

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen

Faculté de Technologie

Département de génie civil

Laboratoire Eau et Ouvrages dans Leur Environnement (EOLE)



THÈSE

Présentée pour l'obtention du grade de DOCTEUR EN SCIENCES

En : Génie civil

Spécialité : Géotechnique et environnement

Par : SERBAH Boumediene

Sujet

**Cartographie des sédiments de dragage  
des barrages de l'ouest Algérien : Une  
solution de valorisation en BTC**

*Soutenue publiquement le 27 Octobre 2018, devant le jury composé de :*

**Jury**

GHOMARI Fouad	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
ABOU-BEKR Nabil	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
TAIBI Said	Professeur	Univ. Le Havre Normandie	Co-Directeur de thèse
MEKERTA Belkacem	Professeur	Univ. d'Adrar	Examineur
ALLAL Mohammed Amine	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
ABDELBAKI Cherifa	MCA	Univ. Tlemcen	Examinatrice

# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>i</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>iii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>viii</b>
<b>I Cartographie des sédiments de dragage des barrages Algériens</b>	<b>5</b>
<b>Chapitre 1 Les systèmes d'information géographique : concepts généraux</b>	<b>7</b>
1.1 <b>Introduction</b> . . . . .	7
1.2 Historique des systèmes d'information géographique . . . . .	7
1.3 Qu'est ce qu'un système . . . . .	8
1.4 Qu'est ce qu'un SIG ? . . . . .	9
1.5 Qu'est-ce qu'un SIG-outil ? . . . . .	10
1.6 Fonctionnalités et concepts de base des SIG . . . . .	11
1.7 Structure et composantes d'un SIG . . . . .	12
1.8 Les étapes de la conception d'une base de données sur SIG . . . . .	16
1.9 Les enjeux et domaines d'utilisation d'un SIG . . . . .	17
1.10 Recherche antérieure sur l'utilisation du SIG . . . . .	17
1.11 Conclusion . . . . .	20
<b>Chapitre 2 Création d'un SIG pour les sédiments de dragage des barrages de l'ouest Algérien</b>	<b>21</b>
2.1 Introduction . . . . .	22
2.2 Envasement des barrages . . . . .	22
2.3 Délimitation de la zone étude . . . . .	24
2.4 Traitement des informations et modélisation conceptuelle des données . . . . .	27
2.5 Conception de SIG des sédiments de dragages . . . . .	35
2.6 Requêtes et analyses thématiques . . . . .	39
2.7 Conclusion . . . . .	54
2.8 Quelques conclusions concernant toute la première partie du SIG . . . . .	54
<b>II La construction en terre : Synthèse bibliographique</b>	<b>55</b>
<b>Chapitre 3 La terre : un matériau de construction non saturé</b>	<b>57</b>
3.1 introduction . . . . .	58
3.2 Les propriétés de la terre en tant que matériau de construction . . . . .	58
3.3 La terre : un milieu poreux granulaire non saturé . . . . .	63
3.4 Conclusion . . . . .	89

<b>Chapitre 4 Technologie de la construction en terre</b>	<b>90</b>
4.1 introduction . . . . .	91
4.2 Aperçu historique . . . . .	91
4.3 Diversité de la construction en terre crue . . . . .	95
4.4 La brique de terre compressée (BTC) . . . . .	103
4.5 Avantages du matériau terre . . . . .	115
4.6 Inconvénients de la construction en terre . . . . .	115
4.7 Conclusion . . . . .	117
<b>III Valorisation des sédiments : Application au barrage Bakhadda</b>	<b>118</b>
<b>Chapitre 5 Proposition de valorisation du sédiment naturel en BTC</b>	<b>120</b>
5.1 Introduction . . . . .	122
5.2 Présentation du barrage de Bakhadda . . . . .	123
5.3 Méthodes expérimentales mises en œuvre . . . . .	125
5.4 Durabilité et érosion de surface . . . . .	140
5.5 Traitement à la chaux . . . . .	149
5.6 Essais d'identification du sédiment naturel noté NS . . . . .	151
5.7 Essais de compactage du sédiment naturel (NS) . . . . .	152
5.8 Positionnement des sédiments naturels NS par rapport aux recommandations pour les BTC . . . . .	154
5.9 Conclusions quant à l'utilisation du sédiment naturel (NS) dans les BTC . . . . .	157
<b>Chapitre 6 Amendement du sédiment de Bakhadda pour une formulation optimisée pour les BTC</b>	<b>158</b>
6.1 Introduction . . . . .	159
6.2 Amendement du sédiment naturel NS avec du sable 0/4 : Matériau NS-S30 . . . . .	159
6.3 Comportement hydromécanique du NS-S30 . . . . .	162
6.4 Perméabilité à la vapeur d'eau . . . . .	173
6.5 Essais de durabilité du NS-S30 . . . . .	177
6.6 Traitement du NS-S30 au liant . . . . .	184
6.7 Conclusion . . . . .	190
<b>Conclusion Générale et Perspectives</b>	<b>207</b>

# Liste des figures

1.1	La notion de système d'information, [Reix, 2005]. . . . .	8
1.2	Les fonctionnalités du SIG, Nottet [2002] . . . . .	11
1.3	Structure et composantes d'un SIG . . . . .	13
1.4	La superposition des couches thématiques (voirie, Hydrologie, topographie) . . . . .	14
1.5	Modes «raster» et «vecteur» (Doc ESRI). . . . .	16
2.1	Evolution de l'envasement dans les barrages maghrébins, [Hallouche and Remini, 2005]. . . . .	24
2.2	Carte de la zone d'étude (les retenues des barrages et les bassins versants ) . . . . .	26
2.3	Les différents niveaux de représentation d'une base de donnée, [Ameur, 2003]. . . . .	27
2.4	Organisation structurelle du système étudié . . . . .	29
2.5	La modélisation entité association E/A . . . . .	30
2.6	Schéma conceptuel de sédiments dragués des barrages de l'ouest algérien . . . . .	31
2.7	Démarche d'élaboration d'un MLD Relationnel . . . . .	34
2.8	Passage du MCD au MLD . . . . .	34
2.9	Calage et la projection des cartes d'état major des barrages algériens . . . . .	37
2.10	Digitalisation des retenues des barrages à l'aide des cartes d'état major . . . . .	37
2.11	Les fuseaux du nord d'Algérie et la projection de la zone d'étude UTM30, UTM31 . . . . .	38
2.12	Création de la base de données et localisation de la zone d'étude . . . . .	39
2.13	La mise à jour de la superficie de bassin versant de la zone d'étude . . . . .	40
2.14	Les étapes d'ouvrir le fichier Excel dans MapinfoLes . . . . .	41
2.15	La mise à jour du taux de matière organique (MO) des sédiments des barrages . . . . .	42
2.16	Les barrages dragués entre 1957 et 2010 . . . . .	44
2.17	Toutes les opérations de dévasement des barrage algériens entre 1957 et 2010. . . . .	45
2.18	Résultats des prélèvements manuels dans les travaux de valorisation des sédiments . . . . .	46
2.19	Résultats des prélèvements manuels de sédiments et leurs teneurs en eaux . . . . .	47
2.20	Cartographie des prélèvements manuels et par sondages des sédiments des barrages . . . . .	48
2.21	Les étapes de la requête de taux de matière organique <3% . . . . .	49
2.22	Résultats de taux de MO <3% . . . . .	50
2.23	Résultats des barrages qui remplissent les conditions de jugement pour utiliser les sédiments en technique routière . . . . .	51
2.24	Carte du taux d'envasement et la quantité draguée des barrages Algériens. . . . .	53
2.25	Carte du domaine d'utilisation des sédiments de dragage en nord ouest de l'Algérie. . . . .	53

3.1	(a) Schéma d'un milieu granulaire humide avec une phase gazeuse occluse. (b) les trois phases du sol naturel, [Gras, 2013]. . . . .	59
3.2	Schéma des arrangements de particules élémentaires et assemblages de particules (d'après Collins et McGown, 1974), (a) l'interaction individuelle des plaquettes d'argile et structure dispersée. (b) L'interaction individuelle des plaquettes d'argile et structure floculée. (c) L'interaction de groupe de plaquettes d'argile et structure turbostratique. (d) L'interaction de groupe de plaquettes d'argile et structure bookhouse. (e) L'interaction individuelle de limon ou du sable, (f) Limon revêtu ou l'interaction de particules du sable, (g) Assemblage de particule . . . . .	60
3.3	Particules d'argile vues au microscope électronique, [Van Damme, 2013]. . . . .	60
3.4	Schéma des modèles de minéraux argileux, [Mitchell and Soga, 2005]. . . . .	61
3.5	Le feuillet est constitué de 4 plans d'atomes d'oxygènes entre lesquels viennent se loger des atomes de silicium, d'aluminium, de fer ou de magnésium, [Anger, 2011]. . . . .	61
3.6	Différents états de l'eau dans le sol, ([Magnan, 2015], [LI, 1999]). . . . .	62
3.7	Actions des forces sur une molécule d'eau, [Delage and Cui, 2000] . . . . .	64
3.8	Les ponts capillaires dans les sols non saturé, [Couvreur, 2014]. . . . .	65
3.9	Placé au contact d'un tissu humide, ce bloc de pisé se charge d'eau. Au bout de 24h, [Couvreur, 2014] . . . . .	66
3.10	Influence du rayon des pores sur la hauteur de remontée capillaire, [Fredlund and Rahardjo, 1993]. . . . .	67
3.11	Schéma d'un isotherme de sorption de vapeur d'eau de type du matériau hygrothermique ([Hall and Allinson, 2009], [Hall and Allinson, 2010]) . . . . .	68
3.12	Schématisation du processus d'adsorption de molécules d'eau sur la surface d'un solide (Bakrania et Anderson), [Salager, 2011]. . . . .	68
3.13	Représentation schématique de l'eau au sein d'un sol non saturé : a) sol granulaire , b) sol fin, [Delage and Cui, 2000] . . . . .	70
3.14	Ménisques capillaires dans le cas de grains sphériques, ([Taibi, 1994], [Arairo, 2013]) . . . . .	70
3.15	Schéma de la succion du sol non saturé . . . . .	72
3.16	Comparaison entre les différentes technique de mesure et controle de la succion sur chemin de drainage-humidification de l'argile blanche, [Fleureau et al., 1993]. . . . .	73
3.17	Courbes de rétention d'eau (succions d'entrée d'air et d'expulsion d'air) et relations avec l'hystérésis entre chemins humidification-séchage et l'indice des vides, [Boutonnier, 2007]. . . . .	74
3.18	Mécanismes invoqués pour expliquer l'hystérésis des courbes de rétention d'eau, [Boutonnier, 2007]. . . . .	75
3.19	Variations de la cohésion apparente et de l'angle de frottement avec la succion pour différents sols, [Delage and Cui, 2001]. . . . .	76
3.20	Evolution de l'indice des vides en fonction des pressions appliquées pour différentes teneurs en eau, [Naserkhaki, 2007]. . . . .	78
3.21	Effets de la succion sur la compressibilité d'un limon de Jossigny compacté, [Cui and Delage, 1996]. . . . .	79
3.22	Schéma représentatif de l'évolution des perméabilités relatives à l'air et à l'eau en fonction du degré de saturation, [Boutonnier, 2007]. . . . .	80
3.23	Variation de l'indice des vides en fonction de la teneur en eau sous différentes charges [Guérif, 1982] . . . . .	83

3.24	Résultats des courbes Proctor réalisées à différentes énergies de compactage et des mesures de succion associées pour différents types de sol, argile à châtaignier LGV-SEA, [LI, 2015]. . . . .	85
3.25	Chemins drainage- humidifications des différents sols compactés à l'optimums de Proctor normal et modifié, [Fleureau et al., 2002]. . . . .	86
3.26	Influence de méthode de compactage, [Mesbah et al., 1999b] . . . . .	87
3.27	Limites des domaines D1, D2, D3 et D4 sur le diagramme de l'essai PROCTOR pour des sols fins, [Boutonnier, 2007]. . . . .	87
3.28	Résultats de succion en fonction du poids volumique sec et de la teneur en eau pour deux loess en Chine, [LI, 1995]. . . . .	88
4.1	Les constructions en terre dans la région de MALI . . . . .	93
4.2	les programmes expérimentaux des constructions en terre . . . . .	94
4.3	Centre de formation de l'Auroville Earth Institute en Inde . . . . .	95
4.4	Distribution mondiale de l'architecture de terre ou technologies de construction de terre, [Houben and Guillaud, 1994], [Vilane, 2010] . . . . .	96
4.5	Schéma de différents procédés constructifs à partir du matériau terre [Houboun and H., 1995] . . . . .	96
4.6	une école construite en pisé à Bonbaden, (en Allemagne). . . . .	97
4.7	Hôpital régional de Feldkirch, Vorarlberg, Autriche, 1993, [Van-Damme and Houben, 2017]. . . . .	98
4.8	Le coffrage du pisé [Houben and Guillaud, 2006]. . . . .	99
4.9	La technologie de la terre pisé :1.compactage dynamique traditionnel à la main avec un petit coffrage en bois mobile, Afrique, 2.Un regard étroit sur un mur de terre pisé, montre les couches compactées, 3 et 4 une construction moderne en pisé (l'Autriche), 5.Un élément préfabriqué mis en place (l'Autriche et suisse), [Van-Damme and Houben, 2017]. . . . .	100
4.10	Les gratte-ciels en terre, Shibam au Yémen. . . . .	101
4.11	Stockage massif d'adobes, Villa Janna, Marrakech, Maroc, [Van-Damme and Houben, 2017]. . . . .	101
4.12	Schéma explicatif de préparation et construction des adobes. . . . .	102
4.13	La construction d'une maison en colombage et torchis près de Rouen, FRANCE.102	
4.14	La technique de la construction en terre : Torchis, [Dewulf, 2015], [Bruno, 2016]. . . . .	103
4.15	Maison en bauge à Gevezé. . . . .	104
4.16	La construction en bauge au Costa Rica. . . . .	104
4.17	Le système de construction monolithique en terre crue empilée (bauge). . . . .	105
4.18	Les constructions en terre (brique de terre crue compressée stabilisée) . . . . .	106
4.19	La construire en blocs de terre compressée stabilisés (BTCs) à Bangalore, Inde, 2007. . . . .	107
4.20	Schéma des presses manuelle et mécanique pour produire des BTC. . . . .	108
4.21	Fuseaux de courbes granulométriques conseillées pour construire en BTC, en Pisé ou en adobe (BTM = Brique de Terre Moulée) selon la norme française [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], CRATerre-EAG [1998], MOPT [1992] . . . . .	110
4.22	Fuseaux de plasticité conseillées pour construire en BTC, en Pisé ou en BTM selon norme française [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], CRATerre-EAG [1998] et Houben and Guillaud [1989] . . . . .	112
4.23	Fuseaux de compactage recommandés pour construire en BTC, en Pisé ou en adobe selon Houben and Guillaud [1994]. . . . .	113

4.24	Résistance à la compression de la terre crue (non stabilisée) séchée à l'air libre, [Van-Damme and Houben, 2017]. . . . .	114
4.25	Différents résultats de comportement hygrothermique du matériau . . . . .	116
5.1	Briques réalisées à base de la vase du barrage de Beni Amrane [Remini, 2006] . . . . .	122
5.2	la digue du barrage de BAKHADDA. . . . .	123
5.3	Drague stationnaire «DJEBEL DEBAGHE» à barrage bakhadda 2009/2010. . . . .	125
5.4	Les échantillons étudiés. . . . .	125
5.5	La confection des éprouvettes par double compactage statique . . . . .	128
5.6	La conservation des éprouvettes dans du cellophane et ensuite dans du papier aluminium . . . . .	129
5.7	Dispositif de mesure du module en petite déformation (vitesse des ondes sonores). . . . .	131
5.8	Principe de mesure à l'aide d'un système de transducteurs piezoélectriques . . . . .	132
5.9	Principe de la technique osmotique. . . . .	133
5.10	Technique de contrôle osmotique et Membranes de dialyse des pores très petits (5nm) . . . . .	133
5.11	Dessiccateur contenant les échantillons et les solutions saline saturée. . . . .	134
5.12	Calibration des courbes de succion-teneur en eau pour humidification des papiers filtre, [ASTM-D5298, 2010]. . . . .	135
5.13	La Méthode du papier-filtre . . . . .	136
5.14	Dispositif de mesure pour peser hydrostatique au kerdane. . . . .	137
5.15	Mouvements de l'eau dans un pore à différents stades d'humidification du matériau poreux, [Rose, 1963]. . . . .	139
5.16	Dimension d'une galette de matériau et son étanchéité latérale . . . . .	140
5.17	Principe de la mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau d'un matériau non saturé en régime stationnaire, [Hibouche, 2013] . . . . .	141
5.18	L'effet "creusement" d'une goutte d'eau de pluie ayant un angle battant < 90° [Heathcote, 2002] . . . . .	143
5.19	SAET Drip Test cité par Heathcote [2002] . . . . .	146
5.20	Spray Test en Australie, « Bulletin 5 » (Schneider, 1987) . . . . .	147
5.21	détail de Spray Test [Norme-SAZS-724, 2012], [Norme-NZS-4298, 1998] . . . . .	148
5.22	la distribution granulométrique des sédiments naturels. . . . .	151
5.23	Positionnement des sédiments naturels (NS) sur le diagramme de plasticité. . . . .	152
5.24	Essais de compactage du matériau naturel NS. . . . .	153
5.25	Distribution granulométrique des sédiments naturels et le fuseau recommandé pour le BTC. . . . .	154
5.26	limites d'Atterberg de sédiment naturel et le fuseau recommandé pour BTC . . . . .	155
5.27	Essais de compactage (SPO et MPO) de sédiment naturel (NS) et la zone recommandée pour les BTC. . . . .	156
6.1	Distribution granulométrique des NS, du sable 0/4, du matériau amendé NS-S30 et le fuseau recommandé. . . . .	160
6.2	limites d'Atterberg des NS, NS-S30 et le fuseau recommandé. . . . .	160
6.3	Essais de compactage de : NS à SPO et MPO, NS-S30 à SPO, MPO et MPO + 25coups positionnés par rapport à la zone recommandée. . . . .	163
6.4	Résistances à la compression simple d'éprouvettes de NS-S30 à MPO et MPO+25 Coups . . . . .	163

6.5	chemins de drainage-humidification du NS-S30 préparé initialement sous forme de pâte. . . . .	166
6.6	Chemins de drainage-humidification du NS-S30 compactés à MPO et MPO+25 coups. . . . .	168
6.7	Définition du module $E_{50}$ . . . . .	169
6.8	Effet de la teneur en eau sur UCS du matériau NS-S30 compacté à MPO+25 coups. . . . .	170
6.9	La résistance UCS en fonction de la teneur en eau (a) et la succion (b) . . .	171
6.10	la variation des modules sécants en fonction de déformation selon la teneur en eau et la succion . . . . .	172
6.11	la variation des modules en petite et grande déformations en fonction de la teneur en eau et la succion . . . . .	173
6.12	variation des modules en petites et grandes déformations en fonction de la résistance à la compression simple UCS. . . . .	174
6.13	La perte de masse du récipient-échantillon dans le cas d'un flux de vapeur ascendant et descendant en fonction de temps . . . . .	175
6.14	Évolution du coefficient de perméabilité incrémental à la vapeur d'eau du matériau NS-S30 en fonction du temps. . . . .	176
6.15	Les précipitations de la région de Jijel-Est Algérien. (infoclimat.fr) . . . . .	178
6.16	Dispositif «Essai Drip Test» selon les normes [Norme-NZS-4298, 1998], [Norme-SAZS-724, 2012] . . . . .	179
6.17	Dispositif «Essai Drip Test» développé Par L.O.M.C [Nguyen and Taibi, 2015].	180
6.18	Schéma du dispositif «Drip Test» développé, Nguyen and Taibi [2015] . . .	181
6.19	Courbe d'étalonnage de capteur laser . . . . .	181
6.20	évolution des profondeurs d'érosion du matériau NS-S30 en fonction de temps. . . . .	182
6.21	Exemple des photos de l'évolution d'érosion en fonction du temps des gouttes de test 1. . . . .	183
6.22	Comparaison de l'évolution des profondeurs d'érosion du matériau NS-S30 avant et après traitement. . . . .	185
6.23	Exemple des résultats de l'essai «Drip test » sur Ech+3%ch à 3j. . . . .	186
6.24	Exemple des résultats de l'essai « Drip test » sur Ech+3%ch à 28j . . . . .	187
6.25	Schéma du dispositif expérimental « Spray Test » type de Nguyen and Taibi [2015]. . . . .	187
6.26	Photo du Spray Test, contrôle de pression, buse normalisée en PVC, échantillon étudié. . . . .	188
6.27	Le matériau NS-S30 avant l'exposition au jet d'eau du spray test. . . . .	188
6.28	Résultats de l'essai spray test du matériau NS-S30 . . . . .	189

# Liste des tableaux

1.1	Avantages et inconvénients des modes raster et vecteur . . . . .	15
2.1	Taux d'envasement des barrages de l'ouest algérien (Levés bathymétrique 2004-2005 ANBT) . . . . .	25
2.2	Démarche MERISE [Mojeron, 1991] cité par Abdelbaki [2014] . . . . .	28
2.3	Dictionnaire de données de notre travail . . . . .	32
2.4	Différents systèmes de gestion de bases de données . . . . .	35
2.5	Les extensions des fichiers de MapInfo . . . . .	36
2.6	Critères de jugement pour utiliser les sols en technique routière, selon la norme (NF XP-P11-300) et GTS2000 . . . . .	45
2.7	Le taux d'envasement des barrages de deux régions ouest-Chelif Zahrez . . . . .	52
4.1	Programme de construction en Terre, en Algérie depuis 1970 . . . . .	94
4.2	Classification granulométrique des sols selon ASTM D2487 [Van-Damme and Houben, 2017] . . . . .	109
4.3	Système simplifié de classification des sols selon la norme ASTM D2487 avec une évaluation qualitative de l'aptitude à la construction en terre, [Van-Damme and Houben, 2017] . . . . .	111
5.1	L'énergie de compactage dynamique calculée . . . . .	127
5.2	Humidité relative et succion imposées en fonction de la solution saline saturée en température . . . . .	134
5.3	Limite de masse perdue proposé par Fitzmaurice [1958] . . . . .	144
5.4	Classification de SAET Drip Test [Weisz et al., 1995] . . . . .	145
5.5	Classification d'érodabilité du sol testé par Spray Test, [Norme-SAZS-724, 2012], [Norme-NZS-4298, 1998] . . . . .	147
5.6	Traitement des sols à la chaux : Recensement non exhaustif des travaux rapportées dans la littérature depuis une quarantaine d'années. . . . .	150
5.7	Propriétés géotechniques des sédiments naturels. . . . .	153
5.8	les teneurs en eaux initiales et les densités sèches maximales des BTC, ([Moevus et al., 2012], [Jiménez et al., 2007], [Houben and Guillaud, 1994]) . . . . .	156
6.1	Résultats de résistance à la compression simple des éprouvettes(5cmx10cm) de NS-S30 compactées à ( $w_{MPO}$ , $\gamma_d$ MPO . . . . .	161
6.2	Valeurs des couples de ( $w$ , $\gamma_d$ ) du NS et NS-S30 aux optimums . . . . .	162
6.3	Valeurs initiales moyennes des caractéristiques du NS-S30. . . . .	167
6.4	Courbes d'ajustement entre $E_{50}$ et UCS [Dongxing et al., 2013] . . . . .	174
6.5	Résultats de la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau NS-S30 . . . . .	176
6.6	Classification d'érodabilité du sol testé par Drip Test [Frencham, 1982], [Norme-NZS-4298, 1998], [Norme-SAZS-724, 2012]. . . . .	184

# DÉDICACES

*Je dédie cette thèse aux personnes qui me*

*sont chères*

---

# Remerciement

Mes premiers remerciements s'adressent à mes directeurs de recherche :

- Monsieur ABOU-BEKR Nabil, Professeur à l'université de Tlemcen, pour la confiance qu'il m'a accordée dès le début, sa générosité intellectuelle, et la qualité de ses conseils.
- Monsieur TAIBI Said, Professeur à l'université Le Havre Normandie (Laboratoire Ondes et Milieux complexes, UMR CNRS 6294), qui a participé de très près à l'élaboration de ma thèse, ainsi que les conditions de travail qu'il m'a assurées, ainsi que pour sa disponibilité, sa patience et la sincérité de ses recommandations aux moments opportuns.

Je tiens à remercier :

- Monsieur GHOMARI Fouad, Professeur à l'université de Tlemcen pour avoir accepté de présider le jury de ma thèse.
- Monsieur MEKERTA Belkacem, Professeur à l'université d'Adrar, d'avoir accepté de participer au jury de cette thèse en qualité de rapporteur ainsi que pour toutes les données qui m'avait transmises.
- Monsieur ALLAL Mohammed Amine, Professeur à l'université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'examiner ce travail.
- Madame ABDELBAKI Cherifa, Maître de conférences à l'université de Tlemcen pour l'examen de cette thèse et pour le suivi précieux qu'elle m'a assuré pour la partie cartographie.

Je tiens à exprimer mes plus vifs et sincères remerciements à Dr Salima BOUCHE-MELLA et Dr Joanna EID pour les fructueux travaux que nous avons pu réaliser ensemble. Leurs contributions ont été capitales pour l'aboutissement de cette thèse.

Mes remerciements vont également à toute l'équipe du laboratoire LOMC de l'université Le Havre Normandie. Je voudrais également faire part de ma reconnaissance à toute l'équipe du barrage Bakhadda pour l'ensemble des services qu'elle m'a rendus. Un merci particulier à M. Ahmed GUENDOZ, directeur du barrage bakhadda pour son aide.

Enfin, je réserve mes plus intenses pensées à mes parents, aux membres de ma famille, mes frères, mes sœurs et amis laid, benaissa, youcef, abdallâh, Bendaoud, Djamel et ked-douri, à mes étudiants pour le soutien moral. A toutes les personnes qui m'ont assisté de près ou de loin.

La finalisation de cette thèse n'aurait pas été possible sans l'appui financier assuré par le Programme National Exceptionnel (PNE : 2015-2017) du gouvernement algérien.

## ملخص

يتطلب طمي السدود حملات حفر تحت المياه وذلك من اجل الحفاظ على سعتها العملية. في الجزائر أكثر من 32 مليون متر مكعب هي حصيلة الترسبات السنوية على مستوى السدود. هذا الكم الهائل من الترسبات يمكن استغلاله كمواد بناء جيوببيئية مصنوعة من التربة . هناك عدد كبير من العينات البيانية والأبحاث التثمينية لهذه الرواسب، التي تمكن من جمع معلومات جيوتقنية هامة لخلق قاعدة بيانية.

هذا البحث مقسم إلى قسمين.

الأول عبارة عن إنشاء قاعدة بيانية جيوتقنية يتم استعمالها من طرف مصالح البناء و الأشغال العمومية وكذا الصناعيين ورسم خريطة جيوتقنية لرواسب سدود الغرب الجزائري.

أما القسم الثاني فيسمح بدراسة وتثمين الرواسب لسد بن خدة وتحويلها إلى قوالب من التربة المضغوطة. الدراسة الأولية الهيدروميكانكية بينت انه يجب إضافة كمية من الرمل تقدر ب 30 بالمئة لتحسين نوعية هذه الرواسب للحصول على خصائص ميكانيكية ملائمة للقوانين المعمول بها، وللتمكن من تحقيق صلابة ملائمة، يجب رص التربة إلى ذروة بروكتور + 25 بعد تصميم القوالب الترابية المضغوطة ، حيث تم إجراء دراسة هيدروميكانكية ومدى تأثير الرطوبة على صلابتها ومقاومتها الميكانيكية وذلك بعد خضوع القوالب لأطوار التجفيف والتبلييل.

استنتجنا مدى تطور معامل التشوهات الكبرى والصغرى من جهة و مقاومة الضغط البسيطة من جهة أخرى بدلالة نسبة المياه و الامتصاص ، هذه الدراسة سمحت لنا بوضع تركيبية مناسبة لصناعة القوالب الترابية المضغوطة عن طريق الرواسب المستخرجة من السدود، و هذه التركيبات تتناسب مع متطلبات البناءات الترابية.

**الكلمات الاستدلالية** دراسة الخرائط ، نظام المعلومات الجغرافية ، التربة المستخرجة ، البناءات الترابية ، القوالب الترابية ، التربة غير المشبعة، التجفيف ، التبلييل ، الضغط ، معامل المقاومة.

---

# Résumé

L'envasement des barrages nécessite des campagnes de dragage périodiques pour maintenir leur capacité fonctionnelle. En Algérie, plus de 32 millions de  $m^3$  de sédiments se déposent chaque année au fond de ces retenues. Ces gisements de sédiments peuvent être valorisés comme Eco-Géo-matériaux de construction à base de terre crue.

Un nombre important de sondages de reconnaissance et des travaux de valorisation sur ces sédiments ont abouti à des informations géotechniques qui doivent être collectées afin de créer une base de données.

Ce travail est divisé en deux axes. Le premier consiste à établir une base de données géotechniques et un système d'information géographique qui pourraient servir aux services de BTP et aux industriels. Le deuxième axe présente un exemple de valorisation. Il s'agit de valoriser les sédiments de dragage du barrage Bakhadda en brique de terre crue comprimée.

Une étude hydro-mécanique préliminaire a montré la nécessité d'amender le sédiment naturel avec une fraction sableuse de 30% pour atteindre les caractéristiques en termes de granulométrie, de plasticité et de propriétés mécaniques selon les normes en vigueur.

Pour atteindre des performances suffisantes en termes de résistance mécanique, une énergie de compactage équivalente à celle de l'optimum Proctor + 25 coups est nécessaire. Le BTC ainsi confectionné, a fait l'objet ensuite d'une étude hydro-mécanique pour mettre en évidence l'effet de l'humidité sur l'évolution de sa rigidité et de sa résistance mécanique. En effet, la résistance du matériau augmente lorsque la teneur en eau diminue à cause de l'augmentation de la succion. Après une identification du comportement des BTC soumis à des cycles de drainage et d'humidification, des relations ont été établies concernant les évolutions des modules en petites et grandes déformations d'une part, et de la résistance à la compression simple d'autre part, en fonction de la teneur en eau et de la succion.

Cette étude nous a permis de mettre au point une formulation de brique de terre comprimée à base de sédiment de dragage. Cette formulation répond aux exigences requises pour la construction en terre.

**Mots clés :** Cartographie, système d'information géographique, sédiments de dragage, construction en terre crue, brique de terre comprimée, sol non saturé, drainage-humidification, compactage, modules .

# Abstract

The silting of dams requires periodic dredging campaigns to maintain their functional capabilities. In Algeria, more than 32 million  $m^3$  of sediment are deposited every year. These deposits (resources) of dredged sediments can be valorised as an eco-geo-material for building construction based on raw earth. A large number of investigation soundings and valorization work on these sediments have lead to geotechnical information that must be collected in order to create a database. This work is divided into two axes, the first one, it is to establish a geotechnical database that will be confided to the service of Building and civil engineering works (BTP).

The second axis allows to study the valorization of dredging sediments of the Bakhadda dam and to transform them to compressed earth blocks (CEB). Preliminary hydro-mechanical study showed the need to amend the natural sediment with sand fraction up to 30% to reach the recommended characteristics of the standards, as granulometry, plasticity and mechanical properties. To achieve high mechanical strength, compaction energy equivalent to modified optimum proctor + 25 blows was required. The hydro-mechanical properties of the manufactured CEB were then studied. Water content effect on their mechanical properties was highlighted. In fact, the strength increases when water content decreases due to an increase in suction. Using the measured drying-wetting paths, relations were established between small and large strains modulus on one hand, and water content and suction on the other hand. Results of this study have led to the valorization of natural dredged sediments in CEB which respond to the recommendations. Based on the hydric and mechanical tests carried out, the behaviour of CEB in situ was determined.

**Keywords :** Cartography, GIS, Dredged sediments, Raw earth construction, Compressed earth blocks CEB, Unsaturated soil, Drying-wetting paths, Compaction, Modulus.

# Introduction générale

En Algérie, de nombreux barrages ont été récupérés par la technique de dragage et leur durée de vie s'est trouvée ainsi prolongée de plusieurs années.

Il a été alors judicieux de mener une réflexion pour une utilisation rationnelle de ces sédiments. Cette étude s'inscrit dans la recherche d'une approche de gestion des sédiments de dragage partant d'outils d'investigation archaïques (archivage manuels, plans, etc.) transformés en outils puissants tels que les systèmes d'information géographique (SIG). Aussi, on présente un exemple de valorisation appliqué aux sédiments dragués du barrage Bakhadda à travers la mise au point d'une formulation pour une brique de terre crue compressée.

Un aspect de l'intérêt scientifique du sujet réside dans le fait de démontrer qu'un matériau, à priori inutilisable en BTP et en particulier en éco-géo-matériau (BTC), pourrait être récupéré et utilisé moyennant de légers traitements à base de matériaux granulaires et/ou de liants hydrauliques en faible quantité. Cela présente un intérêt double, d'une part, la valorisation de matériaux permettant d'éviter les inconvénients liés à leur stockage, et d'autre part, la préservation des matériaux nobles

L'idée de cette thèse repose d'abord sur le recensement et la cartographie des sédiments de dragage des barrages de l'ouest algérien dans une perspective de valorisation. L'outil développé serait d'un apport précieux pour les décideurs et les acteurs du secteur du BTP, dans la mesure où il permettrait de localiser ces matériaux, de donner leurs caractéristiques pertinentes et les possibilités de leur valorisation.

Ce travail permet de démontrer l'intérêt que peut apporter l'utilisation de l'outil de programmation informatique « S.I.G » (Système d'Information Géographique) pour la caractérisation variationnelle des différentes données géotechniques des zones envasées des barrages de l'ouest Algérien. La gestion à l'aide d'un SIG permettra d'élaborer une cartographie recouvrant toutes les données des matériaux de dragage. Une démarche méthodologique a été adoptée pour mettre en place le SIG de gestion des sédiments de dragage des barrages. Cette démarche est basée sur une approche systémique. Afin de comprendre le fonctionnement de ces différentes extensions spatiales, nous ferons dans un premier temps une introduction générale sur les Systèmes d'Information Géographique, qui traitent de l'information géoréférencée et nécessitent soit des logiciels SIG (comme ArcGIS ou Mapinfo), soit des bases de données spatiales.

Cette première partie posera les bases de l'information géographique, à savoir, quels sont les objets utilisés pour représenter telle ou telle information provenant d'une carte ? Quel est le mode et le modèle de représentation utilisés pour gérer les données ?, ce qui permettra de décrire plus facilement le fonctionnement des systèmes de gestion de bases de données spatiales.

Les données sont numérisées et traitées par les procédures de superposition et de classement du logiciel Mapinfo - ArcGIS. Il en découle la production d'une carte des sédiments de dragage du bassin versant de l'ouest Algérien. Ces informations cartographiques sont utiles pour le programme intégré de construction en terre crue. Nous ver-

rons dans la deuxième partie, la possibilité de valorisation de ces sédiments comme éco-géo-matériaux de construction à base de terre crue. La terre crue est l'un des principaux matériaux de construction utilisés par l'homme depuis des milliers d'années et elle restera sans doute l'un des matériaux les plus employés dans le monde dans les années à venir pour réduire la consommation d'énergie à l'échelle planétaire. Les chercheurs donnent ainsi de plus en plus d'intérêt à l'utilisation de la terre crue comme un éco-géo-matériau pour la construction des bâtiments. En témoigne le nombre d'articles de recherche publiés traitant de la construction en terre qui a augmenté de 10 fois par rapport aux années 1990.

En effet, la terre est un véritable matériau écologique : inépuisable et recyclable, économe en énergie, à forte inertie thermique, aux propriétés acoustiques élevées, aux capacités d'assainissement de l'air, et aux grandes qualités esthétiques. Un de ses inconvénients majeurs est toutefois sa fragilité à l'eau.

### **Les objectifs de cette étude**

La valorisation des sédiments de dragage des barrages de l'ouest algérien est explorée ici comme une solution possible pour la fabrication de briques de terre crue compressée. Malgré ses nombreux avantages, l'utilisation de blocs de terre compressée est restreinte suite à une compréhension limitée de certaines propriétés du matériau de base et un manque de normes de construction adéquates. Les matériaux appropriés pour la fabrication de BTC doivent répondre à des exigences spécifiques en termes de granulométrie, de propriétés plastiques, matière organique, cohésion et compactage. Nous tenterons de voir quelles solutions peuvent être apportées pour mieux les mettre en valeur.

Le but principal de ce travail est d'améliorer les propriétés mécaniques du sédiment utilisé en brique de terre crue compressée par l'emploi d'une nouvelle procédure de compactage à énergie élevée, qui permet d'atteindre de bonnes performances mécaniques en termes de résistance à la compression simple et de modules en petites et grandes déformations. La résistance à la compression simple de la terre est déterminante pour le dimensionnement des ouvrages, c'est une propriété mécanique faisant l'objet d'exigences réglementaire fortes.

Nous présentons dans cette étude des résultats expérimentaux de la réponse hydro-mécanique du matériau sous l'effet du séchage couplé avec des cycles de drainage – humidification réalisés en utilisant différentes techniques d'imposition et de mesure de la succion. L'originalité de notre démarche réside dans l'intérêt que nous portons à la succion en tant que paramètre d'état de contrainte pertinent dans le comportement rhéologique du matériau compacté donc non saturé.

### **Contributions**

La cartographie est une partie essentielle dans cette étude, la valorisation de sédiment dragué doit impérativement passer par une étude préalable de l'origine de ce sédiment. La qualité et la quantité de sédiment dragué jouent un rôle important dans la suite de l'étude, le rendement d'un investissement potentiel dans ce domaine est décisive en cas d'adoption de l'une de nos solutions.

Selon la nature du bassin versant (géologique, hydrogéologique, climatique, le couvert végétale, ...) le sédiment est différent d'un barrage à un autre.

La cartographie est un outil utilisé dans cette étude pour nous faciliter le choix des sédiments à valoriser.

Dans le manque d'une base de données globale de la région ouest Algérien (concernant les sédiment dragués), nous avons fait appel à d'autres travaux de recherches, des

fiches de reconnaissances, des opérations de dragages (exemple d'une entreprise Allemande avec 12 sondages dans le barrage Fergoug et l'entreprise HYDRODRAGAGE-C.T. SYSTEMS dans les barrages BaKhadda et Bouhnifia selon l'ANBT) pour créer une base de données qualitative et quantitative de sédiment de dragage dans les barrages de l'Ouest Algérien.

### Sources des données

Durant l'établissement de ce travail nous nous sommes basés principalement sur les enquêtes que nous avons menées sur terrain en plus des essais de valorisations et les essais de reconnaissances de sédiments dragués. Cette phase a été plus longue en raison des plusieurs difficultés tel que le manque de données et les difficultés d'accès à l'information.

Afin de combler le manque d'information, nous avons fait appel aussi à différentes sources de données telle que :

1. Thèses et publications scientifiques : Kassoul M.(1997), Labiod Z. (2004), Remini B. (2005), Semcha A. (2006), Mekerta et al. (2008, 2009, 2012), Nougar B.(2009), Serbah B. (2011), Belas N. (2011), Bourabah M.A. (2012), Sadok A. (2013), Benassla M.(2014), Guessas H. (2014), Seklaoui o. (2016), Mokhtari H. (2017), Serbah et al.(2018)...
2. Fiches de reconnaissance de l'ANBT (sondages à 28m).
3. Fiches techniques et rapports des levés bathymétriques (ANBT, 2004/2005).
4. Documents divers fournis par les directions des barrages visités.

### Organisation du manuscrit

Cette thèse est structurée en trois parties déclinées en six chapitres.

**La première partie** relative aux SIG est constituée de deux chapitres :

- Le premier chapitre débute par une description bibliographique des principales définitions, les notions et les règles essentielles des systèmes d'information géographiques.
- Le second chapitre est consacré à la conception de la base de données des sédiments de dragage et leur valorisation dans le domaine du BTP.

**La deuxième partie**, constituée de deux chapitre, concrétise le lien entre la première et la troisième partie de la thèse. En effet, cette deuxième partie est une synthèse bibliographique sur la construction en terre dans la perspective d'un exemple de valorisation qui fera l'objet de la troisième partie.

- Le chapitre trois consiste à présenter la terre et ses propriétés hygroscopiques et l'influence de la succion sur le comportement de la terre en tant que matériau de construction (un milieu poreux non saturé). La prise en compte de la non saturation à travers la succion distingue notre travail des travaux déjà réalisés sur la BTC.
- Dans le chapitre quatre, on a défini dans un premier temps, la possibilité de valorisation des sédiments de dragage en tant que matériaux de construction en présentant la diversité des constructions en terre dans leur contexte historique, géographique et social.

**La troisième partie** déclinée en deux chapitre présente justement cet exemple de valorisation.

- Dans le chapitre cinq, on présente les résultats d'une étude expérimentale qui a été effectuée au laboratoire Ondes et Milieux Complexes (L.O.M.C) de l'université Le Havre Normandie dans le cadre d'une mobilité PNE de 18 mois, pour identifier et valoriser les sédiments de dragage du barrage Bakhadda (Ouest Algérien) en brique de terre crue compressée (BTC).

Nous avons présenté aussi les propriétés de ces sédiments en termes de granulométrie, densité, plasticité et résistance en les comparant aux normes et recommandations concernant son aptitude à être utilisé comme matière première pour les BTC.

- Le chapitre six a été consacré à l'étude de l'influence de différentes énergies de compactage, l'effet de la teneur en eau et de la succion sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression, les modules en petites et grandes déformations) et la durabilité du matériau amendé par un pourcentage de sable 0/4 pour trouver la formulation adéquate à la fabrication des BTC.

La conclusion générale, portera sur une synthèse des travaux réalisés en passant par le recueil de données numériques et leur introduction dans le SIG aux résultats d'essais géotechniques et mécaniques sur la BTC et enfin une perspective de réaliser un modèle physique de structure en BTC.

**Première partie**

**Cartographie des sédiments de dragage  
des barrages Algériens**



# Chapitre 1

## Les systèmes d'information géographique : concepts généraux

### 1.1 Introduction

Aujourd'hui, les bases de données occupent une place de plus en plus importante dans les systèmes d'informatique. L'utilisation de l'informatique devient indispensable lorsqu'il s'agit de traiter et de gérer un grand nombre de données d'origines variées. Il est souvent difficile pour un problème donné d'acquérir une connaissance rapide et exacte du terrain en raison de la difficulté de l'accumulation de connaissances éparses. Dans ce cas, l'actualisation, la connaissance, et la précision des données sont impératives. Le SIG nous permet de définir des bases de données et des cartes qui doivent être adaptées aux besoins spécifiques (volume des sédiments dragués, taux d'envasement des retenues des barrages, choix de valorisation de ces sédiments, etc.). Les SIG sont des systèmes d'information constitués pour répondre à des besoins précis et qui déterminent une modélisation finalisée du monde réel.

Le SIG peut être localisé sur un poste informatique unique sur lequel vont s'accumuler un ensemble de couches d'informations destinées à différentes applications. Il est alors nécessaire de mettre en place une structure d'exploitation. Donner la possibilité aux utilisateurs d'interroger directement ce système en donnant un aperçu du résultat souhaité semble être une piste prometteuse pour rendre les systèmes plus exploitables.

### 1.2 Historique des systèmes d'information géographique

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont apparus dans les années soixante, exactement en 1964 aux USA, et/ou Canada, [Tomlinson, 1967]. Les cartographes commencent à utiliser des méthodes informatiques. Dans les mêmes périodes, plusieurs cartes ont été utilisées dans l'Afrique de l'Est pour permettre de localiser les meilleurs endroits pour créer de nouvelles implantations forestières font naître l'idée d'utiliser l'informatique pour traiter les données géographiques. Ces systèmes sont devenus des outils incontournables pour la compréhension et le suivi des phénomènes dynamiques, [Maguire, 1991].

Ils ont connu un essor important lors des trois dernières décennies et son véritable développement date au début des années quatre vingt. On distingue quatre périodes principales dans l'évolution des SIG :

- **A la fin des années 70** : L'utilisation des ordinateurs en cartographie s'était rapide-

ment perfectionnée. La diffusion des outils de cartographie automatique/SIG dans les organismes d'État (armée, cadastre, services topographiques...) et des nouvelles techniques dans des domaines proches (pédologie, hydrographie et topographie).

- **Au début des années 80**, les SIG avaient pris une forme. Ils devenaient plus complexes, moins coûteuse et se répandaient dans le marché de plus en plus.
- **En 1995** : Très fortes augmentation des capacités de traitement, stockage et des applications sur internet et une banalisation de l'usage d'information géographique (cartographie sur internet, calcul d'itinéraires routiers, utilisation d'outils embarqués liés au GPS...), apparition des « logiciels libres » ou d'outils dédiés aux pratiques coopératives. Une demande croissante de cartes présentant l'état de l'environnement a été générée suite au sommet de la terre qui s'est tenu à Rio de Janeiro en 1992 afin de mesurer les impacts du développement.
- **A l'heure actuelle**, ces systèmes sont rapidement mis en place par des institutions publiques, des laboratoires de recherches, des institutions universitaires, des entreprises du secteur privé, des services militaires et Publiques.

### 1.3 Qu'est ce qu'un système

Le mot système dérive du grec "systema" qui signifie "ensemble organisé". Dans la littérature, nous avons recensé plusieurs définitions pour le mot système.

- "Un système d'information est un ensemble organisé de ressources (matériel, logiciel, personnel, données, procédures, etc.) permettant d'acquérir, de traiter, de stocker des informations (sous forme de données, texte, images, etc.), dans et entre des organisations", (figure 1.1, [Reix, 2005]).

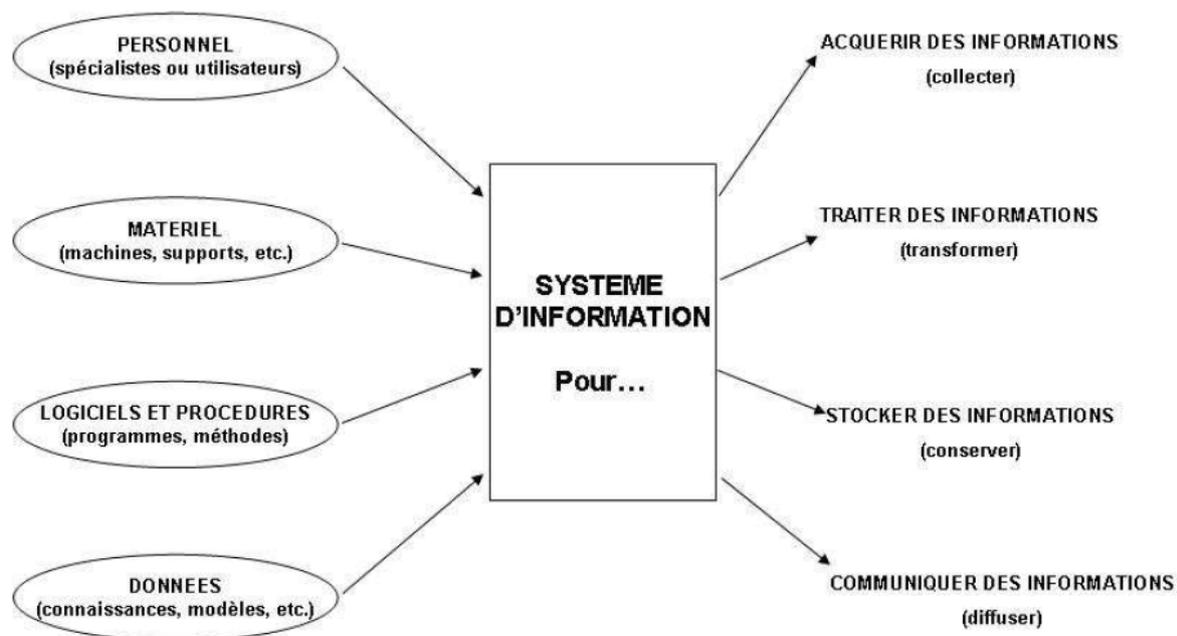


FIGURE 1.1 – La notion de système d'information, [Reix, 2005].

- **Mélèze [1972]** propose la définition suivante : "Des finalités et des buts étant exprimés sur un environnement, un système finalité est un ensemble organisé de moyens, méthodes, règles et procédures qui permet d'obtenir des réponses satisfaisantes de l'environnement".

- **LeMoigne [1977]**, définit un système comme "quelque chose (n'importe quoi identifiable) qui fait quelque chose (activité, fonction) et qui est doté d'une structure qui évolue dans le temps, dans quelque chose (environnement) pour quelque chose (finalité)".
- **Muriel [2015]**, le système est "une totalité organisée, faite d'éléments solidaires ne pouvant être définis que les uns par rapport aux autres en fonction de leur place dans cette totalité".

Il convient alors de considérer le système d'information comme un objet multidimensionnel, susceptible d'être une dimension informationnelle, une dimension technologique, une dimension organisationnelle.

- La dimension informationnelle permet de produire des «images», pas seulement au sens graphique du terme mais plutôt au sens large. Ce qui conduit à définir des modèles de données et les règles de transformation de ces données par des modèles de traitement. L'ensemble de ces modèles de données et de traitement correspond à une description fonctionnelle mais abstraite), du futur système d'information.
- La dimension technologique : est un système d'information qui repose sur un système informatique composé de matériels, ordinateurs permettant l'acquisition, le traitement, le stockage des informations, des logiciels permettant la communication, les traitements et de technologies qui permettent d'assurer les fonctions de base : collecter, stocker, traiter, diffuser.
- La dimension organisationnelle permet de gérer et distribuer les informations nécessaires à ses activités et notamment à celles liées au cœur de fonctionnement.

## 1.4 Qu'est ce qu'un SIG ?

C'est un Système d'Information Géographique qui utilise des informations référencées géographiquement et qui inclut des possibilités de traitement d'information à des fins d'analyse spatiale. Il consiste à présenter un phénomène ou un objet du monde réel ou virtuel ayant une localisation dans l'espace. Dans la littérature, plusieurs définitions des systèmes d'informations géographiques ont été données, toutes reprennent les fonctionnalités que doit avoir tout SIG. Nous avons recensé ces définitions :

- D'après l'Union Géographique Internationale (I.G.U), un système d'information géographique est «le terrain commun entre le traitement d'information et plusieurs domaines utilisant les techniques d'analyse spatiale», [**Tomlinson, 1972**]. C'est un système pour collecter, stocker, vérifier, manipuler, analyser et restituer des données spatialement référencées à la surface de la terre.
- C'est un ensemble de données repérées dans l'espace, structurées de façon à pouvoir extraire commodément des synthèses utiles à la décision, [**Didier and Bouve-ron, 1993**].
- Les SIG incluent par conséquent l'ensemble des outils de traitement de données spatiales : des logiciels, comme MapInfo, Arcview, ArcGis, mais aussi le hardware utilisé (ordinateurs, scanners, tables de numérisation, GPS, etc.). Les SIG sont aussi liés aux logiciels de traitement d'images, ainsi qu'à la télédétection, et peuvent être utilisés conjointement selon les produits voulus, [**Krafft and Minne, 2005**].

Une des définitions largement utilisées pour décrire les SIG est celle fournie par le centre américain d'information géographique et d'analyse [**Goodchild and Kemp, 2007**] : « Un SIG est un ensemble de matériels, de logiciels et de procédures conçus pour permettre la collecte, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation, l'affichage de données à référence spatiale afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement

et de gestion ». En effet toutes les définitions convergent vers un même objectif. La possibilité de numériser l'information géographique et d'en confier la gestion à l'ordinateur.

## **1.5 Qu'est-ce qu'un SIG-outil ?**

Un certain nombre d'outils spécifiques appelés « SIG-outil » ou « SIRS » Système d'Information à Référence Spatiale ont été développés. On peut représenter l'information géoréférencée d'un barrage à titre d'exemple par des informations spatiales comme les limites de la retenue, son bassin versant, la digue et les points de sondage par des attribues (polygones, points, cordonnées ) et chaque objet doit être identifié à l'aide des outils de SIG. Ensuite, une analyse thématique qui donne les résultats du projet étudié. La numérisation de l'information géographique permet de représenter le monde réel sur des supports-carte (carte du réseau routier, carte des sédiments des barrages, carte des régions agricoles, carte du réseau ferroviaire, carte des fonds marins, carte du réseau d'eau etc.).

## 1.6 Fonctionnalités et concepts de base des SIG

Le Système d'Information Géographique SIG offre cinq fonctionnalités, plus connues sous le terme des «5A», (Acquisition, Archivage, Analyse, Affichage et Abstraction), [Denegre and Salge, 1996], figure 1.2.

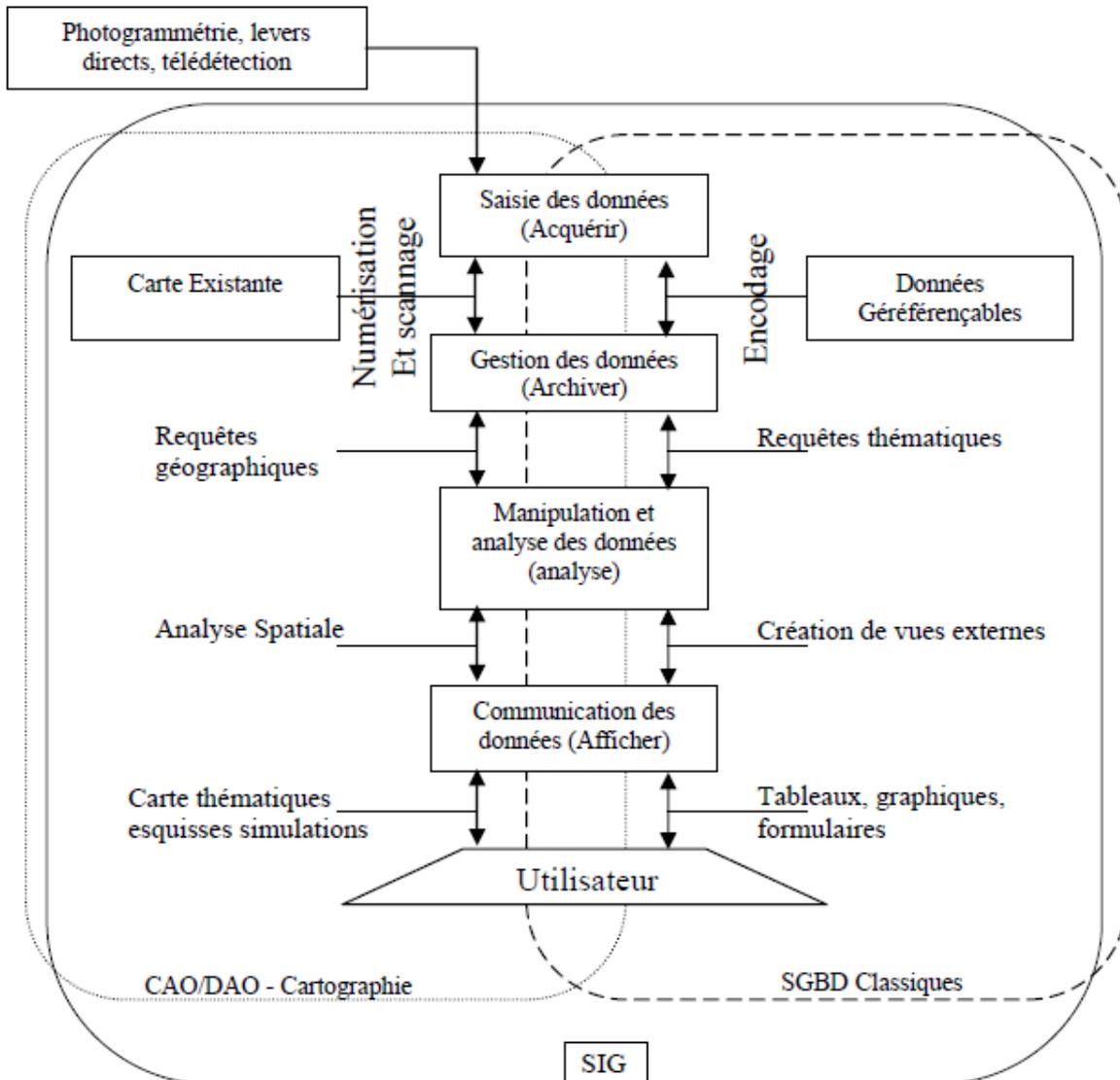


FIGURE 1.2 – Les fonctionnalités du SIG, [Nottet, 2002].

Un SIG est un système comprenant des fonctions de saisie de données géographiques sous forme numérique (Acquisition), un système de gestion de ces données (Archivage), des fonctions de manipulation (Analyse) et des outils de mise en forme (Affichage). Ces quatre phases, de l'acquisition à l'affichage, traitent des données en faisant abstraction d'un certain nombre de détails du monde réel en raison des définitions des objets géographiques. C'est la règle des principes de SIG, [Denègre et al., 1996]. La création des bases de données nécessite une phase d'acquisition assez lourde, dont les différents modes sont les suivants :

- Le relevé de terrain associe à des points situés sur la surface terrestre leurs coordonnées (x,y,z) dans un système de projection.
- La digitalisation a permis de passer de la cartographie papier à la cartographie informatique.

- La télédétection permet de générer directement des cartes informatiques à partir d'une analyse de photographie aériennes ou de photogrammétrie spatiale plus récemment, images satellites LANDSAT ou SPOT.

Dans le SIG, l'interrogation et l'analyse vont permettre à l'utilisateur de se renseigner sur des objets géographiques divers, comme par exemple les barrages, les bâtiments, les routes, les forêts, ou tout autre objet géographique. C'est en quelque sorte, comme lire une carte papier à travers un logiciel qui permet une interrogation approfondie.

Un système d'information géographique apporte des réponses aux questions suivantes, ([Abdelbaki, 2014], [Rabah and Abdelbaki, 2015]).

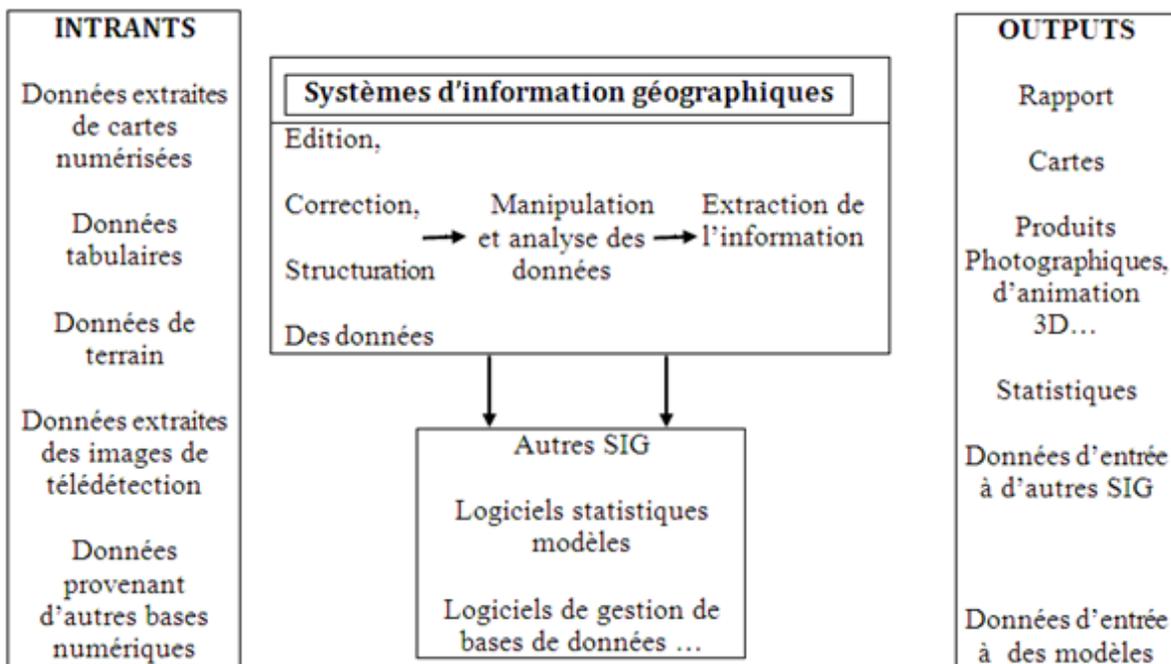
- **Comment ?** : cette question recherche les relations qui existent entre différents objets ou phénomènes. Ex :
  - Comment évolue l'envasement des barrages en Algérie ?
  - Comment évolue la déforestation en Amazonie ?
- **Quoi ?** : c'est la recherche de caractéristiques d'objets par rapport à leur positionnement. Cette question permet de déterminer tous les objets ou phénomènes présents sur un territoire donné. Ex :
  - Quel est l'état des routes sur une commune ?
- **Où ?** : c'est la recherche spatiale d'objets, elle met en évidence leur répartition. Ex :
  - Où implanter des bassins de décantation des sédiments du barrage ?
  - Quelles sont les zones sensibles en cas d'avalanches ou de glissement de terrain ?
- **Quand ?** : pour rechercher d'éventuels changements intervenus sur les données et déterminer les moments de ces changements. C'est la problématique de l'analyse temporelle. Ex :
  - Qu'est-ce qui a changé depuis 1962 dans les barrages algériens ?
- **Et si ?** : elle définit en fonction de certaines hypothèses l'évolution du terrain. C'est la projection dans l'avenir. Ex :
  - Que se passe-t-il si une substance toxique se déverse à tel endroit ?
  - Recherche de sites propices à l'utilisation des vases traitées sur les routes de l'ouest algérien ?

## 1.7 Structure et composantes d'un SIG

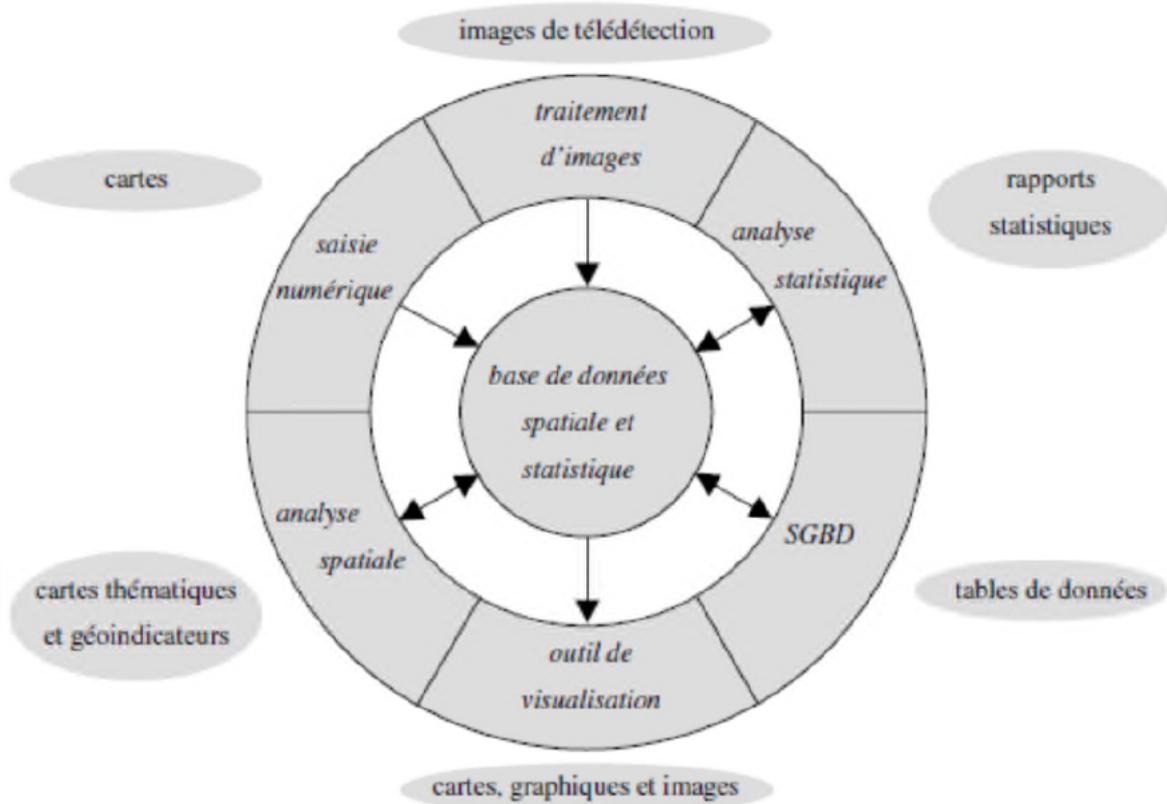
Dans le système d'information géographique, il faut essentiellement prévoir comment les différentes entités seront réparties en couches, par quel type d'éléments graphiques ou cartographiques seront représentées et comment elles seront logiquement reliées entre elles.

La structure générale d'un SIG est illustrée par les schémas représentés sur la figure 1.3. Ces schémas résument les principaux modules de traitements proposés, au cœur du système à la base de données géographiques.

- INTRANTS : possibles à un SIG, qui sont des données géo-référencées et/ou descriptives d'une base de données, provenant du terrain ou d'autres bases de données.
- TRAITEMENTS : nécessaires et possibles dans un SIG, que sont l'édition, la correction et la structuration des données, suivis de l'analyse spatiale ou non, éventuellement agrémentés de traitements connexes dans d'autres SIG, logiciels statistiques, modèles, etc.
- OUTPUTS : se sont des produits d'un SIG, des cartes, produits photographiques, statistiques, animations 3D ou données traitées.



(a) Structure générale d'un SIG, [Krafft and Minne, 2005]



(b) Les composants informatiques d'un SIG, adapté de Eastman (1991) et de Prélaz-Droux (1995) in Repetti (2004) cité par [Abdelbaki, 2014]

FIGURE 1.3 – Structure et composants d'un SIG

### 1.7.1 Structure par couche

Un SIG stocke les informations concernant le monde sous la forme de couches thématiques pouvant être reliées les unes aux autres par leurs coordonnées géographiques. On peut faire une analogie avec le travail « manuel » du cartographe qui superpose ses différents calques (calque des rivières, calque des retenues des barrages, calque des routes et calque des villes...) afin de représenter l'information géographique, figure 1.4.

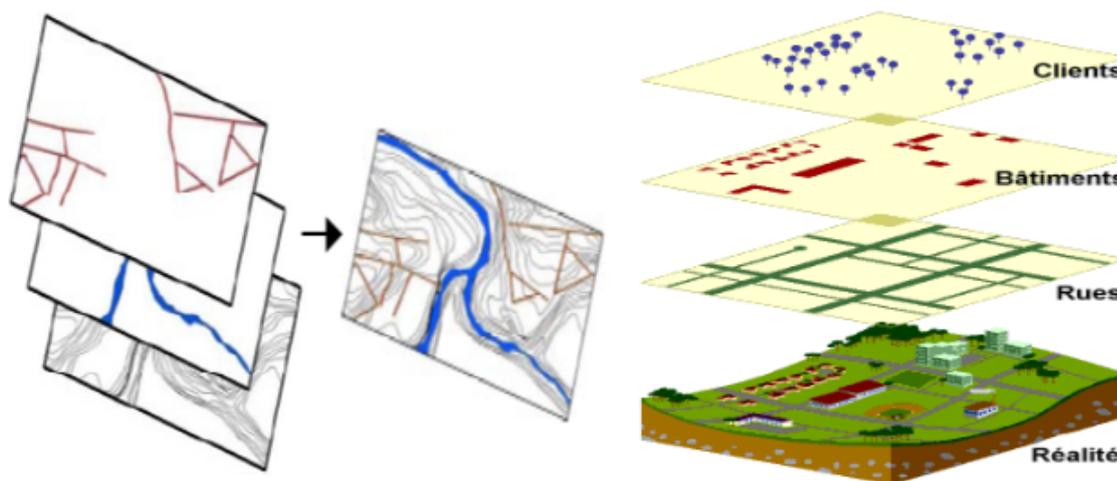


FIGURE 1.4 – La superposition des couches thématiques (voirie, Hydrologie, topographie)

Chaque couche va donc contenir un ensemble unique de données (couche des bâtiments, couche des rues, couche des forêts, couche des bassins versant, couche des barrages, etc.) et c'est en rassemblant ces différentes couches que l'on va obtenir la carte finale comportant toutes les données géographiques voulues comme le montre l'image, (figure 1.4). Cette figure montre une représentation d'un site géographique à travers d'un ensemble de couches thématiques. Chaque couche est une carte montrant la répartition spatiale d'une entité géographique ou d'un phénomène. L'utilisation des couches pour la représentation est une approche simple mais extrêmement puissante. Elle permet de gérer (en décrivant l'organisation de ces différents composants) la complexité du monde réel, ce qui aide à comprendre les relations entre les différents thèmes. L'intégration de données à travers des différentes couches d'information permet d'effectuer une analyse spatiale rigoureuse et complexe. Cette analyse par croisement d'informations, si elle peut s'effectuer visuellement à l'identique de calques superposés les uns aux autres nécessite souvent le croisement avec des informations alphanumériques.

### 1.7.2 Modes de représentation de l'information géographique dans un SIG

Les SIG exploitent différents types de modèles géographiques. Deux modèles sont utilisés pour numériser et stocker les données géographiques dans la base de données, le mode « raster » et le mode « vecteur ». D'autres modes plus rarement exploités existent, comme par exemple le modèle triangulé.

- **Le Mode raster (maillé)** : Le terme « raster » est un mot anglais signifie « trame », en mode raster, la représentation se fait par un quadrillage dont chaque carré (appelé pixel) arbore une couleur différente, ce qui forme une image. Les informations

géographiques de type maillées, ou type « raster » sont des données qui ont été scannées à partir d'une photographie de la carte papier, par photographie aérienne directe ou même par imagerie satellite (télédétection), [Adiba and Collet, 1993], (figure 1.5).

- **Le Mode vecteur** : les données vectorielles sont des objets géométriques du type point ou une série de points reliés entre eux pour former trois types d'objets (un point, une ligne, ou un polygone (surface)), (figure 1.5.), Tableau 1.1 présente les Avantages et inconvénients des modes raster et vecteur.

TABLEAU 1.1 – Avantages et inconvénients des modes raster et vecteur.

Mode raster		Mode vecteur	
Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients
Facile d'emploi	Demande des machines plus puissantes	Plus grande richesse d'informations	Demande une grande connaissance pour l'utilisation
Déjà symbolisé	Ne permet que peu d'analyses	Permet toutes sortes d'analyses	Demande un habillage pour la visualisation
Très gros volume de données	La symbolisation est figée		Volume de données plus léger

Lorsque l'on veut étudier une carte géographique, deux types de données sont à prendre en compte :

- **Les données attributaires** : description qualitative des objets géographiques (entité classique), selon Krafft and Minne [2005] « Les données liées aux caractéristiques des objets, donc les données attributaires sont représentées dans des tables similaires à celles des bases de données. Chaque ligne (ou enregistrement) représente un objet graphique et chaque colonne (ou champ) représente une information ».
- **Les données spatiales** : qui décrivent l'emplacement absolu et relatif des objets géographiques, ainsi que leur étendue. Les données spatiales peuvent être représentées par les trois types d'objets graphiques suivant : le point (sondages, position des barrage, chef lieu de wilaya, opération de dragage, bâtiments, ...), les données linéaires (routes, fleuves, réseaux, ...), les polygones (bassin versant, retenue du barrage, bassin de décantation, ...).

Ces objets sont associés à des éléments réels du milieu décrit : par exemple un point représente une localisation d'un point de prélèvement dans un barrage, une ligne représente une digue et un polygone un découpage administratif tel que les contours d'une ville, du bassin versant et le plan d'eau du barrage.

Les « données géographiques de référence » d'un SIG sont celles qui permettent de localiser les informations, non pas directement par leurs coordonnées géographiques, mais indirectement par une adresse, dont les coordonnées sont déjà connues. Il est ainsi possible de représenter des données statistiques ou des données de gestion sur des cartes et d'analyser leurs répartitions spatiales. Généralement, dans un SIG à usage multiple, les données géographiques de référence ne sont pas spécifiques à une seule application. Elles ont pour vocation d'être partagées entre plusieurs domaines de gestion.

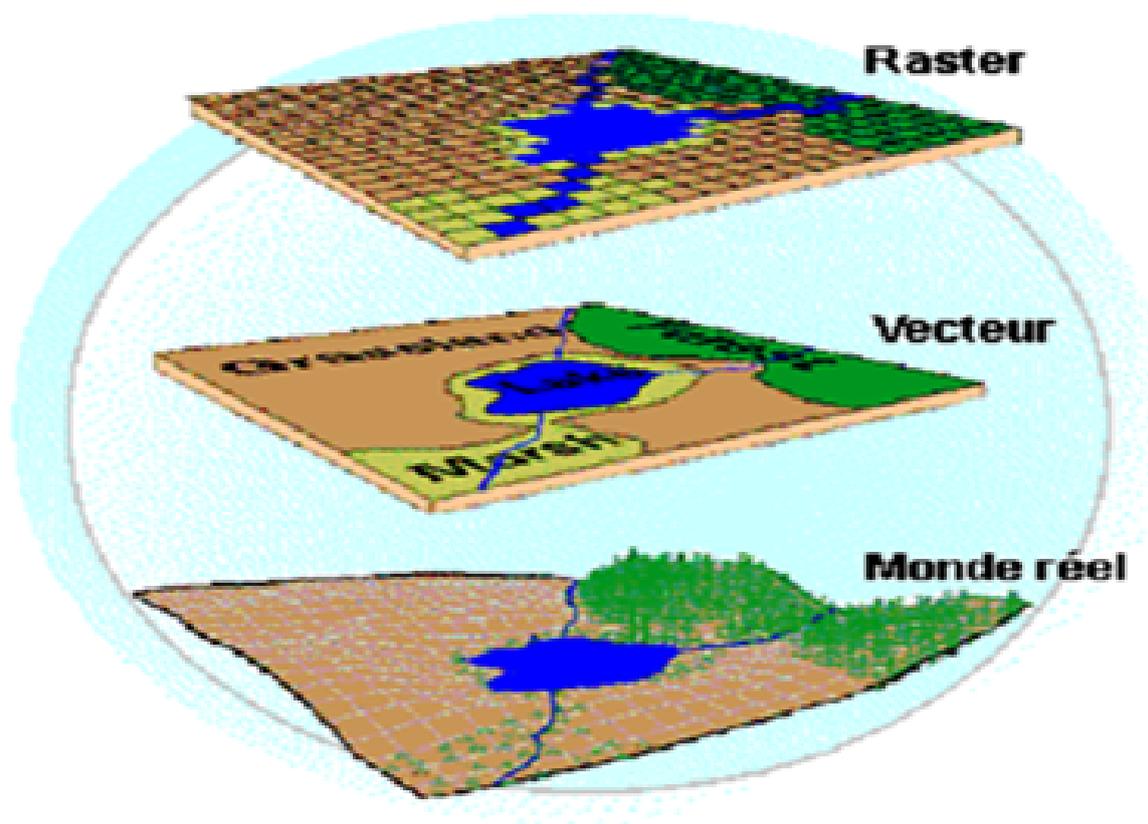


FIGURE 1.5 – Modes «raster» et «vecteur» (Doc ESRI).

## 1.8 Les étapes de la conception d'une base de données sur SIG

Deux phases essentielles sont à considérer comme la mise en place d'un système d'information géographique :

1. Étape de la structuration des données spatiales (géomatiques et attributaires). Cette étape rassemble l'acquisition, la vérification, la documentation et la structuration des données spatiales (Manipulations, la saisie et la digitalisation).
2. Étape de l'utilisation et l'exploitation de ces informations géographiques sont destinés à des fins de cartographie et/ou d'analyse spatiale (La gestion des données, Interrogation et analyses).

La première étape est primordiale et nécessaire pour assurer une bonne qualité de la seconde. Les SIG sont parfois réduits à de simples systèmes informatiques qui permettent de gérer ces Bases. Les premiers SIG ont été utilisés pour créer des cartes, des présentations démographiques ou d'autres présentations géo-indexées. Les SIG sont devenus par la suite beaucoup plus variés et ont réussi à pénétrer des domaines inconnus précédemment [Coppock and Rhind, 1991]. Cette diversité a aussi changé la communauté de leurs utilisateurs. Les utilisateurs de SIG appartenaient à une petite élite d'experts. L'élargissement de champs d'application a créé le besoin de s'adapter à un grand spectre de compétences, s'étendant des utilisateurs débutants aux professionnels. Il est donc devenu crucial que les SIG fournissent des moyens appropriés d'interaction permettant aux utilisateurs d'accéder à l'information dont ils ont besoin.

## 1.9 Les enjeux et domaines d'utilisation d'un SIG

Les domaines d'application des SIG sont aussi nombreux que variés, ses capacités spécifiques font du SIG un outil s'adressant à une très grande variété d'applications. Voici une liste non exhaustive des différents domaines d'application des Systèmes d'Information Géographique :

1. Gestion urbaine : gestion de la voirie des réseaux de distribution, des espaces verts, du patrimoine et de la sécurité.
2. Protection de l'environnement : Définition des zones sensibles, suivi des évolutions comme l'envasement des barrages, alerte aux pollutions, [Koussa, 2011].
3. Aménagement de territoire : l'organisation du territoire, plan d'occupation des sols, choix de tracé routier, autoroutier ou ferroviaires, l'étude d'impact d'une construction.
4. Circulation et conduite automobile : Choix d'itinéraires, suivi de flotte de véhicules, aide à la conduite assistée par ordinateur (le suivi en temps réel des véhicules)
5. Agriculture : génie rural, gestion des ressources en eau, suivi et prévision des récoltes, gestion des forêts.
6. Aéronautique, bâtiment et travaux publics, cadastre, démographie, électricité, géologie, Internet, immobilier, ressources naturelles, santé, tourisme, etc.

Ces domaines sont directement concernés par la puissance des SIG pour créer des cartes, pour intégrer tout type d'information, pour mieux visualiser des scénarios, mieux présenter les idées et mieux appréhender l'étendue des solutions possibles. La création des cartes et l'analyse géographique ne sont pas des procédés nouveaux, mais les SIG procurent une plus grande vitesse d'exécution et proposent des outils sans cesse innovants dans l'analyse, la compréhension et la résolution des problèmes, plus particulièrement, dans notre travail. Les SIG interviennent dans, l'aménagement des territoires, dans la planification territoriale, des activités du barrage, c'est-à-dire leur organisation spatiale (géologie, pédologie, l'envasement, zones protégées etc.).

## 1.10 Recherche antérieure sur l'utilisation du SIG

Nous citons ci-dessous quelques travaux de chercheurs algériens concernant l'utilisation du SIG dans différents domaines (mouvement de pente, risque inondation, vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines et la gestion des ressources en eau en milieu urbain, etc.).

- Zerhouni [1991a] a fait une étude statique, à partir d'une cartographie intégrant des données physiques et socio-économiques, des zones à risques de contamination fécale du réseau d'A.E.P. Elle constitue un moyen préventif de certaines maladies hydriques, notamment celles liées à la pollution fécale des eaux de consommation. L'auteur a identifié, dans un premier temps, des zones potentielles à risques de contamination fécale du réseau d'approvisionnement en eau potable, en associant cartographiquement les facteurs de l'environnement physique et les structures socio-économiques de la cité révélées par la typologie de l'habitat. Ensuite, elle a réalisé une enquête "socio-économique" au niveau des zones définies par la cartographie intégrée.
- Allal et al. [2005], Benzenine [2005], Lassouani [2007], Boubekeur [2003] ont établi des cartes : cartographié de l'aléa sismique et ceux du micro-zonage de l'aléa des mouvements de pente de la commune de Bensekrane, afin de connaître le risque

- potentiel dans le cas d'un éventuel séisme. Ces cartes sont indispensables pour l'urbanisme et l'aménagement du territoire. La carte d'aléa naturel a un caractère prévisionnel.
- **Bachi [2011]** a fait appel à l'outil SIG pour la mise en œuvre d'une approche systématique pour résoudre le risque inondation en milieu urbain, cas de l'agglomération de Sidi Bel abbés. Dans ce travail, il a exposé la cartographie de l'aléa de l'inondation par l'approche de la modélisation hydraulique à travers l'exemple de oued Mekerra qui scinde la ville de Sidi Bel abbés, afin de définir les règles générales concourant à une meilleure gestion de l'espace urbain tout en constituant un moyen d'information de la population sur les risques d'inondations.
  - **Zeguid [2013]** a étudié la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines karstiques, en particulier le cas du bassin versant du Meffrouche. Dans ce travail, la cartographie a été sélectionnée pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau souterraine dans un bassin versant, avec différents degrés de karstification.
  - **Rouba and Taibi [2014]** ont étudié la cartographie des terrains du miocène supérieur de la marge nord du bassin de la Tafna région de Beni Saf. Ce travail de cartographie entrepris dans la région de Sidi Safi concernant les terrains du miocène supérieur (continentaux et marins), a permis de réaliser une cartographie lithologique d'un secteur d'une superficie de  $9 \text{ km}^2$ .
  - **Aziz [2014]** dans ses travaux, a établi une cartographie des faciès hydrochimiques (Carte d'iso-teneurs des eaux) de la nappe alluviale du fossé de Sebdu (wilaya de Tlemcen). Cette région comporte un aquifère alluvial d'âge Plio-quaternaire. L'analyse des cartes en iso-valeurs a montré que les fortes concentrations sont rencontrées au Sud-Est de l'aquifère et elles diminuent de plus en plus en se dirigeant vers l'exutoire.
  - **Douaimi and Benyoub [2015]** ont utilisé les SIG pour cartographier et mettre en valeur des calcaires récifaux de la région de Sebaa Chioukh - wilaya de Tlemcen. Dans le but de valoriser ces calcaires récifaux, une étude cartographique, qualitative et d'estimation des réserves a été entreprise sur un site choisi pour son accessibilité dans le Djebel Tidda. L'étude lithologique et stratigraphique a révélé une forme en lentille caractéristique des dépôts récifaux. L'introduction des différentes données de terrain pour l'utilisation de l'outil informatique (Surfer) a permis de créer un modèle numérique 3D et de calculer les réserves géologiques du périmètre exploré. L'étude qualitative préliminaire a consisté en une mesure du taux de calcium contenu dans la roche et de sa densité. Cet état de l'art, nous a permis de bénéficier des informations disponibles dans notre domaine de recherche afin de créer et développer un outil SIG pour assurer une performance et pertinence de notre système par SQL.
  - **Bouchetata and Tarik [2006]** ont présenté la démarche méthodologique appropriée pour l'utilisation d'un système d'informations géographiques (SIG) sur l'aménagement d'oued Fergoug. Les données recueillies permettent d'élaborer une série de cartes thématiques devant aboutir à l'élaboration de la carte des zones fortement ravinées avec priorité d'intervention pour entreprendre les aménagements antiérosifs adéquats à travers un programme d'action tenant compte de la diversité des situations. La localisation des zones ravinées et la précision des caractéristiques climatiques et hydriques de la zone d'étude constituent une étape préliminaire à tout aménagement de lutte antiérosive appropriée.

- **Labani [2014]** a élaboré à l'aide d'un Système d'Information Géographique(SIG) des cartes d'érosion hydriques des sols du sous bassin versant de l'oued de saida. Les sédiments contribuent à l'envasement du barrage d'Ouizert. Cette étude a permis de hiérarchiser les différentes zones du sous bassin versant, en produisant une carte synthétique de répartition des degrés de sensibilité à l'érosion. Cette ébauche cartographique est un outil devant aider les décideurs pour une meilleure gestion des ressources en eau et en sol et tenant compte des attentes et des besoins de la population rurale.
- **Souidi et al. [2014]** ont fait appel aux outils spatiaux, tels que la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG), pour suivre la progression de l'érosion hydrique qui présente la forme de dégradation physique des sols la plus importante. Ces outils permettent d'élaborer des cartes précises sur la progression de la dégradation à partir des indicateurs écologiques qui mettent en évidence les transformations du milieu. L'objectif de cette étude est de développer une méthodologie pour la cartographie du risque de dégradation par utilisation combinée de l'information acquise par les capteurs satellitaires et des variables dérivées du modèle numérique de terrain (MNT). Sur la base de la connaissance des états de surface et de leur comportement vis-à-vis des ruissellements et de l'érosion par expérimentation, la cartographie des risques érosifs est possible à grande échelle (parcelle, petit bassin versant élémentaire) mais aussi sur des surfaces qui peuvent atteindre plusieurs milliers de  $km^2$  grâce à des modèles spatiaux.

Dans notre travail, nous cherchons à apporter une contribution à la gestion de données géographiques des sédiments de dragages de l'ouest algérien.

## 1.11 Conclusion

Dans ce chapitre, un état de l'art sur la définition et l'utilisation du SIG dans différents domaines a été présenté afin de comprendre les limites de ces systèmes et leur adaptation à notre domaine de recherche. Les produits principaux fournis par un SIG sont les cartes : la représentation spatiale d'objets graphiques et les différentes informations peuvent être représentées en cartes, ou un ou plusieurs thèmes (couches) peuvent être combinés. Le choix de la représentation cartographique peut suivre certaines règles, non seulement sur l'habillage (le *lay-out*) des cartes, mais aussi au départ, sur le type de carte à produire selon les données et les besoins. Les SIG permettent de représenter les données recueillies sous différentes formes, sans pour autant constituer un traitement :

- Des cartes thématiques avec des variables cartographiques : la couleur, la forme, la taille, l'orientation et la valeur. Plusieurs possibilités de cartes thématiques sont proposées dans les logiciels de SIG.
- Différentes méthodes de classification des données quantitatives : classes à amplitudes égales, à fréquences égales, classification selon la méthode des bris naturels (minimise les variances à l'intérieur des classes, afin que les données dans chacune des classes soient proches les unes des autres etc.).
- Superposition ou non de plusieurs couches d'informations dans une même carte, afin d'associer des données choisies (bassin versant, les retenues des barrages, les opérations de dragage, type de sédiment, etc.).

# Chapitre 2

## Création d'un SIG pour les sédiments de dragage des barrages de l'ouest Algérien

### Sommaire

---

2.1	Introduction . . . . .	22
2.2	Envasement des barrages . . . . .	22
2.2.1	Causes, ampleur et conséquences . . . . .	22
2.2.2	Dragage et devenir des gisements . . . . .	23
2.2.3	Statistiques . . . . .	23
2.3	Délimitation de la zone étude . . . . .	24
2.3.1	Situation géographique . . . . .	24
2.4	Traitement des informations et modélisation conceptuelle des données . . . . .	27
2.4.1	Structure de données géographiques et sémantiques . . . . .	28
2.4.2	Présentation de la méthode de MERISE . . . . .	28
2.4.3	Modèle conceptuel de données MCD . . . . .	30
2.4.4	Modèle logique de données MLD . . . . .	33
2.5	Conception de SIG des sédiments de dragages . . . . .	35
2.5.1	Choix d'un SIG . . . . .	35
2.5.2	Création de la base de données . . . . .	35
2.5.3	Calage des barrages (image Raster) dans MapInfo . . . . .	35
2.5.4	Analyse et numérisation de données . . . . .	36
2.6	Requêtes et analyses thématiques . . . . .	39
2.6.1	La requête sélection SQL ( <i>Structured Query Language</i> ) . . . . .	43
2.6.2	Analyse thématique . . . . .	52
2.6.3	Choix de valorisation des sédiments . . . . .	52
2.7	Conclusion . . . . .	54
2.8	Quelques conclusions concernant toute la première partie du SIG . . . . .	54

---

## 2.1 Introduction

Le problème de l'envasement des barrages s'est toujours posé de façon aiguë. Le présent chapitre commence par donner un aperçu traitant le phénomène d'envasement des barrages, ses causes, ses conséquences ainsi que les techniques modernes de lutte contre ce phénomène. La gestion et valorisation de sédiments de dragage des barrages dans la région du nord-ouest algérien nécessitent une étude prévisionnelle des dépôts des sédiments (gisements), pour créer une base de données. Elle permettra la réalisation et l'actualisation de produits cartographiques et thématiques, qui aideraient à la prospection et à la prise de décision. Dans les projets de valorisation et réutilisation des sédiments de dragage, la reconnaissance et l'interprétation des données de sédiments jouent un rôle déterminant, fondé sur l'exploitation des bases de données dans le domaine du BTP.

La présente étude concerne les bassins versants de l'ouest Algérien. La connaissance du site à travers sa localisation, la taille du bassin versant, la nature géologique des formations soumises à l'érosion, son historique mettant en évidence son importance économique, se sont des éléments qui peuvent caractériser les sédiments à valoriser, en matière d'ordre de grandeur des volumes à traiter et des moyens à mettre en œuvre dans le cadre global de la valorisation de la vase.

Nous avons effectué une collecte de données des levés bathymétriques auprès de l'agence nationale des barrages et transfert (ANBT) et les données récoltées de plus d'une vingtaine de barrages Algériens répartis sur l'ensemble de la région du nord par [Hal-louche and Remini \[2005\]](#). Ces mesures ont été effectuées séparément dans le temps (de la période : 1950-2004) à l'aide d'un matériel simple composé essentiellement d'un échosondeur à ultrason, une barque équipée d'un moteur hors bord et un théodolite. Les anciens levés ont été réalisés à l'aide d'un équipement manuel avec une règle graduée (pour la mesure du toit de vase), une barque et une corde pour fixer les sections transversales. La prévision de l'envasement de cette région est une étape indispensable pour tout projet de faisabilité d'un barrage et la réutilisation de son sédiment.

## 2.2 Envasement des barrages

Le problème d'envasement causé essentiellement par un fort taux d'érosion des bassins versants dont les particules solides sont entraînées directement par des cours d'eaux, et se déposent au fond de la retenue. Les conséquences de cette forte sédimentation sont extrêmement gênantes dans la mesure où elles entraînent une diminution du volume de réservoir des retenues.

### 2.2.1 Causes, ampleur et conséquences

En Algérie, le taux d'érosion spécifique atteint les valeurs les plus élevées de l'Afrique du nord. Les éléments de quantification concernant les taux et les concentrations d'érosion spécifique, issus des travaux de Demmak, Heusch (1982) cité par [Remini \[2011\]](#) donnent des chiffres allant de 2000 à 5000 t/km<sup>2</sup>/an sur la plupart des bassins versants de l'Atlas tellien et notamment dans le bassin versant de l'oued Agrioum. Les sédiments arrachés annuellement au niveau des bassins versants du nord algérien sont de l'ordre de 120 millions de tonnes avec un taux d'envasement des barrages de l'ordre de 32 millions de m<sup>3</sup>/an. Au Maroc, le taux d'érosion dépasse 2000t/km<sup>2</sup>/an, dans les bassins versants du Martil, de l'Ouergha, de Lakhdar et de la Tessaout, [[Badraoui, 2001](#)], avec des quanti-

tés considérables de sédiments environ 65 millions  $m^3$ /an se déposent annuellement au fond des barrages.

En Tunisie, la majorité des bassins versants est caractérisés par de fortes dégradations spécifiques dépassant  $2000 t/km^2$ /an avec 1,2 millions d'hectares des terres cultivables sont gravement affectés par l'érosion dans le nord et le centre, soit 25% de la superficie totale des terres. Un taux d'envasement de ses barrages de 30 millions de  $m^3$ /an, ([Bouزيد, 1991], [Remini and Remini, 2003]).

Ce phénomène entraîne l'envasement rapide de nombreuses retenues d'eau en diminuant leur capacité utile. Par ailleurs, le rejet de la vase dans les cours d'eau pose d'énormes problèmes écologiques et environnementaux.

### 2.2.2 Dragage et devenir des gisements

Le dragage est une opération ayant pour objet le prélèvement de matériaux, notamment boues, limons, sables et graviers au fond d'un cours d'eau ou d'un plan d'eau à l'aide de moyens mécanique, hydraulique ou pneumatique dans un but d'aménagement ou d'entretien, c'est-à-dire tous travaux nécessaires pour rétablir un cours d'eau dans sa largeur et sa profondeur naturelle. Cela exclut un approfondissement ou un élargissement du lit, [Remini et al., 1997].

Par définition l'opération de dragage est l'ensemble des actions caractérisées par un prélèvement de matière par excavation sous l'eau avec des engins flottants au moyen de procédé mécanique ou par aspiration et par un déversement de ces produits dans la veine de l'eau côté aval de la retenue ou sur le rivage, ([CCN-Québec, 2004], [Remin and Hal-louche, 2004]).

L'opération de dragage peut se décomposer en plusieurs étapes :

- Études préalables et caractérisation des sédiments,
- choix de la filière de destination,
- Extraction des boues,
- Transport des matériaux de dragage, et traitement.

Les facteurs qui poussent à envisager le dragage sont liés soit à des considérations hydrauliques, soit à l'entretien et à la restauration du milieu. Le dragage peut avoir les objectifs suivants :

1. Procéder à des travaux d'excavation sous l'eau dans les retenues des barrages «la récupération de la capacité de stockage».
2. Extraire les sédiments immergés tel que sable, gravier, argile, les métaux précieux et les agents fertilisants.
3. La navigation gênée ou rendue impossible par l'envasement : Entretien et approfondir les voies navigables.
4. Nettoyer des fonds pollués.
5. Améliorer ou maintenir la capacité de débit des cours d'eau en augmentant les profondeurs naturelles, [Scordia, 2008].

### 2.2.3 Statistiques

Pour tout projet de valorisation de sédiments de dragage, il est indispensable de quantifier ces dépôts de sédiments et d'étudier la prévision de l'envasement des barrages du nord algérien.

Les travaux Orth F en 1934 cité par Hallouche and Remini [2005] qui ont été effectués sur la prévision de l'envasement. Il a montré une loi à décroissance exceptionnelle pour

la prévision du volume des dépôts sédimentaires dans une retenue, (la capacité résiduelle des sédiments en fonction de temps), cette loi est largement utilisée en Algérie.

Hallouche and Remini [2005] ont proposé une relation pratique de prévision d'envasement propre à la région du Maghreb, en se basant sur les données récoltées de plus d'une centaine de levés bathymétriques de barrages de Maghreb dans la période : (1950-2000), (figure 2.1).

$$Ev = 0,014.Q^{0,85} \quad (2.1)$$

$$Ev = 0,0063.S^{0,66} \quad (2.2)$$

Ev : Apport solide annuel (  $Mm^3/an$  ).

Q : Apport liquide (  $Mm^3/an$  ) et S : la superficie du bassin versant (  $Km^2$  ).

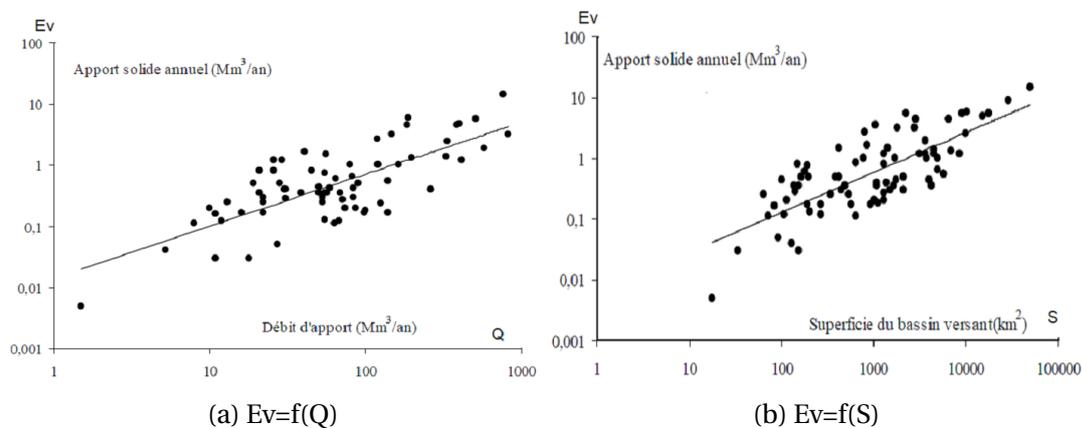


FIGURE 2.1 – Évolution de l'envasement dans les barrages maghrébins, [Hallouche and Remini, 2005].

Saïdi [1991] a proposé aussi une formule de prévision de l'envasement pour chaque barrage algérien, basé sur 18 levés bathymétriques des barrages algériens.

Dans ce travail nous essayons de récolter l'ensembles des données de taux d'envasement, la quantité draguée, essais qui ont été effectués sur ces sédiments et le choix de valorisation de chaque barrage du nord ouest algérien, tableau 5.1.

## 2.3 Délimitation de la zone étude

### 2.3.1 Situation géographique

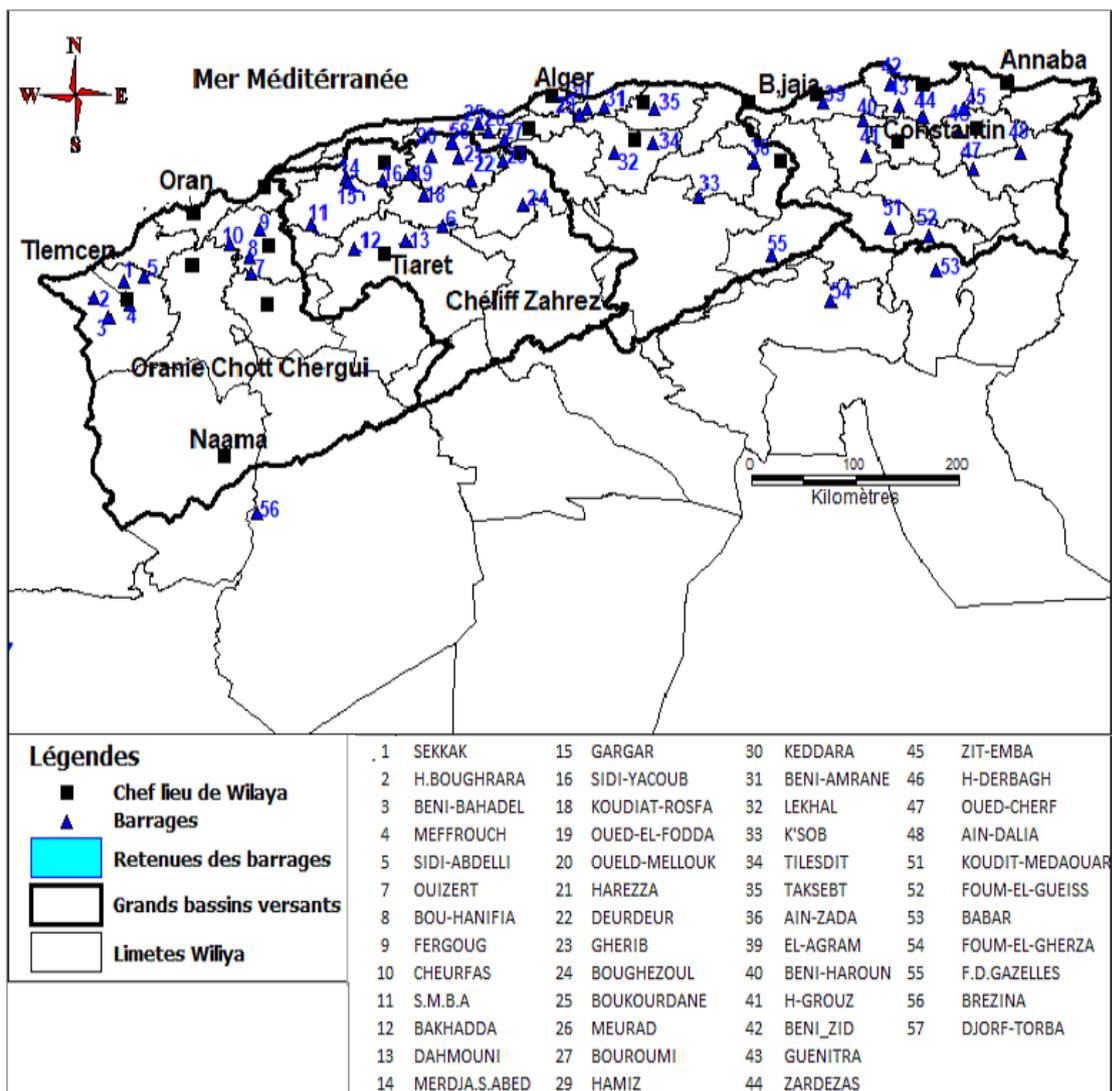
Les bassins versants de l'ouest Algérien, situés au nord du territoire algérien, (figure 2.2a), s'étendent sur le Maroc au nord ouest, au sud le bassin versant du Sahara (Saoura) et au nord Est la limite du bassin versant algérois Soumam El Hodna. Ils sont limités au nord par la mer méditerranée. Selon la nouvelle structuration des unités hydrologiques en Algérie, les bassins versants de l'ouest peuvent être divisés en deux grandes parties (l'Oranie Chott Chergui, Cheliff Zahrez), (figure 2.2b).

Le bassin versant de l'ouest algérien a été choisi comme zone d'investigation, pour déterminer les zones envasées et leurs type de sédiments. La délimitation des bassins versant et leurs sous bassins versants de chaque barrage à pour but d'identifié spatialement la position des barrages, savoir l'origine et la nature des sédiments.

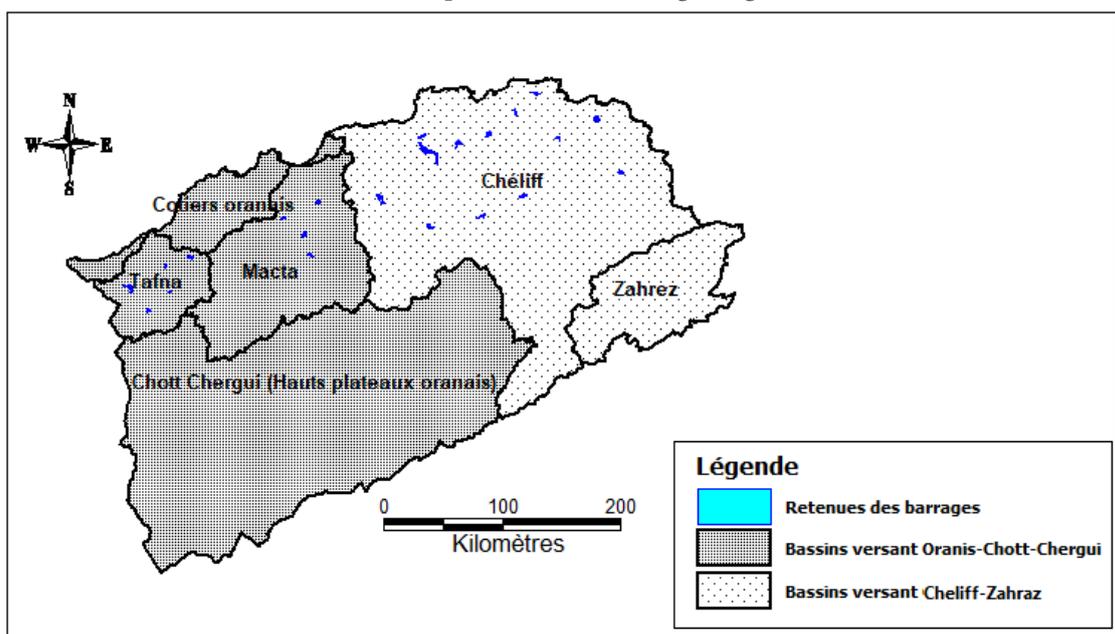
Ces bassins versants sont immenses et complexes, le choix de la zone d'étude s'est fait en fonction du taux d'envasement très élevé. Le secteur hydrique en Algérie ANBT

TABLEAU 2.1 – Taux d'envasement des barrages de l'ouest algérien (Levés bathymétrique 2004-2005 ANBT)

Barrages	Année de mise en eau	Capacité initiale $10^6 m^3$	capacité (dernier levé) $10^6 m^3$	Taux d'envasement(%)
Bakhadda	1936	56	39.94	28.68
Beni-bahadel	1946	63	54.63	13.29
Bou-hanifia	1940	73	38.11	47.79
Brézina	2000	122,5	108,5	11,45
Cheurfas II	1992	82	70.21	14.38
C.Bougara	1989	13	11,32	/
Dahmouni	1987	41	39,52	3,46
Djorf-Torba	1969	350	260,25	25,64
Fergoug	1970	18	0.4	97.78
H.Bouhrara	1999	177	175.5	9.7
Gargar	1988	450	358.28	20.38
Kerrada	/	69.5	/	/
Koudiat Rosfa	2004	73	66,04	9,53
Kramis	2005	45,4	41,368	8,84
Meffrouch	1963	15	14.99	0.07
Merdja.S.abed	1984	54.4	47.97	11.82
Oued El Fodda	1932	228	102.85	54.89
Oueld-Melloul	2004	127	119.04	6.27
Ouizert	1986	100	93.91	6.09
Prise chellif	/	50	/	/
Sarno	1954	22	21,25	3,41
Sekkak	2004	27	/	/
Sidi-abdelli	1988	110	106.61	3.08
Sidi-yacoub	1985	280	252.85	9.7
S.M.B.A	1977	235	153.71	34.59



(a) Carte des positions des barrages algériens.



(b) Bassins versants

FIGURE 2.2 – Carte de la zone d'étude (les retenues des barrages et les bassins versants )

compte aujourd'hui 64 barrages en exploitation répartis sur le territoire national. Cette répartition indiquent clairement que les barrages de l'ouest avec un taux d'envasement de (16%) et ceux de cheliff zahrez avec un taux d'envasement de (27%) sont des barrages les plus menacés par le phénomène d'envasement.

Nous avons recensé le taux d'envasement, les opérations de dragage, les points de sondage des essais de reconnaissance et valorisation pour créer une base de données. Le but recherché est de réunir toutes les informations, en nombre et en qualité utiles au suivi du comportement du sédiment, tout en assurant une décision rapide de choix de valorisation de ces sédiments.

## 2.4 Traitement des informations et modélisation conceptuelle des données

Dans le système de gestion de la base donnée (SGBD), on présente trois niveaux d'abstraction, (figure 2.3), [Ameur, 2003] :

1. Niveau physique (interne) : il a pour but de spécifier comment les données sont stockées sur les supports physiques.

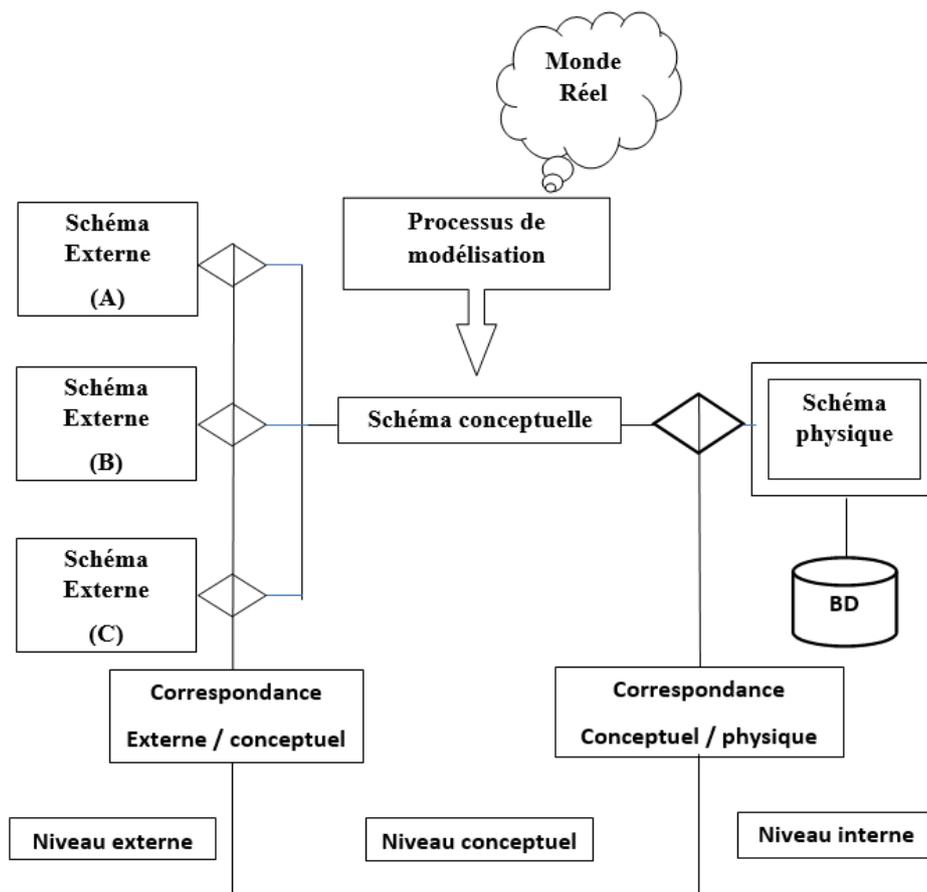


FIGURE 2.3 – Les différents niveaux de représentation d'une base de données, [Ameur, 2003].

2. Niveau conceptuel : il définit l'arrangement des informations au sein de la base de données appelé MCD (Modèle de conceptuel de données) ou MLD (Modèle de logique de données). Le passage de monde réel au schéma conceptuelle correspond à

un processus de modélisation où les objets du monde réel sont classifiés et nommés.

3. Niveau externe : il peut être considéré comme un sous schéma du schéma conceptuel qui correspond à la vision de tout ou partie du schéma conceptuel par un groupe d'utilisateurs concernés par des programmes d'application.

Nous pouvons définir la modélisation comme "opération par laquelle on établit le modèle d'un système complexe, afin d'étudier plus commodément et de mesurer les effets sur ce système des variations de tel ou tel de ses éléments composants", [Giraud et al., 1974] cité par Koussa [2011].

### 2.4.1 Structure de données géographiques et sémantiques

La figure 2.4 présente le schéma de l'organisation structurelle du système de sédiments de dragage des barrages de l'ouest algérien. Une description structurelle du système consiste à identifier et représenter clairement les éléments du système. C'est une étape essentielle dans la conception des bases de données. Cette structure permet de comprendre le détail du fonctionnement de la base de données, d'identifier les composantes et les relations les plus pertinentes à représenter par rapport à une finalité donnée.

La création d'un système d'information géographique de sédiments de dragage est basée sur l'organisation structurelle qui donne une idée sur les composantes du système. Ces composantes se représentent à travers les relations fonctionnelles. Pour établir et mettre en œuvre ce système, nous avons recours aux modèles conceptuels. La méthode de MERISE occupe une place prépondérante dans ces modèles. MERISE est une méthode de conception, de développement et de réalisation du système d'information et de projet d'informatiques.

### 2.4.2 Présentation de la méthode de MERISE

La méthode MERISE est basée sur la séparation de données et des traitements à effectuées en plusieurs modèles conceptuels et physique. Le but de cette méthode est d'arriver de concevoir un système d'information se développe dans les règles de l'art et par des niveaux (conceptuel, organisationnel et opérationnel), c-à-d la formalisation du futur système sous ses différents aspects, (tableau 2.2), [Mojeron, 1991], [Abdelbaki, 2014]).

TABLEAU 2.2 – Démarche MERISE [Mojeron, 1991] cité par Abdelbaki [2014]

Niveau	Traitement	Données	Choix
Conceptuel	Modèle conceptuel	Modèle conceptuel	De gestion
Organisationnel	Modèle organisationnel	Modèle logique	D'organisation
Opérationnel	Modèle opérationnel	Modèle physique	Technique

La méthode MERISE utilise le modèle entité- association comme un outil conceptuel de la structuration des données, [Mojeron, 1991], [Ameur, 2003], [Abdelbaki, 2014].

Le modèle entité-association (E/A) est une technique d'analyse permettant de construire des schémas théoriques de raisonnement sur des applications tournant avec les bases de données rationnelles. Ce modèle a été rendu célèbre dans le monde entier par l'américain Peter CHEN, à la suite d'une publication intitulée " *The entity-relationship Model*" (ACM, Transaction on database systems, 1979), ([Tardieu et al., 1986], [Ameur, 2003]).

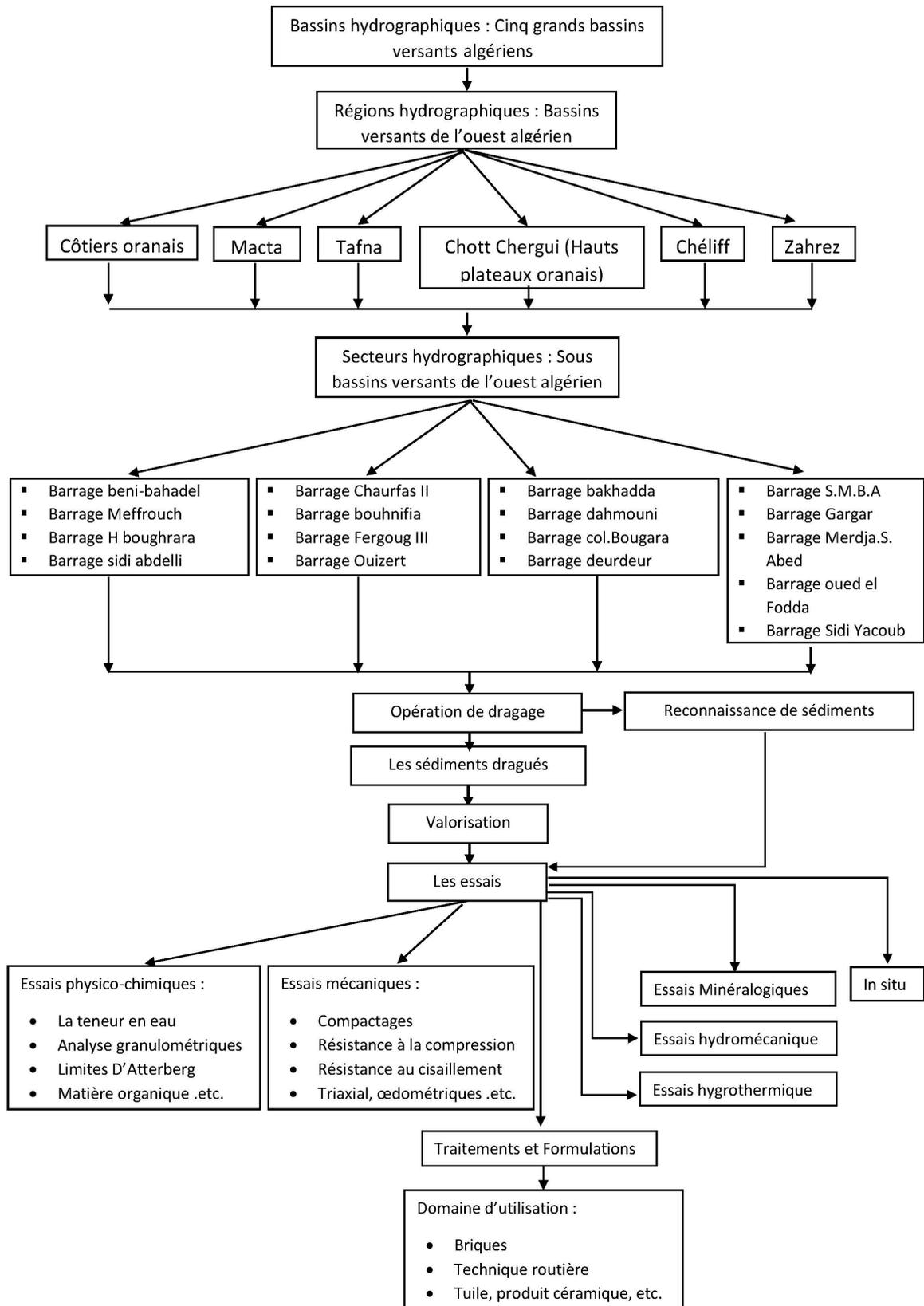


FIGURE 2.4 – Organisation structurelle du système étudié

### 2.4.3 Modèle conceptuel de données MCD

C'est la partie fondamentale dans l'architecture d'un système de gestion de base de donnée (SGBD). Le modèle Entité/Association est constitué des éléments de base suivants, (figure 2.5) :

- Entités : Il est difficile de donner une définition très précise des entités. Les entités sont des objets et regroupements d'informations possèdent des attributs (caractéristiques). D'après **Mojeron [1991]**, les objets dans le monde réel sont des objets simples et complexes qui peuvent groupés en catégories appelées classes d'entités.
- Associations : sont des liens logiques entre les entités, qui sont quantifiées par des cardinalités.
- Cardinalité : c'est la connectivité qui permet de dénombrer les éléments de l'entité d'arrivée en relation avec un élément de l'entité de départ et vice versa. Le rôle d'une association est défini par deux nombres (min :correspond à la réponse à la question : combien de fois au moins une entité de A est reliée à une entité de B. Max : correspond à la réponse à la question : combien de fois au plus une entité de A est relié à un entité de B), (1-1, 1-1) (un-un) ou (1-n,1-1), (1-1, 1-n) (un - plusieurs), (1-n, 1-n) (plusieurs – plusieurs), [**Abdelbaki, 2014**].
- Propriétés : sont les caractéristiques élémentaires décrivant les entités et doivent être représentées comme une liste de mots (Attributs).

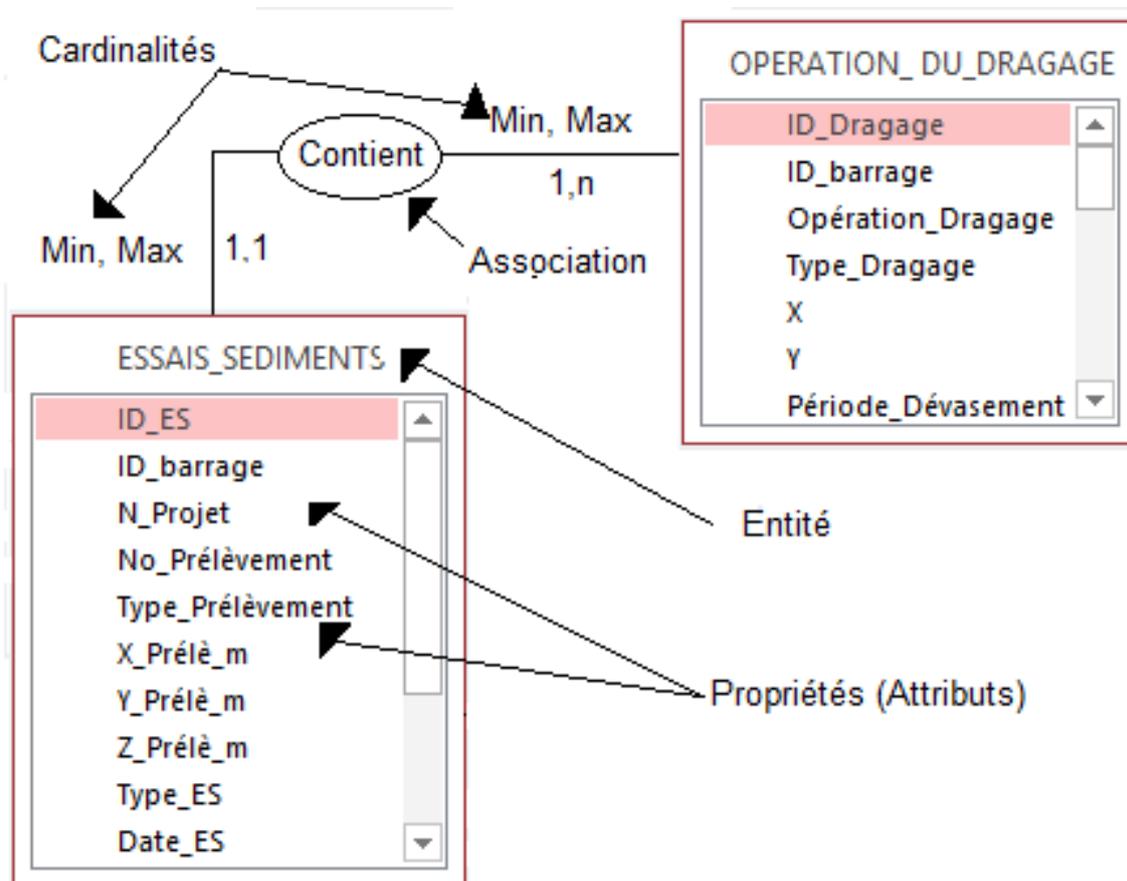


FIGURE 2.5 – La modélisation entité association E/A

### 2.4.3.1 Schéma conceptuel de données

Aujourd'hui, la plupart des systèmes de gestion de base de données sont de type rationnel qui s'appuie sur trois concepts de base : le domaine, la relation et l'attribut. La correspondance modèle E/A vers modèle relationnel est la suivante : Identifiants ID vers clé primaire, Entité vers table et propriétés vers attributs.

La représentation logique des données constitué le passage de la description conceptuelle à l'implantation physique. La figure 2.6 présente le schéma conceptuel de base de données de notre travail.

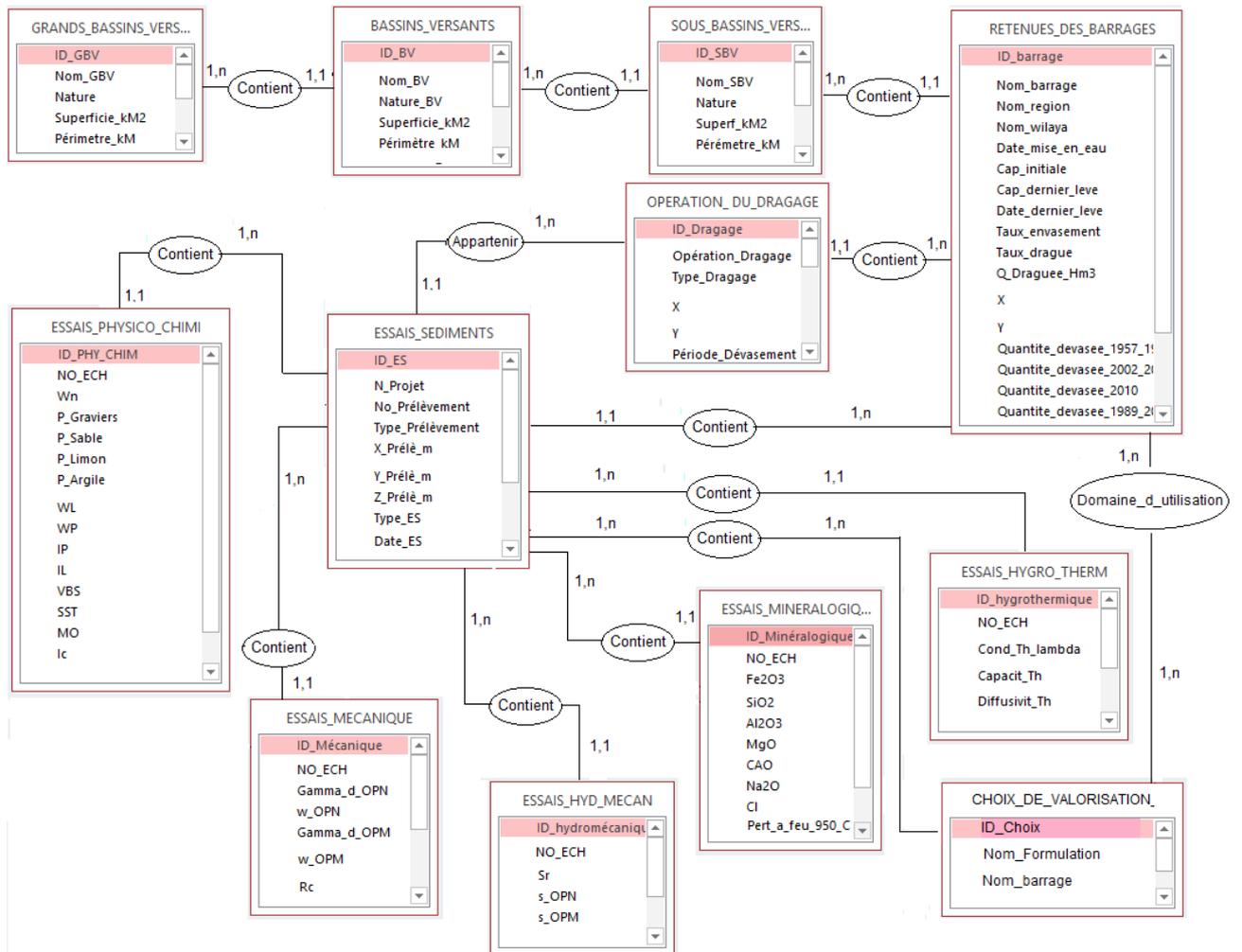


FIGURE 2.6 – Schéma conceptuel de sédiments dragués des barrages de l'ouest algérien

### 2.4.3.2 Dictionnaire de données

Le dictionnaire des données est le support du travail, les résultats de la recherche et analyse des données. Il est utile, voir indispensable, d'effectuer un inventaire brut des données qui seront stockées et/ou calculées par la base de données, les données collectées et acquises dans la première phase, (Tableau 2.3). Les remarques relatives à l'indexation (I), à la saisie(S), à la modification (M), à l'unicité (U), et à l'unité utilisées des propriétés.

TABLEAU 2.3 – Dictionnaire de données de notre travail

Mnémonique	Définition sémantique	Type de données	Remarques
ID	Le numéro automatique incrémenté	Entier long incrémenté	(I) (ID)
Code_Bar- rage	le code d'identification du barrage	Numérique (en- tier long)	(S)(M)(I)
N_Projet	Le numéro d'identification du projet géotechnique	Numérique (en- tier long)	(S)(M)(I)
N_Prélève- ment	Le numéro de prélèvement sur site	Numérique (en- tier long)	(S)(M)(I)(U)
Type_Prélè- vement	Type de prélèvement manuel ou mécanique (carottage)	Char(20)	Liste de choix
X_Prélève- ment	Coordonnées plane X d'un Prélèvement	Réel simple	(S)(M)(I)
Y_Prélève- ment	Coordonnées plane Y d'un Prélèvement	Réel simple	(S)(M)(I)
PROF_Pré- lèvement	La profondeur à laquelle Prélèvement a été effectué	Réel Simple	(S)(M)(I)
Date_Prélè- vement	La date du Prélèvement	Date	(S)(M)(I)
N_ES	Le numéro d'identification l'essai	Numérique (en- tier long)	(S)(M)(I)(U)
NO_ECH	Le numéro d'identification de l'échantillon	Numérique (en- tier long)	(S)(M)(I)(ID)
NB_ES	Le nombre d'essai dans un projet	Numérique (en- tier long)	(S)(M)(I)
Date_ES	La date de l'essai	Date	(S)(M)(I)
TypeES	Le type d'essai Char(8)	Liste de choix	(I)
$\gamma_h$	Le poids spécifique humide	Réel simple	(S)(M)(I)
$\gamma_d$	Le poids spécifique sec	Réel simple	(S)(M)(I)
$\gamma_s$	Le poids spécifique des grains	Réel simple	(S)(M)(I)
Wn	La teneur en eau naturelle	Réel simple	(S)(M)(I)
P_cailloux	Le pourcentage des cailloux	Réel simple	(S)(M)(I)
P_gravier	Le pourcentage de gravier	Réel simple	(S)(M)(I)
P_sable_- Gros	Le pourcentage de sable gros	Réel simple	(S)(M)(I)
P_sable_fin	Le pourcentage de sable fin	Réel simple	(S)(M)(I)

P_Limon	Le pourcentage de limon	Réel simple	(S)(M)(I)
P_argile	Le pourcentage d'argile	Réel simple	(S)(M)(I)
Sr	Le degré de saturation de l'échantillon	Réel simple	(S)(M)(I)
WL	La limite de liquidité	Réel simple	(S)(M)(I)
WP	La limite de plasticité	Réel simple	(S)(M)(I)
IP	L'indice de plasticité	Réel simple	(S)(M)(I)
Cs	Le Coefficient de gonflement	Réel simple	(S)(M)(I)
Cc	Le coefficient de compressibilité	Réel simple	(S)(M)(I)
Rc	La résistance à la compression simple	Réel simple	(S)(M)(I)
E	Le module d'élasticité	Réel simple	(S)(M)(I)
K	Le coefficient de perméabilité	Réel simple	(S)(M)(I)
$\varphi$	L'angle de frottement interne de l'échantillon ( $\varphi$ )	Réel simple	(S)(M)(I)
C	la cohésion	Réel simple	(S)(M)(I)
TYPE	Le type d'essai effectué pour la détermination des paramètres(C et $\varphi$ )	Char(13) Liste aux choix	(S)(M)(I)
pH	Le pourcentage de PH dans le sol	Réel simple	(S)(M)(I)

#### 2.4.4 Modèle logique de données MLD

Le modèle logique de données est un modèle organisationnel qui permet de modéliser la structure selon laquelle les données seront stockées dans la future base de données. Ce modèle décrit aussi les relations entre les associations entre classes d'entités, (MLD-R) pour permettre d'implémenter la base de données dans un SGBD donné.

La figure 2.7 présente le passage du MCD au MLD est basée sur des règles suivantes :

1. toute entité devient une relation ayant pour clé primaire son identifiant. Chaque propriété se transforme en attribut. **Un exemple** (figure 2.8) RETENUES\_DES\_BARRAGES (ID\_barrage, Nom\_barrage, Nom\_Region, Nom\_wilaya,...).
2. toute association hiérarchique (de type (1,n)) se traduit par une clé étrangère. La clé primaire correspondant à l'entité père (coté n) migre comme clé étrangère dans la relation correspondant à l'entité fils (coté 1). **Un exemple** OPERATION\_DU\_DRAGAGE (ID\_Dragage, opération\_Dragage, type\_Dragage, X, Y, Période\_Dévasement, # ID\_barrage).
3. toute association non hiérarchique (de type (n,n) ou dimension > 2 :plusieurs–plusieurs) devient une relation. La clé primaire est formée par concaténation (Enchaînement) l'ensemble des identifiants des entité reliées. C-à-d, s'il y a une entité de A relié à un entité de B par l'association (n,n) (plusieurs–plusieurs), l'association devient une

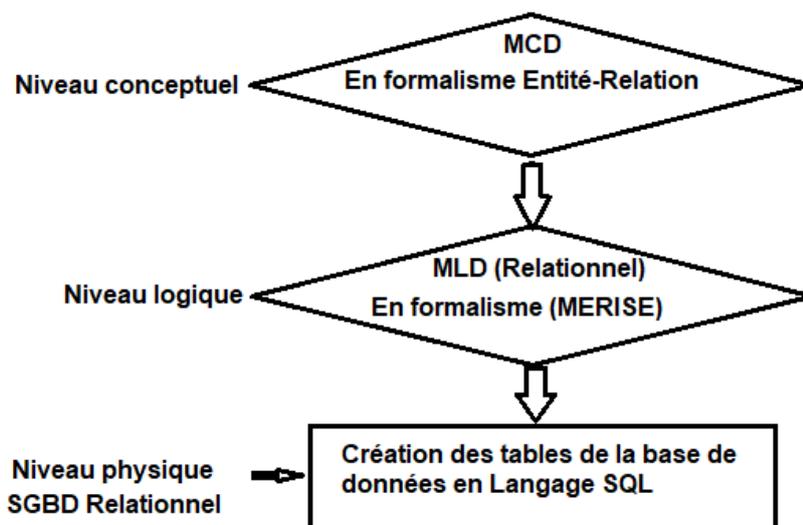


FIGURE 2.7 – Démarche d'élaboration d'un MLD Relationnel

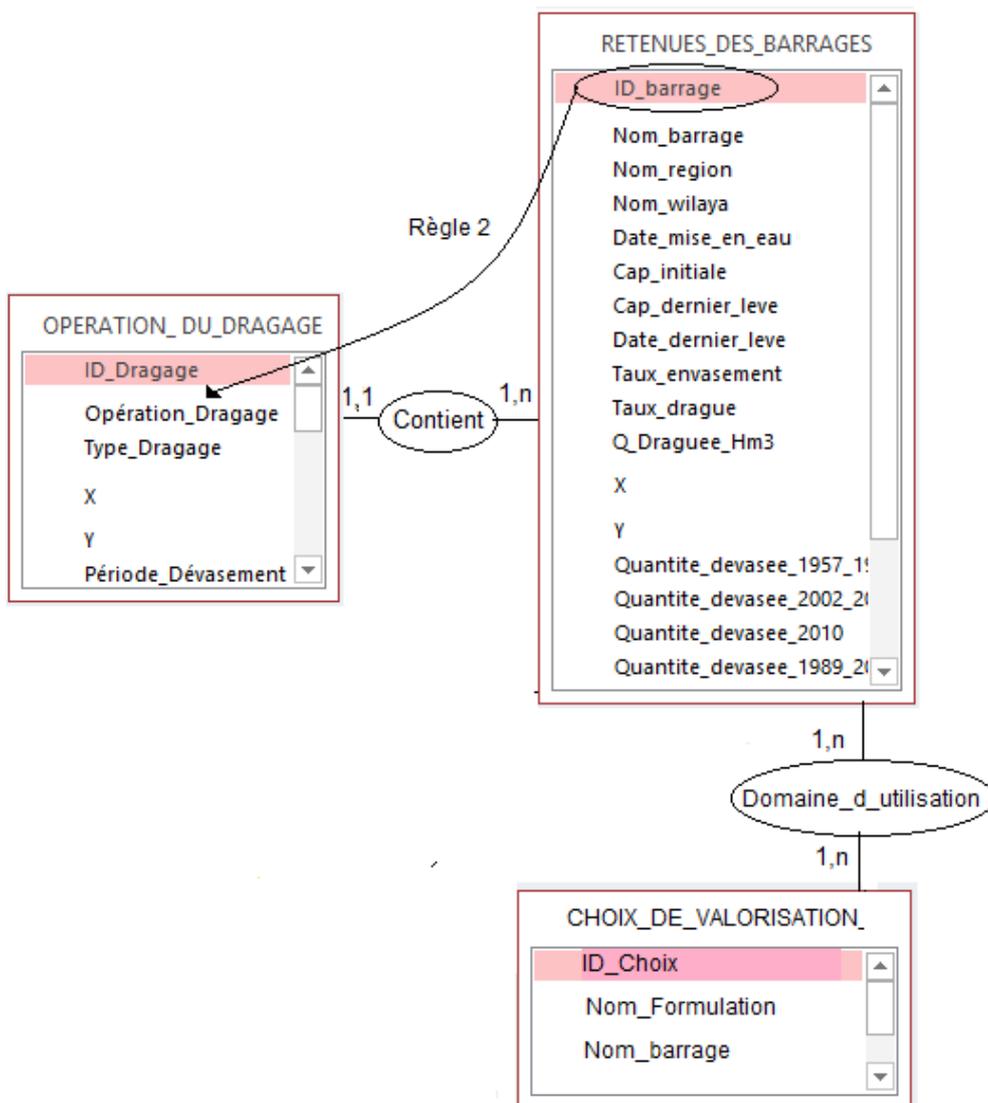


FIGURE 2.8 – Passage du MCD au MLD

table. La clé primaire de cette table est la combinaison entre les deux entités (A,B).

**Un exemple :** Domaine\_d\_utilisation (# ID\_barrage, # ID\_Choix, Valorisation).

Le modèle physique de données (MPD), c'est le niveau opérationnel qui correspond à la structure de stockage de données. IL permet de proposer une solution technique optimale pour l'implantation physique des données.

Pour interroger la base de données, mettre à jour et effectuer les manipulations sur MLD, il existe de nombreux systèmes de gestion de bases de données, (tableau 2.4).

TABLEAU 2.4 – Différents systèmes de gestion de bases de données

SGBD	plate-forme	mode
ACCESS	Windows	mono-poste
SQL SERVER	Windows	client/serveur
ORACLE	Windows	client/serveur

## 2.5 Conception de SIG des sédiments de dragages

### 2.5.1 Choix d'un SIG

Le choix d'un SIG dépend de la nature et la complexité des problèmes à résoudre. Il doit présenter les fonctionnalités requises avec des conditions de rapidité et facilité de mise en œuvre.

Nous avons choisi le logiciel MapInfo pour la création d'une base de données de sédiments de dragages. C'est un outil de SIG de type vecteur qui se prête à la modélisation des points, des lignes, des polygones et des polygones. Il permet de créer et d'afficher des données sous forme des cartes, des tableaux, des graphes et de modifier une carte intégrer pour une présentation. Les caractéristiques principales de MapInfo sont :

1. La superposition des couches thématiques.
2. La représentation cartographiques.
3. Échange de données avec les autres SIG (Arc-GIS, ARC-info).
4. Il a le Langage SQL étendu pour la gestion des données descriptives et nous allons voir des exemples ci-dessous.

### 2.5.2 Création de la base de données

L'outil MapInfo est un logiciel SIG puissant qui permet à l'utilisateur de visualiser et d'analyser de manière conviviale les relations entre les données et l'information spatiale. Le tableau 2.5 présente les cinq fichiers de MapInfo (.ID, .tab, .Map, .dat, .IND) lors de la création d'une base de données.

Afin de créer une base de données, la première étape, Mapinfo demande un simple affichage ou la calage (géo-référencement) de l'image.

### 2.5.3 Calage des barrages (image Raster) dans MapInfo

Le MapInfo permet de travailler facilement avec des images raster. Nous avons effectué le calage des cartes des retenues des barrages. Il s'agit du passage de format raster à

TABLEAU 2.5 – Les extensions des fichiers de MapInfo

Type de fichiers	type de table	l'utilisation
.ID	Attributaire graphique	ce sont des fichiers faisant les liens entre les données graphique et les données descriptives
.Tab		MapInfo : les fichiers décrivent la structure de la table
.Map		les fichiers contiennent des données géométriques
.dat		les fichiers contiennent les données descriptives
.Ind		index facultatif
.Tab .tif	Raster	support de saisie et le fond de plan
.Tab .dat ou .DBF	Attributaire non graphique	les données Alphanumérique Données provenant d'un autre logiciel

un format vectoriel. C'est la conversion des points numériques d'une image scannée en vecteur linéaire. Il est indispensable de caler chaque image raster avant de l'utiliser dans la base de données surtout si nous utilisons l'image avec des données vectorielles. Il est aussi conseillé d'utiliser (04)points de calage afin d'évaluer l'erreur commise au moment de la saisie des points de calage.

Le calage a pour objectif de rapprocher le comportement du modèle de celui du système réel (introduction des différents plans de données dans le SIG). Chaque entité géométrique (barrage ) est reliée à sa description exhaustive, ce lien se fait au moyen d'un identifiant interne, figure 2.9.

Pour que le support cartographique soit exploité, il est important de géoréférencer les plans des barrages dans les projections ( *Universal Transverse Mercator (UTM) Zones 30 et 31 Northern Hemisphere*, (WGS84), (figure 2.11). Après le calage des carte, ses informations sont stockées dans le fichiers (.tab). On a fait la digitalisation des retenues des barrages étudiées à l'aide des carte d'états major, (figure 2.10).

Cette méthode de digitalisation nous a permet de combler les principaux besoins : la saisie des données géographiques et des données alphanumériques associes (comme les retenues des barrages, les capacités de stockage et le taux d'envasement ...).

#### 2.5.4 Analyse et numérisation de données

La numérisation des données qui consiste à remplacer les traditionnels plans papier difficiles à manipuler et complexes à mettre à jour par des plans numérisés où l'on retrouve de manière bien différenciées (symboles, couleurs) les bassins versants, les barrages, points de mesures etc., (figure 2.12).

Les données sont des observations brutes, après leurs traitements, on arrive à des informations utiles pour la conception de la base de données. Elles sont de natures va-

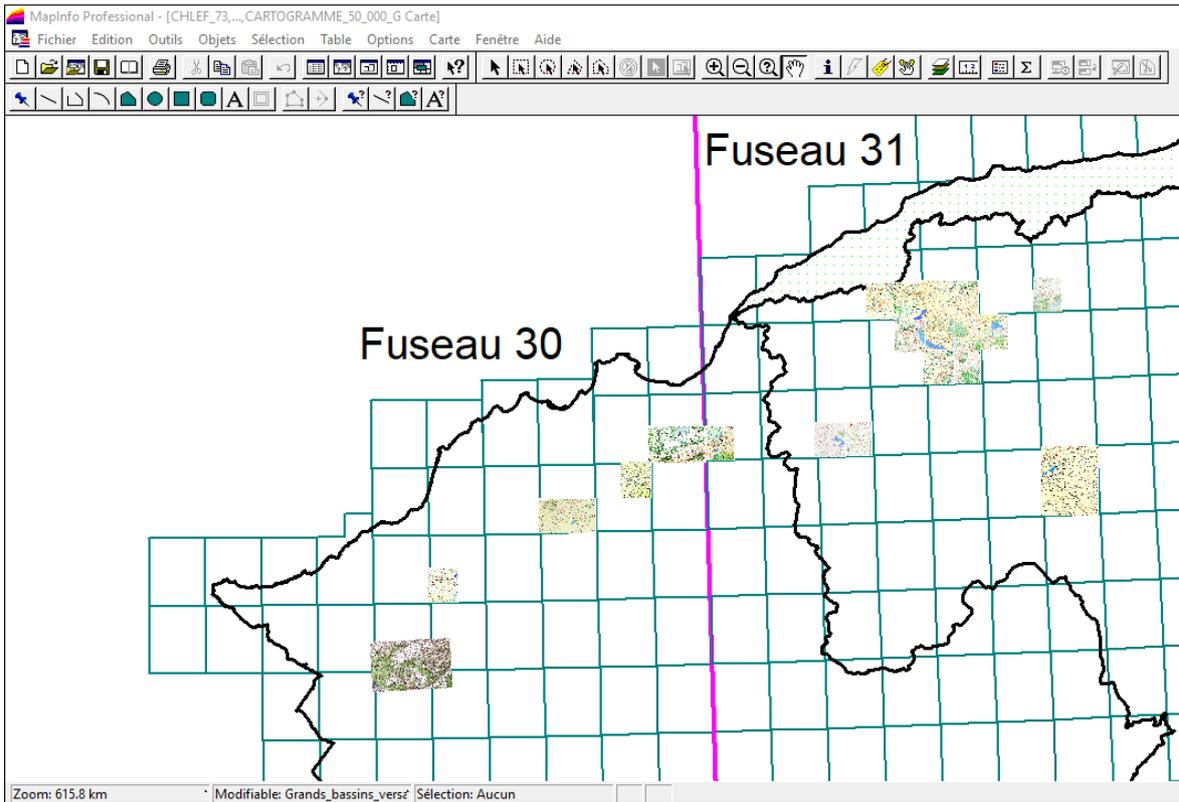


FIGURE 2.9 – Calage et la projection des cartes d'état major des barrages algériens

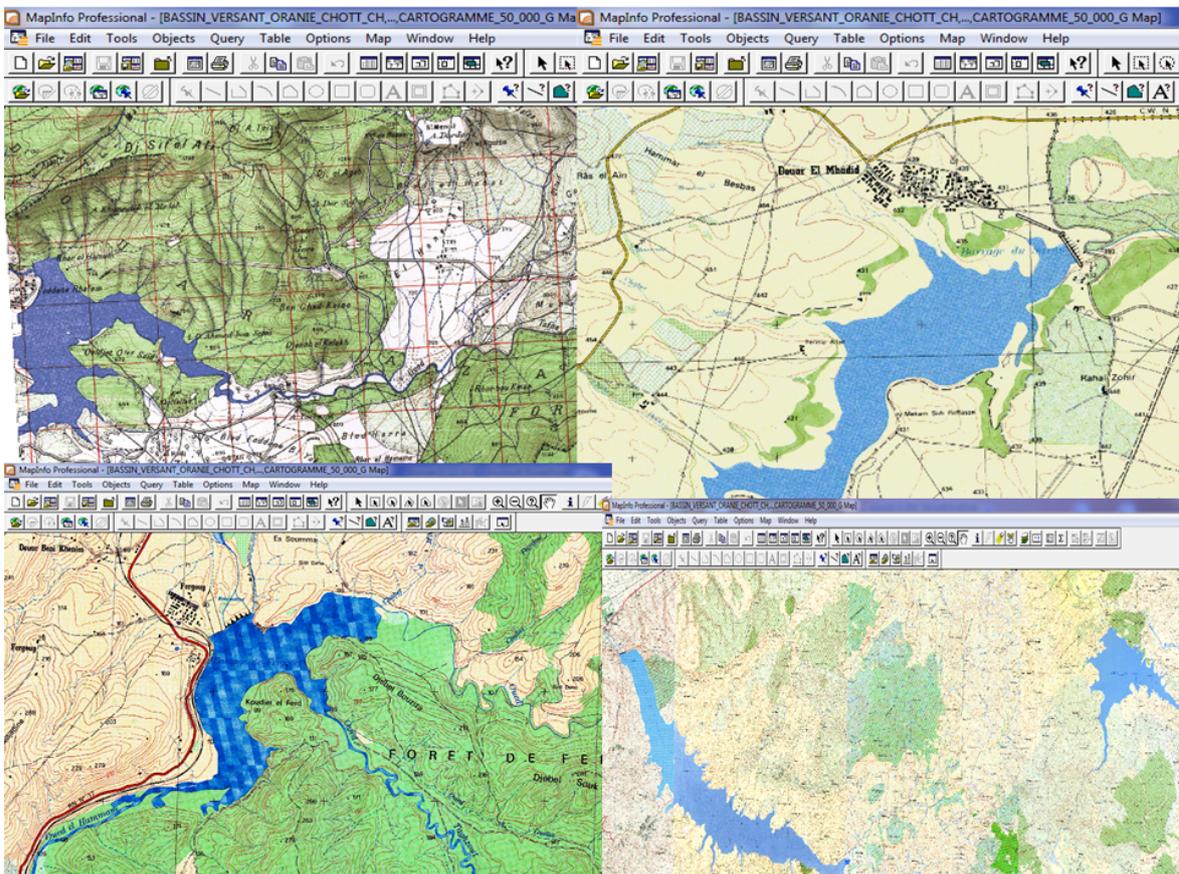


FIGURE 2.10 – Digitalisation des retenues des barrages à l'aide des cartes d'état major

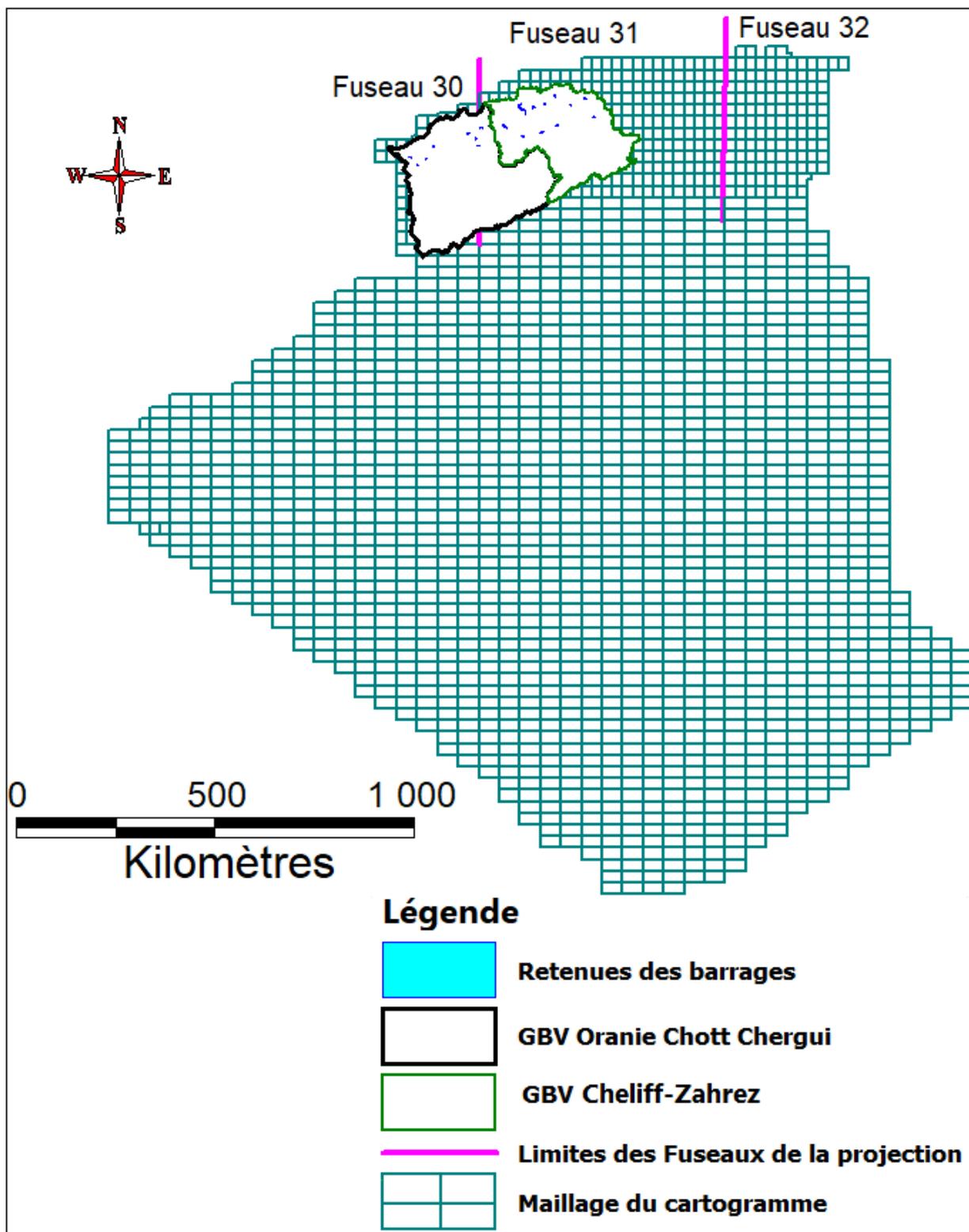


FIGURE 2.11 – Les fuseaux du nord d’Algérie et la projection de la zone d’étude UTM30, UTM31

riables, structures variables et sources variables. Les données sont organisées sous forme de tables. Les noms d'attributs sont introduits champ par champ selon leurs types (caractère, entier, flottants, virgule fixe, date, etc).

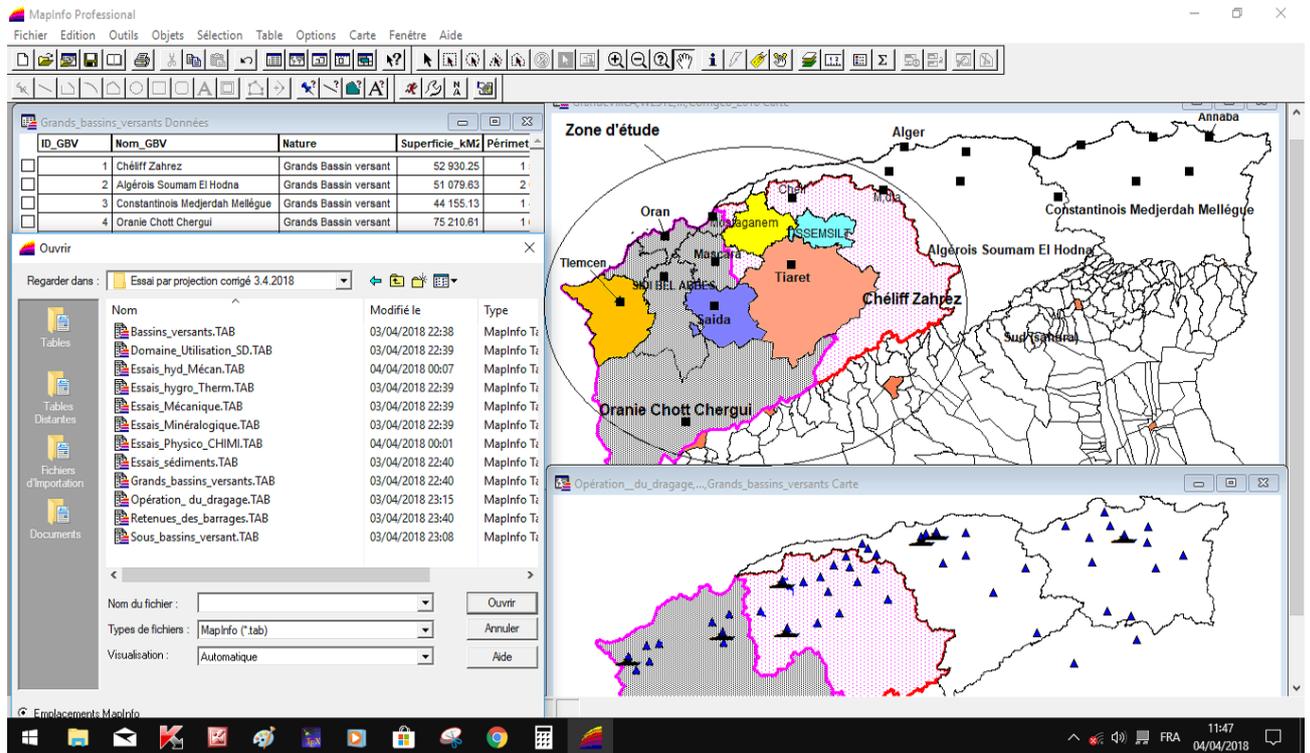


FIGURE 2.12 – Création de la base de données et localisation de la zone d'étude

Parmi les avantages d'outil SIG est d'actualiser les données. On peut mettre la mise à jour de données sur les deux composantes (tabulaire, graphiques), par plusieurs extensions.

Exemples :

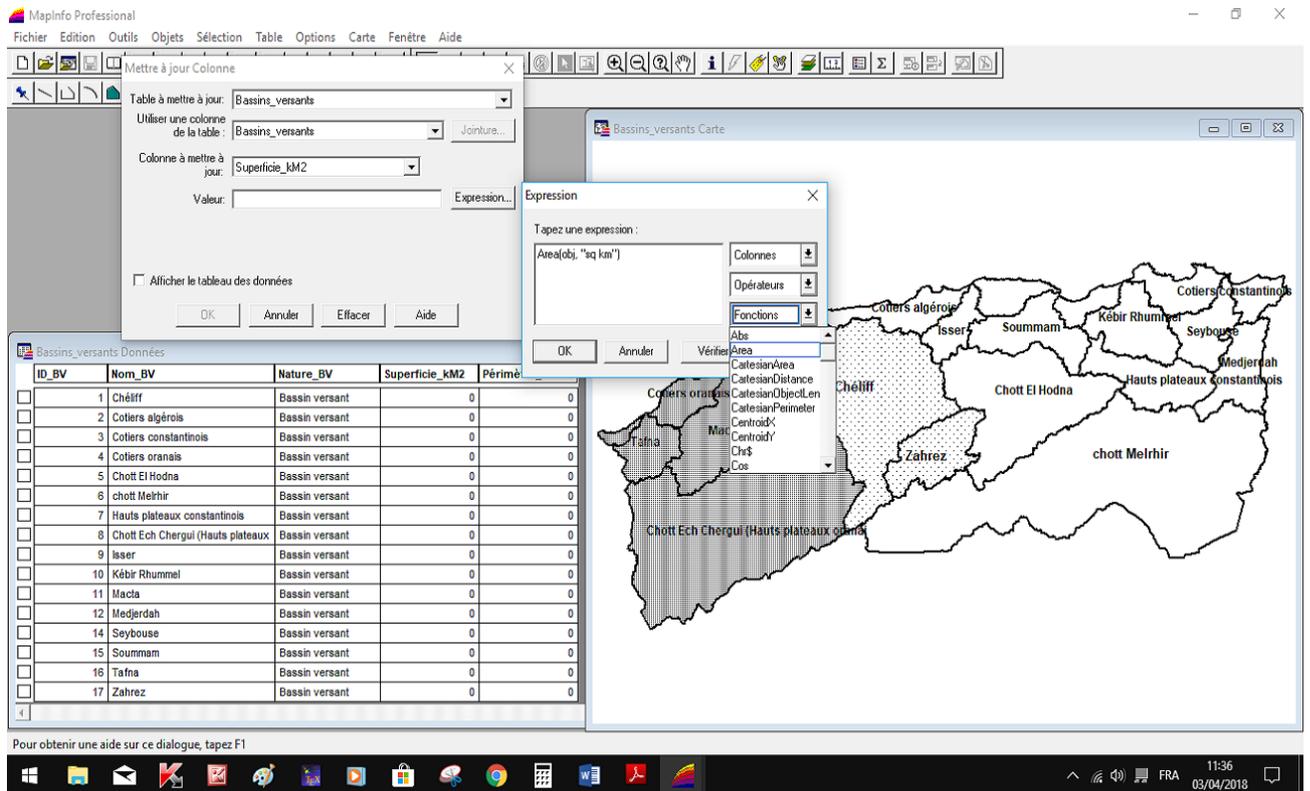
1. La mise à jour de la superficie du bassin versant de la zone d'étude est calculée par la clause de la mise à jour, d (figure 2.13).
2. La mise à jour des données géotechniques peut être actualisé par un fichier Excel. Cela peut être utile quand les données sous Excel, sont récentes. Le fichier Excel étant par exemple sur un serveur ou un dossier partagé par plusieurs utilisateurs, (figure 2.14).

Dans notre cas, comme Mapinfo est en mesure d'ouvrir un fichier Excel, nous avons fait la mise à jours des valeurs de matière organique MO des sédiments des barrages, (figures 2.15).

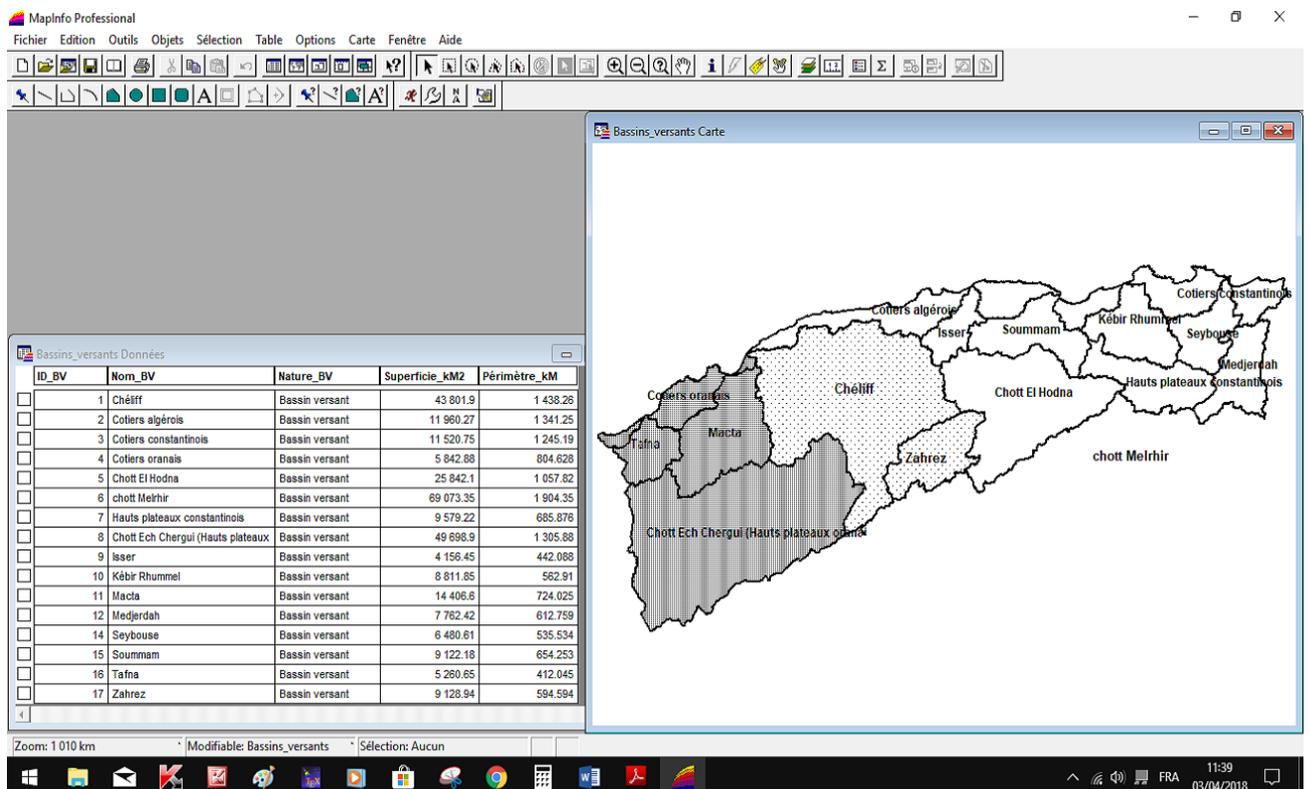
## 2.6 Requêtes et analyses thématiques

Une requête SQL est un Langage de définition et manipulation de données, c-à-d c'est une opération d'interrogation réalisée sur une partie d'une base de données. Les requêtes SQL vont servir à afficher certaines données contenues dans les tables (une ou plusieurs tables) selon certains critères. L'intérêt de SQL est d'utiliser sur n'importe quelle base de données. L'analyse de ces requêtes à pour but d'interpréter et d'élaborer d'une nouvelle information de la zone traitée et pour informatiser la solution. Les résultats d'une requête

## Chapitre 2. Création d'un SIG pour les sédiments de dragage des barrages de l'ouest Algérien



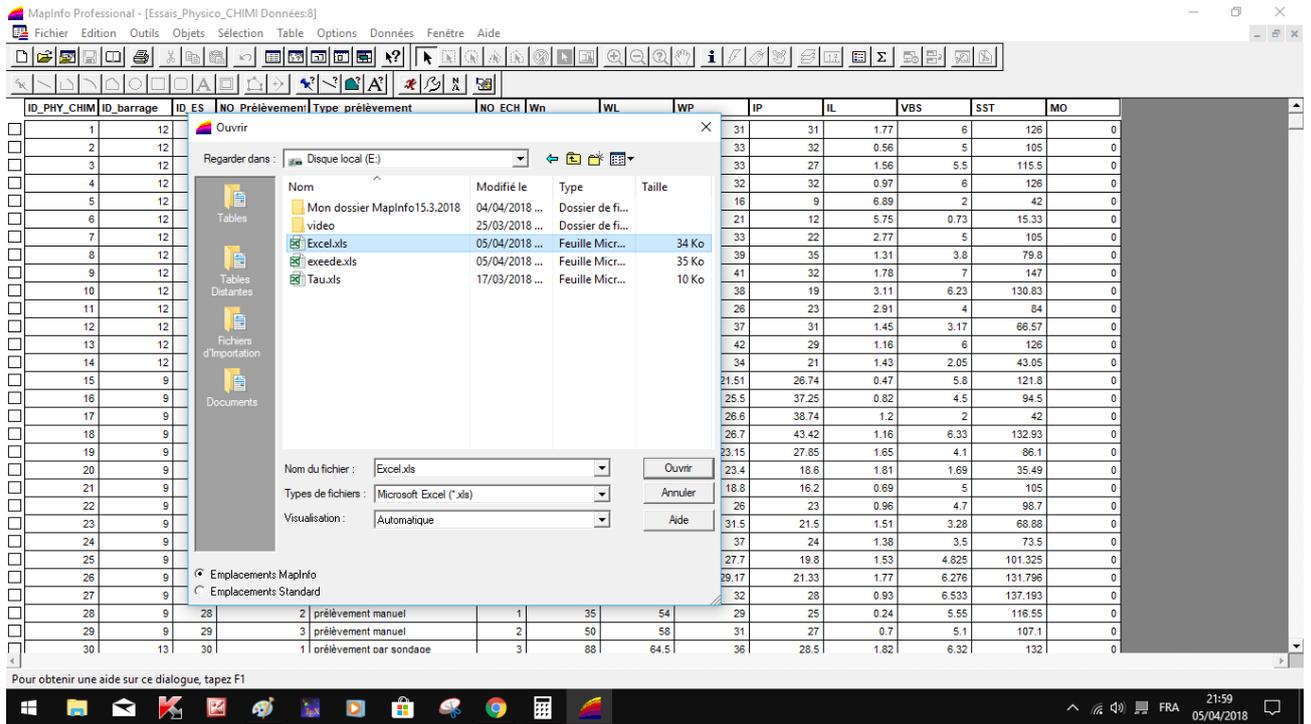
(a)



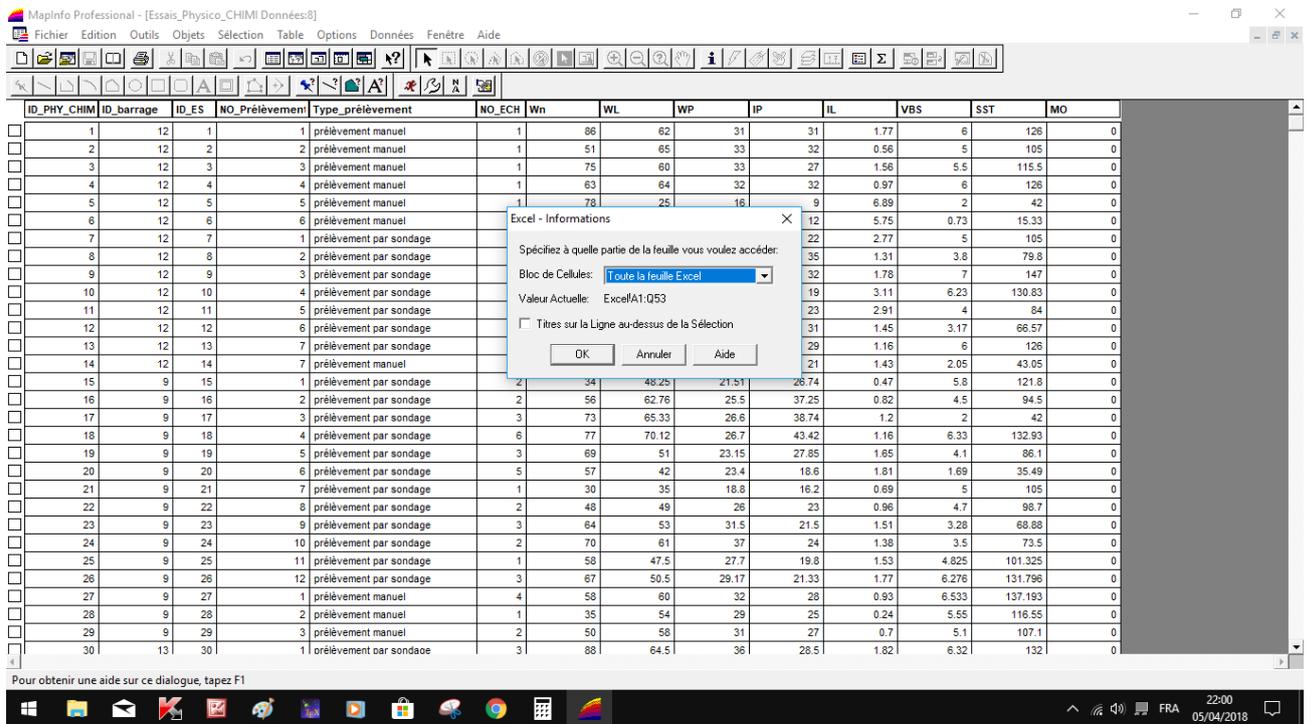
(b)

FIGURE 2.13 – La mise à jour de la superficie du bassin versant de la zone d'étude

## Chapitre 2. Création d'un SIG pour les sédiments de dragage des barrages de l'ouest Algérien



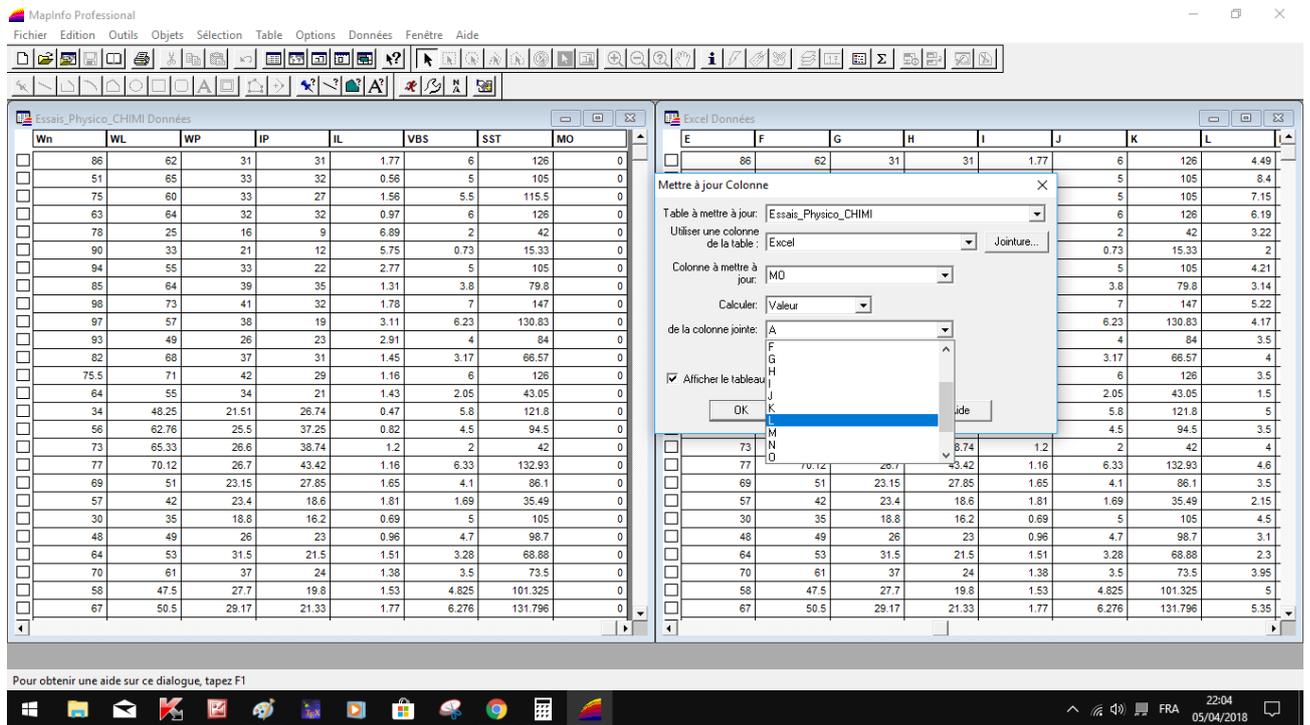
(a)



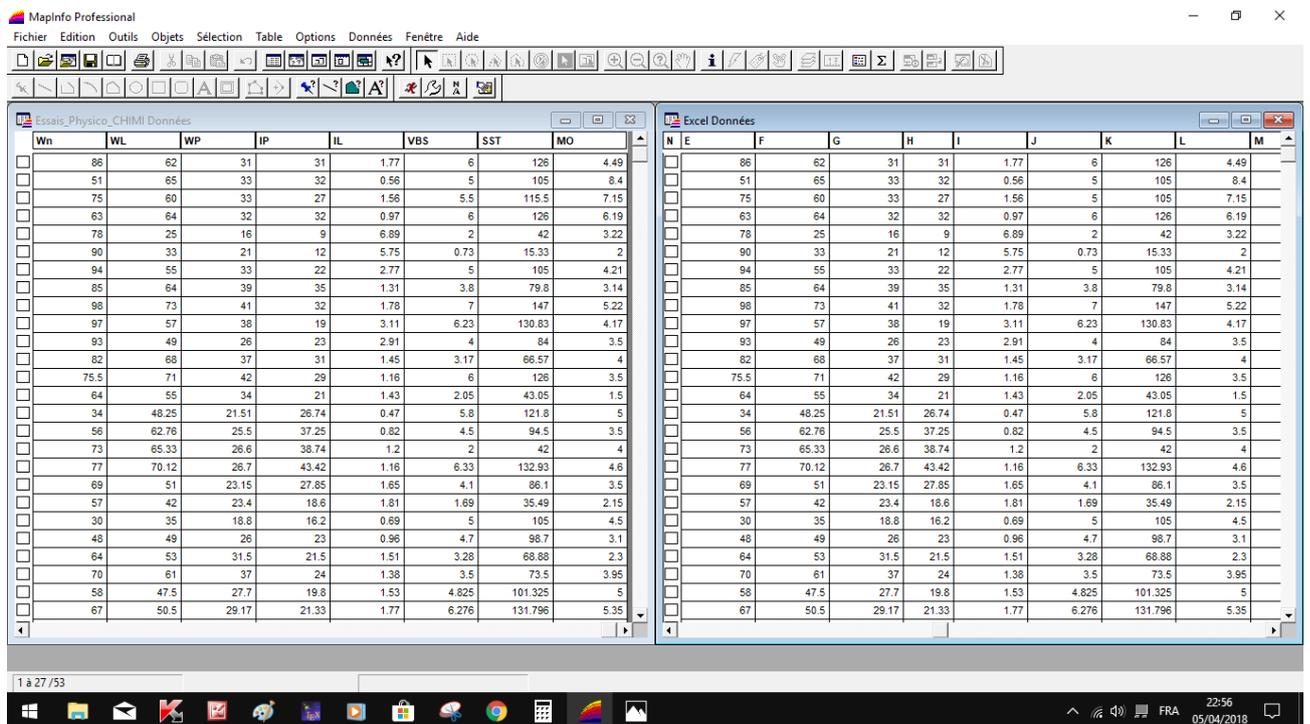
(b)

FIGURE 2.14 – Les étapes d'ouvrir le fichier Excel dans Mapinfo

## Chapitre 2. Création d'un SIG pour les sédiments de dragage des barrages de l'ouest Algérien



(a)



(b)

FIGURE 2.15 – La mise à jour du taux de matière organique (MO) des sédiments des barrages

sont affichés dans une feuille qui peuvent être exploités dans un état ou un phénomène. Il existe différents types de requêtes que nous allons détailler ci-dessous.

### 2.6.1 La requête sélection SQL (*Structured Query Language*)

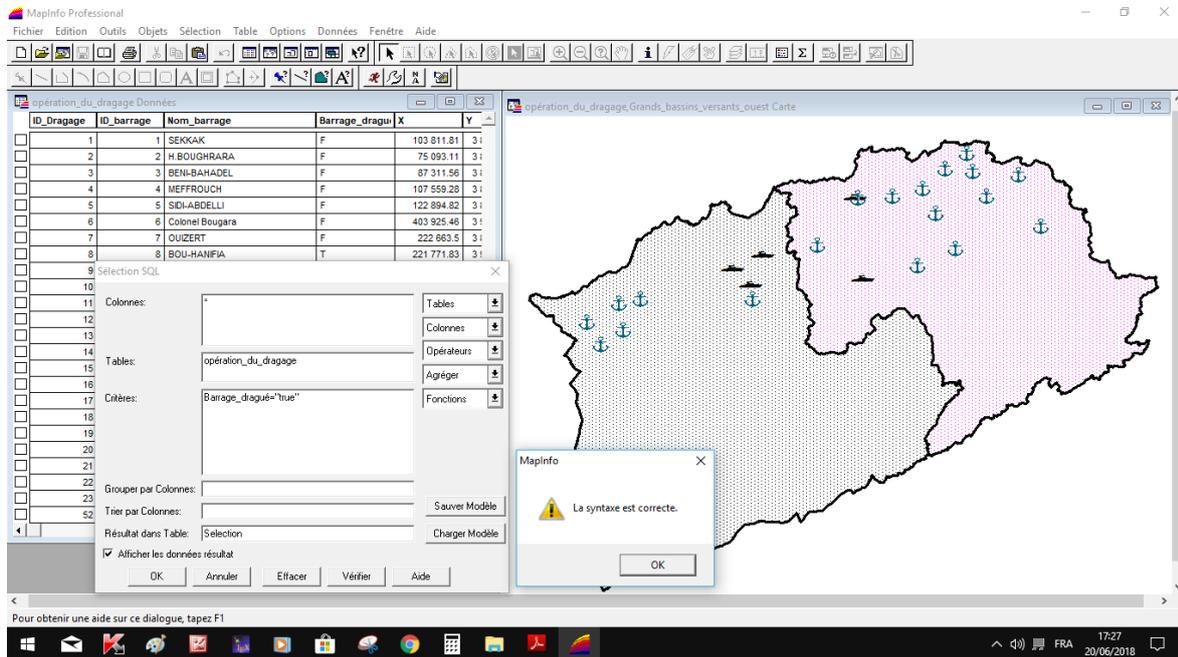
Lorsqu'on interroge une base de données relationnelle à l'aide d'un ordre SQL de sélection de type *SELECT* (liste\_expressions), *FROM* (nom\_table), *WHERE* (groupe\_conditions), *INTO* (table\_résultats), *GROUP BY* (liste\_colonnes). On sait que le SGBD ne duplique pas physiquement les données mais qu'il crée une vue temporaire pour afficher les résultats comme (taux d'envasement, les barrages dragués, la quantité de sédiments dévasés (gisement) et le choix de valorisation, etc.), ou des résultats concernant les caractéristiques de sédiments (taux de matière organique, limites d'atterberg et la résistance à la compression, etc.). Donc cette requête permet d'avoir une vision synthétique des différentes opérations possible, répondant à un ensemble de critères sur les attributs. A cet effet, on va analyser les résultats de notre étude par des requêtes simple et complexe (multi-critère).

#### 2.6.1.1 Requêtes SQL simples

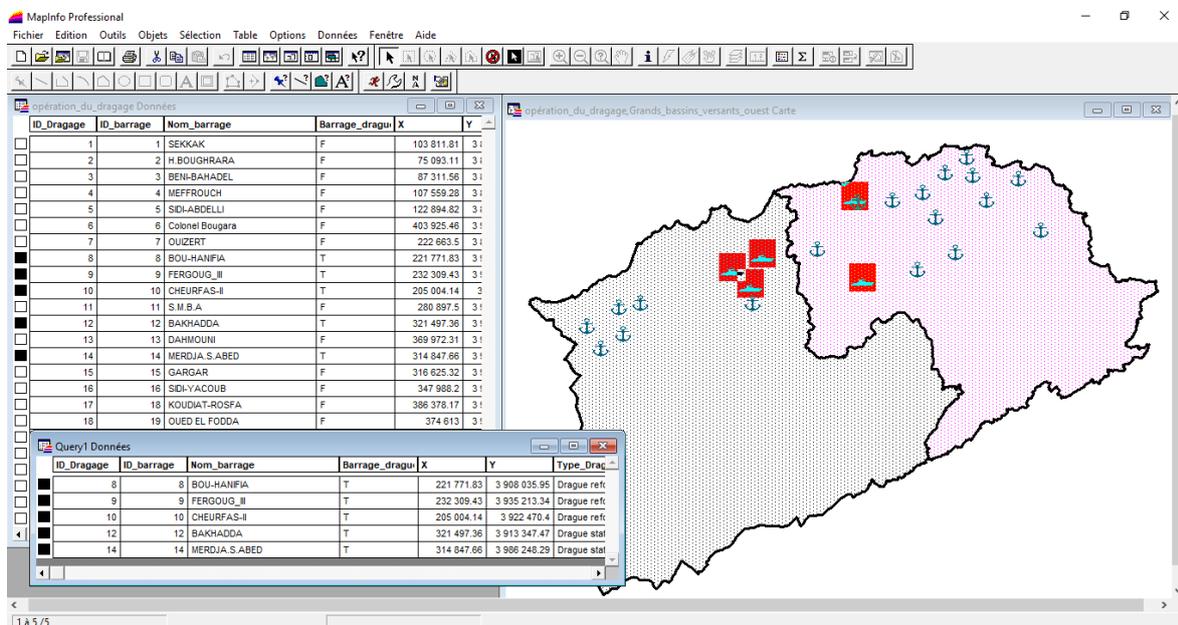
Une requête simple qui a été basé sur un seul critère. Quelques exemples d'exploitation

1. L'outil SIG permet d'afficher les opérations de dragages en Algérie depuis 1957 jusqu'à 2010 à l'aide d'un ordre SQL logique (T "true" : barrage dragué avec le symbole bateau et/ou F "false" avec le symbole de l'ancre (barrage non dragué), (figure 2.16). Après l'étape de la sélection des opérations de dragage, on peut établir une cartographie de toutes ces opérations de dévasement des barrages algériens entre 1957 et 2010, (figure 2.17). Cette illustration nous résume, une vision synthétique des différentes opérations de dragages qui ont été effectuées dans les barrages de l'ouest algérien dans cette période.
2. On désire avoir la liste des points des prélèvements manuels dans les barrages de l'ouest Algérien, afin de voir leurs positions spatiales par rapport aux barrages, (figure 2.18). En parallèle, nous pouvons chercher leurs teneurs en eaux dans lesquelles, les valeurs sont inférieures à 50% ( $W_n < 50\%$ ), (figure 2.19). La figure 2.20 montre les points d'implantation de sondages de reconnaissance et les points de prélèvement des travaux de valorisation qui ont été effectués sur les sédiments de deux barrages Bakhadda (Tiaret) et Fergoug (Mascara). Ces résultats nous donnent la possibilité de répondre à différentes requêtes.
3. Tous les matériaux destinés aux ouvrages de génie civil doivent renfermer un faible taux de matière organique ( $MO < 3\%$ ). On cherche le taux de matière organique  $< 3\%$  présenté dans les sédiments de différents barrages. Au premier lieu, on choisit les tables concernées, telles que les essais, les sondages et les barrages, (figure 2.21). Puis on clique sur le bouton sélection SQL pour interroger cet outil. Donc il y a trois cases, la première case permet d'afficher tous les résultats qu'on cherche. La deuxième case, on introduit les tables des essais, des sondage et des barrages. Finalement, dans la troisième case de critère, on doit établir les jointures entre ces tables et on introduit la requête de taux de MO  $< 3\%$  sans prendre la valeur zéro. Les résultats présentés sous formes de table et graphique, (figure 2.22), donc les barrages Fergoug bouhanifia et bakhadda remplissent la condition de  $MO < 3$ .

## Chapitre 2. Création d'un SIG pour les sédiments de dragage des barrages de l'ouest Algérien



(a)



(b)

FIGURE 2.16 – Les barrages dragués entre 1957 et 2010

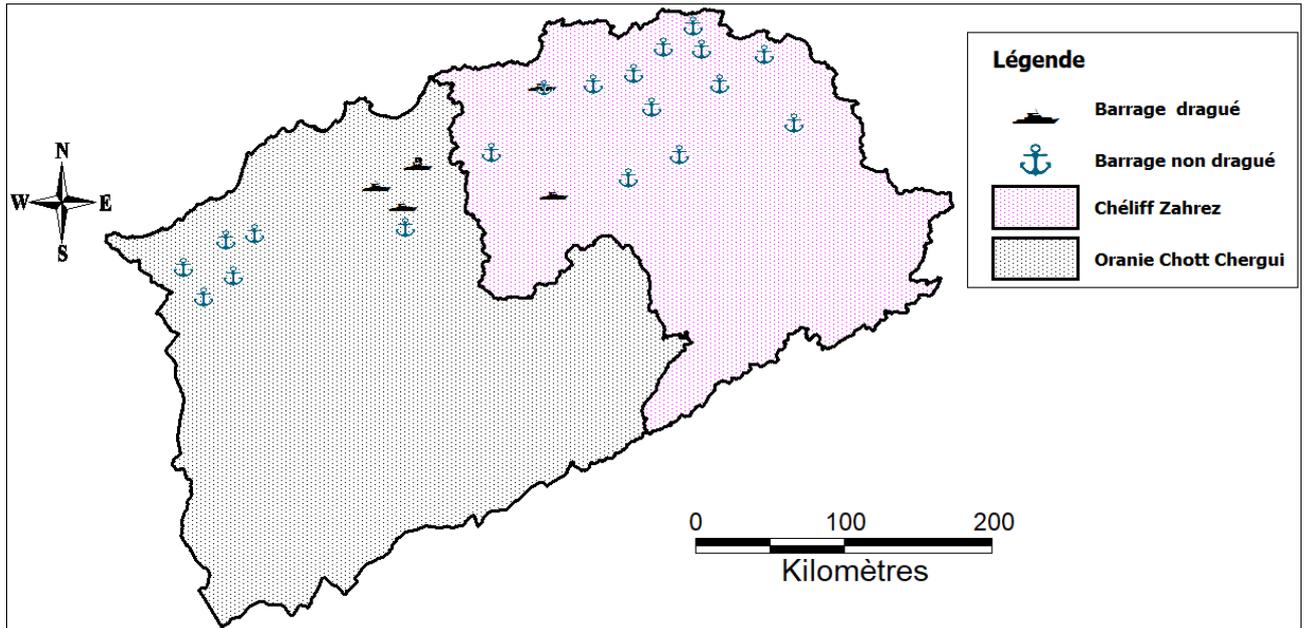


FIGURE 2.17 – Toutes les opérations de dévasement des barrage algériens entre 1957 et 2010.

### 2.6.1.2 Requête SQL complexe (multi-critères)

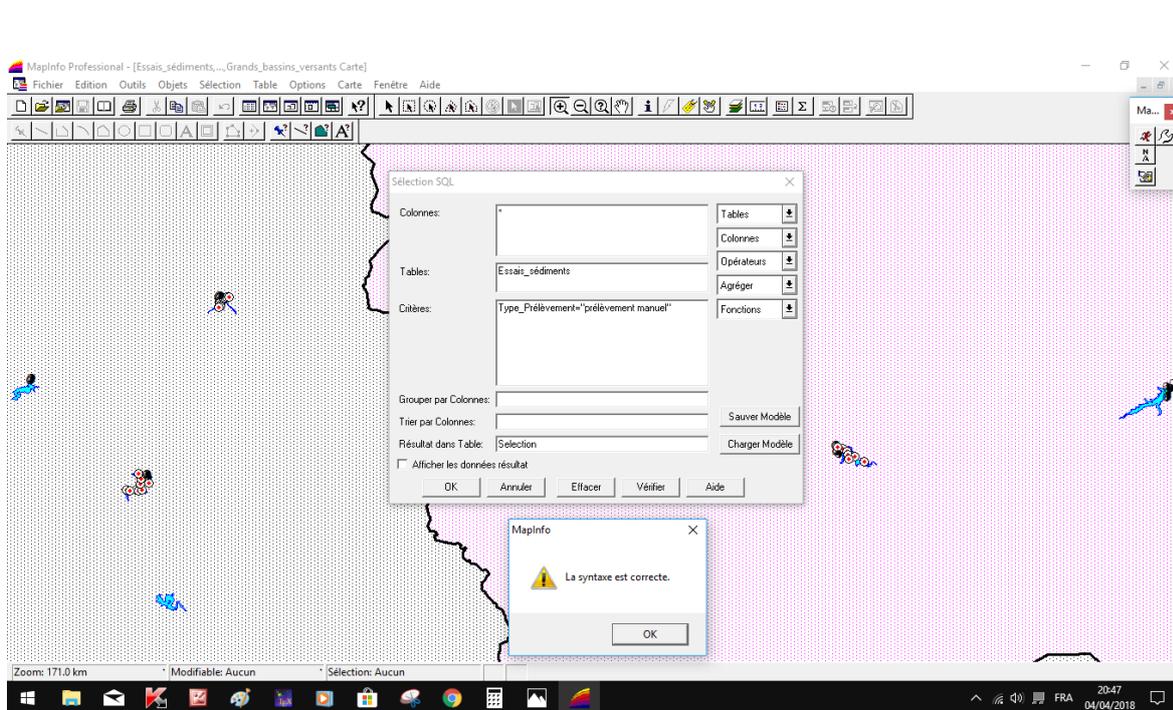
Pour la requête multi-critère qui a été basé sur plusieurs paramètres, on prend à titre d'exemples :

1. La requête de choix de sédiments utilisables en techniques routiers selon la norme française (NF XP-P11-300) et GTS2000  
 Donc la figure 2.23b montre les étapes de la requête multi-critère de jugement pour l'utilisation des sédiments des barrages en techniques routière. c'est les mêmes étapes de la requête simple que on a montré précédemment. Dans la case de critère, on introduit les critères de jugement comme le pourcentage de 80µm, Ip et vbs etc., tableau 2.6. Les résultats des barrages qui remplissent les conditions sont présentés sous forme de table et carte (graphique), figure 2.23. Les résultats de cette requête est affiché dans une feuille qui peuvent être exploiter dans un état ou un phénomène.

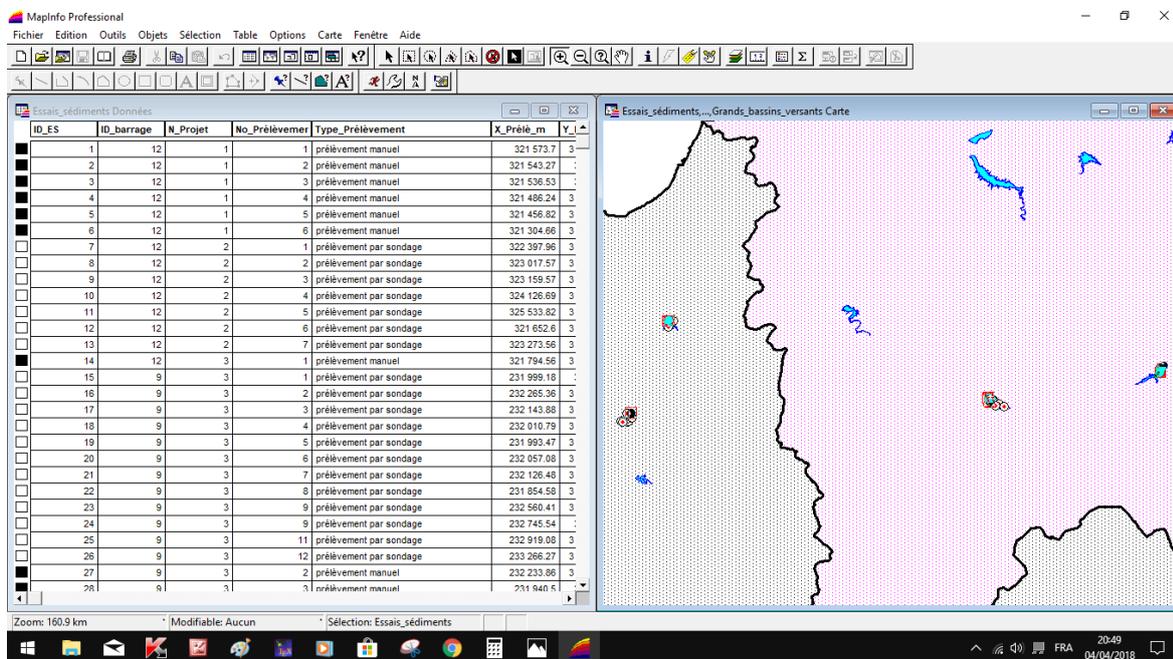
TABLEAU 2.6 – Critères de jugement pour utiliser les sols en technique routière, selon la norme (NF XP-P11-300) et GTS [2000]

Matériaux	80µm (%)	Vbs	IP	Rc (MPa)	IPI
couche de chaussée	< 35	<8	<40	>1	>25

Ce travail de cartographie tend à la détermination des différents matériaux argileux composant la matière première pour la réalisation et la fabrication des produits très répandue, qui sont : les matériaux terre (BTC, pisé...), les briques terre cuite et les couches de chaussées, afin de connaître la source des problèmes répandues sur la qualité de résultat de certains gisements.

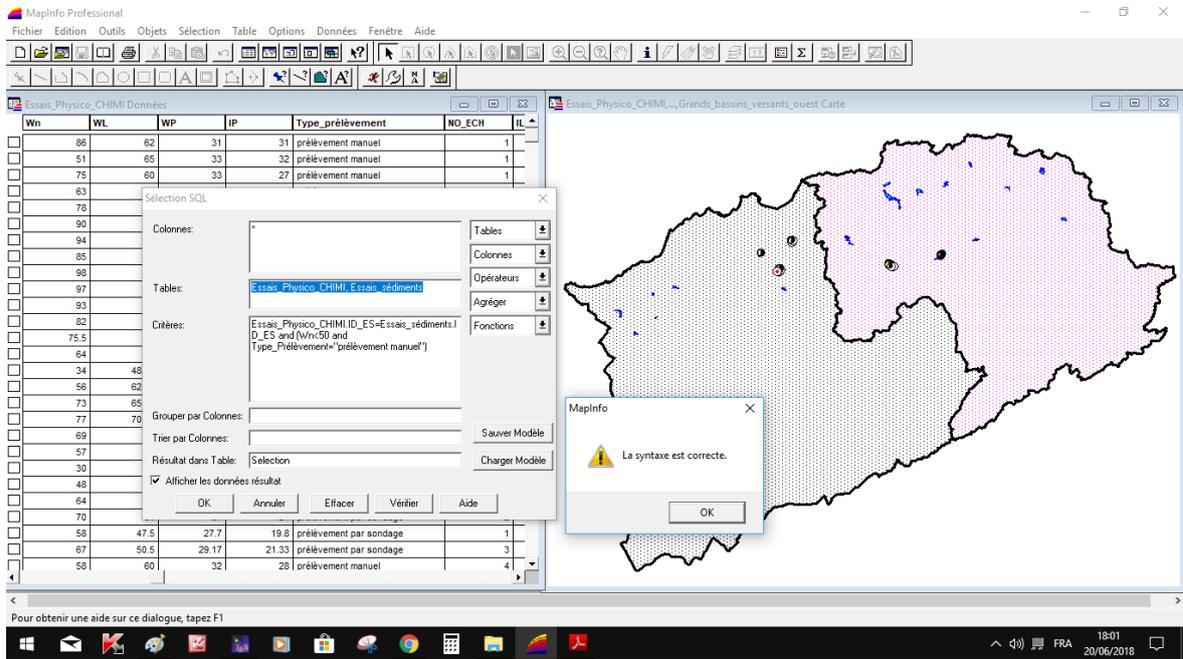


(a)

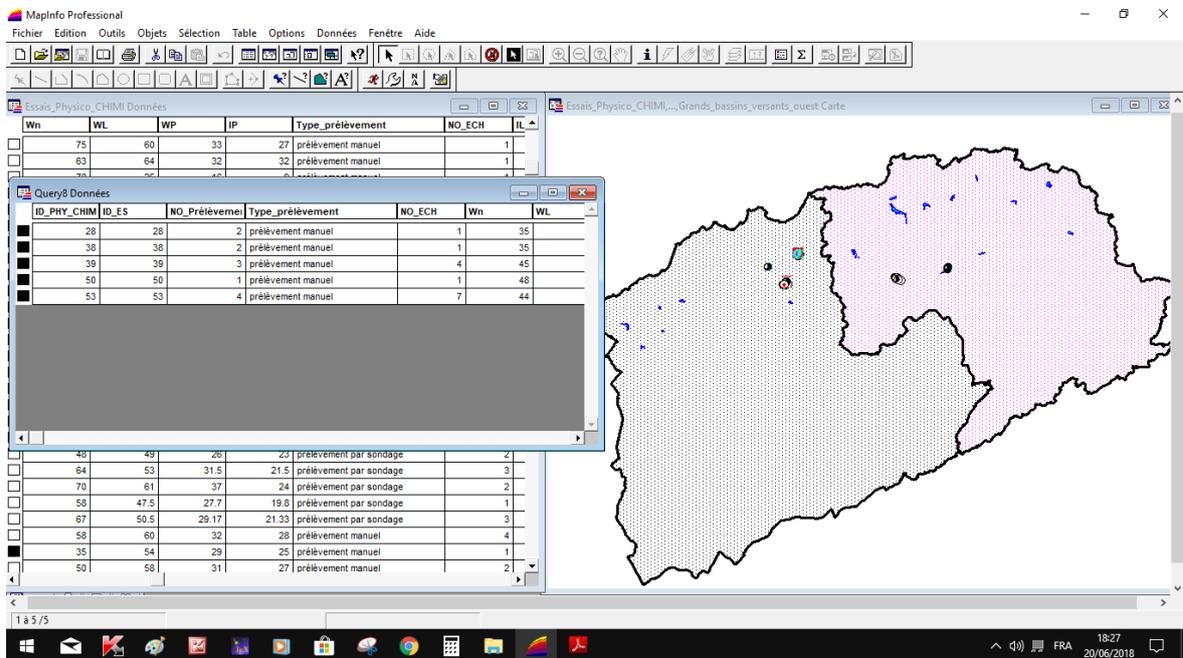


(b)

FIGURE 2.18 – Résultats des prélèvements manuels dans les travaux de valorisation des sédiments

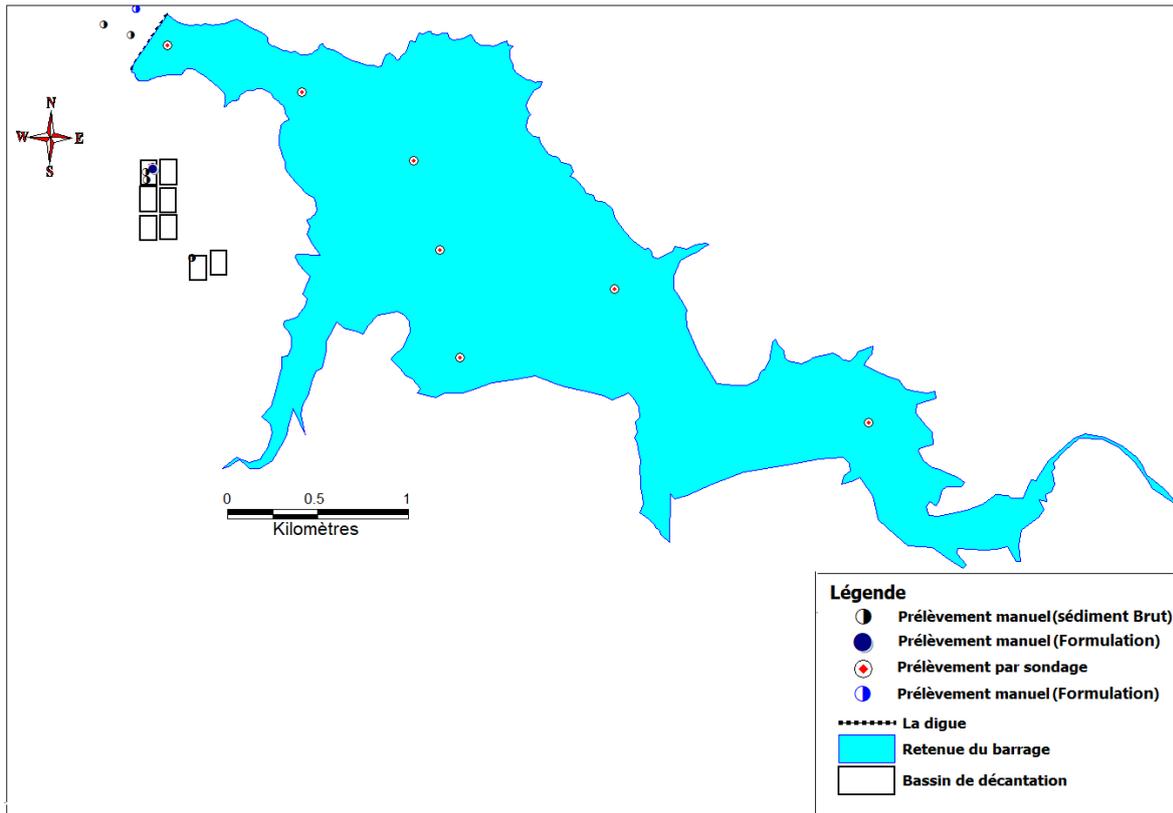


(a)

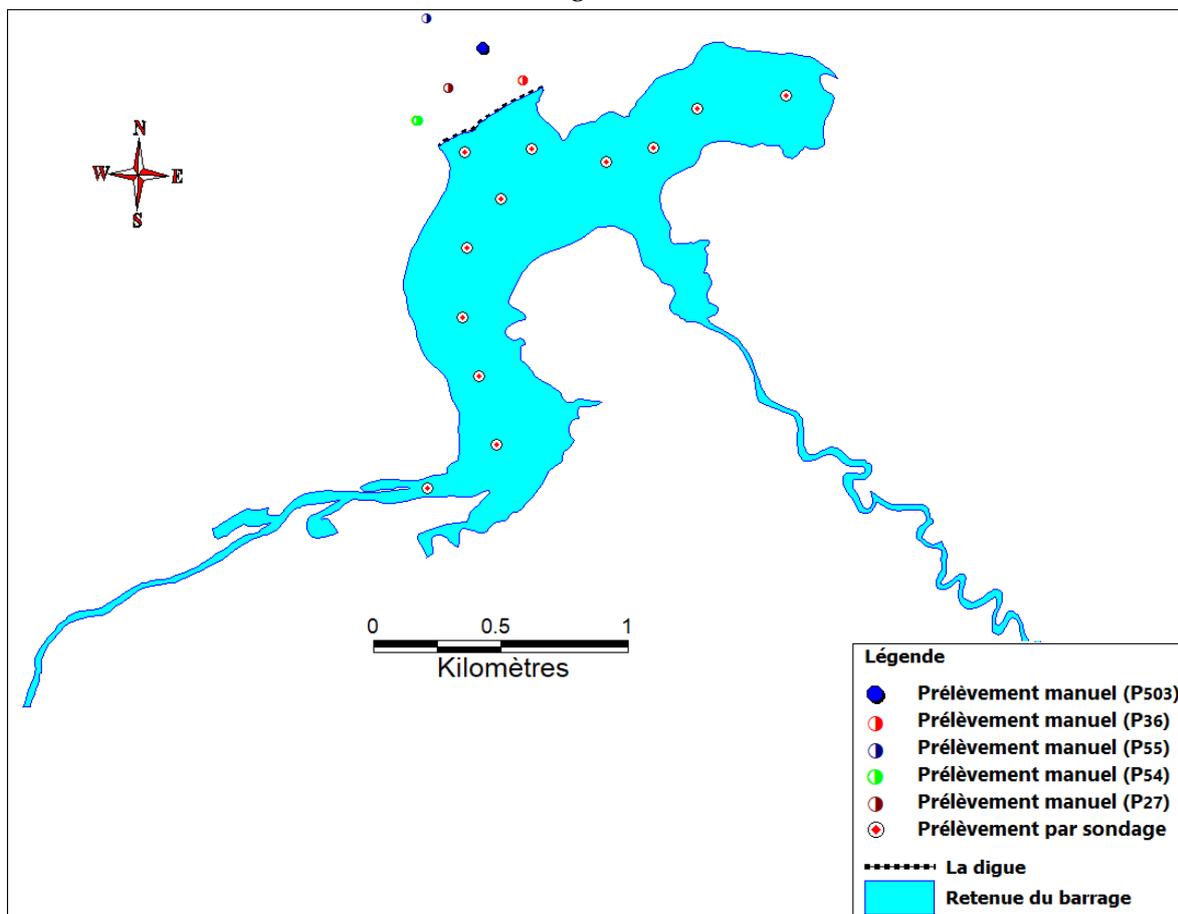


(b)

FIGURE 2.19 – Résultats des prélèvements manuels de sédiments et leurs teneurs en eaux

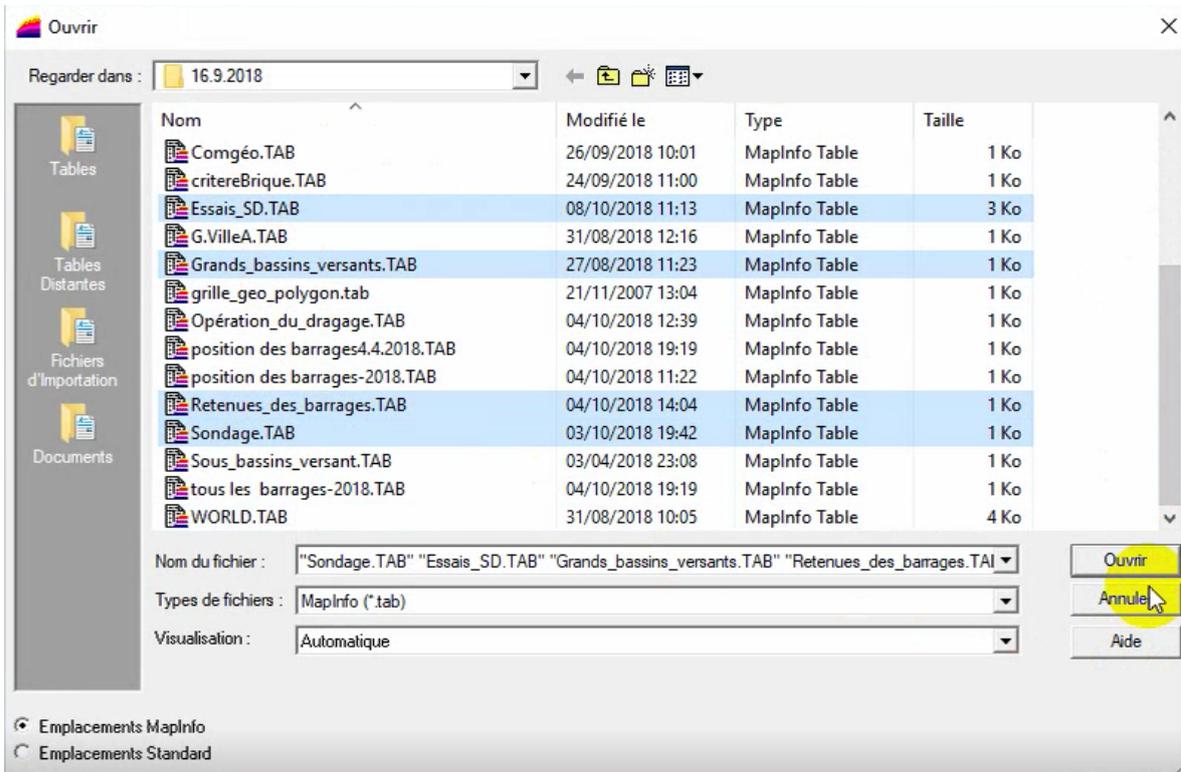


(a) Barrage Bakhadda

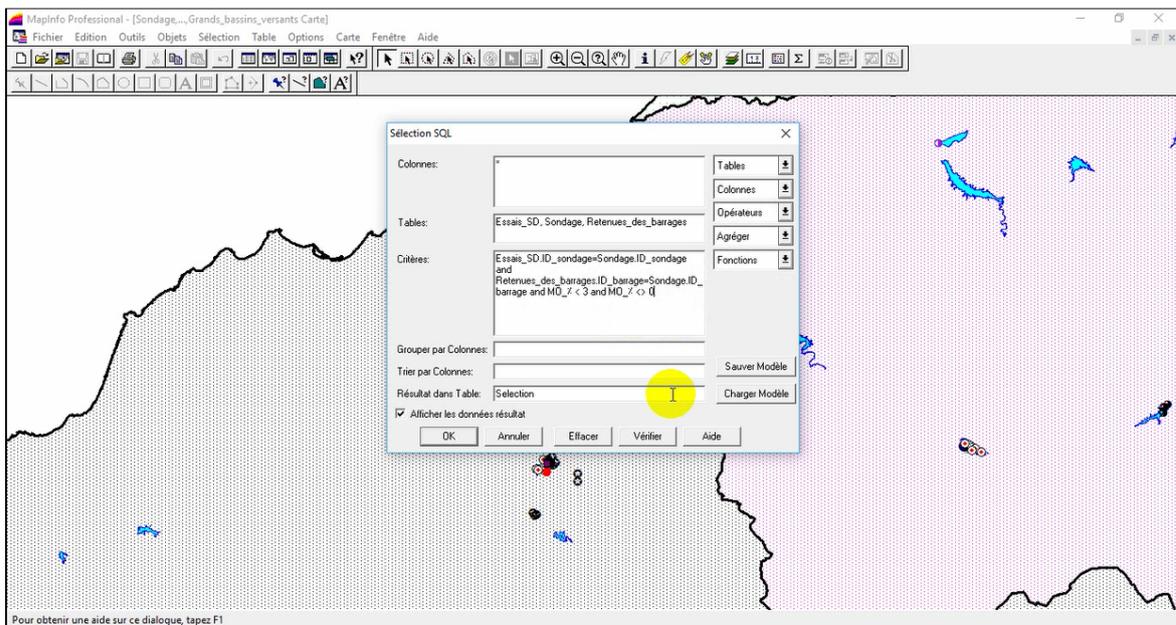


(b) Barrage Fergoug

FIGURE 2.20 – Cartographie des prélèvements manuels et par sondages des sédiments des barrages



(a)



(b)

FIGURE 2.21 – Les étapes de la requête de taux de matière organique <3%

## Chapitre 2. Création d'un SIG pour les sédiments de dragage des barrages de l'ouest Algérien

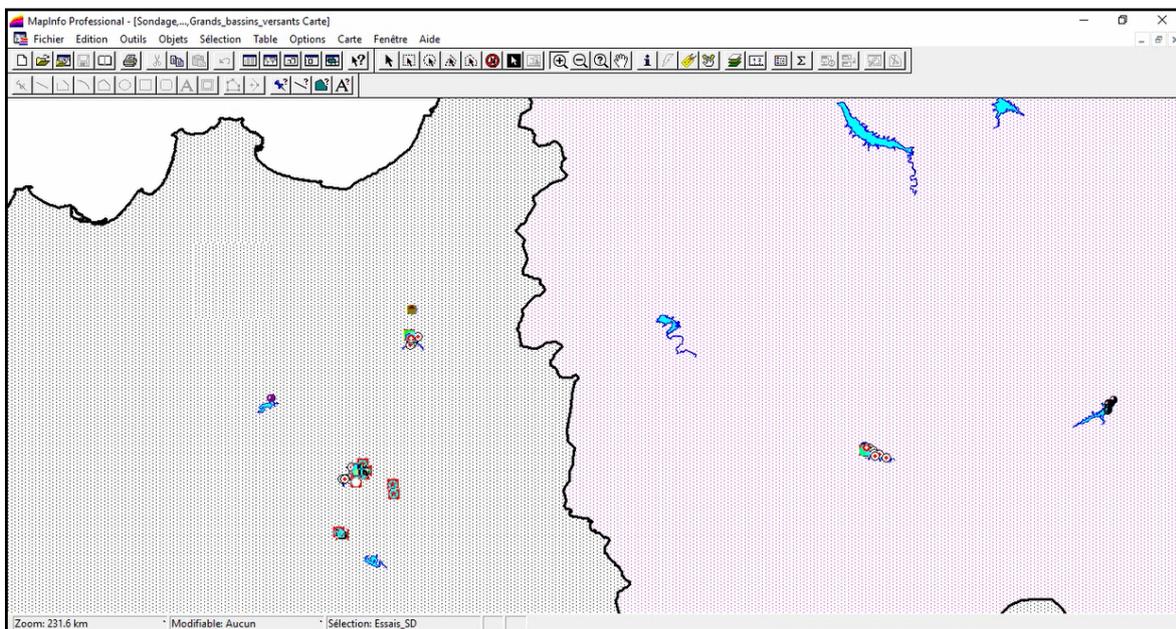
MapInfo Professional - [Query1 Données]

Fichier Edition Outils Objets Sélection Table Options Données Fenêtre Aide

ID_ES	ID_sondage	Wn_%	MO_%	Argile	Limon	Sable_fin	WL	IP	Wp	Reference	Prof_inf_m	P_1C
174	P4	46	1.5	34	56	10	55	21	34	Serbah et al.,2018		1
176	P6	60	2.6	12	0	0	27.5	6.5	19	Serbah B.,2011		0.75
222	P37	0	2.95	27	0	0	64	12	52	Serbah B.,2011		0
224	P39	0	2.18	10	0	0	61	14	47	Serbah B.,2011		0
226	P41	0	2.82	25	16	57	41	20	21			0
227	P42	0	2.76	12	42	46	42	9	33			0
228	P43	0	2.62	12	11	77	32	9	23			0
229	P44	0	2.43	3	20	77	48	8	40			0
248	P55	0	0.17	0	62	38	47.14	24.19	22.95	Nougar B.,2009		0.5
271	P70	11	0.39	12.48	30	41.06	20	6	14	Guessas H.,2014		0
272	P71	19	0.64	20.99	57.66	19.94	37	15	22	Guessas H.,2014		0
273	P72	21	0.47	16.43	79.57	2.6	35	13	22	Guessas H.,2014		0
274	P73	23	1.12	18.63	71.04	7.45	34	13	22	Guessas H.,2014		0
275	P74	18	0.21	18.52	58.57	19.33	36	16	20	Guessas H.,2014		0
276	P75	15.75	0.3	14.94	28.11	27.38	13	3	19	Guessas H.,2014		0
277	P76	20	0.77	16.06	79.12	4.43	28	17	21	Guessas H.,2014		0
278	P77	14	0.43	9.32	28.97	46.31	19	4	15	Guessas H.,2014		0
279	P78	13.5	0.56	14.88	20.46	31.99	24	9	15	Guessas H.,2014		0
280	P79	15	0.43	32.88	14.11	44.19	25	7	18	Guessas H.,2014		0
285	P80	0	1	25	40	20	41	15	26	Serbah et al.,2018		1

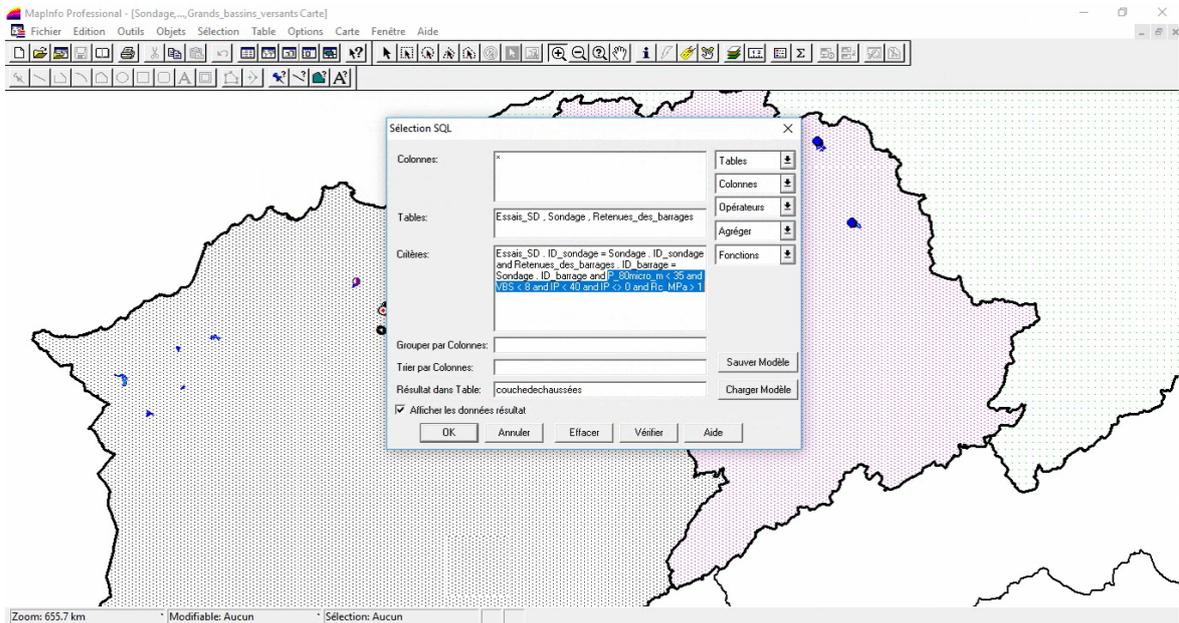
1 à 20 / 20

(a)

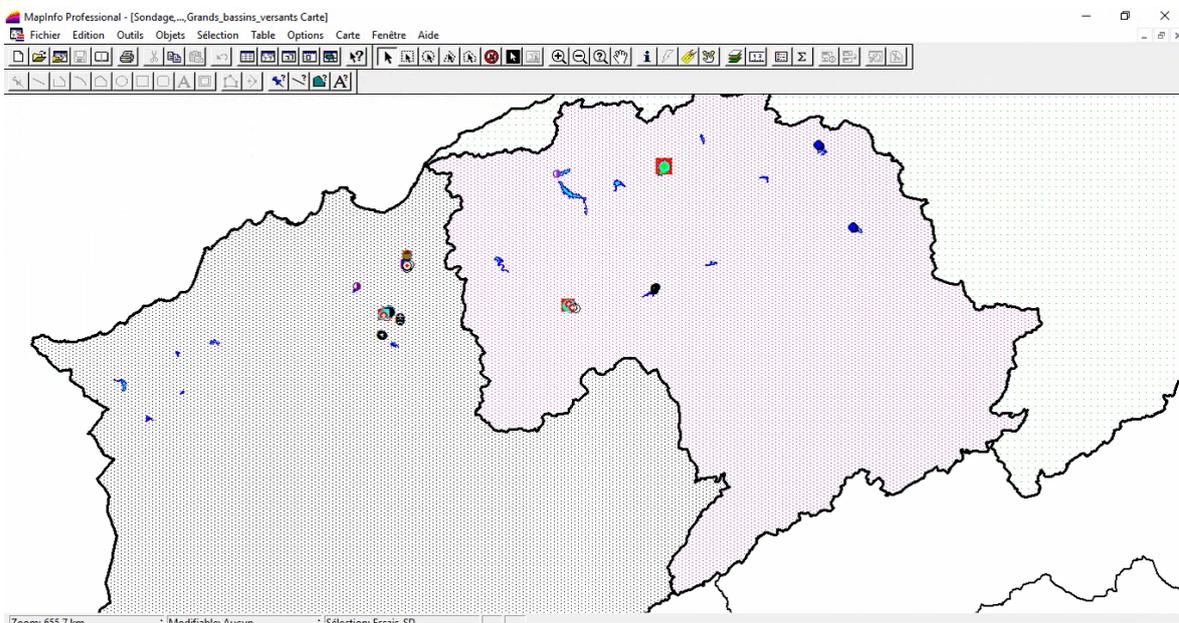


(b)

FIGURE 2.22 – Résultats de taux de MO <3%



(a)



(b)

FIGURE 2.23 – Résultats des barrages qui remplissent les conditions de jugement pour utiliser les sédiments en technique routière

### 2.6.2 Analyse thématique

L'analyse thématique permet de visualiser de manière graphique les données attributaires (un ou plusieurs champs) liées aux objets de la carte. Les données de l'analyse thématiques permettent de répondre à trois critères essentielles : l'exhaustivité, la non-redondance et structure, (Martin (1977) cité par [Abdelbaki \[2014\]](#)). Ces données représentent la base descriptive des propriétés thématiques et spatiale du système. C'est également un outil puissant pour faire de l'analyse de l'information géographique. Un exemple, on peut demander au SIG d'afficher le taux d'envasement et la quantité dragée des barrages du nord Algérien en différentes périodes. Cette analyse thématique permet de construire une cartographie thématiques de l'ampleur de phénomène d'envasement et l'estimation de leurs gisements sédimentaires, (figure 2.24).

TABLEAU 2.7 – Le taux d'envasement des barrages de deux régions ouest-Cheliff Zahrez

Région	capacité initiale (Hm <sup>3</sup> )	Date dernier levé bathymétrique	envasement moyen annuel (Hm <sup>3</sup> )	Quantité draguée (Hm <sup>3</sup> )
Ouest	1205	2004	9.15	39
Cheliff	2210	2005	23.80	13

Le tableau 2.7 montre l'ampleur de phénomène d'envasement et l'estimation leurs gisements sédimentaires. Il est intéressant de constaté que la quantité des sédiments dragués dans le nord d'Algérie est suffisante comme un gisement pour créer des usines de briqueterie et d'autres matériaux de construction.

### 2.6.3 Choix de valorisation des sédiments

Des travaux de dévasement gigantesques ont été entretenus dans plusieurs barrages algériens en l'occurrence les barrage de l'ouest algérien mais se sont avérés destructeurs de l'environnement puisque des quantités considérables de vase sont déversées dans la nature portant un préjudice écologique incontournable. C'est pour cette raison qu'il faut tirer la sonnette d'alarme et sensibiliser les chercheurs à étudier tous les aspects chimiques, physiques, minéralogiques et mécaniques de la vase draguée des barrages afin d'en tirer profit dans le domaine des matériaux de construction par souci d'économie et contribuer ainsi à la préservation de l'environnement.

Parmi les points essentiels de système d'information géographique est de localiser les travaux divers de valorisation de sédiments de dragage.

Pour quel type de construction et dans quel domaine peut ont utiliser le sédiment dragué? la superposition des données nous a permis d'élaborer la carte de choix de valorisation des sédiments dragués de la zone d'étude, (figure 2.25), donnant les différents domaine possible de valorisation de sédiment de dragage en basant aux résultats de leurs caractéristiques (physico-chimiques et mécaniques).

Plusieurs chercheurs ([[Semcha, 2006](#)], [[Bouchetata and Bouchetata, 2006](#)], [[Remini, 2006](#)], [[Mekerta et al., 2008](#)], [[Benaissa, 2008](#)], [[Serbah, 2011](#)], [[Bourabah, 2012](#)], [[Guessas, 2013](#)], [[Benasla, 2015](#)], [[Sadok, 2013](#)], [[Serbah, 2018](#)]...), se sont penchés sur la gestion et la valorisation des sédiments de dragage. Cette gestion qui commence toujours par une

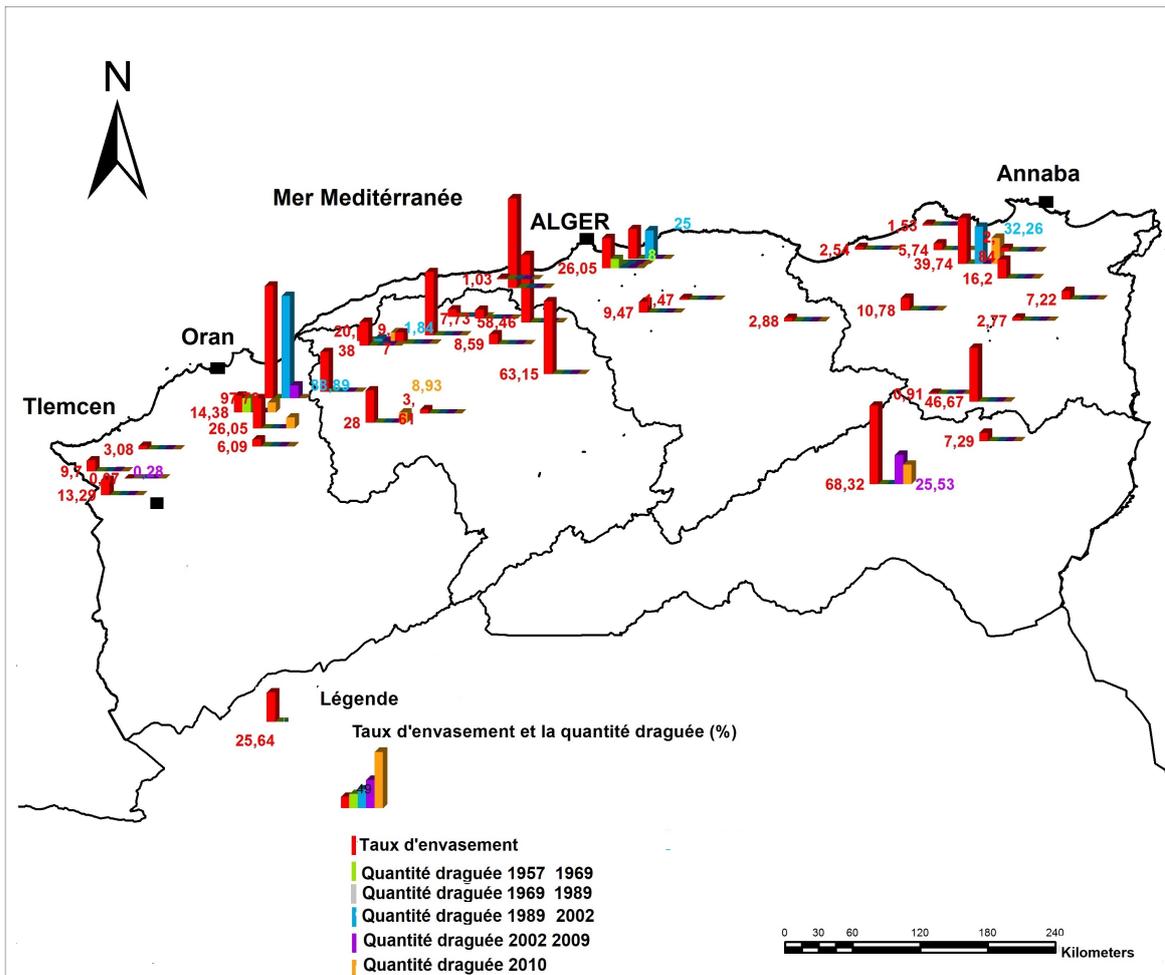


FIGURE 2.24 – Carte du taux d'envasement et la quantité draguée des barrages Algériens.

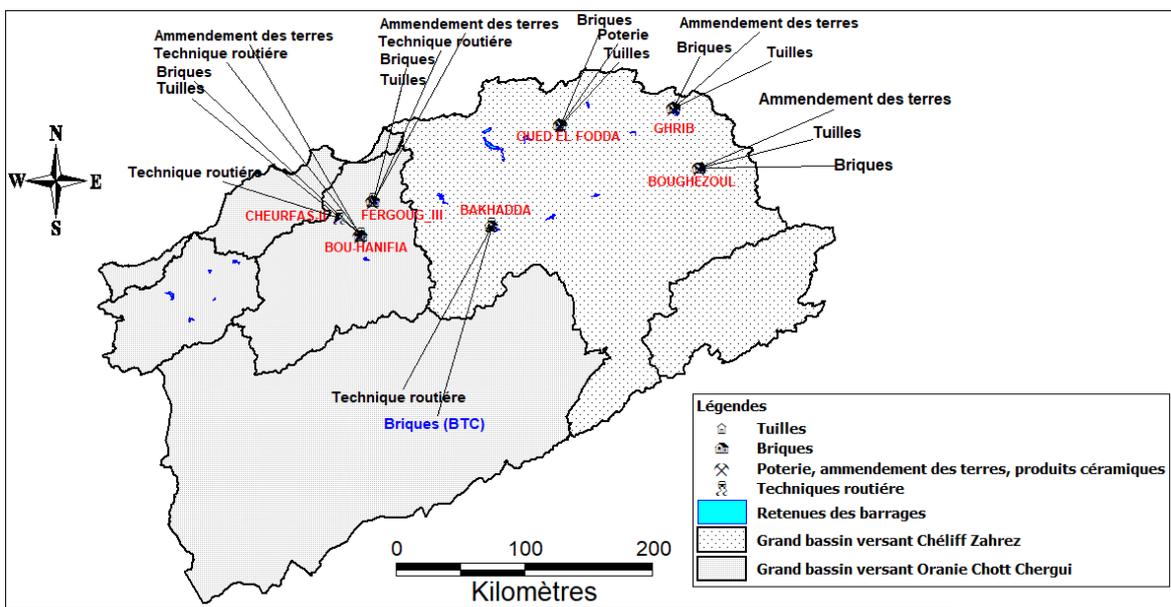


FIGURE 2.25 – Carte du domaine d'utilisation des sédiments de dragage en nord ouest de l'Algérie.

phase de caractérisation a pour objet de déterminer les propriétés qui permettent de préciser les vocations ultérieures du produit. Remini [2006] a étudié la possibilité d'utiliser la vase de 11 barrages les plus envasés en Algérie dans les différents matériaux constructions. Les échantillons ont été prélevés au niveau des vannes de fond de ces barrages.

## 2.7 Conclusion

Ce chapitre consiste à décrire le développement des bases de données géographiques indispensables pour la zone d'étude. La création d'une base de données de sédiments de dragage de l'ouest Algérien comprend deux étapes : La première concerne les relevés et récoltes des données déterminant la quantification, les caractéristiques de sédiments de dragage et la numérisation de ces données à l'aide du SIG. Notre choix s'est porté sur ce système d'information géographique pour bénéficier d'un produit performant, évolutif, largement diffusé auprès des utilisateurs. La deuxième concerne les requêtes établies sur les données spatiales et descriptives sur ces sédiments de dragage ont permis de répondre à certaines questions et critères de jugement de leurs valorisations.

L'analyse et les décisions sont adoptées et les résultats visualisés à l'écran de chaque niveau d'analyse ce qui permet de vérifier la pertinence des décisions prises. Il en découle une cartographie des sédiments de dragage. Le document peut servir comme base pour guider la localisation des sédiments dragués et le choix de valorisation en BTP. L'outil développé pourrait être d'une grande utilité pour les décideurs et les industriels du BTP.

## 2.8 Quelques conclusions concernant toute la première partie du SIG

Le travail présenté ici ne constitue qu'une contribution modeste et une amorce pour la réalisation d'un projet SIG.Barrages.dz beaucoup plus ambitieux. Ce projet doit avoir une dimension nationale. Il nécessite du temps, et surtout l'adhésion des acteurs concernés par le secteur :

- Décideurs publics (ANBT, Ministre des Travaux Publics et des Transports, Directions de l'équipement au niveau des wilayas...) dont le rôle, entre autres, est d'héberger le SIG, d'assurer la maintenance et la mise à jour, et le rendre accessible aux utilisateurs intéressés.
- Entreprises du secteur, laboratoires publics, bureaux d'études, dont le rôle est d'alimenter la base de données du SIG avec des données techniques et des mesures in situ.
- Laboratoires de recherches universitaires qui alimenteront la base avec des résultats de leurs recherches scientifiques sur les propriétés hydro-mécaniques et physico-chimiques des sédiments de dragage.

## **Deuxième partie**

# **La construction en terre : Synthèse bibliographique**



# Chapitre 3

## La terre : un matériau de construction non saturé

*« Pour que les arbres et les plantes s'épanouissent, pour que les animaux qui s'en nourrissent prospèrent, pour que les hommes vivent, il faut que la terre soit honorée. »*

---

Pierre Rabhi

### Sommaire

---

3.1	introduction . . . . .	58
3.2	Les propriétés de la terre en tant que matériau de construction . . . . .	58
3.2.1	Définition du sol (terre) . . . . .	58
3.2.2	Composition . . . . .	58
3.2.3	Les propriétés des argiles . . . . .	59
3.2.4	Différents états de l'eau dans le sol . . . . .	62
3.3	La terre : un milieu poreux granulaire non saturé . . . . .	63
3.3.1	Non saturation : Notion de succion - Interaction eau/terre . . . . .	63
3.3.2	La capillarité . . . . .	63
3.3.3	Les propriétés hygrométriques . . . . .	64
3.3.4	La succion . . . . .	69
3.3.5	Techniques de contrôle et de mesure de la succion . . . . .	71
3.3.6	Effet de la succion sur le comportement du sol non saturé . . . . .	74
3.3.7	Effet du compactage sur sol . . . . .	82
3.4	Conclusion . . . . .	89

---

### 3.1 introduction

Pourquoi construire en terre ? la terre est un matériau qui possède énormément d'avantages : c'est un « véritable matériau écologique », inépuisable et recyclable, économe en énergie, à forte inertie thermique, aux propriétés acoustiques élevées, aux capacités d'assainissement de l'air et aux grandes qualités esthétiques. Nos ancêtres avaient simplement du bon sens, ils ont fait avec ce que la nature leur offrait.

Aujourd'hui, nous recherchons des solutions techniques et des procédures propres à augmenter la durée de vie de ce matériau terre en combinant l'action de bonne condition de mise en œuvre à celle de la protection des surfaces exposées aux intempéries (périodes sèches et périodes humides). Un de ses inconvénients majeurs est toutefois sa fragilité à l'eau.

Les propriétés de la terre sont changeantes et dépendent de la nature et du mélange complexe des fractions granulaires qui les composent. La connaissance de ces propriétés chimiques et physiques permet de préciser la qualité et le comportement d'une terre pour la construction (Rigassi, 1995) cité par [Taallah, 2014]. Dans ce chapitre, on présente les propriétés du matériau terre en tant que matériau non saturé dans lequel il se produit des interactions entre les phases solides, liquides et gazeuses.

### 3.2 Les propriétés de la terre en tant que matériau de construction

#### 3.2.1 Définition du sol (terre)

Le sol est un mélange de diverses substances naturelles, incluant des constituants solides (grains) et les constituants fluides (l'eau et l'air, figure 3.1). La combinaison de particules solides forme le squelette granulaire de la terre et lui apporte sa rigidité, [Kolihi, 2008]. En surface, la terre est la matière du sol immobilisée ou au contraire mobilisable par les vents et les flots ; cette précieuse couche résulte de l'altération des roches. Lorsqu'ils sont meubles et contiennent peu de matière organique, les niveaux superficiels des sols sont utilisables pour la construction en terre, [Van-Damme and Houben, 2017].

$V_w$  : volume d'eau

$V_a$  : volume d'air libre (gaz)

$V_v = V_a + V_w$  volume des vides

$V_s$  : volume des grains de sol

$S_r = V_w / (V_a + V_w)$  degré de saturation.

Un sol est dit non saturé si le volume d'air libre est non nul :  $V_a > 0 \Rightarrow S_r < 1$ .

#### 3.2.2 Composition

La terre est un milieu complexe formé de sable, de limon, d'argile (<2  $\mu\text{m}$ ). Il s'agit d'un milieu fortement hiérarchisé dont les échelles structurales vont du nanomètre au millimètre. Les argiles jouent le rôle des liants dans les constructions en terre. La structure du sol, quelles que soient ses causes de formation, a été divisée en trois catégories selon Collins et McGown (1974) cité par Kolihi [2008] :

1. Les arrangements de particules élémentaires : constitués de formes individuelles de particules au niveau d'argile, limon, sable, ou de petits groupes de plaquettes

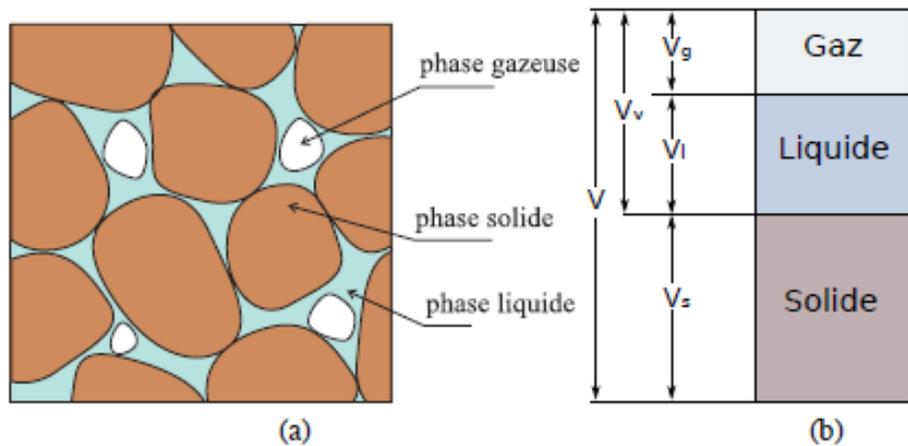


FIGURE 3.1 – (a) Schéma d'un milieu granulaire humide avec une phase gazeuse occluse. (b) les trois phases du sol naturel, [Gras, 2013].

d'argile ou de limon revêtues et des particules de sable. La combinaison de ces arrangements forme différents modèles de structure au niveau de l'arrangement des particules élémentaires, (figure 3.2).

2. Les assemblages de particules : Les particules élémentaires ont tendance à se regrouper plutôt qu'à exister en tant que particules individuelles.
3. Les espaces de pores : sont définis comme étant l'espace à l'intérieur entre les particules élémentaires et les assemblages de particules.

### 3.2.3 Les propriétés des argiles

Les argiles sont des minéraux silicates  $SiO_2$ , invisibles à l'œil nu et sont classées dans la sous-famille des phyllosilicates. Si on les observe au microscope, on pourra voir que ces grains très fins sont de formes variées tout en étant toujours plus fines que larges et longues « feuillets microscopiques » ou des « plaquettes », comme la kaolinite, l'illite, chlorite, qui présentent beaucoup moins de gonflement lorsqu'elles sont mouillées et de rétrécissement ou de fissuration lorsqu'elles sont sèches et sont donc plus appropriées pour la construction en terre, (Figure 3.3).

Par contre la smectite ou la montmorillonite présente une grande variation de volume en humidité et en séchage, (figure 3.4).

La représentation polyédrique du feuillet de smectite, faisant apparaître en transparence les substitutions isomorphes, en vert et orange dans la couche octaédrique, et en gris dans la couche tétraédrique, [Anger, 2011].

Les feuillets d'argile sont composés de plusieurs couches d'oxydes tétraédriques et octaédriques. La structure essentielle est une couche bidimensionnelle continue tétraédres d'atomes d'oxygène coordonnant des atomes de Si et éventuellement d'Al ou Fe. Cela composé de trois ou quatre plans d'anions (ions négatifs), tel qu'hydroxyle  $OH^-$  ou oxygène  $O^{2-}$ , entre lesquels s'insèrent de petits cations (ions positifs), principalement de silicium, d'aluminium et de magnésium. La charge nette de feuillet dépend des proportions d'anions et de cations, (figure 3.5).

Les argiles ont donc une structure en couches formées de feuillets superposés (empilement de feuillets) et glissent les uns contre les autres conférant à l'argile une certaine plasticité avec la présence de l'eau.

Elles peuvent être considérées comme liant, la source de la cohésion de la terre crue,

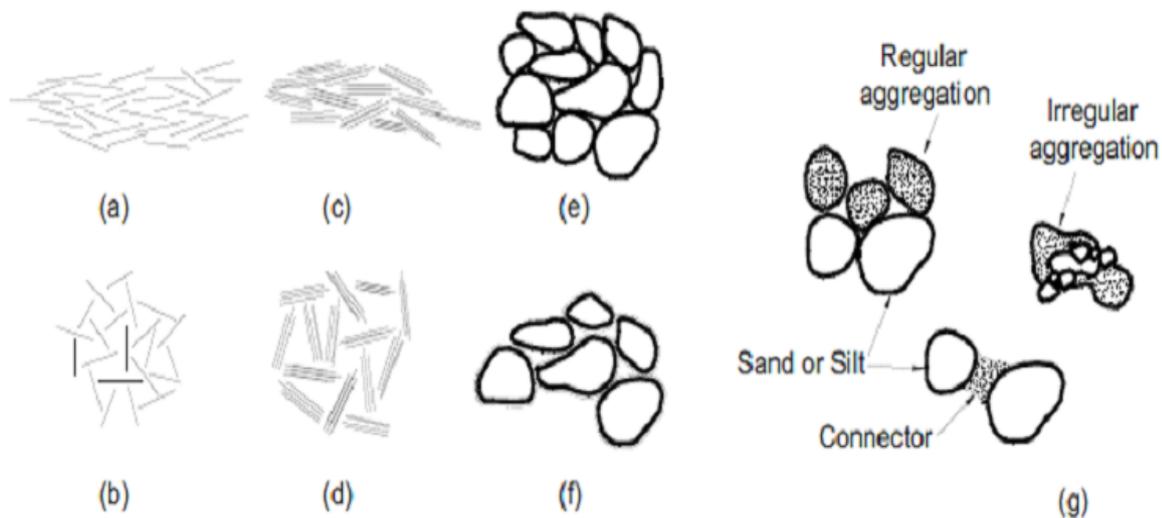


FIGURE 3.2 – Schéma des arrangements de particules élémentaires et assemblages de particules (d’après Collins et McGown, 1974), (a) l’interaction individuelle des plaquettes d’argile et structure dispersée. (b) L’interaction individuelle des plaquettes d’argile et structure floculée. (c) L’interaction de groupe de plaquettes d’argile et structure turbostratique. (d) L’interaction de groupe de plaquettes d’argile et structure bookhouse. (e) L’interaction individuelle de limon ou du sable, (f) Limon revêtu ou l’interaction de particules du sable, (g) Assemblage de particule, [Koliji, 2008].

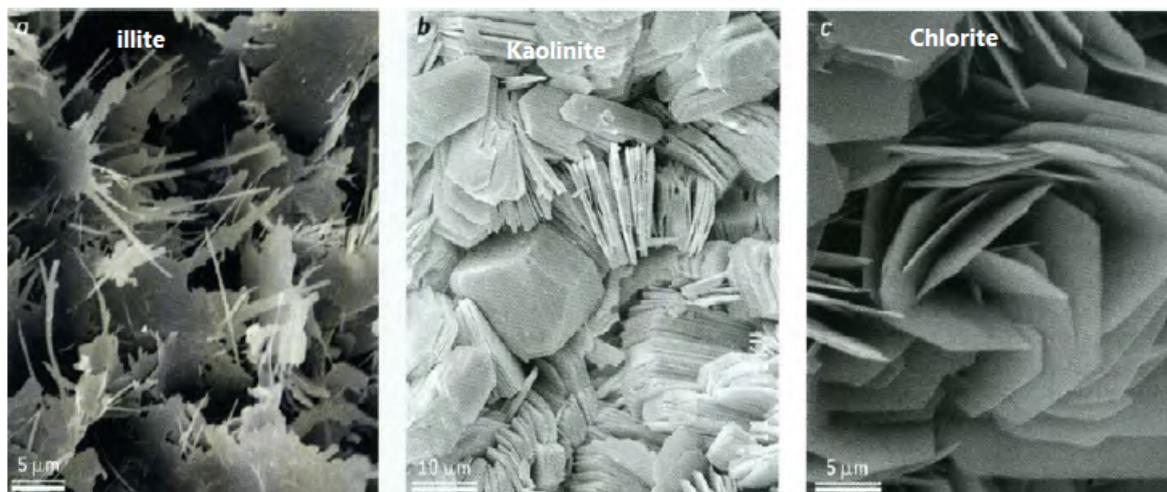


FIGURE 3.3 – Particules d’argile vues au microscope électronique, [Van Damme, 2013].

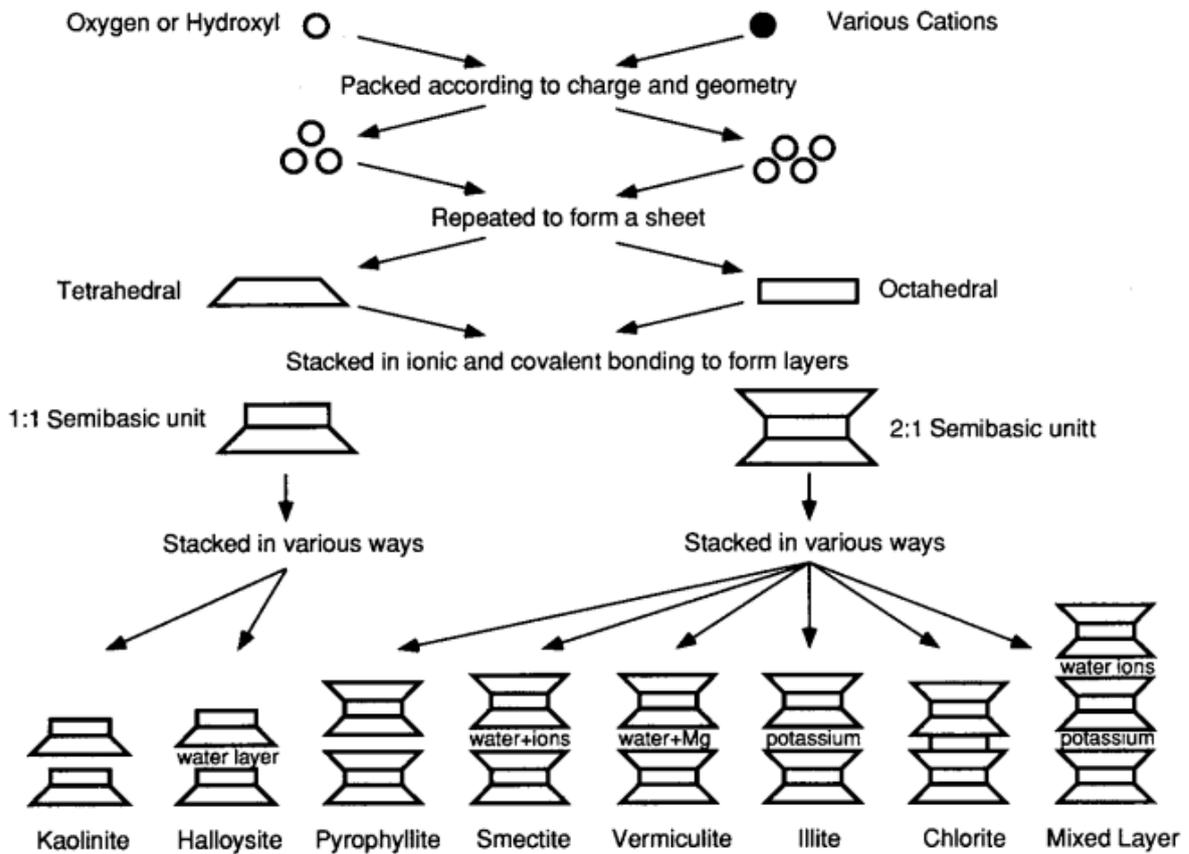
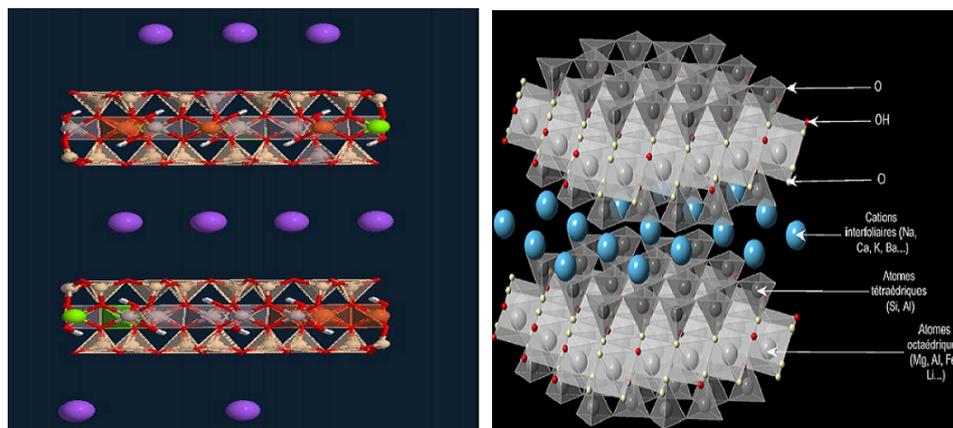


FIGURE 3.4 – Schéma des modèles de minéraux argileux, [Mitchell and Soga, 2005].



(a) Structure d'une smectite en 2d

(b) une smectite en 3d

FIGURE 3.5 – Le feuillet est constitué de 4 plans d'atomes d'oxygène entre lesquels viennent se loger des atomes de silicium, d'aluminium, de fer ou de magnésium, [Anger, 2011].

qui est expliqué essentiellement par les forces de capillarités et, dans une moindre mesure, les forces de van der Waals et de corrélation d'ions, ([Gelard, 2005], [Van-Damme and Houben, 2017]).

La structure chimique des particules de terre et les très petites tailles de l'espace poreux impliquent l'existence d'énormes forces de nature électrostatique (Adsorption).

Ces forces capables de retenir au niveau des surfaces extérieures des minéraux molécules d'eau et des cations. Cela signifie que son activité de liaison aux molécules d'eau est plus grande, si le sol est peu humide. En conséquence, l'eau est fortement retenue. Lorsque le sol est complètement saturé, les forces de retenue d'attraction sont nulles.

### 3.2.4 Différents états de l'eau dans le sol

L'eau est le liant de la terre qui peut se trouver dans plusieurs états suivant l'intensité des forces liant aux particules solides, (figure 3.6).

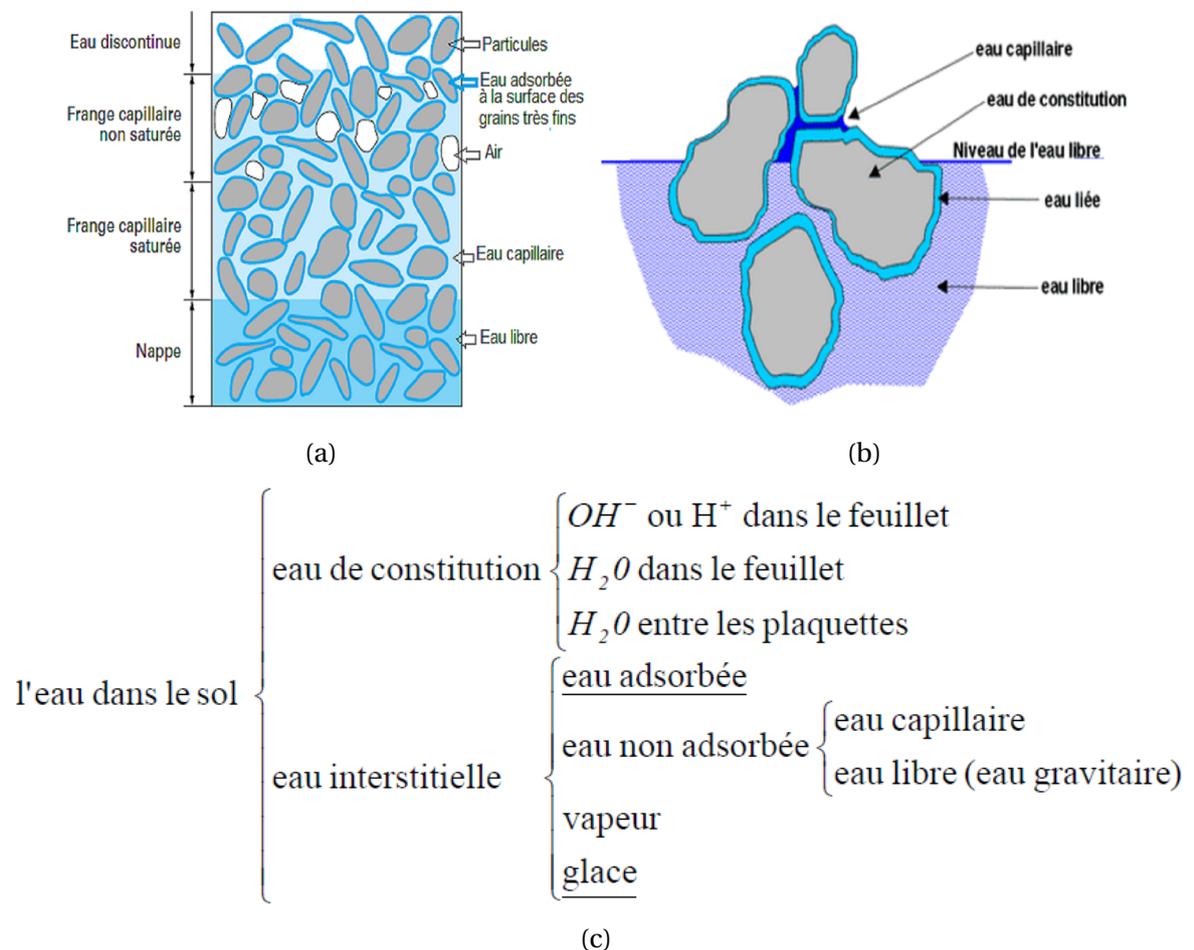


FIGURE 3.6 – Différents états de l'eau dans le sol, ([Magnan, 2015], [LI, 1999])

- L'eau de constitution qui rentre dans la structure cristalline des minéraux dont les particules de sol sont formées, elle a une position fixe, soit sous forme d'ions  $OH^-$  et  $H^+$ , soit sous forme de molécules  $H_2O$ . Elle peut s'éliminer à une température supérieure à  $550^\circ C$ .
- L'eau d'adsorption ou liée à la surface par des grains très fins, est orientée par les forces d'attraction moléculaire et les forces électrostatiques. Elle ne peut s'échapper du matériau qu'en le portant à des températures supérieures à  $105^\circ C$ .

- L'eau libre qui circule librement dans les pores du sol sous l'effet des forces de pesanteur, elle peut être éliminée par séchage à l'étuve à une température supérieure à 105°C.
- L'eau de capillarité (Frange capillaire) se trouve dans les pores du sol non saturé (l'interface eau-air), comme le matériau terre qui contient une quantité d'eau allant de 0,5 à 2% qui permet d'assurer sa cohésion via les ponts capillaires, ([Gelard, 2005], [Couvreur, 2014]).

Les molécules d'eau sont soumises à un ensemble de forces d'interactions non équilibré, à la différence d'une molécule située au sein du sol saturé. Elles sont donc attirées vers la masse d'eau et la surface de l'eau qui est soumise à une force perpendiculaire à la surface libre. C'est cette attraction qui engendre une tension superficielle à l'interface.

En général, l'eau interstitielle avec son état, ses caractéristiques physico-chimiques, ses interactions aux autres phases du sol influencent fortement sur les propriétés mécaniques, l'état de plasticité, la résistance au frottement, la consistance, etc.

### 3.3 La terre : un milieu poreux granulaire non saturé

#### 3.3.1 Non saturation : Notion de succion - Interaction eau/terre

L'ensemble des problèmes pratiques liés au sol non saturé sera mieux perçu avec une meilleure connaissance du statut de l'eau dans les sols non saturés. Le caractère triphasique des milieux non saturés, existence d'une phase gazeuse en plus des phases liquide et solide complique le comportement du matériau terre par le développement de ménisques eau-air au sein du squelette du sol.

La résistance d'un élément de terre crue dépend directement de la quantité d'eau qu'il contient. La résistance du matériau terre diminue lorsque sa teneur en eau augmente (les ponts capillaires sont saturés).

#### 3.3.2 La capillarité

L'ascension ou la dépression d'un liquide (eau) dans un milieu poreux est provoquée par la tension superficielle ( $\sigma_s$  : la tension de surface eau-air). Elle dépend des grandeurs relatives de la cohésion du liquide et de son adhésion aux pores (contacts des parois des grains). Les liquides s'élèvent dans le milieu poreux qu'ils mouillent (adhésion > cohésion) et s'enfoncent dans les pores qu'ils ne mouillent pas (cohésion > adhésion).

La figure 3.7 présente les actions des forces sur une molécule d'eau, [Delage and Cui, 2000]. Chaque molécule d'eau située à l'interface eau-air va être soumise à des actions dues au liquide et actions dues au gaz, (figure 3.7a). Une molécule d'eau située au sein du milieu va être soumise à un ensemble des forces de même nature exercées dans toutes les directions par les molécules voisines, (figure 3.7b).

Dans un sol non saturé, la pression d'eau est toujours inférieure à la pression de l'air. La densité de l'air à la pression atmosphérique est d'environ  $1,2 \times 10^{-3}$  à 20°C, [Salager, 2011].

L'eau a la capacité de former des ponts entre les grains. Ces ponts sont dits «capillaires», Ils résultent de la tension superficielle de l'eau. La surface de contact entre eau et air s'accroît, si on éloigne les grains et par conséquent le système tente de rapprocher les deux grains car l'eau cherche à minimiser sa surface de contact avec l'air. Elle fonctionne comme un ressort, (figure 3.8b, [Couvreur, 2014]).

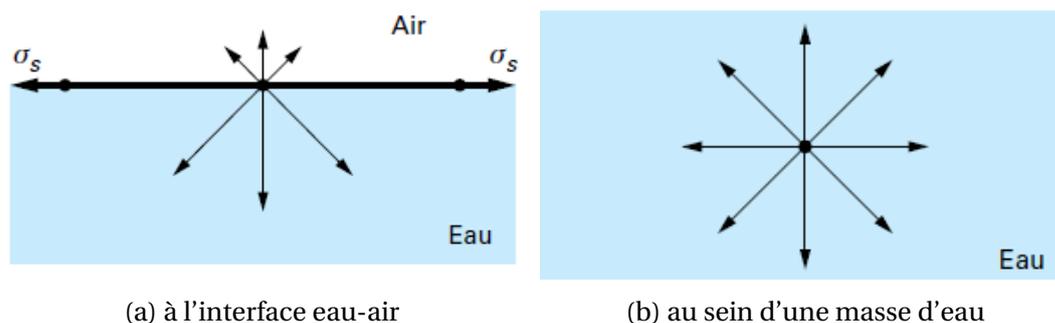


FIGURE 3.7 – Actions des forces sur une molécule d'eau, [Delage and Cui, 2000]

La cohésion dans le matériau de terre (BTC, pisé et adobe) est assurée par l'argile.

Dans les travaux théoriques, la cohésion a été considérée aux niveaux particuliers comme la somme des forces attractives moins la somme des forces répulsives. Elle dépend de façon subtile des conditions hydriques et les contraintes appliquées, dont les liaisons s'expriment par les forces de pression d'eau agissant sur les grains du sol par l'adsorption et le phénomène capillaire (multiplication des nombres des ponts capillaires) et d'autres forces entrent en jeu, liées aux forces de frottement entre grains qui les empêchent de glisser facilement les uns sur les autres (contacts frictionnels secs et lubrifiés) dans les sables, les graviers, (figures 3.8c, 3.8a).

Dans les sols cohérents comme les argiles et certains limons, la nature de l'interaction est plus complexe impliquant des liens chimiques internes. Toutes ces forces sont connues comme des forces d'interaction sol-eau et leur intensité est exprimée par la succion du sol, également appelé la succion matricielle, (figure 3.8a). Elles peuvent présenter une résistance étonnante, malgré l'absence de liants chimiques (ciment, chaux).

### 3.3.3 Les propriétés hygrométriques

Les matériaux en terre peuvent absorber la vapeur de l'humidité relative ambiante et la relâcher (désorber) dans des milieux secs, avec des changements typiques du poids d'environ 3-4%, [Bruno et al., 2015]. Ils sont aussi exposés à des variations de pression, de température. Par ailleurs, le matériau de terre a la possibilité de transfert de l'eau en état liquide (absorption) du sol vers le mur en contact avec le terrain. Ces remontées capillaires se produisent en cas de fondations et de soubassements constitués de matériaux à porosité fine et ouverte.

Que se passe-t-il lorsqu'on met au contact de l'eau un matériau comme la terre crue, connue pour être très sensible à l'eau ?

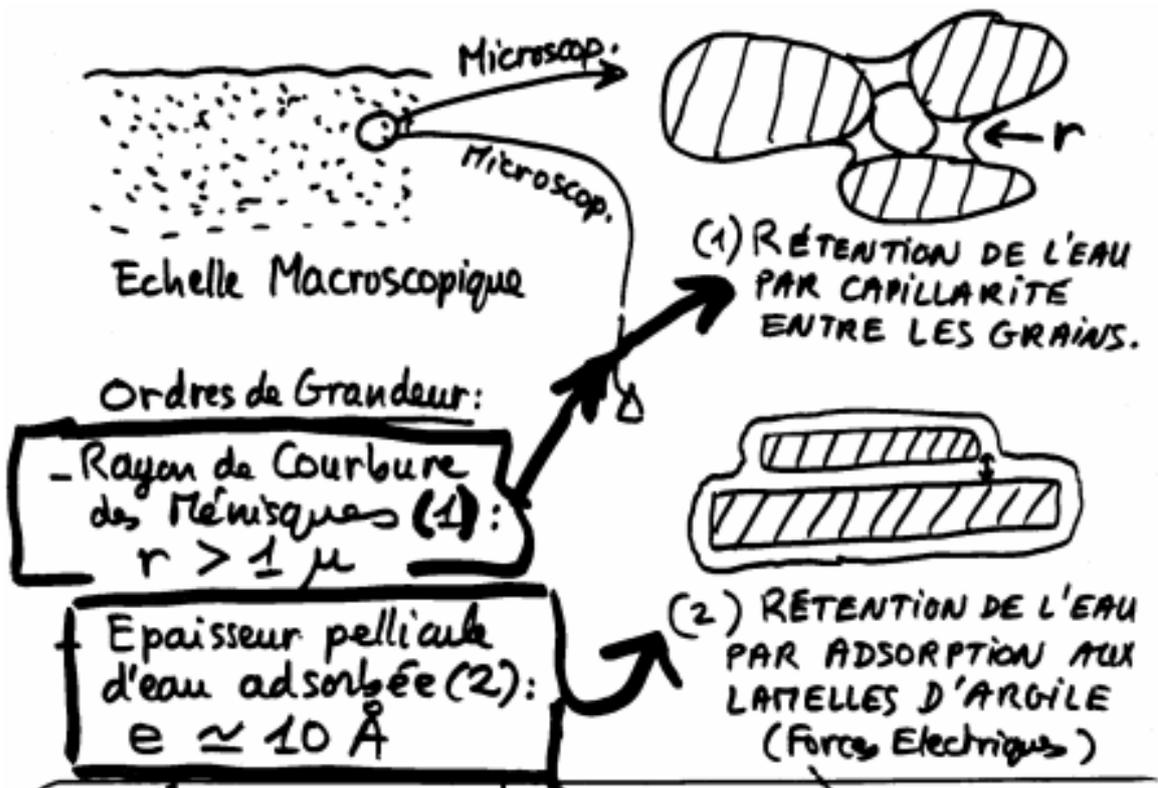
[Couvreur, 2014] a présenté dans ses travaux l'expérience de la remontée capillaire pour les blocs de pisé qui a été réalisée par Maxime Nicolas et Blanche Dalloz 2014,

L'action de capillarité des pores provoque l'absorption rapide de toute l'eau libre qui se trouve en contact avec les blocs en terre. L'eau monte progressivement dans le bloc, le niveau de l'eau n'est plus qu'à quelques centimètres du haut du bloc, (figures 3.9, 3.10).

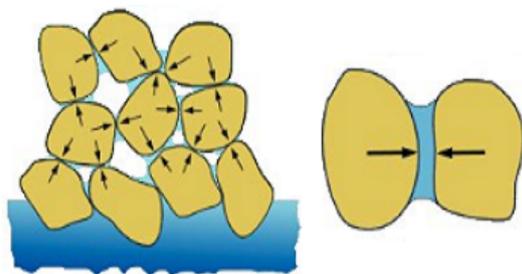
Cette expérience s'apparente en réalité à un test d'absorption d'eau tel qu'on le pratique pour déterminer la capacité d'absorption capillaire des matériaux.

Plusieurs chercheurs montrent que la quantité d'eau absorbée par la terre au bout de 5 minutes varie entre 0,15 et 0,74%, contre 0,77 à 1,29% pour la brique cuite et 0,31% pour le béton, [Couvreur, 2014].

La conductivité hydraulique d'un échantillon non saturé dépend de son état hydrique,



(a) Les liaisons eau-grains en zone non-saturée.



(b) Une goutte d'eau placée entre deux billes forme un pont capillaire.

(c) Schéma des forces capillaires dans les sols non saturés.

FIGURE 3.8 – Les ponts capillaires dans les sols non-saturée, [Couvreur, 2014].



FIGURE 3.9 – Placé au contact d'un tissu humide, ce bloc de pisé se charge d'eau. Au bout de 24h, [Couvreur, 2014].

[LI, 2015]. L'humidité relative est définie comme la pression partielle de la vapeur d'eau rapportée à la pression de la vapeur d'eau saturante. Elle est exprimée en pourcentage. La relation entre l'humidité ambiante et la succion est indépendante du sol. Elle est exprimée en pourcentage.

La figure 3.11 présente la variation de la teneur en eau massique (masse d'eau contenue dans le matériau par rapport à sa masse sèche) au sein du matériau en fonction de l'humidité relative pour une température donnée, dont l'humidité relative est fixée par des solutions salines, ([Hall and Allinson, 2009], [Moëvus et al., 2012]).

Hall and Allinson [2009], Hall and Allinson [2010], Moëvus et al. [2012] ont montré que le réseau poreux dépend de l'arrangement des particules au sein de l'empilement granulaire, dont la forme et la distribution des pores influencent directement sur l'isotherme de sorption qui on peut diviser en trois domaines distincts (hygroscopiques, capillaire et domaine gravitationnel), (figures 3.11, 3.12).

### 3.3.3.1 Domaine hygroscopique

Dans ce domaine, le chemin d'humidification se produit par l'augmentation de la teneur en eau d'une terre sèche peu à peu. Cela se produit en raison de l'influence du potentiel électrostatique (forces de Van der Waals) sur le matériau poreux à l'intérieur des surfaces, ce qui entraîne la fixation des molécules d'eau de l'air ambiant (s'adsorber) sur les parois des pores au sein du matériau. Lorsque l'humidité relative augmente à partir de zéro, l'adsorption sur une seule couche (mono-moléculaire) est passé à l'adsorption multicouche des molécules de vapeur d'eau (multimoléculaire) qui se produisent dans la structure des pores du matériau, (figure 3.11). Dans ce domaine hygroscopique, l'humidité peut être stockée en phase liquide à l'intérieur des pores du matériau et le transport d'eau par capillarité est impossible.

### 3.3.3.2 Condensation capillaire

La condensation se produit dans des rayons de pores étroits, de taille inférieure à  $0,100 \mu\text{m}$  de l'ordre des nanomètres, permettant une condensation capillaire, servent de «lieu de stockage» de la vapeur à partir de  $HR=50\%$ , c'est-à-dire des micro-gouttelettes, la quantité des ménisques, leur taille et leur rayon de courbure dépendent de la pression de vapeur saturante de la phase gazeuse à une humidité relative et température données,

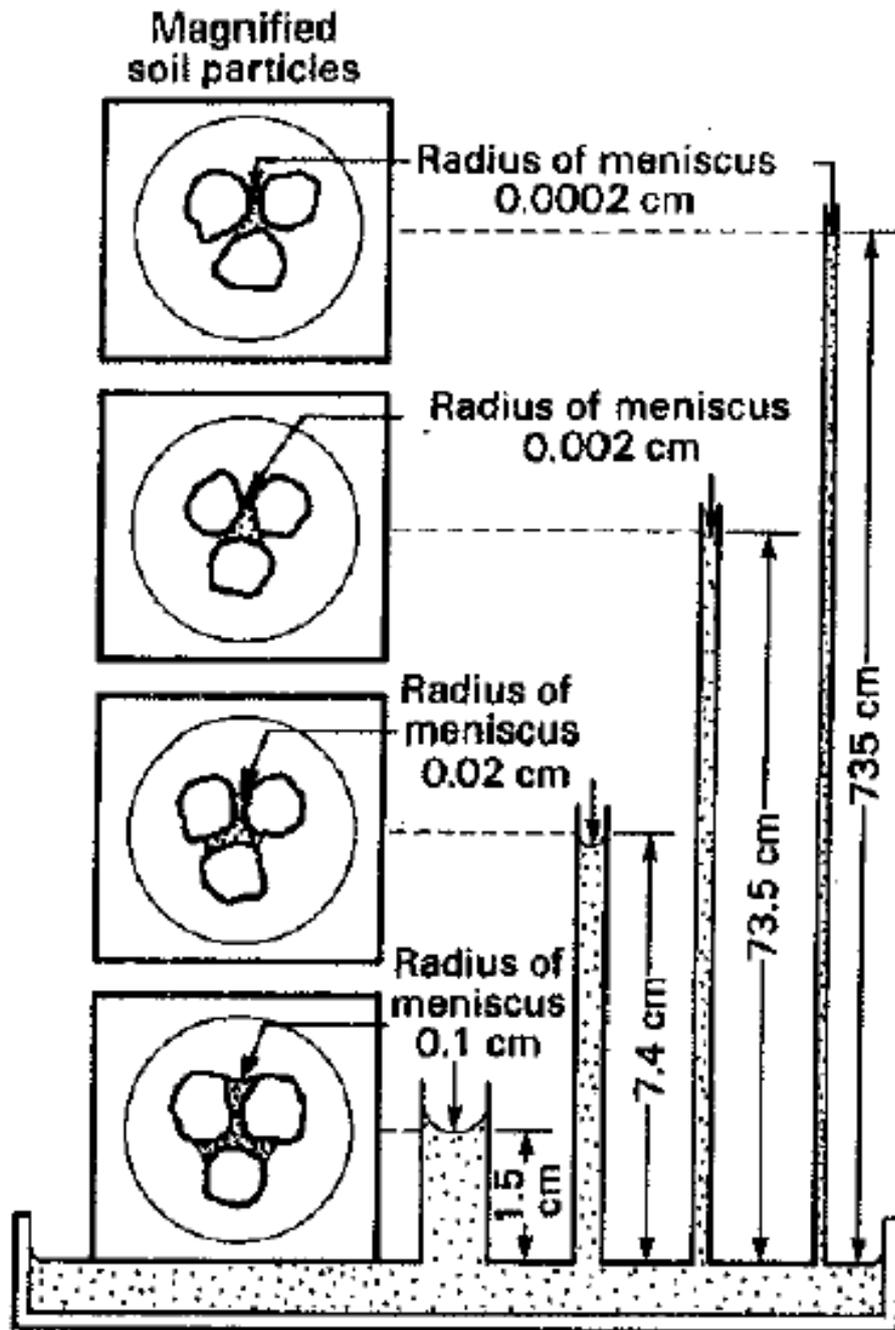


FIGURE 3.10 – Influence du rayon des pores sur la hauteur de remontée capillaire, [Fredlund and Rahardjo, 1993].

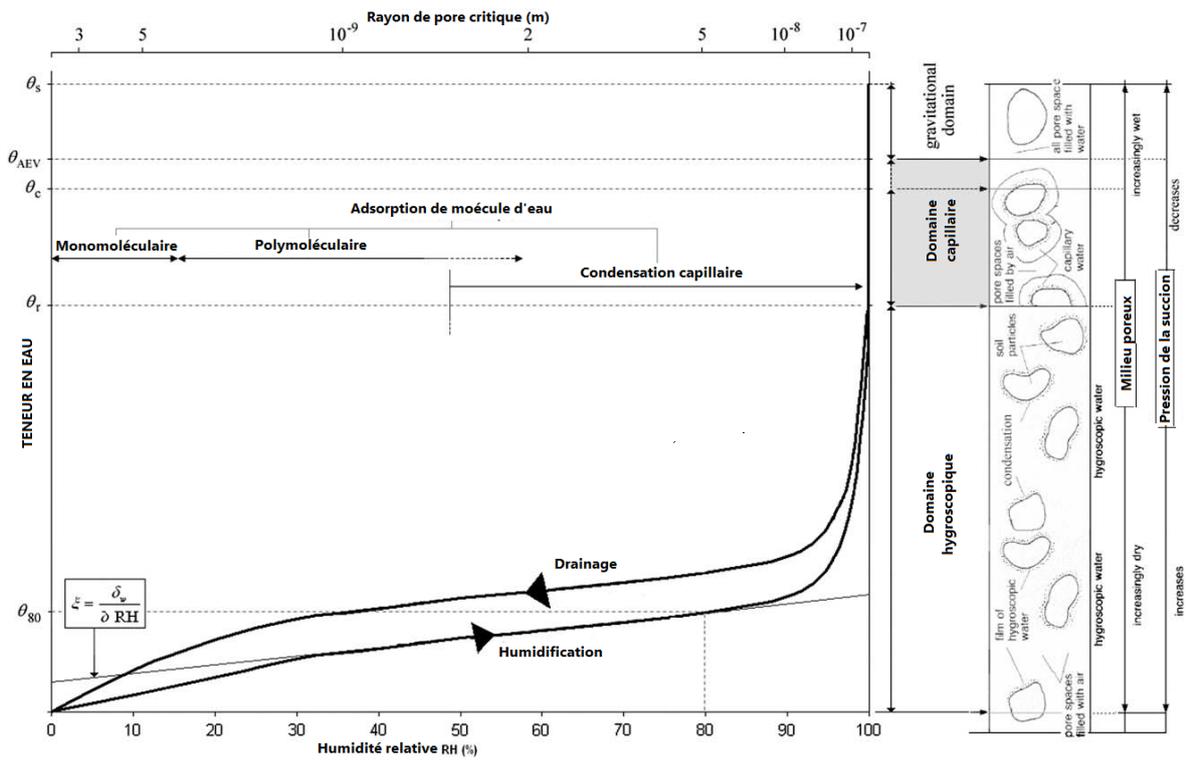


FIGURE 3.11 – Schéma d’un isotherme de sorption de vapeur d’eau de type du matériau hygrothermique, ([Hall and Allinson, 2009], [Hall and Allinson, 2010])

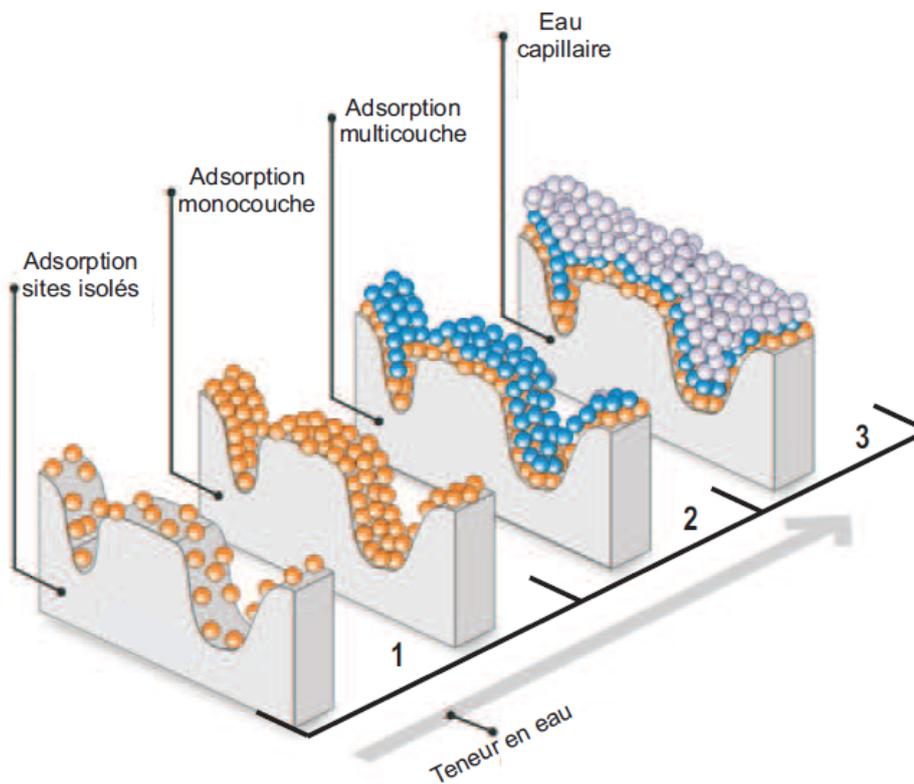


FIGURE 3.12 – Schématisation du processus d’adsorption de molécules d’eau sur la surface d’un solide (Bakrania et Anderson), [Salager, 2011].

de la tension de surface du liquide, et de la géométrie des pores. Le transport de l'eau est gouverné par les forces capillaires.

### 3.3.3.3 Domaine gravitationnel

Au-dessus de ce domaine, dans le chemin d'humidification, l'absorption continuera jusqu'à la saturation capillaire, le transport de l'eau dans les pores  $> 5\mu\text{m}$  ne peut se faire que sous l'effet d'un gradient de pression, action du vent sur un mur en terre par exemple, ou par gravité.

Les travaux de [Jaquin et al., 2008] et [Beckett and Augarde, 2012] indiquent que les matériaux de terre fine retiennent plus d'eau que les plus grossiers au même niveau de succion. Notez que, dans les deux études, les échantillons de terre fine et grossière avaient approximativement la même densité sèche et, par conséquent, le même volume total de pores. Ceci implique que la différence de comportement de rétention est uniquement due aux variations de la distribution de la taille des pores.

Les propriétés mécaniques du matériau se renforcent lorsque l'eau s'évapore. La résistance à la compression du pisé peut être multipliée par trois au cours de son séchage, [Couvreur, 2014].

Plusieurs chercheurs corney et al 1958 et Bishop 1959 cité par Alshihabi [2002], Zur [1966], Williams and Shaykewich [1969] et Kassiff and BenShalom [1971], Richards 1974 cité par Delage and Cui [2000], Alonso et al. [1990], Fredlund and Rahardjo [1993], Fleureau et al. [1993], Taibi [1994], Abou-Bekr [1995], Coussy and Fleureau [2002], Fleureau et al. [2002], Khalili et al. [2004], Gelard [2005] ont étudié et mis en œuvre des approches pour expliquer le comportement des sols non saturés. Ces progrès ont permis de mieux appréhender le comportement des sols non saturés.

### 3.3.4 La succion

En Agronomie : La succion est définie comme la dépression qu'il faut, dans un système isotherme, appliquer à l'eau libre pour amener son potentiel à la même valeur que celui de l'eau contenue dans un échantillon de sol libéré de toute contrainte extérieure. L'unité de cette dépression est le centimètre de colonne d'eau [cmCE] et son logarithme décimal est appelé pF, [Verbrugge, 1974] cite par Coussy and Fleureau [2002].

En géotechnique en 1965 : La succion a été définie en thermodynamique comme une énergie potentielle comparable à la charge hydraulique dans les sols saturés. Ce potentiel est égal à la quantité de travail par unité de volume d'eau pure, nécessaire pour transporter de façon réversible, isotherme à altitude constante et à la pression atmosphérique, une quantité infinitésimale d'eau depuis un état d'eau pure loin du sol, à celui d'eau interstitielle dans le sol non saturé, [Delage and Cui, 2000].  $\psi$  : le potentiel de l'eau dans un sol non saturé est défini comme la somme des potentiels :

$$\Psi = \Psi_{\text{pression externe}} + \Psi_{\text{pression gravitaire}} + \Psi_{\text{pression osmotique}} + \Psi_{\text{pression matricielle}} \quad (3.1)$$

Dans la figure 3.15, un schéma de mesure de la succion est suggéré. L'eau existant dans le milieu poreux est adsorbée par le sol non saturé jusqu'à ce que l'équilibre des forces est établi. La pression à l'intérieure du ménisque est négative ( $u_w < u_a$ ).

$$\text{succion} : s = (u_a - u_w). \quad (3.2)$$

$u_a$  : La pression de l'air (pore-air pressure).

$u_w$  : La pression de l'eau interstitielle (pore-water pressure).

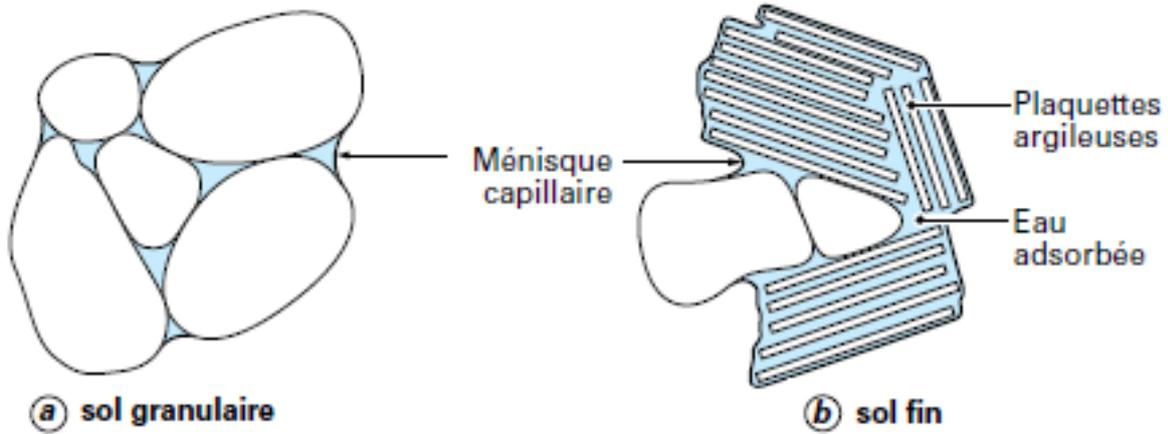


FIGURE 3.13 – Représentation schématique de l'eau au sein d'un sol non saturé : a) sol granulaire , b) sol fin, [Delage and Cui, 2000]

D'après la loi de Jurin-Laplace, la succion est égale au produit de la tension superficielle (Les interactions moléculaires entre le gaz et l'eau) par la somme des 02 courbures principales, des rayon  $r, l$ , (figure 3.14), ([Taibi, 1994], [Arairo, 2013]).

$$u_a - u_w = \sigma_s(1/r - 1/l) \quad (3.3)$$

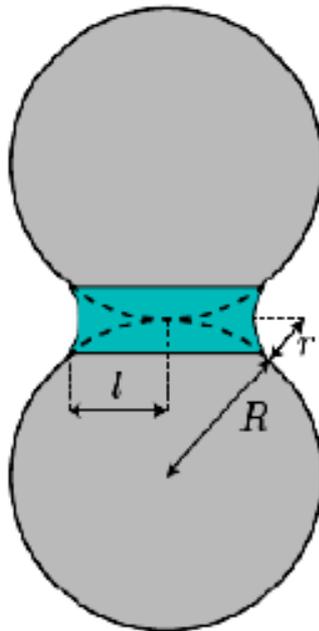


FIGURE 3.14 – Ménisques capillaires dans le cas de grains sphériques, ([Taibi, 1994], [Arairo, 2013])

et égale aussi

$$u_a - u_w = 2\sigma_c \frac{\cos\theta_c}{r} \quad (3.4)$$

$r$  rayon de courbure du ménisque

$\theta_c$  angle au contact solide, liquide et gaz.

$\sigma_c$  tension capillaire, (figure 3.15b).

Dans les argiles (feuille argileux), la succion liée à l'eau d'adsorbée peut se définir comme

la différence entre la pression de l'eau libre  $u_{wl}$  et la pression de l'eau adsorbée  $u_{wa}$  avec  $d_{ads}$  l'épaisseur maximale de la couche adsorbée, (figure 3.15a), l'intensité de la succion croît au voisinage des particules argileuses dont l'épaisseur maximale de la couche adsorbée peut atteindre  $d_{ads} \approx 10$  nm (100Å) dans les particule d'une smectite pure et la teneur en eau serait théoriquement de 800% dans une kaolinite pure ( $d_{ads} \approx 1$  à 2 nm, cette teneur en eau ne serait plus que de 15% ([Mitchell and Soga, 2005], [Boutonnier, 2007], [Dysli, 1997])).

La succion est exprimée en : (KPa,m). Elle peut avoir une large gamme des valeurs (entre 0-10<sup>7</sup>cmH<sub>2</sub>O) et

$$pF = \log_{10}s = \log_{10}\Psi \quad (3.5)$$

Selon certains chercheurs (Aitchison 1965 cité par Fredlund and Rahardjo [1993], Krahn and Fredlund [1971], Edil et al. [1984], El-Ehwan et Huston 1990 cité par (Alshihabi [2002], Fredlund et al. [2000]) définissent la succion totale comme la somme de la succion matricielle  $s_m$  et de la succion osmotique  $s_\pi$ .  $\Rightarrow$

$$s_t = s_m + s_\pi \quad (3.6)$$

Alors, Il est habituel de distinguer dans la pression interstitielle mesurée dans un sol deux composantes, ([Fleureau et al., 1993], [Alshihabi, 2002]) :

- une composante osmotique : qui est la capacité de rétention d'eau par les sels présents sous forme dissoute dans l'eau interstitielle. Elle est due à un déséquilibre de composition ionique entre l'eau interstitielle et la surface des solides (ce terme ne joue aucun rôle dans le comportement mécanique du sol).
- une composante matricielle : par définition est la capacité de rétention d'eau à l'intérieur de la matrice solide du sol qui représente le véritable paramètre du comportement rhéologique du sol ( intervenir à la fois dans les propriété capillaire du milieu, rayon des pores, affinité de l'interface liquide-gaz pour le solide et les propriété d'absorption des minéraux argileux et des ions superficiels).

La succion matricielle est reliée à la pression de pore d'eau négative dans le sol par :

$$s_m = (u_a - u_w) \quad (3.7)$$

D'après Krahn and Fredlund [1971], la différence entre la succion totale ( $s_t$ ) et succion matricielle décroît avec l'augmentation de la teneur en eau initiale et pour mesurer ces derniers, il y a une méthode très simple dite méthode de papier filtre, [ASTM-D5298, 2010], qui permet de mesurer soit la succion totale quand le papier filtre n'est pas en contact avec l'échantillon du sol, soit la succion matricielle quand le papier filtre est en parfait contact avec l'échantillon du sol.

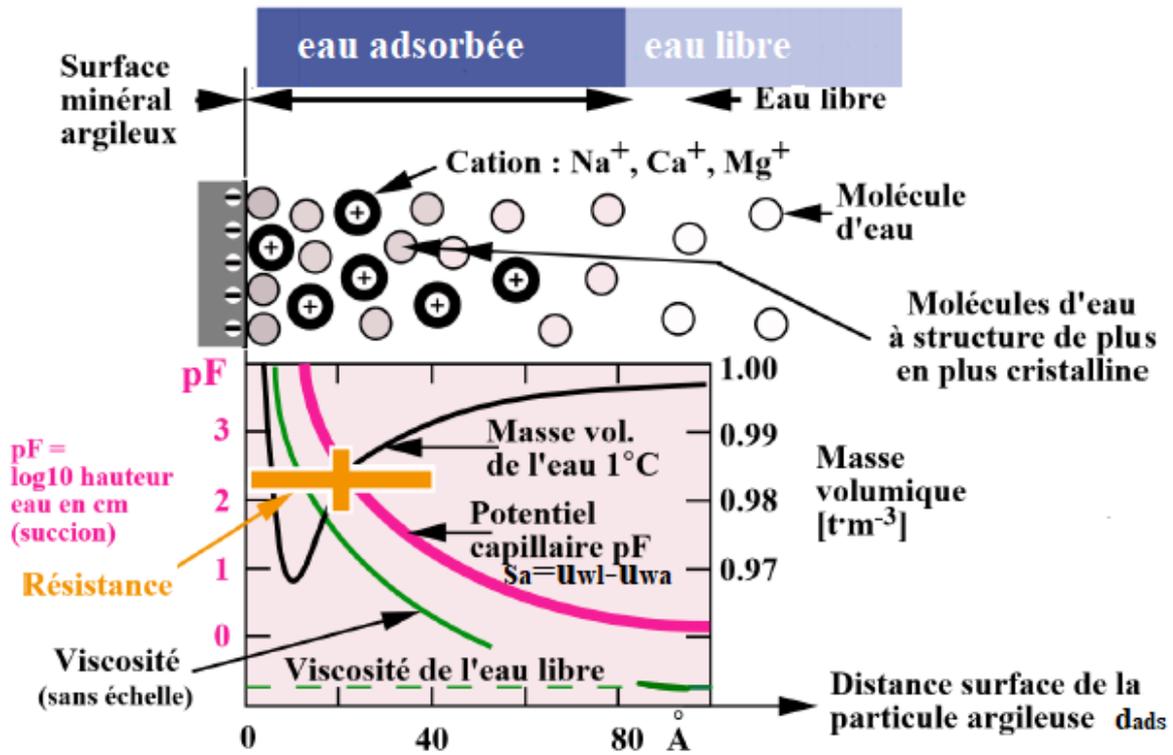
### 3.3.5 Techniques de contrôle et de mesure de la succion

Les différentes techniques utilisées pour la mesure et le contrôle de la succion sont nécessaire pour couvrir toute la gamme de la succion rencontrée dans les sols.

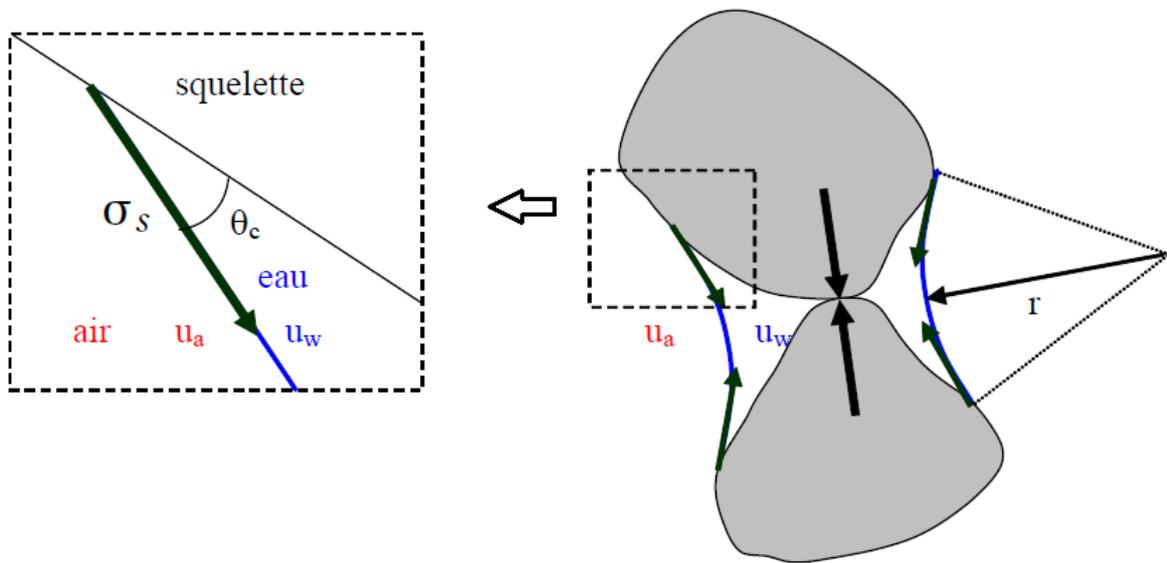
#### 3.3.5.1 La technique de contrôle de la succion

Elle consiste à imposer des succions par différentes méthodes :

- la plaque tensiométrique : la succion contrôlé est entre 0 à 10 kPa,
- la technique de translations d'axes ou surpression d'air (l'appareil de Richard) : la succion imposée est de l'ordre 1.5 MPa,



(a) Schéma explicatif de la suction du sol



(b) représentation des ménisques et augmentation des forces de contact liant les grains de sol : la suction capillaire, [Boutonnier, 2007]

FIGURE 3.15 – Schéma de la suction du sol non saturé

- la technique osmotique : les succions peuvent atteindre 12 MPa,
- la technique de solutions salines permet d'imposer des valeurs de succions < 1000 MPa.

### 3.3.5.2 La technique de mesure de la succion

- le tensiomètre à eau : les succions mesurées sont < 100 kPa,
- la méthode psychométrique mesure la succion entre 300 kPa à 8 MPa,
- la méthode du papier filtre permet de mesurer une large gamme de la succion allant de pF=1 à pF=7.

[Fleureau et al., 1993] ont étudié les différentes techniques de contrôle, mesure d'une large gamme de succion et la comparaison entre-elles pour 11 types des sols argileux afin de définir les principales caractéristiques des chemins drainage-humidification et le rôle de l'état initial. Ils ont montré que la succion contrôlée par la plaque tensiométrique est inférieure à 20kPa. La succion imposée dans les techniques de translations d'axes ou surpression d'air et osmotique est comprise entre 50 à 1500 kPa. La technique de solution saline dans le dessiccateur, la succion est entre 2 à 1000 MPa. Par contre la mesure de la succion par la méthode psychométrique (WESCOR HP115) est d'environ de 0.3 à 6 MPa, (figure 3.16).

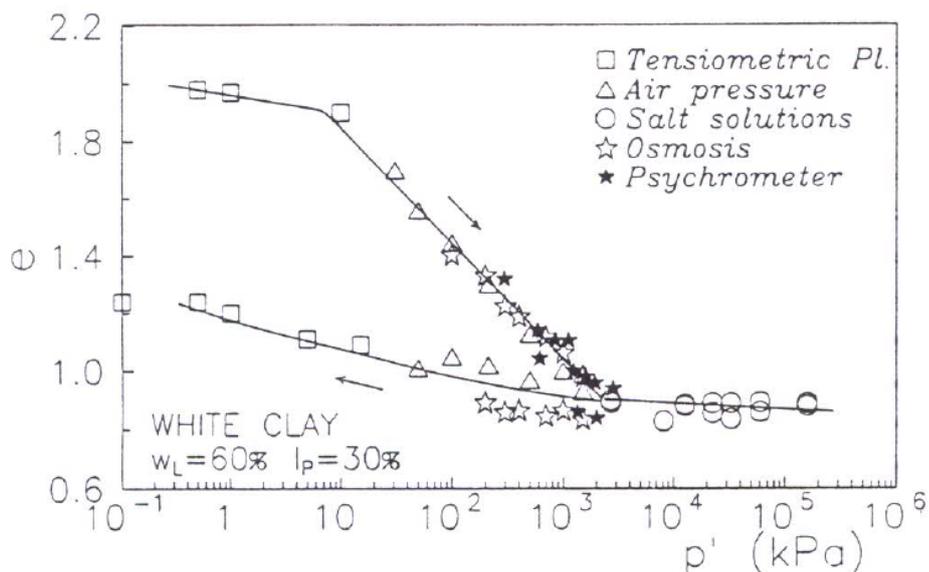


FIGURE 3.16 – Comparaison entre les différentes technique de mesure et contrôle de la succion sur chemin de drainage- humidification de l'argile blanche, [Fleureau et al., 1993].

Plusieurs techniques présentés reposent sur l'utilisation de pierres poreuses céramique très fine porosité qui restent toujours saturées, même lorsqu'elles sont soumises à des pressions d'air, ces pierres permettent d'assurer la continuité de l'eau entre le système de contrôle, de mesure et du sol. La loi de Jurin montre qu'une céramique capable de contenir une pression maximale de 500 kPa devra avoir des rayons de pore inférieurs à 0.29mm, [Delage and Cui, 2000].

### 3.3.6 Effet de la succion sur le comportement du sol non saturé

Pour mieux comprendre l'influence de la succion sur le comportement du sol non saturé, il est nécessaire de savoir contrôler ou imposer la succion dans les sols et tracer les courbes de rétention d'eau. Ces courbes peuvent être employées pour estimer divers paramètres (la compressibilité, limite de retrait, résistances, perméabilité, durabilité, etc.).

#### 3.3.6.1 Effet de la succion sur le chemin de drainage-Humidification

La quantité d'eau présente dans un matériau terre à une influence majeure sur sa succion. Cette relation décrite par la courbe de rétention d'eau qui relie la succion et le degré de saturation  $S_r = S_r(s)$ . La succion diminue lorsque le degré de saturation augmente et vice-versa. Ces courbes sont déterminées en soumettant un échantillon à un cycle de séchage-humidification par application de palier de succion croissante d'un sol initialement saturé, puis décroissante d'un sol initialement sec, et en reportant les valeurs de teneur en eau volumique dans un diagramme « logarithme de la succion / teneur en eau ou degré de saturation », (figure 3.17).

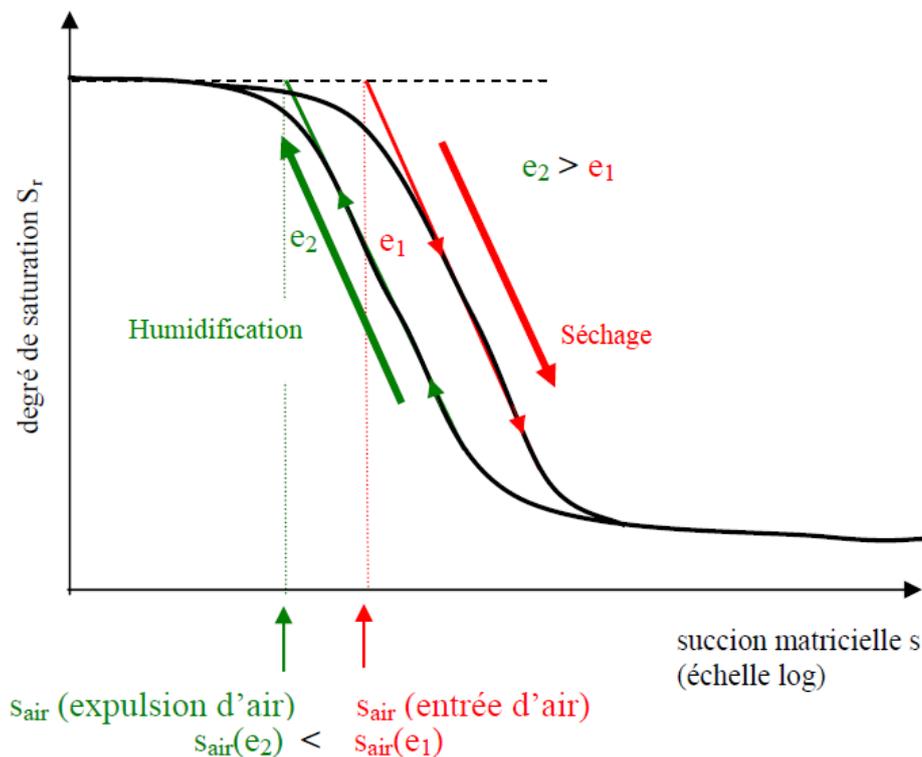


FIGURE 3.17 – Courbes de rétention d'eau (succions d'entrée d'air et d'expulsion d'air) et relations avec l'hystérésis entre chemin humidification-séchage et l'indice des vides, [Boutonnier, 2007].

Une compréhension plus approfondie de l'état de saturation initiale des éprouvettes peut être obtenue à partir de leur courbe de rétention d'eau, avec ses principales propriétés :

1. Définition de la succion d'entrée d'air  $s_{air}$  qui a été introduite par [Brooks and T.Corey, 1964]. Lors d'un séchage, la succion d'entrée d'air correspond à une pression limite appelée pression de désaturation, l'air commence à rentrer dans l'échantillon sous forme gazeuse et continu dont la vidange du plus gros tube et le petit tube connecté en parallèle ne se vide pas, (figure 3.18).

Selon Biarez et al. [1987], Fleureau et al. [1993] et Fleureau et al. [2002], la teneur en eau à la succion d'entrée d'air correspond approximativement à la limite de plasticité PL, dans les sols fins remaniés sans consolidation préalable, par contre les degrés de saturation à l'entrée d'air sont difficiles à mesurer précisément quand ils sont compris entre 90 à 100%.

Pour les sols compactés à l'optimum Proctor [Fleureau et al., 2002] ont montré que les degrés de saturation entre 75% à 90%. Lors de chemins d'humidification, la succion d'expulsion d'air  $s_{air}$  où la phase gazeuse devient discontinue. Dans un chemin de dessiccation, elle est toujours plus faible que la succion d'entrée d'air  $s_{air}$ , (figure 3.17, 3.18).

2. L'hystérésis des cycles de séchage-humidification est typique des milieux poreux constitués de pores de tailles variables inter-connectés en parallèle ou en série (effet de goulot, [Bear, 1969]), dans lesquels l'air est piégé, (figure 3.18). Par ailleurs, l'angle de contact aux chemins d'humidification et séchage est différent.
3. L'effet de l'indice des vides et les mécanismes physiques associés à la succion d'entrée d'air montre que lorsque l'indice des vides diminue, la succion d'entrée d'air augmente, (figure 3.17).

Tous ces points en dessus ont une importance capitale dans le comportement des sols non saturés.

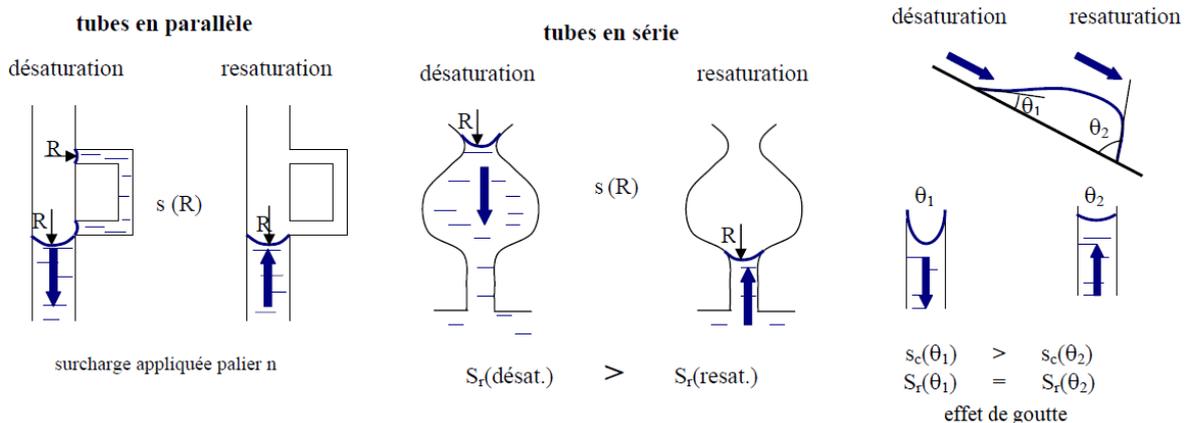


FIGURE 3.18 – Mécanismes invoqués pour expliquer l'hystérésis des courbes de rétention d'eau, [Boutonnier, 2007].

Les pressions d'eau négatives spécifiques (succion) aux milieux non-saturés ont un effet mécanique de rapprochement des composants du milieu poreux.

### 3.3.6.2 Les effets de la succion sur la résistance au cisaillement du sol non saturé

Plusieurs chercheurs ([Delage and Graham, 1995], [Cui and Delage, 1996], [Escario and Saez, 1986], [Fleureau et al., 1993], [Taibi, 1994], [Coussy and Fleureau, 2002], [Delage and Cui, 2001]) ont essayé de mesurer la cohésion en fonction de la succion. Ces auteurs ont observé que la cohésion augmente en fonction de la succion, elle correspond à l'action de cimentation inter-granulaire ou inter-agrégats de la succion. Par contre l'angle de frottement n'augmente pas toujours avec la succion, (figure 3.19).

Dans les travaux de [Croney et al., 1958], [Aitchinson, 1961], [Bishop, 1959], [Jennings, 1961] cité par [Delage and Cui, 2001], les contraintes effectives dans les sols non saturés ont été reliés de façon simple aux contraintes totales et la pression interstitielle négative qui est basées sur la capillarité (la succion capillaire) dans un sol granulaire.

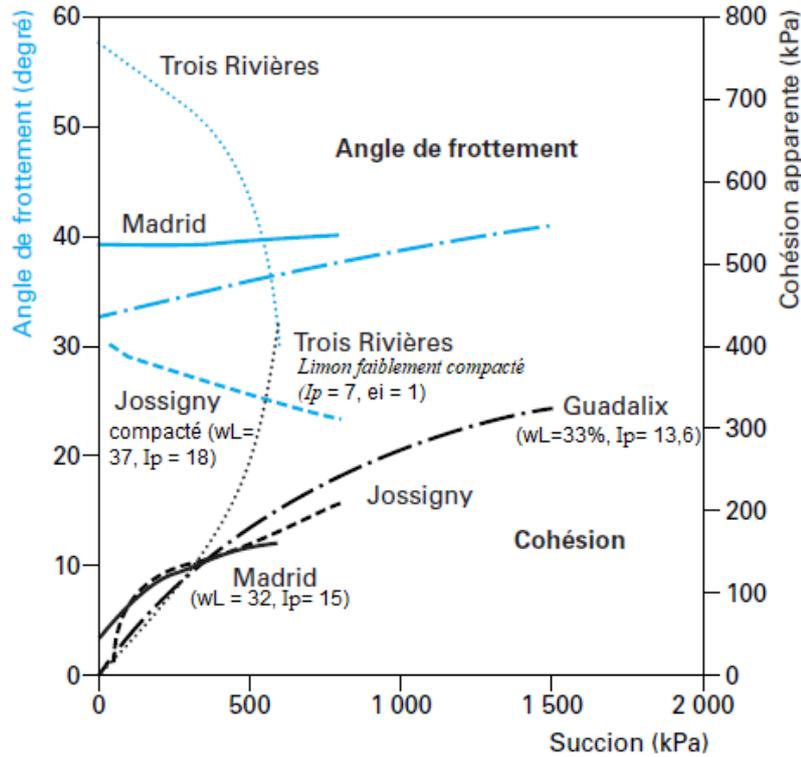


FIGURE 3.19 – Variations de la cohésion apparente et de l’angle de frottement avec la succion pour différents sols, [Delage and Cui, 2001].

Dans les années 1960, [Bishop and Blight, 1963] dans leur travaux ont proposé la notion de la contrainte effective aux sols non saturés, « la contrainte effective est une fonction de la contrainte totale et de la pression interstitielle de l’eau, qui contrôle les effets mécaniques dus à une modification de l’état de contrainte auquel est soumis un élément de sol », [Delage and Cui, 2001].

$$\sigma' = F(\sigma, u) \quad (3.8)$$

[Coussy and Fleureau, 2002] ont expliqué le mécanisme intrinsèque d’un matériau non saturé avec la difficulté d’exprimer le tenseur des contraintes régissant le comportement de ce matériau, phases (eau/air). L’équation de Mohr coulomb devient.

$$\tau = C' + \sigma_{eq} \tan \phi' \quad (3.9)$$

Avec :  $\tau$  : Contrainte de cisaillement,  $\sigma_{eq}$  : La contrainte équivalente en fonction de la succion,  $\phi'$  : l’angle de frottement effectif,  $C'$  : La cohésion effective

1. D’après Bishop and Blight [1963]

$$\sigma_{eq} = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (3.10)$$

Avec  $u_w$  : pression interstitielle de l’eau et  $\chi$  : coefficient de Bishop ( $\chi=0$  sol sec,  $\chi=1$  sol saturé).

2. selon Fredlund

$$\sigma_{eq} = (\sigma - u_a) + \int_0^s \left( \frac{S_r - S_{rr}}{1 - S_r} \right) ds \quad (3.11)$$

avec  $S_r$  : degré de saturation,  $S_{rr}$  : degré de saturation résiduelle et  $s$  : la succion  
 $u_a$  : pression interstitielle dans l’air. La mesure de ces paramétrés ( $u_a, u_w, s, S_r$  et  $S_{rr}$ )

n'est pas facile en continu lors des essais mécaniques sur les échantillons non saturés.

3. [Abou-Bekr, 1995] utilise une approche micromécanique, [Taibi, 1994] en définissant  $s_{max}$  comme une fonction de la tension superficielle, de la densité et de la granulométrie du sol. Il aboutit à l'équation :

$$\chi = \frac{s_{max}}{s} \cdot \tanh\left(\frac{s}{s_{max}}\right) \quad (3.12)$$

4. [Alonso et al., 2010] ont montré que le paramètre  $\chi$  est une fonction du degré de saturation  $S_r$  mais reste plus faible que le degré de saturation lui-même. La formule s'écrit comme suite :

$$\chi = (S_r)^\alpha \quad (3.13)$$

Certains auteurs ([Satyanaga et al., 2013], [Fredlund and Rahardjo, 1993], [Fleureau et al., 2002]) ont essayé de corrélérer la succion à des paramètres facilement mesurables (courbe granulométrique, limites d'Atterberg, surface spécifique, etc).

Dans les sols fins, la courbe de rétention d'eau est logiquement corrélée à la limite de liquidité LL.

En effet, la limite de liquidité est une indication de la capacité d'un sol à absorber de l'eau sous une contrainte de confinement proche de zéro. Néanmoins, l'indice de vide initial semble jouer également un rôle important.

Des études ont été menées par [Fleureau et al., 2002] sur les sols compacté à l'optimum Proctor normal ou modifié dans une large gamme de limites de liquidités LL donnant des relations empiriques entre celle-ci et la succion, elle est valable uniquement sur un chemin d'humidification ( voir le détail dans le chapitre VI, Propriétés de compactage).

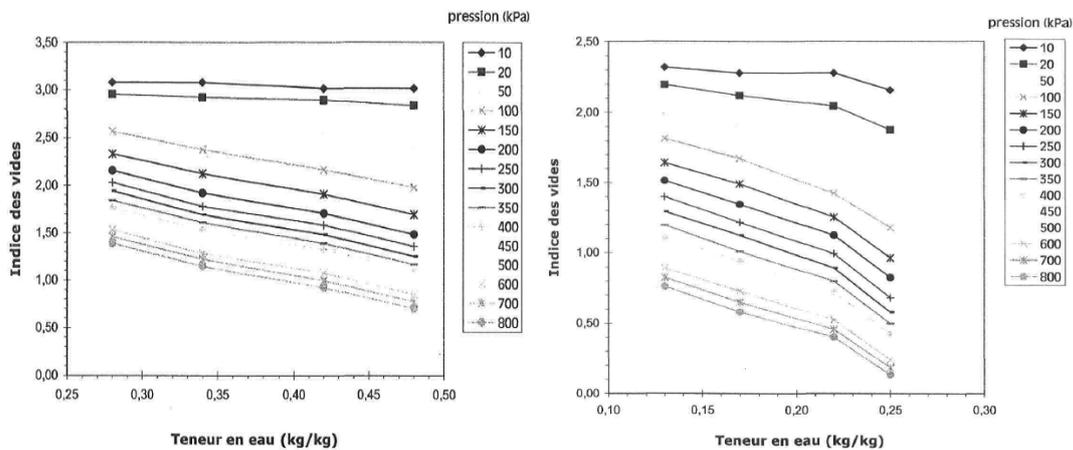
### 3.3.6.3 Les effets de la succion sur la compressibilité volumiques du sol non saturés

Dans ce domaine, beaucoup de travaux ([Cui, 1993], [Cui and Delage, 1996], [Naserkhaki, 2007], etc.) ont été effectués par des essais oedométriques et triaxiaux à succion contrôlée.

Ces chercheurs procèdent souvent par la mesure directe, en réalisant des essais triaxiaux sur les sols non saturés tout en contrôlant l'effet de la succion. Cette démarche est très exigeante, du point de vue de la précision et du temps. Les travaux de [Naserkhaki, 2007] ont été réalisés des essais oedométriques à des différents teneurs en eaux sur 20 sols agricoles ayant de texture variée et provenant de la province de Québec. Les courbes montrent l'évolution de l'indice des vides en fonction des pressions appliquées pour différents teneurs en eaux, (figure 3.20).

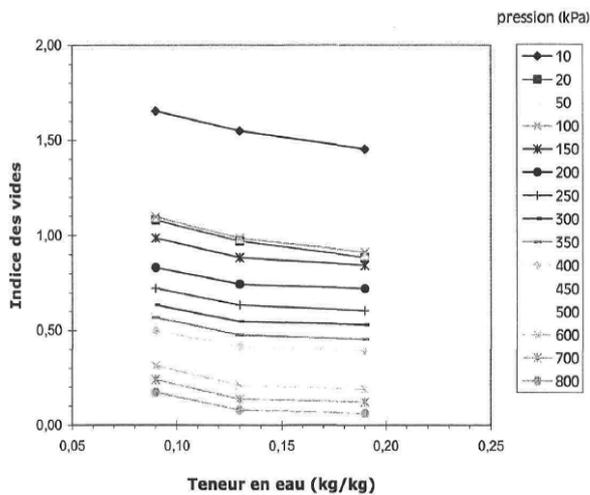
Leurs résultats montrent que pour des pressions de moins de 20 kPa, la déformation des sols de texture fine est presque nulle. L'allure générale de ces courbes est analogue à celle rapportée par d'autres chercheurs mais, se différencie un peu au niveau de leur pression de préconsolidation. La pression de préconsolidation diminue à mesure que la teneur en eau augmente. Par ailleurs, il a constaté aussi l'augmentation du pourcentage d'argile fait augmenter la pression de préconsolidation, expliquant l'effet bénéfique de la teneur en argile des sols sur leur résistance aux déformations.

Les résultats de [Cui and Delage, 1996] ont été obtenus par les essais triaxiaux à succion contrôlée ( $s = 200, 400, 800$  et  $1500$  kPa) et des contraintes appliquées ( $p = 25, 50, 100, 200, 400$  et  $600$  kPa) sur un limon compacté statiquement, comme indiqué dans la (figure 3.21).



(a) Évolution de l'indice des vides du sol de la série Ste-Rosalie (58,6% d'argile, 24,9% de limon et 16,5% de sable) en fonction de la teneur en eau sous différentes pressions appliquées

(b) Évolution de l'indice des vides du sol de la série Joly (28,9% d'argile, 33,8% de limon et 37,3% de sable) en fonction de la teneur en eau sous différentes pressions appliquées



(c) Évolution de l'indice des vides du sol de la série St-Jude (9,9% d'argile, 15,8% de limon et 74,3% de sable) en fonction de la teneur en eau sous différentes pressions appliquées

FIGURE 3.20 – Evolution de l'indice des vides en fonction des pressions appliquées pour différentes teneurs en eau, [Naserkhaki, 2007].

La courbe de compressibilité se résume à un diagramme V-log p. avec p est la contrainte moyenne

$$P = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 - 2 \times u_a). \tag{3.14}$$

Dans cette figure 3.21, l'indice de vides initial des échantillons est proche les uns des autres malgré une petite différence de l'échantillon qui est soumis à la succion S=400kPa, il est plus petit les autres. Toutes les courbes montrent que l'indice de vide diminué (la compressibilité plastique) lorsque la succion augmente dans la gamme des contraintes plus élevés ( P< P0). avec P0 : pré-consolidation. L'effet de la succion sur la préconsolidation a été confirmé dans ces résultats, dont le paramètre P0 évolué (augmente) lorsque la succion augmente. Cela permet une détermination correcte de la courbe LC (*loading-collapse* :est en fait une surface du charge). Ce qui se traduit par un écrouissage (augmentation du domaine élastique).

Par ailleurs, l'effet de la succion s'est révélé opposé à celui de la contrainte de confinement, avec une déformation volumique d'autant plus importante que la succion est faible.

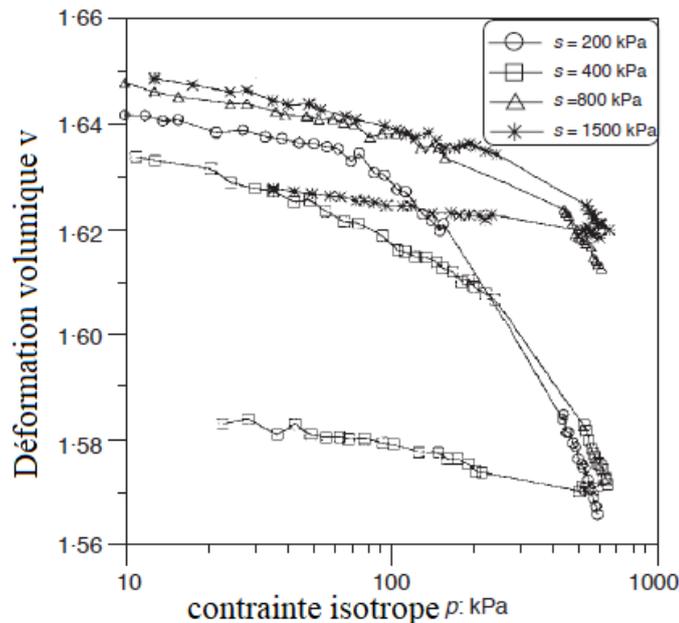


FIGURE 3.21 – Effets de la succion sur la compressibilité d'un limon de Jossigny compacté, [Cui and Delage, 1996].

### 3.3.6.4 Les effets de la succion sur la perméabilité à l'eau et l'air du sol non saturé

L'effet de la succion sur la perméabilité à l'eau et l'air (vapeur d'eau) a fait l'objet de nombreuses recherches ([Leong and Rahardjo, 1997], [Fredlund et al., 1994], [Taibi, 1994], [Minke, 2006], [Boutonnier, 2007]). Ces travaux ont porté essentiellement sur les lois de comportement thermo-hydro- mécanique dont la mesure de la perméabilité polyphasique dans différents matériaux.

1. Dans le cas des milieux poreux saturés, la loi de Darcy prend une forme différentielle et s'écrit comme :

$$q = -k \cdot grad H \tag{3.15}$$

Dans le cas du monodimensionnel :

$$q = \frac{Q}{S} = -k \cdot \frac{\Delta h}{L} \tag{3.16}$$

Où  $q$  : flux ou vitesse d'écoulement (m/s)

$Q$  : débit écoulé ( $m^3/s$ ) et  $S$  : Section traversée ( $m^2$ ),

$h$  : charge totale (m) et  $L$  : longueur parcourue (m) pour une perte de charge  $\Delta h$ .

$k$  : coefficient de perméabilité (m/s).

- Lorsque la phase n'est pas continue (diffusion de l'air dissous dans l'eau ou diffusion de l'eau à l'état de vapeur dans l'air). La diffusion de la vapeur dans un milieu poreux à l'échelle macroscopique est décrite par la loi de Fick [Fick, 1855] :

$$q_v = -D_v \cdot grad. \rho_v \quad (3.17)$$

avec  $q_v$  : la densité de flux de vapeur ( $kg \cdot m^{-2}/s$ ), en fonction du gradient de concentration de vapeur,

$D_v$  : le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air ( $m^2/s$ ),

$\rho_v$  : la masse volumique de la vapeur d'eau ( $Kg/m^3$ ).

La pression de vapeur d'eau est la pression sous laquelle le liquide se vaporise (ou encore le solide se sublime), à la température considérée. Les molécules de vapeur d'eau se déplacent des zones où les concentrations sont élevées vers les zones à concentrations plus faibles, afin d'homogénéiser le système. La théorie sur ce déplacement (le transport de vapeur d'eau) repose sur cette loi.

Dans les travaux de [Boutonnier, 2007], le comportement des sols non saturés a été divisé en quatre domaines D1 (désaturé : phase air continue), D2 (air occlus et contact de l'air avec le squelette), D3 (air occlus sous forme de bulles dans le fluide interstitiel) et D4 (saturé) en fonction du degré de saturation. Cette décomposition sera le fil conducteur permettant d'analyser le comportement des sols non saturés dans le domaine de la construction en terre.

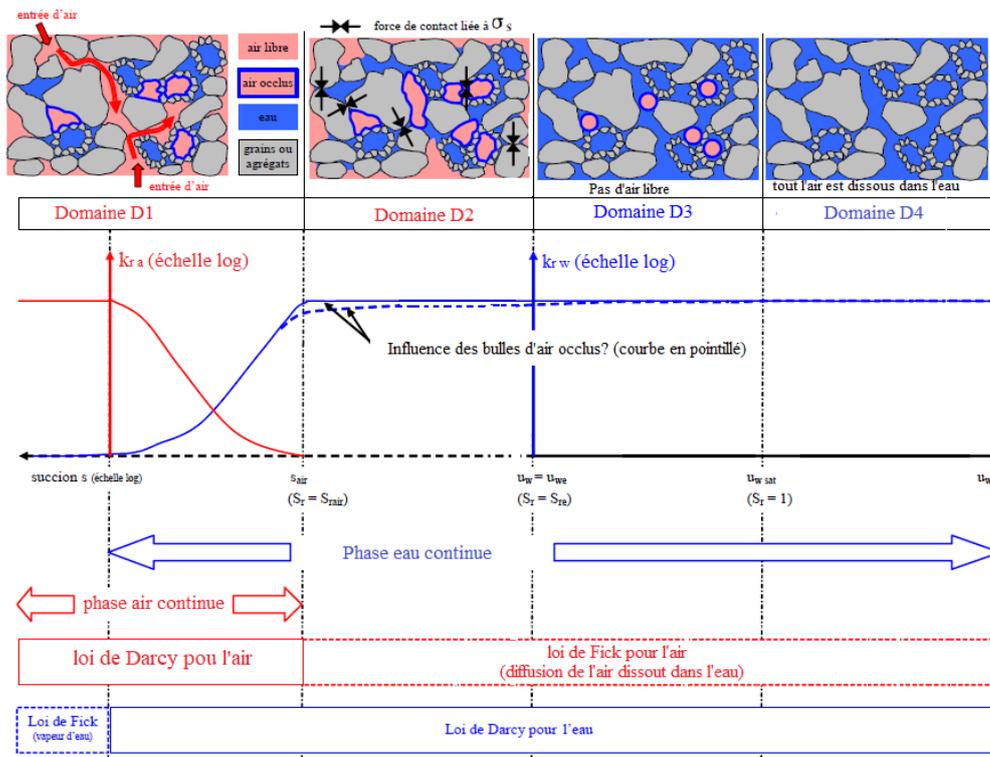


FIGURE 3.22 – Schéma représentatif de l'évolution des perméabilités relatives à l'air et à l'eau en fonction du degré de saturation, [Boutonnier, 2007].

Dans ses travaux, il a montré l'évolution de la perméabilité à l'air et l'eau en fonction du degré de saturation, (figure 3.22).  $K_a$  : perméabilité à l'air, dans le cas d'un comportement isotrope, les perméabilités dans les trois directions sont toutes égales et le tenseur de perméabilité s'écrit :

$$[K_a] = [K_a] \cdot [I] \quad (3.18)$$

- Première classe D1 (sols non saturés) : Phase liquide(eau) discontinue ( $K_w$  : perméabilité à l'eau=0) dans l'échantillon de sol considéré, l'eau n'existe qu'aux points de contact entre grains, elle forme des ménisques aux points de contact entre particules, la pression à l'intérieur du ménisque est négative ( $u_w < u_a$ ), ou la succion  $s \geq s_{air}$ , (ou d'expulsion d'air sur un chemin d'humidification), deux régimes dans ce domaine : lenticulaire dont le degré de saturation  $S_r$  entre  $\approx 0$  à 25% et régime funiculaire air et eau  $S_r$  entre  $\approx 25$  à 80%, dans cette phase eau et air continu. La loi du type Darcy applicable lorsque la phase de l'air est continue qui gouvernent aussi le transport de l'air dans le sol et lorsque l'eau est continue dont l'équation peut s'écrire sous la forme suivante [Boutonnier, 2007] :

$$q_{ra} = -K_a \cdot grad(h_a) \quad (3.19)$$

avec :  $K_a$  tenseur de perméabilité à l'air

$h_a$  : charge d'air et  $h_z$  altitude (positive vers le haut) ( $h_z$  est généralement négligeable)

$$h_a \approx \frac{u_a}{\rho_a g} + h_z \quad (3.20)$$

La perméabilité à l'air relative ( $k_{ra}$  en%) est alors définie par l'équation ci-dessous :

$$k_{ra} = 100 \cdot \frac{k_a}{k_{ad}} \quad (3.21)$$

avec :  $k_a$  perméabilité à l'air

$k_{ad}$  perméabilité à l'air pour un degré de saturation nul (état sec).

- Deuxième classe D2 : phase gazeuse(air) discontinue, la perméabilité à l'air est nulle ( $K_a=0$ ). Le gaz et le liquide sont considérés comme une seule phase fluide compressible, [Taibi, 1994]. La diffusion de l'air dans l'eau joue un rôle important lorsque la perméabilité à l'air est nulle et la loi de diffusion du type Fick lorsque la phase n'est pas continue (diffusion de l'air dissous dans l'eau ou diffusion de l'eau à l'état de vapeur dans l'air).
- Troisième classe D3 (air occlus) : il existe dans ce domaine des bulles d'air occlus dans l'échantillon de sol considéré. Le degré de saturation est entre  $S_{re} < S_r < 1$ ,  $S_{re}$  : Degré de saturation lorsque les forces de tension capillaires agissant sur le squelette s'annulent. Mais la pression interstitielle est positive (pas de succion à l'échelle macroscopique),  $u_w > u_{we}$ . Dans ce domaine D3, la loi de Darcy applicable lorsque la phase d'eau est continue. elle correspond au cas des pressions interstitielles positives avec  $S_r < 1$ , ce qui revient à faire l'hypothèse  $u_{we} = 0$ .  
 $u_{we}$  : La pression relative de l'eau du fluide interstitiel.
- Quatrième classe D4 : le sol est parfaitement saturé ( $S_r = 1$ ). Il n'y a pas d'air à l'état gazeux dans l'échantillon de sol considéré. La limite entre les domaines D3 et D4 peut également s'exprimer à travers la pression interstitielle  $u_{wsat}$  pour laquelle  $S_r=1$ , [Boutonnier, 2007].

### 3.3.7 Effet du compactage sur sol

Le réseau poreux du sol dépend de l'arrangement des particules au sein de l'empilement granulaire.

Le compactage d'un sol a pour but de le densifier et de diminuer son volume d'air, en augmentant son poids volumique sec et en diminuant son volume apparent afin d'augmenter sa résistance.

La conséquence directe du compactage du sol est la réduction des macro-pores. Les pores ayant le diamètre plus grand que 30  $\mu\text{m}$ , facilement exploitables par l'écoulement de l'eau et de l'air. D'après Kay [1990] les méso-pores : les pores de diamètre entre 0,2  $\mu\text{m}$  et 30  $\mu\text{m}$  et les micro-pores : les pores ayant le diamètre entre  $10^{-4}$   $\mu\text{m}$  et 0,2  $\mu\text{m}$ ) sont moins touchées par le compactage.

D'après Biarez and Favre [1975], l'opération de compactage a des effets importants sur le comportement du sol, une augmentation de la résistance au cisaillement, une diminution du retrait, une diminution de la perméabilité et une diminution de la compressibilité et une diminution des déformations.

Dans les sols compactés, il est usuel de faire la relation entre les propriétés mécaniques (résistance à la compression, traction et les modules d'élasticité) et la teneur en eau de préparation des échantillons.

D'après Guérif [1982], l'essai de compression simple permet, pour une énergie de compression donnée, de distinguer trois domaines de comportement mécanique du sol compacté, séparés par deux seuils hydriques ( les teneurs en eaux pondérales  $w_1$  et  $w_2$ ), figure 3.23. Les courbes de variation de l'indice de vides structuraux en fonction de la teneur en eau " $w$ " pour différentes intensités de compression permettent d'analyser l'effet de la teneur en eau sur le comportement du sol compacté.

Le comportement solide est défini dans l'intervalle  $[0 \text{ à } w_1]$ , dans ce domaine :

- la diminution de l'indice de vide est très faible résulte du réarrangement sans rupture des agrégats,
- la résistance mécanique du sol est très supérieure aux charges appliquées. L'effet obtenu est instantané et il est indépendant du temps d'application de la charge, ainsi que de la teneur en eau, [Naserkhaki, 2007].
- Le seuil  $w_1$  est correspond à la limite de retrait du sol, indépendamment de l'intensité de la charge appliquée.

Le comportement fragile est compris entre  $[w_1 \text{ à } w_2]$ , dans ce domaine :

- une diminution de l'indice de vide est observé survient à la fois par rupture.
- une diminution de la résistance mécanique du sol et elle atteint l'ordre de grandeur des charges appliquées.

Le comportement visqueux est défini dans les valeurs de teneur en eau supérieures à  $w_2$ ,

- la diminution importante de l'indice de vide,
- la compressibilité augmente à la fois par rupture et déformation plastique du sol
- La teneur en eau dépend nettement du temps d'application de la charge.

[LI, 2015] a étudié l'influence de différentes énergies de compactage et des mesures de succion associées par psychromètre et technique du papier-filtre. ces papiers ont été placés à l'intérieur des moules Proctor pendant la phase de compactage pour différents types de sol (une argile remaniée non saturée proche de la saturation, argile à châtaignier LGV-SEA), afin d'étudier le comportement du sol compacté sur chemins de drainage- humidification dans différents états initiaux.

Les résultats de l'étude montrent que :

- les méthodes de mesure par papier-filtre et la mesure psychrométrique ne changent pas beaucoup la valeur de succion, (figure 3.24a).

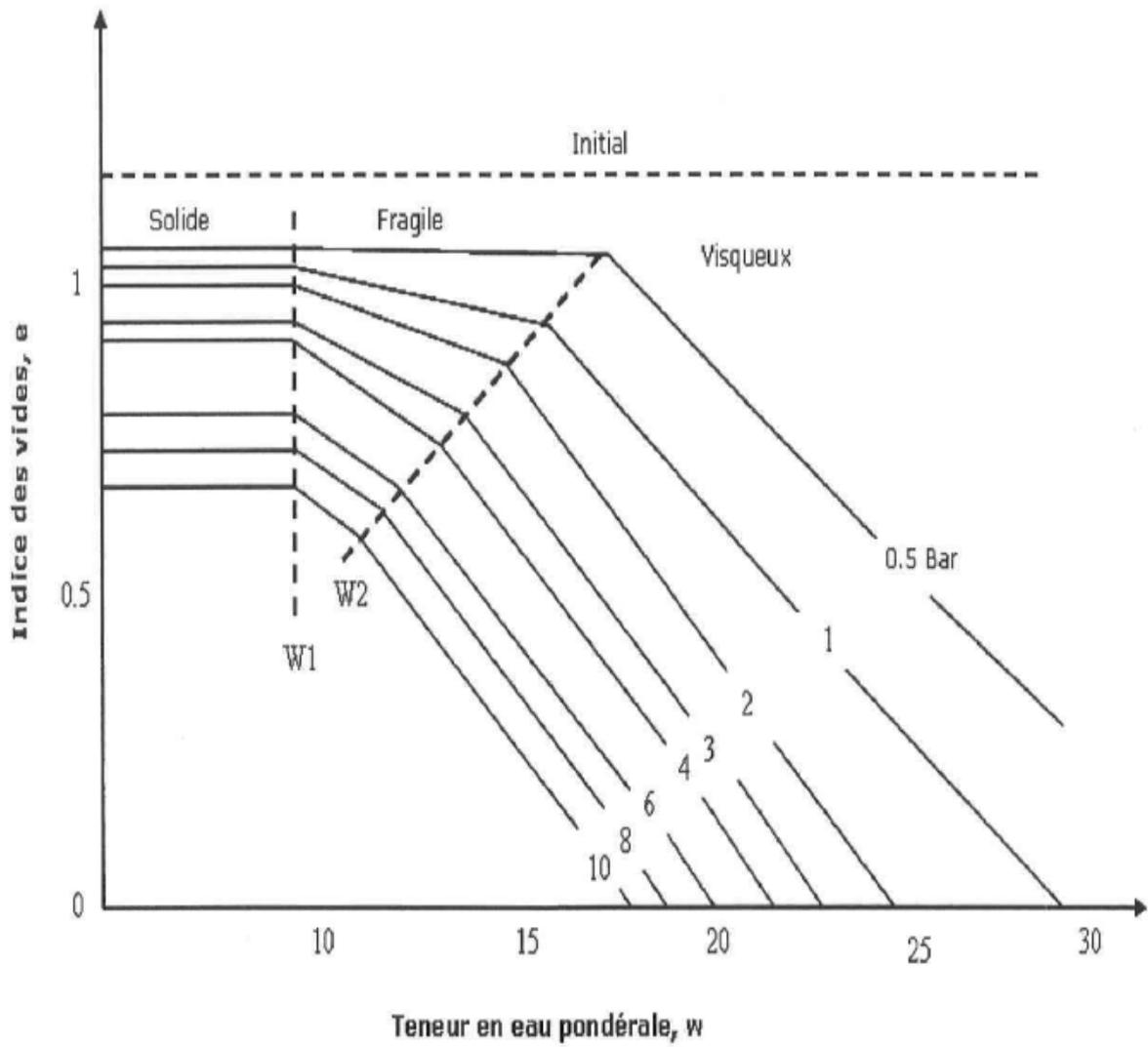


FIGURE 3.23 – Variation de l'indice des vides en fonction de la teneur en eau sous différentes charges [Guérif, 1982]

- les courbes d'iso-succion sont à la fois influencées par la teneur en eau et l'énergie de compactage. les lignes d'iso-succion sont presque verticales, coté « sec » de la ligne optimale de compactage (ligne reliant le sommet des courbes Proctor, teneur en air volumique généralement de l'ordre de 6%), [Boutonnier et al., 2016].

Plusieurs chercheurs ([Mesbah et al., 1999b], [Boutonnier, 2007], [P'kla, 2002], [LI, 1999], [Taibi et al., 2011], [Fleureau et al., 2002]) ont étudié la relation entre l'énergie de compactage et la teneur en eau ou le degré de saturation (succion) du matériau, afin d'améliorer son comportement mécanique (la résistance au cisaillement, résistance à la compression simple UCS et les modules d'élasticité).

[Fleureau et al., 2002] ont étudié la variation de la teneur en eau massique et de l'indice des vides en fonction de la succion dans le sol compacté, pour décrire l'application de la succion sur le couplage hydro-mécanique.

Les résultats obtenus montrent que les chemins de drainage et d'humidification des sols compactés sont sensiblement linéaires et réversibles dans les plans de l'indice des vides ou de la teneur en eau en fonction de la succion, (figure 3.25). La figure 3.25a montre une relation linéaire entre le logarithme de la pression interstitielle négative (pente  $C_{ms}$ ) à l'humidification et l'indice des vides ( $e$ ) et une relation entre le logarithme de la pression interstitielle négative (pente  $D_{ms}$ ) à l'humidification et la teneur en eau, (figure 3.25b).

De la même manière, Gallipoli et al., (2003) cité par [Boutonnier, 2007] donnent une relation à quatre paramètres prenant en compte l'indice des vides ( $e$ ) et la succion ( $s$ ).

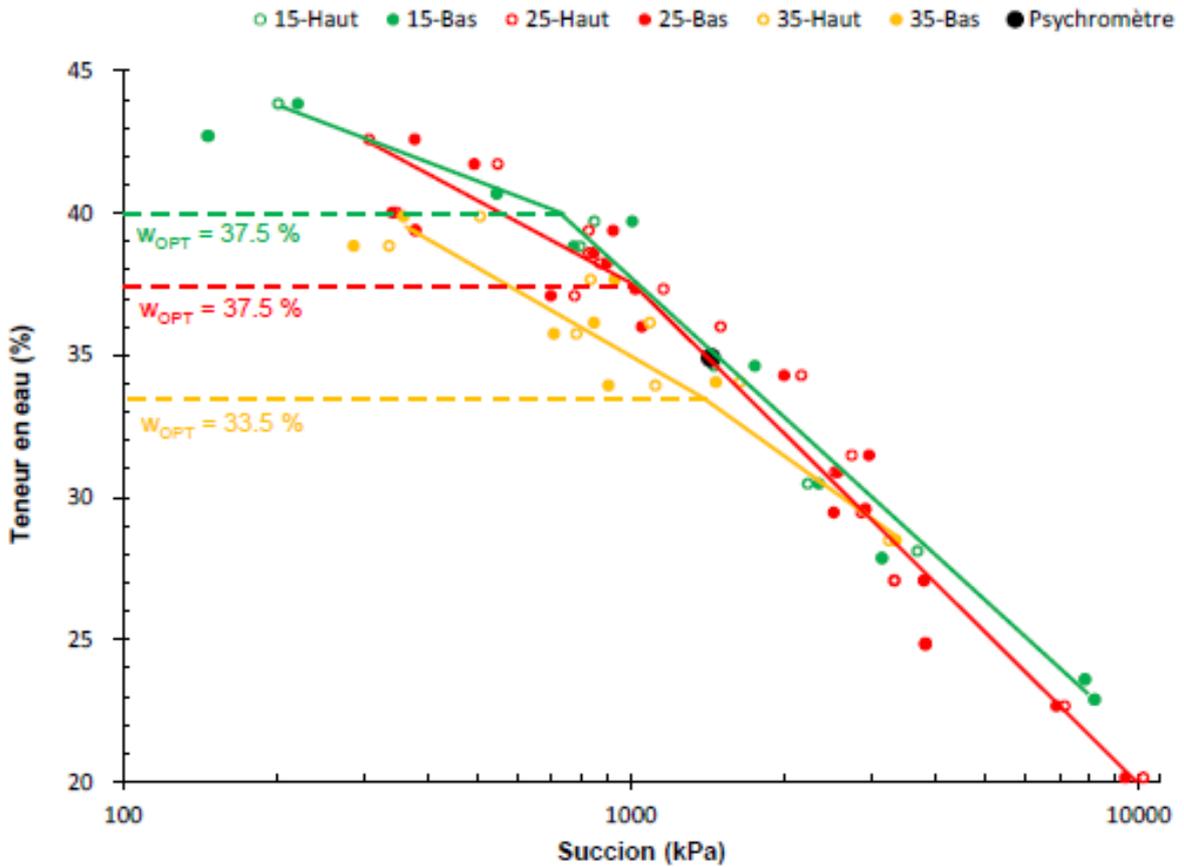
Dans différents chemins de contraintes sur une kaolinite compactée la relation a été vérifié [Boutonnier, 2007] dont l'état initial se situe à 4% côté sec de l'optimum Proctor, la forme des courbes obtenues montre qualitativement que plus l'indice des vides est faible, plus la succion d'entrée d'air est élevée, (figure 3.17).

La figure 3.26 montre les différents types de compactage statique et dynamique effectuée sur des sols fins argileux pour déterminer l'efficacité de chaque méthode, [Mesbah et al., 1999b]. Trouvé qu'il ya une dissipation d'énergie lors de l'essai PROCTOR en dehors de l'échantillon (dans les vibrations du bâti, par frottement sur les parois du moule) est de 250 kJ/m<sup>3</sup> (différence d'énergies des point O et B sur la figure, qui ont la même densité sèche), soit 45% de l'énergie totale qui n'est pas utilisée pour le compactage. Pour les mêmes énergies appliquées 550 kJ/m<sup>3</sup>, la densité sèche par le compactage statique est de 0.07 g/cm<sup>3</sup> supérieure à celle du PROCTOR Normal, [LI, 2015].

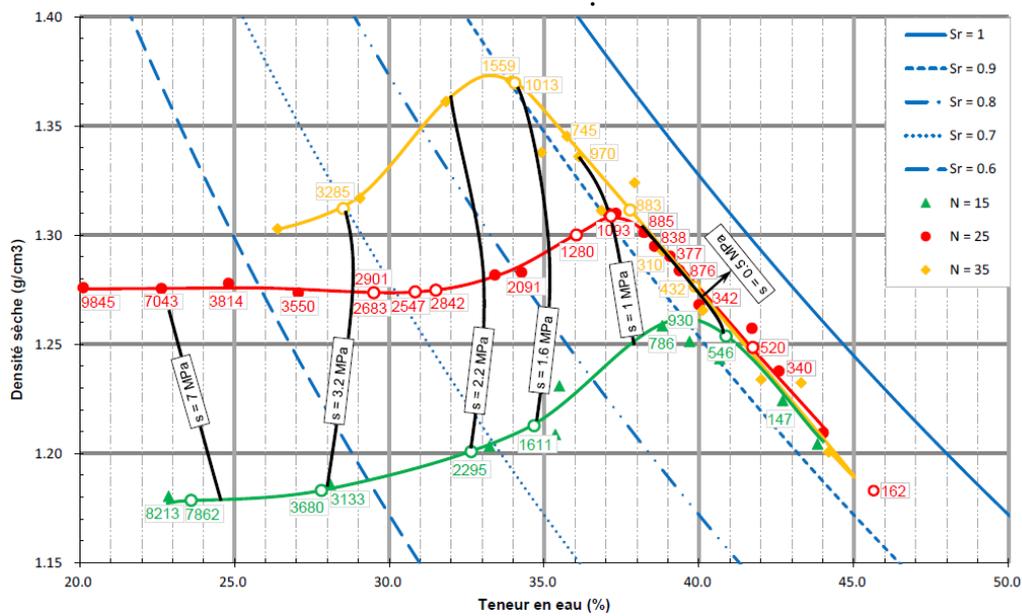
[Boutonnier et al., 2016] ont montré que la résistance au cisaillement d'un sol avait tendance à augmenter lorsque celui-ci était compacté du côté sec de la courbe de compactage et le domaine D2 couvre l'optimum Proctor et une partie du côté humide de l'OPN qui est basé sur la classification des sols compactés. Les résultats de [Fleureau et al., 2002] montre que l'optimum Proctor correspond à une inflexion dans la courbe succion ( $s$ ) fonction de la teneur en eau ( $w$ ), (figure 3.27, [Boutonnier, 2007]).

[LI, 1995] a développé un montage pour mesurer les courbes iso-succion de deux loess, la relation entre la succion et le compactage par l'intermédiaire des iso-valeurs de succion dans la courbe de compactage, (figure 3.28).

Montage et technique : les échantillons sont découpés en morceaux de 2 cm de hauteur de 30 cm<sup>2</sup> et 50 cm<sup>2</sup> de superficie de la section et placés dans une cellule oedométrique avec une pierre poreuse fine en bas, l'échantillon est déposé sur la pierre poreuse et les pressions d'eau et d'air sont respectivement contrôlées en utilisant la technique de translation d'axe. Les variations de succion en fonction de la densité sèche, [LI, 1995] a montré que l'augmentation de la densité sèche avec la teneur en eau ne change pas considérablement la succion de l'échantillon par contre, pour une certaine densité sèche des teneurs en eau plus faibles, les succions plus fortes ont été mesurées. Li conclut que

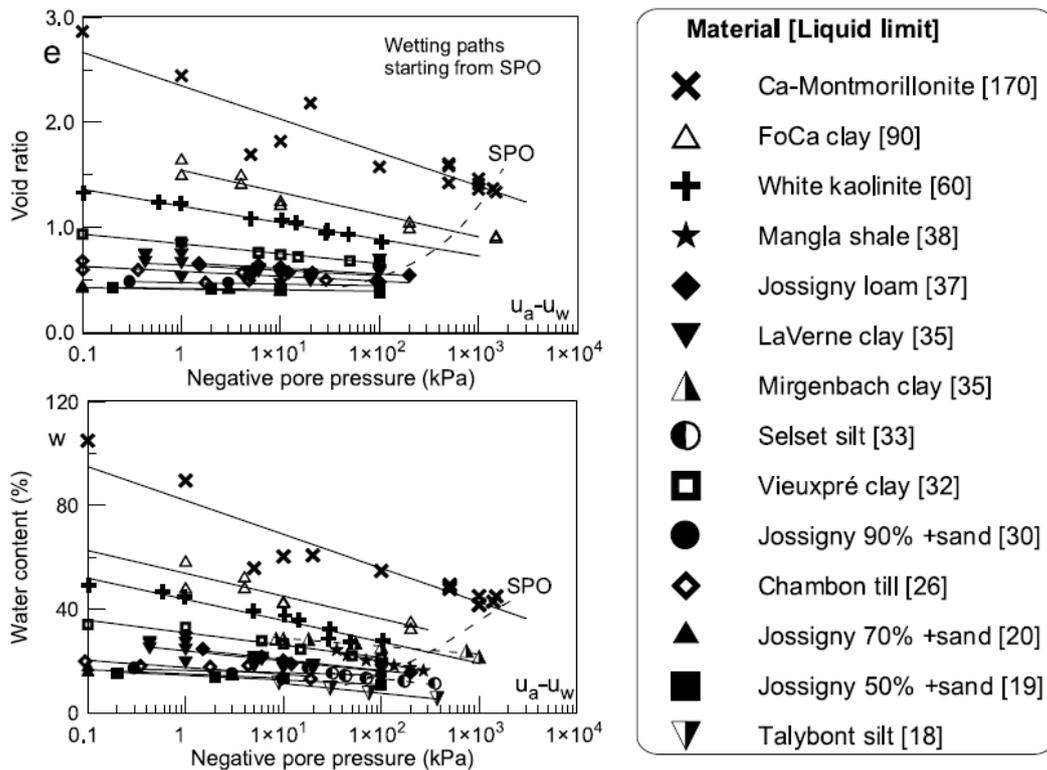


(a) Courbes de succion mesurées sur les échantillons compactés avec différentes énergies (15, 25, et 35 coups / couche) par différentes méthodes (papier filtre, et psychromètre) en échelle logarithmique, [LI, 2015].

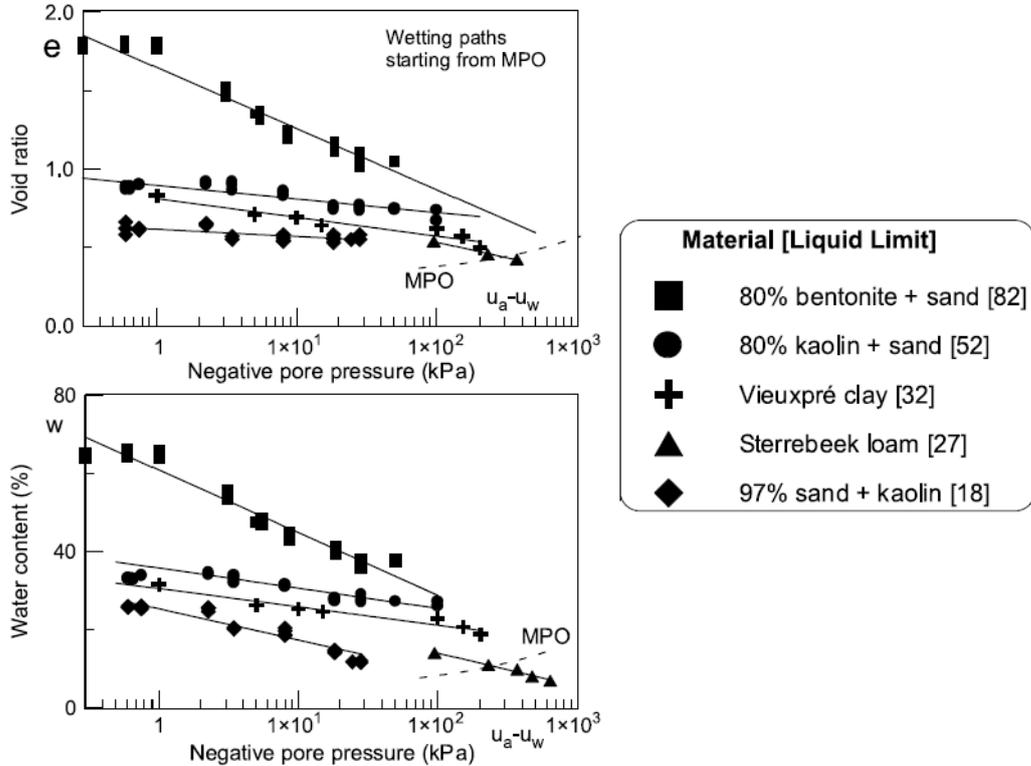


(b) Courbe d'iso-succion du sol compacté ( $w$ ,  $\rho_d$ )

FIGURE 3.24 – Résultats des courbes Proctor réalisées à différentes énergies de compactage et des mesures de succion associées pour différents types de sol, Argile à châtaignier LGV-SEA, [LI, 2015].



(a) Les chemins d'humidification des différents sols compactés à l'optimum de Proctor normal.



(b) Chemins drainage- humidifications des différents sols compactés à l'optimum de Proctor modifié.

FIGURE 3.25 – Chemins drainage-humidifications des différents sols compactés à l'optimums de Proctor normal et modifié, [Fleureau et al., 2002].

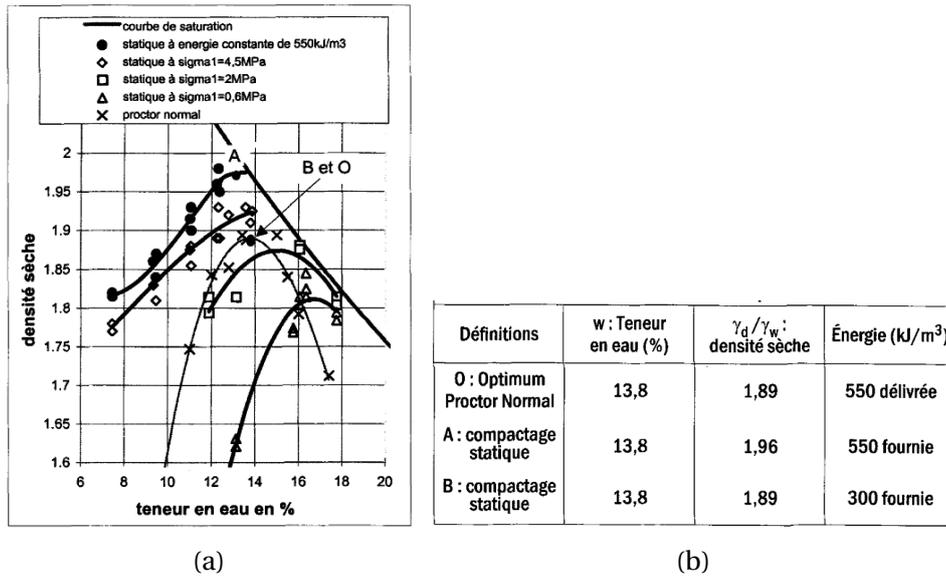


FIGURE 3.26 – Influence de méthode de compactage, [Mesbah et al., 1999b].

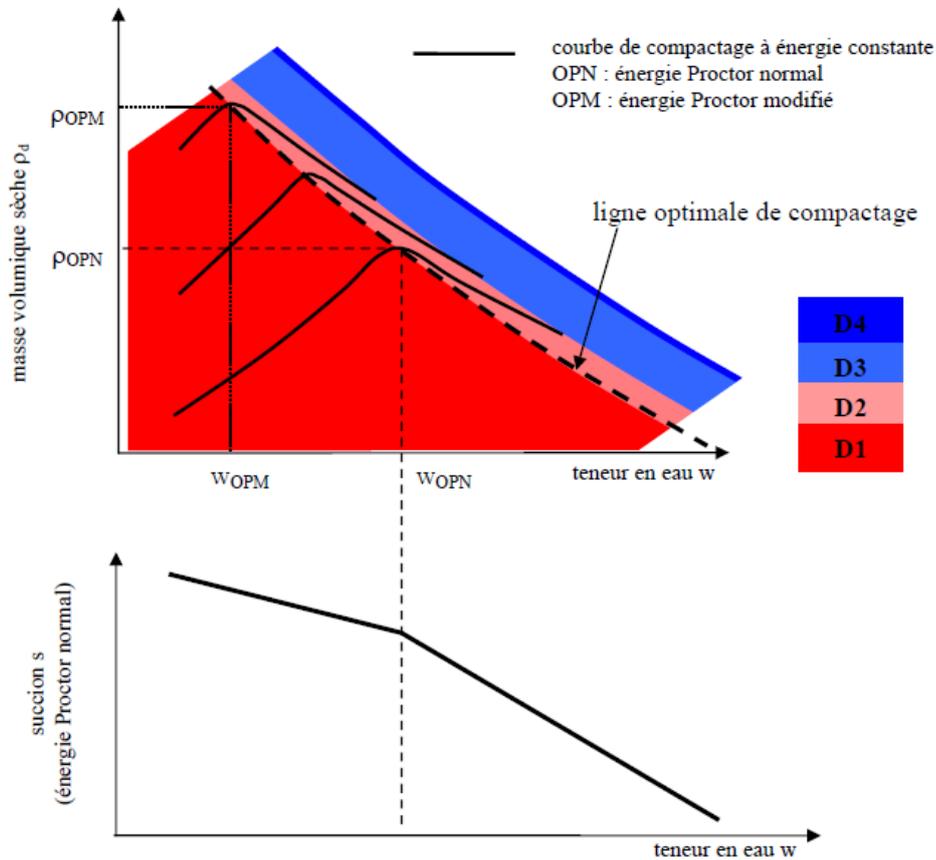


FIGURE 3.27 – Limites des domaines D1, D2, D3 et D4 sur le diagramme de l'essai PROCTOR pour des sols fins, [Boutonnier, 2007].

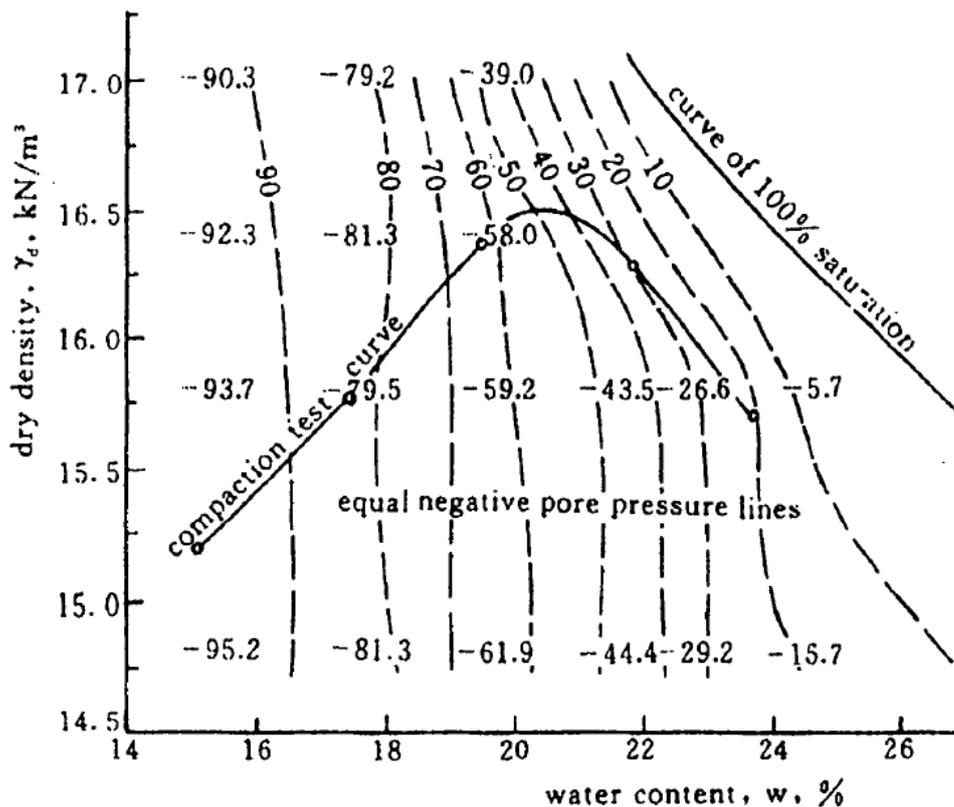


FIGURE 3.28 – Résultats de succion en fonction du poids volumique sec et de la teneur en eau pour deux loess en Chine, [LI, 1995].

l'influence de la teneur en eau est beaucoup plus remarquable que celle de la densité sèche.

### 3.4 Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence l'influence marquée de l'eau et de l'énergie de compactage sur les propriétés hygroscopiques de la terre, et par conséquent sur le comportement mécanique de la terre comme matériau de construction.

Nous avons présenté aussi dans ce chapitre les caractéristiques des différentes matières premières qui entrent dans la composition du matériau de construction terre.

D'après [Taallah \[2014\]](#), la connaissance exhaustive des propriétés physico-chimiques d'une terre n'est pas toujours nécessaire. Il convient en effet de bien connaître quatre propriétés fondamentales de la terre, qui sont : la texture ou granularité, plasticité, compressibilité, cohésion, [\[Houben and Guillaud, 2006\]](#).

En réalité, pour un matériau donné, c'est la succion, dont la valeur est liée à la teneur en eau et à l'indice des vides, qui gouverne le comportement.

Dans ce travail de recherche, nous avons constaté que la courbe de rétention d'eau peut être un des meilleurs indicateurs de la contribution de la succion matricielle dans le comportement mécanique des sols non saturés, ([\[Fredlund and Rahardjo, 1993\]](#), [\[Delage and Graham, 1995\]](#), [\[Fleureau et al., 1993\]](#), [\[Taibi, 1994\]](#)).

L'allure générale de cette courbe reflète, en fait, l'effet de la succion matricielle sur la capacité de rétention en eau du sol, engendrée par des propriétés du sol (la texture, la porosité, la nature de la compression, le pourcentage des particules fines et la minéralogie).

Les travaux antérieurs réalisés sur l'effet de la succion sur les propriétés physiques et mécaniques du matériau terre, va nous permettre de mieux analyser les résultats et d'avoir une meilleure compréhension de l'influence des différents paramètres étudiés sur les propriétés du matériau de terre. C'est ce que nous allons montrer dans la suite du comportement des sols non saturés compactés dans le cas de la BTC.

# Chapitre 4

## Technologie de la construction en terre

### Sommaire

---

4.1	introduction . . . . .	91
4.2	Aperçu historique . . . . .	91
4.3	Diversité de la construction en terre crue . . . . .	95
4.3.1	Technique du pisé . . . . .	97
4.3.2	Technique de l'adobe . . . . .	98
4.3.3	Technique du Torchis . . . . .	100
4.3.4	Technique de la bauge . . . . .	103
4.4	La brique de terre compressée (BTC) . . . . .	103
4.4.1	Normes, recommandations, critères de choix des matériaux . . . . .	107
4.4.2	Critères de choix des matériaux . . . . .	109
4.4.3	Le comportement hydromécanique des BTC . . . . .	113
4.4.4	Le comportement hygrothermique des BTC . . . . .	114
4.5	Avantages du matériau terre . . . . .	115
4.6	Inconvénients de la construction en terre . . . . .	115
4.7	Conclusion . . . . .	117

---

## 4.1 introduction

La terre est un matériau qui offre une très large gamme de possibilités pour la construction de bâtiments. Les techniques de construction en terre ont évolué à travers l'histoire de l'humanité et les techniques les plus importantes sont le torchis, le pisé, l'adobe et la bauge, qui ont résulté des échanges entre les peuples et le brassage des cultures.

Dans le présent chapitre, on présente ces techniques et leur mode de mise en œuvre ainsi que les critères de choix des matériaux destinés à la construction en terre.

On mettra l'accent sur la brique de terre compressée qui fera l'objet de notre étude expérimentale qui constitue le noyau de cette thèse et qui sera présentée dans les chapitres 5 et 6. sans oublier les aspects essentiels du comportement hydromécanique et hygrothermique de la BTC.

## 4.2 Aperçu historique

Selon Pollock [1999], la présence de construction en terre date de plusieurs siècles, dans la période de l'ancienne Mésopotamie (5000-4000 av.J.C).

Au Yémen, dans la vallée de l'Hadramout, Shibam, le siècle IV de notre ère, leurs immeubles de terre culminent ont des hauteurs bien remarquables.

Selon zami et Lee 2011, la civilisation égyptienne 5000 av.J.C, fournit des preuves abondantes de l'utilisation de la terre dans les constructions des premiers établissements humains dans les sites de Merimd et Fayoum dans le Nil.

Les romains utilisaient aussi la terre crue moulée pour leurs habitations entre 1500 et 300 av.J.C, [Dorothee, 2011], [Bruno, 2016].

Parmi les techniques utilisées à l'époque, la construction en pisé, c'est une tradition vieille de 11000 ans. Néanmoins, elle est relativement récente en comparaison les autres techniques de constructions traditionnelles (comme le torchis ou la bauge, l'adobe), puisque cette technique semble apparaitre pour la 1<sup>ère</sup> fois à Carthage en Tunisie en 814 av.J.C, [Dorothee, 2011].

Le pisé s'exporte en Europe, avec l'expansion de l'Islam dans le VIII<sup>ème</sup> siècle, d'abord en Espagne, puis en France. Ils ont utilisé ce système dans différents types de leurs constructions, cité par [Jaquin, 2008], [Jaquin and Augarde, 2012].

Cette technique nouvelle qui va s'étendre autour du bassin méditerranéen et dans le Maghreb, comme le Maroc, la ville de la vallée du Draa a été construite en pisé depuis environ 250 ans.

En Espagne, la construction en terre a été bien développée entre le VIII<sup>e</sup> et le XV<sup>e</sup> siècles, comme le Palais de l'Alhambra en Andalousie, l'un des monuments majeurs de l'architecture islamique, du 10<sup>ème</sup> siècle.

Les constructions en pisé ont été observées dans la région du Maghreb (Algérie, Maroc). Le Mishwâr à Tlemcen est l'ancienne citadelle édifiée par Yaghmurâsan, fin XIII<sup>e</sup>-début XIV<sup>e</sup> siècle et les vestiges de Mansourah possèdent un important patrimoine monumental et artistique, ses murailles ont été construites en pisé avec des épaisseurs de 1,50 m (Mérinides 1299-1337).

Les techniques de la construction en terre se sont développées entre (1740-1830) en Europe (France, Allemagne, Italie, Suisse et Danemark) grâce à l'initiative de l'architecte lyonnais François Cointeraux (sa définition de pisé dans la publication "Ecole d'architecture Rurale" (1790-1791)). En Allemagne, l'industriel Jacob Wimpfin à Weilburg an der Lahn acon a construit en 1828 un bâtiment à sept étages, l'un des plus grands bâtiments

en terre à ce jour, [Bruno, 2016].

Après la première guerre mondiale, les constructions en terre ont été relancées. Près de 20 000 habitations en terre crue ont été réalisées dans la région de Prusse et Saxe en 1920-1921 (en Allemagne).

Après la seconde guerre mondiale, l'effort de reconstruction a été orienté vers des techniques nouvelles rapides et esthétiques par des matériaux innovants comme le béton et l'acier. Ils sont rapidement devenus le choix préféré des architectes et des ingénieurs. Tandis que la terre crue est devenue de plus en plus obsolète et vers la fin des années 1950, était pratiquement abandonnée dans le monde développé. Nous avons perdu un savoir-faire énorme cumulé au fil des siècles. Malgré cette baisse, on estime qu'environ 50% de la population mondiale actuelle vit encore dans des constructions en terre en particulier dans les pays les plus pauvres.

Par contre, la construction en brique de terre compressée BTC est apparue comme un nouveau matériau dans les années 50, les premiers blocs de terre compressée ont été produits à l'aide des pilons en bois, [Guillaud et al., 1985].

La construction en BTC est un dérivé moderne du bloc de terre moulée (adobe), plus communément connu sous le nom de bloc d'adobe. Le BTC est utilisé en construction dès 1952, suite à l'invention de la célèbre petite presse CINVA-RAM, conçue par l'ingénieur Raul Ramirez au centre CINVA à Bogota, dans le cadre d'un programme de recherche sur l'habitat rural en Colombie. Un bras de levier permet d'exercer une forte pression sur le bloc, qui est ensuite démoulé, puis stocké. cette presse sera ensuite utilisée dans le monde entier.

Dans les années 70 à 80, de nouvelles générations de presses manuelles et mécaniques sont apparues. Aujourd'hui une immense croissance de la production des BTC offre un type de matériau de bonne qualité.

La terre est un matériau local bénéfique, disponible tout le temps et partout pour la construction, [Morel et al., 2001], son utilisation comme matériau de construction exploite l'une de ses propriétés qu'est la cohésion qui joue le rôle de liant naturel, dont la force provient entièrement des efforts d'attraction capillaires inter granulaires exercés par la tension de l'eau interstitielle, [Gelard, 2005], [Taibi, 1994].

Cependant l'addition des liants chimiques (ciment, chaux) ou modernes (résine chimique) et les fibres végétales par exemple comme stabilisant dans les matériau terre est nécessaire, [Taallah, 2014]. On peut améliorer ses propriétés physico-mécaniques (les liaisons inter granulaires) et d'augmenter sa résistance macroscopique et sa durabilité en utilisant six types de mécanismes : Armer, densifier, enchaîner, lier, imperméabiliser, hydrofuge, [Houben and Guillaud, 1994], [Gelard, 2005], [Morel et al., 2007], [Gupta, 2014], [Vilane, 2010] et [Jayasinghe and Kamaladasa, 2007]. Par contre, ces additions limitent la recyclabilité du matériau terre après la démolition.

La construction en terre apparait comme un moyen efficace de production à court terme d'un habitat économique dans de nombreux pays en développement (en Afrique, en Amérique du sud et en Asie), permettant le logement du plus grand nombre, par l'exploitation des ressources locales. Les nombreuses études sur le matériau terre ne cessent aussi de fournir l'évidence d'un emploi permanent de la terre crue (techniciens et artisans du bâtiment) pour la construction d'établissements humains très divers, des hameaux aux villages et jusqu'aux villes.

En Afrique, on peut observer plusieurs patrimoines remarquables, comme les mosquées en briques crues (Tombouctou, Djenné) au Mali qui est l'un des édifices les plus connus, car c'est le plus grand monument religieux en terre. Elle s'étend sur 75 mètres de longueur et s'élève à plus de 20 mètre d'hauteur. Son toit est soutenu par 100 piliers,

(figure 4.1).

Mais l'Europe n'est pas en reste (France, Angleterre, Espagne, Allemagne, Portugal, suède et Danemark) l'habitat fait partie du paysage rural (des quartiers historiques). La majorité des maisons rurales en France (15% de la population), a été construite en pisé, briques crues et torchis, [Technique-d'ingénieur, 2005].



(a) Grande mosquée de Tombouctou

(b) ville ancienne de Djenné

FIGURE 4.1 – Les constructions en terre dans la région de MALI

Plusieurs programmes de recherche sont lancés à travers le monde sur les constructions en terre crue (Caractéristiques mécaniques, hydromécaniques, thermiques, hygrométriques, et ainsi que les techniques de construction et l'architecture de la terre). De nombreux programmes régionaux financés par l'Unesco.

En France, la construction de 64 logements expérimentaux en Terre en 1985 à Ville fontaine dans l'Isle-d'Abeau est constituée de 45% de logements en pisé, 45% en blocs de terre et 10% en terre paille, (figure 4.2a). Ce programme confirme l'engagement de ce pays dans une voie opérationnelle.

On note aussi le développement des constructions en pisé et adobe en Allemagne, en suisse, en Belgique et dans le sud ouest des USA.

En Algérie, la construction en terre est très répandue dans toute sa longue histoire dans les régions arides et les zones rurales (ksour d'Algérie tiennent depuis 12 à 15 siècles, Timimoun (Adrar) possède le plus grand ksar en terre d'Algérie).

Aujourd'hui, beaucoup de programmes ont été réalisés dans notre pays et notamment dans les années 70 [Benouali, 2015], (tableau 4.1). Il y a aussi le CAPterre (centre Algérien du patrimoine culturel bâti en terre) qui est chargé de faire la promotion des architectures de terre en Algérie, il est installé à Timimoun (adrar). Le centre est divisé en deux départements techniques, dont l'un s'occupera de la recherche sur les matériaux et les techniques de construction.

Au Maroc, un programme de recherche a été lancé en 1983 sur les matériaux de construction en terre et les équipements touristiques en terre : la réalisation de 60 logements dans le cadre d'une action REXCOOP à Marrakech au Maroc, (figure 4.2b).

En Inde, un vaste programme a été lancé aussi en 1980 pour valorisation des possibilités de la construction en terre par l'organisme gouvernemental chargé de l'habitat social (HUDCO) et les centres de construction régionaux, les « building centres » chargés de réaliser des démonstrations, expérimentations et de former des techniciens de la construction. Dans ce centre de formation, les bâtisses sont tout construit en terre : l'Institut terre d'Auroville en Inde, les murs et les voutes sont entièrement en BTC, (figure 4.3). Plus de 72% du parc immobilier de l'Inde a été construit en terre ce qui représente 67 millions de maisons ou vivent près de 375 millions de personnes, [Technique-d'ingénieur, 2005].

TABLEAU 4.1 – Programme de construction en Terre, en Algérie depuis 1970, [Benouali, 2015]

Date	Techniques	Nombre	lieu
1969-1970	Terre coulée	02	Zéralda
1971-1973	Terre remplissante	/	Abadla
1972	Pisé	136	Batna
1973-1975	Pisé (R+2)	30/300	Sdi Bel Abbes
1976	Toub	100	Felliache (Biskra)
1980	Bloc de terre compressée	120	Madher (Boussaâda)
1981	Bloc de terre compressée	40	Chéraga
1984	Bloc de terre compressée	20	Tamanrasset
1984	Bloc de terre compressée	02	Tamanrasset et Souidania
1986	Bloc de terre compressée	10	Reggane (Adrar)
1993	Bloc de terre compressée	68	Tamanrasset
1999	Pisé	01	Souidania (Alger)
2007	Bloc de terre compressée (panneaux solaire, énergétique)	01	Souidania (Alger)



(a) Le Domaine de la Terre à Ville fontaine dans l'Isère, né en 1985



(b) Logements en blocs de terre stabilisés à Marrakech, programme REXCOOP/ERAC (©CRATerre-EAG).

FIGURE 4.2 – les programmes expérimentaux des constructions en terre

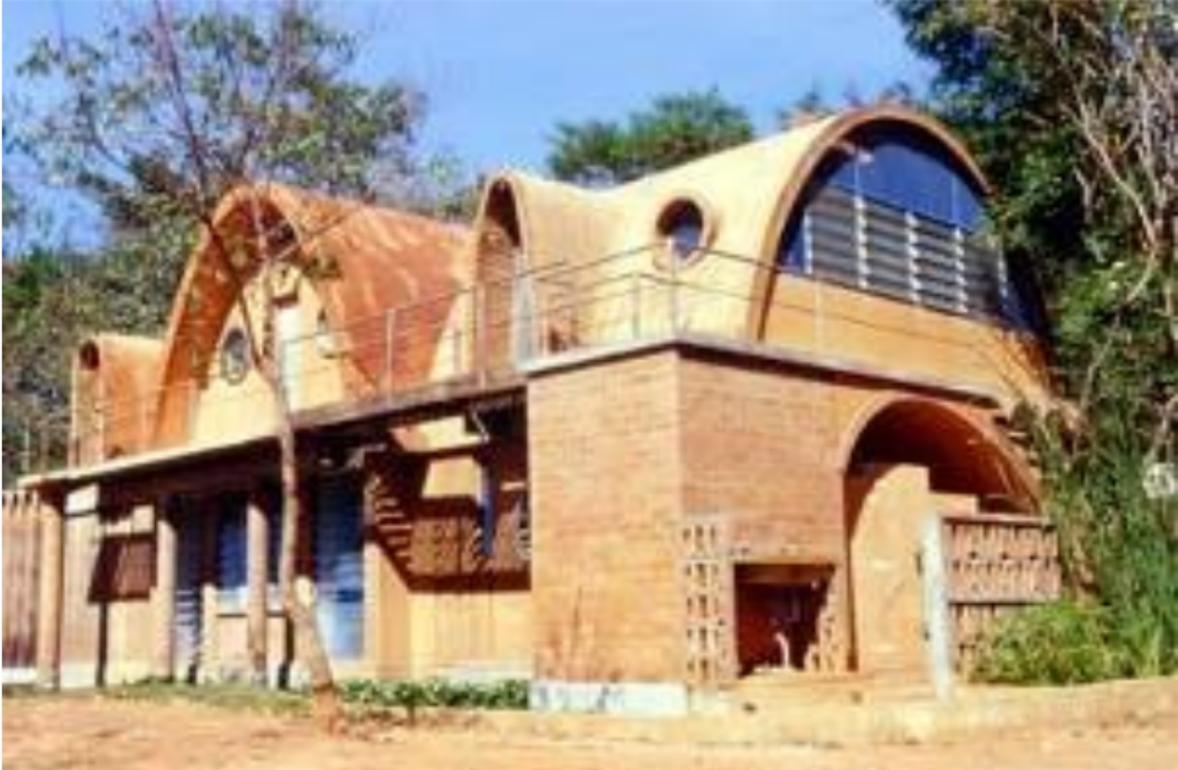


FIGURE 4.3 – Centre de formation de l’Auroville Earth en Inde

Plusieurs constructions rurales et militaires en terre peuvent être trouvées partout dans le monde (en Europe, en Maghreb, en Amérique centrale et Amérique du Sud : Mexique, Pérou, Brésil), en Inde et en Chine, (figure 4.4), [Houben and Guillaud, 1994], [Bruno, 2016]. La terre a autant servi à bâtir un habitat rural qu’à édifier d’impressionnantes citadelles militaire.

Aujourd’hui plus d’un tiers des habitants vit dans des constructions en terre crue, soit de plus de 2000 000 000 d’être humains dans 150 pays, [Technique-d’ingénieur, 2005], [Van-Damme and Houben, 2017]. Pour les pays en voie de développement, il s’agit de 50% de la population, en majorité des constructions rurales, et au moins de 20% de population urbaine et pré-urbaine, [Minke, 2006], [Houben and Guillaud, 2006].

### 4.3 Diversité de la construction en terre crue

La terre crue est un matériau de construction composé d’un mélange de sol et d’eau, qui a été utilisé depuis l’antiquité sous diverses formes, (Adobes, pisé, bauge, torchis, blocs de terre comprimé), [Van-Damme and Houben, 2017].

La technique de construction en terre offre des possibilités inimaginables tant d’un point de vue diversités d’application, que des traditions culturelles reproduites. Car la terre crue se prête à bien des manipulations permettant de l’utiliser en murs massifs monolithes (pisé, bauge), en pâtes garnissant un support de nature diverse (torchis, terre-pailles), ou en blocs appareillés (BTC, Adobes).

CRAterre a présenté douze techniques d’utilisation de terre pour la construction. Parmi celle-ci sept à huit sont d’un usage courant et constituent les techniques majeurs, [Houben and H., 1995], [Taallah, 2014], [CRATERre, 1991], (figure 4.5).



### 4.3.1 Technique du pisé

Le mot pisé dans la construction en terre a été utilisé pour décrire une large gamme de procédures de compactage dynamique du sol dans des coffrages traditionnels en bois ou métal, couche par couche avec une dame (manuelle ou pneumatique) pour construire une masse solide (Mur), (figure 4.6). Le matériau de base est très variable.

- Plus de 60% des habitations a Kigali et du Pérou sont bâties en adobe ou en pisé .
- Un mur en Pisé de 180 m de long et de 6 m de hauteur fonctionne comme un régulateur du climat dans l'hôpital régional de Feldkirch, Vorarlberg, Autriche, 1993, (figure 4.7), [Van-Damme and Houben, 2017].
- La construction consiste à réaliser des murs massifs en terre humide et pulvéru-lente.
- Procédure de compactage en couches successives, couche après couche dans des coffrages en bois ou métal à l'aide d'un pilon (ou dame, pisoir), (figure 4.8).
- Le mur est décoffré immédiatement après que la terre a été damée.
- Présente une texture et une couleur uniques appréciées par les architectes.
- Le compactage moderne (vibro-compactage) permet une densification plus élevée de terre avec un meilleur contrôle de la qualité du produit final, [Zami and Angela, 2007].
- Il existe bien entendu des techniques traditionnelles de construction en terre pisé et des techniques modernes à forte intensité de main-d'œuvre, (figure 4.9).



FIGURE 4.6 – une école construite en pisé à Bonbaden, (en Allemagne).

Harbit [2005] a étudié dans ce travail le matériau du béton de terre banché (pisé) qui est largement utilisé pour la réalisation de nombreux monuments historiques dans la région de Tlemcen. La dégradation de ces monuments (sites de Honaine et Mansourah) fait



FIGURE 4.7 – Hôpital régional de Feldkirch, Vorarlberg, Autriche, 1993, [Van-Damme and Houben, 2017].

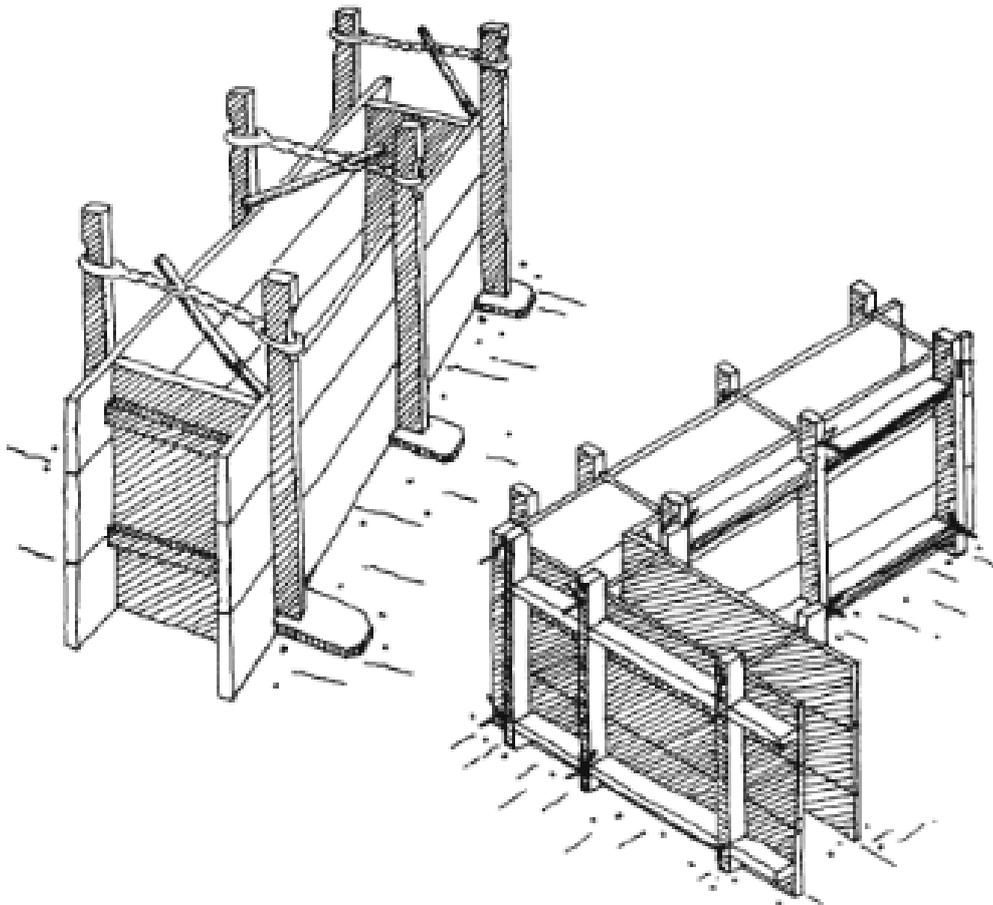
l'objet d'une étude approfondie permettant à l'auteur d'identifier la technique du pisé, les matériaux et les moyens utilisés ainsi que les mécanismes liés à sa durabilité. Il a mené une série d'analyse au laboratoire (propriétés physiques et mécaniques) sur des échantillons de deux sites. Les résultats montrent que le matériau utilisé est un silico-calcaire et des traces d'argile. La résistance à la compression simple des éprouvettes cubiques, taillées dans les fragments de pisé a donné des valeurs comprises entre 2 et 16 MPa, et son module élastique varie entre 700 et 8500 MPa. La rupture montre une certaine ductilité (matériau élasto-plastique). Ce matériau en terre "pisé" s'apparente à un véritable béton dont les caractéristiques globales lui ont permis de traverser des siècles durant dans des milieux dont l'agressivité est prouvée. La modélisation de la structure en pisé a été effectuée à l'aide du code de calcul Castem2000 pour analyser le comportement des murs d'enceinte en pisé. Il a confirmé que l'effet de leur inertie contribue à la stabilité de l'ensemble.

### 4.3.2 Technique de l'adobe

Les adobes sont des briques de terre crue moulées à l'état de pâte plastique ou façonner à la main, sans compactage, amendée de fibres naturelles ou du sable et puis séchées à l'air libre pendant plusieurs semaines.

L'une des plus anciennes pratiques de l'architecture durable (hiéroglyphe égyptien) [Smith and S., 1996], [Reman, 2004]. La construction en adobe est encore largement répandue en Amérique du Sud, en particulier au Pérou, [Heathcote, 2002].

- L'adobe par des moyens simple fournit rapide un logement. Synonyme d'une grande rapidité d'exécution, (figure 4.12).



(a)



(b)

FIGURE 4.8 – Le coffrage du pisé [Houben and Guillaud, 2006].



FIGURE 4.9 – La technologie de la terre pisé :1.compactage dynamique traditionnel à la main avec un petit coffrage en bois mobile, Afrique, 2.Un regard étroit sur un mur de terre pisé, montre les couches compactées, 3 et 4 une construction moderne en pisé ( l’Autriche), 5.Un élément préfabriqué mis en place (l’Autriche et suisse), [Van-Damme and Houben, 2017].

- créer un bon niveau de confort de vie.
- Les premiers gratte-ciel au monde, Shibam Hadhramaut au Yémen, Plus de cinq cents gratte-ciel de terre crue (adobe), dont certains de 08 étages, (figure 4.10).
- Elle consiste à mélanger de terre crue humide amendée par les pailles ou autres fibres façonnée manuellement par la main ou dans des moules parallélépipédiques.
- Les dimensions de blocs sont assimilés aux briques classiques ordinaires.
- L’adobe offre la possibilité de construire des arcs, voutes et des coupoles.
- La construction des adobes sont réalisées presque sans outils (extrêmement économiques), (figure 4.12).
- faible coût dans la production, avec la possibilité de créer une masse production, (figure 4.11).

### 4.3.3 Technique du Torchis

Le mot torchis vient de « torche », qui désignait des fibres nouées en torsades et destinées à allumer les fagots de bois, où, la paille servait comme matériau d’entretien et d’hygiène, [Dewulf, 2015].

Par définition : Le torchis est un matériau de remplissage non-porteur (le principe du colombage), à l’inverse de la bauge et du pisé utilisés en murs monolithes, son matériau à base de terre argileuse et de paille ou autres fibres. Il est utilisé pour les murs, les cloisons et les plafonds dans les constructions à ossatures en bois, avec une épaisseur minime entre (6 à 30cm), (figure 4.14).

- La technique consiste à réaliser une structure porteuse en bois garnie de terre à l’état plastique, le plus souvent mélangée à la paille.



FIGURE 4.10 – Les gratte-ciels en terre, Shibam au Yémen.



FIGURE 4.11 – Stockage massif d'adobes, Villa Janna, Marrakech, Maroc, [Van-Damme and Houben, 2017].

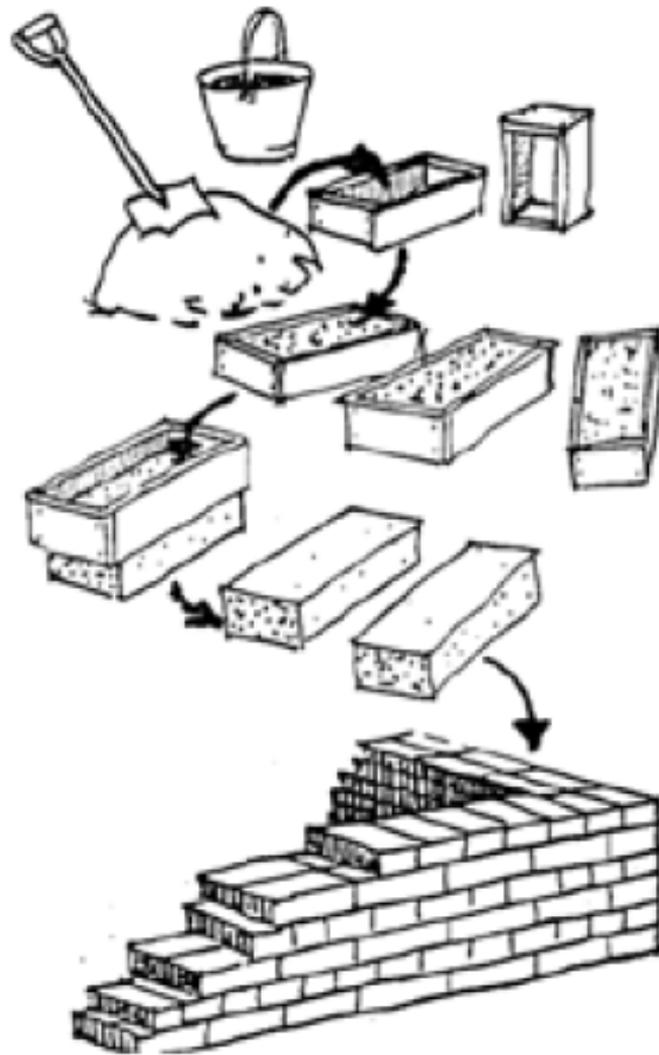


FIGURE 4.12 – Schéma explicatif de préparation et construction des adobes.



FIGURE 4.13 – La construction d'une maison en colombage et torchis près de Rouen, FRANCE.



FIGURE 4.14 – La technique de la construction en terre : Torchis, [Dewulf, 2015], [Bruno, 2016].

- La terre recouvre une structure en lattis de bois fixée entre des poteaux, appelés colombes, la structure en bois est en général extrêmement légère et rapide à monter, (figure 4.13).
- Le torchis, matériau souple, d'une bonne résistance mécanique et bonne durabilité tant utilisé à l'extérieur qu'à l'intérieur des bâtiments.
- Le torchis peut être utilisé pour garnir l'entre-solive des plafonds, constituer les sols des greniers et pour édifier aussi les cheminées et leurs conduites.

#### 4.3.4 Technique de la bauge

La construction en bauge consiste à empiler des boules de terres grossières malléables mélangées à des fibres naturelles, les unes sur les autres et entassées légèrement à l'aide des mains ou des pieds jusqu'à confectionner des murs monolithiques. Les surfaces verticales sont dressées par découpe après un court temps de séchage, alors que le matériau n'est pas trop dur.

- En Afghanistan, des habitats ruraux fortifiés construits en bauge (boules entassées en levées de terre ensuite réglées).
- En France, la construction rurale consiste à empiler à la fourche des paquets de terre plastiques qui ressemblent aux murs en pisé et généralement façonnée à la main, (figure 4.15).
- Elle consiste à amender la terre avec des fibres de natures diverses et confectionner sous forme de boules comme de la pâte à modeler, qui sont empilées les unes sur les autres à l'aide des mains ou des pieds, (figure 4.17).
- La bauge est incorporée dans une structure en bois, dans des cas particuliers comme par exemple les plafonds.
- Dans la plupart des régions du monde, la construction en bauge est entièrement façonnée à la main, à la manière de sculpture géante, (figure 4.16).

### 4.4 La brique de terre compressée (BTC)

Pendant les dernières décennies, le matériau terre est considéré comme un matériau de moindre importance qui a été remplacé par des matériaux de construction industriels (le béton armé, acier, la charpente métallique) lors de la révolution industrielle. Actuellement, le retour au matériau terre, en tant que matériau de construction est devenu indispensable et nécessaire en raison de ses avantages économiques et environnementaux (le matériau de terre ne nécessite que 1% de l'énergie nécessaire à l'extraction, transport



FIGURE 4.15 – Maison en bauge à Gevezé.



FIGURE 4.16 – La construction en bauge au Costa Rica.



FIGURE 4.17 – Le système de construction monolithique en terre crue empilée (bauge).

et la production de matériaux à base de ciment, [Sadek and Hashim, 2011]. La terre est aussi capable de répondre aux normes de confort actuelles. Par ailleurs, la gestion des sédiments de dragage s'oriente vers la valorisation plutôt que l'immersion et le dépôt.

Parmi toutes les techniques les plus utilisées en construction de terre, la brique de terre crue compressée BTC est une technique récente et la seule qui nous intéresse ici. Elle constitue une sorte des pisés en briques et d'adobe qui doit comprimer pour densifier la terre et bénéficier d'un maximum de cohésion pour que le matériau soit rigide, ne se fissure pas et même abordées à un très haut niveau de recherche scientifiques et technologiques. Les avantages de ces matériaux, sont leurs qualités environnementales en formant un écosystème social, économique et écologique. La brique de terre n'est un excellent matériau lorsque ses caractéristiques et ses performances sont prises en compte dès la conception de l'ouvrage.

Aujourd'hui les bâtiments produits en BTC sont intégrés dans la ville et font désormais partie de son paysage physique et social, comme les exemples de Mayotte île française (Mamoudzou), (figure 4.18a) et le bâtiment en BTS sur 4 étages en Inde, (figure 4.18b).

La brique ou Bloc de terre crue compressée BTC : est la terre humide compressée dans des presses à une densité relativement élevée à l'intérieur d'un moule parallélépipédique avec les dimensions d'une brique standard.

- La BTC en terre crue répondra largement au besoin local comme le sud de l'Algérie (Adrar, Béchar, Tamanrasset et Ouargla, etc).
- Le taux des précipitations dans ces régions est très faible (désert) qu'on n'aura pas besoin des Blocs de terre comprimé stabilisé, (figure 4.19).
- elle consiste à compressée la terre sous forme de bloc (ou brique) dans un moule à l'aide des presses dont il existe une grande variété.
- Presse Manuelle transportable appliquent des charges statiques comprises entre 1 à 2 MPa, elle a le rendement de 300 à 800 blocs par/jour, (figure 4.20a).
- Presse mécanique qui appliquent des charges Statiques comprises entre 2 et 15 MPa. son rendement dépend la puissance de la presse, (figure 4.20b), [Gelard, 2005], [Houben and Guillaud, 2006].
- Les blocs obtenus sont immédiatement stockables contrairement aux adobes qui doivent sécher sur de vastes aires de production avant de pouvoir les utiliser.
- Les nouvelles formes des BTC peuvent améliorer les contact inter blocs jusqu'au bloc parasismique.
- D'un point de vue thermique, la BTC est sans égal. La chaleur accumulée le jour est



(a) une maison privée construite par des BTC à Mayotte (Mamoudzou)



(b) Bâtiment en terre stabilisée sur 4 étages en INDE

FIGURE 4.18 – Les constructions en terre (brique de terre crue compressée stabilisée)



FIGURE 4.19 – La construire en blocs de terre compressée stabilisés (BTCs) à Bangalore, Inde, 2007.

dispensée la nuit, et vice versa pour la fraîcheur emmagasinée la nuit et répandue le jour valent mieux qu'une climatisation.

- La construction en BTC participe à la monétarisation des populations (créer des emplois).

La fabrication du BTC est une formidable évolution dans le domaine de la construction et l'architecture de terre. Pour cela la valorisation des sédiments de dragage en brique de terre crue compressée doit satisfaire plusieurs critères.

#### 4.4.1 Normes, recommandations, critères de choix des matériaux

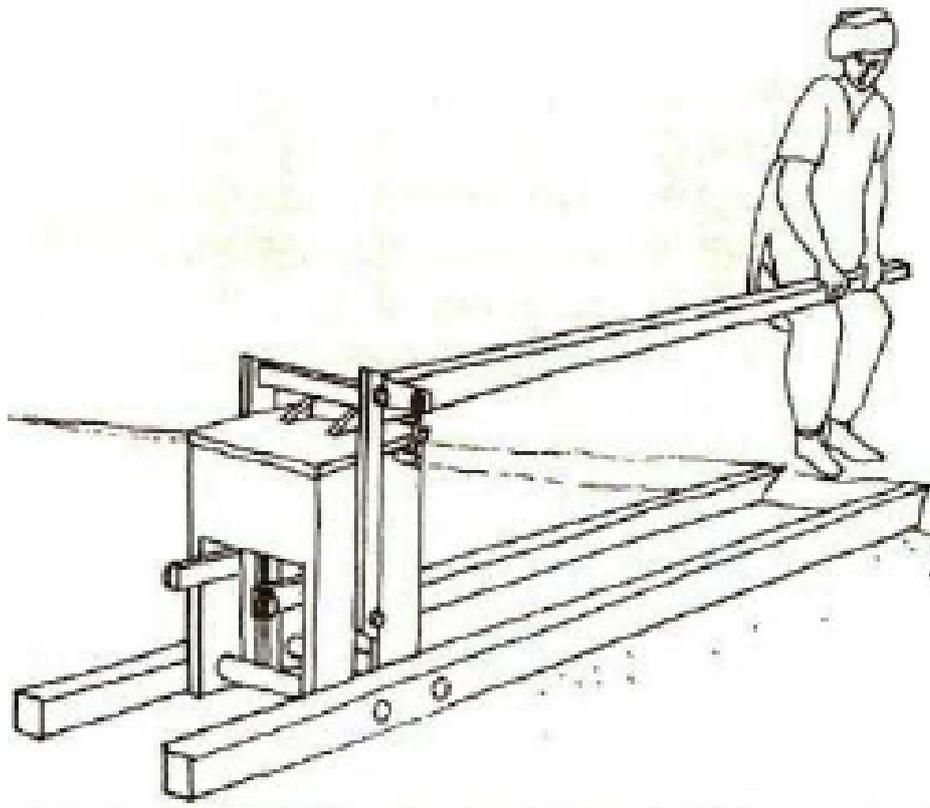
Dans cette section, les principales normes et recommandations de matériau de terre crue vont être présentées :

Les normes générales sur la construction en terre constituent une références utile pour satisfaire aux exigences particulières du cadre réglementaire et de la culture de la construction, afin d'améliorer les propriétés des matériaux utilisés dans ces structures.

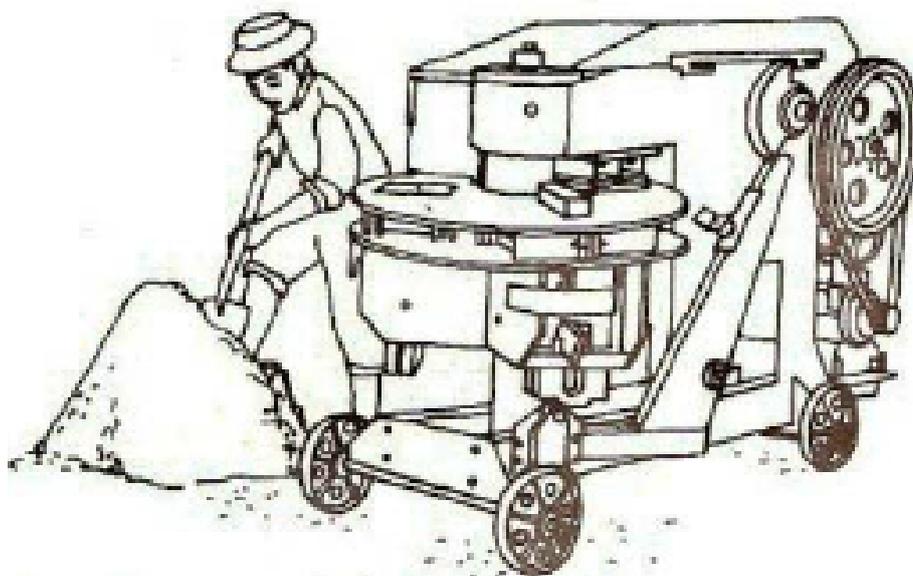
Durant ces derniers années, plusieurs normes en matière de construction en terre ont été publiées en USA (New Mexico, NMAC 14.7.4 (2000) pour les adobes, BTC et pisé), France (XP P 13-901 (2001) pour les BTC), Nouvelle-Zélande (NZS 4297-1998a, 1998b, 1998c pour les adobes, BTC et pisé), [Jiménez et al., 2007]. Regional Africa -ARSO 1996 pour les BTC, et Zimbabwe SAZS 724-2001 pour les pisés, et Peru NTE E 080-2000 sur le comportement sismique dans la construction d'adobe. Ces normes permettent de créer un environnement favorisant l'acceptation des nouvelles constructions en terre.

Pour que le matériau terre soit largement utilisé, il est nécessaire de disposer des recommandations et méthodes simples d'identification et de caractérisation des terres qui se référeront directement aux caractéristiques de résistance des matériaux structuraux, une fois les matériaux mélangés et séchés ou compactés.

- il est nécessaire de connaître le matériau, ses caractéristiques, ses propriétés et ses performances.
- il est aussi nécessaire de connaître les particularités de la ou des techniques de construction employées (adobe, pisé, bloc comprimé, bauge, torchis, etc.), leur outillage adapté et leurs modes de mise en oeuvre spécifiques.



(a) Presse Manuelle



(b) Presse Mécanique

FIGURE 4.20 – Schéma des presses manuelle et mécanique pour produire des BTC.

- Nécessairement adopter des systèmes constructifs simples et compatibles avec les modes de travail du matériau : bonne résistance à la compression, faible résistance à la traction, flexion et cisaillement.
- il est nécessaire d'adopter des principes de conception, des solutions techniques et constructives propres aux constructions et aux architectures en terre .

Nous avons cité les documents techniques les plus utilisés en matériau de la terre en Espagne (MOPT (1992) pour les BTC, adobes et le pisé). En Australia (HB 195 (2002), Bulletin 5- 1992, EBAA (2001) pour les adobes, BTC et les pisés). En Europe, Houben et Guillaud (1994, 2006 ainsi que CRAterre pour les adobes, BTC et les Pisés), Rigassi V (1995) pour les BTC, [Jiménez et al., 2007].

#### 4.4.2 Critères de choix des matériaux

La terre utilisée pour la fabrication de la BTC devrait être exemptée des matières organiques et doit aussi répondre à des exigences spécifiques, en termes de granulométrie, de propriétés plastiques, cohésion et densité sèche. De plus, la relation entre ces propriétés et le comportement hydro-mécanique macroscopique est mise en évidence. Bien qu'il existe une approche qualitative utilisée, des propriétés structurelles fiables telles que : La résistance à la compression, le module d'élasticité. L'effet de l'eau (séchage-humidification, succion), la durabilité (érosion de surface), les résistances à la flexion et la traction.

##### 4.4.2.1 La distribution granulométrique

La distribution granulométrique est la première propriété à prendre en compte lors de l'évaluation de l'aptitude d'un matériau en terre pour la construction. La terre est un matériau granulaire dont la distribution granulométrique peut être particulièrement large. il peut y avoir une différence de taille plus de  $10^5$  entre les granules plus grossiers et les argiles plus fines. La granulométrie contribue à définir la texture du sol par les techniques les plus courantes (Analyses granulométrique et sédimentométrie). Ces méthodes consistent à séparer les différentes fractions et à les évaluer en pourcentage pondéraux de l'ensemble de l'échantillon. On distingue dans un premier temps les éléments grossiers de diamètre supérieur à 2mm comme graviers et cailloux et les autres classes granulométriques classiques de diamètre inférieur à 2mm, sont les sables, les limons et les argiles. Tableau 4.2.

TABLEAU 4.2 – Classification granulométrique des sols selon ASTM D2487 [Van-Damme and Houben, 2017]

terre fine					Éléments grossiers	
<2μ	2μ - 20μ	20μ - 50μ	50μ - 200μ	200μ- 2mm	2mm-2cm	>2cm
Argile	limons fin	limon grossier	sable fin	sable grossier	gravier	cailloux

La distribution granulométrique contrôle en quelque sorte largement toutes les autres propriétés. Plusieurs chercheurs ([Jiménez et al., 2007], [Bruno et al., 2015], [Jaquin, 2008], [V. and Peter, 2003] et [Van-Damme and Houben, 2017]) ont examiné des documents techniques y compris les normes et les recommandations internationales sur la distribution granulométrique des matériaux terres, ([Norme-NF-XP-P13-901, 2001], [CRAterre-

EAG, 1998], [MOPT, 1992], [Moevus et al., 2012] et [Houben and Guillaud, 1989]). À partir de ces normes et recommandations, ils ont conclu que les prescriptions relatives à la taille des particules sont plus restrictives pour la construction en pisé, BTM : (brique de terre moulée comme l'adobe) et BTC.

La figure 4.21 montre les limites inférieure et supérieure de la distribution granulométrique des matériaux en terre (BTC, Pisé, BTM).

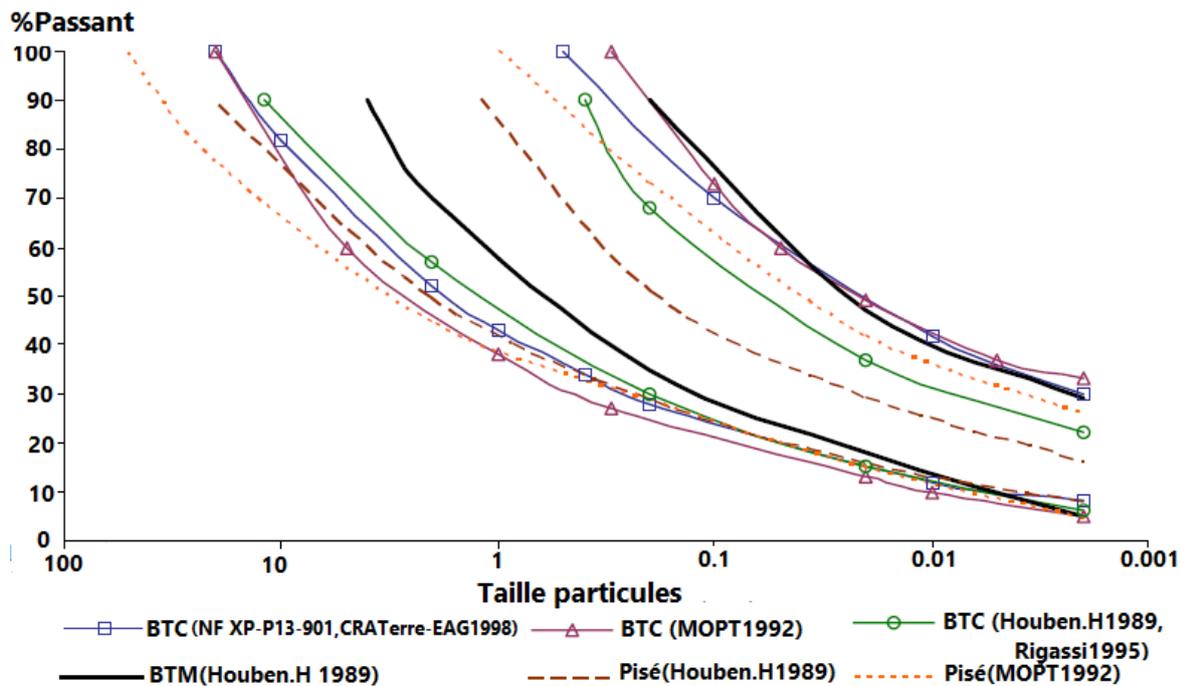


FIGURE 4.21 – Fuseaux de courbes granulométriques conseillées pour construire en BTC, en Pisé ou en adobe (BTM = Brique de Terre Moulée) selon la norme française [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], CRATerre-EAG [1998], MOPT [1992]

#### 4.4.2.2 La plasticité : Pouvoir à se déformer sans se fissurer ou se désintégrer

La plasticité d'une terre et les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg (limite de liquidité LL, limite de plasticité PL, l'indice de plasticité PI). Pour obtenir la meilleure résistance des matériaux de terre (BTC, pisé et adobe), tant aux sollicitations mécaniques qu'à l'action de l'eau, il est nécessaire de choisir les limites les mieux adaptées pour les blocs de terre selon la norme française [Norme-NF-XP-P13-901, 2001]. Cette norme recommande que le sol doit présenter un minimum de plasticité assurant une cohésion entre les grains du matériau lors du compactage ( $\% 2\mu\text{m} > 5\%$ ). La plasticité d'une terre dépend directement de la teneur en argiles et de leur capacité d'adsorption d'eau, (figure 4.22).

TABLEAU 4.3 – Système simplifié de classification des sols selon la norme ASTM D2487 avec une évaluation qualitative de l’aptitude à la construction en terre, [Van-Damme and Houben, 2017]

Principales divisions	symbole de groupe	Noms de sols typiques	Aptitude à la construction de la terre (non stabilisée)
sols à gros grains > 50% retenus (refus) sur le tamis de 0,075mm	Gravier propre, avec < 5% de passant du tamis 0,075mm	gravier bien gradué	Ne convient pas, il faut amender par des sols fins
	Gravier avec > 12% de fines	gravier mal gradué (serrée) gravier limoneux	Ne convient pas, il faut amender par des sols fins approprié mais manque de la cohésion et se désagrège facilement approprié, parfois, un sol fin doit être ajouté
les sables de 50% ou plus passent dans le tamis de 4,75 mm	Sables propres	Gravier argileux Sables propres bien gradué	Ne convient pas, il faut amender par des sols fins
	sables avec > 12% de fines	Sables propres mal gradué sable limoneux	Ne convient pas, il faut amender par des sols fins approprié mais manque de la cohésion et se désagrège facilement
Sols à grains fins > 50% passent (tamisât) dans le tamis de 0,075 mm	Inorganique	Sables argileux limons de faible plasticité, sables fins limoneux	approprié, parfois, un sol fin doit être ajouté approprié, mais manque de la cohésion
	Organique	Argiles de faible plasticité, limon Argileux	Parfois approprié, un sol sableux doit être ajouté
	inorganique	limons organiques et argiles de faible plasticité	Ne convient pas, parfois acceptable
limons et argiles avec limite de liquide > à 50%	organique	limons de forte plasticité argiles de forte plasticité, argile plastique argiles et limons organiques de fortes plasticités	Très rarement approprié Rarement approprié, un sol sableux doit être ajouté inapproprié
sols très organiques		Tourbe et autres sols très organiques	inapproprié pour les constructions en terre

Pour La BTC, cinq fuseaux de granularité sont trouvés, certains d’entre eux étant très similaires, ils ont déduit que la taille maximale des grains pour BTC est de 20 mm, [Jimenez et al., 2007], [Moevus et al., 2012].

Tableau 6.6, basé sur le système de classification des sols, selon la norme ASTM D2487, résume les principaux types de sous-sols et leur aptitude à être utilisés pour la construction en terre. Dans ce système de classification, les sols les plus appropriés sont les graviers limoneux ou argileux, les sables limoneux ou argileux et, dans une moindre mesure, les limons et les argiles à faible plasticité ( limon et assez d’argile pour agir comme un liant), [V. and Peter, 2003], [Van-Damme and Houben, 2017].

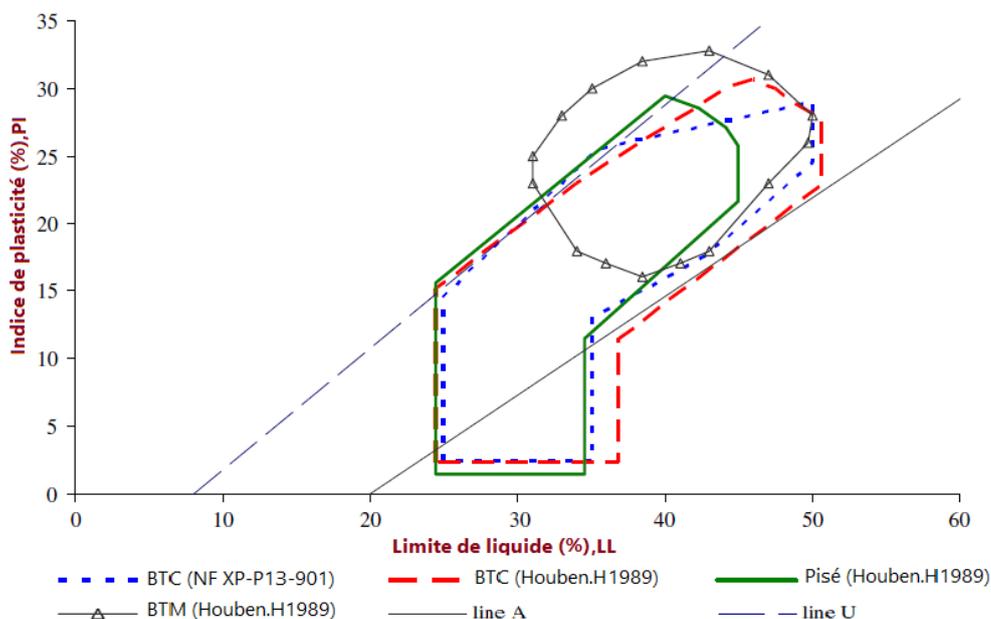


FIGURE 4.22 – Fuseaux de plasticité conseillées pour construire en BTC, en Pisé ou en BTM selon la norme française [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], CRATerre-EAG [1998] et Houben and Guillaud [1989]

#### 4.4.2.3 Compactage

Un certain nombre d’études s’est intéressé à la relation entre la densité de la terre et l’effort de compactage. La teneur en eau optimale est celle pour laquelle la masse volumique est maximale. Pour cela on utilise un essai de Proctor normal ou modifié, pour choisir la terre utilisable en fabrication des Matériaux en terre (BTC) et déconseillé pour les sols argileux mais le compactage statique est mieux adapter aux sols argileux, [Mesbah et al., 1999b]. Par contre ces essais ne sont pas utilisés pour déterminer la teneur en eau optimale de la BTC, [P’kla, 2002] montrent qu’un compactage statique mieux.

La figure 4.23 présente les fuseaux de compactage recommandés pour construire en BTC, en pisé ou en adobe selon Houben and Guillaud [1989] et Houben and Guillaud [1994].

#### 4.4.2.4 La résistance à la compression simple

La résistance à la compression simple de la terre crue (non stabilisée) séchée à l’air libre est généralement de quelques dixièmes de MPa, (0.5 à 1.5 MPa pour bauge, 1 à 2.5

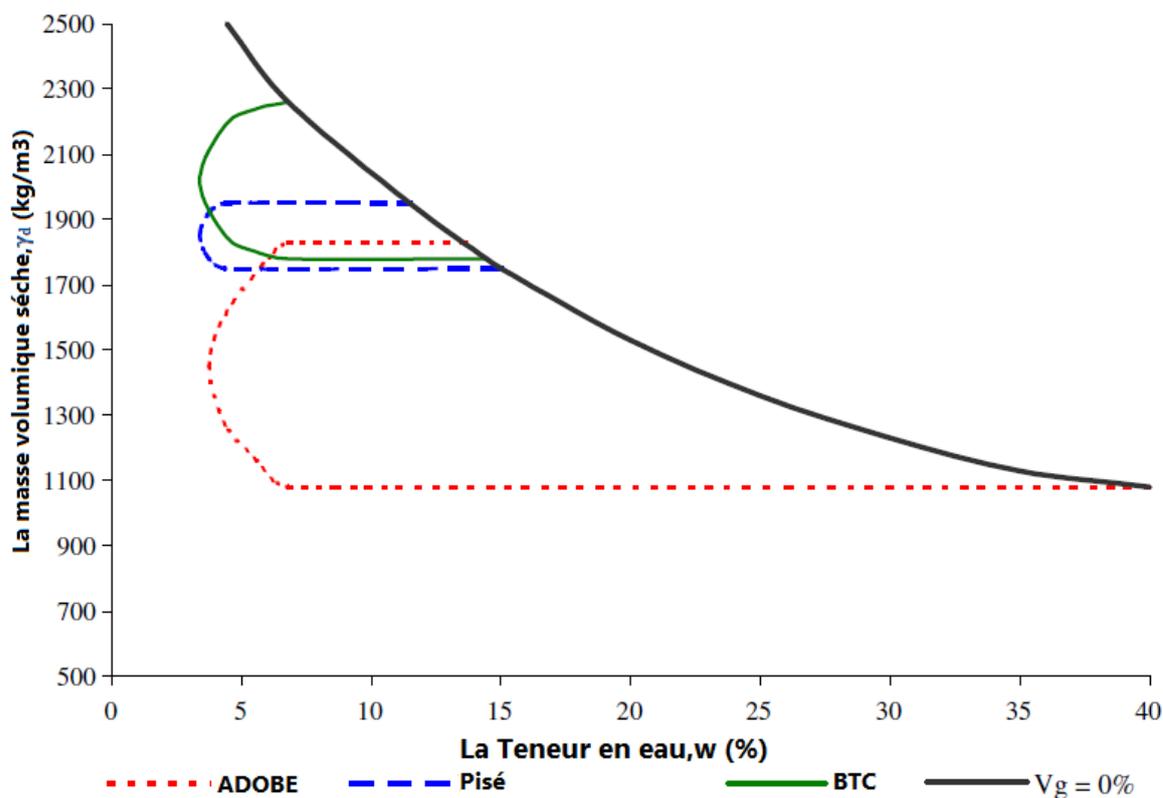


FIGURE 4.23 – Fuseaux de compactage recommandés pour construire en BTC, en Pisé ou en adobe selon Houben and Guillaud [1994].

MPa pour l'adobe) à quelques MPa pour le pisé (1 à 4 MPa) et les blocs de terre compressée BTC entre (1 à 7 MPa), (figure 4.24), [Van-Damme and Houben, 2017].

Dans la littérature, le manque des normes sur la terre crue constitue le point délicat. La résistance à la compression simple de la terre, c'est une propriété mécanique faisant l'objet d'exigences réglementaire fortes. Selon la norme [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], la résistance à la compression simple des BTC doit être supérieure ou égale à 1.6 MPa.

Nous cherchons donc à valider nos essais à cette norme, [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], pour trouver un résultat à la compression également fiable.

#### 4.4.3 Le comportement hydromécanique des BTC

La terre crue est un matériau cohésif-frottant, c'est-à-dire que son comportement mécanique est déterminé par l'action combinée de la cohésion et du frottement. Dans les conditions rencontrées dans la construction en terre comme la BTC, (un milieu poreux non-saturé), c'est-à-dire qu'il contient de l'eau adsorbée et des ponts d'eau liquide (eau capillaire) en équilibre avec l'humidité relative ambiante interne. La cohésion provient d'un certain nombre de forces d'attraction de surface inter-particulaires, les forces de dispersion (van der Waals), capillaires (ou la succion matricielle) et ioniques, [Gelard et al., 2007], [Gelard et al., 2005], [Van-Damme and Houben, 2017] dont la résistance dépend principalement de la teneur en argile, de la nature et de l'état d'hydratation.

La phase interstitielle dans le milieu poreux non saturé (l'air et l'eau) joue un rôle très important sur son comportement. La présence de l'eau et l'air dans les matériaux de terre (BTC), génère toujours un état de contrainte supplémentaire, modifiant le comportement de ces milieux poreux. L'état de contrainte supplémentaire est complètement différent pour les milieux non-saturés par rapport aux milieux saturés.

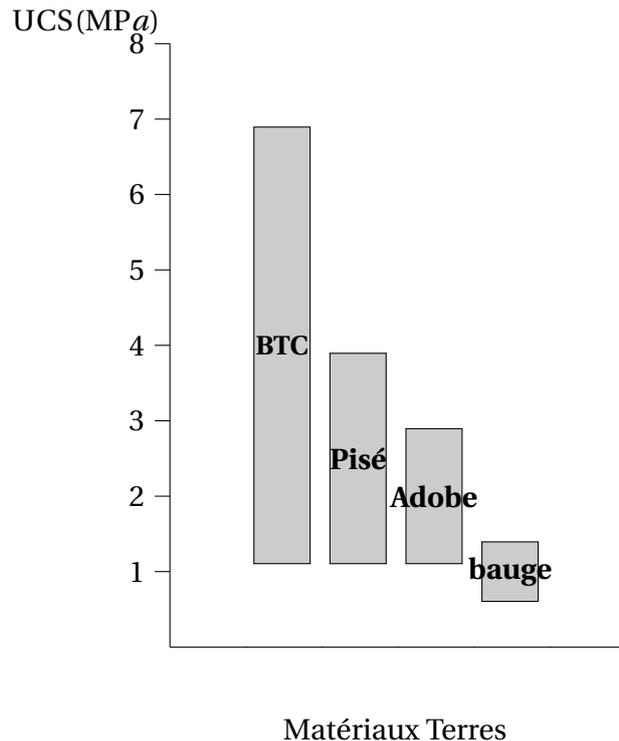


FIGURE 4.24 – Résistance à la compression de la terre crue (non stabilisée) séchée à l'air libre, [Van-Damme and Houben, 2017].

Les mesures expérimentales triaxiales et la modélisation sur les sols ont permis de conclure que la principale contribution à la cohésion est produite par les forces capillaires (ou la succion matricielle) dans le ménisque de l'eau rempli le vide entre les particules d'argile ou le vide entre les particules d'argile et les particules plus grossières (Limon, le sable), [Van-Damme and Houben, 2017], [Gelard et al., 2005] et [Gelard et al., 2007]. Cela a été confirmé par des données expérimentales, reliant la résistance et la rigidité de la terre compactée à sa teneur en eau et sa succion matricielle, [Van-Damme and Houben, 2017], [Florian et al., 2016], [Fleureau et al., 2002], [Jaquin et al., 2009]. Comme tous les matériaux cohésif-frottant, la terre crue devient plus résistante et rigide avec l'augmentation de la densité. Généralement, la résistance de terre crue augmente dans l'ordre [la terre séchée à l'air libre (adobes, bauges) < la terre en pisé < le bloc de terre crue compressée (BTC)], [Van-Damme and Houben, 2017], [Miccoli et al., 2014]. Le matériau de terre est mélangé avec une quantité d'eau pour optimiser les propriétés mécaniques du produit final.

Enfin, la terre est sujette à un phénomène de retrait : pendant une phase de séchage, le réseau poreux se contracte sous l'action des forces capillaires qui deviennent de plus en plus fortes. Cela se traduit par une diminution de volume de la terre au cours du séchage. Plus le retrait est important, plus le risque de voir apparaître des fissures est très important.

#### 4.4.4 Le comportement hygrothermique des BTC

Les murs en briques de terre crue compressée sont connus pour leur confort d'habitation et leur capacité à réguler la température et l'humidité à l'intérieur des bâtiments, grâce à leur conductivité thermique relativement faible, grande masse thermique et une forte respirabilité (transfert facile de phase eau/ vapeur). Les mécanismes couplés de transferts de masse et de chaleur est simple résistance thermiques pour caractériser le

comportement hydrothermique de BTC.

Nous avons résumé ci-dessous quelques travaux trouvés dans la littérature ([[Van-Damme and Houben, 2017](#)]; [[Moevus et al., 2012](#)]), concernant la conductivité thermique (W/m.K), capacité thermique massique (J/kg.K), et le facteur de résistance à la vapeur d'eau ( $\mu$ ) (rapport entre la diffusion de la vapeur d'eau à travers un matériau et celle d'un mètre d'air immobile à 760 mmHg, 20°C qui est le facteur le plus utilisé pour caractériser l'étanchéité d'un matériau à la vapeur d'eau.) de différents matériaux terre : BTC, Pisé, bauge, adobe, et d'autres matériaux : Béton ordinaire (BO), Béton poreux (BP), Terre cuite (TC), plaques de plâtre (PP), bois, etc.), avec des techniques de mesure différentes, (figure 4.25).

[[Laurent, 1986](#)] dans sa thèse, a montré que la conductivité thermique du matériau terre ou avec addition paille était directement en adéquation avec : son taux de compactage par l'augmentation de la densité et donc de nombre contact entre les grains, sa teneur en eau résiduelle : fonction de l'atmosphère dans lequel l'échantillon est à l'équilibre.

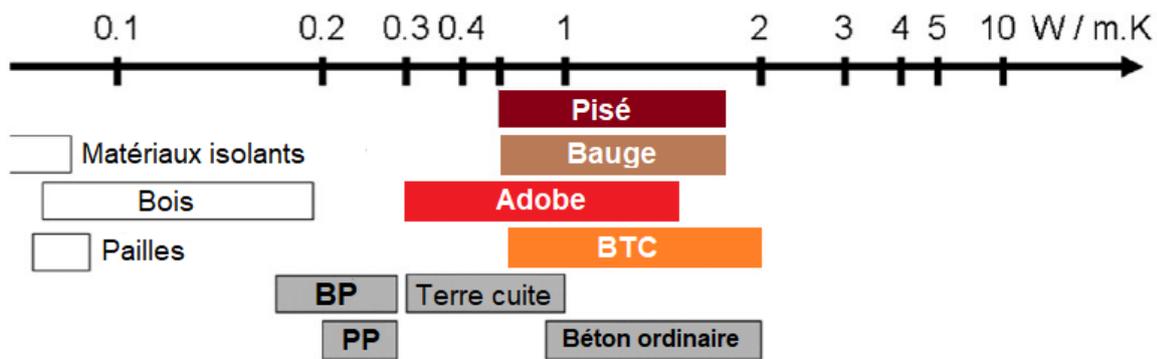
## 4.5 Avantages du matériau terre

Les constructions en terre crue présentent beaucoup d'avantages.

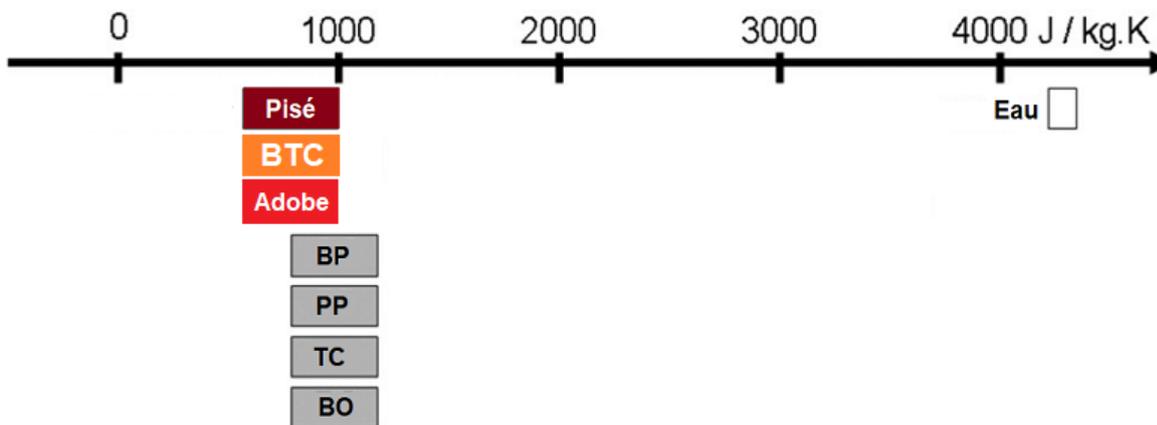
1. Les matériaux de constructions (béton, brique de terre cuite, parpaing) consomment beaucoup d'énergie qui sont parmi les plus élevés de tous les secteurs de l'activité humaine. La terre réduit des coûts énergétiques qui associés à la construction dont la fabrication, mise en œuvre simple (presse, les moules, coffrage légers) et le transport des matériaux terre ne nécessitent que peu d'énergie (pétrole, gaz,...).
2. La terre peut être entièrement recyclable qui ne produit aucun déchet d'exploitation industrielle ou chimiques.
3. L'utilisation de la terre comme matériau de construction limite l'épuisement des ressources naturelles.
4. Les constructions en terre fonctionnent également très bien de manières hygrothermique qui contribuent à la régulation des ambiances du confort thermique, déphasage thermique (effusivité et diffusivité) et donnent aussi aux bâtiments la possibilité de "respirer" en absorbant ou libérant de l'humidité en fonction des conditions hydriques environnantes, [[Allinson and Hall, 2012](#)], [[Hall and Allinson, 2009](#)].
5. Le matériau terre diminue la consommation énergétique liée à la climatisation et au chauffage, [[Pacheco-Torgal and Jalali, 2012](#)].
6. La réduction des émissions de gaz (un bilan de pollution entièrement positif).
7. La création des emplois sur l'ensemble de la chaîne de production.
8. La terre permet de prolonger l'héritage des traditions architecturales en matériaux locaux.
9. Les constructions en terre peuvent garantir l'accès à la dignité d'un logement décent à des populations qui vivent le plus souvent dans des conditions précaires et misérables.
10. quelque soit les techniques de la construction en terre, le traitement est maintenu au minimum.

## 4.6 Inconvénients de la construction en terre

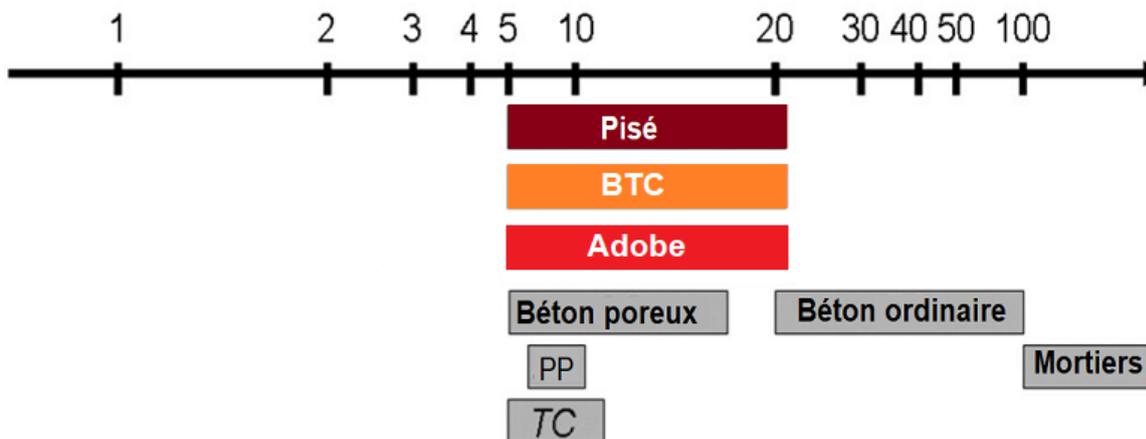
La terre crue présente cependant quelques inconvénients :



(a) La conductivité thermique, [Van-Damme and Houben, 2017]



(b) La capacité thermique massique



(c) Diffusion relative de la vapeur d'eau

FIGURE 4.25 – Différents résultats de comportement hygrothermique du matériau

1. La composition de terre peut varier fortement qui empêche une standardisation de la préparation de la terre crue et nécessite une certaine identification.
2. Manque des normes spécifiques des constructions en terre, heureusement, les études récentes permettent de combler cette lacune.
3. La terre crue est plus ou moins sensible à l'eau (la pluie, la neige, la remonter capillaire), ce qu'il faut rajouter des liants, afin d'obtenir les caractéristiques souhaitable contre l'érosion de surface et faire des soubassements en pierre ou béton pour éviter la remonter d'eau. il doit mettre aussi un toit présentant un dépassement suffisant pour protéger la construction, (des bonnes bottes et un bon chapeau).
4. les constructions en terre couche par couche comme le pisé crée des zones faibles entre elles et toujours plus denses en haut que dans leur partie inférieure.
5. Les matériaux terre ont une résistance faible à la traction et sensibles aux séismes.

## 4.7 Conclusion

La terre est un matériau qui possède énormément d'avantages. Elle est gratuite, locale, écologique. La terre, étant un matériau éternellement renouvelable et non polluant, permet aussi d'avoir l'autonomie technique et économique. Pour remettre en valeur ce matériau, il est nécessaire de capitaliser une expérience millénaire. Nous nous sommes également intéressés à la diversité des constructions en terre et en particulier la BTC. On s'est particulièrement intéressé à ses propriétés physico-chimique et hydro-mécanique en prévision d'une valorisation des sédiments en BTC qui fera l'objet des deux prochains chapitres.

## **Troisième partie**

# **Valorisation des sédiments : Application au barrage Bakhadda**



# Chapitre 5

## Proposition de valorisation du sédiment naturel en BTC

*« I don't see the Earth as a formless material without consciousness, but as Spirit consciously disguised as matter.  
Un matériau n'est pas intéressant pour ce qu'il est mais pour ce qu'il peut faire pour la société »*

---

John F. C. Turner, architecte anglais

### Sommaire

---

5.1	Introduction . . . . .	122
5.2	Présentation du barrage de Bakhadda . . . . .	123
5.2.1	Situation géographique du bassin versant . . . . .	123
5.2.2	Un aperçu sur le taux d'envasement du barrage Bakhadda . . . . .	124
5.3	Méthodes expérimentales mises en œuvre . . . . .	125
5.3.1	Préparation des sédiments . . . . .	125
5.3.2	Compactage . . . . .	126
5.3.3	Dimensions et modalités de confection des éprouvettes . . . . .	127
5.3.4	Essais de compression simple . . . . .	127
5.3.5	Mesure des propriétés élastiques en petite déformation . . . . .	130
5.3.6	Chemins de drainage-humidification . . . . .	130
5.3.7	Perméabilité à la vapeur d'eau . . . . .	137
5.4	Durabilité et érosion de surface . . . . .	140
5.4.1	Mécanisme d'érosion . . . . .	141
5.4.2	Pathologie de désagrégation . . . . .	142
5.4.3	Facteurs d'influence de l'amplitude de l'énergie cinétique . . . . .	142
5.4.4	Les recherches antérieures sur la durabilité des constructions en terre . . . . .	142
5.4.5	Techniques de caractérisation de l'érosion de surface . . . . .	143
5.5	Traitement à la chaux . . . . .	149
5.6	Essais d'identification du sédiment naturel noté NS . . . . .	151

5.6.1	Granulométrie . . . . .	151
5.6.2	Limites d'Atterberg . . . . .	151
5.6.3	Valeurs au bleu de méthylène VBS . . . . .	152
5.6.4	Teneur en Matières organiques . . . . .	152
5.6.5	Classification LPC-USCS . . . . .	152
5.7	Essais de compactage du sédiment naturel (NS) . . . . .	<b>152</b>
5.8	Positionnement des sédiments naturels NS par rapport aux recommandations pour les BTC . . . . .	<b>154</b>
5.8.1	Vis à Vis de la granulométrie . . . . .	154
5.8.2	Vis-à-vis des limites d'Atterberg . . . . .	154
5.8.3	Vis-à-vis du compactage . . . . .	155
5.9	Conclusions quant à l'utilisation du sédiment naturel (NS) dans les BTC	<b>157</b>

---

## 5.1 Introduction

Au cours de ces dernières années, la protection environnementale et le développement durable sont devenus de plus en plus importants dans plusieurs secteurs d'activité. La bonne gestion des sédiments de dragage est reconnue comme un enjeu majeur pour le bon fonctionnement des barrages. Des volumes importants de sédiments sont dragués périodiquement dans la région de l'ouest algérien afin de maintenir le fonctionnement des retenues des barrages et leurs activités.

Plusieurs opportunités pour l'utilisation bénéfique des sédiments dragués ont été identifiées : dans l'usage de la construction (briques, mortier, produit de ciment), [ElFgaier et al., 2013], [Aouad et al., 2012], [Mazen et al., 2009], fabrication d'agrégats en technique routière, [Dubois et al., 2009], [Kamali et al., 2008], [Miraoui et al., 2012].

L'utilisation bénéfique des matériaux locaux dans la construction en terre comme BTC est l'une des principales opportunités envisagées par plusieurs chercheurs, [Morel and P'kla, 2002], [ElFgaier et al., 2015], [Aubert, 2013b], [Oti and Kinuthia, 2009], [Morel et al., 2001], dont la mise en forme ne nécessite que peu d'énergie, il peut être entièrement recyclable. Aujourd'hui un retour croissant à la construction en terre crue dans plusieurs pays y compris les pays industrialisés profitant du développement des techniques de production très variées, soutenues par des recherches scientifiques approfondies illustrées particulièrement par celles qui concernent la technologie des blocs de terre comprimée (BTC), [Houben and Guillaud, 2006].

La valorisation des sédiments de dragage est explorée comme une solution possible pour fabriquer des matériaux de construction, [Lafhaj et al., 2008] et [Mazen et al., 2009], pour limiter les consommations d'énergie associées aux matériaux de construction à l'échelle planétaire. Remini [2006] a obtenu des résultats très encourageants sur des sédiments de plus d'une dizaine de barrages en Algérie pour la fabrication des briques pleines, (figure 5.1).

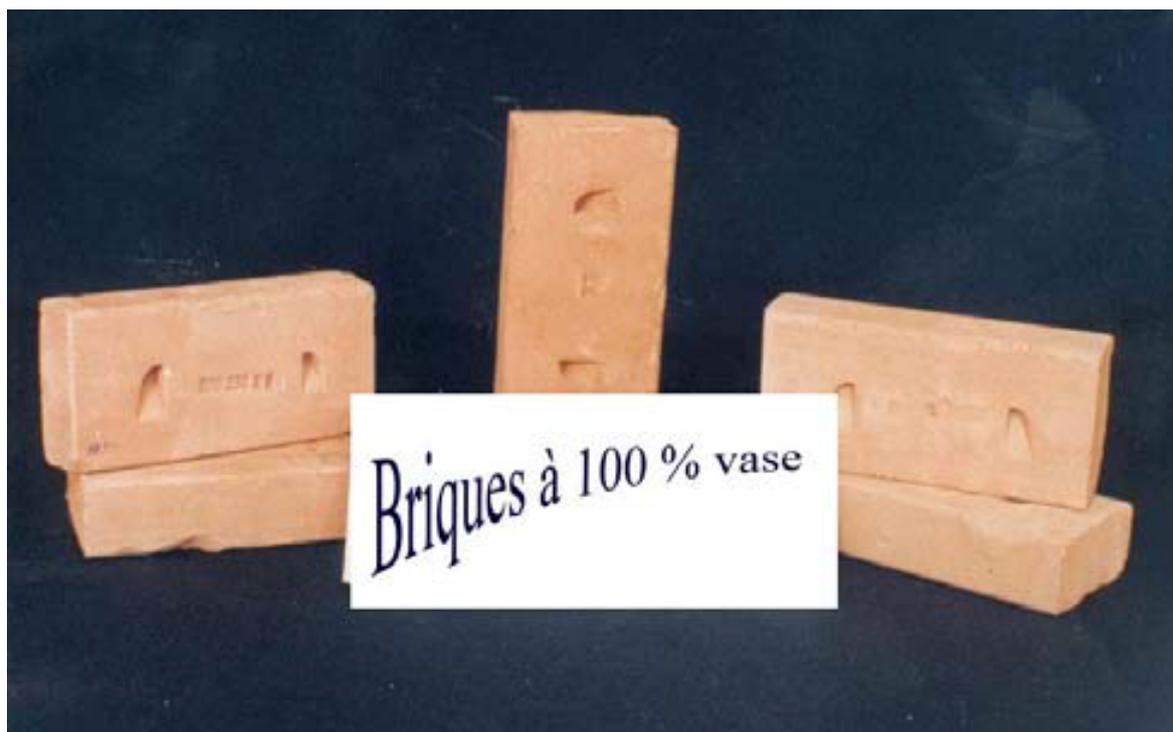


FIGURE 5.1 – Briques réalisées à base de la vase du barrage de Beni Amrane [Remini, 2006]

La terre pourrait constituer un matériau de construction alternatif pour les logements à faible cout en Algérie, [Bahar et al., 2004]. La construction en terre est répandue dans les zones rurales et désertiques, même s'il existe de nombreux exemples de constructions en terre crue en milieu urbain. Selon les sources de CRAterre (centre international de la construction en terre), 30% de la population mondiale, vit dans un habitat en terre. Pour les seuls pays en voie de développement, il s'agit de 50% des populations en majorité rurale, et au moins 20% de la population urbaines et péri-urbaine, [Houben and Guillaud, 1994], [Taallah, 2014]. Cette étude a pour but de valoriser les sédiments de dragage des barrages Algériens (Barrage bakhadda), et nous nous intéressons à la élaboration des blocs de terre crue comprimée qui est un produit de construction économique à faible impact environnemental, et recyclable.

## 5.2 Présentation du barrage de Bakhadda

Cette étude porte sur le barrage Bakhadda, qui se trouve au nord-ouest de l'Algérie. Ce barrage est l'un des premiers barrages en enrochements avec un masque étanche sur le parement amont, dont l'exécution a été confiée à la société des grands travaux de Marseille en 1928-1936 [Hydrodragage, 2005].

Il est situé sur le cours supérieur d'oued Mina, affluent de l'oued Chéllif à proximité du village de MACHRAA SFA à 30 km à l'ouest de la wilaya de Tiaret. Il est principalement destiné à l'irrigation de la plaine de la wilaya de Relizane et l'approvisionnement en eau potable de Tiaret, Rehouia, Frenda et Machraa Sfa, (figure 5.2).



FIGURE 5.2 – la digue du barrage de BAKHADDA.

### 5.2.1 Situation géographique du bassin versant

Le bassin versant de l'oued Mina s'étend sur 5000 km<sup>2</sup> dans la partie occidentale de l'Atlas Tellien. Il s'allonge sur 90 km sur les monts de Frenda au sud, ceux de la Mina au nord et 50 km de l'ouest à l'Est entre les monts des Beni-Chougrane et le massif de l'ouar-senis. L'oued Mina prend sa source dans les monts de Frenda pour confluer avec l'oued

Chélif après un parcours de 125 km. Deux barrages ont été construits sur cet Oued, BAKHADDA, sur le cours supérieur qui draine un sous bassin de  $1280 \text{ km}^2$  et Es-Saada en amont de Sidi Mhamed Benaouda avec une capacité de 237 millions  $m^3$  [Hydrodragage, 2005]. Le bassin de l'oued MINA est à peu près entièrement situé dans les calcaires jurassiques du portlandien, le marne-calcaires crétacés du Turonien et de l'Albien. L'entraînement des alluvions par le ruissellement a comblé les vallées, creusées en forme de cuvettes.

### 5.2.2 Un aperçu sur le taux d'envasement du barrage Bakhadda

L'envasement est un phénomène naturel très complexe pour les barrages. Il est devenu actuellement une réelle menace pour l'infrastructure hydraulique, tant au niveau de la réduction rapide de la capacité utile du barrage qu'à celui de la sécurité de l'ouvrage lui-même. En Algérie, la durée de vie d'un barrage est calculée en fonction du taux d'envasement. La plupart des barrages en Algérie ont une durée de vie de l'ordre d'une trentaine d'année à cause de phénomène de l'envasement. Ils sont dans une situation critique, leur exploitation reste en dessous de leur capacité réelle. L'évaluation du taux d'envasement se fait par comparaison du levé de la cuvette initiale du barrage Bakhadda en 2005 avec le levé fait en 1967. Notons que  $1 m^3$  de vase pèse 1.6 tonnes se décomposant en 1 tonne de matière solide et 0.6 tonne d'eau. Il est probable que l'envasement de la cuvette est passé par des étapes :

- Avant 1950 le barrage : peu exploité, était vidé souvent, les vidanges de fond ont permis de limiter l'envasement.
- De 1950 à 1963 le barrage a été exploité jusqu'à la cote 581.5 m, l'envasement a donc augmenté.
- Après 1963, après surélévation, le barrage a été exploité jusqu'à la cote 584.75 et malgré des chasses régulières, l'envasement a augmenté encore sensiblement.

Les principaux résultats de la campagne bathymétrique [Hydrodragage, 2005] sont les suivants :

- La perte de capacité annuelle moyenne du barrage BAKHADDA de 1986 à 2005 est de  $0.273 \text{ Hm}^3/\text{an}$ .
- le taux d'envasement est de l'ordre de 28.67 %.

Le dragage de la retenue est devenu une solution indispensable pour prolonger la durée de vie de cet ouvrage, l'envasement de la retenue augmente d'une année à l'autre.

Cette opération de dragage confiée à une entreprise HYDRODRAGAGE-C.T.SYSTEMS spécialisée pour draguer une quantité de 20 millions de  $m^3$ . Ils ont dragué 5 millions de  $m^3$  en 2009 (Agence nationale des barrages et des transferts :ANBT), à l'aide d'une drague stationnaire suceuse-refouleuse «Djebel DEBAGHE» puissance  $5000 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $1500 \text{ m}^3$  de solide par heure, soit de l'ordre de 20% à 30%), (figure 5.3), d'un montant de l'ordre de 80 milliards de centimes.

La qualité des sédiments dragués et la distance du site de dépôt le plus proche, apte à recevoir ces sédiments qui ont été déversés dans 8 bassins de décantation : La technique consiste tout simplement en un aménagement adéquat. Une succession de bassins de décantation sont creusés plus en amont du barrage à dévaser «terres inculte d'une superficie de 200 hectares». Les boues extraites sont déposées dans ces bassins, et après décantation, les eaux sont acheminées gravitairement vers leur lieu d'origine.

La connaissance du site à travers sa localisation, la taille du bassin versant, la nature géologique des formations soumises à l'érosion, mettant en évidence son importance économique, sont autant d'éléments qui peuvent caractériser les sédiments à valoriser,



(a) système de dragage vers les bassins de décantation) (b) (la drague stationnaire suceuse-re-fouleuse)

FIGURE 5.3 – Drague stationnaire «DJEBEL DEBAGHE» à barrage bakhadda 2009/2010.

en matière d'ordre de grandeur des volumes à traiter et des moyens à mettre en œuvre dans le cadre global de la réutilisation de la vase (valorisation éventuelle).

Nous estimons aujourd'hui un gisement de sédiments dragués au niveau du barrage de Bakhadda de l'ordre de 5 millions m<sup>3</sup>. Nous proposons dans ce qui suit une méthodologie pour valoriser ces sédiments dragués dans le domaine du BTP, et plus particulièrement en matériaux de construction par l'élaboration de BTC (Blocs de terre crue comprimée).

## 5.3 Méthodes expérimentales mises en œuvre

### 5.3.1 Préparation des sédiments

Les échantillons étudiés ont été prélevés dans les bassins de décantations situées dans la zone de rejet à 2km de la digue. Ils ont été conditionnés dans des sachets en plastique fermés et conservés dans des bidons étanches. Sous ce conditionnement, ces bidons ont été transférés au laboratoire LOMC, UMR CNRS de l'université Le Havre Normandie où j'ai effectué un long séjour scientifique pour les étudier, (figure 5.4).



FIGURE 5.4 – Les échantillons étudiés.

L'exploitation de ces sédiments a été selon le protocole suivant :

- La teneur en eau initial a été mesurée à l’ouverture de chaque bidon de sédiment.
- La totalité du stock a été étalé sur le sol pour réaliser un mélange homogène représentatif du gisement in situ.
- Au fur et à mesure du séchage à l’air libre, des mottes se constituent, ce qui a nécessité leur fragmentation.
- Enfin, un tamisage à 5mm a été réalisé pour obtenir une mouture exploitable pour les essais d’identification.

### 5.3.2 Compactage

En construction de terre crue compactée (BTC, pisé, etc.), on se réfère généralement aujourd’hui aux essais Proctor normal et modifié et les critères recherchés en termes de densités et de résistance.

Cet essai permet de déterminer les caractéristiques de compactage du matériau, matérialisées par deux grandeurs fondamentales : la teneur en eau optimale et le poids volumique sec maximal. Ces deux grandeurs dépendent de l’énergie de compactage appliquée à l’éprouvette. On distingue l’essai Proctor normal et modifié qui conduisent à des couples de valeurs différents.

- $W_{SPO}$  (ou  $W_{MPO}$ ) : Teneur en eau à l’optimum Proctor Normal (ou Modifié).
- $\gamma_{dSPO}$  (ou  $\gamma_{dMPO}$ ) : Poids Volumique sec à l’optimum Proctor Normal (ou Modifié).

Dans notre cas, les essais de Proctor normal et modifié ont été effectués à l’aide d’un appareil de compactage automatique selon la norme NF EN 13286-2.

#### 5.3.2.1 Énergie de compactage dynamique Proctor normal et modifié.

L’étude pratiquée en laboratoire pour caractériser les sols compactés est généralement basé sur l’essai Proctor, selon les normes, [Norme-NF-P94-093, 1993], [ASTM-, D1557-D698].

Dans notre cas, les essais Proctor normal et modifié ont été effectués en utilisant les deux types de moules : Proctor et CBR, vu la diversité des dispositifs (dimensions des moules, masse de la dame) pouvant être utilisés pour l’essai de compactage.

Selon la norme NF EN 13286-2, les équivalences entre les résultats obtenus avec des appareillages nouveaux et/ou alternatifs sont fondées sur l’énergie spécifique donnée par l’équation (tableau 5.1) :

$$E_s = m g H \frac{N}{V} \quad (5.1)$$

où  $E_s$  ( $J/m^3$ ) : Énergie spécifique de compactage ( $N.m/m^3$ )

$m$  (kg) : masse de la dame

$g$  (N/kg) : accélération de pesanteur

$H$  (m) : hauteur de chute

$N$  : nombre de coups (Nombre de coups par couche x nombre des couches).

$V$  ( $m^3$ ) : volume du moule

Concernant les éprouvettes destinées aux essais hydro-mécaniques, celle-ci ont une dimension de 50mm de diamètre × 100 mm de hauteur. Pour les confectionner, un compactage statique dans un moule à double pistons à l’aide d’une presse est nécessaire pour reproduire les densités et les teneurs en eau cibles.

TABLEAU 5.1 – L'énergie de compactage dynamique calculée

Caractéristiques de l'essai	Proctor Normal	Proctor modifié
	Moule CBR	Moule CBR
Diamètre du moule D (mm)	0.152	0.152
hauteur du moule h (mm)	0.152	0.152
volume du moule v (mm <sup>3</sup> )	0.003	0.003
masse de la dame m (gr)	2.5	4.5
diamètre du mouton d (mm)	0.05	0.05
Hauteur de chute H (mm)	0.305	0.457
Nombre de couches	3	5
N de coups par couche	56	56
n (nombre de coups par couche x nombre de couche)	168	280
Energie Spécifique (KJ/m <sup>3</sup> )	455.8	2065

### 5.3.3 Dimensions et modalités de confection des éprouvettes

Après avoir déterminé les conditions optimales (la teneur en eau optimale, le poids volumiques sec maximal), la préparation du sédiment et la confection des éprouvettes, se sont déroulées comme suit :

Le sédiment tamisé à 5mm et séché a été mélangé avec une quantité d'eau correspondant à la teneur en eau cible. Après un mélange homogène, le matériau a été conservé dans un sac hermétique pendant 24h pour homogénéiser la teneur en eau au sein de la matrice solide. Ensuite, le sédiment humide a été placé dans un moule cylindrique de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur (élanement 2), équipé d'un double piston pour avoir un compactage homogène aux deux interfaces de l'échantillon, (figure 5.5) et par conséquent une meilleure homogénéité des éprouvettes, [Olivier, 1986], [Mesbah et al., 1999a].

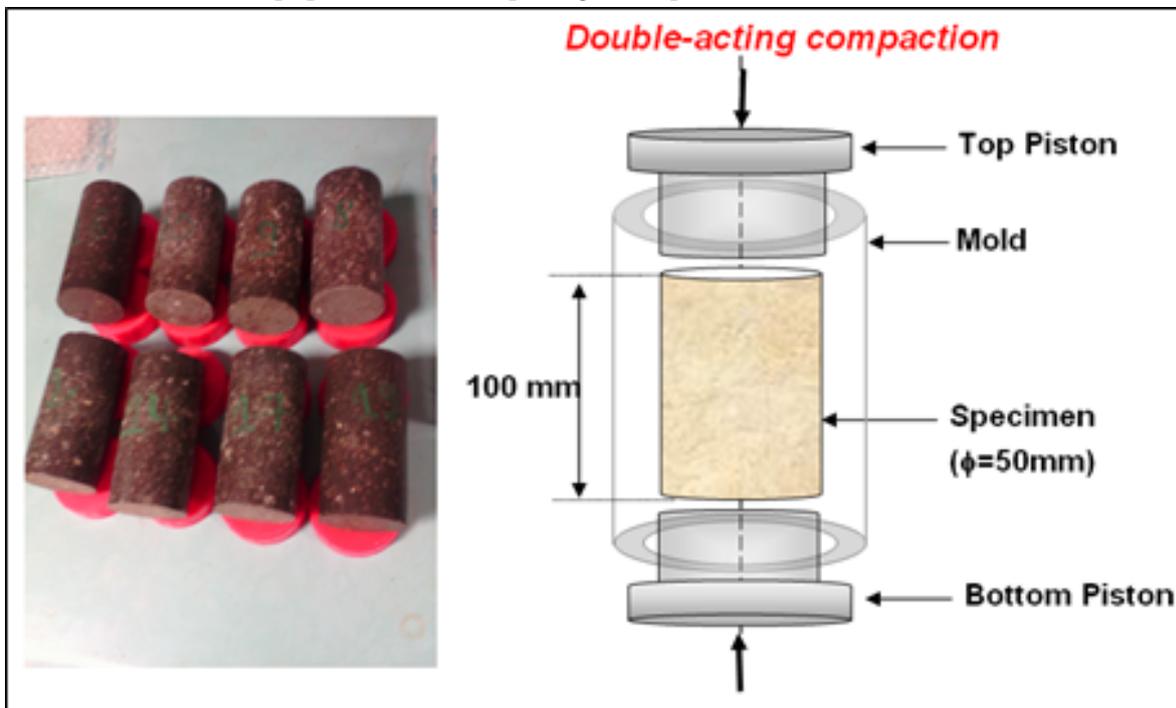
Après compactage, les éprouvettes sont démoulées et enveloppées d'abord dans du cellophane et ensuite dans du papier aluminium pour conserver ses propriétés hydriques en attendant les essais mécaniques programmés, (figure 5.6).

### 5.3.4 Essais de compression simple

Les essais de compression simples ont été réalisés selon la norme [Norme-NF-P-98-232-1, 1991]. Il s'agit d'un essai standard normalisé pour caractériser la résistance mécanique des matériaux de construction. Dans notre cas, le principe est d'étudier les effets de l'énergie de compactage et de la teneur en eau sur la résistance à la compression simple. La résistance à la compression simple a été mesurée sur des échantillons compactés à différentes énergies. La contrainte est appliquée avec une vitesse de chargement de 0.23



(a) les équipements de compactage statique des échantillons étudiés.



(b) Schéma de la confection et photo démoulage des éprouvettes étudiés

FIGURE 5.5 – La confection des éprouvettes par double compactage statique

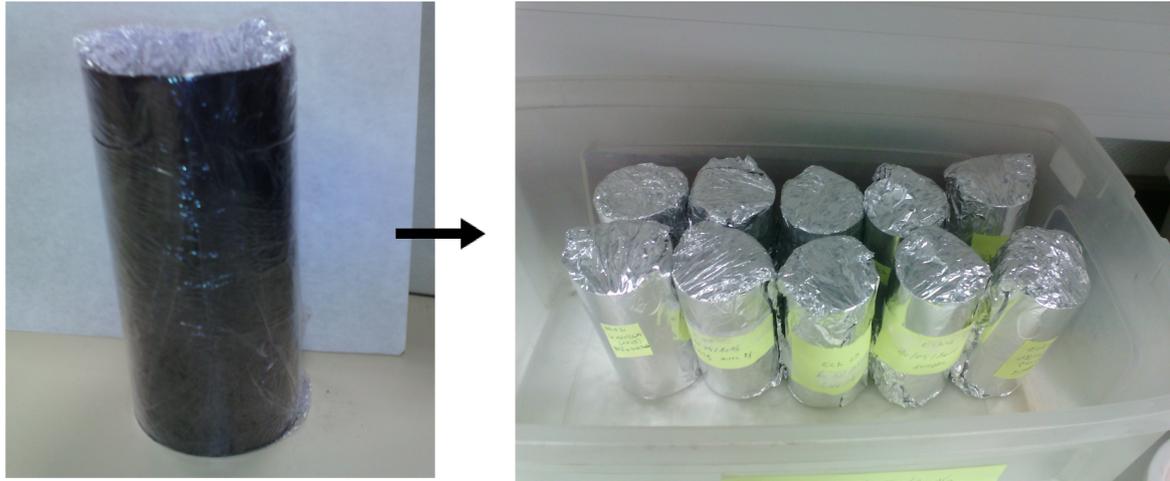


FIGURE 5.6 – La conservation des éprouvettes dans du cellophane et ensuite dans du papier aluminium

mm/min jusqu'à la rupture en utilisant une presse électromécanique d'une capacité de 100 kN.

La vitesse ne doit pas dépasser une certaine limite pour ne pas surestimer la résistance à la compression simple, [Bruno et al., 2015]. Ces auteurs ont observé que la vitesse de déplacement doit être inférieure à 0.6 mm/min pour ne pas affecter l'intensité du pic de compression mesuré. Par rapport au frottement, des auteurs ont montré que lorsque le diamètre des échantillons est relativement faible avec un élancement de 2, l'effet du frottement sera très faible, [Bruno et al., 2015].

Le développement de frottements entre les plateaux de la presse et un élancement insuffisant de l'échantillon peuvent induire des erreurs dans l'évaluation de la résistance mécanique [Morel et al., 2007], [Ciancio et al., 2012].

Pour éviter les effets du frottement, ces auteurs ont utilisé des échantillons de 50 mm de diamètre et de 100 mm de hauteur (élancement égal à 2). Dans nos essais nous avons aussi utilisé ces mêmes dimensions, ce qui nous laisse penser que les effets du frottement sont négligeables. Le protocole expérimental consiste à suivre les étapes suivantes :

- Après le compactage, les éprouvettes sont enveloppées dans un film en plastique parfaitement étanche et stockées durant 24 h afin d'homogénéiser la teneur en eau au sein du matériau.
- Caractériser la variation des propriétés mécaniques du matériau en fonction de la teneur en eau, les éprouvettes sont soumises à une dessiccation à l'air libre pour atteindre des teneurs en eau cibles.
- Lorsque la teneur en eau cible est atteinte, on procède à la mesure des vitesses de propagation des ondes sonores à l'aide d'un système de transducteurs piezoélectriques pour estimer les caractéristiques élastiques du matériau.
- On procède ensuite à l'essai de compression simple jusqu'à la rupture du matériau, en enregistrant la relation contrainte déformation.
- Le module en grandes déformations a été déduit de la courbe contrainte-déformation.
- Après l'écrasement, on procède à la mesure de la teneur en eau de l'éprouvette.

La résistance à la compression simple est calculé comme suit :

$$R_C(\text{MPa}) = \frac{F_{\text{Max}}}{S} \quad (5.2)$$

$F_{\text{max}}$  : la valeur maximale de la force appliquée sur l'éprouvette au moment de la rup-

ture (N), S : la section de l'éprouvette ( $mm^2$ ).

### 5.3.5 Mesure des propriétés élastiques en petite déformation

Pour déterminer les caractéristiques élastiques en petites déformations (module de young et coefficient de Poisson) sous contraintes mécaniques, on procède à la mesure des vitesses de propagation des ondes sonores à l'aide de l'appareil Pundit Lab (portable Ultrasonique Non destructive Digital Indicating Tester), (figure 5.7), qui permet de mesurer la vitesse des ondes de compression P et de cisaillement S. La mesure des modules dépend de l'état initial des matériaux. Le principe de la technique est le suivant :

Un signal électrique est transformé en onde de déformation par un transducteur piézoélectrique émetteur. Cette onde se propage dans l'échantillon qui est interceptée par un autre transducteur récepteur, (figure 5.8). On mesure le temps de parcours de cette onde traversant l'échantillon, et on déduit la vitesse de propagation de celle-ci.

L'utilisation de transducteurs qui génèrent des ondes longitudinales ( $V_p$ ) et transversales ( $V_s$ ) permet de remonter aux caractéristiques d'un matériau élastique linéaire et isotrope. La vitesse des ondes mécaniques est dépendante de la masse volumique et des caractéristiques élastiques dans les matériaux solides. Les équations des vitesses de propagation longitudinale ( $V_p$ ) et transversale ( $V_s$ ) sont :

$$V_p = \sqrt{\frac{(k + \frac{4}{3}\mu)}{\rho}} \quad (5.3)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (5.4)$$

$$\mu = G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (5.5)$$

$$k = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (5.6)$$

$$E = \frac{V_p^2 \cdot \rho(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (5.7)$$

$\mu$  (MPa) : Module de cisaillement

$k$  (MPa) : Module de compressibilité

$E$  (MPa) : Le module d'élasticité

$\eta$  coefficient de poisson

$V_p$  : vitesse des ondes primaires (compression) (m/s)

$V_s$  : vitesse des ondes secondaires (cisaillement) primaires (m/s)

$\rho$  : masse volumique du matériau ( $kg/m^3$ ).

Taibi et al (2008) ont montré que dans le cas des sols non saturés, les modules dépendent nettement de la succion, et la variation du module dans le plan (succion-modules) suit une loi parabolique tendant vers un palier pour les très fortes succions.

### 5.3.6 Chemins de drainage-humidification

Les chemins de drainage-humidification ont été déterminés en utilisant différentes techniques.



FIGURE 5.7 – Dispositif de mesure du module en petite déformation (vitesse des ondes sonores).

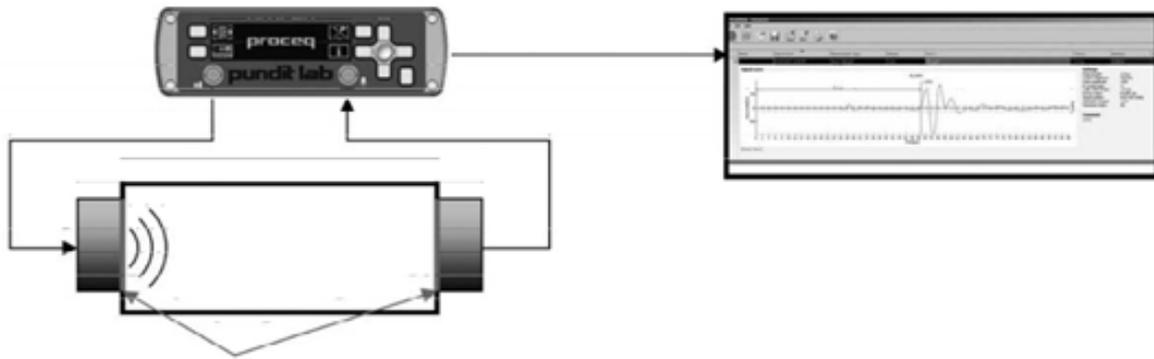


FIGURE 5.8 – Principe de mesure à l’aide d’un système de transducteurs piezoélectriques.

- Des techniques d’imposition de la succion : il s’agit de la méthode osmotique et de la méthode des solutions salines saturées, [Zur, 1966], [Kassiff and BenShalom, 1971], [Williams and Shaykewich, 1969], [Tessier, 1975], [Fleureau et al., 1993], [Delage et al., 1998], [Delage et al., 1992].
- Des techniques de mesure de la succion, il s’agit ici de la méthode de mesure à l’aide du papier filtre Whatman 42, selon la norme [ASTM-D5298, 2010].

### 5.3.6.1 Techniques d’imposition de la succion

#### 1. La méthode osmotique

La technique osmotique a été utilisée pour imposer des niveaux de succion variant de 50 kPa à 8 MPa environ. Le principe de la méthode consiste à utiliser des membranes de dialyse (Spectra-Por) et une solution de polyéthylène glycol (PEG 6000 ou PEG 20000). Les échantillons de sol sont placés sur la membrane qui les sépare de la solution. Comme les macromolécules ont tendance à hydrater et à attirer l’eau de l’échantillon, Ce dernier est soumis à une succion matricielle qui dépend de la concentration de PEG dans la solution. La figure 5.9 résume les caractéristiques de cette méthode (principe de l’essai, étalonnage, type de membranes). La figure 5.10 présente quelques photos des montages expérimentaux.

2. **Méthode des solutions salines saturées** Pour des succions plus élevés (2 à 1000 MPa), le transfert d’eau se produit en phase vapeur. La relation entre la succion et la pression de vapeur est donnée par la loi de Kelvin.

$$s = \frac{RT\rho}{M} \cdot \ln \frac{Pv}{P_{sat}} \quad (5.8)$$

Avec  $s$  = succion, (Pa),

$R$  = La constante des gaz parfaits =  $8.32(J.mole^{-1}.k^{-1})$ ,

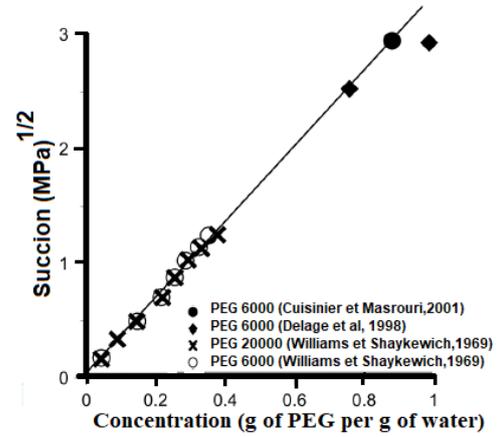
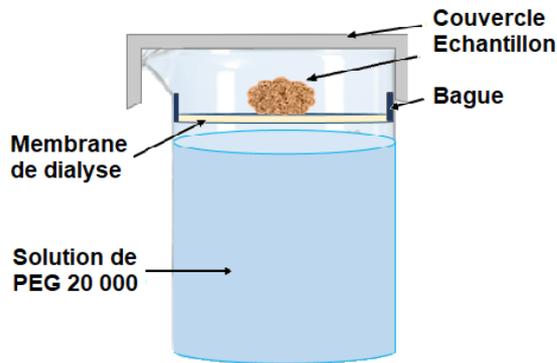
$T$  = température absolue, (K),

$\rho$  : masse volumique de l’eau ( $kg/m^3$ ),

$M$  : masse molaire de l’eau ( $kg/mole$ ),

$Pv$  : pression partielle de vapeur (Pa),  $P_{sat}$  : Pression à la saturation (Pa).

Cette technique consiste à placer un échantillon dans une atmosphère confinée à humidité et température contrôlées dans un dessiccateur et à laisser les transferts d’eau s’effectuer sous phase vapeur jusqu’à l’équilibre. Plusieurs solutions de sel ont été utilisées, (tableau 5.2), pour contrôler l’humidité relative de l’atmosphère dans les dessiccateurs contenant les échantillons, et par conséquent la succion matricielle dans les échantillons. La durée de l’équilibre en vapeur dans les dessiccateurs est de l’ordre de 3 mois, (figure 5.11).



PEG	Membrane	MWCO	épaisseur moyenne
PEG 20 000	SPECTRA/POR n°4	14000	40 µm
PEG 6 000	SPECTRA/POR n°3	3500	47 µm

$$s \text{ (MPa)} = 11c^2 \text{ (Delage et al., 1998).}$$

Avec :

s : succion (MPa)

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

Les membranes semi-perméables sont définies par leur poids moléculaire obstacle («molecular weightcut-off» : MWCO)

FIGURE 5.9 – Principe de la technique osmotique.



(a) Membranes de dialyse



(b) Une solution de polyéthylène glycol (PEG 6000 ou PEG 20000)

FIGURE 5.10 – Technique de contrôle osmotique et Membranes de dialyse des pores très petits (5nm)



FIGURE 5.11 – Dessiccateur contenant les échantillons et les solutions saline saturée.

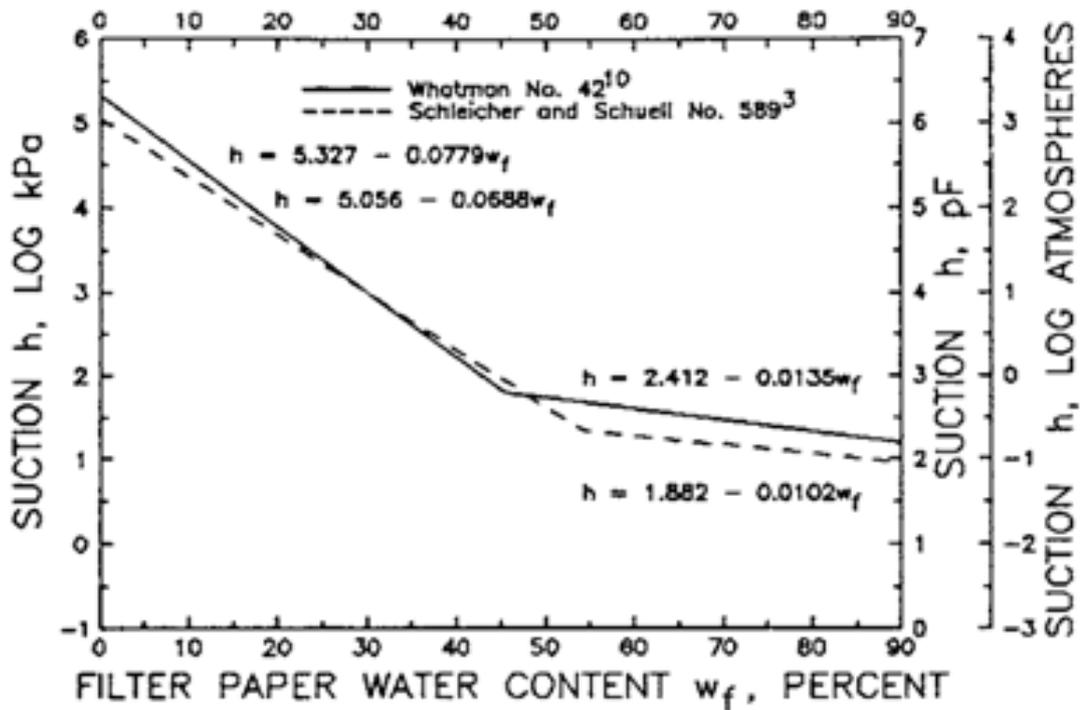
TABLEAU 5.2 – humidité relative et succion imposées en fonction de la solution saline saturée en température

sel	Humidité relative en %		la succion en (MPa)	
	T°C	20°	20°	20°
osmose		-		0.05-0.8
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (150g/l)		91.5		12.25
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>		73		43.4
KCL (800g/l)		80		30.77
NH <sub>4</sub> Cl		81		34.59
NaNO <sub>3</sub>		75		38.62
Nacl (400g/l)		75		39.67
NaNO <sub>2</sub>		73		43.42
CaNO <sub>3</sub>		56		80.73
KcNs		70		49.19
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		43.16		113.49
LiCl		12		292.4
ZnSO <sub>4</sub> , 7H <sub>2</sub> O		90		14.53
CuSO <sub>4</sub>		98		2.79

### 5.3.6.2 Techniques de mesure de la succion à l'aide du papier filtre

La méthode du papier filtre permet de mesurer la succion matricielle lorsque celui-ci est en contact parfait (direct) avec le sol. Cette méthode est applicable pour des succions allant de 10 kPa à 100 MPa, [ASTM-D5298, 2010].

On a utilisé la courbe d'étalonnage représentée en trait continu sur la figure 5.12 de la norme [ASTM-D5298, 2010], qui correspond au papier filtre Whatman 42 que nous avons utilisé pour nos mesures. La corrélation correspondant à cette courbe est la suivante : « $h=5.327-0.0779 w_f$ », la teneur en eau mesurée du papier filtre est < 35%.



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

FIGURE 5.12 – Calibration des courbes de succion–teneur en eau pour humidification des papiers filtre, [ASTM-D5298, 2010].

La succion initiale a été mesurée à l'aide de papier filtre mis en place dans l'éprouvette lors du compactage. A cet effet, un papier filtre Whatman 42 enveloppé de deux autres papiers filtres est introduit dans le matériau dans la couche supérieure de l'éprouvette correspondant aux 10 derniers millimètres. Après compactage, ces éprouvettes sont enveloppées dans un film plastique étanche durant une semaine environ afin de permettre l'équilibre de la teneur en eau du matériau avec le papier filtre.

Une fois l'équilibre atteint, on commence par extraire le papier filtre pour mesurer immédiatement sa teneur en eau pour en déduire la valeur de la succion initiale, (figure 5.13).

Pour décrire les chemins de drainage-humidification, les éprouvettes sont découpées en petits échantillons d'environ 2 à 3 cm<sup>3</sup> chacun. Ces échantillons sont mis en équilibre avec différentes valeurs de succion imposée. Si la succion imposée est supérieure à la succion initiale, la courbe suit un chemin de drainage. Dans le cas contraire, la courbe suit un chemin d'humidification. Par ailleurs, les caractéristiques initiales ( $e$ ,  $w$ ,  $S_r$ , etc.) du matériau ont été mesurées par pesées immergées.

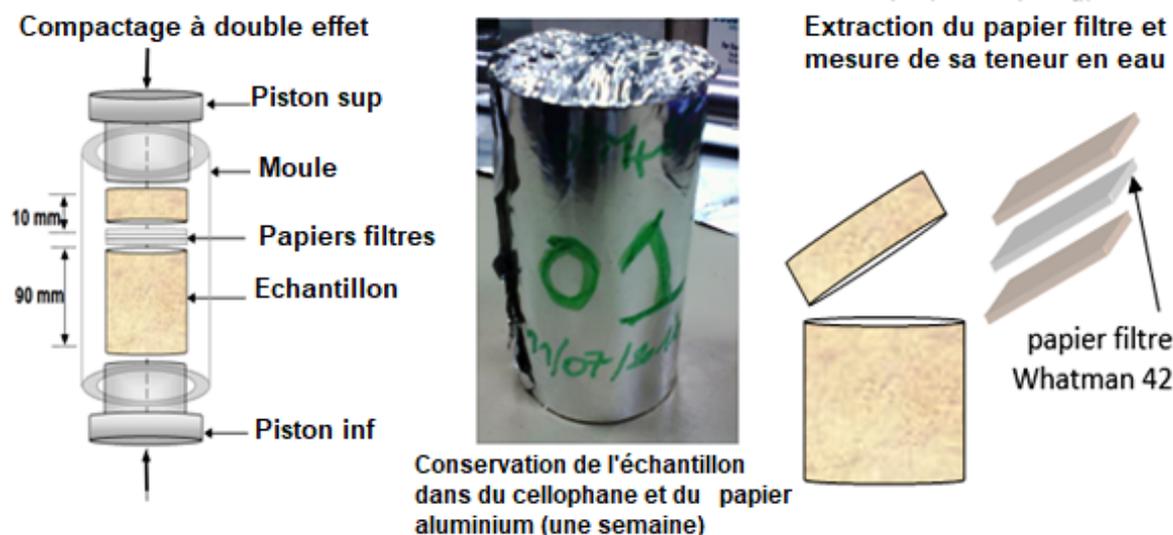


FIGURE 5.13 – La Méthode du papier-filtre.

### 5.3.6.3 États initiaux

Les chemins de drainage-humidification ont été réalisés sur le matériau préparé à deux états initiaux :

- Matériau sous forme de pâte préparé initialement à une teneur en eau de  $w=1.5LL$ .
- Matériau compacté aux optimums à différentes énergies.

Dans le cas du matériau préparé sous forme de pâte, des échantillons de  $2cm^3$  environ sont soumis à un chemin de drainage en les mettant en équilibre avec différentes valeurs de succion imposée.

Concernant les chemins d'humidification, les échantillons sous forme de pâte sont d'abord séchés à l'étuve à  $105\text{ }^\circ\text{C}$  durant 24h, puis soumis à différentes valeurs de succion imposée de plus en plus faibles.

L'objectif n'est pas de rendre l'échantillon parfaitement sec, mais de le mettre à un niveau de succion plus élevé que la succion imposée pour qu'il suive un chemin d'humidification.

### 5.3.6.4 Mesure des caractéristiques physiques après équilibre

Deux types de mesures ont été effectuées pour définir les propriétés physiques des échantillons ( $e$ ,  $n$ ,  $w$ ,  $S_r$ ) : par pesée directe et pesée hydrostatique par immersion en utilisant l'huile de kerdane. Le protocole des mesures est comme suit : Une fois l'équilibre atteint sous les valeurs de succion imposée, les échantillons sont pesés pour avoir leur poids humide ( $P_h$ ), et puis immergés dans l'huile non mouillante (Kerdane commercial de densité de l'ordre de 0.785) pendant de 2h pour remplir le maximum des vides des plus gros pores sans faire gonfler l'échantillon. On mesure le volume externe des échantillons par une procédure qui permet d'éviter la modification de leur volume ou de leur teneur en eau, [Tessier, 1975], [Zerhouni, 1991b], [Fleureau et al., 1993]. Les échantillons sont aussi pesés pendant l'immersion  $P_{imm}$  et après le mouillage  $P_{hk}$ . Ce volume extérieur est déduit de la différence entre le poids de l'échantillon imbibé d'huile et celui de l'échantillon immergé dans l'huile  $V = ((P_{hk} - P_{imm}) / 0.785)$ . Finalement, son poids volumique sec  $P_s$  a été mesuré après l'évaporation de deux fluides (eau, huile kerdane) dans une étuve de température de  $105\text{ }^\circ\text{C}$  Pendant 24h. D'autres caractéristiques peuvent être aussi dé-

duits de ces poids comme l'indice de vide ( $e$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ) et la porosité ( $n$ ). Le dispositif expérimental utilisé est représenté sur la figure 5.14.

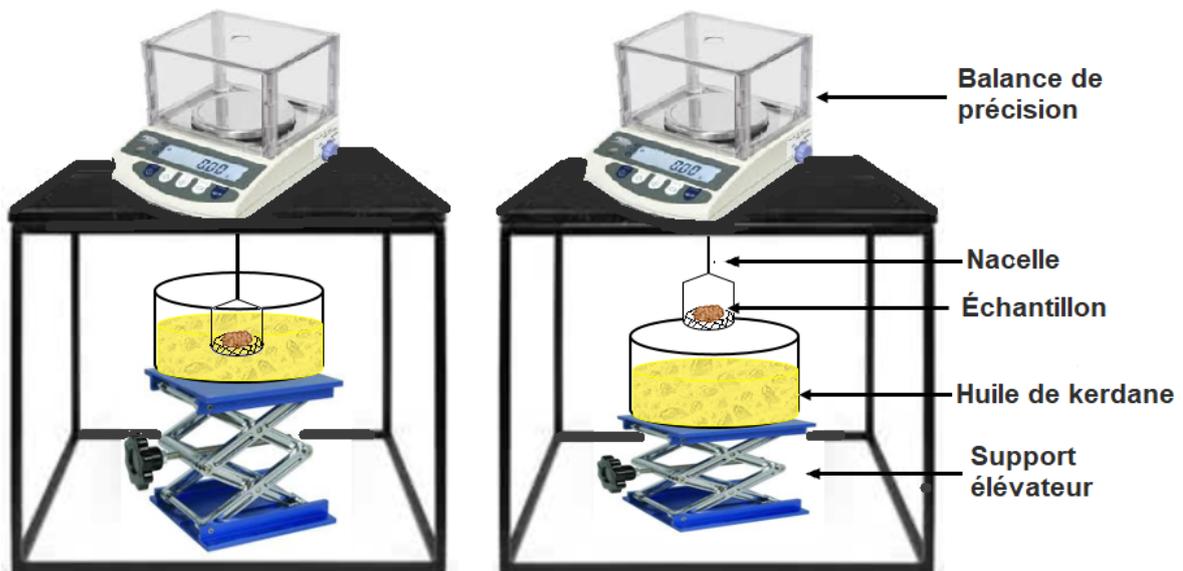


FIGURE 5.14 – Dispositif de mesure pour peser hydrostatique au kerdane.

### 5.3.7 Perméabilité à la vapeur d'eau

Dans les constructions en terre, la perméabilité à la vapeur d'eau est une propriété intrinsèque importante pour le comportement hygrométrique du matériau (adsorption, désorption), autrement dit, le confort hygrométrique dépend de la capacité du matériau à échanger avec son environnement (effet respirant), et aussi sa capacité à emmagasiner et à restituer de l'humidité en fonction des conditions aux limites internes et externes à l'ouvrage (effet d'inertie et de régulation hygrométrique). Ces propriétés font que la terre est donc un matériau poreux qui permet de réguler l'hygrométrie d'une construction (capacité d'échange hygrométrique entre l'intérieur et l'extérieur d'une construction), ce qui participe au confort intérieur

Les performances hygrométriques d'un matériau sont tributaires de sa perméabilité à la vapeur d'eau, c'est-à-dire à sa capacité à se laisser traverser par la vapeur d'eau. Le confort intérieur est assuré grâce à la propriété de régulateur thermo-hygrométrique qui caractérise la terre comme les BTC. Le comportement hygrométrique du matériau terre dépend essentiellement de deux propriétés intrinsèques : la perméabilité à la vapeur d'eau et la capacité d'absorption à la vapeur d'eau qui est déterminée par la mesure de la courbe de rétention (teneur en eau «  $w$  » en fonction de l'humidité relative « HR »).

L'humidité relative HR est le rapport entre la pression actuelle de vapeur  $P_v$  et la pression saturante de vapeur  $P_{sat}$ .

$$HR = \frac{P_v}{P_{sat}} \quad (5.9)$$

Où :  $P_v$  est la pression de la vapeur d'eau en équilibre avec l'eau du milieu,  $P_{sat}$  : est la pression de vapeur saturante en équilibre avec une surface plane d'eau libre et pure.

Par ailleurs, différentes solutions salines donnent différentes concentrations de molécules d'eau. Donc on peut obtenir différentes humidités relatives par différentes solutions salines.

Dans les sols non saturés la mesure étant délicate mais on peut calculer la perméabilité à partir de la courbe de rétention d'eau.

Les remontées capillaires se traduisent généralement par une frange humide permanente qui dépend de nombreux facteurs (caractéristiques du matériau, possibilités d'évaporation, épaisseur du mur). Les condensations de surface se situent généralement à des endroits où la température de surface atteint le point de rosée ce qui est accentué aux angles et aux parties à isolation thermique moins élevée (réduction de l'épaisseur/présence d'autres matériaux moins isolants/ponts thermiques). Différents travaux se focalisent sur les quantifications expérimentales de la perméabilité à la vapeur d'eau et la capacité d'absorption de vapeur d'eau des terres compactés, [Moevus et al., 2012], [Hall and Allinson, 2010], [Allinson and Hall, 2012], [Hall and Allinson, 2009].

On mesure la perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux à base de terre (les milieux poreux), lorsque l'on cherche à apprécier les risques de condensation dans les parois.

### 5.3.7.1 La diffusion à la vapeur

La diffusivité massique est la propriété d'un corps, qui permet de caractériser l'aptitude de l'eau d'y migrer sous l'influence d'un gradient de concentration de teneur en eau, de pression partielle de vapeur, etc. L'évaporation d'un corps peut être définie comme le passage de son état liquide à son état vapeur, c'est ce qu'on appelle la diffusion.

Le coefficient de diffusion à la vapeur ( $\mu$ ) est une grandeur sans dimension qui compare la facilité de la vapeur d'eau à se diffuser à travers un matériau par rapport à sa diffusion dans l'air. Plus ( $\mu$ ) est élevée plus la résistance est grande, une valeur inférieure à 10 correspond à une bonne diffusion de la vapeur d'eau.

Avec  $\delta_a$  : la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air =  $2.10^{-10} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}$ ,  
 $\delta_p$  la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau,  $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}$ .

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p} \quad (5.10)$$

### 5.3.7.2 Processus de transfert de liquide et vapeur d'eau

La vapeur d'eau doit diffuser à travers le réseau poreux pour sortir de l'échantillon. Les propriétés hygroscopiques des matériaux peuvent avoir un impact sur la diffusivité : les couches d'eau adsorbées et l'eau de condensation capillaire encombrant le réseau et perturbent le processus de diffusivité [Rose, 1963].

Par ailleurs, la diffusivité est modifiée, lorsque l'humidité relative augmente. La quantité de ménisques de condensation capillaire augmente, parce que ces ménisques fonctionnent, semble-t-il, à la manière de "ponts" qui accélèrent la vitesse de diffusion de la vapeur d'eau.

[Rose, 1963], a décrit six différents mécanismes de transport d'eau à l'échelle d'un pore, (figure 5.15), cette figure présente les combinaisons des trois mécanismes fondamentaux suivants (écoulement liquide, écoulement gazeux, écoulement intermédiaire : diffusion).

Les transferts d'eau se feront d'abord sous forme d'eau liquide puis progressivement les transferts à l'état vapeur deviendront dominants. L'eau adsorbée, quant à elle est présente quel que soit l'état de saturation, à partir du moment où l'humidité relative n'est pas nulle.

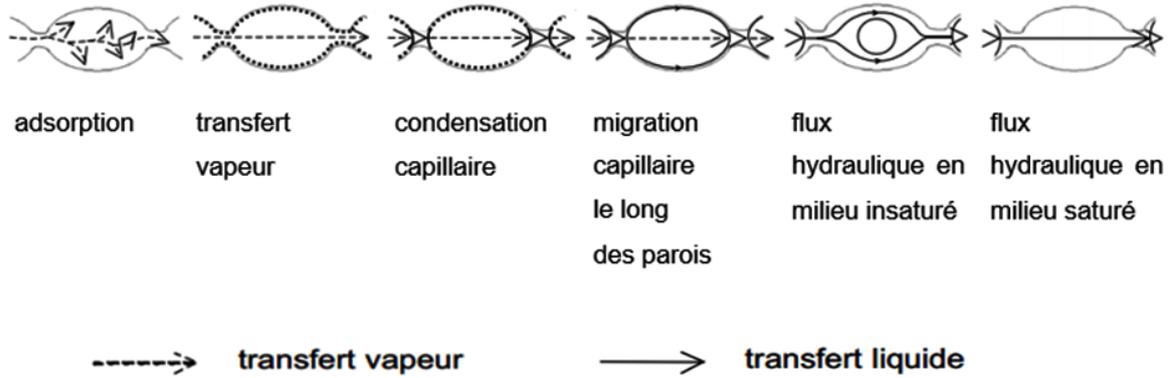


FIGURE 5.15 – Mouvements de l’eau dans un pore à différents stades d’humidification du matériau poreux, [Rose, 1963].

### 5.3.7.3 Mesure de la perméabilité à la vapeur d’eau par la méthode de la coupelle

La méthode de la coupelle dite aussi la méthode gravimétrique en utilisant pour mesurer la perméabilité à la vapeur d’eau selon la norme [Norme-NF-EN-12572, 2016]. Cet essai consiste à soumettre l’éprouvette à tester à un gradient d’humidité relative.

### 5.3.7.4 Dispositif expérimental (la méthode de la coupelle)

Le principe de la mesure consiste à placer un échantillon d’épaisseur ( $e$ ) à un gradient d’humidité relative en le plaçant entre deux ambiances à humidité relative contrôlée à l’aide de solutions salines, [Norme-NF-EN-12572, 2016]. Le gradient de pression partielle de vapeur  $\Delta P_v$  constant et unidirectionnel en condition isotherme. La connaissance de flux de vapeur traversant le matériau, déterminé par pesée, permet de calculer la perméabilité à la vapeur d’eau selon la formule de Houdaille [1895] :

$$\delta_p = -\frac{e \cdot q_v}{\Delta P_v} \tag{5.11}$$

$$q_v = \frac{\Delta m}{\Delta t \times S} \tag{5.12}$$

$$\Delta P_v = P_{v2} - P_{v1} \Rightarrow \Delta P_v = HR_2 \times P_{sat} - HR_1 \times P_{sat} \tag{5.13}$$

D’où  $\delta_p$  : la perméabilité à la vapeur d’eau ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ),  $e$  : épaisseur de l’échantillon (m),  $\Delta P_v$  : la différence de la pression de vapeur d’eau (Pa) des solutions salines employées,  $q_v$  : densité de flux de vapeur ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), (dédit de la pesée et de la section de l’échantillon) et le signe moins définie le sens des pressions fortes vers les pressions plus faibles,  $P_{sat}$  : La pression de vapeur d’eau saturante (Pa),  $S$  : Section traversée ( $\text{m}^2$ ),  $\Delta m$  : la variation de la masse (gr) du récipient-échantillon en fonction du temps,  $\Delta t$  : le temps de l’essai (s), HR : L’humidité relative (%).

Dans notre cas, les solutions salines de chlorure de lithium (LiCl) et de sulfate de potassium ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) permettent d’imposer une humidité relative respectivement de  $HR_1=11\%$  et  $HR_2=97\%$  à  $20^\circ\text{C}$ . Le gradient créé et détermine un flux de vapeur. Le dispositif expérimental est composé d’une galette de matériau d’épaisseur  $e=32$  mm et de diamètre  $D=100$  mm, (figure 5.16).

Deux essais ont été réalisés dans des conditions isothermes, le premier consiste à mettre l’échantillon au-dessus d’un récipient, contenant une solution saline saturée ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) permettant d’imposer une humidité relative contrôlée dans l’atmosphère régnant dans

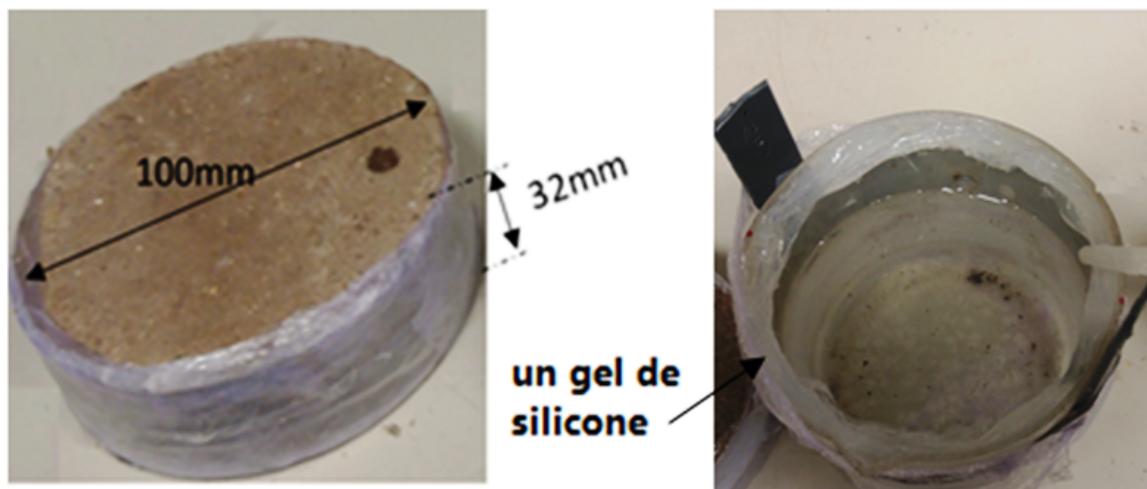


FIGURE 5.16 – Dimension d'une galette de matériau et son étanchéité latérale

la partie inférieure de la galette ( $HR_2=97\%$ ). L'étanchéité latérale de la galette en contact avec les parois du récipient est assurée à l'aide d'un gel de silicone. Le récipient contenant l'échantillon est ensuite suspendu à l'intérieur d'un dessiccateur dans lequel une seconde solution saline a été préalablement placée (LiCl), permettant d'imposer une seconde humidité relative dans l'atmosphère ( $HR_1 = 11\%$ ) qui est en contact avec la partie supérieure de la galette pour que le gradient d'humidité relative imposée entre les deux faces de la galette est de l'ordre de 86%, le tout à 20°C. Le récipient et son contenu sont suspendus à une balance de précision permettant de suivre la variation de sa masse en fonction du temps. La galette de terre crue compactée se trouve ainsi soumise au niveau de ses faces inférieure et supérieure à un gradient d'humidité relative constant qui engendre un flux de vapeur d'eau de bas en haut à travers l'épaisseur de la galette. Le second essai est basé sur le même principe, mais le sens du flux de vapeur est inversé. Le récipient hébergeant l'échantillon contient une solution saline saturée (LiCl) permettant d'imposer une humidité relative contrôlée dans l'atmosphère  $HR_1 = 11\%$ . Ce dernier est suspendu à l'intérieur d'un dessiccateur contenant une solution saline saturée  $K_2SO_4$  ( $HR_2=97\%$ ) dans des conditions isothermes de 20°C, [Hibouche, 2013], (figure 5.17).

Ces essais permettent de déterminer la perméabilité à la vapeur d'eau qui renseigne sur la capacité du matériau à réguler l'emmagasinement et le transfert de vapeur d'eau.

Les pesées de la masse de l'ensemble de la coupelle permettent de déterminer le flux de vapeur traversant le matériau, après une phase transitoire de stabilisation de l'échantillon, la phase à régime permanent est atteinte. Le flux de vapeur est alors constant, et la détermination de la perméabilité à la vapeur et/ou celle d'un coefficient de diffusion est possible. Le coefficient de conductivité de vapeur d'eau quant à lui est trouvé d'après l'équation :

$$q_v = - \frac{\Delta P_v \cdot \delta_P}{e} \quad (5.14)$$

## 5.4 Durabilité et érosion de surface

La Majorité des constructions en terre qui ont vécu longue temps , sont principalement localisées dans des zones de faible précipitation annuelle (zones arides), qui sont protégées par un large avant toit, ou par couvert de revêtement protecteurs. La résis-

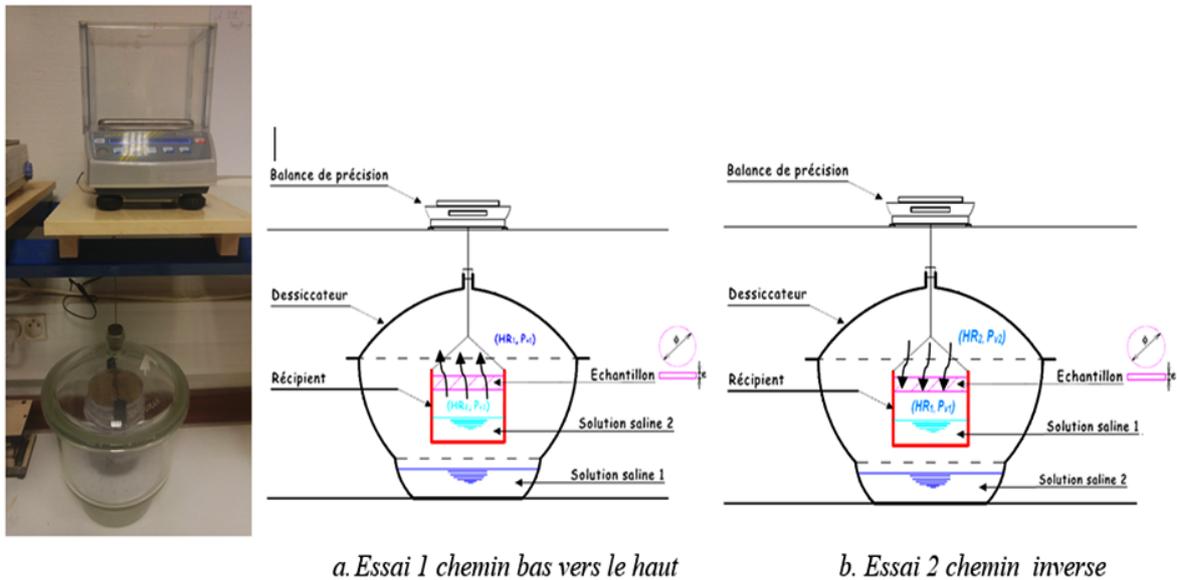


FIGURE 5.17 – Principe de la mesure de la perméabilité à la vapeur d’eau d’un matériau non saturé en régime stationnaire, [Hibouche, 2013]

tance à la pénétration de l’eau est un critère important pour les constructions à base de terre crue. [Heathcote, 2002] a défini, la durabilité de matériaux de construction comme la résistance à l’érosion au cours du temps. La durabilité des constructions en terre dépend non seulement de ses propriétés intrinsèques (composition minéralogiques des sols, pourcentage d’argile, densité sèche, teneur en eau, teneur en liants etc.), mais aussi sur les conditions climatiques (pluie, vent, neige et température), [Ghomari, 1989]. Les érosions les plus importantes sont dues aux phénomènes météorologiques. Dans notre cas, des essais d’érosion de surface ont été réalisés sur le matériau à base de terre crue, afin de vérifier la durabilité des constructions en terre dans les zones de fortes précipitations.

#### 5.4.1 Mécanisme d’érosion

L’importance de l’érosion est liée à l’érosivité qui définit la puissance des agents érosifs et l’érodibilité qui traduit l’aptitude d’un matériau à être altéré par les facteurs érosifs. La goutte d’eau de pluie s’abat sur la surface du mur avec son énergie cinétique, en présence du vent, (figure 5.18). Au niveau macroscopique, les deux mécanismes d’érosion sont les suivants :

- l’énergie cinétique de goutte d’eau dépend de l’intensité de la pluie et l’angle d’impact de la pluie.
- la teneur en eau du mur et la cohésion entre des particules du matériau sont plus sensibles à l’érosion.
- Cette énergie produit la source principale de l’érosion des murs en terre, [Heathcote, 1995], et l’érosion dans la zone turbulente où l’écoulement se concentre et ruisselle.

Au niveau microscopique, le facteur affectant l’érosion est la force d’adhérence des particules, qui est une caractéristique intrinsèque du matériau.

### 5.4.2 Pathologie de désagrégation

La durabilité des matériaux de construction peut être définie comme leur résistance à la désagrégation au fil du temps [Heathcote, 2002]. Donc, pendant sa durée de vie, il y a plusieurs facteurs qui affectent sa durabilité, [Nguyen and Taibi, 2015] tels que :

- L'érosion de surface des murs en raison de la pluie ou des éclaboussures de pluies au niveau du pied des murs. La pluie joue un rôle important si l'intensité de la pluie est supérieure à 25mm/min, [Ogunye and Boussabaine, 2002],
- La perte de la résistance mécanique due à une augmentation significative de l'humidité dans le mur (remontées capillaires, infiltration de l'eau pendant la saison des pluies ou des inondations),
- Les dommages affectant le matériau du mur en raison du gel-dégel par la présence d'eau dans le mur,
- Les dommages causés à la paroi par l'abrasion, d'insectes et de plantes.

Par ailleurs, les fuites d'eau peuvent causer l'érosion sur les murs ou sur le sol au pied des murs.

### 5.4.3 Facteurs d'influence de l'amplitude de l'énergie cinétique

Selon Heathcote [1995], les facteurs qui influencent l'érosion des murs en terre sont suivants :

- ★ L'intensité des pluies : Plus fortes sont les pluies battantes contre le mur, plus le matériau est érodé,
- ★ Le type de pluies est aussi un facteur important : une pluie forte mais pendant un temps court fait moins d'érosion qu'une pluie longue de même intensité,
- ★ L'angle des pluies : L'angle avec lequel les gouttes d'eau de pluie battent le mur est déterminé par la vitesse du vent coïncidant. S'il n'y a pas de vent, les gouttes d'eau de pluie seront verticales et aucune érosion n'aura lieu. L'énergie cinétique sera maximale pour un angle de 90°, mais l'érosion des particules sera favorisée pour un angle plus faible par l'effet de « creusement », (figure 5.18),
- ★ Le débord de la toiture : Ce facteur influence directement la quantité des gouttes d'eau battant contre le mur. Dans le cas d'une maison bien couverte par la toiture, l'érosion des murs extérieurs sera plus limitée,
- ★ La rugosité du mur : Il est possible que l'érosion soit plus importante sur une surface rugueuse que sur une surface lisse, [Heathcote, 1995], [Nguyen and Taibi, 2015].

### 5.4.4 Les recherches antérieures sur la durabilité des constructions en terre

Sur la base des dispositifs existants, des recherches antérieures sur la durabilité des murs en terre sont citées, afin de donner un aperçu des divers paramètres pertinents pour la prédiction de l'érosion des murs en terre :

- L'effet de divers paramètres de matériaux sur la résistance à l'érosion des murs en terre.
- Le développement de quelques essais pour établir la résistance d'érosion des échantillons de mur en terre. Les tests les plus appropriés pour les maçonneries, d'après ([Walker, 2004], [Walker et al., 2005], [Ogunye and Boussabaine, 2002]) sont : **Wire Brush Test**, **Drip Test** et **Spray Test**.

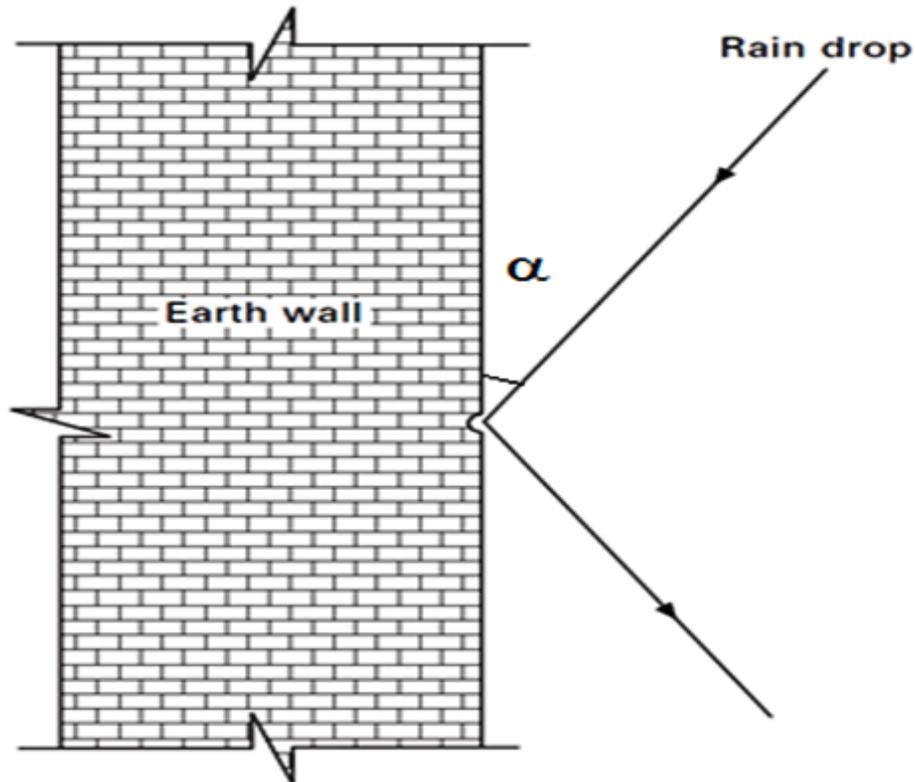


FIGURE 5.18 – L'effet "creusement" d'une goutte d'eau de pluie ayant un angle battant  $< 90^\circ$  [Heathcote, 2002].

#### 5.4.5 Techniques de caractérisation de l'érosion de surface

il existe plusieurs dispositifs expérimentaux cités dans la littérature que nous pouvons classer en deux catégories : Essais de laboratoire et essais in situ, afin de sélectionner ces dispositifs et leurs protocoles adaptées dans notre cas.

##### 5.4.5.1 Essais de la brosse métallique (Wire Brush Tests).

Cette méthode est probablement l'essai le plus largement reconnu pour la durabilité des matériaux en terre stabilisés au ciment. Il a été développé vers la fin de la deuxième guerre mondiale comme « la méthode d'essai de drainage-humidification du mélange de sol-ciment compacté » [ASTM-D559, 1944]. Afin de déterminer la quantité minimale du ciment requise dans le sol-ciment pour obtenir un degré de dureté suffisant pour résister aux intempéries, [Heathcote, 2002] :

**Wire Brush Test, ASTM D559** : Selon la norme, le sol est compacté en trois couches dans un moule proctor normal de 102 mm de diamètre et de 116 mm de hauteur à l'aide de la dame proctor normal. Après le compactage, l'échantillon est stocké dans un environnement à humidité élevée, il est ensuite immergé dans l'eau pendant 5-6 heures. Ensuite, il est séché dans une étuve à 105 °C pendant 42 heures. L'échantillon est alors brossé avec une brosse métallique par deux coups fermes avec une pression de brosse verticale de 1.5 kg (13 newton) pour enlever toutes les particules perdues durant le cycle de séchage-humidification. La brosse métallique dispose de 50 groupes de dix poils, chaque poil aux dimensions de 50 mm par 1.6 mm par 0.46 mm. Après avoir effectué 12 cycles de séchage-humidification, la masse du matériau perdue est calculée en pourcentage par rapport à la masse initiale de l'échan-

tillon. Sur la base de ses résultats, [Fitzmaurice, 1958] a proposé une limite acceptable pour la masse perdue maximale pour ce test, (tableau 5.3).

TABLEAU 5.3 – Limite de masse perdue proposé par Fitzmaurice [1958]

Type of development	weight Loss	
	in any climate	in dry climate (500mm ruin p.a)
permanent buildings	<5%	<10%
rural buildings	<10%	<10%

**CraTerre Abrasion Test (CDE000) :dérivé du test développé dans [ASTM-D559, 1944]) :**

Dans ce test, l'échantillon est brossé en aller-retour d'une seconde pendant une minute à l'aide d'une brosse avec une pression de 3kg. Le facteur d'abrasion est défini comme le ratio de masse perdue par rapport à l'aire de surface.

L'avantage de cet essai est qu'il constitue une norme spécifique relative à la durabilité des mélanges de sol-ciment. Les inconvénients de ce test sont :

- la durée de l'essai (24 jours) et la possibilité de variation des résultats en raison de l'application incontrôlée de la pression de brosse.
- le séchage dans une étuve à 105 °C pendant 42 heures.

Dans notre cas, à cause de ces inconvénients, cette technique n'a pas été sélectionnée.

#### 5.4.5.2 Essai des Gouttes (Drip Test)

Cet essai est normalisé pour les matériaux de construction en terre en Nouvelle-Zélande, [Norme-NZS-4298, 1998] et au Zimbabwe, [Norme-SAZS-724, 2012]. Il est possible d'appliquer ce test pour les régions où les précipitations sont environ 500 mm par an, mais pour les régions où les précipitations sont supérieures à 500 mm par an, ce test est à confirmer.

1. **Yttrup Drip Test** [Yttrup et al., 1981] ont développé le premier Drip Test à l'université de Deakin. Leur motivation est de développer un test très simple pour que les maçons puissent déterminer eux-mêmes la pertinence de leur terre. Dans cet essai, une mèche en tissu mouillée est longée dans 100 mm d'eau, la hauteur de chute des gouttes d'eau est de 400 mm sur l'échantillon qui est incliné de 27° par rapport à l'horizontale, (figure 5.19).

Cette action peut simuler des gouttes d'eau de pluie. Pour ce test, la fréquence des gouttes est de 833 gouttes par heure (14 gouttes par minute), le diamètre des gouttes est de 6mm approximativement, [Norme-NZS-4298, 1998], [Norme-SAZS-724, 2012].

2. **Swinburne Accelerated Erosion Drip Test**

Le Swinburne Accelerated Erosion Test (SAET) a été développé par un groupe d'étudiant de l'université de technologie de Swinburne en 1987, cité par Heathcote [2002] et Nguyen and Taibi [2015].

Dans ce test, le jet d'eau est appliqué pendant 10 minutes avec la charge hydraulique de 1500 mm. Le débit de ce test est approximatif de 1 l/min. Weisz et al (1995) ont proposé une classification pour les briques moues à la base de SAET Drip Test, (tableau 5.4).

Ce test est similaire que celui développé par Yttrup (1981) mais avec un jet d'eau continu via un tube de 5mm de diamètre au lieu des gouttes d'eau (figure 5.19).

TABLEAU 5.4 – Classification de SAET Drip Test [Weisz et al., 1995]

Classification	Pitting Depth
Excellent	$0 < D \leq 10$
Good	$10 < D \leq 20$
Fair	$20 < D \leq 30$
Poor	$D \geq 30$

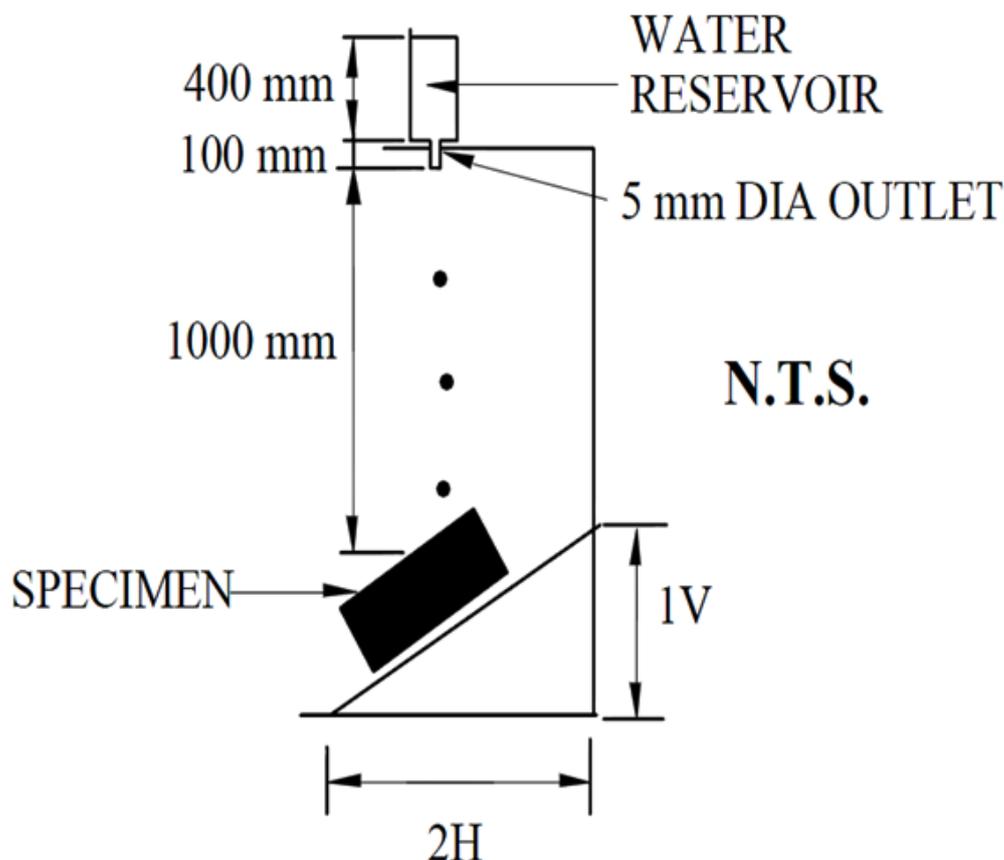
Concernant les travaux sur les matériaux de construction à base de terre crue, Ghomari [1989] a mené une étude sur le matériau en terre crue compactée BTC. Cette étude a été réalisée sur quatre sols de diverses provenances (terre de l'Isle d'Abeau, terre de Limonest de Lyon, terre d'Aramon, terre malienne : Sotuba) afin de déterminer l'influence de la pression de compactage et de la teneur en eau sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression) et la teneur en eau (**test à la goutte d'eau**). Dans ce travail, il a étudié aussi l'effet des produits d'imprégnation et les enduits sur protection de surface des BTC, et les comparer aux blocs traités en surface dans des conditions climatiques réelles (in situ). Les résultats montrent que l'action de compactage convertit le sol humide en un système ayant des caractéristiques mécaniques et de durabilités plus grandes, mais au-delà d'une pression de compactage de 9 MPa le grain n'est plus notable. Le procédé de protection de surface des BTC par des produits d'imprégnation (18 type divers : la plupart destinés à l'imprégnation de façades construites en béton) est convenable par rapport des traitements de surface par les enduits. Selon Didier and Ghomari [1990], plusieurs essais de simulation de l'érosion ont été proposés.

Leroux [1978], Mariotti [1983] proposent de soumettre l'échantillon à l'action-cyclique de séchage – mouillage – rayonnement. Azzouz [1983] suit la dégradation d'un échantillon soumis à une lame d'eau verticale continue jusqu'à sa totale dégradation. Tadanier [1985] fait un trou au centre d'un échantillon compacté et remplit d'eau pour ensuite déterminer son temps de délitage. Auger [1987] simule la dégradation d'un échantillon sous l'action d'une ambiance marine.

Dans ce travail, Didier and Ghomari [1990] ont mis une simulation au laboratoire traduisant l'érosion de la terre compactée sous l'action de chocs répétés de gouttes de pluie dites "battantes". Cet essai de vieillissement accéléré permettant d'apprécier globalement la durabilité du matériau terre face à l'action destructrice de la battance. L'essai consiste à soumettre 5 échantillon en parallèles de terre compactée de chaque série sur un plateau mobile à l'impact répète de gouttes d'eau, qui constitué par 5 vannes réglables en hauteur de 1.5 à 2,5 m. La mesure du temps de délitage (Td) est rendue automatique grâce à des cellules photo résistances, sensibles à la lumière. Avant le début du test, les échantillons sont places sur les supports contenant les cellules.

Le chronomètre est enclenche au moment où les échantillons, places chacun sous une vanne, reçoivent la première goutte d'eau. Lorsque l'échantillon est érode sur sa hauteur, celui-ci se rompt et laisse passer la lumière qui est alors captée par la cellule. Cette dernière réagit instantanément en arrêtant le compteur ou le temps reste affiche.

L'érosion de l'échantillon est le résultat du cumul des énergies mécaniques correspondant au nombre de gouttes tombées. Si la fréquence augmente, l'érosion augmente nécessairement, par conséquent, le temps de délitage sera plus faible,. La confrontation des résultats de vieillissement naturel et accélère semble montrer qu'une demi -heure d'exposition au test de la goutte d'eau équivaut à 18 mois d'exposition naturelle, [Ghomari,

FIGURE 5.19 – SAET Drip Test cité par [Heathcote \[2002\]](#)

1989]. Ils ont aussi étudié l'effet de la teneur en eau sur la densité sèche, la résistance et la teneur à l'eau et le retrait volumique, (La teneur en eau optimale pour 9MPa) Les résultats de la recherche font le lien entre la charge de compactage statique et la teneur en eau et les propriétés mécaniques et la résistance à l'essai de chute d'eau. La Meilleure tenue à l'eau est atteinte pour une teneur en eau de 2% supérieur à la teneur en eau optimale (12.5%), le retrait volumique est alors de 3%.

### 5.4.5.3 Spray Test

Cet essai est normalisé pour les murs en terre en Zimbabwe et en Australie, ([[Norme-SAZS-724, 2012](#)], [[Norme-NZS-4298, 1998](#)], figure 5.20). Les essais sont effectués à partir d'une douche à une distance de 470 mm par rapport à la surface de l'échantillon, pendant une heure à des jets d'eau horizontaux. La pression appliquée est de de l'ordre de 50 kPa constante durant l'essai avec une vitesse initiale des jets d'eau de 9.9m/s. La douche a 35 trous dont le diamètre est de 1.3 mm, la zone d'impact est comprise dans un cercle de diamètre 150 mm. La profondeur d'érosion maximale acceptable par heure est de 60 mm. Pour chaque 15 minutes, l'essai est interrompu pour mesurer la profondeur d'érosion et le taux d'érosion. On doit classifier l'indice d'érosion selon la profondeur des piqûres d'érosion (Tableau 5.5).

Il existe différents type de spray tests cité par [Heathcote \[2002\]](#) et [Nguyen and Taibi \[2015\]](#) : Ola et Mbata Spray Test (1990), Cytryn Spray Test, Wolfskill Spray Test, Reddy et Jagadish Spray Test, Dad's Spray Test (1985), Rainfall Test (Essai de simulation des pluies), Essai d'érodimètre à jets mobiles.

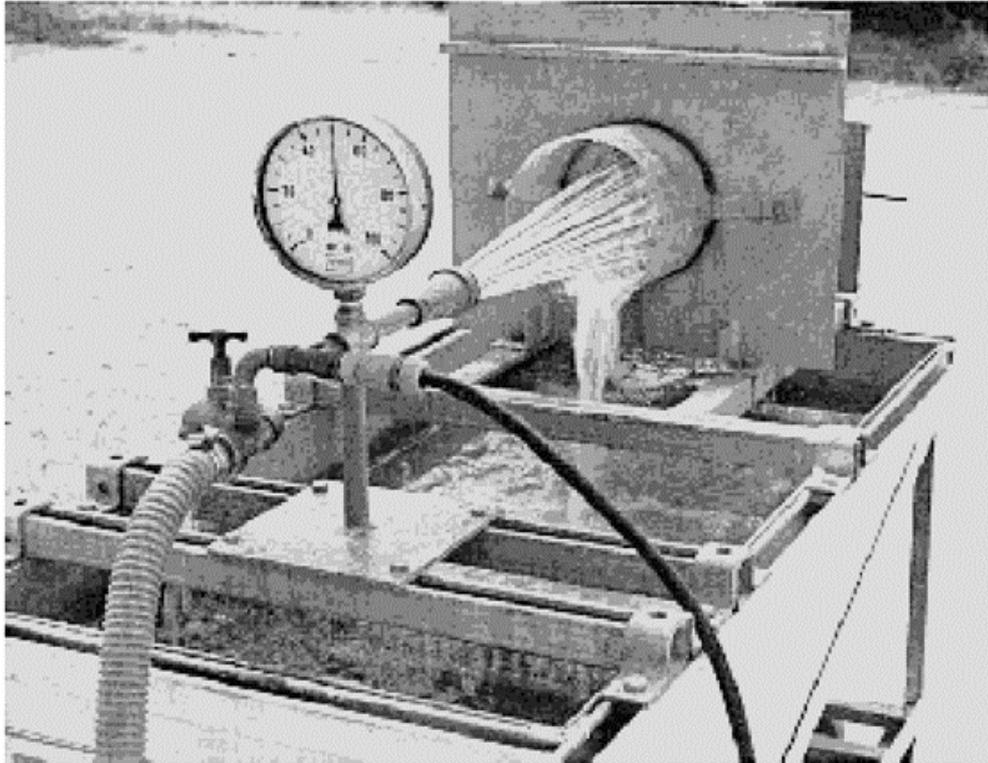
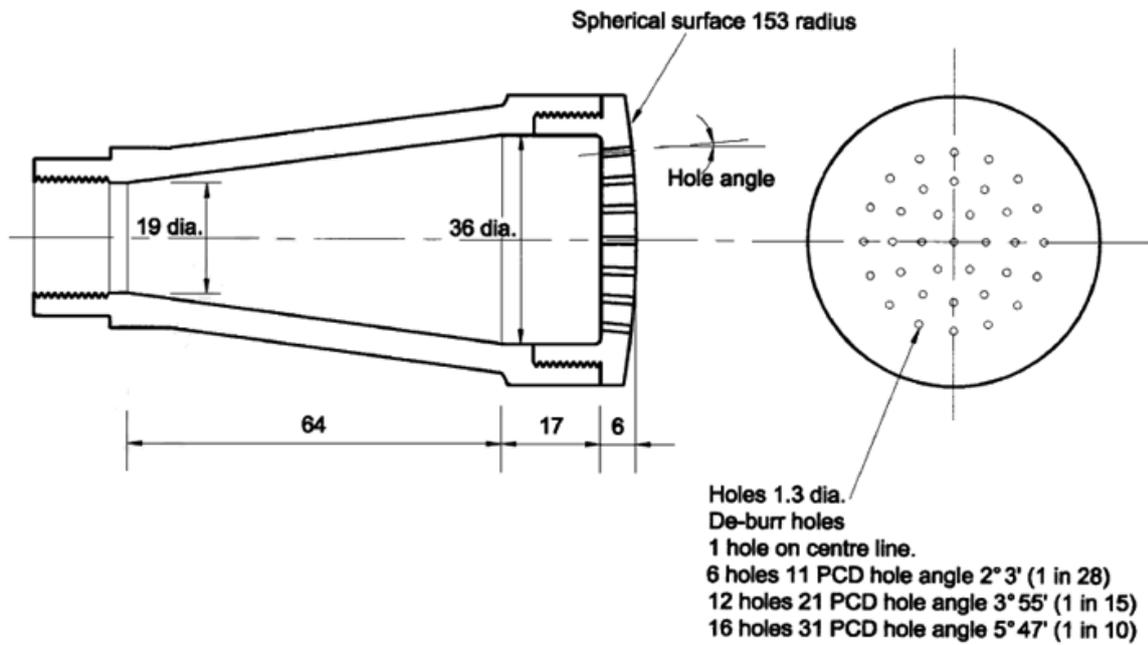


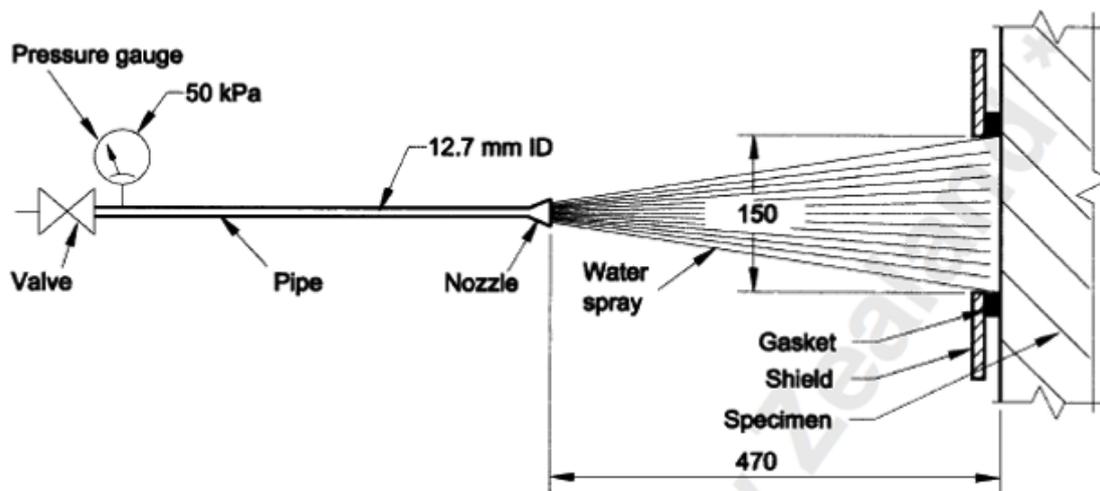
FIGURE 5.20 – Spray Test en Australie, « Bulletin 5 » (Schneider, 1987)

TABLEAU 5.5 – Classification d'érodabilité du sol testé par Spray Test, [Norme-SAZS-724, 2012], [Norme-NZS-4298, 1998]

Depth of Erosion(mm/hr)	Erodibility index
< 20	1
$20 \leq D < 50$	2
$50 \leq D < 90$	3
$90 \leq D < 120$	4
$D \geq 120$	5(Fail)



(a) Douchette en détail



(b) un tube en acier de 50 cm de long et de 12.2 mm de diamètre intérieur

FIGURE 5.21 – détail de Spray Test [Norme-SAZS-724, 2012], [Norme-NZS-4298, 1998]

## 5.5 Traitement à la chaux

Depuis fort longtemps, la chaux a été employée pour stabiliser les matériaux en terre (Adobe, pisé, bauge, BTC..). Son utilisation perdure encore aujourd'hui pour modifier les caractéristiques physico-chimiques et hydro-mécaniques des sols compactés. Les techniques de préparation des matériaux terre sont les actions consistants à mélanger les différents produits tels que la chaux ou des correcteurs granulométriques pour conférer au matériau des performances mécaniques supérieures à celles qu'il possède à l'état naturel et durables tout au long de la vie de l'ouvrage. Le suivi du processus physico-chimique de la réaction chaux-argile a permis de déterminer les quantités de chaux nécessaires aux changements instantanés ou/et durables du comportement hydromécanique des sols argileux traités, (Lasledj, A. (2009)). Le mécanisme du traitement des sols avec la chaux est basé sur plusieurs réactions.

- **Echange cationique** : les argiles ont la propriété de pouvoir échanger une partie de leurs cations constitutifs « échangeables » ou « Adsorbés à la surface » et de fixer l'ion calcium.
- **Floculation** : l'incorporation de la chaux dans un sol provoque des actions immédiates (état hydrique) et une réaction physico-chimique qui permet le passage d'une structure plastique à une composition stable, grumeleuse (chaux vive ou chaux éteinte). Des ponts se forment à court terme reliant entre elles les particules fines qui se trouvent ainsi agglomérées. Celles-ci sont peu sensibles à l'eau et possèdent une bonne résistance mécanique. Ce phénomène est appelé floculation et s'explique par l'échange des cations alcalins ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ...) par des cations  $\text{Ca}^{2+}$  apportés par la chaux, ceci développe des forces électriques conduisant à la formation des ponts  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ou  $\text{CaOH}^+$  entre les feuilletts d'argile, (Ghomari F. (1989), Locat et al, (1990), Locat et al, (1996), Diamond et Kinter, (1965), Khattab S.A.A, (2002), Le Runigo, B. (2008), TRAN Van Duy (2013), Djelloul R.(2018)).
- À long terme, **l'action pouzzolanique** donne naissance à des agents de cimentation qui augmentent la résistance et la durabilité du sol stabilisé. Les éléments de la silice, de l'alumine, des oxydes de fer présents dans les minéraux argileux réagissent avec la chaux pour former des ferro-silico-aluminates de chaux insolubles qui précipitent et cristallisent en présence de l'eau créant ainsi des lisons de même nature que celles produites avec les liants hydrauliques, (GTS2000). La carbonatation (formation de la calcite) de la chaux est une conséquence de la réaction produite entre la chaux et le  $\text{CO}_2$  de l'air. Cette réaction pourrait avoir lieu pendant la maturation des sols traités. On conclure que la chaux est également attribuable à la carbonatation en présence du  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère, et aux possibilités de liaisons de type pouzzolanique avec certains composants siliceux et alumineux de la terre.

L'efficacité du traitement est excellente, atteignant parfois plus de 90% en présence d'un pourcentage optimal d'ajout de 4% et dans des conditions de compactage optimales. Il convient de noter que ce pourcentage optimal d'ajout a été déterminé à travers l'essai de mesure du pH. Khattab S.A.A. (2002). De nombreuses études confirment que l'ajout de chaux a un effet positif sur les propriétés mécanique et hydromécaniques des sols compactés, Tableau 5.6

TABLEAU 5.6 – Traitement des sols à la chaux : Recensement non exhaustif des travaux rapportés dans la littérature depuis une quarantaine d’années

Référence	Propriétés	Mise en œuvre	Type de terre	Dosage de chaux	Observation
Wissa et al.(1965) ; Perret, 1979 ; Bell, 1996 ; Little, 1995 ; Houben and Guillaud, 1994 ; Brandl, 1981 ; Balasubramaniam et Buensuceso, 1989	Les propriétés physiques et mécaniques	éprouvette compactée	naturelle	0-10%	L'ajout de chaux à un sol compacté conduit à une augmentation de sa résistance à la compression simple, sa résistance au cisaillement. Cette augmentation est associée à la formation des produits cimentaires. L'augmentation de la résistance à la compression simple dépend également de la quantité de chaux ajoutée et du temps de cure.
MOPT, 1996 et Jiménez Delgado, 2006	La résistance à la compression simple	Pisé (5 x 5 x 5cm), Adobe (bloc)	naturelle	Faible, Moyen, Élevé	La résistance à la compression des échantillons de pisé traités en fonction de dosage augmente de 1.8 à 3.6 MPa. Pour les adobes, la résistance est améliorée de 2.25 à 4.5MPa
Ngowi AB., 1997	La résistance à la compression simple	Brique de terre crue	naturelle	5%-15%	La résistance à la compression est améliorée en fonction de la chaux
Derriche Z. et Lazzali E.(1997)	La résistance à la compression simple	/	smectites	4%-8%	L'addition de 8% de chaux permet d'acquérir une résistance mécanique importante de 9 MPa, elle ne serait que de 1 MPa avec 4% de chaux (rupture à 45)).
New Zealand NZS 4297 :1998	La rigidité	éprouvette compactée	naturelle	2%-6%	Les échantillons traités montrent une amélioration de la rigidité ; Module en grande déformation augmente de 120 à 192 MPa
Niño Cesar Consoli et al,2001	La résistances en compression, traction et module sécant	éprouvette compactée	Sol sableux	4%-10%	Les échantillons traités avec la chaux montrent une augmentation des propriétés mécaniques
Burroughs (2008) et (2010)	La résistance à la compression simple	éprouvette compactée ; pisé	naturelle	(1.2 à 2.7%) et (2% à 6%)	104 types de sols compactés sont stabilisés par la chaux ou ciment dans un totale de 219 mélanges. Une amélioration de la résistance à la compression simple. Le sol peut être stabilisé si sa résistance à la compression dépasse 2 MPa.
Oti et al, 2009 Oti et Kinuthia 2012	La résistance à la compression simple	Brique crue stabilisée	naturelle	3%-8%	Les échantillons traités avec la chaux montrent une augmentation de la résistance à la compression
Akli hibouche 2013	Les propriétés hydro-mécaniques	éprouvette compactée	Remblai et Cematerre	2.5%	L'utilisation de traitement du sol à la chaux montre une amélioration de la résistance mécanique et la durabilité ; la rigidité augmente après traitement (module en petite déformation avec la contrainte de confinement). La résistance à la traction augment après traitement avec le temps de cure
Bui et al., 2014	Résistance à la compression simple, durabilité	éprouvette compactée ; Pisé	naturelle	2%-8%	Les échantillons stabilisés avec la chaux montrent une augmentation de Rc sèche : 3.5 à 10MPa à 28j. Les échantillons stabilisés montrent aussi une meilleure durabilité.
Ciancio D.,2014	Résistance à la compression simple et la rigidité	éprouvette compactée ; Pisé	naturelle	0-6%	L'échantillon traité avec 4% de chaux plus 4% de PFC représentait le meilleur choix en termes d'amélioration de la résistance et de coût d'application. Le traitement avec 6% a également été sélectionné puisque l'amélioration de la résistance et la rigidité ont été jugées satisfaisante, (E varie de 160 à 204 MPa).
Izemmouren O.,2015	Résistance à la compression simple	BTCs (100x100x200mm)	naturelle+ sable (0/3)	6, 8 et 10%	L'ajout de chaux conduit à une augmentation de la résistance à la compression simple des sols compactés de Rc sèche : 2.5 à 10 MPa à 24h d'âge et de Rc humide : 1.5 à 7 MPa
J. Alexandre Bogas et al 2018	La résistance à la compression et traction. La durabilité (drip test et spray test)	BTC et BTCs	Sol+ agrégats fins recyclés	4%	Les résistances à la compression et traction des BTC ont été amélioré après traitement de chaux mais à long terme. Les résultats ne montrent aucun signe de l'érosion de surface après traitement.

## 5.6 Essais d'identification du sédiment naturel noté NS

Le sédiment naturel présente un pourcentage de fractions fines non négligeables, les essais d'identification ont consisté à la réalisation des courbes de distribution granulométriques, d'essais spécifiques au matériau argileux comme les limites d'Atterberg, l'essai au bleu de méthylène, la teneur en matière organique et aussi des essais de compactage.

### 5.6.1 Granulométrie

L'analyse granulométrique a été réalisée par tamisage humide pour la fraction supérieur à 80  $\mu\text{m}$  selon la norme française, [Norme-NF-XP-P94-041, 1995], et par sédimentométrie pour les éléments inférieurs à 80  $\mu\text{m}$  selon la norme [Norme-NF-P94-057, 1992]. La figure 5.22 présente la distribution granulométrique du matériau. La courbe révèle un pourcentage de fines (<80 $\mu\text{m}$ ) de l'ordre de 84% et un pourcentage d'argile (<2  $\mu\text{m}$ ) de l'ordre de 32%. Le  $D_{50}$  est de l'ordre de 5 $\mu\text{m}$ .

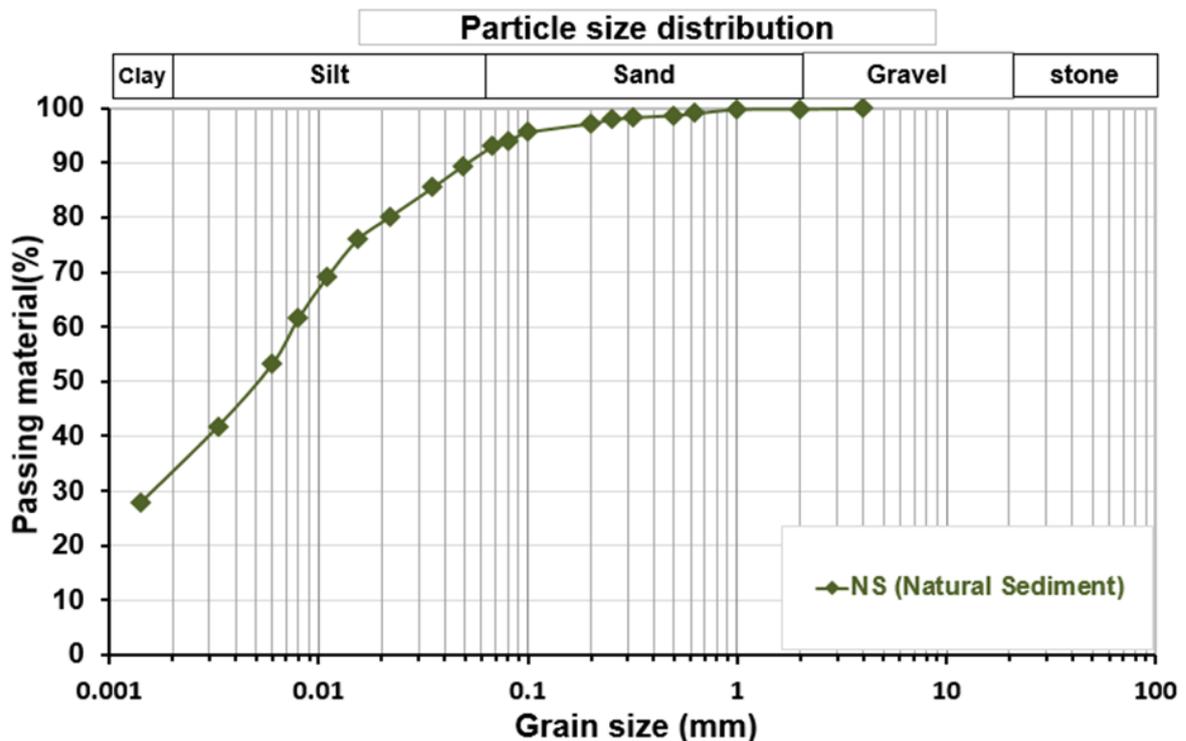


FIGURE 5.22 – la distribution granulométrique des sédiments naturels.

### 5.6.2 Limites d'Atterberg

Les essais de limites d'Atterberg ont été réalisés selon la norme [Norme-NF-P94-051, 1993]. Le sédiment présente une limite de liquidité LL de l'ordre de 55%, une la limite de plasticité PL de 34 %, soit un indice de plasticité PI de 21. Si on positionne ce matériau sur le diagramme de plasticité (figure 5.23), on constate que celui-ci se situe au-dessous de la droite A,  $PI=0.73 (LL-20)$ .

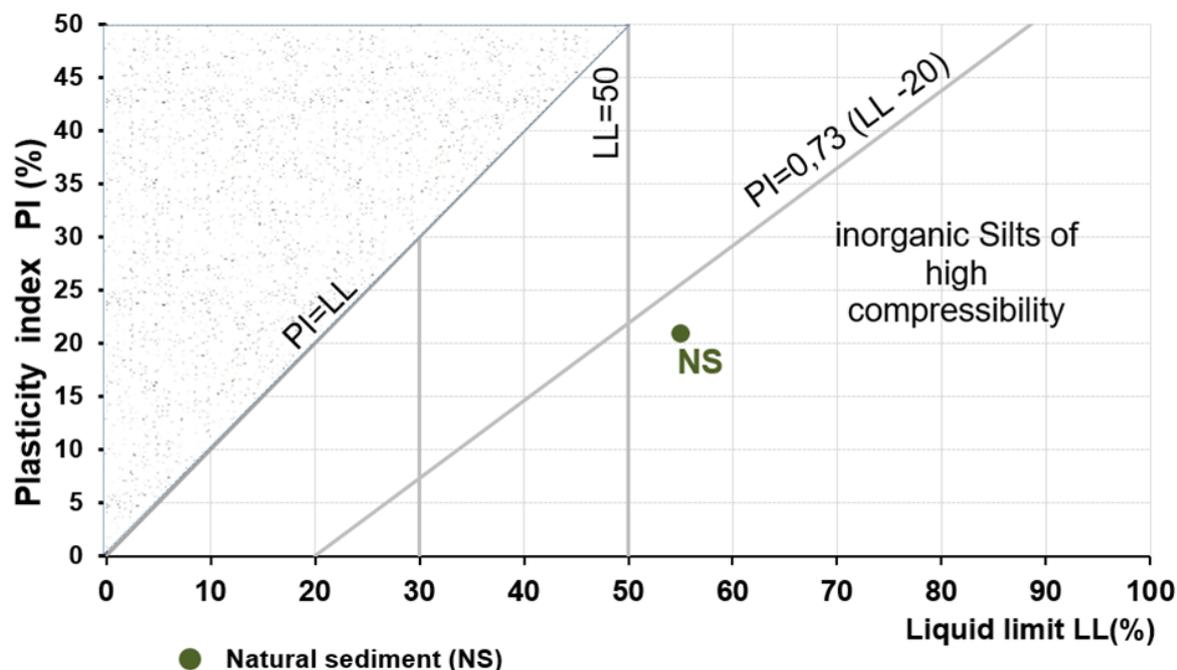


FIGURE 5.23 – Positionnement des sédiments naturels (NS) sur le diagramme de plasticité.

### 5.6.3 Valeurs au bleu de méthylène VBS

L'essai au bleu de méthylène a été réalisé selon la norme [Norme-NF-P94-068, 1993] qui donne une valeur de VBS comprise entre 1.7 et 2.4. La surface spécifique totale (SST) est ensuite déduite de la valeur au bleu de méthylène  $m^2/g$ , ( $SST = 21 \cdot VBS$ ), est comprise entre 37 et  $51 m^2/g$ .

### 5.6.4 Teneur en Matières organiques

La teneur en matières organiques MO mesurée selon la norme [Norme-NF-XP-P94-047, 1998], est comprise entre 0 et 1.5% (négligeable).

### 5.6.5 Classification LPC-USCS

Le tableau 5.7 présente les résultats des essais d'identification du sédiment naturel (NS), Selon la classification LPC-USCS, il s'agit d'un limon très plastique Lt (MH).

## 5.7 Essais de compactage du sédiment naturel (NS)

Les essais de compactage aux optimums Proctor normal (SPO) et modifié (MPO) ont été réalisés selon la norme [Norme-NF-P94-093, 1993]. La figure 5.24 présente une superposition des courbes de compactage normal et modifié. On remarque que l'augmentation de l'énergie de compactage provoque une diminution de la teneur en eau à l'optimum de l'ordre de 4% avec une augmentation de la densité séchée de l'ordre de 1.5%.

TABLEAU 5.7 – Propriétés géotechniques des sédiments naturels.

tests	sédiment Naturel (NS)	valeurs
Propriétés physiques	Sable (%)	10
	Limon (%)	56
	Argile (%)	34
	LL (%)	55
	PL (%)	34
	PI (%)	21
Propriétés chimiques	VBS(g/100g)	1.7-2.4
	SST( $m^2/g$ )	37 – 51
	MO (%)	0-1.5
Paramètres de compactage	$w_{SPO}$ (%)	27
	$\gamma_{dmax}(SPO)$ ( $kN/m^3$ )	14.86
	$w_{MPO}$ (%)	23.5
	$\gamma_{dmax}(MPO)$ ( $kN/m^3$ )	16.33

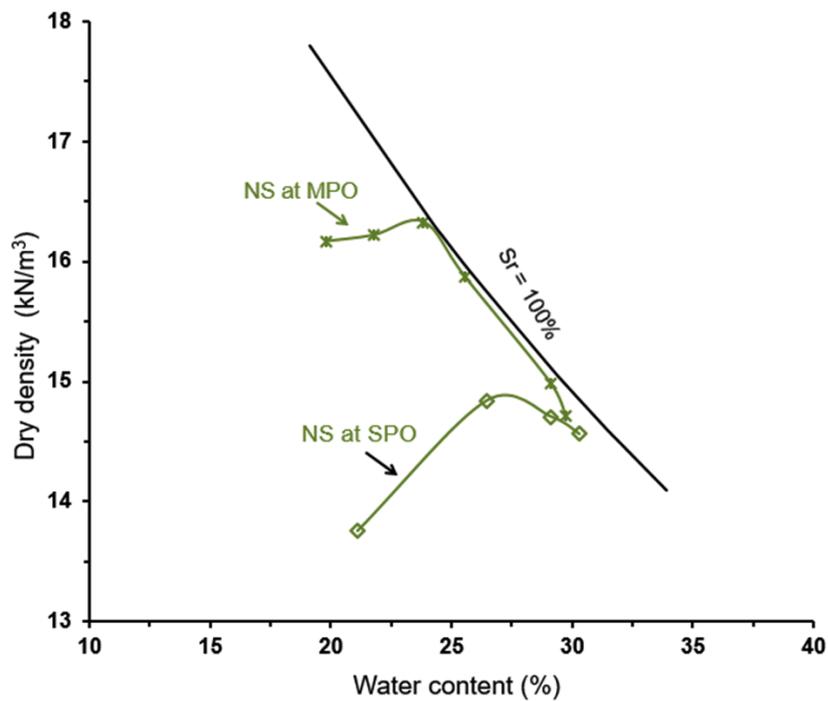


FIGURE 5.24 – Essais de compactage du matériau naturel NS.

## 5.8 Positionnement des sédiments naturels NS par rapport aux recommandations pour les BTC

La norme [Norme-NF-XP-P13-901, 2001] et les recommandations [CRATerre-EAG, 1998], [MOPT, 1992], [Jiménez et al., 2007], [Houben and Guillaud, 1994] précisent les caractéristiques en termes de granulométrie, de plasticité, de densité et de résistance que doivent vérifier les matériaux aptes à être utilisés dans la confection des BTC.

### 5.8.1 Vis à Vis de la granulométrie

La courbe de la distribution granulométrique est présentée sur la figure 5.25. Sur cette figure, le fuseau déduit des normes [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], [MOPT, 1992] est représenté en pointillés.

On remarque que la courbe granulométrique du sédiment naturel se positionne en dehors du fuseau, du côté des sols fins. Par conséquent, ce matériau ne peut pas être sélectionné en l'état pour la confection des BTC.

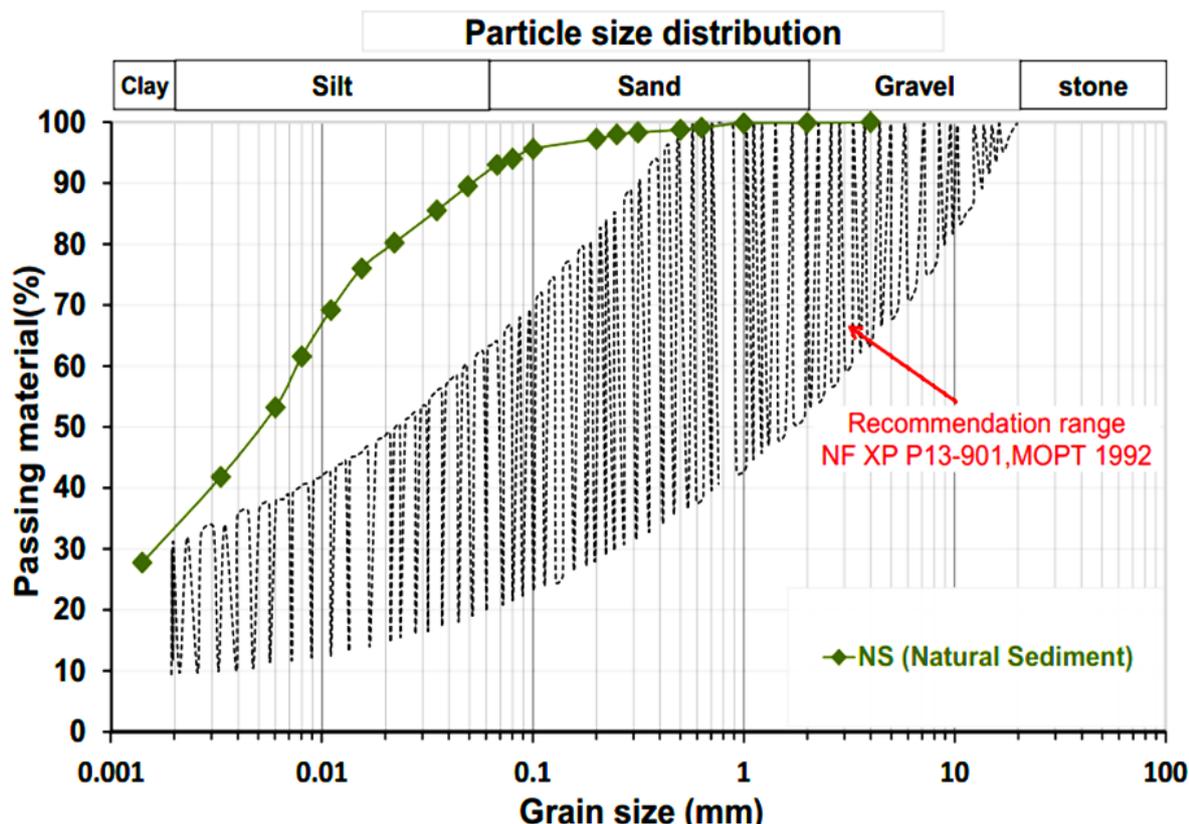


FIGURE 5.25 – Distribution granulométrique des sédiments naturels et le fuseau recommandé pour le BTC.

### 5.8.2 Vis-à-vis des limites d'Atterberg

La limite de liquidité et l'indice de plasticité du sédiment naturel sont positionnés dans le diagramme de casagrande dans le plan (LL, PI), (figure 5.26). Sur ce même plan, nous avons reporté les deux fuseaux recommandés par les normes [Norme-NF-XP-P13-901, 2001] et [MOPT, 1992]. On constate que le sédiment naturel se positionne au-dessous

de la droite (A) de l'équation  $PI=0.73(LL-20)$ , le classant comme matériau inorganique et compressible. Par ailleurs, on remarque qu'il se trouve en dehors des fuseaux normalisés à cause de sa forte limite de liquidité, le rendant ainsi inapproprié pour être utilisé tel que pour les BTC.

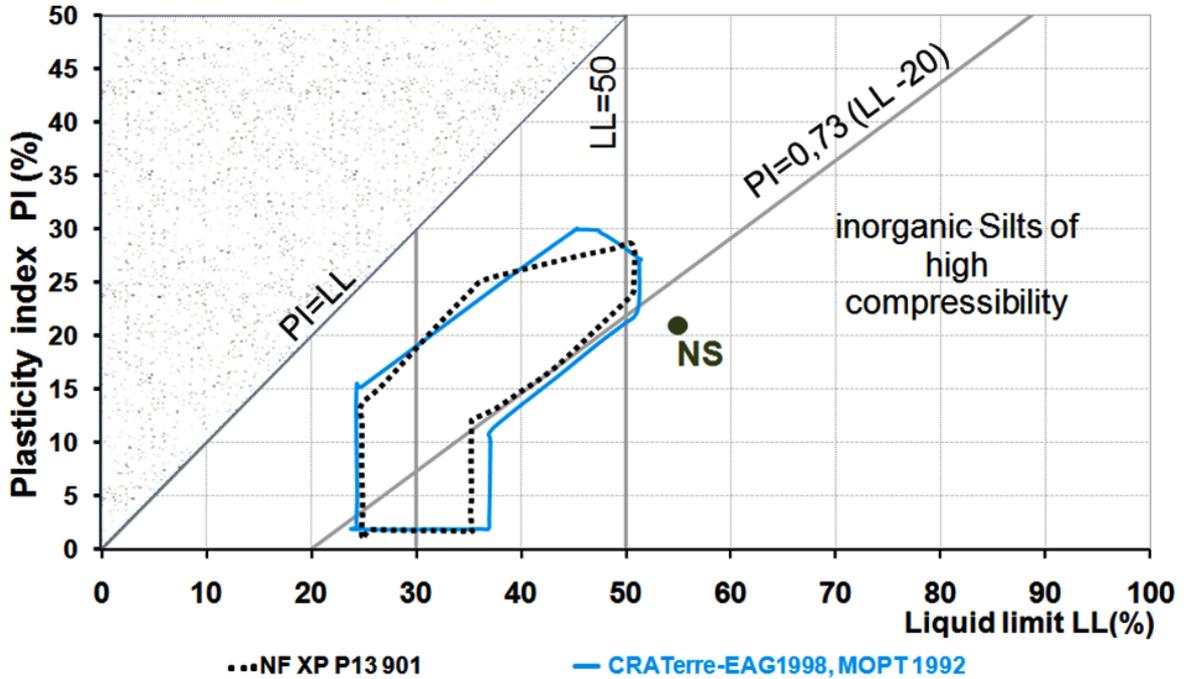


FIGURE 5.26 – limites d'Atterberg de sédiment naturel et le fuseau recommandé pour BTC

### 5.8.3 Vis-à-vis du compactage

Les courbes de compactage à l'optimum de Proctor normal (SPO) et à l'optimum de Proctor modifié (MPO) du matériau naturel (NS) sont représentées dans le plan  $(w, \gamma_d)$ . Sur ce même plan, nous avons positionné le domaine du couple  $(w, \gamma_d)$  recommandé par Moevus et al. [2012], Houben and Guillaud [1994] et Minke [2006]. On constate que même à l'énergie MPO, les densités optimales sont bien au deçà du fuseau recommandé, qui borne la teneur en eau de [5 à 15%] et le poids volumique sec de [16 à 22]  $kN/m^3$  (figure 5.27).

Le tableau 5.8 résume les différentes valeurs de densité et la teneur en eau relevées dans la littérature concernant la mise en œuvre des BTC.

TABLEAU 5.8 – les teneurs en eaux initiales et les densités sèches maximales des BTC (en anglais :CEB), ([Moevus et al., 2012], [Jiménez et al., 2007], [Houben and Guillaud, 1994])

Référence	Technique	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Wi (%)
Craterre2012	BTC	16 à 22	5 à 15
Jiménez 2007	BTC	17.5 à 23	5 à 15
Morel 2003	BTC	18.6 à 18.7	/
Hakimi1996	BTC	19.2 à 19.30	9.8 à 10.8
Olivier1994	BTC	18.25à 20.13	12 à 19
Ola 1987	BTC	16 à 19	/

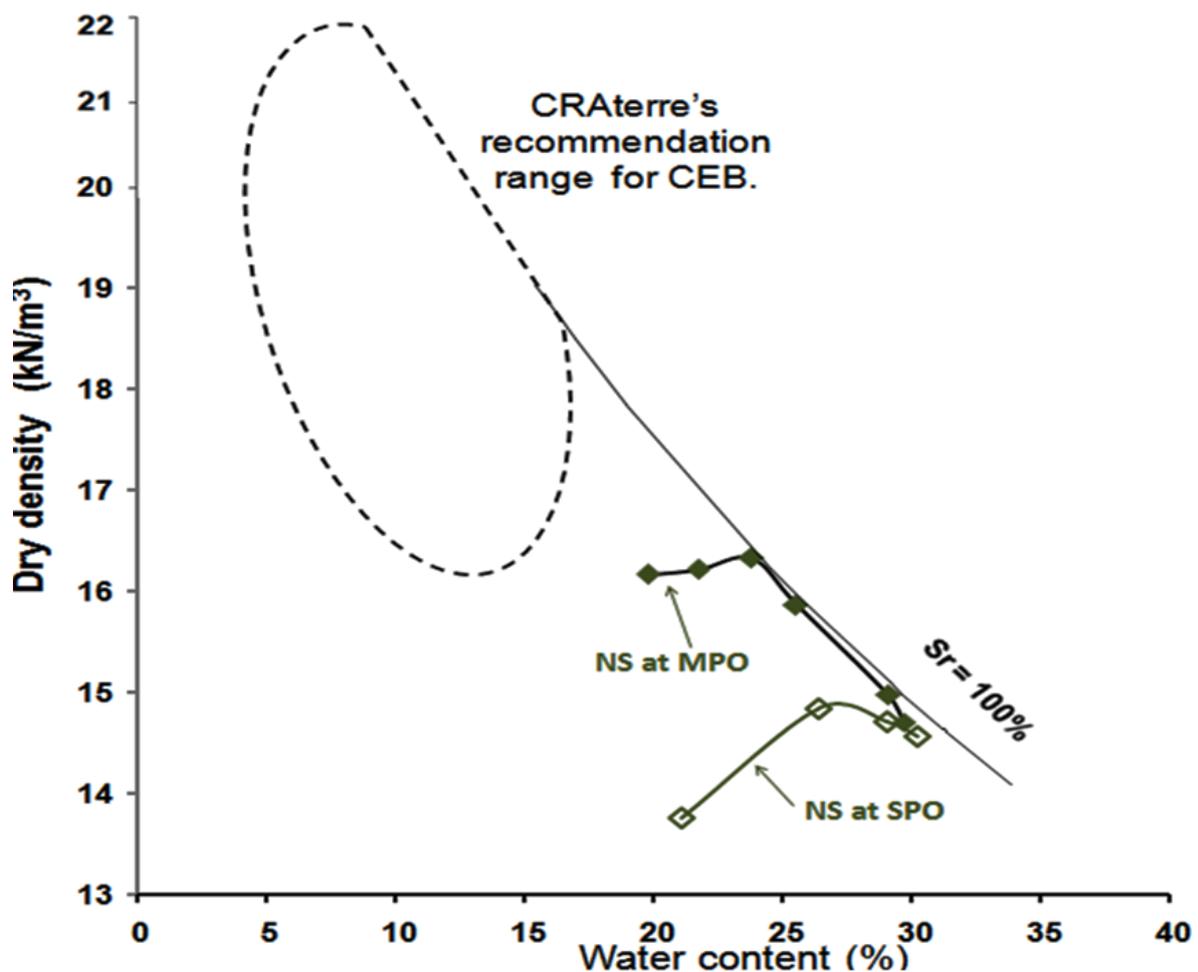


FIGURE 5.27 – Essais de compactage (SPO et MPO) de sédiment naturel (NS) et la zone recommandée pour les BTC.

## **5.9 Conclusions quant à l'utilisation du sédiment naturel (NS) dans les BTC**

Dans ce chapitre, nous avons analysé les problèmes posés par l'envasement du barrage de Bakhadda, des problèmes associées liés au dragage de ces sédiments et leur impact sur l'environnement. Ce gisement naturel peut être valorisé en matériau de construction comme les BTC. Cependant, les essais d'identification ont montré qu'en termes de granulométrie, de densité optimale et de plasticité sont loin de satisfaire les normes et les recommandations concernant son aptitude à être utilisé en l'état comme matière première pour les BTC. Par conséquent, ce sédiment naturel doit être amendé pour améliorer ses propriétés mécaniques et les rendre conformes aux recommandations en vigueur pour la confection des BTC. Cette approche est l'objet du chapitre 6.

# Chapitre 6

## Amendement du sédiment de Bakhadda pour une formulation optimisée pour les BTC

### Sommaire

---

6.1	Introduction . . . . .	159
6.2	Amendement du sédiment naturel NS avec du sable 0/4 : Matériau NS-S30	159
6.2.1	Fuseaux granulométrique et de plasticité . . . . .	159
6.2.2	Propriétés de compactage . . . . .	159
6.2.3	Résistance à la compression simple (UCS) du NS-S30 compacté	161
6.3	Comportement hydromécanique du NS-S30 . . . . .	162
6.3.1	Chemins de drainage-humidification du NS-S30 sous forme de pâte . . . . .	164
6.3.2	Chemins de drainage-humidification du NS-S30 compacté . . .	165
6.3.3	Variation des propriétés mécaniques avec la succion . . . . .	169
6.3.4	Relation entre la résistance UCS et les modules ( $E_{ss}$ , $E_{50}$ ) . . . .	172
6.4	Perméabilité à la vapeur d'eau . . . . .	173
6.5	Essais de durabilité du NS-S30 . . . . .	177
6.5.1	Érosion de surface . . . . .	177
6.5.2	constat . . . . .	184
6.6	Traitement du NS-S30 au liant . . . . .	184
6.7	Conclusion . . . . .	190

---

## 6.1 Introduction

Nous avons montré dans le chapitre précédent que le sédiment naturel NS ne remplit pas les conditions nécessaires pour être utilisé en l'état pour la confection des BTC. Nous cherchons par conséquent dans ce chapitre à amender ce sédiment naturel avec apport granulaire permettant de répondre au cahier des charges des BTC (correcteur à la fois granulométrique et mécanique). Une fois amendé, le matériau sera caractérisé en termes de densité optimale, de portance, de résistance mécanique en vue de leurs adéquation avec les normes et recommandations en vigueur pour la confection des BTC.

## 6.2 Amendement du sédiment naturel NS avec du sable 0/4 : Matériau NS-S30

L'une des solutions pour améliorer les propriétés de sédiment naturel sans un traitement aux liants consiste à amender le NS avec un matériau granulaire. Le choix s'est porté sur un sable 0/4, disponible naturellement en grande quantité dans la région d'exploitation du gisement de sédiment naturel NS. Afin de satisfaire le critère granulométrique selon la norme française [Norme-NF-XP-P13-901 \[2001\]](#), une étude portant sur différents pourcentages de sable ajouté, a montré qu'un ajout de 30% de sable est nécessaire. Afin de vérifier les autres critères, une étude systématique sur ce mélange nommé désormais NS-S30 est réalisée et présentée ci-dessous.

### 6.2.1 Fuseaux granulométrique et de plasticité

La figure 6.1 présente respectivement les courbes granulométriques du sédiment Naturel (NS), du sable 0/4 et du sédiment amendé avec 30% de sable (NS-S30). On constate ainsi que la courbe granulométrique du sédiment amendé avec 30% du sable se positionne de manière satisfaisante (à plus de 70%) par rapport au fuseau granulométrique normalisé recommandé pour les BTC et représenté par des pointillés sur la figure 6.1. La limitation à 30% de sable ajouté est un critère purement économique.

Les mesures des limites d'Atterberg du NS-S30 sont positionnées dans le plan de Casagrande (LL, PI), (figure 6.2). On constate que le sédiment amendé NS-S30 se positionne à la frontière des fuseaux recommandés par les normes [[Norme-NF-XP-P13-901, 2001](#)], les recommandations de [CRATerre-EAG \[1998\]](#) et [MOPT \[1992\]](#). Ceci rend l'utilisation du NS-S30 admissible pour la confection des BTC.

### 6.2.2 Propriétés de compactage

La figure 6.3 regroupe dans le plan ( $w$ ,  $\gamma_d$ ), l'ensemble des courbes de compactage du sédiment naturel NS et amendé avec 30% de sable NS-S30, compactés aux énergies SPO et MPO. Sur ce même graphique, nous avons représenté le fuseau recommandé par [[Moëvus et al., 2012](#)]. On remarque ce qui suit :

- Les couples ( $w_{SPO}$ ,  $\gamma_{dSPO}$ ) du sédiment amendé NS-S30 se situe à l'extérieur du fuseau recommandé pour les BTC.
- En revanche, le point ( $w_{MPO}$ ,  $\gamma_{dMPO}$ ) du NS-S30 se situe à l'intérieur de la zone recommandée.

[[Fleureau et al., 2002](#)] ont proposé des corrélations entre les teneurs en eaux optimales, les densités sèches maximales des sols compactés dans les conditions de Proctor nor-

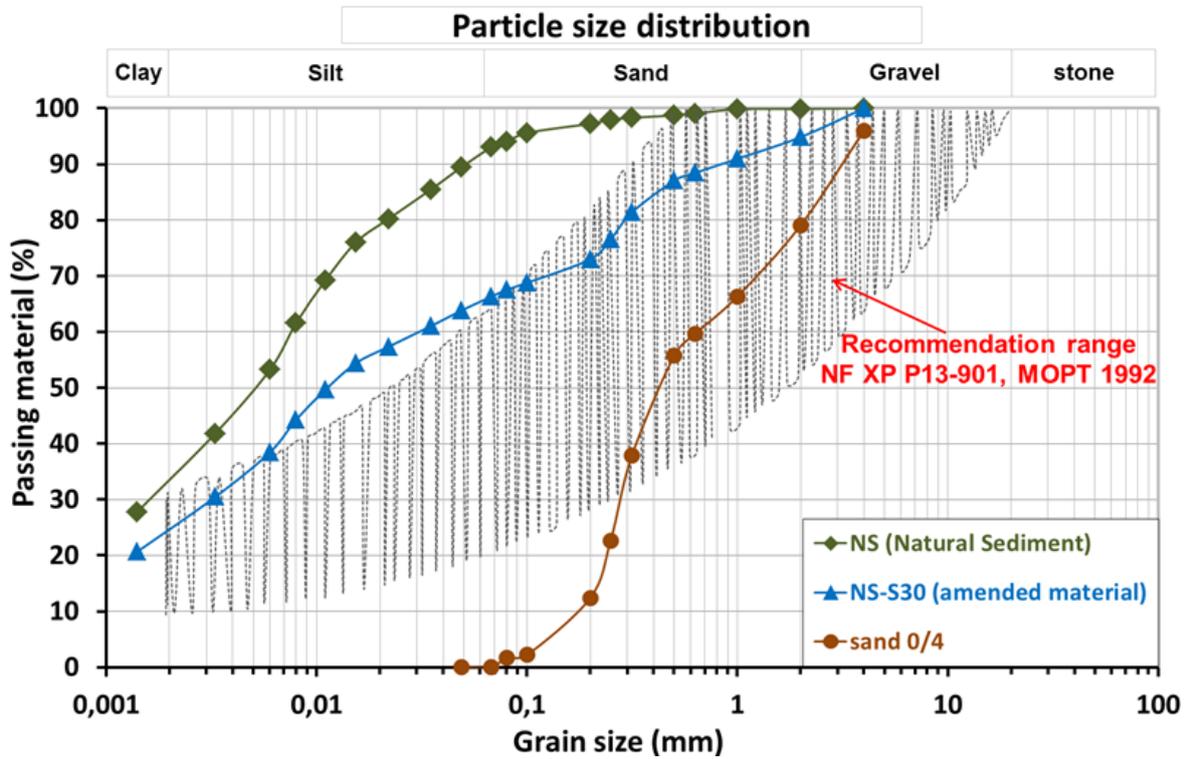


FIGURE 6.1 – Distribution granulométrique des NS, du sable 0/4, du matériau amendé NS-S30 et le fuseau recommandé.

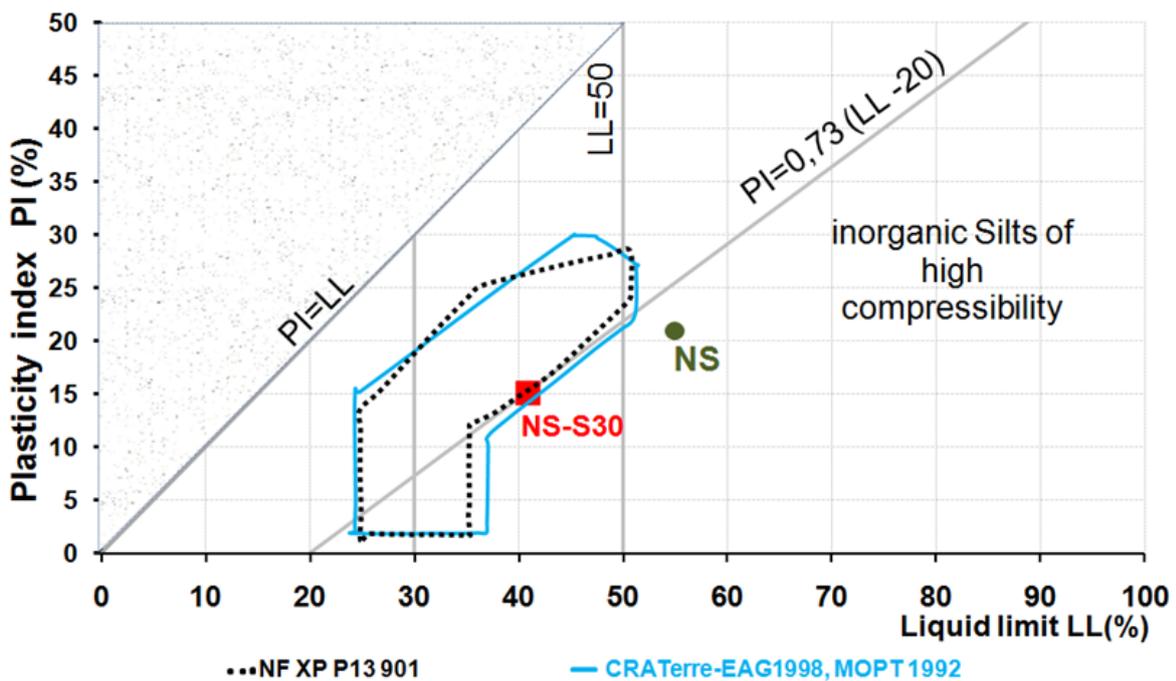


FIGURE 6.2 – limites d’Atterberg des NS, NS-S30 et le fuseau recommandé.

mal ou modifié (SPO, MPO, respectivement) et leur limite de liquidité. Ces corrélations permettent de trouver à partir de la valeur de limite de liquidité (LL), les densités sèches maximales et leurs teneurs en eau à l'optimum de Proctor normal ou modifié. Les équations des lignes de régression sont comme suit (la limite de liquide en pourcentage) :

1. Cas de l'optimum Proctor normal (SPO).
  - (a)  $w_{SPO}(\%) = 1.99 + 0.46LL - 0.0012LL^2$
  - (b)  $\gamma_{dSPO}(\text{kN}/\text{m}^3) = 21 - 0.113LL + 0.00024LL^2$
2. Cas de l'optimum Proctor modifié (MPO)
  - (a)  $w_{MPO}(\%) = 4.55 + 0.32LL - 0.0013LL^2$
  - (b)  $\gamma_{dMPO}(\text{kN}/\text{m}^3) = 20.56 - 0.086LL + 0.00037LL^2$

Le tableau 6.2 résume les valeurs des couples ( $w$ ,  $\gamma_d$ ) du NS et NS-S30 aux optimums. Il y a une bonne concordance entre ces corrélations et les valeurs mesurées, malgré une différence significative dans la teneur en eau d'environ 3% pour SPO et de 5% pour MPO, respectivement. D'autre part, l'incertitude concernant les densités optimales ne dépasse pas 4% pour NS et NS-S30, la différence de la teneur en eau est d'environ 1,2% pour SPO et de 0,9% pour MPO, respectivement, et une faible différence entre les densités qui n'excèdent pas de 0,70%.

### 6.2.3 Résistance à la compression simple (UCS) du NS-S30 compacté

La résistance à la compression simple (UCS) a été réalisée sur sept éprouvettes de sédiment naturel amendé avec 30% de sable (NS-S30) compacté à l'optimum Proctor modifié (MPO). Le Tableau 6.1 présente les valeurs de résistance à la compression qui varient de 0.63 à 0.72 MPa avec une valeur moyenne de 0.70 MPa. Cette valeur est inférieure au seuil minimum recommandé par la norme [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], qui doit être supérieure ou égale à 1.6 MPa.

TABLEAU 6.1 – Résultats de résistance à la compression simple des éprouvettes(5cmx10cm) de NS-S30 compactées à ( $w_{MPO}$ ,  $\gamma_{dMPO}$ )

Échantillons	UCS(MPa)
1	0.63
2	0.7223
3	0.66576
4	0.67308
5	0.701
6	0.658
7	0.69
moyen	0.70
Écart type	0.03

Par conséquent, dans le cas de notre matériau (NS-S30), celle ci est insuffisante, d'où la nécessité de chercher à augmenter cette résistance. Une des possibilités consiste à augmenter l'énergie de compactage au-delà de MPO. Une énergie de compactage équivalente à MPO + 25coups permet d'atteindre cet objectif. Le nouveau couple ( $W_{MPO+25}$ ,

$\gamma_{dmax}$  MPO+25), (tableau 6.2), est aussi situé dans le plan  $[w, \gamma_d]$  à l'intérieur de la zone recommandée comme montré sur la figure 6.3.

TABLEAU 6.2 – Valeurs des couples de  $(w, \gamma_d)$  du NS et NS-S30 aux optimums

Matériau de compactage et énergie	$\gamma_{dmax}$ ( $kN/m^3$ )	$W_{opt}$ (%)	Corrélation de [Fleureau et al., 2002]	
			$\gamma_{dmax}$	$W_{opt}$
NS à SPO	14.9	27	15.5	24
NS à MPO	16.3	23.5	16.9	18.20
NS-S30 à SPO	16.6	20	16.77	18.80
NS-S30 à MPO	18.4	16.4	17.66	15.50
NS-S30 à MPO+25Coups	19.1	13.5	/	/

La figure 6.4 présente les résultats des mesures de la résistance à la compression simple réalisée sur des éprouvettes de NS-S30 compactées dans les conditions de l'optimum Proctor modifié (MPO) et l'optimum Proctor modifié plus 25 coups (MPO + 25coups). Après compactage, les échantillons sont conservés durant 24h enrobés dans un film plastique étanche afin d'homogénéiser leurs teneurs en eau. Celles-ci correspondent aux teneurs en eaux optimums de compactage. L'écrasement a donc été effectué après 24h.

Concernant les échantillons compactés à MPO, le chemin de chargement présente au voisinage de l'origine une rigidité très faible caractéristique du comportement des milieux poreux et qui peut être liés à la fermeture de micro-fissures et au resserrement des particules [Taibi et al., 2009], [Bui et al., 2014]. Ensuite la contrainte varie linéairement avec la déformation jusqu'à une valeur de l'ordre de 1%. Au-delà de cette valeur de déformation, le matériau présente un comportement élasto-plastique ductile présentant un pic de résistance pour une déformation voisine de 2.5% puis une chute de résistance qui ne se stabilise pas.

Concernant les échantillons compactés à MPO+25, la valeur moyenne maximale de la résistance à la compression (UCS) est de l'ordre de 1.8 MPa, valeur vérifiant la norme [Norme-NF-XP-P13-901, 2001] et proche de celles trouvées par [Bui, 2008] (1.74 à 2.22 MPa sur des éprouvettes cylindriques) et [P'kla, 2002] (1.8 MPa pour les BTC).

### 6.3 Comportement hydromécanique du NS-S30

Les chemins de drainage et humidification ont été réalisés sur le matériau NS-S30 préparé à deux états initiaux :

- Matériau sous forme de pâte préparé initialement à une teneur en eau de  $w=1.5LL$ . (1,5 fois la limite de liquidité, soit  $W_i = 61.5\%$ , correspondant à un état saturé et normalement consolidé), ([Fleureau et al., 2002], [Fleureau et al., 1993], [Dumont et al., 2010]). Cet état Normalement Consolidé sert de référence pour les autres états initiaux.
- Matériau compacté aux énergies MPO et MPO + 25coups

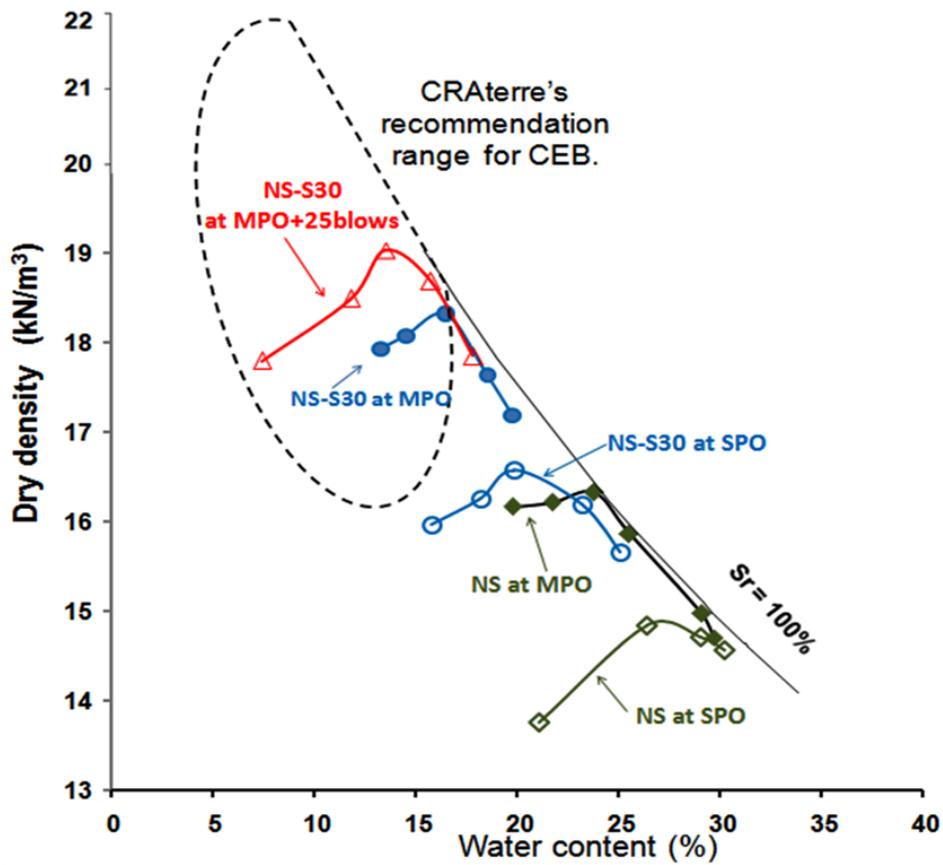


FIGURE 6.3 – Essais de compactage de : NS à SPO et MPO, NS-S30 à SPO, MPO et MPO + 25coups positionnés par rapport à la zone recommandée.

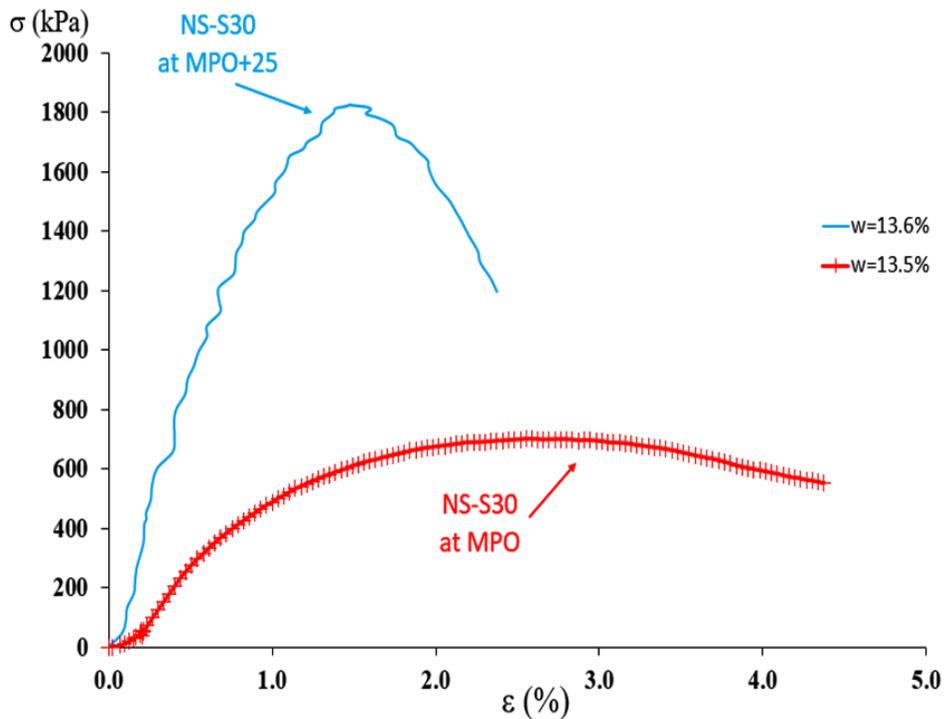


FIGURE 6.4 – Résistances à la compression simple d'éprouvettes de NS-S30 à MPO et MPO+25 Coups

### 6.3.1 Chemins de drainage-humidification du NS-S30 sous forme de pâte

Les figures 6.5, (a, b, c, d et e) présentent les chemins de drainage-humidification des échantillons dans cinq plans :

- Les variations de l'indice des vides et du degré de saturation sont tracés en fonction de la teneur en eau sur les graphes (a) et (c).
- Les graphes (b), (d), (e) montrent respectivement la variation de l'indice des vides, du degré de saturation et la teneur en eau en fonction du logarithme de la succion.

#### 6.3.1.1 Concernant chemin de drainage

La figure 6.5 montre que lors de séchage des échantillons préparés sous forme de pâte à une contrainte extérieure nulle, l'indice de vide diminue. Cette diminution montre que le volume de l'échantillon diminue progressivement en fonction de la teneur en eau où l'indice des vides remplace le volume total. Au début de séchage, le matériau suit la droite de saturation ( $e_{Sr} = w_{Gs}$ ), jusqu'à une valeur de teneur en eau de l'ordre de 16.5%. À partir de cette valeur, l'indice des vides tend vers une valeur constante avec une diminution de la teneur en eau. La limite de retrait ( $w_{SL}$ ) est définie par l'intersection de la droite de saturation et l'asymptote horizontale correspond à une teneur en eau nulle. On peut estimer cette limite ( $w_{SL}$ ) graphiquement à un teneur en eau de 14% correspondant à une valeur de l'indice des vides ( $e_{SL}$ ) de l'ordre de 0.44. Au-delà de cette valeur, le volume reste constant. Lorsque la succion est inférieure à la succion de désaturation ( $s < s_d$ ), (figure 6.5(b)), l'indice des vides diminue sensiblement linéairement avec l'augmentation du logarithme de la succion. Cette succion de désaturation est également appelée la valeur d'entrée d'air qui correspond à une valeur de succion  $s_d = 2\text{MPa}$ . Dans ce domaine linéaire, la déformation plastique est importante. Ce comportement est similaire au chemin de compression isotrope où œdométrique d'un échantillon de sol saturé avec de grandes déformations plastiques. En fait, il existe une corrélation entre l'indice de compressibilité "Cc" et la limite de liquide "LL" lorsque le sol est saturé ou quasi-saturé. Il est possible de tracer cette corrélation sur le chemin de drainage en utilisant les lignes de référence à partir des corrélations proposées par Biarez et Favre (1975) cité par [Fleureau et al., 2002]. La ligne est tracée en se basant sur deux valeurs de succion : 7kPa et 1MPa, comme suit :

- Pour  $s = 7\text{ kPa}$   $w = LL$  ou  $e = (\gamma_s / \gamma_w) LL$
- Pour  $s = 1000\text{ kPa}$   $w = LP$  ou  $e = (\gamma_s / \gamma_w) PL$

Cette corrélation correspond bien au coefficient de diminution linéaire de l'indice des vides dans le chemin de drainage. L'effet de la succion appliquée à un échantillon est équivalent à l'effet d'une contrainte isotrope. Au-delà de la valeur de la succion de désaturation (ou succion d'entrée d'air ( $s_d$ )), le matériau NS-S30 se désature légèrement jusqu'à la limite de retrait ( $s_{SL}$ ), mais cela n'affecte pas sa compressibilité, dans ce domaine ( $s_d < s < s_{SL}$ ), le matériau reste quasi saturé ( $S_r > 85\%$ ).

Lorsque la succion est supérieure à la limite de retrait ( $s > s_{SL}$ ), le chemin de drainage présente un palier dans le plan  $[\log s ; e]$ . Ce palier constitue un domaine caractéristique de ce graphe, où le NS-S30 devient quasi rigide et se comporte comme matériau élastique. La succion de la limite de retrait joue un rôle important dans la modélisation du comportement du sol, car il correspond à un changement drastique de ses propriétés, ([Modaressi et al., 1996], [Kohgo, 2002]).

La figure 6.5(c) montre que tant que la teneur en eau reste supérieure à 16,5%, (valeur correspondant à la teneur en eau d'entrée d'air), le matériau reste saturé ( $S_r=1$ ). Lorsque

la teneur en eau devient inférieure à celle d'entrée d'air, le degré de saturation diminue très rapidement, presque linéairement avec la teneur en eau, tant que l'indice des vides reste constant.

La figure 6.5(d) montre que le matériau reste saturé malgré l'augmentation de la succion jusqu'à 2 MPa. Cette valeur représente la succion d'entrée d'air qui est déterminée par l'intersection de la ligne de saturation  $S_r = 100\%$  et la tangente de la courbe de chemin de drainage. Lorsque la succion atteint la valeur d'entrée d'air, le degré de saturation diminue pour atteindre 20% pour une succion de l'ordre de 50 MPa. Il apparaît donc que l'effet de la succion sur l'indice des vides est largement lié à la saturation du matériau. Lorsque le matériau est quasi saturé, la phase de compressibilité maximale se produit, alors que l'indice des vides devient presque constant lorsque le degré de saturation est inférieur à 80%.

Finalement, la figure 6.5(e) montre la courbe usuelle de rétention d'eau. La diminution rapide du degré de saturation se traduit par une chute de la teneur en eau. Tant que la succion est plus faible que la succion de désaturation, les variations de la teneur en eau et le degré de saturation sont liés. La variation de la teneur en eau est aussi liée avec l'indice des vides. Au-dessous de la succion de désaturation et pour des valeurs plus élevées de la succion, la teneur en eau devient directement liée au degré de saturation.

#### 6.3.1.2 Chemin d'humidification

Sur le chemin d'humidification, on retrouve les mêmes phases de comportement du matériau sur le chemin de drainage. Lors de l'humidification des pâtes séchées initialement dans une étuve à 105°C durant 24h, l'indice des vides reste constant jusqu'à atteindre la limite de retrait, (figure 6.5(a)). En dépassant cette valeur, l'indice des vides commence à augmenter suivant une pente plus faible que celle du chemin de drainage, et ce jusqu'à une valeur maximale de l'ordre de 0.66. Dans le plan  $(\log(s), e)$ , (figure 6.5(b)), l'hystérésis entre les chemins de drainage et d'humidification est importante. Ceci est dû aux déformations plastiques subies par le matériau sur le chemin de drainage (normalement consolidé). En outre, lorsque le matériau s'humidifie, on observe dans le plan  $[w, S_r]$  une hystérésis importante du degré de saturation. Le matériau atteint un  $S_r = 84\%$  pour une succion de l'ordre de 30 kPa, (figure 6.5(d)).

#### 6.3.2 Chemins de drainage-humidification du NS-S30 compacté

Dans le cas du NS-S30 compacté, les chemins de drainage-humidification ont été réalisés en deux étapes : Premièrement, la valeur de la succion initiale des échantillons compactés à leur teneur en eau optimale a été mesurée en utilisant la technique du papier filtre. Deuxièmement, les échantillons sont soumis à des succions inférieures ou supérieures à sa succion initiale, afin suivre en continu les chemins de drainage et d'humidification.

La figure 6.6 montre les chemins de drainage-humidification du matériau NS-S30 compacté à deux énergies : MPO et MPO+25coups.

Ces résultats sont aussi tracés dans les cinq plans correspondants : a) l'indice des vides en fonction de la teneur en eau. b) l'indice des vides en fonction de la succion. c) Degré de saturation en fonction de la teneur en eau. d) Degré de saturation en fonction de la succion. e) la teneur en eau en fonction de la succion.

Le tableau 6.3 résume les valeurs moyennes de la succion initiale mesurée en utilisant la technique du papier filtre, l'indice des vides et le degré de saturation. Ces valeurs

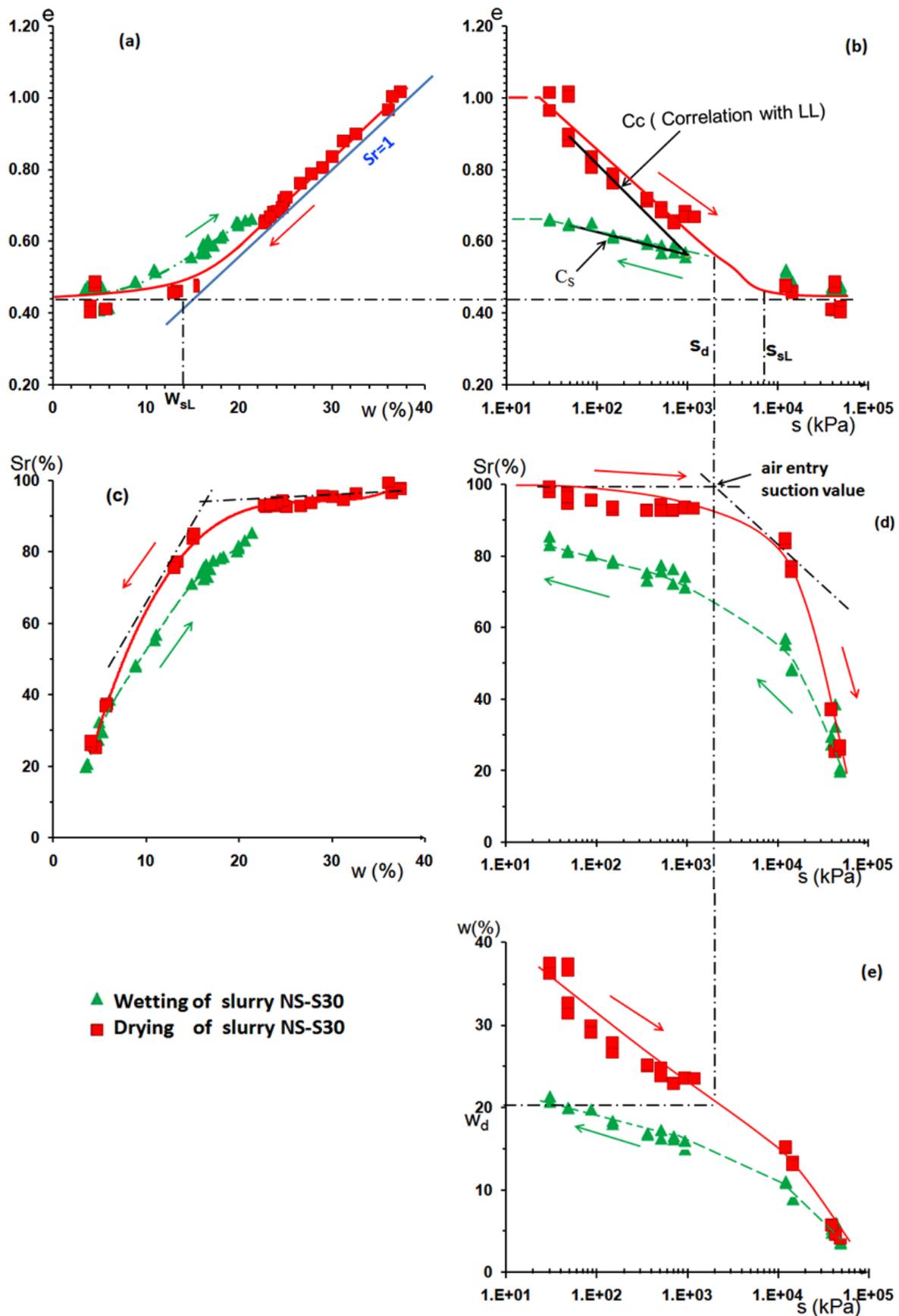


FIGURE 6.5 – chemins de drainage-humidification du NS-S30 préparé initialement sous forme des pâte.

sont représentées par des cercles continus et en pointillés, respectivement pour les états initiaux MPO et MPO+25 coups, (figure 6.6).

TABLEAU 6.3 – Valeurs initiales moyennes des caractéristiques du NS-S30.

	Succion s(kPa)	Indice de vide e	Degré de Saturation Sr(%)
MPO	871.3	0.495	90.2
MPO+25coups	6225	0.437	71.4

[Fleureau et al., 2002] ont proposé une corrélation donnant la succion à l’optimum proctor modifié MPO à partir de limite de liquide, comme suit :

$$s_{MPO} = 1.72 LL^{1.64} \quad (6.1)$$

Cette corrélation donne une valeur de succion de 760 kPa. Celle-ci est en bon accord avec celle mesurée par la méthode du papier filtre, qui est de 871 kPa. Le matériau suit un chemin d’humidification, si la succion imposée est inférieure à la succion initiale, et un chemin de drainage, dans le cas contraire, (figure 6.6). Dans le plan [e, log (s)], (figure 6.6(b)), la succion  $s_{MPO}$  (871 kPa), est inférieure à la succion de la limite de retrait ( $s_{SL\ MPO} = 10MPa$ ) et l’indice des vides  $e_{MPO}$  est supérieure à l’indice des vides de limite de retrait ( $e_{SL\ MPO} = 0.41$ ).

Par conséquent, lors du séchage, le matériau compacté à MPO suit un chemin surconsolidé (OC) de pente  $C_s$ , jusqu’à croiser le chemin normalement consolidé (NC) de pente  $C_c$ . Ensuite tend vers une asymptote horizontale représentée par la limite de retrait. Celle-ci est confondue avec celle de la pâte. Par ailleurs, sur le chemin d’humidification, le matériau compacté à MPO suit un chemin de pente  $C_s$  qui traduit un comportement surconsolidée (OC). Dans le cas des échantillons compactés à MPO+25coups, les valeurs initiales ( $s_{MPO+25}$  et  $e_{MPO+25}$ ) sont très proches des limites de retrait ( $s_{SL\ MPO+25} = 20\ MPa$ ). A partir de cet état initial, le matériau suit sur le chemin d’humidification un chemin de pente OC lorsque la succion imposée est inférieure à la succion initiale. En revanche, lorsque la succion est supérieure à la succion initiale, le matériau suit un chemin de drainage, mais ce dernier est confondu avec le palier de limite de retrait. Dans le plan [log s ; e], ce palier est légèrement plus bas que ceux de la pâte et du matériau compacté à MPO.

La variation de l’indice des vides en fonction de la teneur en eau est presque linéaire pour  $w > w_{SL}$ , (figure 6.6(a)). Autrement dit, au-dessous de cette valeur, l’indice des vides reste constant lorsque la teneur en eau diminue. Dans les plans [w, Sr] (figure 6.6(c)) et [log s, Sr] (figure 6.6(d)), sur le chemin de séchage, le degré de saturation Sr diminue jusqu’à 24.8% pour le matériau compacté à MPO et 8.4% pour celui compacté à MPO+25coups. Cependant, sur chemin d’humidification, le degré de saturation maximale du matériau à MPO ne dépasse pas 95%, correspond à une teneur en eau  $w_{Sat\ MPO}=23\%$ . De même, le Sr maximum du matériau à MPO+25coups atteint 87%, correspond à une teneur en eau  $w_{Sat\ MPO+25}=20\%$ .

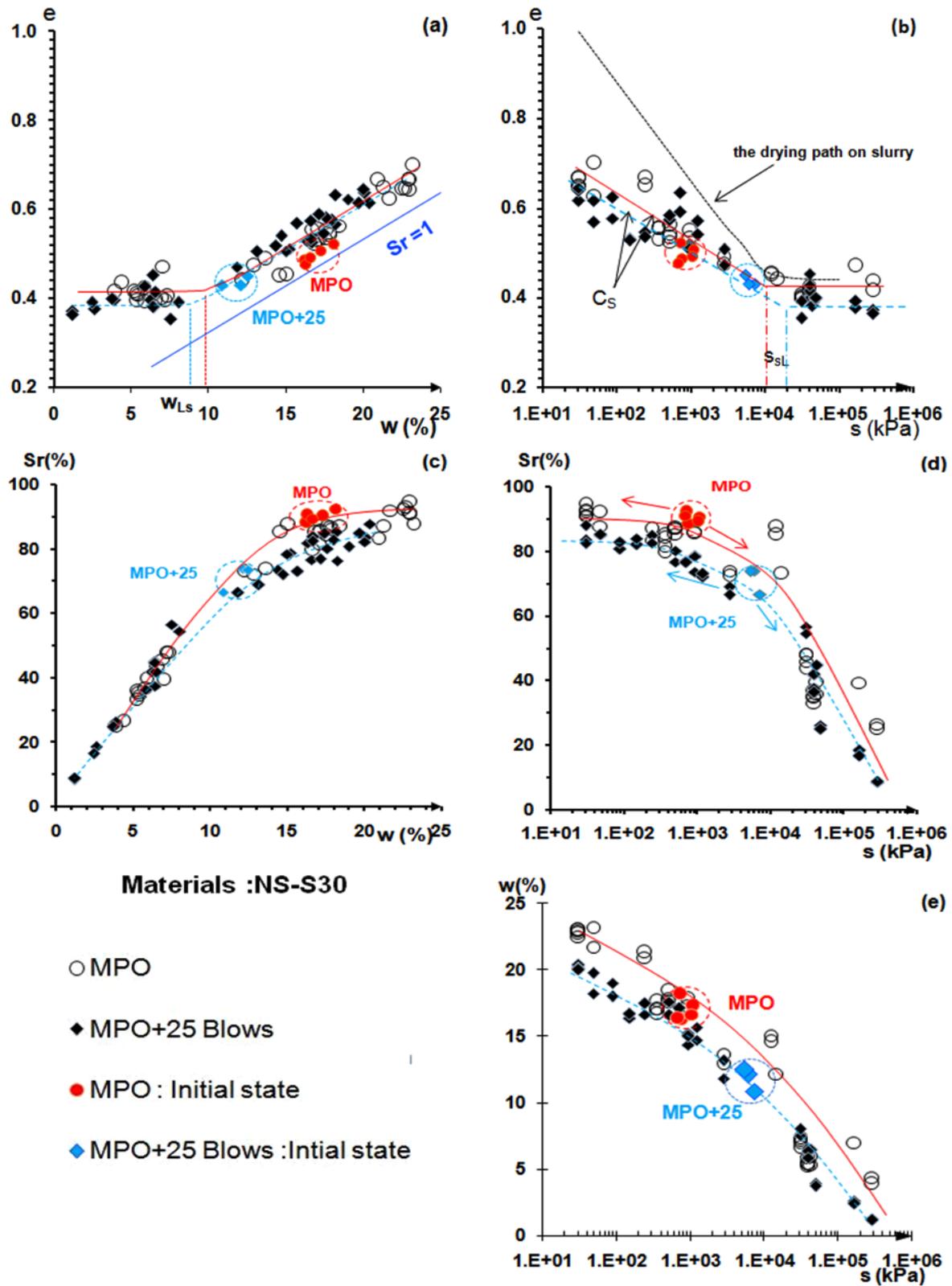


FIGURE 6.6 – Chemins de drainage-humidification du NS-S30 compactés à MPO et MPO+25 coups.

### 6.3.3 Variation des propriétés mécaniques avec la succion

#### 6.3.3.1 Introduction

Pour étudier l'effet de la succion, et donc de la teneur en eau sur les propriétés mécaniques du matériau compacté, des échantillons de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur, ont été initialement compactés à MPO+25coups ( $w_{MPO+25}$ ,  $\gamma_{d MPO+25}$ ). Ces échantillons sont ensuite séchés à l'air libre, de manière contrôlée pour atteindre différentes teneurs en eaux cibles. Lorsque la teneur en eau ciblée est atteinte, le module d'élasticité en petites déformations «noté  $E_{ss}$ » est mesuré en utilisant la technique de propagation des ondes ultrasonores (Pundit Lab). Ensuite, les échantillons sont soumis à des essais de compression simple avec une vitesse d'écrasement de 0.23 mm/min jusqu'à la rupture. La résistance à la compression simple (UCS) correspond à la contrainte à la rupture. A partir de la courbe contrainte-déformation obtenue, trois paramètres peuvent être déduits : la résistance (UCS), le module sécant  $E(\epsilon_1)$  et le module sécant moyen  $E_{50}$ . Ce dernier est défini pour un niveau de déformation  $\epsilon_{1(50)}$  correspondant à 50% de valeur de la résistance maximale [Taibi et al., 2009], (figure 6.7).

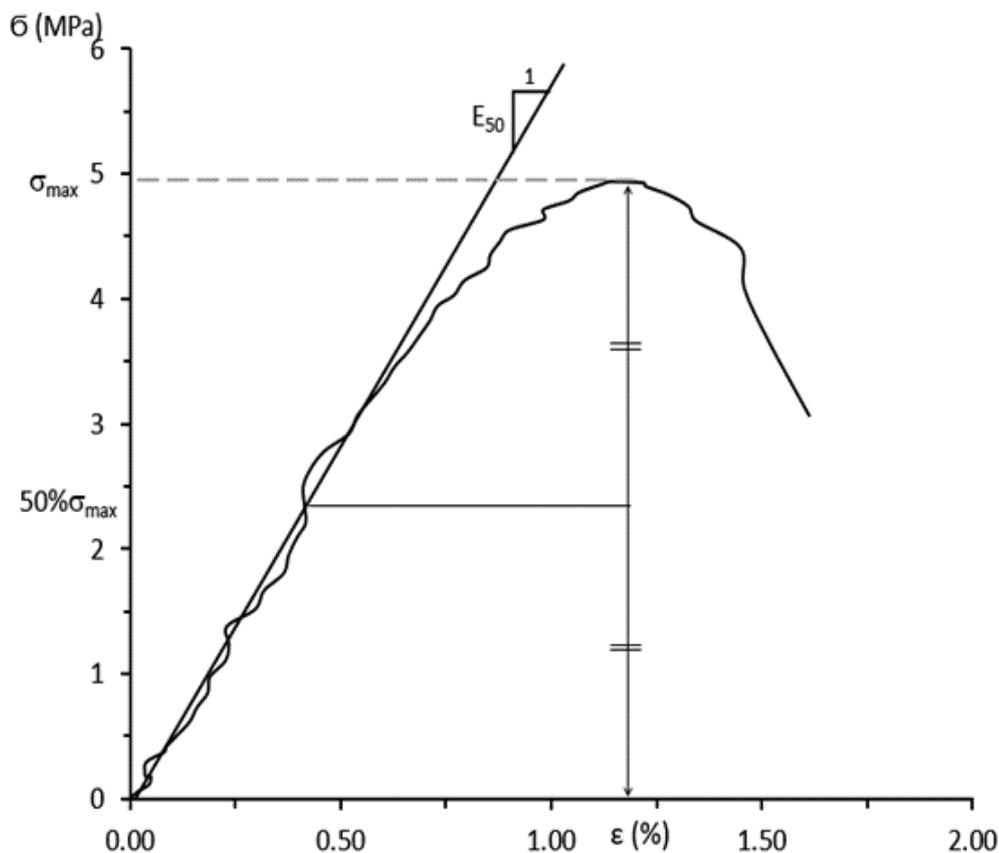


FIGURE 6.7 – Définition du module  $E_{50}$

Par ailleurs, on remarque que lorsque la teneur en eau est élevée, les échantillons présentent un comportement ductile, matérialisé par une courbe plus arrondie et un comportement post-pic relativement doux où la résistance chute très lentement avec la déformation, contrairement aux échantillons à faible teneur en eau où le comportement post-pic est de type fragile.

### 6.3.3.2 Effet de la teneur en eau sur la résistance à la compression simple UCS

Vingt essais de compression simple ont été réalisés afin de déterminer l'effet de la teneur en eau sur la résistance à la compression simple du matériau NS-S30 compacté à MPO+25 coups. La figure 6.8 montre une partie de ces mesures (9 essais/20). On remarque que pour les valeurs les plus élevées de la teneur en eau (8.6%, 11.2% et 13.6%), le pic de résistance est atteint pour une déformation d'environ 1.5%, alors que pour les teneurs en eau plus faibles, la déformation au pic est de l'ordre de 1.3%.

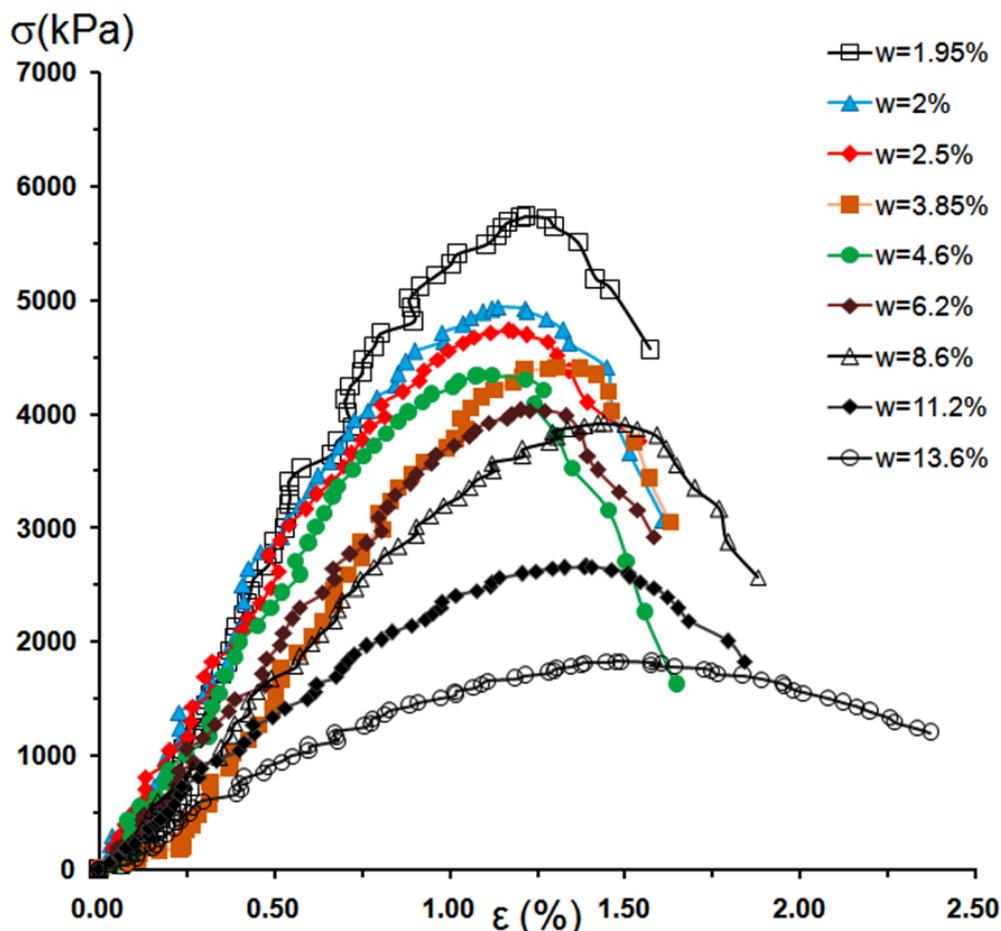


FIGURE 6.8 – Effet de la teneur en eau sur UCS du matériau NS-S30 compacté à MPO+25 coups.

Les valeurs de la résistance UCS sont ensuite tracées en fonction de leurs teneurs en eau, (figure 6.9(a)). On remarque, qu'aux erreurs de mesure près, la résistance à la compression simple varie linéairement avec la teneur en eau. La valeur de la résistance UCS augmente de 1.82 à 5.7 MPa, lorsque la teneur en eau varie de de 13.6% ( $W_{MPO+25}$ ) à 1.95% (teneur en eau résiduelle après séchage). En se basant sur la courbe de rétention du sol compacté à MPO+25 coups (figure 6.6(e)), les valeurs de succion correspondant à ces teneurs en eau peuvent être déduites. Les résistances à la compression simple UCS sont ainsi tracées en fonction de la succion, (figure 6.9(b)). Dans ce cas, la succion varie de de 2 MPa pour un UCS de 1.82 MPa (état MPO+25 coups) à environ 200 MPa pour un UCS de 5.7 MPa correspondant à l'état quasi-sec ( $w=1.95\%$ ). Ceci peut être expliqué par le fait que l'augmentation de la succion génère une augmentation de la cohésion capillaire due à l'augmentation des forces capillaires aux points de contact entre les particules pendant le séchage ([Taibi et al., 2009], [Taibi et al., 2013], [Genes and Alonso, 1992], [Gelard, 2005], [Delage and Cui, 2001]).

La variation de la résistance UCS en fonction de la succion présente cependant une plus grande dispersion des points expérimentaux que dans le cas de la teneur en eau. Une représentation dans un plan semi-logarithmique permet de proposer à titre indicatif une relation linéaire malgré un coefficient de corrélation faible.

Les relations UCS-teneur en eau-suction peuvent être décrites à l'aide des équations suivantes :

$$UCS = -0.27w + 5.47 \quad R^2 = 0.87 \quad (6.2)$$

Avec  $w$  en (%) et UCS (MPa)

$$UCS = -0.71 \ln(s) - 3.68 \quad R^2 = 0.69 \quad (6.3)$$

Avec  $s$  (kPa) et UCS (MPa)

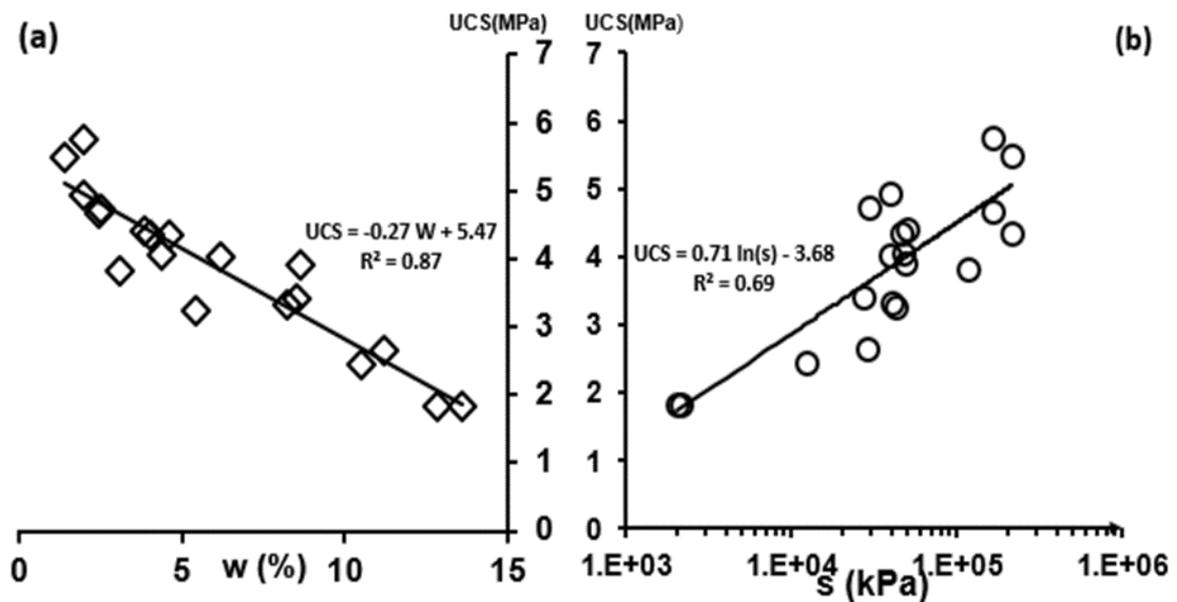


FIGURE 6.9 – La résistance UCS en fonction de la teneur en eau (a) et la succion (b)

### 6.3.3.3 Effet de la teneur en eau sur les modules en petites et grandes déformations

Les modules en petites déformations ( $E_{ss}$ ) sont déduits de la vitesse de propagation des ondes sonores, alors que les modules en grandes déformations  $E(\epsilon_1)$  et  $E_{50}$  sont déduits à partir des courbes contrainte-déformation des essais de compression simple. La figure 6.10 présente la variation du module sécant  $E(\epsilon_1)$  en fonction de la déformation axiale. Sur cette figure, nous faisons apparaître aussi le module  $E_{50}$  (cercles en pointillés). Ces courbes sont paramétrées en succion et en teneur en eau. On constate que quelle que soit la valeur de la teneur en eau, le module sécant suit un plateau jusqu'à une déformation axiale d'environ 1%, puis diminue fortement. En outre, pour une déformation donnée, le module sécant augmente avec la succion. Il convient de noter que le module  $E_{50}$  correspond, dans la plupart des cas, aux valeurs maximales du module sécant.

Si nous considérons l'évolution des modules d'élasticité en petites déformations  $E_{ss}$  et les modules en grandes déformations  $E_{50}$  en fonction de la teneur en eau ou de la succion, (figure 6.11), on note que les deux modules sont très sensibles à la variation de la teneur en eau (ou la succion), [Taibi et al., 2009], [Walter and Domenico, 2017a]. En effet, pour une variation de la teneur en eau d'environ  $\Delta w = 12\%$  correspondant à une variation de la succion de  $\Delta s = 2$  MPa, le module diminue d'un facteur de l'ordre de 2 à 3, variant de 3,8

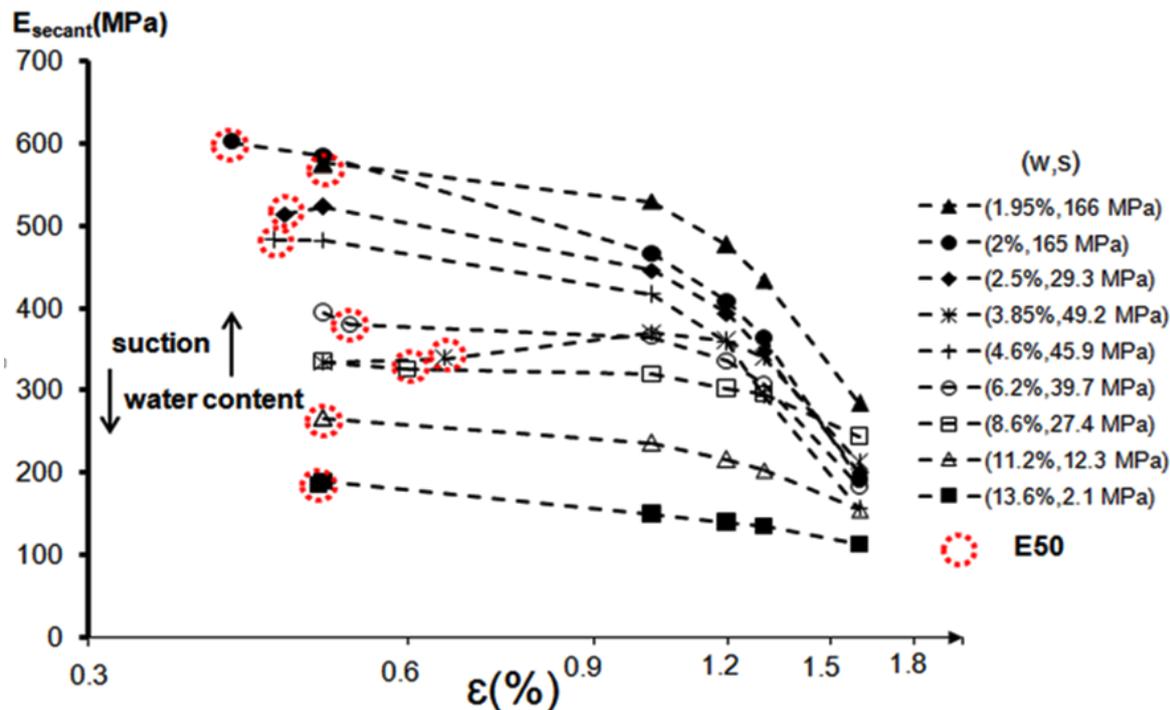


FIGURE 6.10 – la variation des modules sécants en fonction de déformation selon la teneur en eau et la succion

à 1,5 GPa pour le module en petite déformation ( $E_{ss}$ ) et de 0,6 à 0,2 GPa pour le module sécant ( $E_{50}$ ).

Il convient de noter que cette variation est plus grande dans le cas des modules en petites déformation  $E_{ss}$ , le rapport entre  $E_{ss}$  et  $E_{50}$  est de l'ordre de 10, pour une teneur en eau (ou succion) donnée. Comme dans le cas de UCS, des relations peuvent être établies entre le module, la teneur en eau et la succion comme suit :

$$E_{ss} = -0.15 \cdot w + 3.9 \quad \text{avec} \quad R^2 = 0.87 \quad (6.4)$$

$$E_{ss} = 0.43 \cdot \ln(s) - 1.59 \quad \text{avec} \quad R^2 = 0.75 \quad (6.5)$$

$$E_{50} = -0.029 \cdot w + 0.62 \quad \text{avec} \quad R^2 = 0.78 \quad (6.6)$$

$$E_{50} = 0.094 \cdot \ln(s) - 0.58 \quad \text{avec} \quad R^2 = 0.77 \quad (6.7)$$

Avec  $w$  (%);  $E$  (GPa) et  $s$ (kPa).

### 6.3.4 Relation entre la résistance UCS et les modules ( $E_{ss}$ , $E_{50}$ )

La figure 6.12 présente la variation des modules en petites déformations  $E_{ss}$  et les modules en grandes déformations  $E_{50}$  en fonction de la résistance UCS. Les deux modules augmentent avec la résistance à la compression simple. On peut raisonnablement décrire cette variation en utilisant une relation linéaire avec une pente plus raide dans le cas du module  $E_{ss}$ , comme suit :

$$E_{ss} = 0.53 \cdot UCS + 0.92 \quad \text{avec} \quad R^2 = 0.83 \quad (6.8)$$

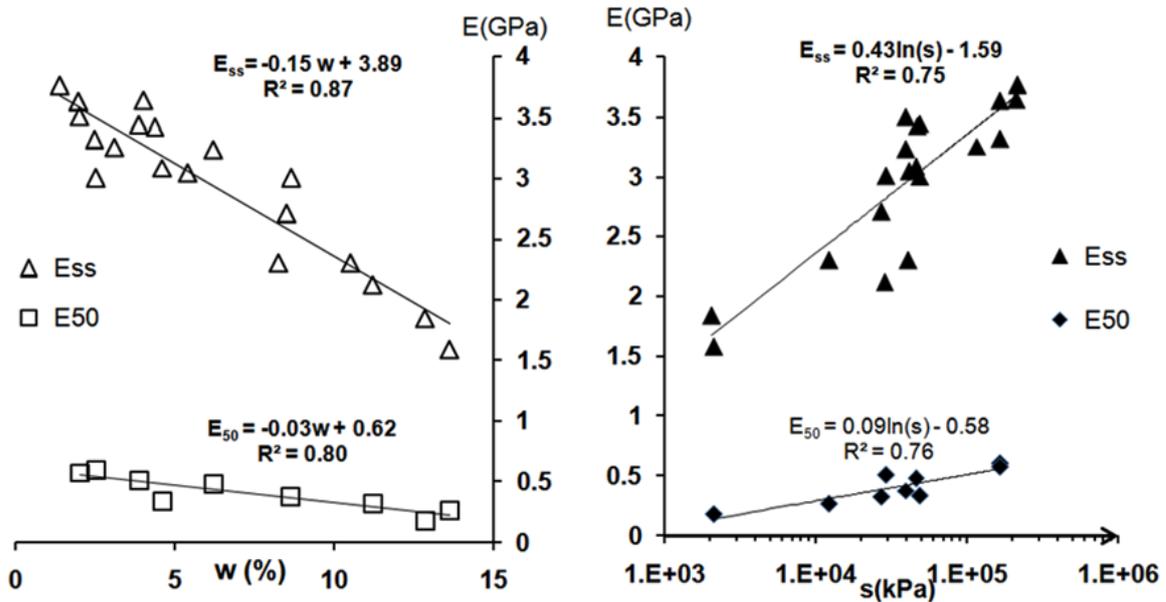


FIGURE 6.11 – la variation des modules en petite et grande déformations en fonction de la teneur en eau et la suction

$$E_{50} = 0.11 \cdot UCS - 0.04 \quad \text{avec} \quad R^2 = 0.82 \quad (6.9)$$

Avec E (GPa) et UCS (MPa).

Les relations ci-dessus démontrent l'effet du séchage sur l'évolution des modules en fonction de la résistance à la compression simple. Des relations similaires ont été établies dans la littérature pour des sols traités avec des liants, (tableau 6.4). Le module en grande déformation  $E_{50}$  varie linéairement avec la résistance UCS, le rapport  $E_{50}/UCS$  varie entre 30 et 200 selon les différents composants, la nature du sol et les différents liants utilisés.

## 6.4 Perméabilité à la vapeur d'eau

Une étude expérimentale a été effectuée sur le comportement hygrométrique de notre matériau. La démarche consiste à analyser à travers des essais de perméabilité à la vapeur d'eau, l'aptitude de ce matériau à diffuser et réguler l'hygrométrie. L'étude est réalisée sur des échantillons compactés à une énergie et une teneur en eau données, référencées par rapport à l'optimum Proctor modifié. Le BTC ciblé, nommé NS-S30, est constitué de 70% de sédiment de dragage et de 30% de sable local.

La galette NS-S30 de terre crue compactée à MPO+25coups se trouve ainsi soumise au niveau de ses faces inférieure et supérieure à un gradient d'humidité relative constant qui engendre un flux de vapeur d'eau de bas en haut ou inversement, à travers l'épaisseur de la galette (voir le détail de l'essai dans le chapitre 5, paragraphe 5.3.7).

La figure 6.13 présente la perte de masse du récipient-échantillon dans le cas d'un flux de vapeur ascendant en fonction de temps. On remarque en général une variation linéaire bien qu'au voisinage de l'origine des temps, on constate une légère déviation malgré le manque de points expérimentaux entre 0 et 24h. Cette petite non linéarité au début de l'essai correspond à un régime permanent non tout à fait instauré, autrement dit, cette phase correspond au régime transitoire du flux de vapeur d'eau. Après un temps de l'ordre de 24 h (faute de points de mesure avant ce temps), on remarque que la variation devient linéaire, ce qui correspond à un flux constant et un régime stationnaire installé. L'échan-

TABLEAU 6.4 – Courbes d’ajustement entre  $E_{50}$  et UCS [Dongxing et al., 2013]

Matériaux	Les fonctions	$R^2$	Sources
	$E_{50}$ , UCS (en MPa)		
Sols-ciment	$E_{50}=(100-200) \cdot UCS$	-	Tang et al. (2000) Heilli, (2000) et Qiao et al. (2007)
Sols pollués au zinc-ciment	$E_{50}=(30-60) \cdot UCS$	-	Wei et al. (2011)
Sédiments-ciment, de la chaux, cendres volantes	$E_{50}=(60-170) \cdot UCS$	-	Dongxing Wang et al. 2013
Sédiments-ciment	$E_{50}=167.3 \cdot UCS$	0.94	Zhu et al. (2005)
Sol pollué au plomb-ciment	$E_{50}=57.2 \cdot UCS + 57.2$	0.9179	Chen et al. (2010)
Sédiments-ciment, de la chaux, cendres volantes	$E_{50}=119.91 \cdot UCS$	0.8013	Dongxing Wang et al. 2013
Sédiments-sable NS-NS30	$E_{50}=110 \cdot UCS - 40$	0.82	Notre étude

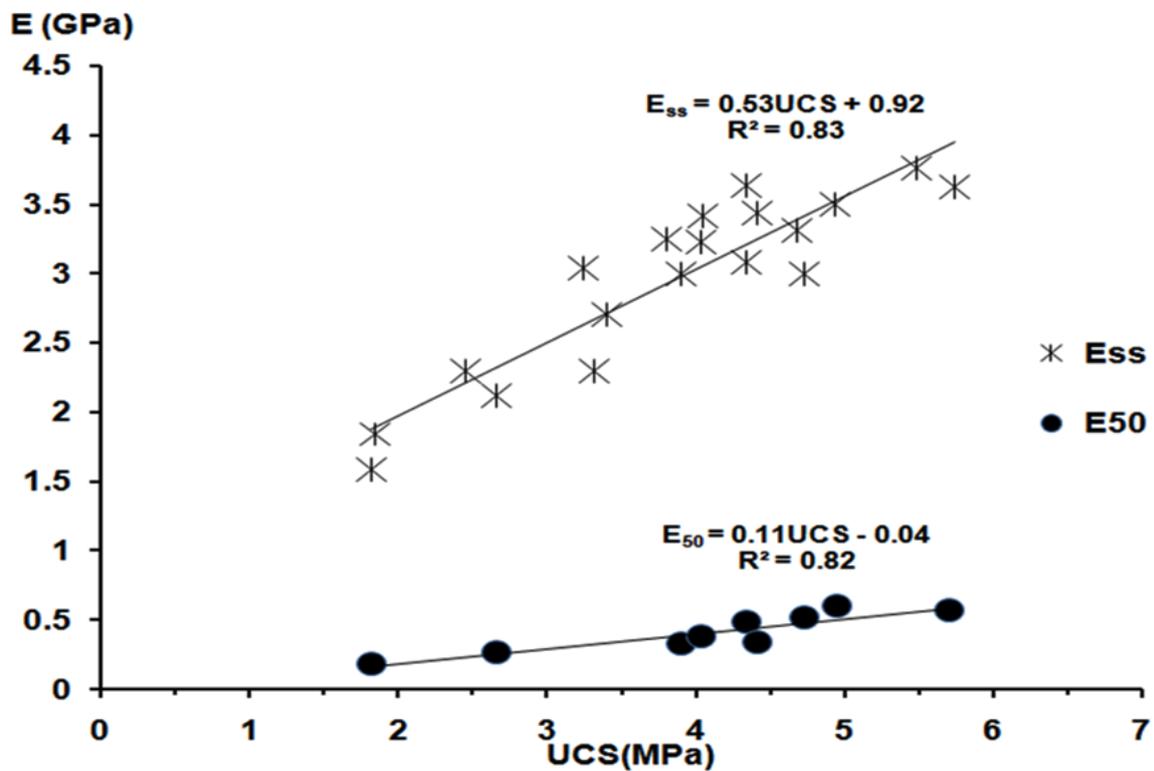


FIGURE 6.12 – variation des modules en petite et grande déformations en fonction de la résistance à la compression simple UCS.

tillon est en équilibre de phase avec les humidités imposées à l'extrémité de chacune de ses deux faces. La période transitoire étant relativement courte, ceci implique que l'état initial de l'échantillon était proche de celui de l'état d'équilibre.

La figure 6.13 présente le cas du flux descendant. On observe alors, contrairement au cas précédent, une augmentation de la masse du récipient-échantillon avec le temps puisque le flux de vapeur transite à travers l'échantillon du dessiccateur vers le récipient. Le régime transitoire du flux de vapeur d'eau, représenté par la branche non linéaire au voisinage de l'origine des temps dure environ 48h.

Cette durée est plus importante que dans le précédent cas et peut être expliquée par le fait que c'est le même échantillon qui a servi à ce second test en inversant les solutions salines du contenant, ce qui signifie que les états d'équilibre atteints lors du premier essai, respectivement sur les deux faces de la galette, doivent être rompus et s'inverser, ce qui nécessite, notamment dans le cas des transferts en phase vapeur, une durée plus longue pour atteindre ce nouvel état d'équilibre pour chacune des faces. Une fois ce dernier atteint, le régime stationnaire s'installe de nouveau et le flux devient constant.

La figure 6.14 présente l'évolution du coefficient de perméabilité incrémental à la vapeur en fonction du temps pour les deux sens de flux (ascendant et descendant). On remarque que dans les deux cas, les courbes décroissent et tendent vers un palier. La valeur au palier représente le coefficient de perméabilité déterminé en régime stationnaire.

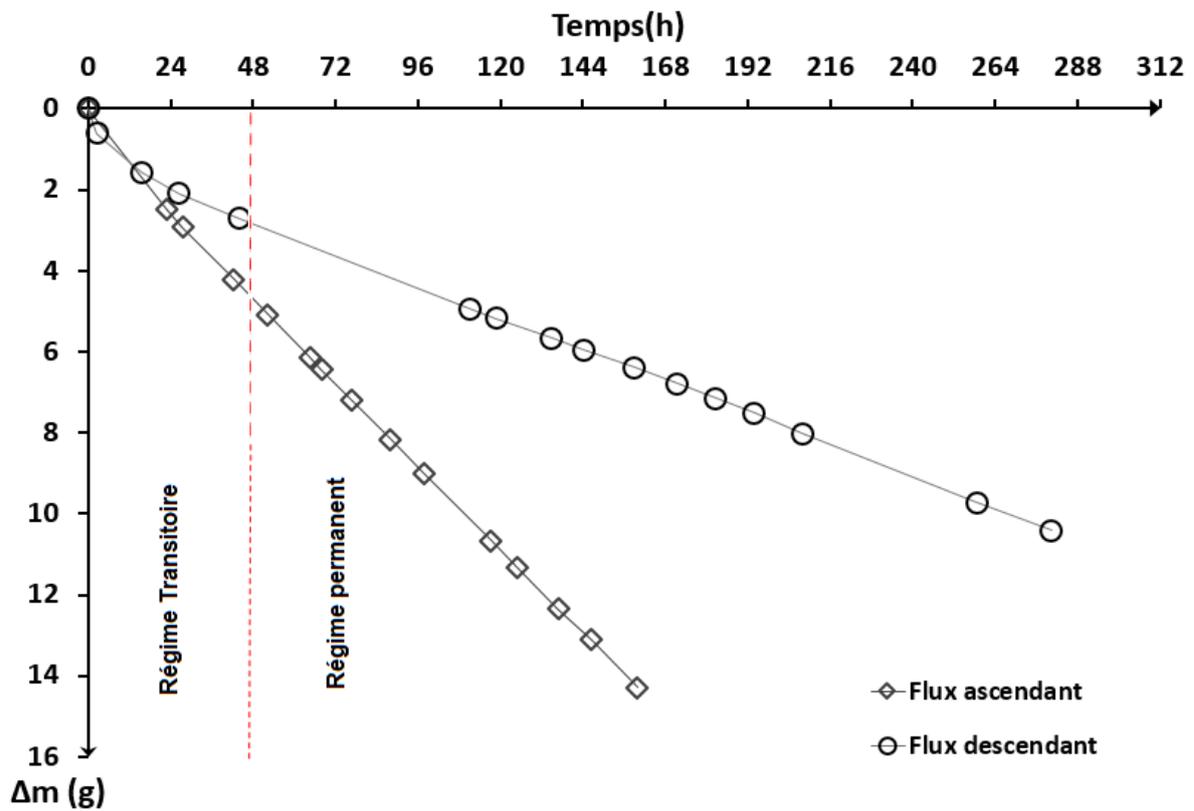


FIGURE 6.13 – la perte de masse du récipient-échantillon dans le cas d'un flux de vapeur ascendant et descendant en fonction de temps.

Le tableau 6.5 présente une synthèse des valeurs mesurées de la perméabilité à la vapeur d'eau. Aux erreurs de mesures près, les deux valeurs sont relativement proches. Mais il y a une petite différence entre les deux mesures (flux ascendant et descendant). En effet, les molécules de vapeur d'eau se déplacent du point où la pression partielle est la plus forte vers le point où elle est la plus faible afin d'homogénéiser le système et que le gra-

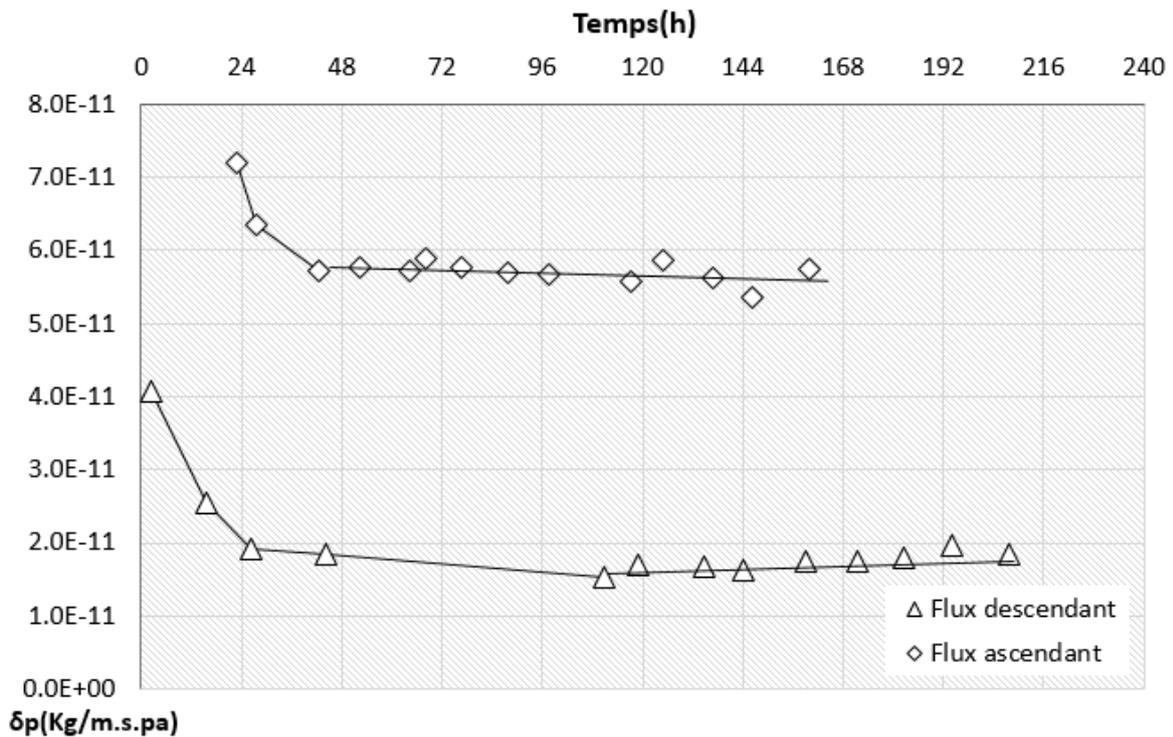


FIGURE 6.14 – Évolution du coefficient de perméabilité incrémental à la vapeur d’eau du matériau NS-S30 en fonction du temps.

dient de pression est homogène dans l’échantillon et égal à la différence de pression  $\Delta P$  mesurée à ses extrémités.

Dans le cas du flux descendant, les forces gravitaires viennent s’ajouter au gradient de succion imposé par le gradient d’humidité relative aux extrémités de l’échantillon, et par conséquent, on s’attend à un flux plus important et une perméabilité à la vapeur d’eau légèrement plus élevée par rapport au flux ascendant, où les forces gravitaires s’opposent aux forces de succion. Cependant, les résultats expérimentaux montrent le contraire.

TABEAU 6.5 – Résultats de la perméabilité à la vapeur d’eau du matériau NS-S30

N°	$\delta_p$ ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}$ )
Flux ascendant	$5.6 \times 10^{-11}$
Flux descendant	$1.7 \times 10^{-11}$

Notons qu’il s’agit de mesures réalisées sur une seule éprouvette, par conséquent, ce n’est pas suffisant pour tirer des conclusions définitives. D’autres essais de reproductibilité sont nécessaires pour confirmer ou non ces tendances. Ces essais complémentaires sont actuellement en cours.

Si on compare nos résultats avec ceux de la littérature, on constate que l’ordre de grandeur est tout à fait acceptable pour des briques en terre crue. En effet, [Dondi, 2003] ont mesuré ce coefficient de perméabilité sur des briques de terre crue de dix centimètres de diamètre et deux centimètres d’épaisseur. Ils ont trouvé des valeurs comprises entre  $0.3$  et  $1.3 \times 10^{-11}$  ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}$ ). Par ailleurs, [Aubert, 2013a] a trouvé des valeurs comprises entre  $0.7$  et  $2.8 \times 10^{-11}$  ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}$ ). On peut conclure que l’ordre de grandeur de  $10^{-11}$  ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}$ ) est celui qui caractérise les BTC.

## 6.5 Essais de durabilité du NS-S30

Les murs des constructions en terre sont toujours soumis à des sollicitations complexes avec le temps : hydromécaniques, physicochimiques et climatiques. Ces sollicitations contribuent à leur éventuelle détérioration. La pluie ou la neige représente un enjeu majeur à comprendre, à maîtriser et à endiguer. Reste à vérifier la durabilité de ce matériau liée à l'érosion de surface par le ruissellement de l'eau de pluie en particulier.

L'objectif de cette recherche est d'étudier la durabilité à l'érosion de surface des murs en brique de terre crue BTC réalisés avec le NS-S30 compacté à MPO+25 coups. Nous résumons les deux techniques expérimentales mises en œuvre au laboratoire L.O.M.C de l'université Le Havre Normandie (France), [Nguyen and Taibi \[2018\]](#)) pour tester l'érodabilité des géomatériaux. Par ailleurs, les résultats de ces deux méthodes sont comparés, et une classification de l'érodabilité selon les normes est présentée.

### 6.5.1 Érosion de surface

Pour étudier l'érosion de surface, nous avons retenu les deux méthodes « Essai Drip Test » et « Spray Test ». Le choix de ces dispositifs expérimentaux nécessite la connaissance de la pluviométrie de la région étudiée, et qui peut être très irrégulière et inégalement répartie dans l'espace. On s'est intéressé à la région en Algérie où la pluviométrie est la plus abondante. Il s'agit de la région de Jijel dans l'Est Algérien. Cette zone est caractérisée par des précipitations annuelles qui varient entre 400 et 1000 mm d'eau (source infoclimat.fr), (figures 6.15 (a) à (e)). Par ailleurs, [\[Mebarki, 2006\]](#)) a relevé une moyenne d'environ 904 mm par an.

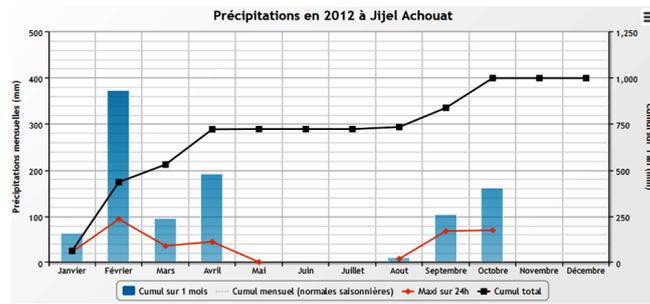
#### 6.5.1.1 Essai Drip Test

D'après les normes [\[Norme-NZS-4298, 1998\]](#), [\[Norme-SAZS-724, 2012\]](#), une mèche textile de 16 mm de largeur est utilisée pour créer des gouttes d'eau, le diamètre de la goutte d'eau est d'environ 6 mm avec le nombre de gouttes est d'environ 14 gouttes/min. En fonction du type de mèche utilisée, la quantité d'eau totale écoulée (volume) est de 100 ml, correspondant à un temps variant de 20 à 60 min. La hauteur de chute de 400 mm par rapport à la surface inclinée (27°) de l'échantillon, (figure 6.16), néanmoins, les caractéristiques de ces gouttes (fréquence et diamètre) sont impossibles à maîtriser car elles dépendent du type de mèche utilisée.

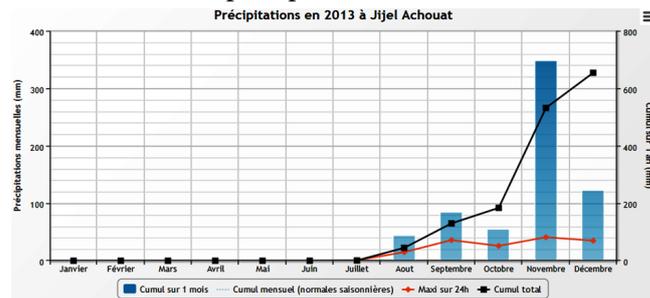
Au lieu d'utiliser une mèche, nous avons utilisé la méthode proposée par ([\[Weisz et al., 1995\]](#), [\[Heathcote, 2002\]](#), [\[Nguyen, 2014\]](#), [\[Nguyen, 2015\]](#)). Un réservoir composé d'une bonbonne inversée et équipée d'un robinet de précision, (figure 6.17(a)). Ce robinet fixé sur le bouchon fermé de la bonbonne permet de contrôler bien la fréquence et le diamètre des gouttes d'eau, (figure 6.17 (b)). Le diamètre des gouttes est contrôlé en jouant sur le diamètre de la tubulure connectée à ce robinet. Le réservoir est fixé sur un portique métallique au-dessus de l'échantillon à tester. La charge hydraulique est constante et imposée par le réservoir.

Pour contrôler le diamètre des gouttes d'eau désirée, nous avons utilisé un tube plastique souple de 4 à 5 cm de longueur avec différents diamètres. L'échantillon est placé sur un support à inclinaison réglable posé dans un bac en plastique à l'aval, (figure 6.17 (c)).

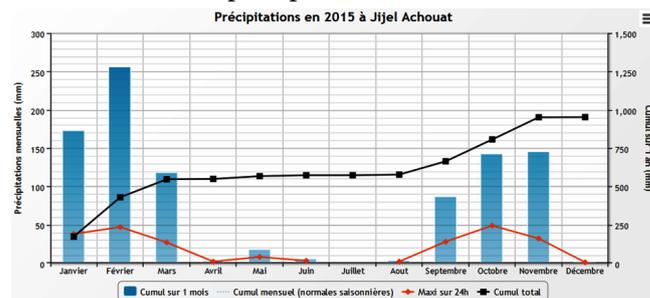
Lors de l'essai, la profondeur d'érosion provoquée par l'impact des gouttes sur la surface de l'échantillon est mesurée à l'aide d'un capteur laser (sans contact). Le schéma simplifié est présenté dans la figure 6.18. Pour valider ce dispositif d'essai, nous avons



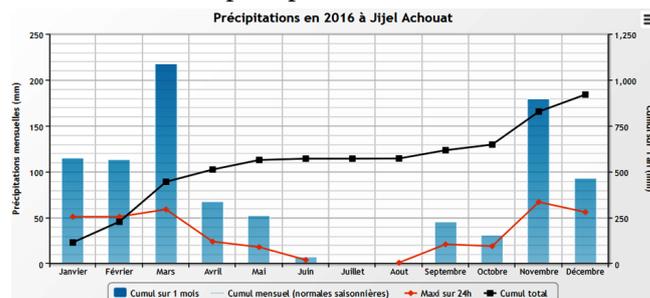
(a) précipitation en 2012



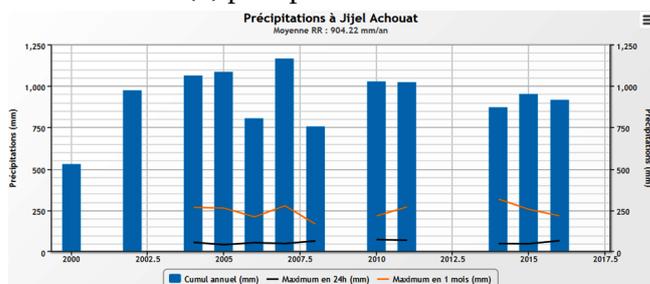
(b) précipitation en 2013



(c) précipitation en 2015



(d) précipitation en 2016



(e) précipitation entre 2000 et 2017

FIGURE 6.15 – Les précipitations de la région de Jjel-Est Algérien. (infoclimat.fr)

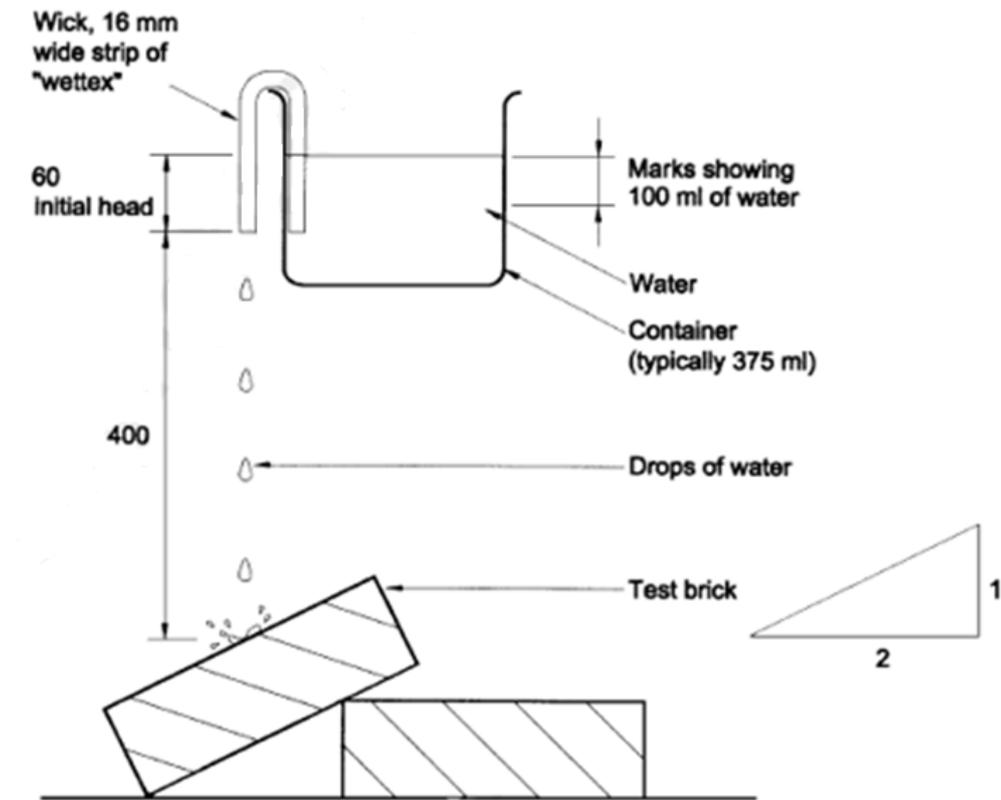


FIGURE 6.16 – Dispositif «Essai Drip Test» selon les normes [Norme-NZS-4298, 1998], [Norme-SAZS-724, 2012]

ajusté la fréquence des gouttes à 15 gouttes/min (en moyenne), afin de faire écouler 100 ml d'eau entre 20 à 60 min environ.

### 6.5.1.2 Mesure de la profondeur d'érosion des gouttes à l'aide d'un Laser

Le capteur de déplacement laser est un faisceau Laser de précision capable de détecter des déplacements allant jusqu'à (10 microns).

Le triangle optique est utilisé pour calculer la distance exacte ou l'épaisseur et les différences de niveau de surface entre le capteur et l'objet. Pour obtenir les meilleurs résultats en détectant les surfaces réfléchissantes, on doit incliner le capteur ou la surface de l'objet pour réduire la réflexion directe du laser

### 6.5.1.3 Étalonnage de capteur laser

Pour étalonner le capteur laser, nous avons fait des mesures d'étalonnage du capteur et nous les avons comparées avec celles de [Nguyen and Taibi, 2015], et aussi du fabricant du capteur. La figure 6.19 présente ces comparaisons. On observe que les points mesurés (points jaunes sur la figure) sont très proches des ceux de [Nguyen and Taibi, 2015] et du fabricant. La résolution de ce capteur laser est de 12.5mV (50  $\mu$  m) et sa distance appropriée à l'échantillon (échantillon-capteur laser) varie de 4cm à 12cm ( $\pm 10$ VDC).

### 6.5.1.4 Préparation des échantillons

En suite, l'échantillon est testé après l'avoir séché à température ambiante durant (24h) environ.



(a) Vue générale du dispositif



(b) Robinet de précision



(c) Échantillon sur son support réglable

FIGURE 6.17 – Dispositif «Essai Drip Test» développé Par L.O.M.C [Nguyen and Taibi, 2015]

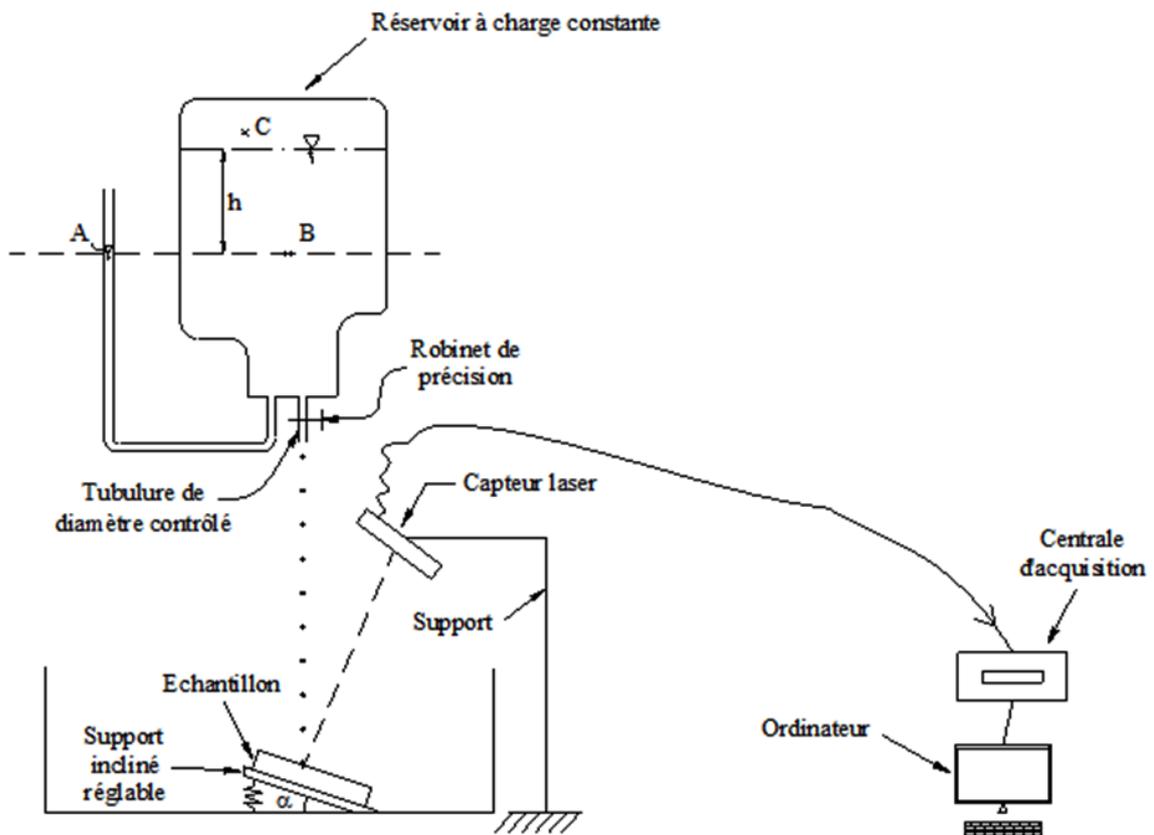


FIGURE 6.18 – Schéma du dispositif «Drip Test» développé, Nguyen and Taibi [2015]

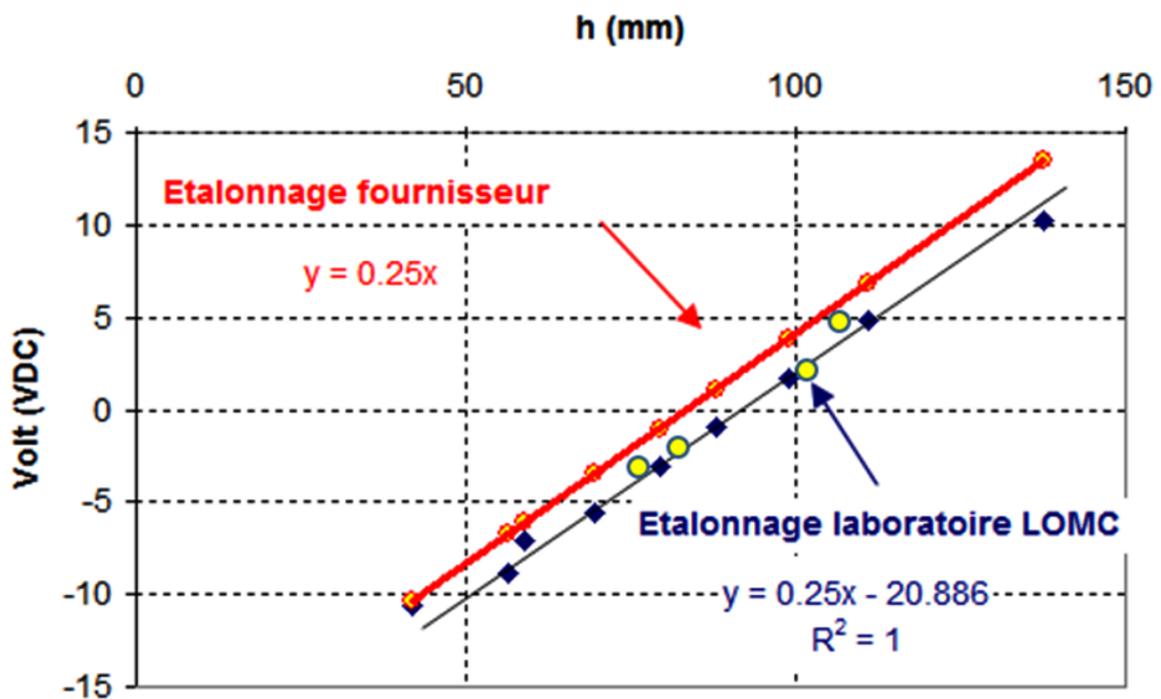


FIGURE 6.19 – Courbe d'étalonnage de capteur laser

Pour étudier l'érosion de surface du matériau compacté à l'aide de l'essai « Drip test », des échantillons de 4 cm d'épaisseur ont été initialement compactés à MPO+25 coups ( $W_{MPO+25} = 13.5\%$ ,  $\gamma_{MPO+25} = 19.1 \text{ kN/m}^3$ ) dans un moule Proctor Normal. Après la confection, les échantillons sont testés sur le support incliné à  $27^\circ$  soit :

- Immédiatement après le compactage
- Après un temps de repos à température ambiante de 24h00 enrobés dans du cellophane.

### 6.5.1.5 Mesure de la profondeur d'érosion

Au cours de l'essai, le goutte à goutte sur la surface de l'échantillon se traduit par le creusement d'une cavité. Le capteur laser permet de mesurer l'évolution de sa profondeur avec le temps, et ce avec une précision de l'ordre de 10 micron. Les données ont été enregistrées à l'aide d'une centrale d'acquisition

### 6.5.1.6 Résultats

La figure 6.20 présente les variations de la profondeur de creusement des cavités en fonction du temps, pour trois échantillons de NS-S30. Le premier échantillon correspond à un essai réalisé immédiatement après le compactage et les deux autres correspondant à des essais réalisés 24h00 après le compactage. On remarque pour la totalité des échantillons que durant les 20 premières minutes, le goutte à goutte n'a quasiment aucune incidence sur l'érosion de surface, les profondeurs mesurées restent très faibles, voire proches de zéro (figure 6.21). Cette période peut correspondre à une phase de saturation du matériau. Après cette phase, les échantillons sont érodés progressivement. L'évolution des profondeurs de creusement augmentent quasi-linéairement avec le temps pour atteindre des valeurs après une heure de temps, respectivement de 2.6 mm pour l'échantillon testé immédiatement après compactage (test 1), et de l'ordre de 1.6 à 2.2 mm pour les échantillons testés après 24h00 (test 2 et test3). Rappelons que selon la [Norme-NZS-4298 \[1998\]](#), une heure (1h) de temps d'écoulement de goutte à goutte correspond à 500 mm de précipitation par an [Heathcote \[2002\]](#).

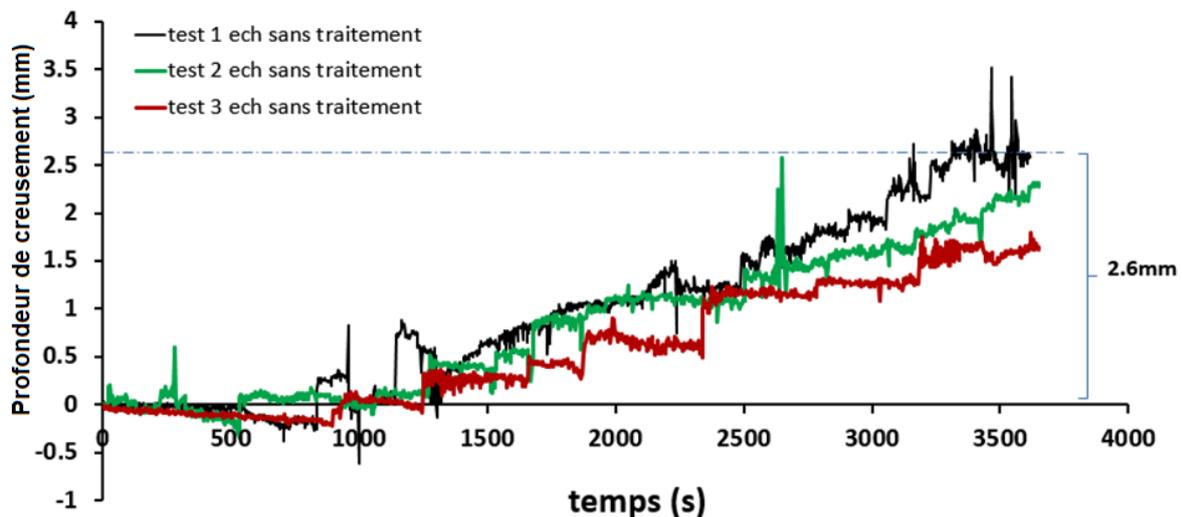


FIGURE 6.20 – évolution des profondeurs d'érosion du matériau NS-S30 en fonction de temps.

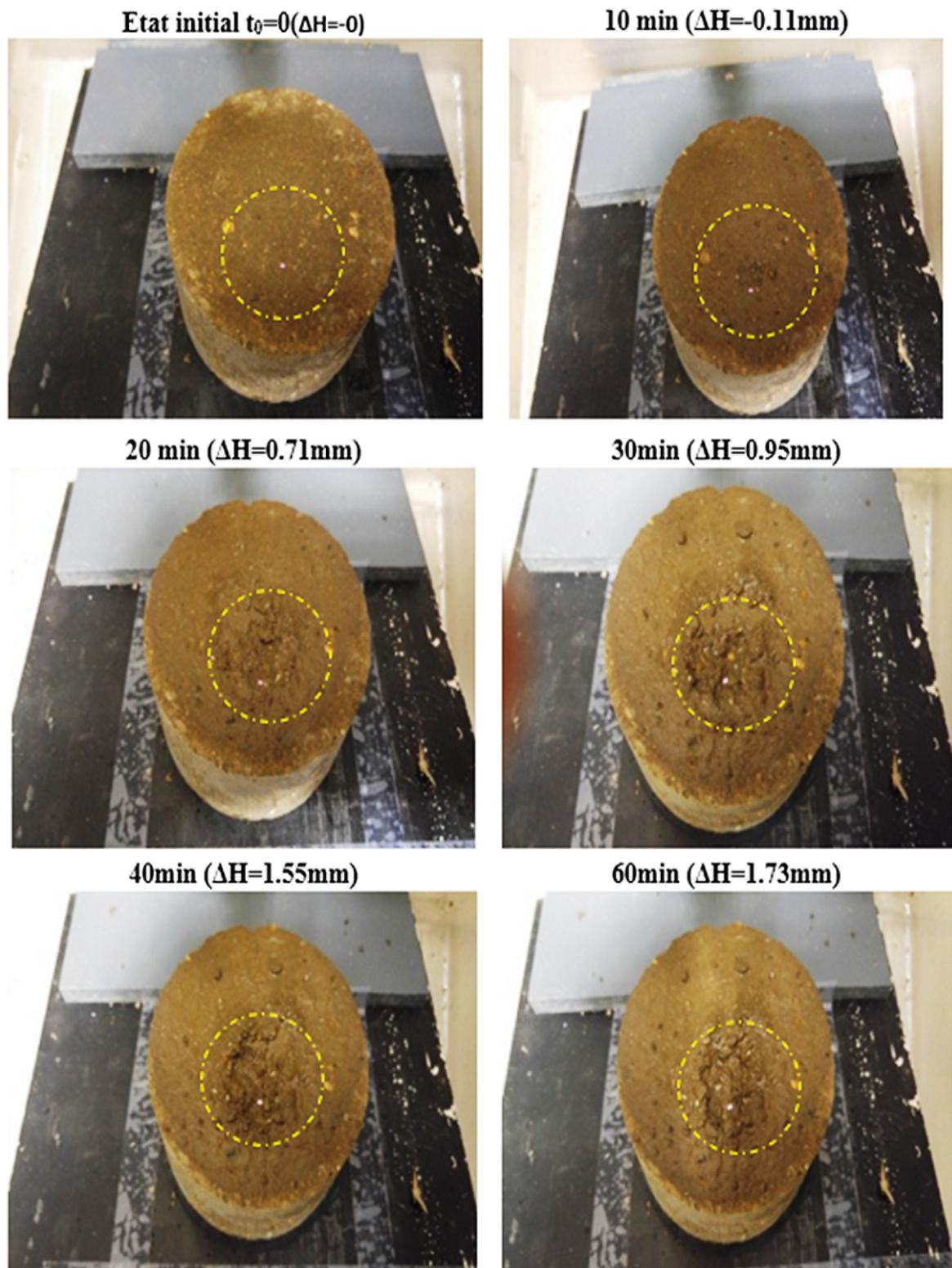


FIGURE 6.21 – Exemple des photos de l'évolution d'érosion en fonction du temps des gouttes de test 1.

TABLEAU 6.6 – Classification d'érodabilité du sol testé par Drip Test [Frencham, 1982], [Norme-NZS-4298, 1998], [Norme-SAZS-724, 2012].

Pit Depth(mm)	Erodibility index (D)
Erodibility index of 1 can only be determined by spray test	1
$0 < D < 5$	2
$5 \leq D < 10$	3
$10 \leq D < 15$	4
$D \geq 5$	5(Fail)

### 6.5.2 constat

Le Tableau 6.6 présente la classification de l'érodabilité de ces échantillons selon les normes [Norme-SAZS-724, 2012], [Norme-NZS-4298, 1998]. On remarque que l'indice d'érodabilité dans notre cas est de 2 car la profondeur d'érosion  $D$  est comprise entre  $0 < D < 5$  mm. Selon Frencham [1982], cet indice correspond à une érodabilité dite « faible ». Cependant, cet indice reste préjudiciable à la durabilité des BTC, et par conséquent cet érodabilité n'est pas acceptable, d'où la nécessité de l'empêcher. L'une des solutions qu'on propose est un léger traitement avec un liant, en l'occurrence de la chaux qu'on présente ci-dessous.

## 6.6 Traitement du NS-S30 au liant

Pour résoudre le problème de l'érodabilité du NS-S30, le matériau a été traité avec 3% de chaux, valeur maximale généralement recommandée. Les échantillons ont été préparés dans les mêmes conditions de compactage  $W_{MPO+25} = 13.5\%$ ,  $\gamma_{MPO+25} = 19.1 \text{ kN/m}^3$  et maturés pendant 2, 7, 14 et 28 jours. Après chaque durée de temps de cure, les échantillons ont été soumis à l'essai « Drip Test » durant 60 minutes.

La figure 6.22 présente les résultats comparant le comportement du matériau avec (test 4 à 7) et sans traitement (test 1 à 3) à la chaux.

On observe une grande différence entre le matériau avant et après traitement. Dans le cas du matériau traité, aucune érosion n'a été observée et ce, quelque soit le temps de cure (figure 6.23 et 6.24). Par conséquent, le matériau traité avec 3% de chaux présente un indice d'érodabilité de 1 ( $D=0$ ), ce qui nécessite selon la Norme-NZS-4298 [1998] de passer au "Spray Test" ou essai d'arrosage présenté ci-dessous.

### 6.6.0.1 Essai d'arrosage (Spray Test)

L'essai (Spray Test) a été réalisé selon le dispositif expérimental type de Nguyen and Taibi [2015] développé sur la base des normes [Norme-NZS-4298, 1998], [Norme-SAZS-724, 2012].

Ce dispositif est composé des éléments suivants (figure 6.25).

- une buse normalisée composée de 35 trous de 1.3 mm de diamètre en PVC,
- un tube en acier de 50 cm de long et de 12.2 mm de diamètre intérieur,
- un manodétendeur dont la réduction de pression varie de 0.5 bar à 15 bars,

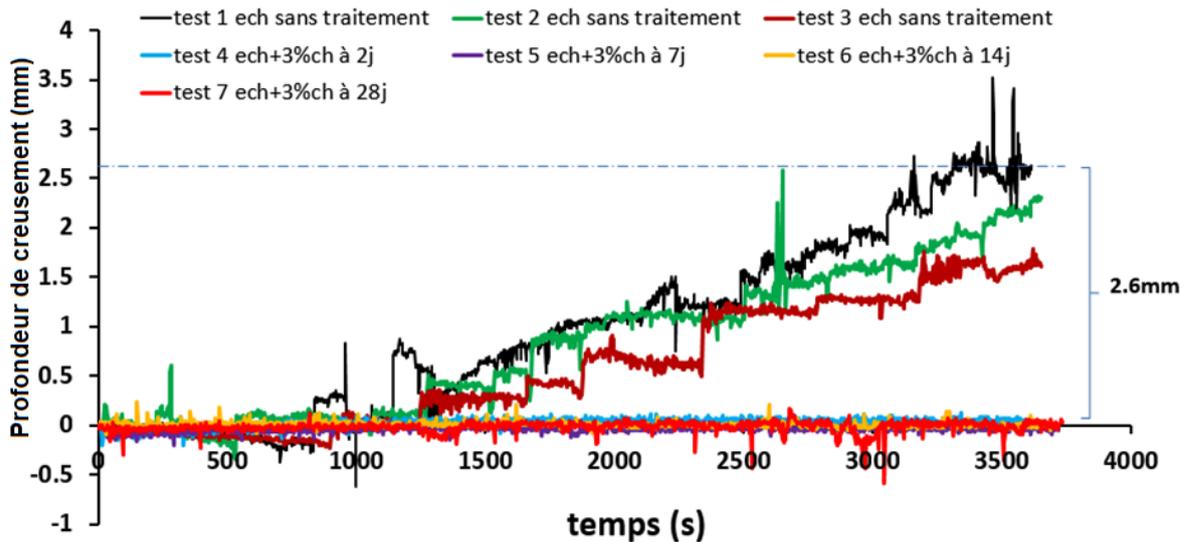


FIGURE 6.22 – Comparaison de l'évolution des profondeurs d'érosion du matériau NS-S30 avant et après traitement.

- une vanne pour contrôler la pression et le débit,
- un manomètre permettant de lire la pression à la sortie de la vanne,
- une pompe électrique dont la pression maximale est de 3 bars et le débit maximal est de 2650 l/h,
- L'échantillon est placé sur un trou de 150 mm de diamètre percée dans une plaque en bois pour délimiter la section de l'échantillon exposée au spray.
- La distance entre la buse et l'échantillon est de 470mm.

Nous avons réalisé (04) essais sur des échantillons compactés à une teneur en eau initiale  $W_{MPO+25} = 13.5\%$ ,  $\gamma_{MPO+25} = 19.1 \text{ kN/m}^3$  dans un moule CBR (152mm de diamètre, 125mm d'hauteur).

Trois tests sont effectués consécutivement pendant une heure (temps normalisé) sans interruption des jets. Le quatrième essai a été volontairement prolongé au-delà du temps normalisé jusqu'à 120 min, afin de confirmer la résistance à l'érosion de surface. Ensuite, si érosion il y a, les profondeurs des cavités seront mesurées à la fin des tests à l'aide d'un pied à coulisse. En se basant sur les données des précipitations les plus abondantes en Algérie, en l'occurrence celles de la région de Jijel (Est algérien), un essai de 60 min de « Spray test » correspond à environ 70 ans de précipitation de pluie.

La figure 6.28 présente les résultats à différents temps d'exposition au jet d'eau du spray test. Les essais ont été poursuivis durant 2 heures pour le 4eme échantillon.

Dans tous les cas, aucune érosion de surface n'a été observée. Seules les couches fines des bords de surface de quelques dixièmes de mm d'épaisseur ont été lessivées par le jet.

En conclusion, un traitement du NS-S30 avec 3% de chaux est suffisant pour garantir la durabilité du matériau vis-à-vis de l'érosion de surface liée au ruissellement des eaux pluviales.

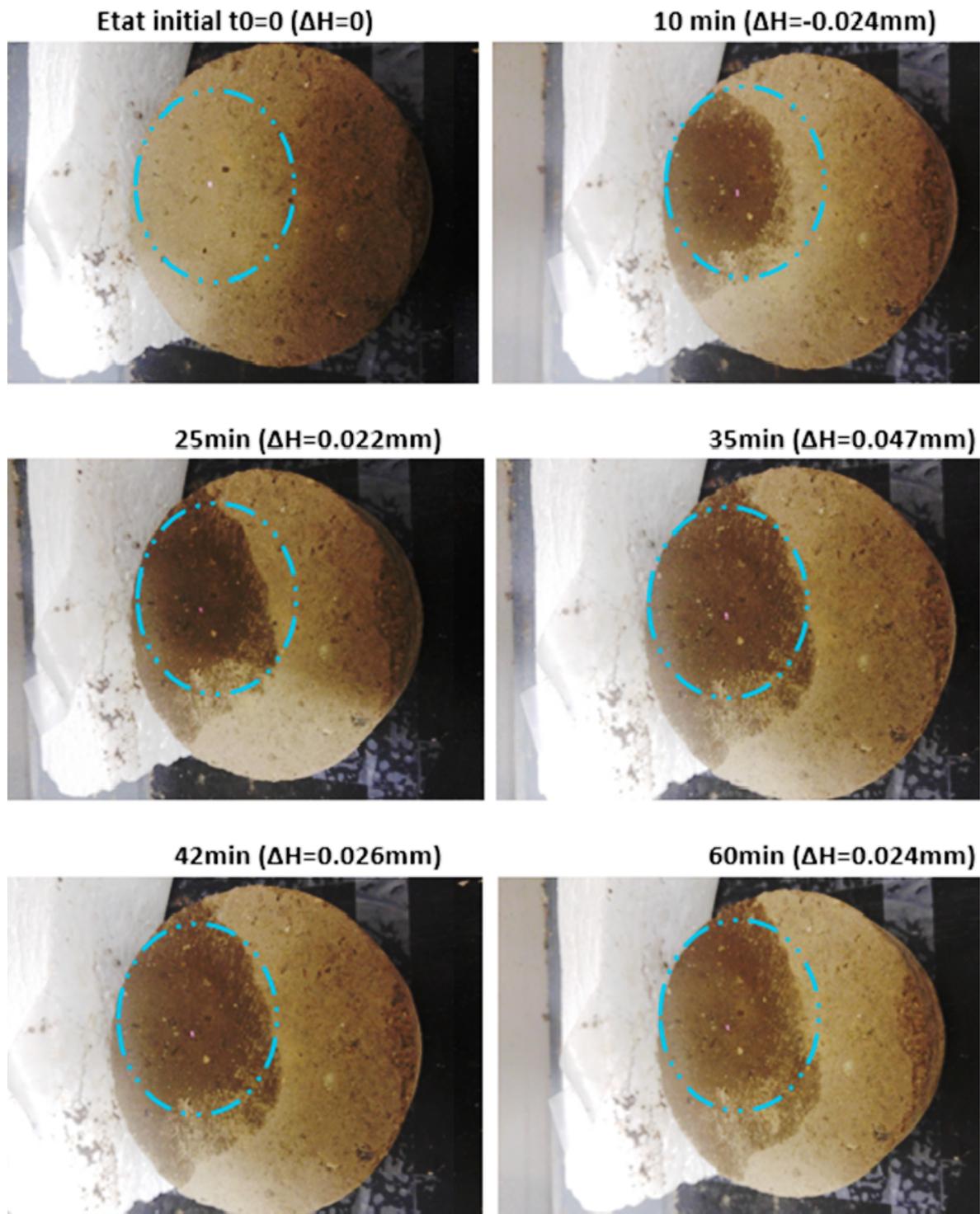


FIGURE 6.23 – Exemple des résultats de l'essai «Drip test » sur Ech+3%ch à 3j.

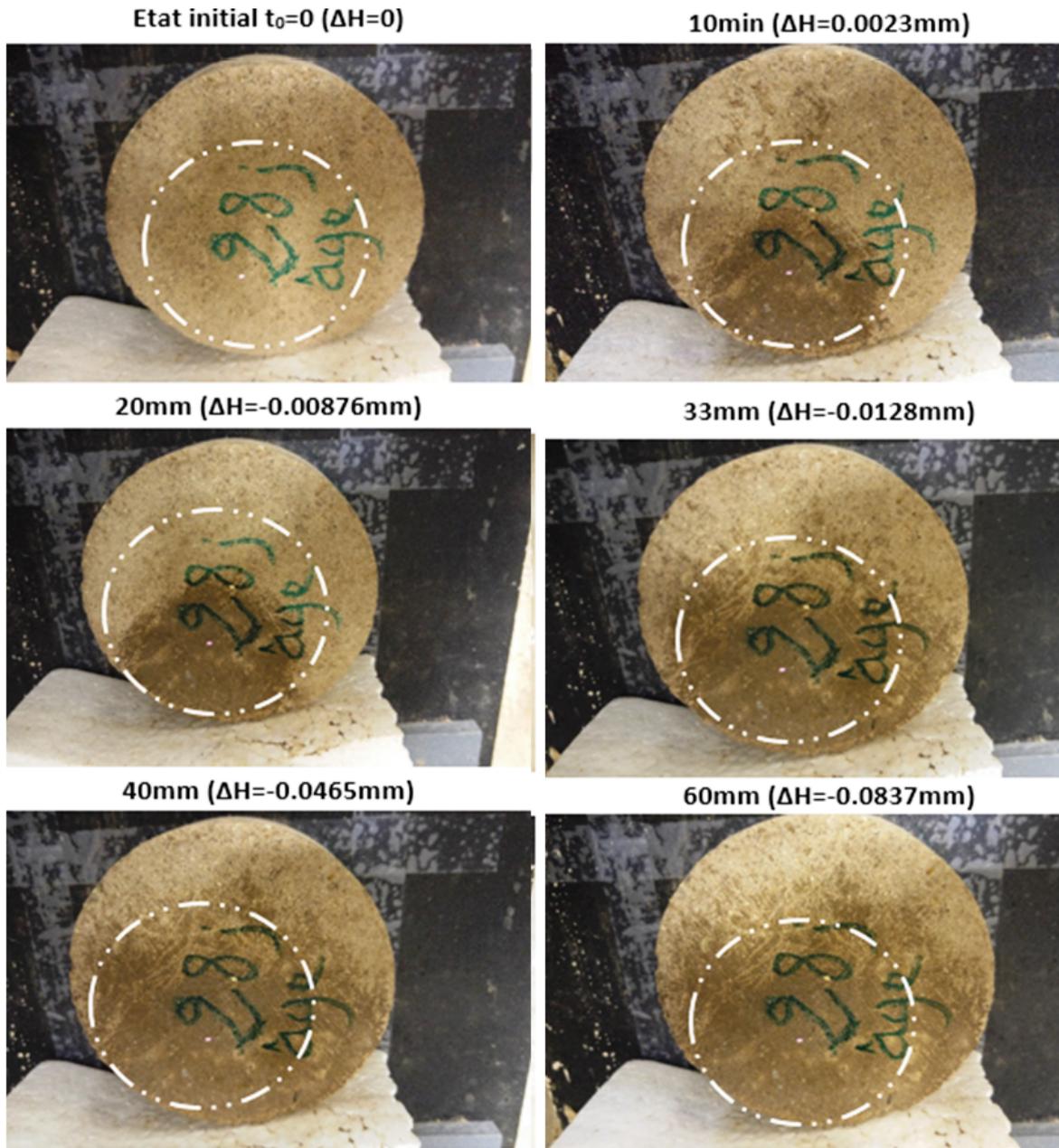


FIGURE 6.24 – Exemple des résultats de l'essai « Drip test » sur Ech+3%ch à 28j

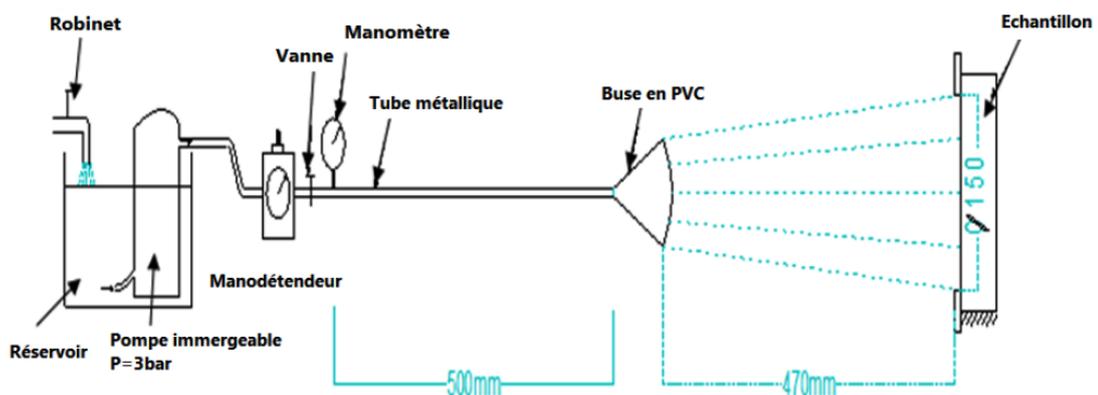


FIGURE 6.25 – Schéma du dispositif expérimental « Spray Test » type de [Nguyen and Taibi \[2015\]](#).

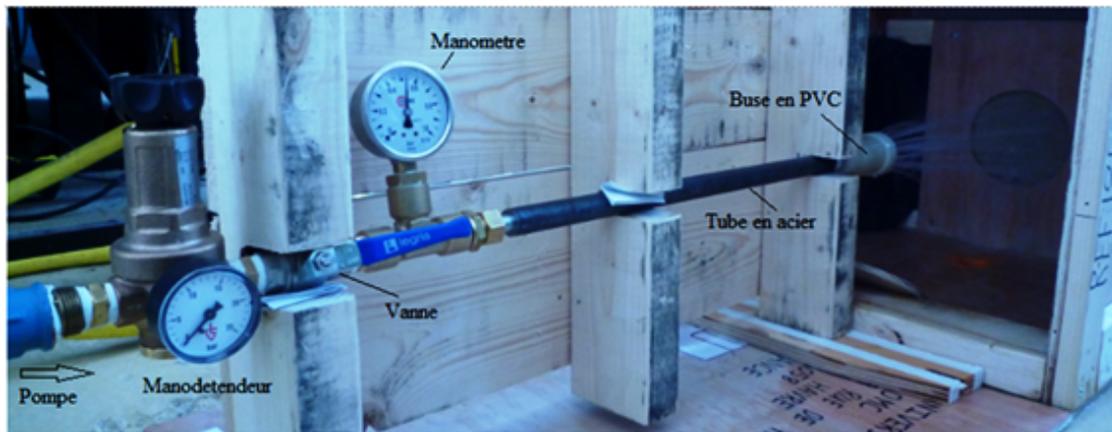


FIGURE 6.26 – Photo du Spray Test, contrôle de pression, buse normalisée en PVC, échantillon étudié

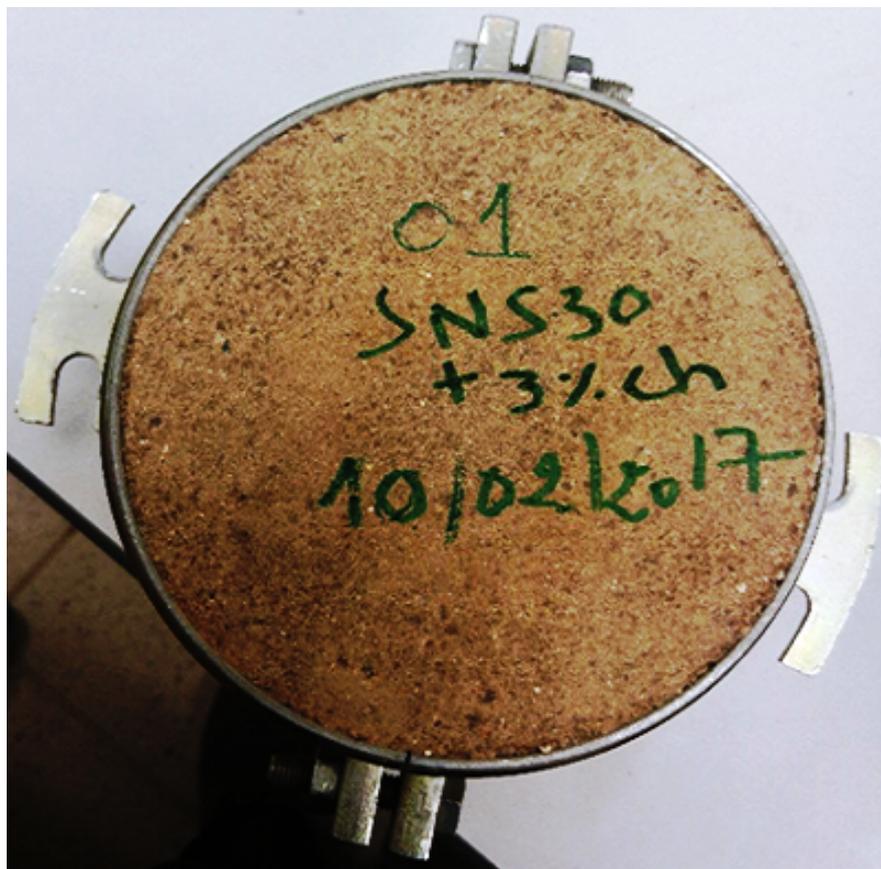


FIGURE 6.27 – Le matériau NS-S30 avant l'exposition au jet d'eau du spray test.



(a) après 60 min



(b) après 120 min

FIGURE 6.28 – Résultats de l'essai spray test du matériau NS-S30

## 6.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques du matériau NS en y incorporant une fraction granulaire de Sable 0/4. Nous avons constaté que les échantillons amendés avec 30% de sable (noté NS-S30), se positionnent de manière satisfaisante (à plus de 70%) par rapport au fuseau granulométrique normalisé recommandé pour les BTC selon la norme [Norme-NF-XP-P13-901, 2001]. L'avantage d'utilisation du matériau granulaire (sable 0/4) est sa disponibilité naturellement en grande quantité dans la région d'exploitation du gisement de sédiment naturel NS. Concernant, le critère de la plasticité, nous avons constaté que les limites d'Atterberg du NS-S30 sont positionnées dans le plan de Casagrande, à la frontière des fuseaux recommandés par les normes [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], les recommandations de CRATerre-EAG [1998] et MOPT [1992]. Ceci répond à ce critère et rend conforme l'utilisation du NS-S30 pour la confection des BTC. Les valeurs de résistance à la compression du NS-S30 compacté à MPO, varient de 0.63 à 0.72 MPa avec une valeur moyenne de 0.70 MPa. Ces résistances sont inférieures au seuil minimum recommandé par la norme [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], qui doit être supérieur ou égale à 1.6 MPa. Par conséquent, Il est nécessaire d'améliorer la résistance à la compression simple de notre matériau NS-S30. Pour cela, nous avons augmenté l'énergie de compactage au-delà de MPO, pour atteindre une énergie correspondante à MPO + 25 coups permettant d'atteindre une densité sèche de  $19.4 \text{ kN/m}^3$  et de vérifier la conformité en termes de résistance à la compression simple. En effet, ces résistances sont de l'ordre de 1.8 MPa (>1.6 MPa), et sont proches de celles trouvées par Bui [2008] (1.74 à 2.22 MPa sur des éprouvettes cylindriques) et P'kla [2002] (1.8 MPa pour les BTC).

Par ailleurs, dans le plan Proctor, les valeurs de couples ( $w$ ,  $\gamma_d$ ) du NS-S30 compacté à MPO + 25 coups sont positionnées dans le fuseau recommandé pour les BTC. Concernant l'effet de la teneur en eau, nous avons l'évolution de ces résistances UCS en fonction de la teneur en eau et de la succion. Cette résistance augmente de 1.82 à 5.7 MPa, lorsque la teneur en eau diminue de 13.6% ( $W_{\text{MPO}+25}$ ) à 1.95% (la teneur en eau résiduelle), correspondant respectivement à la variation de la succion de 2 MPa à environ de 200 MPa. Ceci peut être expliqué par le fait que l'augmentation de la succion génère une augmentation de la cohésion capillaire due à l'augmentation des forces capillaires entre les particules pendant le séchage.

Pour qualifier le matériau en termes de durabilité vis-à-vis de l'érosion de surface, nous avons montré que le traitement du matériau NS-S30 avec 3% de chaux était nécessaire pour satisfaire les normes en vigueur.

# Conclusion Générale et Perspectives

Le premier objectif de ce travail était d'établir une base de données relationnelle, capable de gérer les sédiments de dragage des barrages de l'ouest algérien et leurs caractéristiques à l'aide d'un système d'information géographique. Le second objectif est de tenter de valoriser ces sédiments comme éco-géomatériau de construction dans le domaine du bâtiment.

La réalisation du premier objectif implique un grand nombre de données et de variables de différentes sources. Ce qui nécessite une stratégie d'étude efficace basée, d'une part sur la connaissance du comportement du système de gestion de sédiments de dragage de l'ouest algérien et d'autre part, sur l'utilisation d'indicateurs appropriés pour l'évaluation des performances de fonctionnement du système. Cette stratégie permet aux gestionnaires et décideurs de prendre des décisions, argumentées et pertinentes. La récolte, la saisie, le stockage et la mise à jour des données représentent un travail considérable.

Les résultats ont permis d'établir un prototype du SIG proposant un ensemble d'interfaces graphiques (bassins versants, retenues des barrages, opérations de dragage, points de prélèvements, points des essais, domaines et choix de valorisation, etc.), où l'utilisateur sera guidé dans ses choix mais resterait libre dans ses décisions pour la création et représentation des cartes.

Cet outil du SIG Mapinfo a permis de mettre les données sous format numérique standard dans un écran d'ordinateur, pouvant être consulté et interrogé. Il s'agit des informations relatives aux sédiments de dragage (taux d'envasement, la quantité dévasée de chaque barrage, type de prélèvement, les caractéristiques physico-chimiques telles que les limites d'Atterberg, taux de matière organique et le domaine d'utilisation, etc.) permettant de donner une aide à la gestion et à la prise de décision dans les projets de valorisation.

La méthodologie proposée présente plusieurs avantages :

- Mettre les données sous format numérique.
- Visualiser l'ensemble des essais sur une carte
- Interpréter des informations à travers des cartes thématiques.
- Faire des recherches multicritères étendues basées sur de puissantes requêtes SQL et consulter les données rapidement.
- Mettre à jour en permanence et consulter en temps réel les données des essais.
- Aider à la gestion des données des sédiments dragués et à leur valorisation dans un domaine donné.

Pour toute analyse de ce système d'information géographique, nous estimons aujourd'hui un gisement de sédiments dragués au niveau du barrage de Bakhadda à environ 5 millions  $m^3$ .

Nous avons proposé par la suite une méthodologie pour valoriser ces sédiments dragués dans le domaine du BTP, et plus particulièrement en matériaux de construction par l'élaboration de BTC (Blocs de terre crue comprimée). Après avoir fait un état de l'art, nous avons décidé de nous intéresser aux caractéristiques suivantes :

- Dans un premier temps, l'identification du sédiment naturel NS et le positionnement de ses propriétés par rapport aux normes et recommandations de BTC (granulométrie, plasticité, compactage).
- Ensuite, les résistances mécaniques que nous avons limitées dans un premier temps à la résistance en compression UCS et sa comparaison avec la norme française [NF-XP-P13-901(2001)].

- Dans un second temps, il nous a paru important de quantifier les propriétés hygrométriques de ces matériaux : Chemins de drainage-humidification du sédiment étudié préparé sous forme de pâte et à l'état compacté à différentes énergies, variation des propriétés mécaniques avec la succion et l'effet de la teneur en eau sur le comportement mécanique ( ce qui permet ensuite de calculer d'autres caractéristiques telles que les modules en petites et grandes déformations ainsi que leurs variations en fonction de la résistance à la compression).
- Pour caractériser son pouvoir « respirant » et « régulateur », nous avons mesuré la perméabilité à la vapeur d'eau et la capacité à emmagasiner et à restituer de l'humidité en fonction des conditions aux limites internes et externes à l'ouvrage (effet d'inertie et de régulation hygrométrique), lorsque l'on parle de construction en terre crue non stabilisée.
- Enfin, l'étude de la durabilité à l'érosion de surface du matériau terre nécessaire pour permettre de rassurer les futurs utilisateurs à confectionner des briques de terre crue comprimée BTC durables vis-à-vis des agents atmosphériques comme le ruissellement d'eau pluviales.

Les résultats obtenus sur les sédiments naturels montrent que leurs propriétés en termes de granulométrie, densité, plasticité et résistance sont loin de satisfaire les normes et les recommandations concernant son aptitude à être utilisé comme matière première pour les BTC.

L'ajout d'une fraction sableuse à hauteur de 30% était nécessaire pour vérifier les recommandations et normes vis à vis de la résistance mécanique et la consistance du matériau. Pour atteindre ces objectifs, une énergie de compactage équivalente à MPO+25 coups était nécessaire. La résistance à la compression simple dans ces conditions est de l'ordre de 1.8 MPa, valeur acceptable vis à vis des normes actuelles.

L'effet de la teneur en eau et de la succion sur les propriétés mécaniques des BTC a été étudié à travers les essais de drainage-humidification. Ces chemins ont mis en évidence les paramètres pertinents pour le comportement hydro-mécanique des BTC comme la limite de retrait ou encore la succion de désaturation. Ainsi l'étude de l'effet de la teneur en eau et de la succion sur les modules en petites et en grandes déformations, et sur la résistance à la compression simple, a permis d'établir des relations de type linéaire pour la teneur en eau et semi-logarithmique pour la succion. La résistance à la compression simple a augmenté de 1.8 MPa à environ 5.7 MPa lorsque la teneur en eau varie de 13.6% à 1.95% correspondant à une variation de succion de 2 MPa à 200 MPa. Par ailleurs, le module E50 varie de 180 MPa à 600 MPa sur cette même plage de teneur en eau. Ceci a permis d'établir une relation linéaire entre UCS et les modules en petites et grandes déformations prenant en compte l'effet de la succion.

Comme perspectives, l'étape suivante consiste à réaliser un modèle physique à l'échelle 1 de structure en BTC basé sur les propriétés hydro-mécaniques mises en évidence dans cette étude, en vue de tester la durabilité et les propriétés hygro-thermiques. Ce modèle physique sera instrumenté à l'aide de capteurs de déformation et de thermo-hygrométrie afin de suivre sa réponse à des sollicitations fluctuantes, en analysant en particulier la réponse des joints entre les BTC. Par ailleurs, une réflexion pour une production semi-industrielle de ce BTC est nécessaire (type de presse, cadence, malaxage de la matière première, conditions de stockage et de mise en œuvre sur chantier...)

# Bibliographie

## A

- **Abdelbaki C.**, Modélisation d'un réseau d'AEP et contribution à sa gestion à l'aide d'un SIG - cas du groupement urbain de Tlemcen. Thèse de doctorat, 2014.
- **Abou-Bekr N.**, Modélisation du comportement mécanique et hydraulique des sols partiellement saturés. Thèse de doctorat, école centrale de Paris, 1995.
- **Adiba M., Collet C.**, Objets et bases de données le SGBD, traité des nouvelles technologies. Hermès, 1993.
- **Aitchinson G.D.**, Relationship of moisture stress and effective stress functions in unsaturated soils. Pore pressure and suction in soils. Butterworth, Londres, pages 47–52, 1961.
- **Alex D.**, Petit guide des architectures en pisé à Lyon. Mémoire de master, 2011.
- **Alexandre B. J., Miguel S., Maria da Gloria G.**, Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates, international journal of architectural heritage, taylor , francis, 2018.
- **Allal M. A., Boulsene M., Bouanani A., Benzenine F.**, Cartographie de l'aléa aux mouvements de pente, application à la commune de Bensekrane, Algérie. communi. sémi. univ. Guelma, Algérie, 2005.
- **Allinson D., Hall M.**, Humidity buffering using stabilized rammed earth materials. Construction Materials, 165 :335–344, 2012.
- **Alonso E., Pereira J., Vaunat J., Olivella S.**, A microstructurally based effective stress for unsaturated soils. Géotechnique, 12:913–925, 2010.
- **Alonso E., Gens A., Josa A.**, A constitutive model for partially saturated soils. Géotechnique, 40:405–430, 1990.
- **Alshihabi O.**, Etude en laboratoire du comportement d'un sol compacté non saturé: influence des cycles séchage-humidification. Thèse de doctorat, université des sciences et technologies de LILLE, 2002.
- **Ameur M.**, Contribution d'un système d'information géographique à la gestion d'une base de données géotechnique. Mémoire de magister : construction en génie civil, 2003.

- **Anger R.**, Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2011.
- **Aouad G., Laboudigue .A, Gineys N., Abriak N. E.**, Dredged sediments used as novel supply of raw material to produce Portland cement clinker. *Cement and Concrete Composites*, 34:788–793, 2012.
- **Arabi M.** Application de la gestion conservatrice de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols en Algérie. El Harrach (Algérie) : Institut national de la recherche forestière (INRF),
- **Arairo W.**, Influence des cycles hydriques de la dessiccation et de l'humidification sur le comportement hydromécanique des géo matériaux non saturés. Thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 2013.
- **ASTM-(D1557-D698)**, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ f t <sup>3</sup>(2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)) and Standard Effort (12,400 ft-lbf/ f t <sup>3</sup>(600 kN-m/m<sup>3</sup>)), 2012-2000.
- **ASTM-D5298**, Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. ASTM international, west Conshohocken, Pa, www.astm.org, 2010.
- **ASTM-D559.**, Wetting and Drying Test of Compacted Soil-Cement Mixtures, 1944.
- **Aubert J. E.**, Caractérisation des briques de terre crue de Midi-Pyrénées. Rapport final du projet TERCRUSO, 2013a.
- **Aubert J. E.**, Caractérisation des briques de terre crue de Midi-Pyrénées, 2013b.
- **Auger F.**, Altération des roches sous influence marine dégradation des pierres en œuvre, simulation accélérée en laboratoire, Doctorat d'état es-sciences, Université de Poitiers, 1987.
- **Aziz H.** Application de quelques traitements statistiques aux données hydro - chimiques de la nappe alluviale de la fosse de Sebdou (nord-ouest de l'Algérie), Mémoire de master, université de Tlemcen, 2014.
- **Azzouz S.**, Contribution à l'étude de la stabilité des argiles feuilletées en cours de forage, Thèse de Docteur Ingénieur, institut national des sciences appliquées, 1983.

## B

- **Badraoui. A. H.**, Envasement des retenues de barrages. *Revue la Houille Blanche*, (6/7) :72–75, 2001.

- **Bachi M.**, problématique du risque inondation en milieu urbain : cas de l'agglomération de sidi bel abbés, Mémoire de master, université de Tlemcen, 2011.
- **Bahar R., Benazzoug M., Kenai, S.**, Performance of compacted Cement-stabilized soil. *Cement and Concrete Composites*, 26:811–820, 2004.
- **Bear .J.**, Dynamics of fluids in porous media. Elsevier, Amsterdam. 1969.
- **Beckett C. , Augarde C.**, The effect of relative humidity and temperature on the unconfined compressive strength of rammed earth. *Unsaturated soils: Research and applications 1* springer, 2012.
- **Belas N., Belaribi O., Mebrouki A., bouhamou N.**, valorisation des sédiments de dragage dans les bétons, invaco2 : séminaire international, innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction n° : 1p-173, rabat – Maroc / 23-25 novembre 2011.
- **Benaissa A.**, valorisation des sédiments d'envasement du barrage de Fergoug. Application en Technique routière. Mémoire de magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Algérie, 2008, 112p.
- **Benchetrit M .** L'érosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement en Algérie. Paris : Presses universitaires de France. 1972.
- **Benchetrit M.**, les sols d'Algérie. *Revue de géographie alpine*, 44(4) :749–761. 1956.
- **Benouali H.**, La réglementation technique algérienne de construction avec les matériaux locaux. Conférence internationale ARChiterre-Algérie, Chercheur au CNERIB, 2015.
- **Benzenine F.**, Cartographie de l'aléa des mouvements de pente, application à la commune de Bensekrane, Mémoire. Ing. université de Tlemcen, Algérie, 2005.
- **Biarez. J. , Favre J.L.**, Parameters filing and statistical analysis of data in soil mechanics. *Proceedings 2nd International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering*, Aachen, Germany, 2 :249–264, 1975.
- **Biarez J., Fleureau J.M., Zerhouni M.I., Soepandji B.S.**, variations de volume des sols argileux lors de cycles de drainage-humidification. *Revue Française de Géotechnique*, 41 :63–71, 1987.
- **Bishop A.W. , Blight G.E.**, Some aspects of effective stress in saturated and unsaturated soils. *Géotechnique*, (3):177– 197, 1963.
- **Bishop A.W.**, tekniskukeblad. (39):859–863, 1959.

- **Boubekeur G.**, cartographie et zonage de l'aléa des zones exposées aux risques de mouvement de pentes, Magister en Génie Civil, université de Tlemcen, 2003.
- **Bouchetata A. , Bouchetata T.**, Propositions d'aménagement du sous-bassin-versant de l'oued Fergoug (Algérie) fragilisé par des épisodes de sécheresse et soumis à l'érosion hydrique, Article scientifique, Sécheresse ; 17 (3) : 415-24, 2006.
- **Bouchetata A.**, Cartographie des risques d'érosion hydrique des sols par l'utilisation du SIG « cas du sous-bassin-versant de l'oued Fergoug». Mémoire de Magister, Centre universitaire de Mascara, 2001.
- **Bourabah, M.A.**, Comportement mécanique des sols fins: Application à la valorisation des sédiments de barrages en technique routière, thèse doctorat, université Abou-bekr belkaid – Tlemcen, 2012.
- **Boutonnier L.**, comportement hydromécanique des sols fins proches de la saturation cas des ouvrages en terre : coefficient b, déformations instantanées et différées, retrait / gonflement. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2007.
- **Boutonnier L., Mahmutovic D., Andrianatrehina R., Branque D., Doanh T., Dubreucq T., Fleureau J.M., FRYJ.J., Hoang L., Pelizzari B., Taibi S., Salager S., Bufalo L., Gavois M.** Essais géotechniques de terrassement et succion : quelques renseignements pratiques. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, 2016.
- **Bouزيد A.**, L'expérience de la Tunisie dans la protection des sols et des barrages. Sem. Int. Sur l'érosion et l'envasement des barrages, Alger., 1991.
- **Brooks H.R., Corey A.T.**, Hydraulic properties of porous media. Hydrology paper, Colorado State University, Fort Collins., (3), 1964.
- **Bruno A.W., Gallipoli D.** Mechanical behaviour of hypercompacted earth for building construction. Materials and Structures, 50, 2017.
- **Bruno. A.W, Gallipoli D., Perlot C., Mendès J., and Salmon N.**, Briques de terre crue : procédure de compactage haute pression et influence sur les propriétés mécaniques. 33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet, 2015.
- **Bruno. A. W.**, Hygro-mechanical characterization of hyper compacted earth for building construction. Thèse, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2016.
- **Bui Q. B.** Stabilité des structures en pise : Durabilité, caractéristiques mécaniques, thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées - Lyon, 2008.

- **Bui Q. B., Morel J. C., Hans S., Walker P.** Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. *Construction and Building Materials*, 54:163–169, 2014.
- **Bui Q. B., Morel J. C., Reddy B. V. V., Ghayad W.**, Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering, *Building and Environment* 44 912–919, 2009.
- **Burroughs S.**, Recommendations for the selection, stabilization, and compaction of soil for rammed Earth wall construction. *J Green Build* ;5(1):101–14, 2010.
- **Burroughs S.**, Soil property criteria for rammed earth stabilization. *J Mater Civil Eng* 265–273. 10.1061/(ASCE)0899-1561, 20:3(264) ,2008.

## C

- **Carmen Jiménez Delgado M., Guerrero I.C.**, Earth building in Spain, *Construction and Building Materials* 20, 679–690, 2006.
- **Champiré F., Fabbri A., Jean, Claude Morel, Henry Wong, Fionn, and McGregor.** Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material. *Construction and Building Materials*, 110:70–78, 2016.
- **Comité de concertation Navigation (CCN) -Québec.** Document d’orientation sur la gestion intégrée du dragage sur le saint laurent, document de soutien à la stratégie de navigation durable du c.c.n Québec. Comité de concertation Navigation Québec, 2004.
- **Ciancio, D., Gibbings, J.** Experimental investigation on the compressive strength of cored and molded cement-stabilized rammed earth samples. *Construction and Building Materials*, 28:294–304, 2012.
- **Ciancio D., Beckett C., Carraro J. A.**, Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth, *Construction and Building Materials* 53 59–65, 2014.
- **Consoli, N. C. Prietto P. D. M., HarbCarraro, J. A. Karla Salvagni Heineck K. S.** Behavior of compacted soil-fly ash-carbide lime mixtures, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 127:774-782. 2001.
- **COUSSY O., FLEUREAU J. M.** . Mécanique des sols non saturés, editor hermès - Lavoisier. Hermès - Lavoisier., 2002.

- **Couvreur L.** Matière eau : développement de contenus pédagogiques pour le projet amàco. Mémoire du Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement Architecture de Terre DSA-Terre, Ecole nationale supérieure d'architecture de Grenoble, 2014.
- **CRATerre GATE.** Bloc de terre comprimée. Éléments de base. Eschborn, Allemagne, 28,1991.
- **CRATerre-EAG CDI:** Compressed earth blocks: Standards – technology series, Brussels: CDI, n 11. 1998.
- **Croney D., Coleman J.D., Black W.P.M.** The movement and distribution of water in soil in relation to highway design and performance. Highway research Board, Special Report, Washington, (40), 1958.
- **Cui Y. J., Delage P.** Yielding and plastic behavior of an unsaturated compacted silt. Géotechnique, 46(2) :291–311, 1996.
- **Cui Y. J.** Etude du comportement d'un limon compacté non saturé et de sa modélisation dans un cadre élasto-plastique. Thèse de doctorat, Ecole des Ponts et Chaussées, Paris., 1993.

## D

- **Dangermond D. , Maguire J..** The functionality of gis. in :Maguire d j, good child mf, rhind d weds. Geographical information systems:principles and applications. Longman, London,,1 :319–35, 1991.
- **Da Silva M. F. C. G.,** Compressed earth blocks with and without cementitious materials, 2015.
- **Deboucha, S. Hashim, R.** A review on bricks and stabilized compressed earth blocks. Scientific Research and Essays, 3 :499–506, 2011.
- **Delage P., Howat M. D., Cui Y. J..** The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. Revue Française de Géotechnique, 50, 1998.
- **Delage P., Suraj De Silva G.P.R, Vicol T.** Suction controlled testing of non-saturated soils with osmotic consolidometer. Proceedings 7th International Conference on Expansive Soils. 1992.
- **Delage. P. , Graham J.** The mechanical behavior of unsaturated soils. Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils Unsat95, 3 :1223–1256, 1995.

- **Delage P. , Cui Y. J.**. Comportement mécanique des sols non saturés. Technique de l'ingénieur, construction-Mécanique des sols et géotechnique, 2001.
- **Delage, P. Cui, Y.J.** L'eau dans les sols non saturés. Techniques de l'Ingénieur, 2000.
- **Delgado, M.C. J., Guerrero I. C.** The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. Construction and Building Materials, 21, 2007.
- **Derriche Z. , Lazzali F.**, Analyse des mécanismes de stabilisation d'un sol gonflant par apport de chaux sous différentes formes. Engineering Geology and the Environment, pp 79-84, 1997.
- **Denègre J., Salgé F.** Les systèmes d'information géographique, collection que-sais-je ? Presses Universitaires de France, 1996.
- **Dewulf M.** Le torchis, mode d'emploi ,deuxième édition. Éditions Eyrolles, www.editions-eyrolles.com, 2015.
- **Didier M., Bouveron C.** Guide économique et méthodologique des SIG. HERMES Science publication, 1993.
- **Dondi M.** Water vapor permeability of clay bricks. Construction and Building Materials, 17: 253–258, 2003.
- **Douaimi A., Benyoub M.**, cartographie et mise en valeur des calcaires récifaux de la région de SebaaChioukh - wilaya de Tlemcen, Mémoire de master, université de Tlemcen, 2015.
- **Durand J.** Les sols irrigables (étude pédologique). Dir. Hyd. et Eco Agr Alger, 190p, 1958.
- **Dysli M.** Cycle post grade : Géologie appliquée à l'ingénierie et l'environnement bb2 : mécanique des sols. 1997.

## E

- **Edil .T, Sabri M.** Laboratory evaluation of soil suction components.ASTM INTERNATIONAL, 7, 1984.
- **ElFgaier F., Lafhaj Z., Chapiseau C.**Use of clay bricks incorporating treated river sediments in a demonstrative building: Case study. Construction and Building Materials, 48:160–165, 2013.

- **ElFgaier. F., Lafhaj Z., Brachelet F., Antczak E.** Thermal performance of unfired clay bricks used in construction in the north of France: Case study. *Case Studies in Construction Materials*, 3 :102–111, 2015.
- **Escario. V., Saez J.** The shear strength of partly saturated soils. *Géotechnique*, 36(3):453–456, 1986.

## F

- **Fick. A Ueber diffusion.** *annalen der physik*. Leipzig, 94 :59–86, 1855.
- **Fitzmaurice. R.** Manual on stabilized soil construction for housing. Fitzmaurice, Technical Assistance Program, United Nations, 1958.
- **Fleureau, J. M., Siba Kheirbek S., , Soemitro R., Taibi S.** Behavior of clayey soil on drying-wetting paths. *Canadian geotechnical journal*, pages 287–296,1993.
- **Fleureau, J., M., Verbrugge, J. C., Huergo P. J., Correia, A. G., Siba Kheirbek S.** Aspects of the behavior of compacted clayey soils on drying and wetting paths. *Can. Geotech.* 2012,
- **Fredlund M. D., Wilson W. G., Fredlund D. G.** Use of grain-size functions in unsaturated soil mechanics. Edited by D.S. Charles, L.H. Sandra and C. Nien-Yin. ASCE., 2000.
- **Fredlund. D.G. , Rahardjo H.** Soil mechanics for unsaturated soils. John Willey inter science Publication and Sons, New York., 1993.
- **Fredlund. D.G, Xing A., Huang S.** Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical journal*, 31(3) :521–532, 1994.
- **Frencham. G.J,** The performance of earth buildings. Deakin University, Geelong, 1982.

## G

- **Galati. S.** Geographic information systems. Artech house publisher, 2006.

- **Gallipoli D. Bruno A. W. Perlot C. Salmon N.** Raw earth construction: is there a role for unsaturated soil mechanics? , Taylor et Francis group, 2014.
- **Gelard. D. Fontaine L. Maximilien S. Olagnon C. Laurent J.P., Houben H. Van Damme H..** Water and the cohesion mechanism of earthen materials. towards an optimum water content for earthquake resistance, in : Bilge isik (ed.), living in earthen. Cities, Proceedings of Kerpic'05Istanbul TechnicalUniversity., page 106–115, 2005.
- **Gelard. D. Fontaine L. Maximilien S. Olagnon C. Laurent J.P. Houben H. H. Van Damme H.** When physics revisits earth construction: recent advances in the understanding of the cohesion mechanism of earthen materials, in :B.v. venkataramareddy. International SymposiumonEarthen Structures, InterlinePublishing, Bangalore, India., page 294–302, 2007.
- **Gelard D.** Identification et caractérisation de la cohésion interne du matériau terre dans ses conditions naturelles de conservation. Thèse de doctorat institut national Polytechnique de GRENOBLE, 2005.
- **Genes. A. Alonso E.E.** A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. FF, 1992.
- **Ghomari F.** Matériau en terre crue compactée : amélioration de sa durabilité à l'eau. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences appliquées de Lyon France, 1989.
- **Giraud J. Pamart P. Riverain J.,** niveaux mots dans le vent. Larousse, PARIS, 1974.
- **Goodchild M. Kemp K.** NCGIA Core Curriculum in GIS, National center for geographic information and analysis, University of California, Santa, Barbara, <http://www.geog.ubc.ca/courses/klink/gis.notes/ngia/toc.html>, 1990
- **Guessas H.,** Maintenance du barrage de Bouhanifia par une analyse morpho-sédimentaire de l'affluent principal. Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran Algérie, 132p, 2013.
- **Gras. J.-P.** Approche micromécanique de la capillarité dans les milieux granulaires : rétention d'eau et comportement mécanique. Docteur de l'université Montpellier2, 2013.

- **GTS** : Guide technique-LCPC. Traitement des sols à la chaux et/ou aux liantes hydrauliques applications à la réalisation des remblais et des couches de forme. 2000.
- **Guérif J.** Compactage d'un massif d'agrégat : effet de la teneur en eau et de la pression appliquée. *Agronomie*, 2 :287–294, 1982.
- **Guettala A., Houari H., mezghiche B. Chebili R.**, 2002, durability of lime stabilized earth blocks, *Courrier du Savoir – N°02*, pp. 61-66, Juin 2002.
- **Guettala A., Abibsi A., Houari H.**, Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure, *Construction and Building Materials* 20 119–127, 2006.
- **Guillaud H, Thierry J. Pascal O.** Compressed earth blocks : Manual of desing and construction. *Manual of design and construction*, 1985.
- **Gupta R.** Characterizing material properties of cement-stabilized rammed earth to construct sustainable insulated walls. *Case Studies in Construction Materials*, page 60–68, 2014.

## H

- **Hall M.R Allinson D..** Evaporative drying in stabilized compressed earth materials using unsaturated flow theory. *Building and Environment*, (45) :509–518, 2010.
- **Hall. M. R. Allinson D.** Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilized rammed earth materials. *Building and Environment*, 44 :1935–1942, 2009.
- **Hallouche. W. Remini B.**Prévision de l'envasement dans les barrages du Maghreb. *Larhyss Journal, Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface*, (04) :69–80, 2005.
- **Harbit M.Y.**, patrimoine en pisé : étude et modélisation, mémoire de magister en génie civil , université de Tlemcen, 2005.
- **Heathcote K.A.** Durability of earth wall building. *Construction and Building Materials*, 9:185–189, 1995.
- **Heathcote K. A.** An investigation into the erodibility of earth wall units. A thesis submitted in fulfillment of the requirements For the degree of Doctor of Philosophy, University of Technology Sydney, 2002.

- **Hibouche. A.** Sols traités aux liants : Performances hydro mécaniques et hydro thermiques application en BTP. Thèse de doctorat, Université du Havre, 2013.
- **Houben H. Guillaud H.** Earth construction: A comprehensive guide. U.S.A: Intermediate technology publications. University of Michigan, 1994.
- **Houben H. Guillaud H.** Traite de construction en terre. Parenthèses, 2006 (3eme Edition), 2006.
- **Houboun. H. Guillaud H.** Traité de construction en terre. (2ed) Parenthèses, 1995.
- **Houdaille F.** Mesure du coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'atmosphère et du coefficient de frottement de la vapeur d'eau. Thèse Science, Paris, 1895.
- **H.P.O,** Étude du schéma directeur d'assainissement des eaux usées et pluviales de la ville de Saïda, Rapport d'étude, wilaya de Saïda. 1995.
- **Hydrodragage C.T.Systems.** Rapport technique barrage BAKHADDA Levés Bathymétriques des Barrages en exploitation Lots II Et III Echelon Cheliff et Centre, ANBT-Algérieédition, 2005.

## I

- **Izemmouren O. et Guettala S.,** Mechanical Properties and Durability of Limeand Natural Pozzolana Stabilized Steam-Cured Compressed Earth Bloc., Geotech Geol Eng , 33:1321–1333, 2015.

## J

- **Jaquin P. A.** Analysis of historic rammed earth construction. Doctoral thesis, Durham theses, Durham University, 2008.
- **Jaquin P. Augarde C.** Earth building-history-science and conservation. Bracknell : IHS BRE press, 2012.
- **Jaquin P.A, Augarde C.E Gallipoli D. Toll D.G.** The strength of unstabilized rammed earth materials. Géotechnique, 59(5) :487–490, 2009. 118
- **Jaquin P.A. Augarde C.E. Legrand L.** Unsaturated characteristics of rammed earth. In First European Conference on Unsaturated Soils, Durham, England, 2008.

- **Jayasinghe .C Kamaladasa N.** Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls. *Construction and Building Materials*, 21:1971–1976, 2007.
- **Jennings. J.B.** A revised effective stress law for use in the prediction of the behaviour of unsaturated soils. *Pore pressure and suction in soils*. Butterworths, Londres, pages 26–30, 1961.

## K

- **Kamali, S, Fabrice B., Abriak, N. Degrugilliers P.** Marine dredged sediments as new materials resource for road construction. *Waste Management*, 28 :919–928, 2008.
- **Kassiff. G BenShalom A.** Experimental relationship between swell pressure and suction. *Géotechnique*, 21: 245–255, 1971.
- **Kassoul M. , Abdelgader A. et Belorgey M.,** Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie, *Érudit Revues, Revue des sciences de l'eau* Volume 10, numéro 3, p. 279-414, 1997.
- **Kay. B.D.** Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Advances in Soil Science*, 12:1–41, 1990.
- **Khalidi A.,** Impacte de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaire de l'Ouest algérien "Monts de Tlemcen- Saïda" , Thèse de doctorat d'état, Université d'Oran. 2005.
- **Khalili. N., Geiser F. Blight G. E.** Effective stress in unsaturated soils : Review with new evidence. *International journal of Geomechanics*, 4(2) :115–126, 2004.
- **Kohgo. Y.** Elastoplastic models for unsaturated soils with two suction effects and unsaturated soil behaviour. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils UNSAT'02*, Recife, Brazil, 10–13 March. Edited by J.F.T. Juca, T.M.P. de C Edited by J.F.T. Juca, T.M.P. de Campos, and F.A.MMarinho. Swets et Zeitlinger, Lisse., 2002.
- **Koliji. A.** Mechanical behaviour of unsaturated aggregated soils. Thèse de doctorat Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2008.
- **Kouri L.** L'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de l'Oued Mina Algérie. Étude des processus et types fonctionnels de ravins. Thèse de doctorat, université Louis Pasteur Strasbourg. 1993.

- **Koussa. C.** Implantation d'un système d'information géographique 3d sur internet pour la gestion des modèles urbains. Thèse de doctorat université de strasbourg, 2011.
- **Krafft Curnel and Minne.** Association royale des ingénieurs issus de la fusagx. BULLETIN, 32, 2005.
- **Krahn. J. Frendlund D.G.** On total, matric and osmotic suction. Soil science copyright 1972 by the williams and wilkins co . in USA, 1971.

## L

- **Labani A.,** Contribution à l'évaluation et à lacartographie de la sensibilité à l'érosion hydrique des sols du sousbassin versant de l'oued de saida(ouest de l'algérie),European Scientific Journal September 2014 edition vol.10, No.27 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431
- **Labiod Z., Remini B., Belaredj M.,** Traitement de la vase du barrage de bouhanifia en vue de sa valorisation, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 03, pp.7-12, Juin 2004.
- **Lafhaj, Z., Samara M., Agostini F., Boucard L., Skoczylas F., Depelsenaire G.** Polluted river sediments from the north region of France: Treatment with Novosol process and valorization in clay bricks. Construction and Building Materials, 22 :755–762, 2008.
- **Lassouani A.** cartographie de l'aléa sismique application à la commune de bensekrane (w. Tlemcen), mémoire de magister, université de Tlemcen, 2007.
- **Laurent. J.P.** Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaires : optimisation d'outils de mesure « in-situ » des paramètres thermiques, application à l'étude des propriétés thermiques du matériau terre. Thèse de doctorat, Grenoble INPG, 1986.
- **LeMoigne. J.L,** Théorie du système général, théorie de la modélisation, presses universitaires de France, paris. Presses Universitaires de France, Paris, 1977.
- **Leroux A.,** Détermination de l'altérabilité des marines, Congres de Géologie, Madrid. Session II, volume I, page 84-90, 1978.
- **Leong. E.C. Rahardjo H..** Permeability functions for unsaturated soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(12), 1997. 81

- **LI X. L.** Comportement hydromécanique des sols fins: de l'état saturé à l'état non saturé. Thèse de doctorat, Université de Liège, 1999. iv, 65, 86
- **LI Z.M.** Compressibility and collapsibility of compacted unsaturated loessial soils. Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soil (UNSAT'95), Paris, ALONSON E.E. et DELAGE P, 1 :139–144, 1995. v, 89, 91
- **LI. Z. S.** The study of the hydro-mechanical properties of unsaturated clayey soils close to saturation, these de Doctorat. Thèse de doctorat, Ecole centrale des arts et manufactures « Ecole centrale de Paris », 2015.

## M

- **Magnan. J. P.** L'eau dans le sol. Technique de l'ingénieur C212, 2015.
- **Maniatidis V. Walker P.** A review of rammed earth construction. Innovation project “developing rammed earth for uk housing”. Natural Building Technology Group, Department of Architecture and Civil Engineering, University of Bath, 2003.
- **Mariotti M.**, Programme expérimental sur badigeons de protection des murs en béton de terre, Proceeding symposium Nairobi ,Sect .V, Kenya, 402-415, 1983.
- **Matthieu D., Taibi S., Fleureau J. M., Abou Bekr N., Saouab A.** Hydrology, environment (pedology) modelling the effect of temperature on unsaturated soil behaviour modélisation de l'effet de la température sur le comportement des sols non saturés. Comptes Rendus Géoscience, 2010.
- **Mebarki. A.** Quantification et cartographie automatique des bilans hydrologiques en zone semi-aride : Les bassins de l'Algérie orientale. 14th International Soil Conservation Organization Conference, 2006.
- **Mélèze J.**, l'analyse modulaire des systèmes de gestion. A.M.S., Editions hommes et techniques, Puteaux, France., 1972.
- **Mekerta B., Semcha A., Rahmani F., Troalen J.P.**, Erosion spécifique et caractérisation de la résistance au cisaillement des sédiments du barrage de Fergoug. Xèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Tome 1, Sophia Antipolis France, pp. 135-144, octobre 2008.
- **Mekerta B., Semcha A., Benaissa A., Kazi-Aoual F.**, Comportement mécanique des sédiments de dragage pour leur valorisation en technique routière, SBEIDCO – 1st International Conférence on Sustainable Built Environment

Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.

- **Mekerta B., Kazi-Aoual F., Semcha A., Benaissa A., Rahmani F.,** Estimation de l'érosion spécifique saisonnière et valorisation des sédiments de dragage : cas particulier du barrage de Fergoug (Algérie), *Communication Science & Technologie*, 2012.
- **Mekerta B., Semcha A., Rahmani F., Troalen J.P.,** Erosion spécifique et caractérisation de la résistance au cisaillement des sédiments du barrage de Fergoug, *Xèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil*, 14-16 octobre 2008, Sophia Antipolis
- **Mekerta B., Semcha A., Sadok A., Guessas H., Rahmani M. C.,** Moyens de lutte pour la prédiction l'envasement Des retenues de barrages d'Ouizert, Bouhanifia et Fergoug, *Conference: 5th International Symposium on Sediment Management (I2SM)*, 2016.
- **Mesbah. A., Morel J.C., Olivier M.** Clayey soil behaviour under static compaction test. *Materials and Structures*, 32 :687–694, 134, 1999a.
- **Mesbah. A., Morel J.C., Olivier M..**Comportement des sols fins argileux pendant un essai de compactage statique : détermination des paramètres pertinents. *Materials and Structures*, 32 :687–694,v, 86, 89, 116, 1999b.
- **Mesbah. A Olivier, M.,** Le matériau terre : Essai de compactage statique pour la fabrication de briques de terre compressées. 3070. 134, 1986.
- **Miccoli. L., Urs M., Fontana P.** Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. *Construction and Building Materials*, 61 :327–339, 119, 2014.
- **Millogo Y, Hajjaji M, Ouedraogo R ,** Microstructure and physical properties of lime-clayey adobe bricks. *Constr Build Mater* 22:2386–2392.10.1016/j.conbuildmat.2007.09.002, 2008.
- **Minke. G..** Building with earth : Design and technology of a sustainable architecture.2006.
- **Miraoui, M., Zentar R., Abriak N.** Road material basis in dredged sediment and basic oxygen furnace steel slag. *Construction and Building Materials*, 30 :309–319, 2012.

- **Mitchell. J. Soga K.** Fundamentals of soil behavior, third edition. John Wiley and Sons, Inc., 2005.
- **Modaressi. A., Abou-Bekr N., Fry J.J.** Unified approach to model partially saturated and saturated soils. In Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT95, Paris. Edited by E.E. Alonso and P. Delage Presses des Ponts Presses des Ponts et Chaussées, 1996.
- **Mariette M., Fontaine L. Anger R. (bilan de CRATERre2012).** Caractéristiques mécaniques, thermiques et hygrométriques du matériau terre crue : bilan de la littérature, Projet : Béton d'Argile Environnemental (B.A.E.), Laboratoire CRATERre-ENSAG 60, avenue de Constantine - BP2636 38036 Grenoble Cedex 2, 2012.
- **Mojeron J. Merise par l'exemple.** Les éditions d'organisation, page 247, 1991.
- **MOPT.** Bases para el diseno y construcción con tapial. Centro de Publicaciones, Secretaria General Técnica, Ministerio de Obras Publicas y Transportes, 1992.
- **Morel J. C., Pkla A., Walker P.** Compressive strength testing of compressed earth blocks. Construction and Building Materials, 21 :303–309. 95, 136, 2007
- **Morel, J. C. Mesbah, A., Oggero M., Walker P.** Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction. Building and Environment, 3695, 127, 2001.
- **Morel. J. C. Pkla A.** A model to measure compressive strength of compressed earth blocks with the 3 points bending test. Construction and Building Materials, 16 :303–310, 2002.
- **Morsli B.** Caractérisation, distribution et susceptibilité à l'érosion des sols de montagne « cas des monts de Beni chougrane–Mascara ». Thèse de Magister, Institut national de la recherche forestière (INRF), El Harrach, Alger, 1996.
- **Muriel. S.** La systémique comme piste d'intervention lors de situations problématiques en classe : Un outil applicable et appliqué ? Mémoire de Master en enseignement spécialiste, Haute Ecole Pédagogique - BEJUNE, 2015.
- **Muntohar A. S.,** Engineering characteristics of the compressed-stabilized earth brick, Construction and Building Materials 25, 4215–4220, 2011.

**N**

- **Naserkhaki. M.** Effet de la succion matricielle des sols non saturés sur leur compressibilité. Thèse de doctorat, Université Laval, 2007.
- **Ngowi A. B.**, Improving the traditional earth construction: a case study of Botswana. *Construction and Building Materials*; 11(1):1–7 , 1997.
- **Nguyen V. N. Taibi S.** Projet cématère : Erosion de surface des géo matériaux application aux matériaux de construction à base de terre crue, 2015.
- **Nguyen. V.N. Taibi S.** Using a spray test to study the surface erosion of geomaterials application on construction material of soil-cement mixtures in Le Havre, France. In : Tran-Nguyen HH., Wong H., Ragueneau F., Ha-Minh C. (eds) *Proceedings of the 4th Congrès International de Géotechnique - Ouvrages - Structures. CIGOS 2017. Lecture Notes in Civil Engineering, Springer, Singapore, 8 :610–616, 2018.*
- **Nguyen. V. N.**, editor. Application of Drip test for study the erosion of earthen wall by rain fall-case of le havre area, France, 2015.
- **Nguyen. V. N.** Caractérisation de l'érosion des sols par le jet érosion test. thèse de doctorat, Ecole centrale de Paris, 189, 2014.
- **Nougar B.**, Etude du comportement des sédiments issus du dragage en vue de leur stockage en attente de valorisation, mémoire de magister, ENSET- Oran, 2009.
- **Norme-NF-EN-12572.** Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau - Méthode de la coupelle, 146, 147, 2016.
- **Norme-Afnor**, Briques pleines ou perforés est blocs perforés en terre cuite. NF, octobre, 13-305, 1983.
- **Norme-NF-P94-051.** Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau. 1993.
- **Norme-NF-P94-057.** Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols -Méthode par sédimentation, 1992.
- **Norme-NF-P94-068.** Sols : reconnaissance et essais -Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse - Détermination de la valeur au bleu de méthylène d'un sol par l'essai a la tache. 1993.
- **Norme-NF-P94-093.** Sols : reconnaissance et essais - Détermination des caractéristiques de compactage d'un sol : essai Proctor normal, essai Proctor modifié. 1993.

- **Norme-NF-P-98-232-1.** Tests Relating to Pavements – Determination of the Mechanical, 1991.
- **Norme-NF-XP-P13-901.** compressed earth blocks for walls and partitions: definitions – specifications – test methods – delivery acceptance conditions. Saint-Denis La Plaine Cedex : AFNOR, 2001.
- **Norme-NF-XP-P94-041.** Sols : reconnaissance et essais – Identification granulométrique. Méthode de tamisage par voie humide. 1995.
- **Norme-NF-XP-P94-047.** Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un matériau. Méthode par calcination. 1998.

## O

- **Ogunye F.O. Boussabaine H.** Development of a rainfall test rig as an aid in soil block weathering assessment. *Construction and Building Materials*, 16 :173–180, 2002.
- **Oti, J.E. Kinuthia, J.M** , Stabilised unfired clay bricks for environmental and sustainable use, *Applied Clay Science* 58 52–59, 2012.
- **Oti, E. J Kinuthia, J. M. Bai, J.** Engineering properties of unfired clay masonry bricks. *Engineering Geology*, 107, 2009.
- **Oti, J.E. Kinuthia, J.M Bai, J.,** Compressive strength and microstructural analysis of unfired clay masonry bricks, *Engineering Geology* 109 230–240, 2009.

## P

- **Pekmezci B. Y. , Kafesçioğlu K. , Agahzadeh E.,** improved performance of earth structures by lime and gypsum addition, *improved perf*, (29:2) 205-221, 2012.
- **Pkla, A..** Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (btc) : application aux maçonneries btc-mortier de terre. Thèse de doctorat, INSA Lyon, 2002.
- **Pacheco-Torgal, F. and Jalali, S.** Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, 29 :512–519, 2012.
- **Pollock, S.** Ancient Mesopotamia. Printed in the United Kingdom at the University Press, Cambridge, 1999.

# R

- **Rabah Fissa, A. Boukli Hacene, C.** Systèmes d'information géographique cours et travaux pratiques. Polycopié Université de Tlemcen, 2015.
- **Rahmani, F.**, Caractérisation et analyse statistique des sédiments d'envasement d'un barrage. Mémoire de magister. Ecole Nationale Polytechnique d'Oran Algérie, 2009. 165p.
- **Ramirez, R.A.**, The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks, *Construction and Building Materials* Volume 34, Pages 296-305, 2012.
- **Reix, R.** Systèmes d'information et management des organisations. Vuibert, 2005.
- **Remin, B. Hallouche, W.**. Le dragage des retenues de barrages : quelques exemples algériens. *LA HOUILLE BLANCHE*, (5), 2004.
- **Remini, W. Remini, B.** La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du nord. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, (02) :45-54, 2003.
- **Remini. B** : Une nouvelle approche de lutte contre l'envasement des barrages : La technique des obstacles émergés. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680,, (09) :43-53, 2011.
- **Remini. B, Avenard, J. M Kettab, A.** L'envasement des barrages. 1997.
- **Remini. B.** Valorisation de la vase des barrages : Quelques exemples algériens. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, (05) :75-89, 2006.
- **Remini B., Kenai S.**, Valorisation de la vase du barrage de l'Oued Lekhel pour la fabrication de la brique, *Revue marocaine de Génie Civil*, n. 90, nov/d.c., 36-41, 2000.
- **Reman O.** Increasing the strength of soil for adobe construction. *Architectural Science Review*, . 103, 2004
- **Rose. D. A.** Water movement in porous materials: Part 2- the separation of the components of water movement. *British journal of applied physics*, 14 :491-496, 1963.
- **Roose E.** Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest : vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. *Travaux et Documents*, n° 78. Paris : Orstom éditions. 1977.

- **Roose, E. Arabi, M. Brahamia, K. Chebbani R. Mazour R. Morsli B.** Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. *CahOrstomSérPédol*; 18 : 289-308.
- **ROUBA, K. TEIBI, S.** Cartographie des terrains du miocène supérieur de la marge nord du bassin de la Tafna région de Beni Saf. Mémoire. Ing. Université de Tlemcen, 2014.

## S

- **Sabir M.** Quelques techniques traditionnelles de gestion de l'eau et de lutte antiérosive dans le bassin versant de Sidi Driss, Haut Atlas Central, Maroc. *Bull Réseau Érosion* ; 21 : 224-31. 2002
- **Sadok A.** Maintenance du barrage de Ouizert dans la gestion des sédiments d'envasement et dans la réalisation d'un Centre de Stockage de Déchets (CSD). Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran Algérie, 2013, 140p.
- **Saidi. A.** Erosion spécifique et prévision de l'envasement des barrages. Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages, pages 204–226, 1991.
- **Salager, S.** Etude de la rétention d'eau et de la consolidation des sols dans un cadre thermo-hydro-mécanique. Thèse de doctorat, université Montpellier 2, 2011.
- **Samara M. Lafhaj Z., Chapiseau C.** Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks : Factory scale experiment. *journal of Hazardous Materials*, 163 :701–710, 2009.
- **Satyanaga, A., Rahardjo H. Leong E. C. Wang, J.Y.** Water characteristic curve of soil with bimodal grain-size distribution. *Computers and Geotechnics* 48 (2013) 51–61, 48 :51–61, 2013.
- **Semcha A.,** Valorisation des sédiments de dragage : applications dans le BTP, cas du barrage de FERGOUG. Thèse de doctorat de l'université de Reims Champagne-Ardenne, 2006.
- **Serbah B.** Dredged sediments valorisation in compressed earth blocks: Suction and water content effect on their mechanical properties, *Construction and Building Materials* 158 (2018) 503–515.

- **Serbah B.** Etude et valorisation des sédiments de dragage du barrage bakhadda Tiaret, mémoire de magister, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, 2011
- **Sidahmed M.**, Maintenance et réhabilitation du barrage de Bouhanifia vis-à-vis du transport solide. Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran Algérie, 2013, 120p.
- **Scordia. P. Y.** Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers. L'école centrale de LILLE Spécialité : Génie Civil, 2008.
- **Smith. E.W. Austin G. S.** Bulletin 159-adobe, pressed earth, and rammed-earth industries in New Mexico. USA : University of Mexico Printing Services, 1996.
- **Standards New Zealand. NZS 4297.** materials and workmanship for earth buildings incorporating amendment no. 1. Standards New Zealand, Wellington; 1998.
- **Standard New Zealand Norme-NZS-4298.** Materials and Work man ship for Earth Buildings,(erosion test: pressure spray method), 1998.
- **Standard Zimbabwe Norme-SAZS-724.** Rammed earth structures-Code of practice, 2012.

## T

- **Taabni M.** Aménagement, lutte contre l'érosion des terres et pratiques paysannes dans les montagnes telliennes du nord ouest algérien. Bull Réseau Érosion ; 18 : 348-68. 1998.
- **Taallah, B.** Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider -BISKRA, 2014.
- **Tadanier R.,** Soil security test for water retaining structures, Journal of Geotechnical Engineering, volume 111, n 03, 289 -301, 1985.
- **Taibi, S.** Comportement mécanique et hydraulique des sols soumis a une pression interstitielle négative – étude expérimentale et modélisation. thèse de doctorat, Ecole central Paris, 1994.
- **Taibi, S., Duperret A, Fleureau, J. M.** The effect of suction on the hydro-mechanical behaviour of chalk rocks. Engineering Geology, 106 : 40–50, 2009.

- **Taibi. S., Fleureau J.M., Abou-bekr, N. Zerhouni M.I, Benchouk A., Lachgueur K., Souli H.** Some aspects of the behaviour of compacted soils along wetting paths .Géotechnique,61(5) :431–437., 2011.
- **Taibi. S., Fleureau, J.M. Hadiwardoyo, S. Souli, H and Gomes Correia, A.** The concept of effective stress in unsaturated soils. Chapter 6 in book «Multiscale Geomechanics; From Soil to Engineering Projects”, PP 153–182. P.Y. Hicher Editor-ISTE sci-tech publisher. WILEY. ISBN : 9781848212466 Publication, page 416, 2013.
- **Tardieu, J. R. Colletti, A.** La méthode merise, principes et outils. les éditions d’organisation, 1986.
- **Technique- d’ingénieur.** La construction en terre, un art de bâtir universel et actuel, ref : tba1500. Technique de l’ingénieur, 2005.
- **Tessier. D.** Experimental research on clay fabric particle. doctoral thesis, université de Paris VII, 1975.
- **Tomlinson. R.F.** An introduction to the geographic information system of the canada land inventory. Department of Forrestry and Rural Development, Ottawa. 1967.
- **Tomlinson. R.F.** Geographic data handling. Commission on geographical data sensing and processing. International geographical union. Ottawa Canada, 1972.

## V

- **Van-Damme H. Houben H.** Earth concrete. Stabilization revisited. Cement and Concrete Research, 2017.
- **Van Damme H.** La terre, un béton d’argile. Pour la Science n° 423, 2013.
- **Verbrugge. J.C.** Contribution à la mesure de la succion et de la pression interstitielle dans les sols non saturés. Ph.D. thesis, Université Libre de Bruxelles, Brussels, page 212, 1974.
- **Vilane B.R.T.** Assessment of stabilization of adobes by confined compression tests. Biosystems engineering, 106 :551–558, 2010.
- **Vincent D., Abriak N., Zentar R., Ballivy G.** The use of marine sediments as a pavement base material. Waste Management, 29 :774–782, 2009.
- **Venkatarama Reddy B. V, Hubli S. R.** Properties of lime stabilised steam-cured blocks for masonry. Mater Struct 35(5):293–300, 2002.

- **Venkatarama Reddy B. V, Gourav K.,** Strength of lime–flyash compacts using different curing techniques and gypsum additive. *Mater Struct* 44(10):1793–1808, 2011.

## W

- **Walker P., Keable, R. Martin, J. Maniatidis V.** Rammed earth : Design and construction guidelines. BRE Bookshop, 2005.
- **Walker P. J.** Strength and erosion characteristics of earth blocks and earth block masonry. *Journal of materials in civil engineering*, 16 :497–506, 2004.
- **Weisz A., Kobe, A. McManus, A. M Nataatmadja, A.** Durability of mudbrick – comparison of three test methods. In A Weisz, editor, *Proceedings of the 4th Australasian Masonry Conference*, pages 249– 258, 1995.
- **Williams. J. Shaykewich, C.** An evaluation of polyethylene glycol (p.e.g) 6000 and P.E.G. 20000 in the osmotic control of soil water matrix potential. *Canadian J. of SoilSci*, 102, 1969.
- **Wang D., Abriak N., Zentar R.** Strength and deformation properties of Dunkirk marine sediments solidified with cement, lime and fly ash. *Engineering Geology*, 166 :90–99, 2013.

## Y

- **Yles,** Quantification et modélisation du transport solide dans le bassin-versant de l'oued Saïda (hauts plateaux algériens), *Science et changements planétaires / Sécheresse*. Volume 23, Numéro 4, 289-96, 2010
- **Yttrup, P.J. Diviny K, Sottile, F.** Development of a drip test for the erodibility of mud bricks. DeakinUniversity, Geelong, 1981.

## Z

- **Zami. M. S. Lee A.** Earth as an alternative building material for sustainable low cost housing in zimbabwe. The 7th International Postgraduate Research Conference. The Lowry, Salford Quays, Salford, Greater Manchester, UK., 2007.
- **Zeguid K.** Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines karstiques. Cas du bassin versant du Meffrouche, mémoire de magister , université de Tlemcen, 2013.
- **Zerhouni. M.I.** Rôle de la pression interstitielle négative dans le comportement des sols application à la route. Thèse de doctorat, école central Paris, 1991.
- **Zerhouni D. A.** Recherche d'une méthodologie adaptée à l'étude des zones à risques de contamination fécale des eaux de consommation sur la ville de Tlemcen : Essai Cartographique, mémoire de magister, univ. A. Belkaïd, Tlemcen, 1991.
- **Zur. B.** Osmotic control the matrix soil water potential. Soil Science, 102: 394–398, 1966.