). « Discrete element modeling of drying shrinkage and cracking of soils. » In : *Computers and Geotechnics* 36, p. 61–69.
- PERON, H. et al. (2009b). « Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils : experimental characterisation and mechanisms identification. » In : *Canadian geotechnical journal* 49, p. 1177–1201.
- PLÉ, O., A. TOURABI et M.S. ABUAISHA (2013). « 3-Dimensional digital image correlation for strains determination in clayey soil ». In : *Applied mechanics and materials, the 2013 international conference on civil engineering. Architecture and building materials*. CEABM 2013. Jinan China.
- PLÉ, O. et al. (2012). « Flexural behaviour of a clay layer : experimental and numerical study ». In : *Canadian Geotechnical Journal* 49.4, p. 485–493.
- PONSART, F. (2010). *Projet de L'autoroute A 304 - Expertise d'hydrologue agréé*. Rapp. tech. Dans le cadre de la loi sur l'eau. D.R.E.A.L. Champagne Ardennes.
- PURWANA, Y. M. (2013). « Experimental Study on Unsaturated Direct Shear and California Bearing Ratio Tests with Suction Monitoring on Sand-Kaolin Clay Mixtures ». Thèse de doct. Curtin Iniversity.
- QUEZADA, J. C. et al. (2014). « Penetration test in coarse granular material using Contact Dynamics Method ». In : *Computers and Geotechnics* 55, p. 248–253.
- QUIBEL, A. (1978). « Remblais Expérimental au CER de Rouen, Etude de la polution et du comportement mécanique - Le phosphogypse : utilisation d'un sous produit industriel en technique routière ». In : *Bull. Liaison P. et Ch* Numéro spécial VII, p. 99–109.
- RAO, S. M et K REVANASIDDAPPA (2000). « Role of matric suction in collapse of compacted clay soil ». In : *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 126.1, p. 85–90.
- RASMUSSEN, C. J., Y. J. GOR et V. NEIMARK (2012). « Monte Carlo simulation of cavitation in pore with nonwetting defects ». In : *Langmuir* 28.6, p. 4702–4711.
- RICHARD, G et al. (2001). « Effect of compaction on the porosity of a silty soil : influence on unsaturated hydraulic properties ». In : *European Journal of soil science* 52, p. 49–58.
- RICHEFEU, V., M. S. EL YOUSOUFI et F. RADJAI (2006). « Shear strength properties of wet granular materials ». In : *PHYSICAL REVIEW E* 73.5, p. 1–11.
- RIDLEY, A. M. et J. B. BURLAND (1993). « A new instrument for the measurement of soil moisture suction ». In : *Géotechnique* 43.2, p. 321–324.
- RIGOT, A. (1984). « sols fins traités en assise de chaussées : 4 - Fabrication et mise en œuvre d'un limon traité à la chaux et au ciment : essais sur chantier experimental ». In : *Bull. Liaison P. et Ch* 134, p. 35–45.

- RINEHART, R. V. et M. A. MOONEY (2009). « Measurement of Roller Compactor Induced Triaxial Soil Stresses and Strains ». In : *Geotech. Testing Journal* 32.4, p. 347–357.
- RINEHART, R. V., M. A. MOONEY et J. R. BERGER (2008). « In-Ground Stress-Strain beneath Center and Edge of Vibratory Roller Compactor ». In : *1st Intl. Conf. Transportation Geotechnics (ITCG)*.
- ROMERO, E. (1999). « Characterisation and Thermo-hydro-mechanical behaviour of unstaured boon clay : An experimental study ». Thèse de doct. Universitat Politècnica de Catalunya.
- ROMERO, E., A. GENS et A. LLORET (1999). « Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted boom clay ». In : *Engineering Geology* 54, p. 117–127.
- ROMERO, E. et al. (1997). « A new suction and temperature controlled triaxial apparatus ». In : *14th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.* P. 185–188.
- RUSSEL, A. R. et N. KHALILI (2014). « Interpretation of the cone penetration test in unsaturated sands ». In : *Unsaturated Soils : Research and applications, UNSAT 2014*. N. Khalili, A. Russell et A. Khoshghalb. A.A. Balkema, p. 1675, 1681.
- SALAGER, S. (2007). « Etude de la rétention d'eau et de la consolidation des sols dans un cadre thermohydro-mécanique ». Thèse de doct. Université Montpellier 2.
- SALAGER, S. et al. (2006). « Influence de la température sur le courbe de rétention d'eau en milieux poreux ». In : *Comptes Rendus Mécanique* 334.6, p. 393–398.
- SANDER, R. (2015). « Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent ». In : *Atmospheric Chemistry and Physics* 15.8, p. 4399–4981.
- SAWANGSURIYA, A., T. B. EDIL et P. J. BOSSCHER (2008). « Modulus-Suction-Moisture Relationship for compacted soils in postcompaction state ». In : *Canadian Geotechnical Journal* 45.1, p. 973–983.
- (2009). « Modulus-Suction-Moisture Relationship for compacted soils in postcompaction state ». In : *Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering* 135.1, p. 1390–1403.
- SETRA-LCPC (1982). *Guide de chantier - terrassements routiers - Contrôle continu du compactage*. Rapp. tech. SETRA - LCPC.
- SIMMS, P. et M. GRABINSKY (2009). « Direct measurement of matric suction in triaxial tests on early-age cemented paste backfill ». In : *Canadian Geotechnical Journal* 46.1, p. 93–101.
- SIVAKUMAR, V. et J. WHEELER (2000). « Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay Part 1 : Wetting and isotropic compression ». In : *Géotechnique* 50.4, p. 359–368.
- SIVAKUMAR, V. et S. J. WHEELER (1993). « Elasto-plastic volume change of unsaturated compacted clay ». In : *ASCE National convention and Exposition*, p. 127–138.
- SORMAIL, L. (1969). « Quelques considérations sur l'emploi des tensiomètres ». In : *Bulletin of the international association of scientific hydrology* 14.2, p. 79–129.
- SOULIÉ, F. et al. (2006). « Influence of liquid bridges on the mechanical behaviour of polydisperse granular materials ». In : *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 30, p. 231–228.
- STENGEL, P. et al. (1986). « La double sonde gamma LCP-INRA, Définition, Expérimentation et utilisation en agronomie ». In : *Bull. Liason P. et Ch* 141, p. 109–120.
- TOMI, T. (1998). « contribution à l'étude du phénomène de feuillette des couches de sols fin sous l'effet de sollicitations de compactage ». Thèse de doct. ENPC.
- TRIPATHY, S., E.C. LEONG et H. RAHARDJO (2005). « Suction of compacted residual soils ». In : *Unsaturated Soils : Experimental Studies*. Sous la dir. de Tom SCHANZ. T. 93. Springer Proceedings in Physics. Springer Berlin Heidelberg, p. 111–122.
- VALEUX, J.-C. et G. MOREL (1980). « Influence de la portance du support sur la qualité de compactage des couches de chaussées ». In : *Colloque international sur le compactage*. T. 2. ENPC et LCPC, p. 475–480.

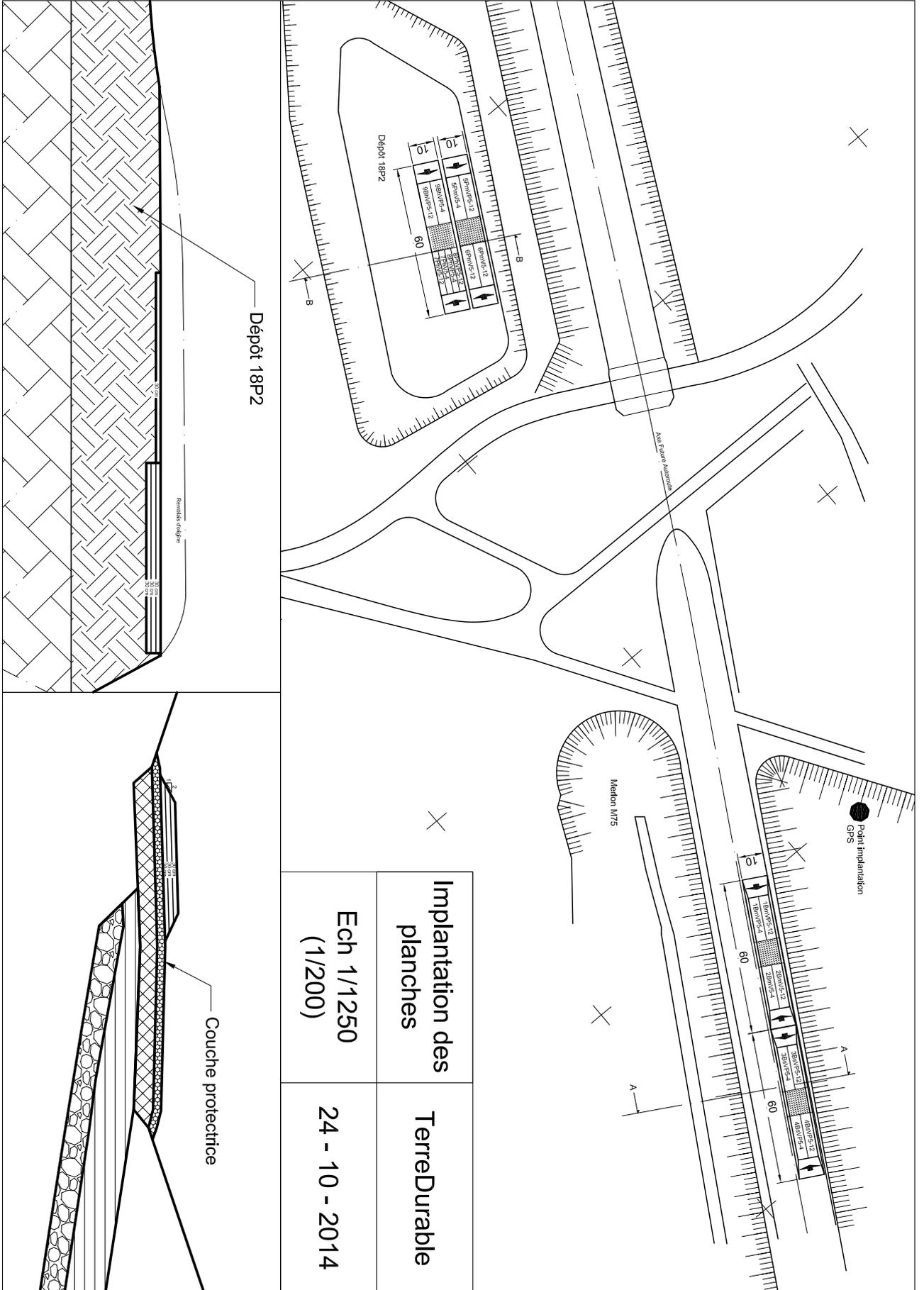
- VILLARD, P., A. HUCKERT et L. BRIANCON (2016). « Load transfer mechanisms in geotextile-reinforced embankments overlying voids : Numerical approach and design ». In : *Geotextiles and Geomembranes*.
- WHEELER, J. et V. SIVAKUMAR (2000). « Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay Part 2 : shearing and constitutive modelling ». In : *Géotechnique* 50.4, p. 369–376.
- WHEELER, S. J. (1986). « The stress-strain behaviour of soils containing gas bubbles ». Thèse de doct. Oxford University.
- YANG, S.-R., H.-D. LIN et W.-H. HUANG (2012). « Variation of Initial Soil Suction with Compaction Conditions for Clayey Soils ». In : *Journal of Mechanics* 28 (3), p. 431–437.
- YANG, X. et X. YOU (2013). « Estimating Parameters of Van Genuchten Model for Soil Water Retention Curve by Intelligent Algorithms ». In : *Applied Mathematics & Information Sciences* 7.5, p. 1977–1983.
- ZERHOUMI, M. I. (1995). « Essais triaxiaux utilisant des psychromètres ». In : *Unsaturated Soils - Sols Non Saturés - UNSAT'95*. E. Alonso et P. Delage. Presse de l'école nationale des Ponts et chaussées, p. 673–678.

---

# Annexes

---

## Annexe 0 : Implantation de la planche sur site A304



## Annexe 1 : Données de la planche de compactage

Planche 1	:	1BMVP5	:	Brut, Médium, Rouleau Pied Dameur
Planche 2	:	2BMV5	:	Brut, Médium, Rouleau Lisse
Planche 3	:	3BSVP5	:	Brut, Sec, Rouleau Pied Dameur
Planche 4	:	4BSV5	:	Brut, Sec, Rouleau Lisse
Planche 5	:	5PMVP5	:	Pulvimixé, Médium, Rouleau Pied Dameur
Planche 6	:	6PMV5	:	Pulvimixé, Médium, Rouleau Lisse
Planche 7	:	7PMVP5	:	Pulvimixé, Humide, Rouleau Lisse
Planche 8	:	8PMVP5	:	Pulvimixé, Humide, Rouleau Pied Dameur
Planche 9	:	9BMVP5	:	Brut, Humide, Rouleau Pied Dameur

## Planche 1 : 1BMVP5

|| Compactage normal (4)

|| Compactage Forcé (12)

Densités en  $gcm^{-3}$  et taux de compactage

	Gamma	%OPN	Carottes	%OPN	Gamma	%OPN	Carottes	%OPN
Haut	-	-	1.69	103.0	-	-	1.74	106.1
Bas	-	-	1.75	106.7	-	-	1.71	104.3
LOMC	-	-	1.65	100.6	-	-	1.66	101.2

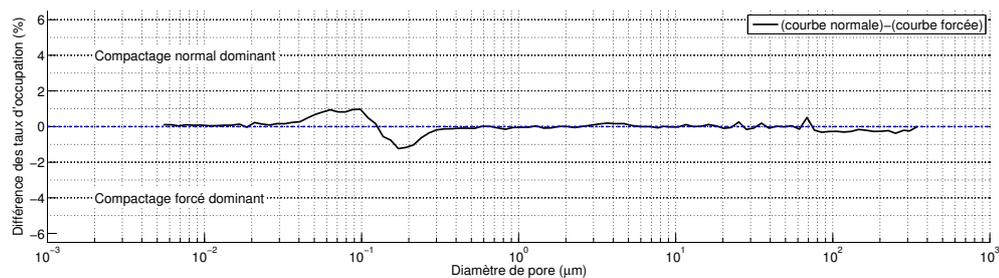
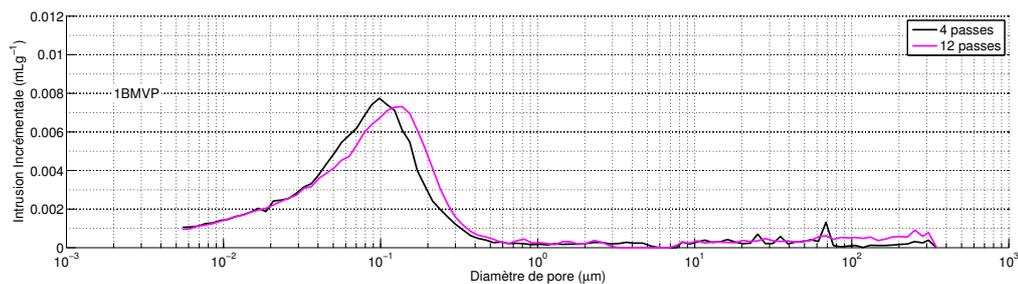
Teneur en Eau (MeO = 21.2%)

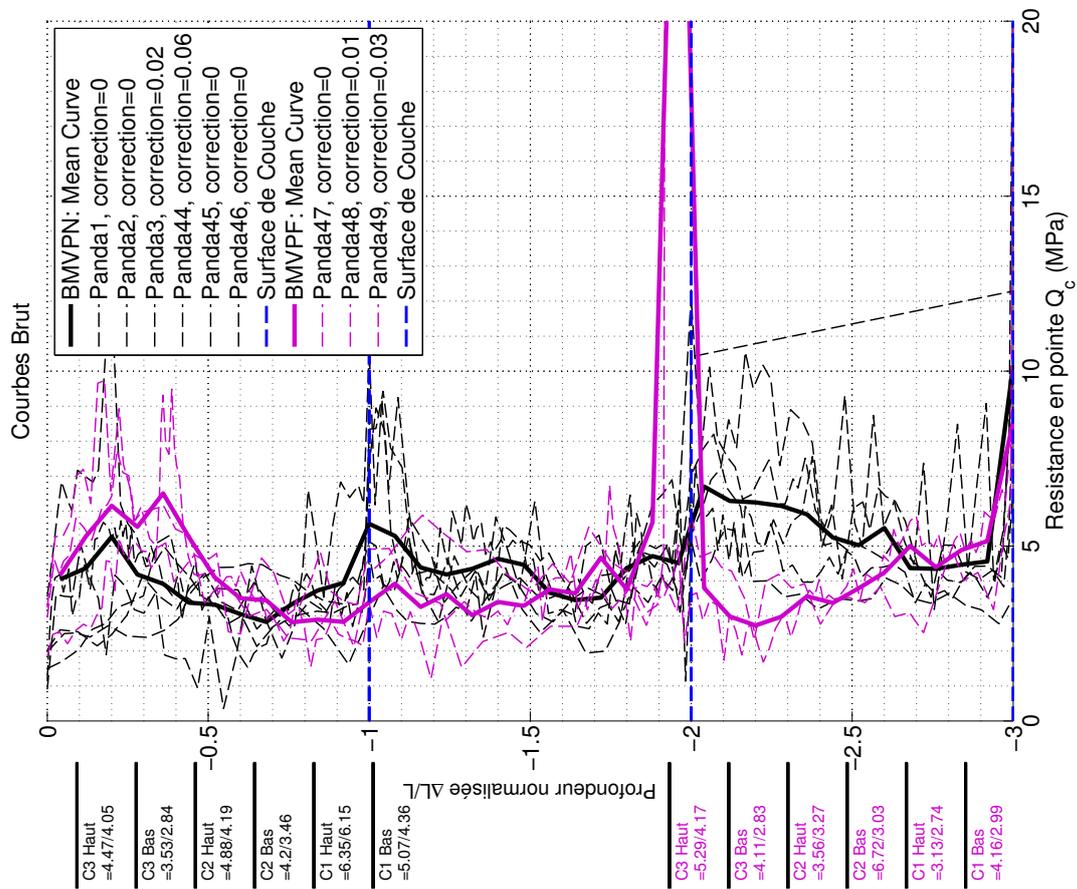
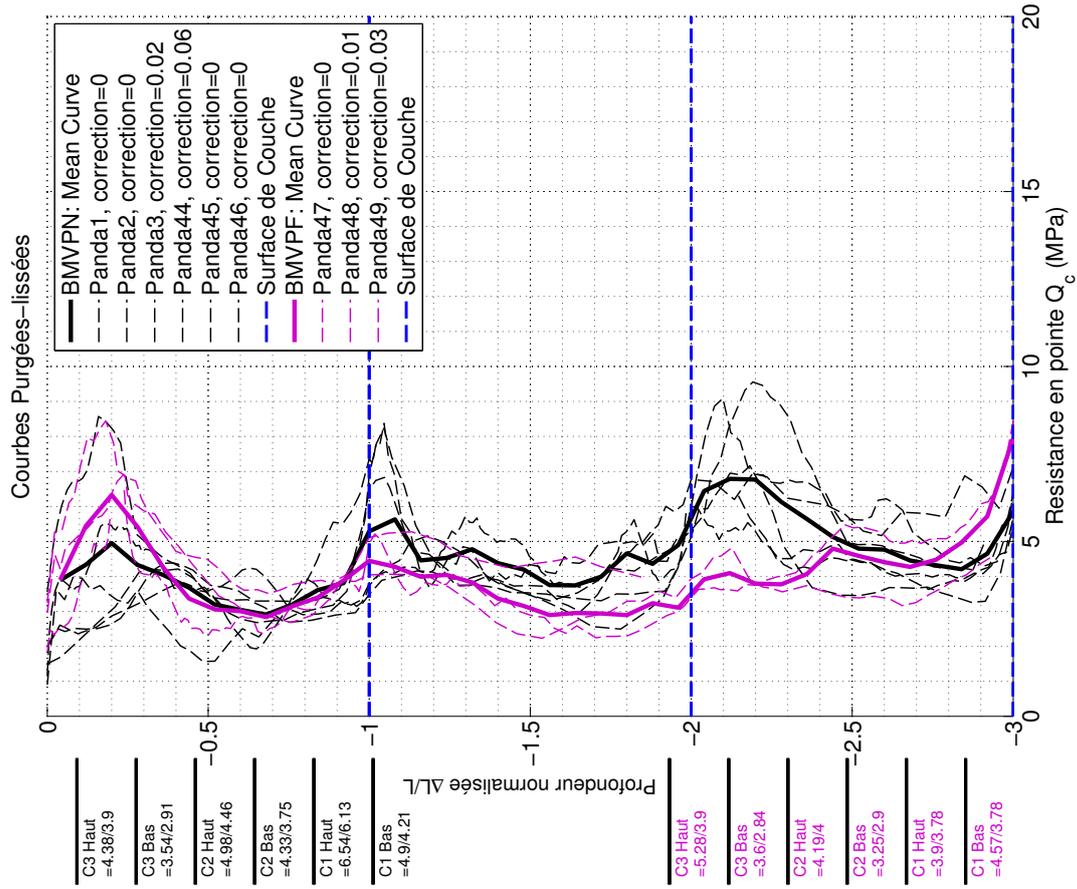
	Gamma	Tarière	Carottes	Gamma	Tarière	Carottes
Haut	- %	- %	19.9%	- %	- %	19.5%
Bas	- %	- %	20.9%	- %	- %	20.4%
LOMC	- %	- %	20.3%	- %	- %	18.0%

Suction en  $kPa$ , Saturation et Perméabilité ( $ms^{-1}$ )

	Suction	$k_a$	$k_w$	Sr	suction	$k_a$	$k_w$	Sr
Haut	456	-	-	100%	533	-	-	97%
Bas	424	-	-	96%	724	-	-	98%
LOMC	815	7.7 $10^{-12}$	8.0 $10^{-16}$	88%	961	-	-	79%

## Porométrie Mercure





# Planche 2 : 2BMV5

|| Compactage normal (4)

|| Compactage Forcé (12)

## Densités en $gcm^{-3}$ et taux de compactage

	Gamma	%OPN	Carottes	%OPN	Gamma	%OPN	Carottes	%OPN
Haut	1.67	101.8	1.79	109.1	1.69	103.0	1.78	108.5
Bas	1.66	101.2	1.78	108.5	1.68	102.4	1.71	104.3
LOMC	-	-	-	-	-	-	1.66	101.2

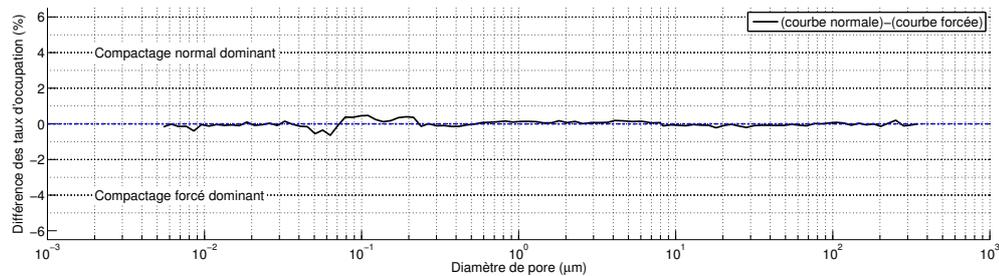
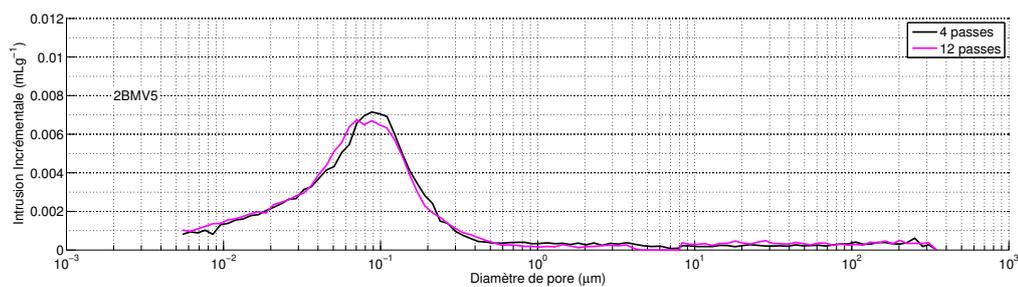
## Teneur en Eau (MeO = 21.2%)

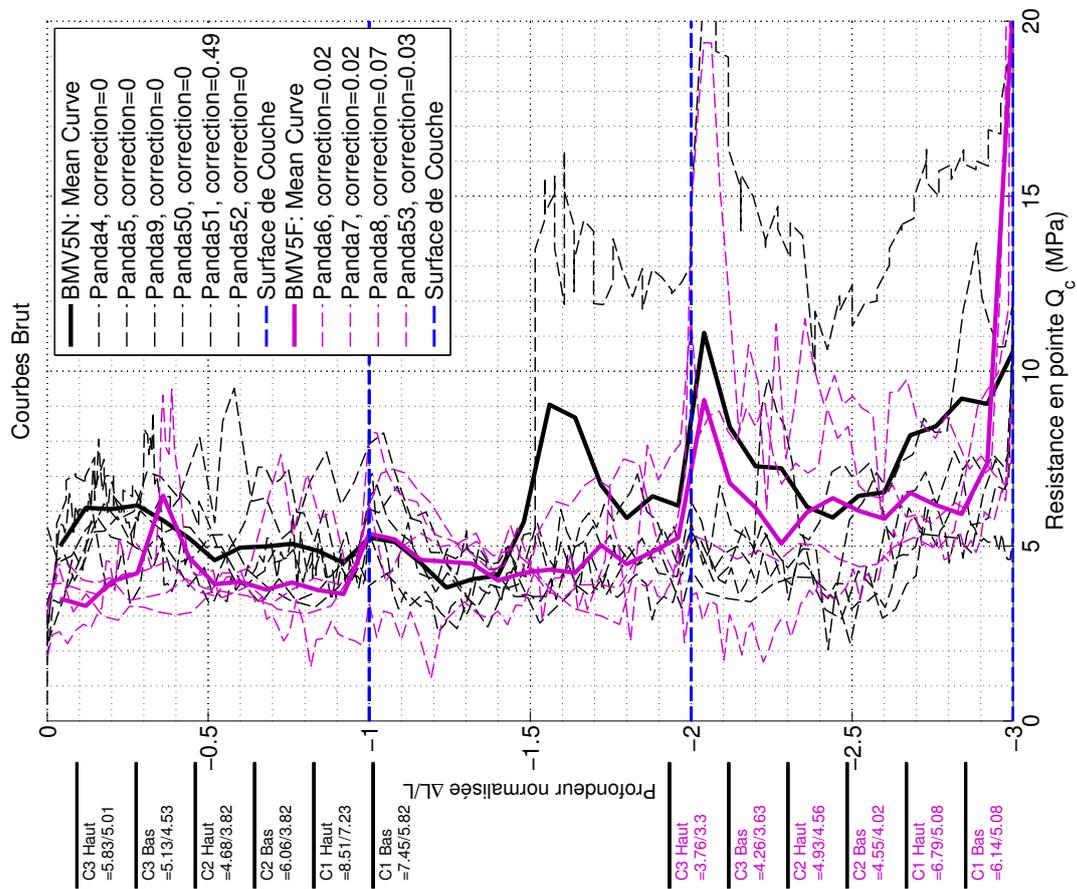
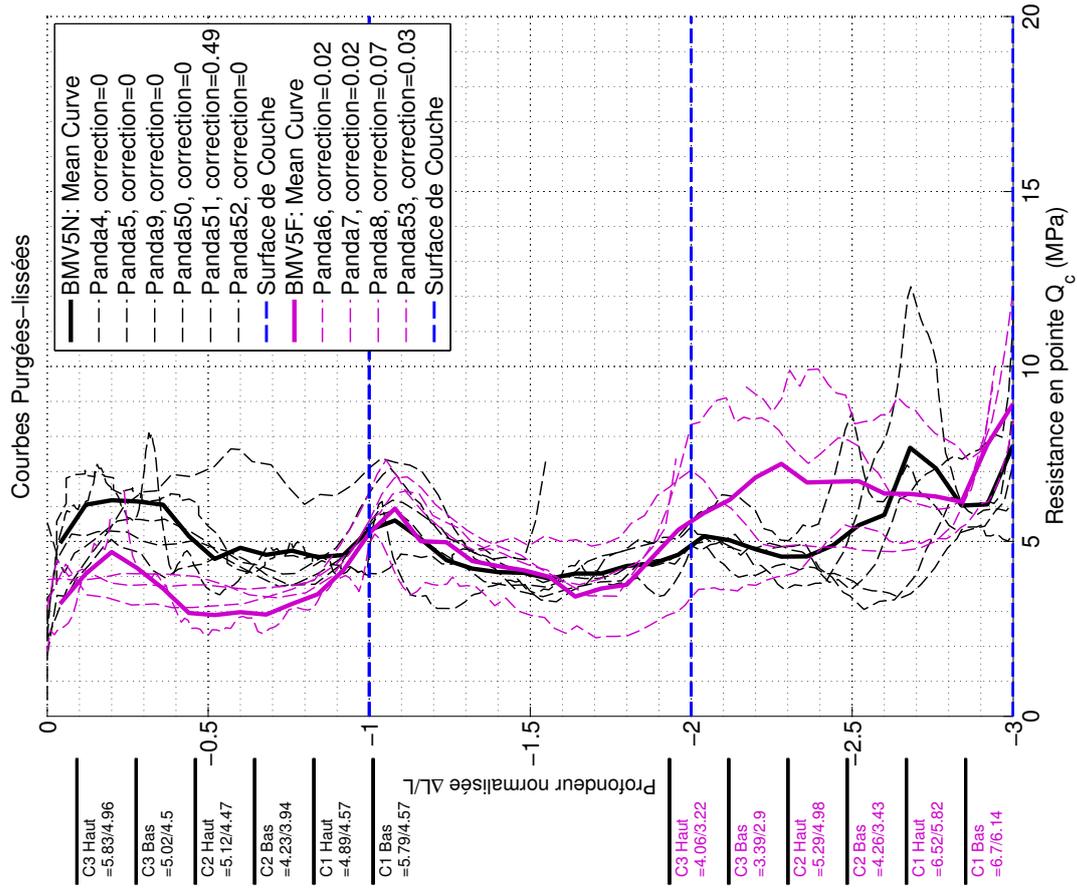
	Gamma	Tarière	Carottes	Gamma	Tarière	Carottes	Position
Haut	18.0%	21.9%	19.9%	21.3%	22.2%	18.7%	
Bas	18.6%	21.9%	20.9%	21.4%	22.2%	20.6%	
LOMC	- %	- %	- %	- %	- %	18%	

## Suction en $kPa$ , Saturation et Perméabilité ( $ms^{-1}$ )

	Suction	$k_a$	$k_w$	Sr	suction	$k_a$	$k_w$	Sr
Haut	2072	-	-	97%	618	-	-	100%
Bas	2143	-	-	100%	584	-	-	99%
LOMC	-	-	-	88%	961	-	-	79%

## Porométrie Mercure





# Planche 3 : 3BSVP5

|| Compactage normal (4)

|| Compactage Forcé (12)

## Densités en $gcm^{-3}$ et taux de compactage

	Gamma	%OPN	Carottes	%OPN	Gamma	%OPN	Carottes	%OPN
Haut	-	-	1.72	104.8	-	-	1.72	104.9
Bas	-	-	1.76	107.3	-	-	1.74	106.1
LOMC	-	-	1.65	100.6	-	-	1.63	99.4

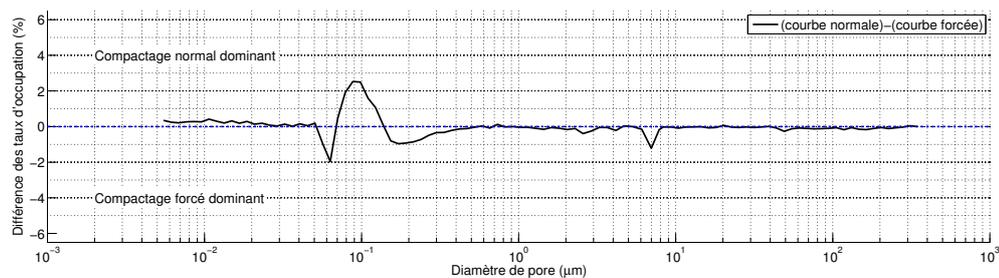
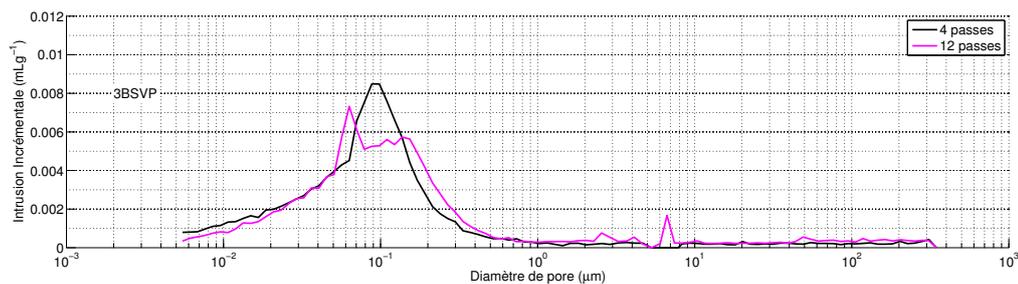
## Teneur en Eau (MeO = 18.8%)

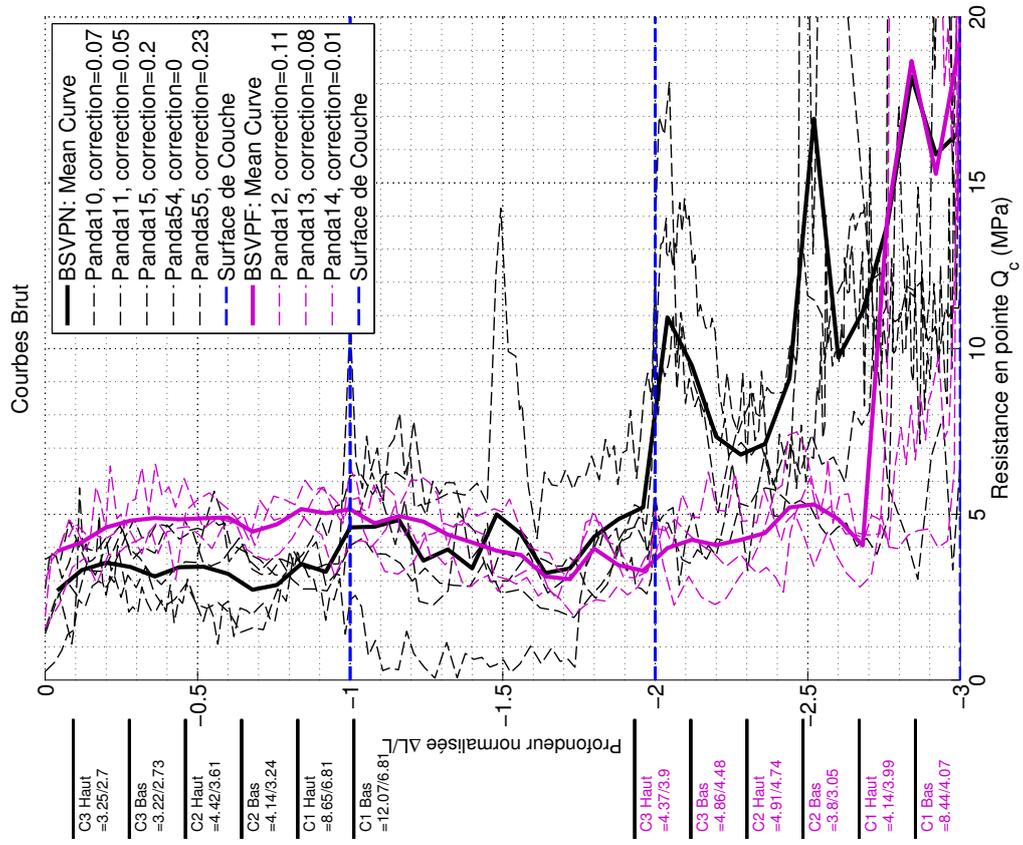
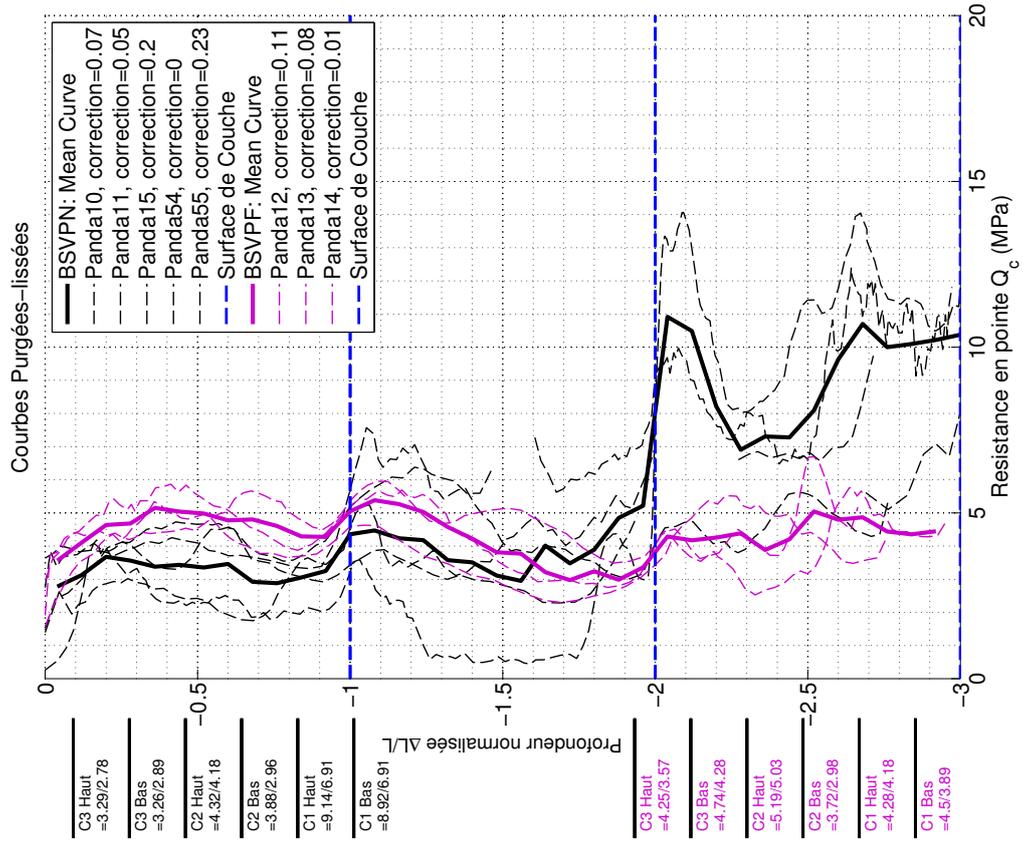
	Gamma	Tarière	Carottes	Gamma	Tarière	Carottes
Haut	- %	- %	19.7%	- %	- %	19.9%
Bas	- %	- %	18.6%	- %	- %	19.4%
Bas	- %	- %	17.2%	- %	- %	17.0%

## Suction en $kPa$ , Saturation et Perméabilité ( $ms^{-1}$ )

	Suction	$k_a$	$k_w$	Sr	suction	$k_a$	$k_w$	Sr
Haut	969	-	-	96%	1041	-	-	97%
Bas	1410	-	-	96%	630	-	-	98%
LOMC	1190	-	-	74%	1060	1.7 $10^{-12}$	1.0 $10^{-15}$	71%

## Porométrie Mercure





## Planche 4 : 4BSV5

|| Compactage normal (4)

|| Compactage Forcé (12)

Densités en  $gcm^{-3}$  et taux de compactage

	Gamma	%OPN	Carottes	%OPN	Gamma	%OPN	Carottes	%OPN
Haut	1.66	101.2	1.76	107.3	1.69	103.0	1.74	106.1
Bas	1.64	100.0	1.77	107.9	1.69	103.0	1.74	106.1
LOMC	-	-	1.72	104.9	-	-	1.69	103.0

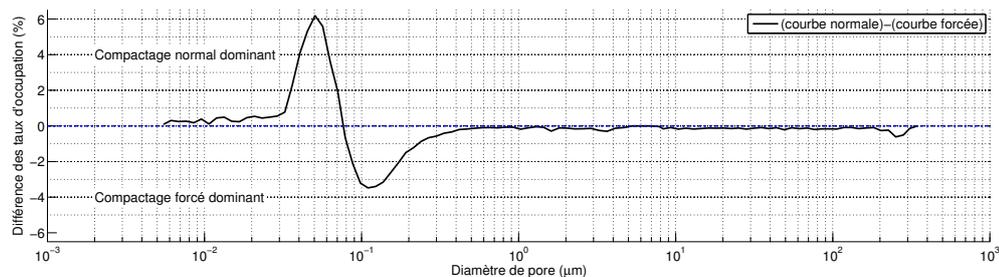
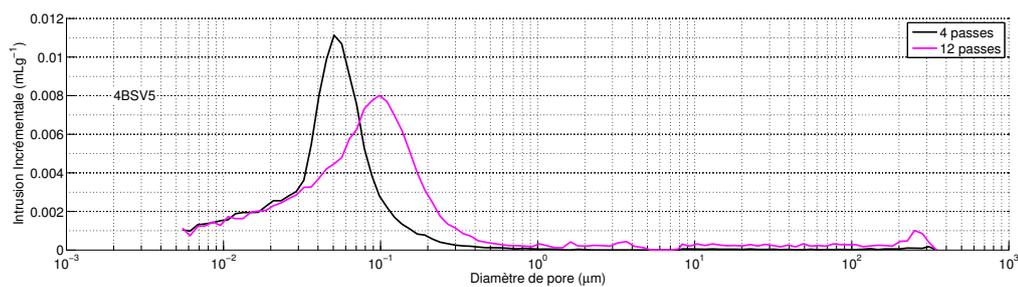
Teneur en Eau (MeO = 18.96%)

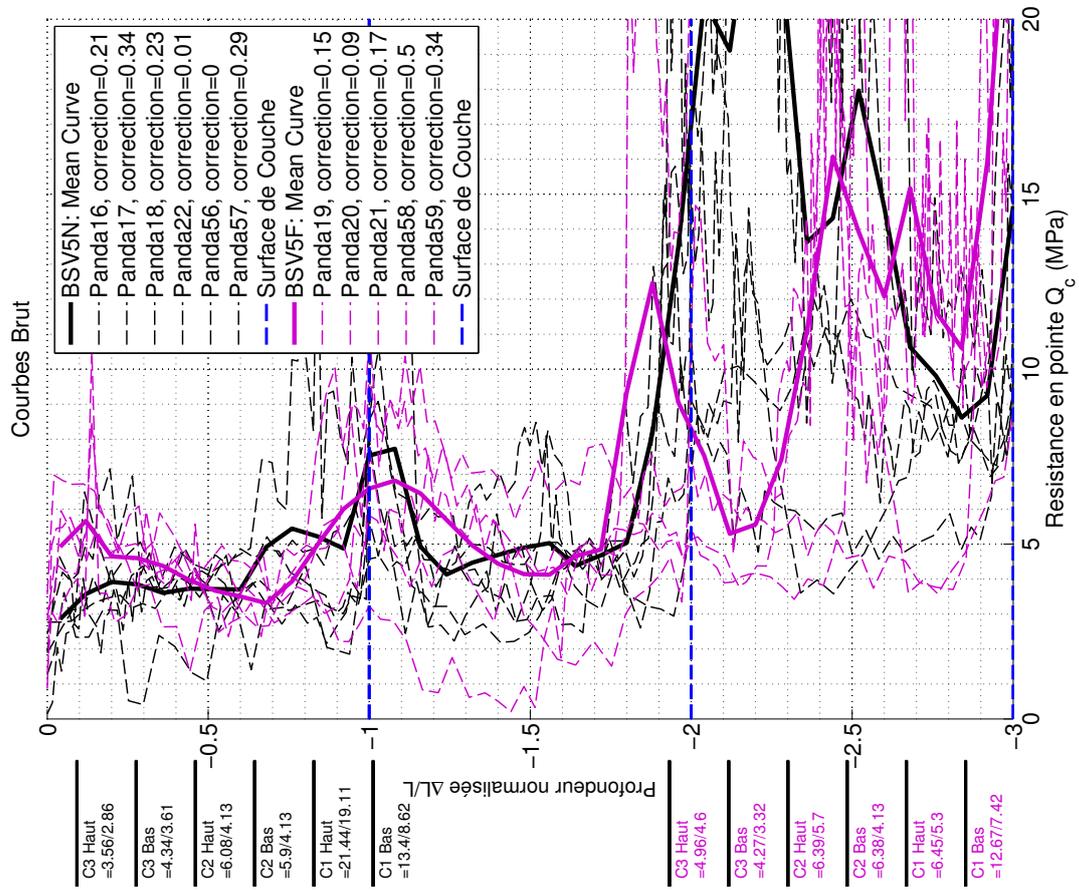
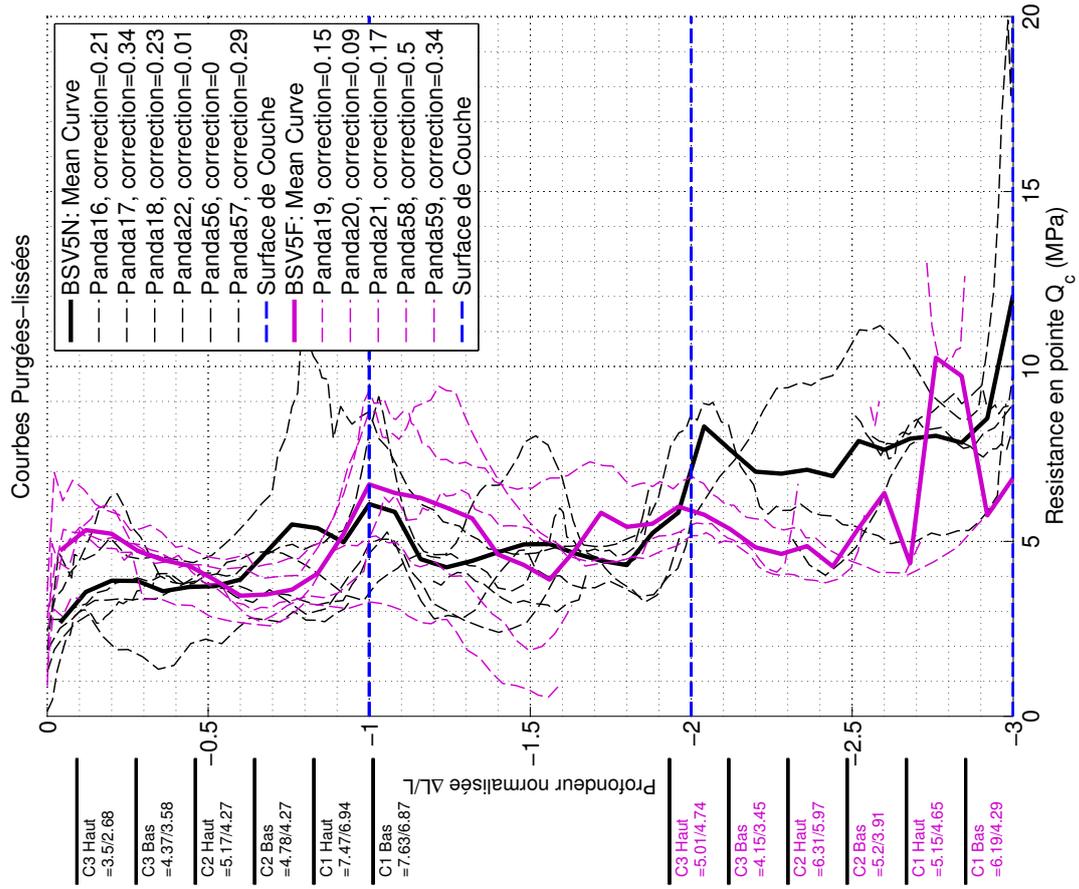
	Gamma	Tarière	Carottes	Gamma	Tarière	Carottes
Haut	18.3%	18.4%	18.9%	18.6%	18.4%	19.7%
Bas	18.5%	18.4%	18.5%	18.0%	18.4%	19.2%
LOMC	-%	-%	17.3%	-%	-%	18.5%

Suction en  $kPa$ , Saturation et Perméabilité ( $ms^{-1}$ )

	Succion	$k_w$	$k_w$	Sr	suction	$k_w$	$k_w$	Sr
Haut	1558	-	-	97%	624	-	-	99%
Bas	1464	-	-	97%	721	-	-	96%
LOMC	1190	1.6 $10^{-15}$	2.0 $10^{-16}$	84%	730	1.5 $10^{-13}$	1.0 $10^{-12}$	85%

## Porométrie Mercure





# Planche 5 : 5BMVP5

|| Compactage normal (4)

|| Compactage Forcé (12)

Densités en  $gcm^{-3}$  et taux de compactage

	Gamma	%OPN	Carottes	%OPN	Gamma	%OPN	Carottes	%OPN
Haut	-	-	1.73	105.5	-	-	1.78	108.5
Bas	-	-	1.70	103.7	-	-	1.74	106.1
LOMC	-	-	1.69	103.0	-	-	1.70	103.7

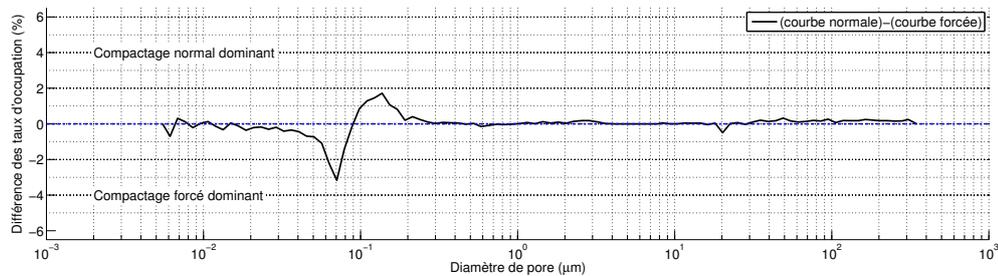
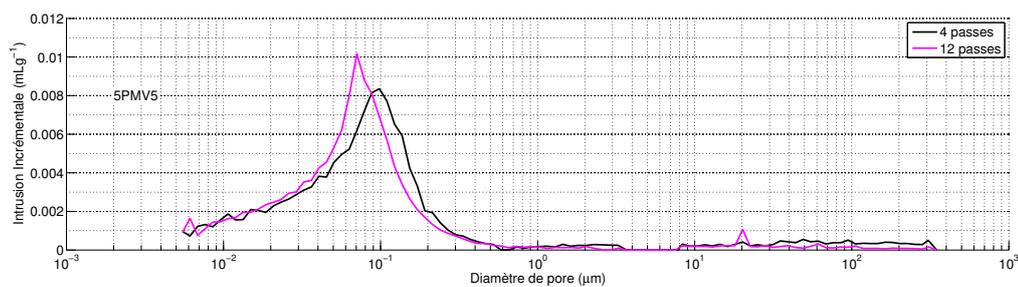
Teneur en Eau (MeO = 21.5%)

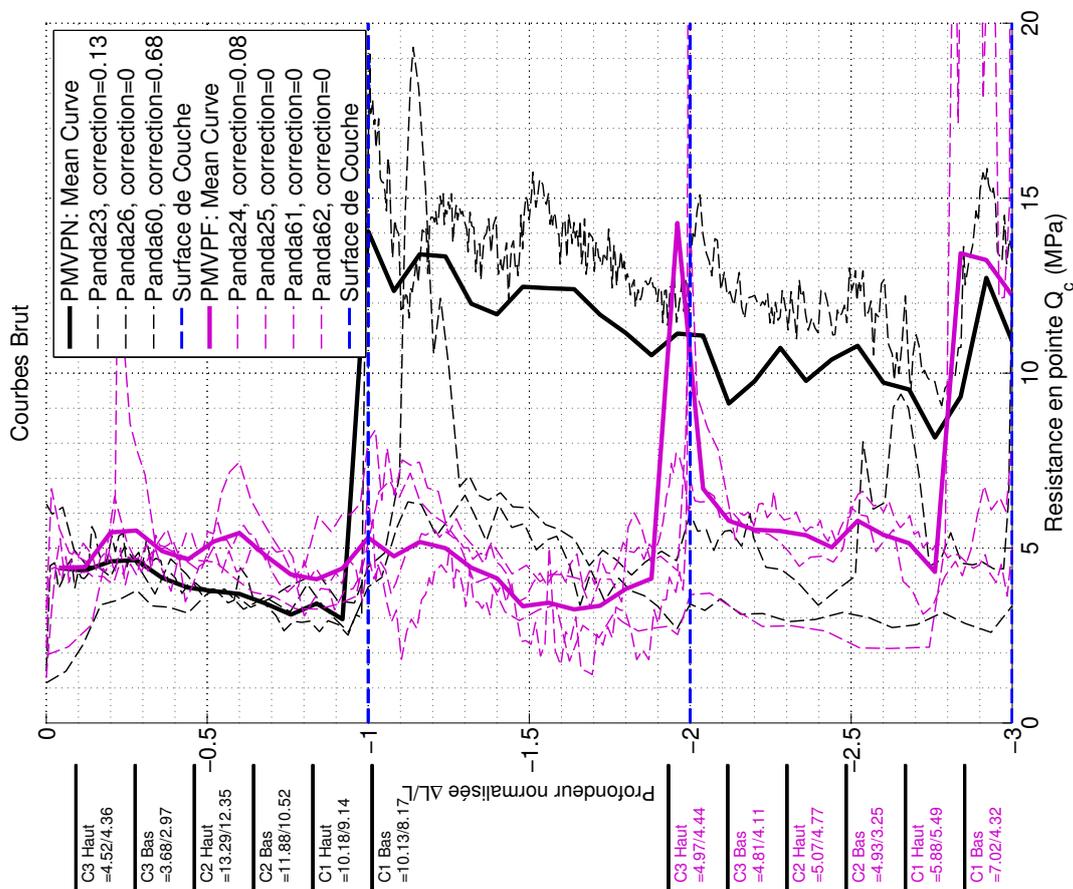
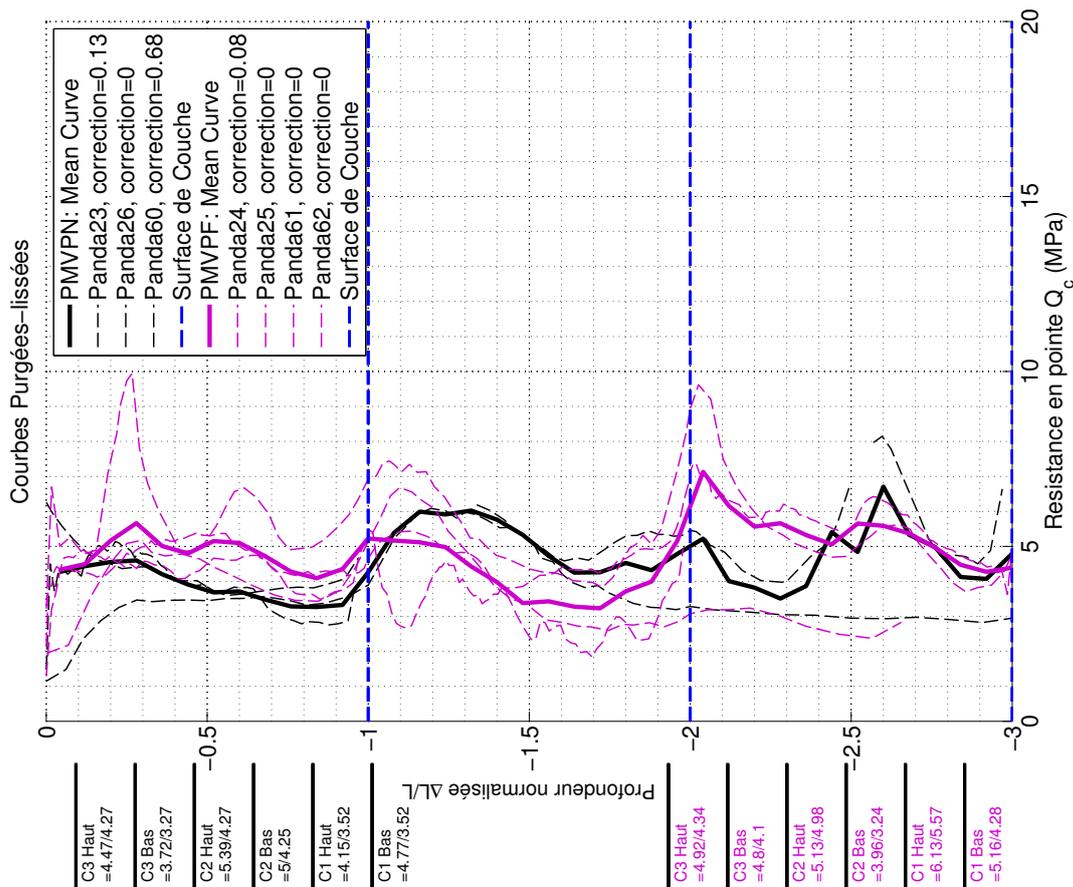
	Gamma	Tarière	Carottes	Gamma	Tarière	Carottes
Haut	- %	- %	19.3%	- %	- %	18.4%
Bas	- %	- %	20.1%	- %	- %	19.3%
LOMC	- %	- %	16.9%	- %	- %	16.2%

Suction en  $kPa$ , Saturation et Perméabilité ( $ms^{-1}$ )

	Suction	$k_a$	$k_w$	Sr	suction	$k_a$	$k_w$	Sr
Haut	922	-	-	96%	1112	-	-	99%
Bas	933	-	-	95%	1372	-	-	98%
LOMC	1190	-	-	78%	1511	-	-	76%

## Porométrie Mercure





## Planche 6 : 6BMV5

|| Compactage normal (4)

|| Compactage Forcé (12)

Densités en  $gcm^{-3}$  et taux de compactage

	Gamma	%OPN	Carottes	%OPN	Gamma	%OPN	Carottes	%OPN
Haut	1.67	101.8	1.76	107.3	1.68	103.8	1.78	108.5
Bas	1.66	101.2	1.76	107.3	1.66	102.9	1.73	105.5
LOMC	-	-	1.68	102.4	-	-	1.45	88.4

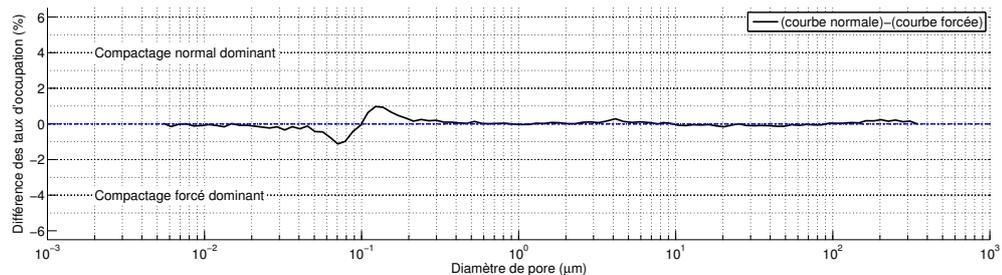
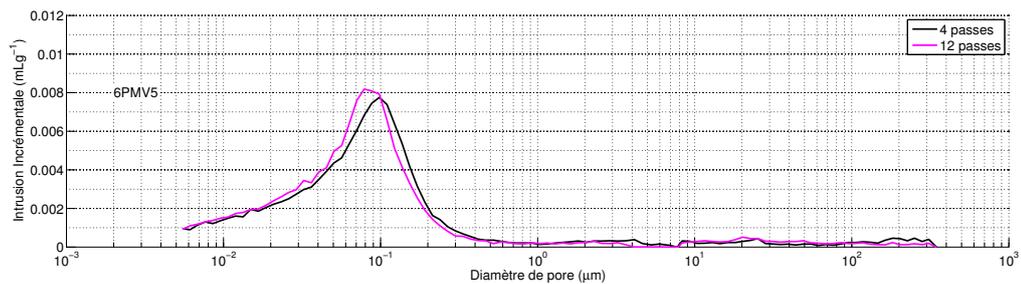
Teneur en Eau (MeO = 21.5%)

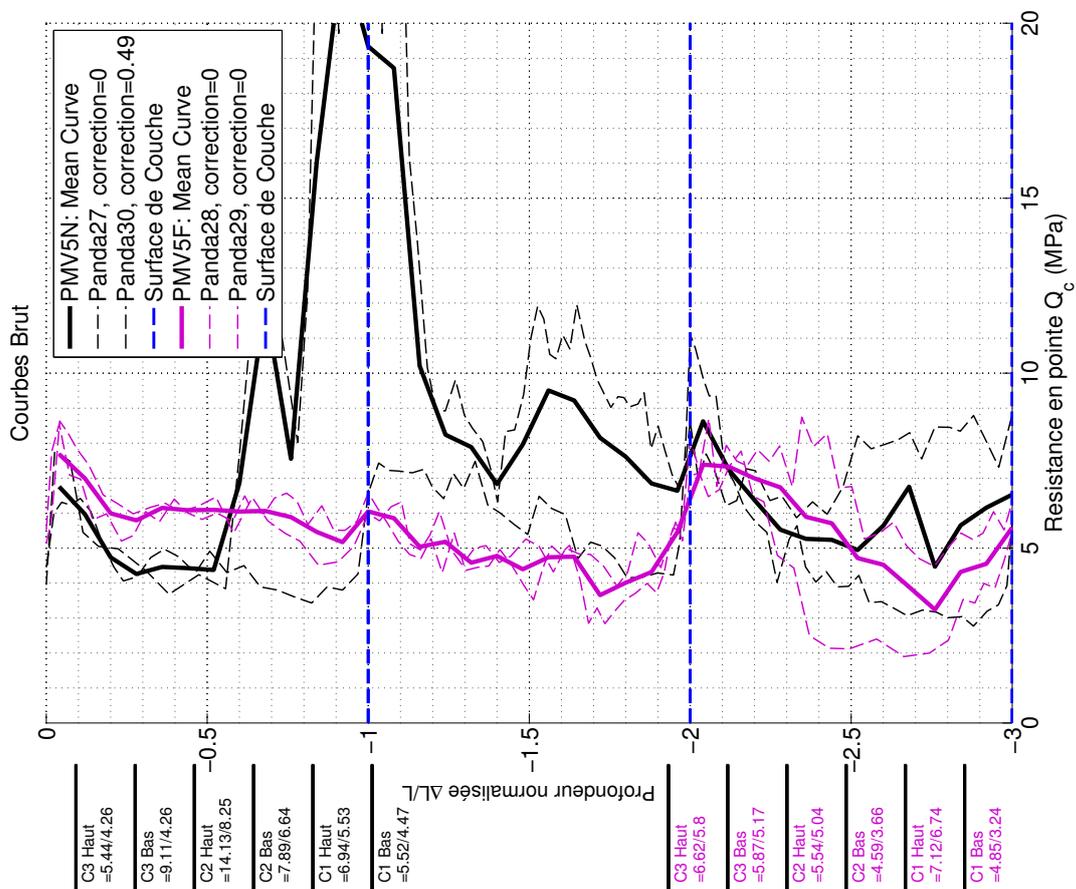
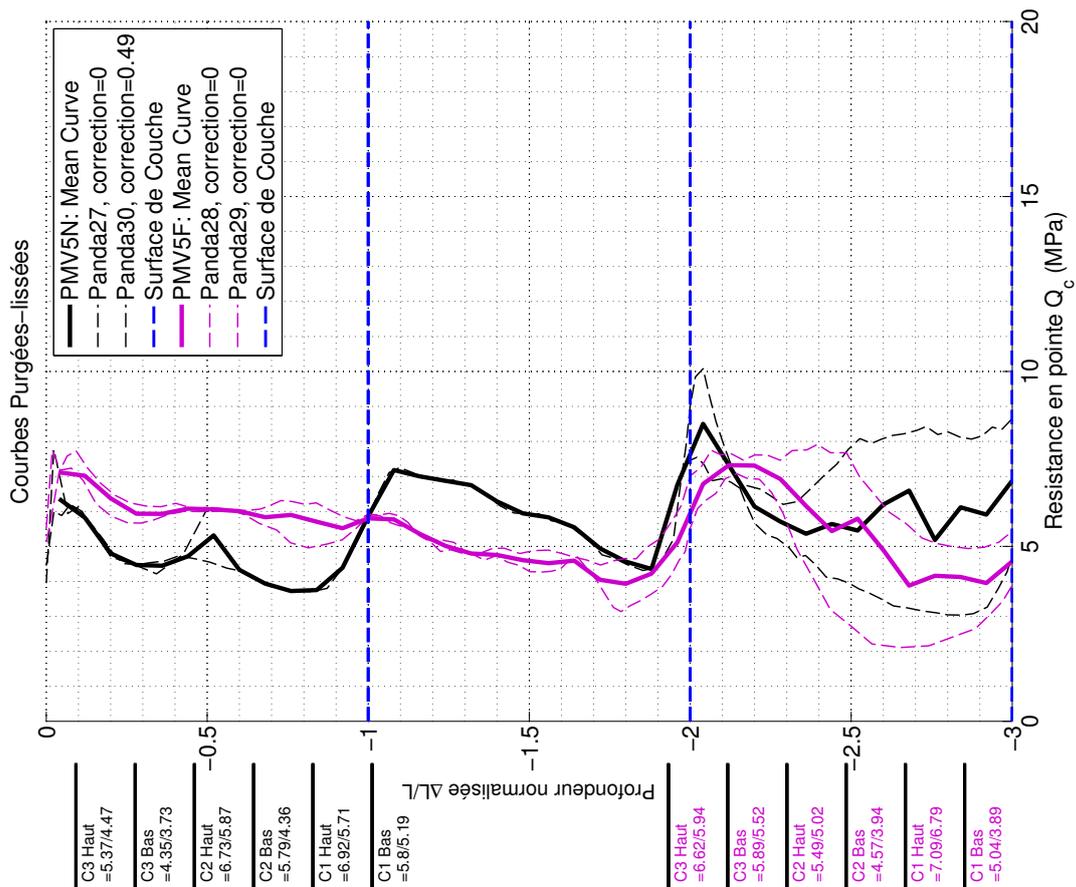
	Gamma	Tarière	Carottes	Gamma	Tarière	Carottes
Haut	20.9%	21.1%	19.2%	20.8%	20.9%	20.8%
Bas	20.6%	21.1%	19.6%	20.9%	20.9%	19.2%
LOMC	-%	-%	19.3%	-%	-%	19.5%

Suction en  $kPa$ , Saturation et Perméabilité ( $ms^{-1}$ )

	Succion	$k_a$	$k_w$	Sr	suction	$k_a$	$k_w$	Sr
Haut	1474	-	-	99%	308	-	-	94%
Bas	1813	-	-	96%	520	-	-	95%
LOMC	985	2.5 $10^{-12}$	2.0 $10^{-15}$	87%	727	-	-	62%

## Porométrie Mercure





## Planche 7 : 7PHV5

|| Compactage normal (4)

|| Compactage Forcé (12)

Densités en  $gcm^{-3}$  et taux de compactage

	Gamma	%OPN	Carottes	%OPN	Gamma	%OPN	Carottes	%OPN
Haut	-	-	1.70	103.7	-	-	1.67	101.8
Bas	-	-	1.70	103.7	-	-	1.70	103.7
LOMC	-	-	1.64	100.0	-	-	1.69	103.0

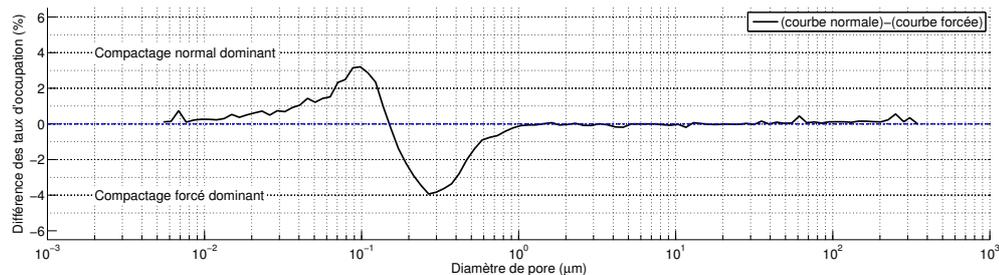
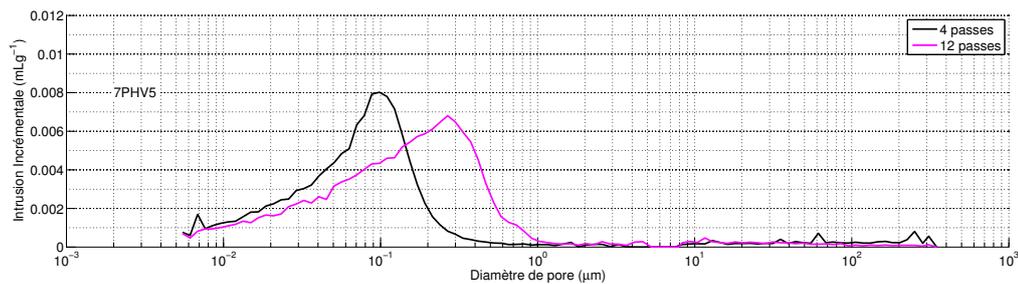
Teneur en Eau (MeO = 25.4%)

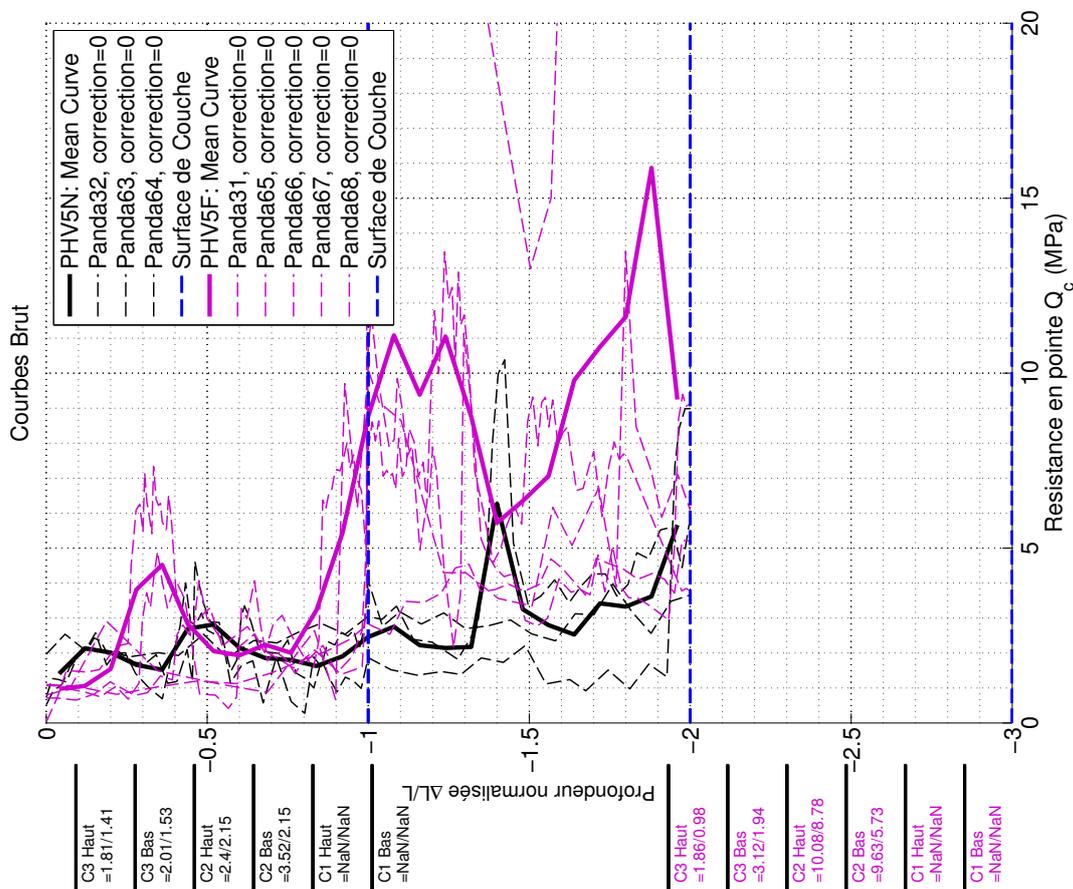
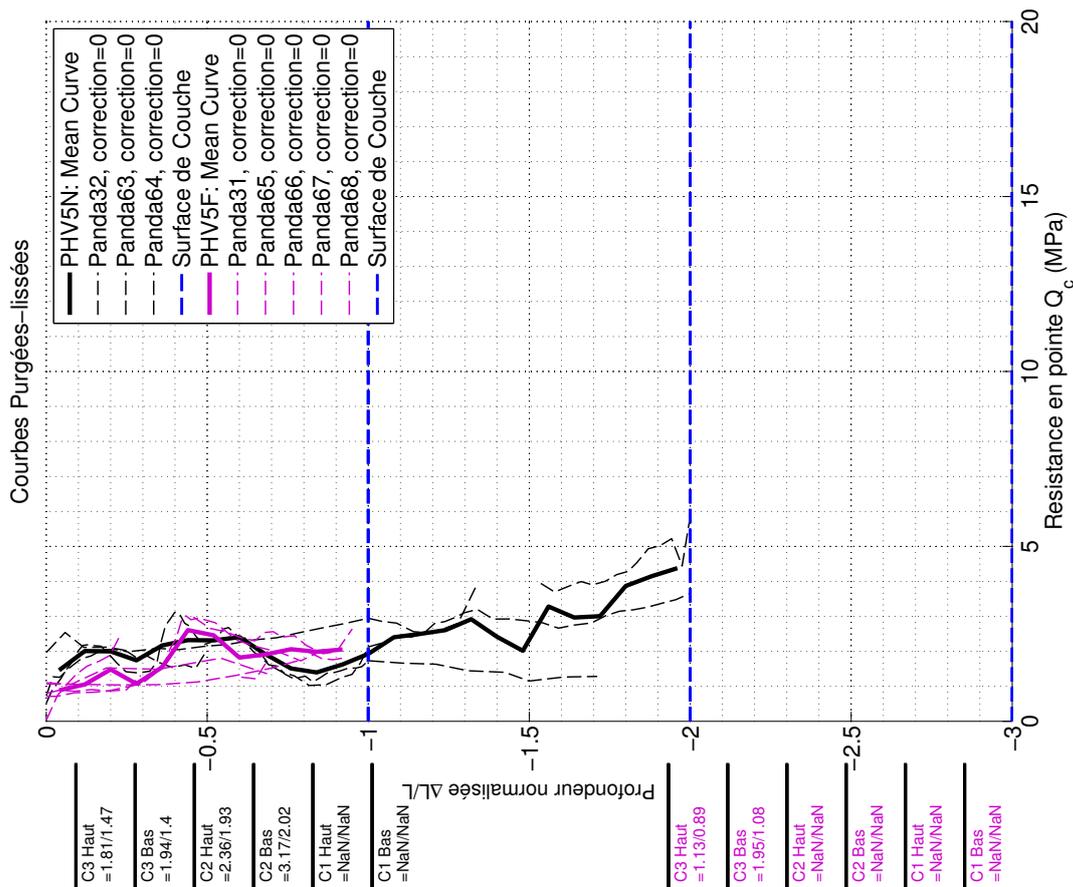
	Gamma	Tarière	Carottes	Gamma	Tarière	Carottes
Haut	- %	- %	20.9%	- %	- %	22.1%
Bas	- %	- %	21.2%	- %	- %	21.3%
Bas	- %	- %	21.4%	- %	- %	18.0%

Suction en  $kPa$ , Saturation et Perméabilité ( $ms^{-1}$ )

	Suction	$k_a$	$k_w$	Sr	suction	$k_a$	$k_w$	Sr
Haut	877	-	-	99%	100	-	-	99%
Bas	796	-	-	100%	202	-	-	99%
LOMC	445	2.5 $10^{-12}$	2.0 $10^{-15}$	91%	820	-	-	83%

## Porométrie Mercure





# Planche 8 : 8PHVP5

|| Compactage normal (4)

|| Compactage Forcé (12)

Densités en  $gcm^{-3}$  et taux de compactage

	Gamma	%OPN	Carottes	%OPN	Gamma	%OPN	Carottes	%OPN
Haut	-	-	1.58	96.3	-	-	1.67	101.8
Bas	-	-	1.60	97.6	-	-	1.67	101.8
LOMC	-	-	1.53	93.3	-	-	1.61	98.2

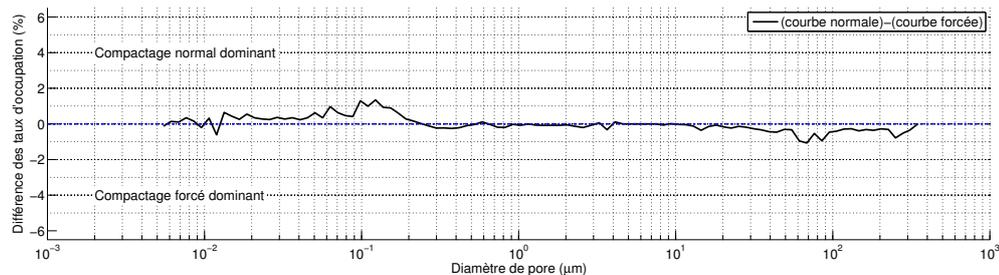
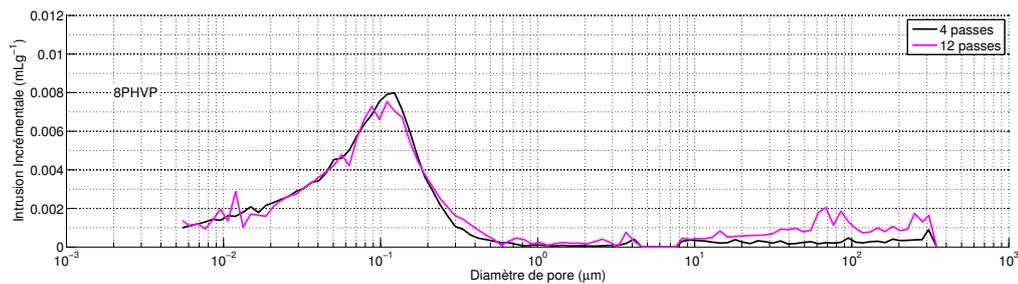
Teneur en Eau (MeO = 25.1%)

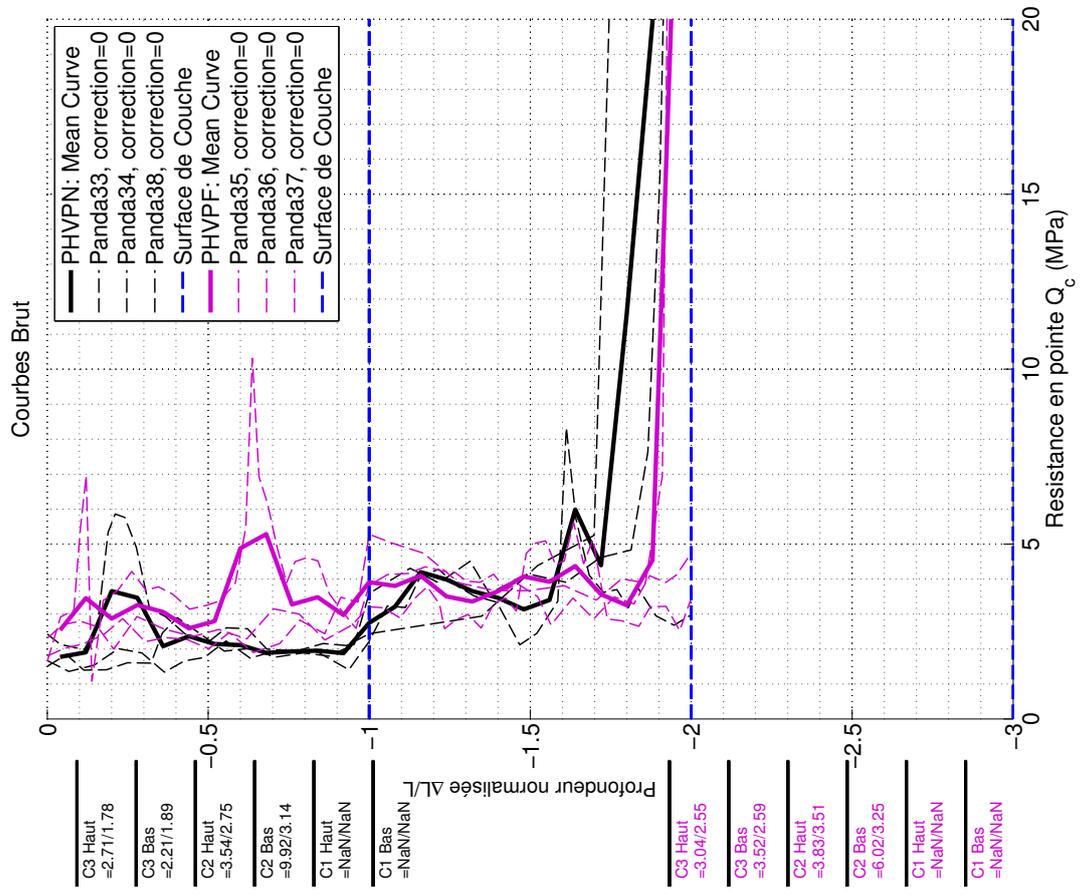
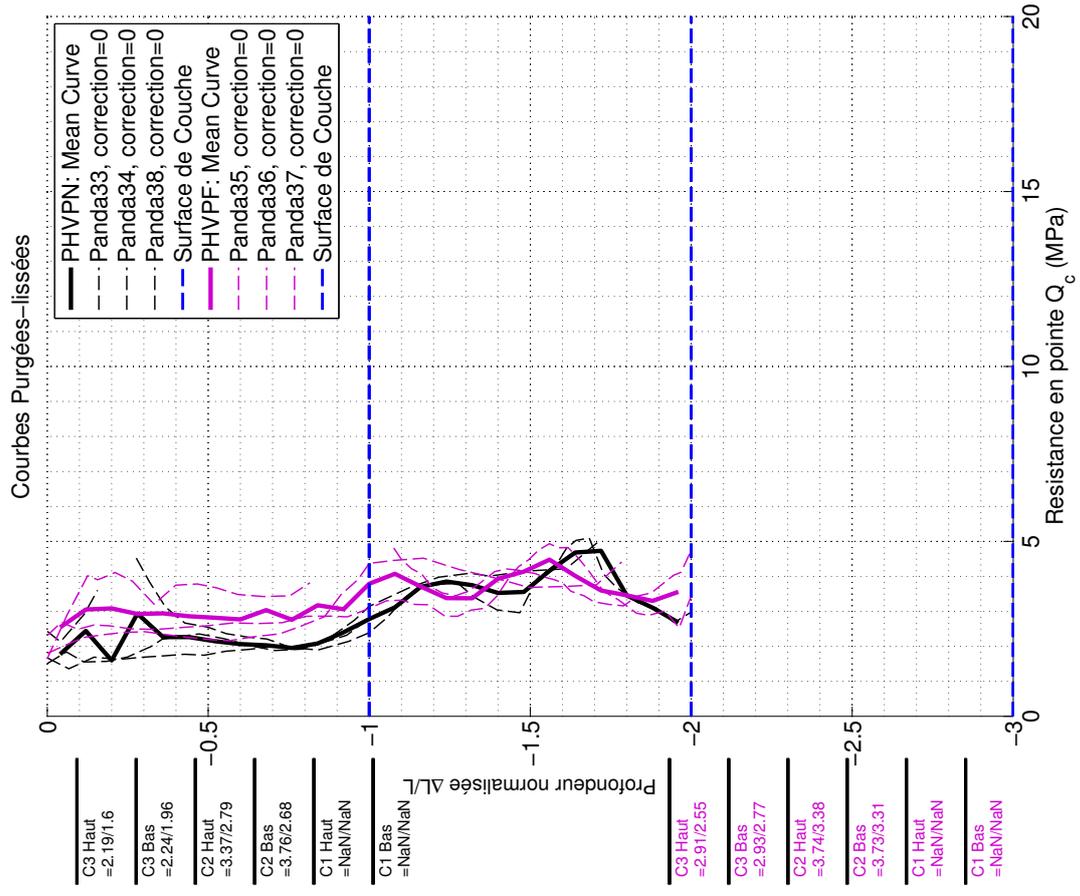
	Gamma	Tarière	Carottes	Gamma	Tarière	Carottes
Haut	- %	- %	25.2%	- %	- %	21.9%
Bas	- %	- %	24.8%	- %	- %	21.9%
LOMC	- %	- %	25.0%	- %	- %	19.5%

Suction en  $kPa$ , Saturation et Perméabilité ( $ms^{-1}$ )

	Suction	$k_a$	$k_w$	Sr	suction	$k_a$	$k_w$	Sr
Haut	71	-	-	99%	637	-	-	99%
Bas	84	-	-	100%	409	-	-	98%
LOMC	120	1.6 $10^{-14}$	1.0 $10^{-15}$	90%	961	-	-	79%

## Porométrie Mercure





## Planche 9 : 9BHVP5

|| Compactage normal (4)

|| Compactage Forcé (12)

Densités en  $gcm^{-3}$  et taux de compactage

	Gamma	%OPN	Carottes	%OPN	Gamma	%OPN	Carottes	%OPN
Haut	-	-	1.71	104.3	-	-	1.61	98.2
Bas	-	-	1.73	105.5	-	-	1.73	105.5
Bas	-	-	1.63	99.4	-	-	1.45	88.4

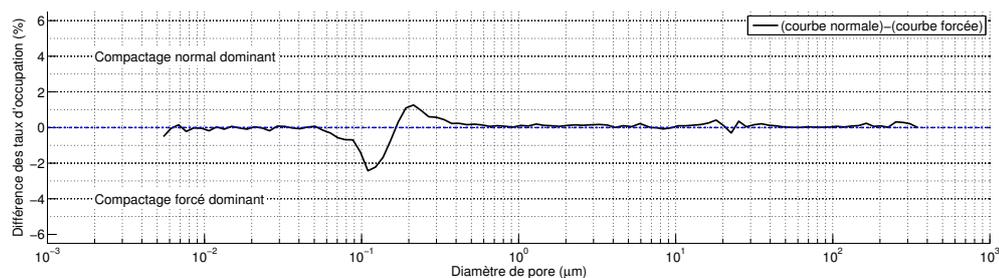
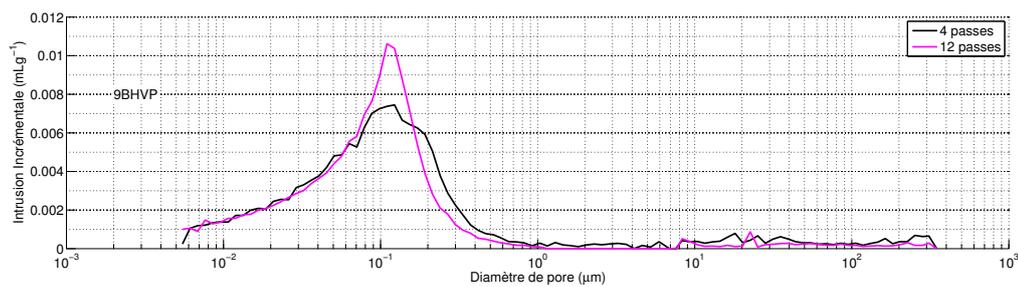
Teneur en Eau (MeO = 25.1%)

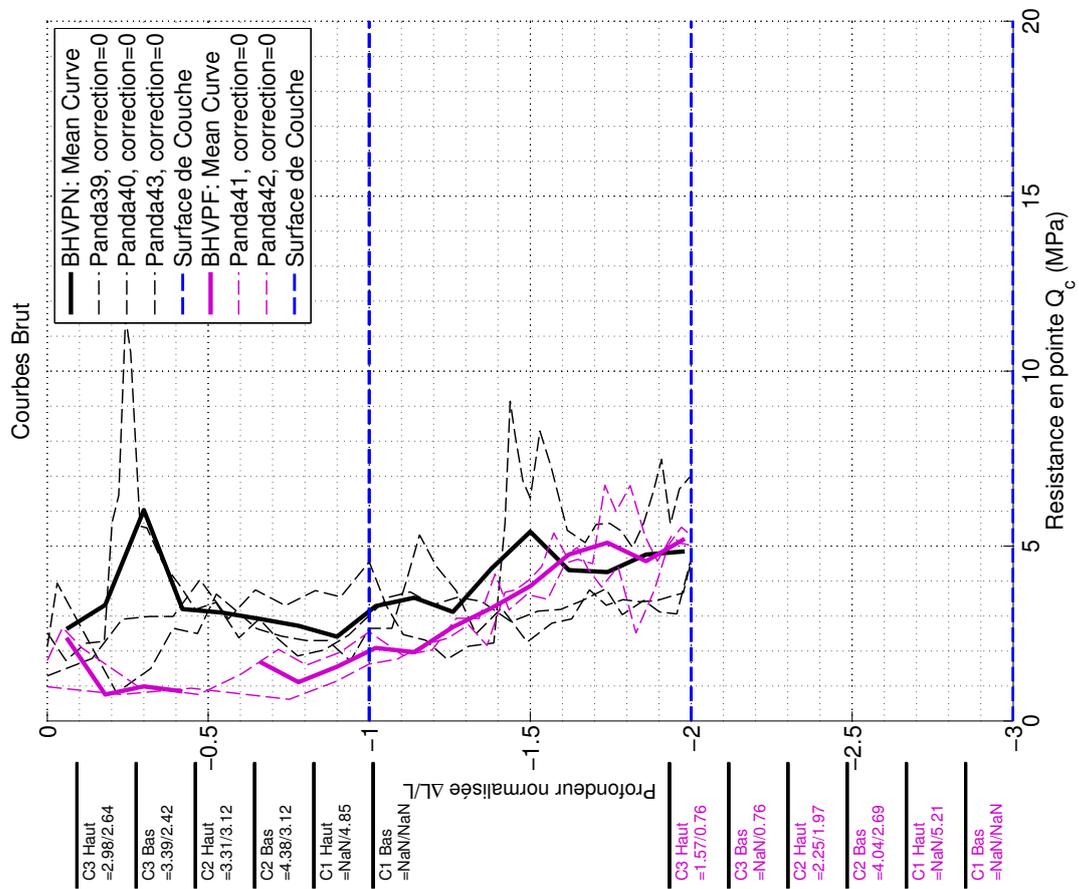
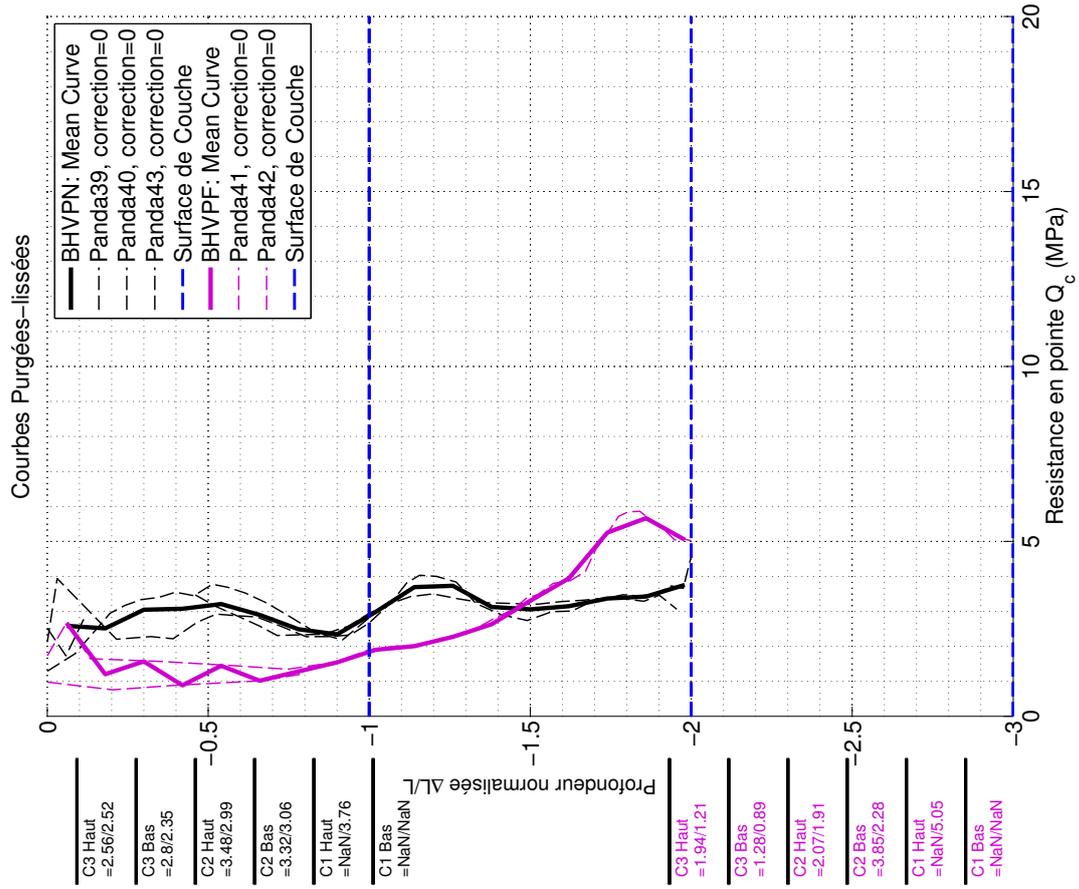
	Gamma	Tarière	Carottes	Position	Gamma	Tarière	Carottes	Position
Haut	- %	- %	20.8%	+1.0/ <i>OPN</i>	- %	- %	24.5%	+2.8/ <i>OPN</i>
Bas	- %	- %	21.4%	+1.3/ <i>OPN</i>	- %	- %	19.8%	+0.5/ <i>OPN</i>
Bas	- %	- %	19.5%	+1.3/ <i>OPN</i>	- %	- %	29.0%	+0.5/ <i>OPN</i>

Suction en  $kPa$ , Saturation et Perméabilité ( $ms^{-1}$ )

	Suction	$k_a$	$k_w$	Sr	suction	$k_a$	$k_w$	Sr
Haut	579	-	-	100%	180	-	-	100%
Bas	679	-	-	100%	1561(!)	-	-	98%
LOMC	1200	-	-	82%	18	7.8	1.0	92%
						$10^{-14}$	$10^{-14}$	

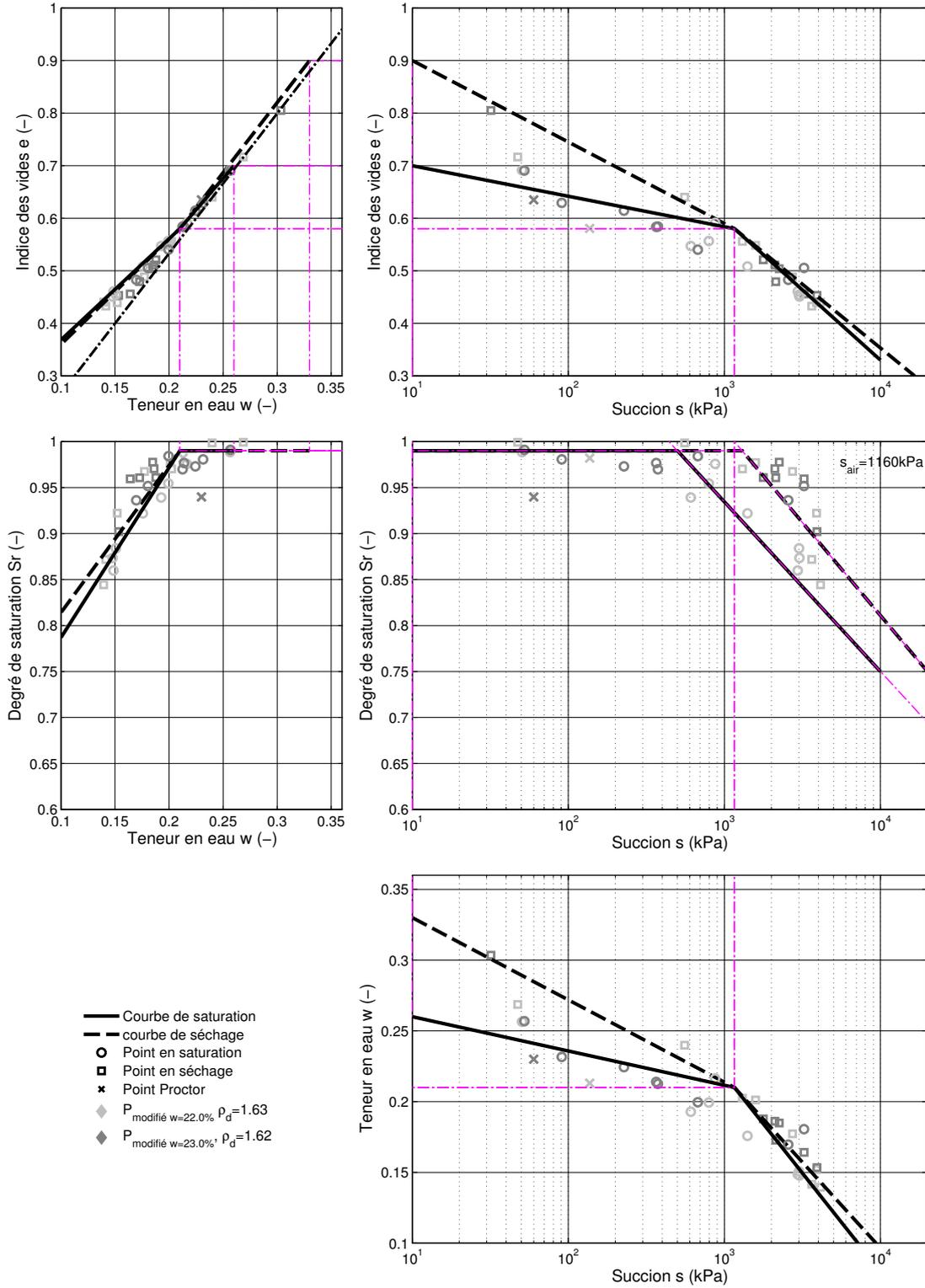
## Porométrie Mercure



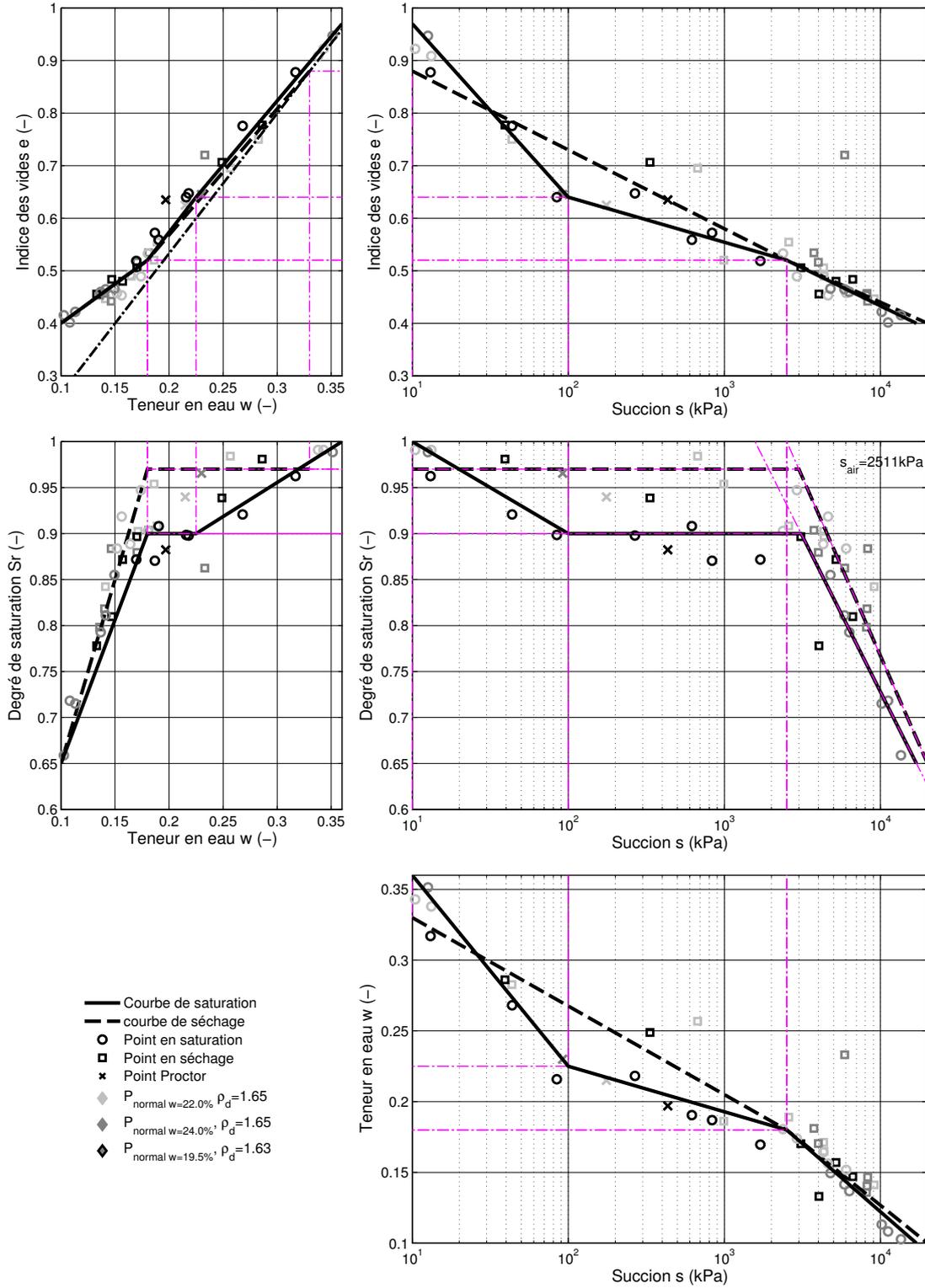


## Annexe 2 : Courbe de rétention avec interprétation du tracé

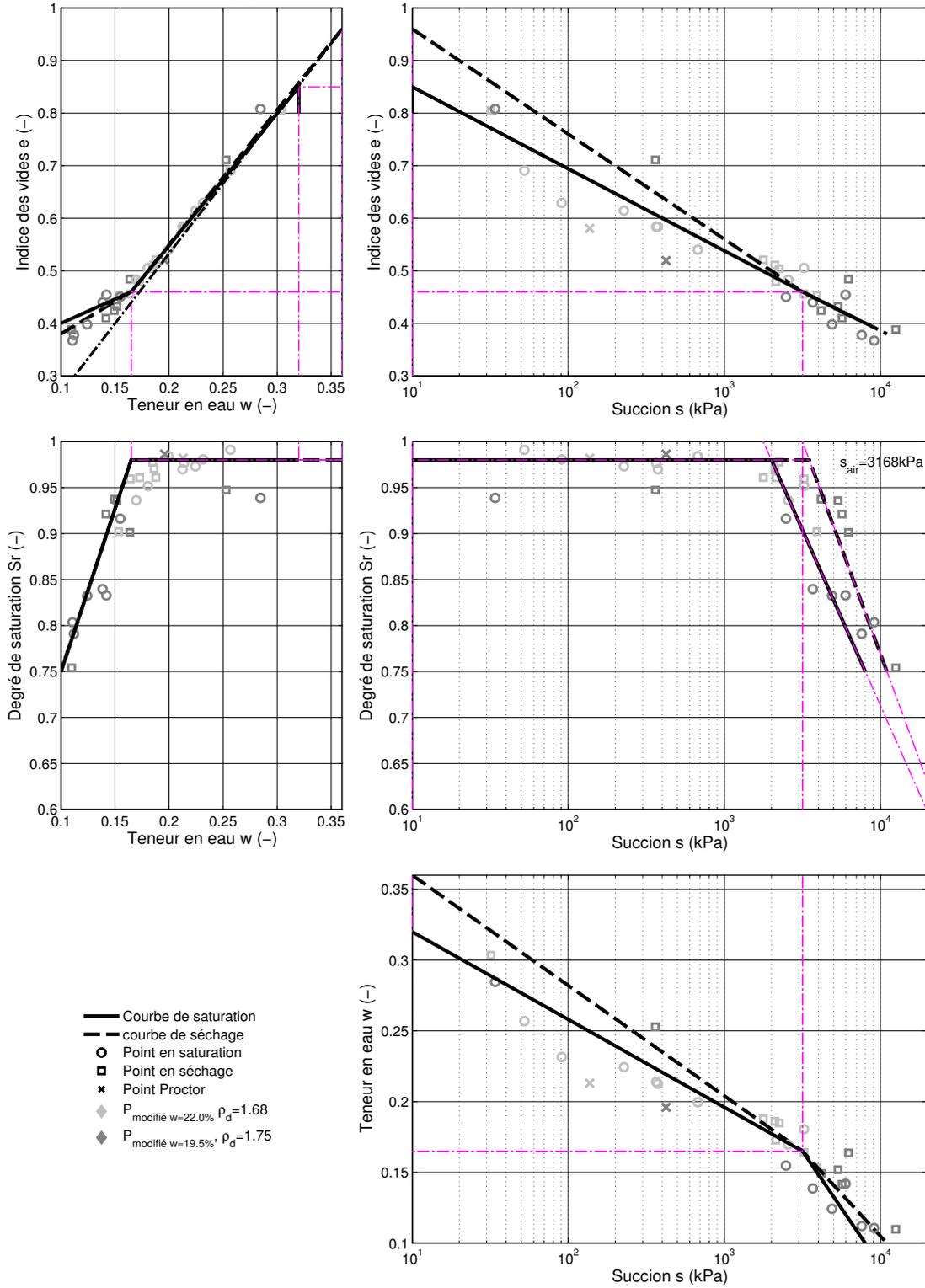
Courbe  $p_d \approx 1.62g \cdot cm^{-3}$ , énergie modifiée, séchage naturel



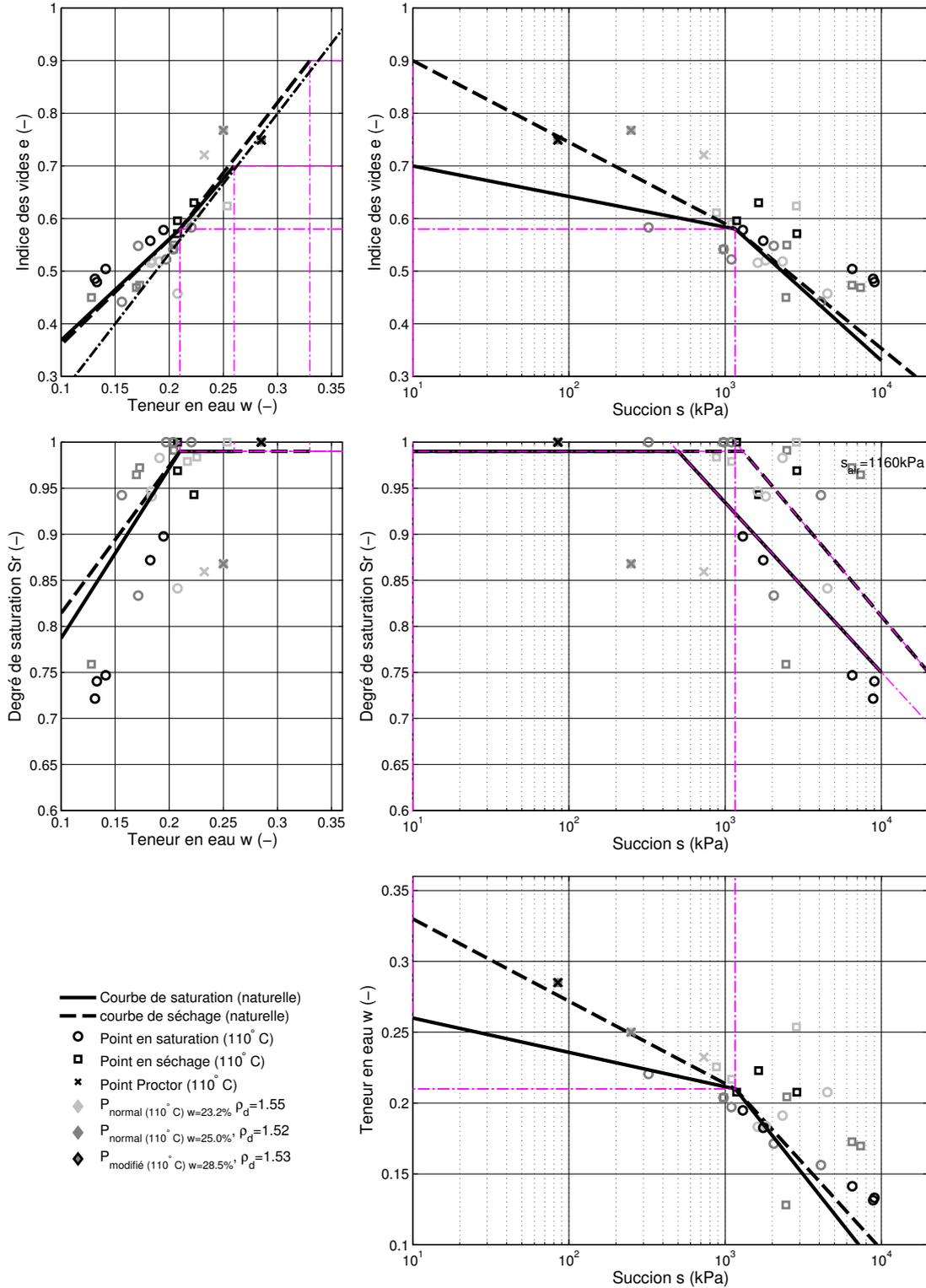
Courbe  $p_d \approx 1.63g \cdot cm^{-3}$ , énergie normale, séchage naturel



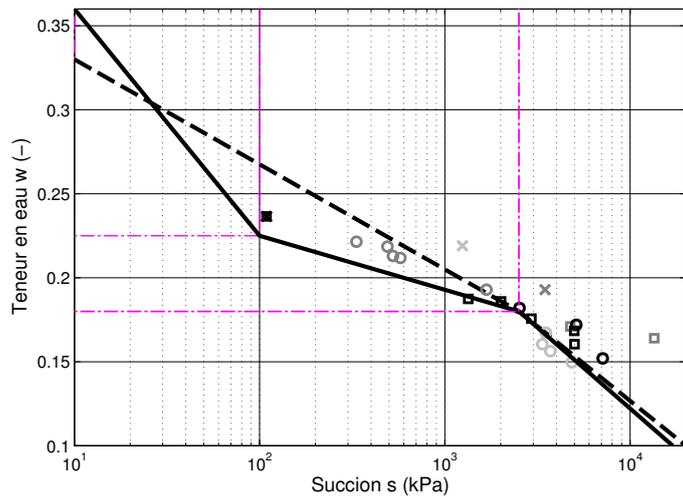
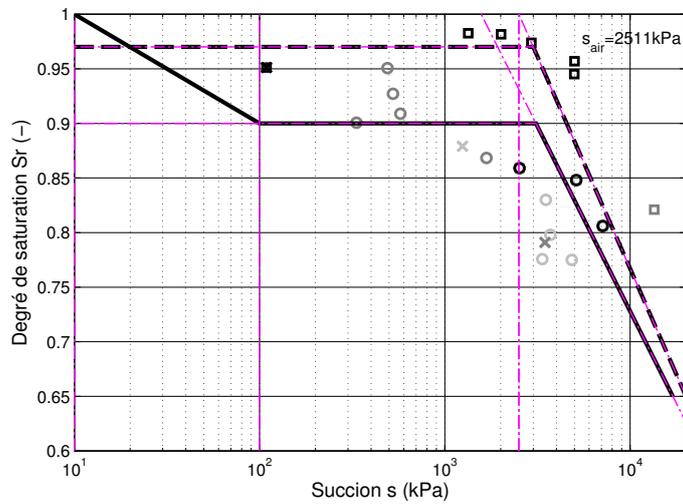
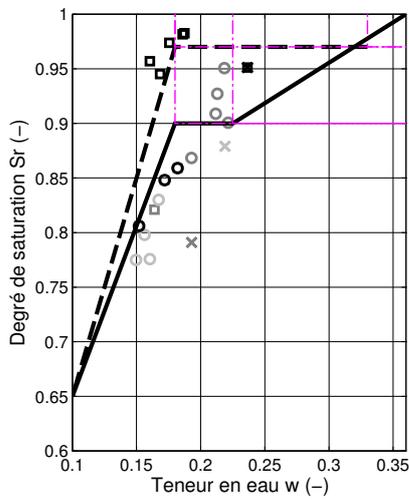
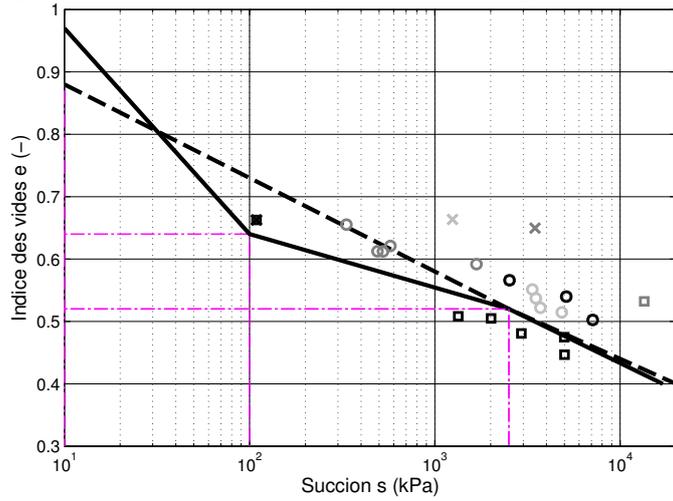
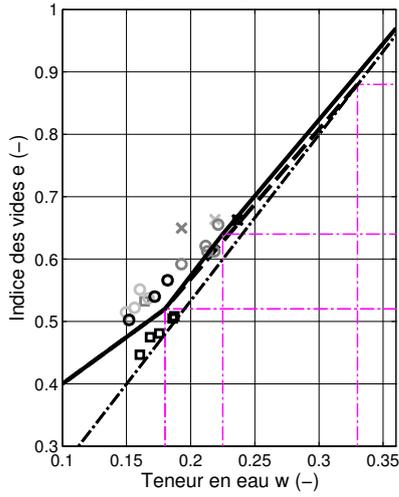
Courbe  $p_d \simeq 1.70g \cdot cm^{-3}$ , énergie modifiée, séchage naturel



Points  $p_d \approx 1.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , séchage  $110^\circ\text{C}$  avec courbe équivalente séchage naturel



Points  $p_d \simeq 1.62 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , séchage  $110^\circ\text{C}$  avec courbe équivalente séchage naturel



- Courbe de saturation (naturelle)
- - courbe de séchage (naturelle)
- Point en saturation ( $110^\circ\text{C}$ )
- Point en séchage ( $110^\circ\text{C}$ )
- × Point Proctor ( $110^\circ\text{C}$ )
- ◇ P normal ( $110^\circ\text{C}$ )  $w=22.0\%$ ,  $p_d=1.60$
- ◇ P normal ( $110^\circ\text{C}$ )  $w=20.0\%$ ,  $p_d=1.62$
- ◇ P modifié ( $110^\circ\text{C}$ )  $w=23.5\%$ ,  $p_d=1.60$

Points  $p_d \simeq 1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , séchage  $110^\circ\text{C}$  avec courbe équivalente séchage naturel

