

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعلیم العالی و البحث العلمی

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen -

Faculté de Technologie



THESE

Présentée pour l'obtention du grade de DOCTORAT 3^{ème} Cycle

En : Génie Civil

Spécialité : Génie Civil

Par : MEKAIDECHE Khalfallah

Sujet

Comportement hygrothermique de la terre crue partiellement saturée

Soutenue publiquement, le 13/ 07/ 2021, devant le jury composé de :

GHOMARI Fouad	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
ABOU-BEKR Nabil	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
DERFOUF F-E Mounir	Maitre de Conférences A	Univ. Saida	Co-Directeur de thèse
TROUZINE Habib	Professeur	Univ. Sidi Bel Abbès	Examineur
DJEDID Abdelkader	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur

REMERCIEMENTS

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

-Monsieur ABOU-BEKR Nabil, Professeur à l'université de Tlemcen, pour la confiance qu'il m'a accordée. Je le remercie pour l'inspiration et l'aide le long de la réalisation de ce travail.

-Monsieur DERFOUF Feth-Ellah Mounir, Maitre de Conférences A à l'université de Saida, pour sa présence avec nous dans le laboratoire lors des essais, ses conseils, explications et orientations.

-Madame BENCHOUK Assia, Maitre de Conférences à l'université de Tlemcen pour ses conseils précieux.

Je tiens à remercier aussi les membres du jury :

- Monsieur GHOMARI Fouad, Professeur à l'université de Tlemcen pour ses précieuses orientations et pour avoir accepté de présider le jury de ma thèse.

-Monsieur TROUZINE Habib, Professeur à l'université de Sidi-Bel Abbes, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'examiner ce travail.

- Monsieur DJEDID Abdelkader, Professeur à l'université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il m'a fait en expertisant ce travail.

Je remercie aussi monsieur MOULI Mohamed, Professeur à l'ENP d'Oran de nous avoir facilité la réalisation des mesures des caractéristiques thermiques.

Je tiens à remercier mes parents, mes frères et sœurs, pour leur soutien permanent.

Je remercie vivement mon frère Obeid Abdelkader enseignant à l'université de Saida.

Je remercie vivement tous mes collègues Sebaa, Sid-Ali, Ait salem, Laimeche et toute l'équipe sols non saturés et couplage ainsi que tous les techniciens du laboratoire.

Je remercie encore tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration et à la bonne marche de travaux de cette thèse.

Table des matières

Sommaire

Introduction générale.....	1
CHAPITRE. I : Généralités sur la construction en terre.	
1 Introduction.....	4
2 Rappel historique sur la construction en terre dans le monde	4
3 Rappel historique en Algérie	6
4 Les techniques de construction en terre crue	9
5 Les avantages de la terre crue.....	14
5.1 Avantages écologiques	14
5.2 Avantages économiques.....	14
5.3 Avantages thermiques	16
5.4 Les inconvénients de la terre crue (non stabilisée)	16
6 Les techniques de stabilisation.....	18
6.1 Compactage et dessiccation	19
6.2 Stabilisation à la chaux.....	20
6.3 Stabilisation au ciment.....	20
6.4 Stabilisation avec fibre	21
6.5 Stabilisation par le bitume	21
7 Normes et recommandations liées à la construction en terre	22
8 Matériaux et critères utilisés pour la fabrication de BTC dans la littérature.....	22
8.1 Présentation de la norme (XP P13-901).....	22
8.2 Critère de compactage	27
8.3 Quantité de sulfate	29
9 Fabrication des briques de terre comprimée	30
10 Les dimensions et formes de la brique de terre comprimée	31
11 Types de presses utilisées.....	32
12 Conclusion.....	34
CHAPITRE II : Performances hygrothermiques du matériau terre compactée	
1 Introduction.....	36
2 Le compactage statique.....	36

2.1	Influence de la pression de compactage.....	37
2.2	Influence de l'énergie et de la force de compactage	38
2.3	Influence de la vitesse de compression	41
2.4	Microstructure de la terre compactée	43
2.5	L'effet de la densité	43
2.6	L'effet de la teneur en eau et énergie de compactage.....	45
2.7	Effet du liant.....	47
3	Caractéristiques hydriques du matériau terre compactée	50
3.1	La conductivité hydraulique saturée.....	50
3.2	L'absorption d'eau capillaire	51
3.2.1	L'influence de la densité sèche sur l'absorption capillaire d'eau	51
3.2.2	Influence de la température sur l'absorption d'eau	53
3.2.3	Influence de la taille des échantillons sur l'absorption d'eau	53
3.2.4	Influence de l'ajout sur l'absorption d'eau	54
3.3	Isotherme sorption-désorption et chemin de séchage humidification	55
3.4	La diffusion à la vapeur d'eau	58
4	Caractéristiques thermiques d'un matériau terre compactée.....	60
4.1	La conductivité thermique	60
4.1.1	Effet de la stabilisation sur la conductivité thermique.....	61
4.1.2	Effet de la densité sèche sur la conductivité thermique.....	63
4.1.3	Effet de la teneur en eau et du degré de saturation sur la conductivité thermique.....	64
4.2	La capacité de stockage thermique	66
5	Diffusivité thermique.....	68
6	Conclusion.....	70

CHAPITRE III: Matériau d'étude et méthodes expérimentales

1	Introduction.....	72
2	Sélection du Matériau.....	73
2.1	Détermination de la granulométrie et de la plasticité.....	74
2.2	Critères de granulométrie	75
2.3	Critère de plasticité.....	75
2.4	Classifications des matériaux selon la norme (NF P 18-592).....	76
3	Identification du tuf de Béni-Saf	77

3.1	Poids volumique des grains solides.....	77
3.2	La teneur en carbonate de calcium CaCO_3	78
3.3	Essai au bleu de méthylène	79
3.4	La matière organique	80
3.5	Classification du tuf de Béni-Saf	80
4	Compactage dynamique et statique du matériau sélectionné	80
4.1	Essai Proctor	80
4.2	Le compactage statique et dynamique du tuf de Béni-Saf	81
4.3	Préparation des échantillons compactés statiquement	84
5	Méthodes et procédures expérimentales.....	84
5.1	Essai d'absorption	84
5.2	Séchage-humidification	87
5.2.1	Méthode osmotique.....	87
5.2.2	La méthode du papier filtre	89
5.3	Détermination de la conductivité hydraulique saturée K_{sat} au triaxial.....	89
5.4	La conductivité hydraulique non saturée	91
5.5	Front capillaire	91
2.8.	La perméabilité à la vapeur.....	92
5.6	Principe de mesure des propriétés thermiques.....	94
6	Conclusion.....	96

CHAPITRE IV: Comportement hygrothermique du matériau non stabilisé

1	Introduction.....	98
2	Comportement hydrique du tuf de Béni-Saf compacté non stabilisé.....	98
2.1	Absorption d'eau capillaire.....	99
2.1.1	Détermination du coefficient d'absorption d'eau	99
2.1.2	L'effet de la densité et du séchage sur le coefficient d'absorption d'eau	101
2.1.3	Effet de la succion initiale sur le coefficient d'absorption d'eau A_w	103
2.1.4	Effet de la teneur en eau et du degré de saturation sur A_w	104
2.2	Chemins de séchage-humidification.....	106
2.3	La conductivité hydraulique saturée	109
2.4	Ajustement de la courbe caractéristique sol-eau (SWCC) par l'équation de Van Genuchten.....	110
2.5	Conductivité hydraulique non saturée.....	111

2.5.1	Relation entre la perméabilité non saturée et le coefficient d'absorption	113
2.6	Front de remontée capillaire	114
2.7	Diffusion de la vapeur d'eau	115
3	Les paramètres thermophysiques des échantillons non stabilisés	117
3.1	La conductivité thermique	118
3.2	La capacité thermique volumique et massique et diffusivité thermique	124
3.3	L'effusivité thermique.....	127
4	Conclusion	129

CHAPITRE V: Comportement hygrothermique du matériau stabilisé

1	Introduction.....	132
2	Paramètres de compactage du tuf de Béni-Saf stabilisé à 4% de chaux.....	132
3	Comportement hydrique des échantillons stabilisés	135
3.1	Absorption d'eau	135
3.1.1	Détermination du coefficient d'absorption A_w	136
3.1.2	Effet de la chaux et du séchage sur la variation du coefficient A_w	138
3.1.3	Effet de la succion initiale sur le coefficient d'absorption d'eau A_w	139
3.1.4	Effet de la teneur en eau et du degré de saturation sur A_w	140
3.2	Courbes de rétention des échantillons stabilisés.....	141
3.3	Conductivité hydraulique saturée	144
3.4	La conductivité hydraulique non saturée K_u	145
3.5	Relation entre le coefficient d'absorption et la conductivité hydraulique non saturée	146
3.6	Front de remontée capillaire	146
4	Les paramètres thermophysiques des échantillons stabilisés	148
4.1	La conductivité thermique	149
4.2	La capacité thermique volumique et massique et la diffusivité thermique	151
4.3	Effusivité thermique.....	154
5	Conclusion	157
	Conclusions générales et perspectives	155

Listes des figures

Figure. I. 1. La grande mosquée de Djerne au Mali.	5
Figure. I. 2. La ville de Shibam, Yémen. (https://whc.unesco.org).....	5
Figure. I. 3. Village de Gourna-Egypte.....	6
Figure. I. 4. Le muret de Mansourah à Tlemcen.	6
Figure. I. 5. Site de Honaine, wilaya de Tlemcen, Algérie.....	7
Figure. I. 6. Typologie constructive du pisé renforcé (tabia renforcée)(a) (© Abdessemed-Foufa Amina,2010); Almudin de Valence en tapia valenciana (b) (© https://tierrah.wordpress.com Le 13-05-2015); Mesures constructives sismo-résistantes à Mena-Aurès (c) (© Kais Djillali. Ministère de la Culture).	7
Figure. I. 7. Logements collectifs R+1 à Sidi Bel Abbès, Algérie.....	8
Figure. I. 8. Prototype d'une maison solaire réalisée par le CNERIB (a) (© www.cnerib.edu.dz , Le 14-05-2015); Atelier de formation sur les techniques de fabrication de BTC à Tamanrasset (b)(© prescriptor.info/.../cap-terre-des-ateliers-de-formation-sur-les-techniques , Le 14-05-2015) (Abdessemed-Foufa Amina, 2010).....	9
Figure. I. 9. Restauration de la mosquée Zahra à Béni-Snouss. Tlemcen. Avant (a) et après (b)(© Abdessemed-Foufa Amina, 2010).....	9
Figure. I. 10. Les techniques de construction et de mise en œuvre de la terre.....	10
Figure. I. 11. Les outils utilisés dans la fabrication du pisé. (Champiré, 2017).....	11
Figure. I. 12. L'usine en pisé à Saint Simeon de Bressieux dans l'Isère réhabilitée en logements. (Chabriac, 2014).	11
Figure. I. 13. Maison en torchis de paille légère à Pullay, au Chili. (Wafer, 2010)	12
Figure. I. 14. Image de fabrication d'adobe.....	12
Figure. I. 15. Constructions en BTC à Mayotte : Préfecture ; Logements sociaux, Ecole.....	13
Figure. I. 16. Maison construite avec des BTC (dont la tour est en pisé) en RhôneAlpes, France. (Champire, 2017).....	13
Figure. I. 17. Cycle de vie du matériau terre. (https://www.cycle-terre.eu/).....	14
Figure. I. 18. La consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment en Algérie.	15
Figure. I. 19. Un exemple de Ksar dans le Sahara algérien (Timimoune)	17
Figure. I. 20. Brique après le test d'absorption d'eau par capillarité. (Flament, 2017).....	17
Figure. I. 21. Stabilisants et fuseaux granulométriques. (Doat et col, 1979).	18
Figure. I. 22. Stabilisants et limites d'Atterberg. (Doat et col, 1979).	19
Figure. I. 23. Fuseau granulométrique. (XP P13-901)	24
Figure. I. 24. Fuseau de plasticité. (XP P13-901).....	24
Figure. I. 25. Position des valeurs de w_L et I_p dans la littérature par rapport aux fuseaux recommandés pour la fabrication de BTC.	27
Figure. I. 26. Le positionnement des optimums par rapport au fuseau de compactage de la BTC, du pisé et de l'adobe.....	29
Figure. I. 27. Les malaxeurs utilisés pour la confection des BTC. (Guillard et col, 1995).....	31
Figure. I. 28. Les dimensions courantes des BTC. (Guillard et col, 1995).....	31
Figure. I. 29. Les différentes formes de BTC (CRAterre-Rigassi, 1995).....	32
Figure. I. 30. Le montage de la presse PALAFITTE. (Doat et al, 1979).	33
Figure. I. 31. La presse hydraulique. (Laibi, 2017)	34
Figure. II. 1. Montage de l'essai de compactage statique. (Olivier et col, 1986).	37
Figure. II. 2. Système de compactage statique dans un moule revêtu de membrane. (Camapum de carvalho et col, 1987).	37

Figure. II. 3. Variation de frottement la force de frottement F_f par la section transversale initiale S_0 en fonction de la pression de compactage statique (PB).	38
Figure. II. 4. Compactage statique et dynamique. (Mesbah et col, 1999).	39
Figure. II. 5. Relations entre la densité d'énergie et la teneur en eau pour des pressions de compactage maximales 2 et 8 MPa. (K10 : mixte contient 10% d'argile, K20 : mixte contient 10% d'argile, K30 : mixte contient 10% d'argile, K40 : mixte contient 10% d'argile).....	40
Figure. II. 6. Influence de la pression de compactage sur la masse volumique.....	41
Figure. II. 7. Evolution du déplacement en fonction du temps chargement.....	42
Figure. II. 8. Courbe de compactage statique à une vitesse de 2mm/min.	42
Figure. II. 9. Variation de la vitesse de compactage statique en fonction du temps dans l'essai de (Champiré, 2017).	43
Figure. II. 10. La distribution porale de deux briques de terre comprimée selon Fouchel et col, 2015.....	44
Figure. II. 11. La distribution porale de trois échantillons compactés dynamiquement, statiquement et par roulement. (Sediki et col, 2016).....	44
Figure. II. 12. Courbe porosimétriques des échantillons compactés à l'optimum Proctor, côté sec et humide. (Delage et col, 1996)	45
Figure. II. 13. Courbes de distribution de la taille des pores des échantillons traités à la chaux compactés au côté sec (Dry) et au côté humide (Wet). (Wang et col, 2016).	46
Figure. II. 14. Essai au prosimètre à mercure d'un matériau argileux. (Tran et col, 2014).....	47
Figure. II. 15. Microstructure d'échantillons d'adobe stabilisés (a: adobe brut; b: adobe avec 2% ciment; c: adobe avec 4% ciment; d: adobe avec 12% de ciment). (Dao et col, 2018).....	48
Figure. II. 16. Représentation schématique de la microstructure du limon de Meaux avant traitement. (Cabane, 2005).....	49
Figure. II. 17. Représentation schématique du limon stabilisé au-delà de 90 jours de cure (Cabane, 2005).	49
Figure. II. 18. Comparaison entre les valeurs de conductivité hydraulique saturée obtenues sur des éprouvettes compactées par pétrissage et par méthodes statique et dynamique. (Mitchell et col, 1965).	50
Figure. II. 19. Essai de capillarité sur des blocs de pisé. (Couvreur, 2014).	51
Figure. II. 20. (A) Résultats des expériences d'absorption d'eau; (B) Variation de la valeur de A_w avec la densité sèche initiale des échantillons. (Fabbri et col, 2019)	52
Figure. II. 21. Relation entre le coefficient d'absorption d'eau et la densité apparente de deux matériaux. (Taallah et col, 2016).	52
Figure. II. 22. Coefficients d'absorption capillaire à différentes températures.	53
Figure. II. 23. Influence de la taille de l'échantillon sur le coefficient A_w (Feng et Janssen, 2019).....	54
Figure. II. 24. Effet de la variation de la teneur en fibres sur le coefficient d'absorption d'eau de BTC stabilisé avec 10% de chaux vive après 7 jours de cure. (Taallah et Guettala, 2016)...	54
Figure. II. 25. Variation du coefficient d'absorption A_w en fonction de l'ajout du ciment.	55
Figure. II. 26. Forme générale de la courbe de sorption. (Piot, 2009)	56
Figure. II. 27. Isothermes de sorption-désorption des échantillons de BTC traités avec la bentonite. (McGregor et col, 2014)	56
Figure. II. 28. Chemins de séchage-humidification d'un sol compacté à différentes énergies. (Serbah et al ,2018).	57
Figure. II. 29. Le facteur de résistance à la vapeur d'eau des matériaux. (Fouchal et col, 2015)	59
Figure. II. 30. Facteur de résistance à la vapeur d'eau en fonction de la densité sèche des matériaux de construction. (Cagnon et col, 2014).....	60
Figure. II. 31. Conductivité thermique de divers matériaux de construction. (Moevus et col, 2016).....	61

Figure. II. 32. Influence de la teneur en chènevotte sur la conductivité thermique d'un éco-matériau à base de terre crue. (Laborel-Préneron et col, 2015)	62
Figure. II. 33. L'effet du ciment et de la chaux sur la conductivité thermique. (Said et col, 2018).....	62
Figure. II. 34. Variation de la conductivité thermique en fonction de la densité.	63
Figure. II. 35. Comparaison entre la conductivité thermique des briques d'argile non cuite par et des briques d'argile cuite. (Oti et col, 2010)	63
Figure. II. 36. Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau.	64
Figure. II. 37. Conductivité thermique des échantillons traités à la chaux en fonction du temps de cure. (Wang et col, 2016).....	65
Figure. II. 38. Variation de la conductivité thermique en fonction du temps de cure.	65
Figure. II. 39. Relation entre la conductivité thermique et le degré de saturation.	66
Figure. II. 40. Capacité thermique de plusieurs matériaux de construction.	67
Figure. II. 41. Comparaison de la capacité volumique thermique d'un limon compacté mesurée et calculée suivant le modèle. (Boukelia, 2016)	68
Figure. II. 42. Diffusivité thermique de la terre stabilisée à différents pourcentages de ciment en fonction de la teneur volumique. (Ezbakhe et col, 2001)	69
Figure. II. 43. Variation de la diffusivité thermique en fonction de la densité volumique.	69
Figure. III. 1. Programme expérimental.	72
Figure. III. 2. Localisation des lieux de prélèvement des matériaux étudiés.	73
Figure. III. 3. La distribution granulométrique par rapport aux fuseaux granulométriques recommandés par la norme (MOPT, 1992 ; XP-P19-901; Houben and Guillaud, 1994 ; CRAterre-Rigassi, 1995).....	75
Figure. III. 4. Les points d'intersection entre W_L et I_p par rapport aux fuseaux recommandés de plasticité par la norme (XP-P19-901 ; Houben et Guillaud, 1994).	76
Figure. III. 5. Classifications des matériaux conformément à la norme (NF P 18-592).....	76
Figure. III. 6. Détermination du poids volumique des grains solides par le pycnomètre (500ml).....	78
Figure. III. 7. Matériels utilisés pour déterminer la quantité de $CaCO_3$	78
Figure. III. 8. L'essai au bleu de méthylène.	79
Figure. III. 9. Compactage dynamique PN et PM du matériau sélectionné.....	81
Figure. III. 10. (a) sol écrêté à 5mm (b) moule double piston (c) l'échantillon compacté.....	82
Figure. III. 11. Les courbes de compactage dynamique et statique à différents énergies.	83
Figure. III. 12. Compactage dynamique et statique du matériau sélectionné.....	84
Figure. III. 13. Dispositif de mesure du coefficient d'absorption A_w	85
Figure. III. 14. Effritement de la base de l'échantillon au contact avec l'eau.	86
Figure. III. 15. Un exemple de la détermination du coefficient d'absorption par capillarité (A_w).	86
Figure. III. 16. (a) moule+échantillon (c) protocole séchage-humification.....	88
Figure. III. 17. Pesée par une balance de précision $10^{-3}g$	88
Figure. III. 18. Courbe d'étalonnage pour la détermination de la succion par la méthode du papier filtre. (ASTM, D. 5298-03).....	89
Figure. III. 19. Mesure de la conductivité hydraulique saturée (dispositif triaxial).....	89
Figure. III. 20. Le principe de mesure du volume traversant l'échantillon.	90
Figure. III. 21. Détermination du front capillaire des échantillons compactés.	91
Figure. III. 22. Principe de la mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau d'un matériau non saturé en régime stationnaire. (Hibouche, 2013).....	92
Figure. III. 23. Appareil de mesure des paramètres thermiques (Laboratoire Matériaux "LABMAT" de l'ENP d'Oran).....	94

Figure. III. 24. L'écran d'affichage de l'appareil de mesure des propriétés thermophysiques.	95
Figure IV. 1. Coefficient d'absorption capillaire paramétré en temps de séchage pour les échantillons T-OPM T-OPN et T-4MPa.....	100
Figure IV. 2. Evolution du coefficient d'absorption au cours du temps de séchage pour les échantillons T-OPN, T-OPM et T-4MPa.....	102
Figure IV. 3. Variation de la densité sèche en fonction du temps de séchage.	102
Figure IV. 4. Relation entre le coefficient d'absorption et la succion.	104
Figure IV. 5. Evolution du coefficient d'absorption en fonction de la teneur en eau initiale.	105
Figure IV. 6. Evolution du coefficient d'absorption en fonction du degré de saturation initial.	106
Figure IV. 7. Chemins séchage -humidification (T-OPM, T-OPN et T-4MPa).	108
Figure IV. 8. Teneur en eau normalisée en fonction de la succion des sols compactés à l'optimum Proctor ou Proctor modifié comparé avec les résultats T-OPM et T-OPN.	109
Figure IV. 9. Evolution de la conductivité hydraulique saturée à l'eau au cours de séchage du des échantillons T-OPM, T-OPN et T-4MPa.....	110
Figure IV. 10. Les courbes caractéristiques des échantillons compactés à T-OPM T-OPN et T-4MPa.....	111
Figure IV. 11. Variation de la conductivité hydraulique non saturé en fonction de la succion des échantillons T-OPM, T-OPN et T-4MPa.....	112
Figure IV. 12. Variation de la conductivité hydraulique non saturée en fonction du coefficient d'absorption d'eau.	113
Figure IV. 13. Les courbes de front capillaire des échantillons compactés à T-OPM, T-OPN et T-4MPa.....	115
Figure IV. 14. Courbes de la droite de régression entre la masse et le temps des échantillons compactés à T-OPM.	116
On note que la pente des équations est pratiquement identique (entre 0.04 et 0.05) et l'intersection des droites de régression avec l'axe des ordonnées reste comprise entre 0.67 et 0.75 W.m ⁻¹ .K ⁻¹ . Cette valeur peut être définie comme étant la conductivité thermique à sec λ_{sec} (Chabriac, 2014). Ainsi une relation globale, indépendamment de l'état de compacité initiale, peut être proposée pour notre matériau (équation IV-23). Cette indépendance vis-à-vis de la l'état initial de compacité peut être expliquer par les faibles variation de la densité sèche au cours du processus de séchage (Figure IV. 15).....	119
Figure IV. 16. Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau initiale.	119
Figure IV. 17. Comparaison entre variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau de cette étude et autres de la littérature.	120
Figure IV. 18. La variation de la conductivité thermique en fonction du degré de saturation initial.....	121
Figure IV. 19. L'effet du séchage sur la conductivité thermique.	122
Figure IV. 20. Evolution de la conductivité thermique en fonction du degré de saturation pour différents matériaux.	123
Figure IV. 21. La conductivité thermique de notre matériau comparée à celle d'autres matériaux de construction.....	123
Figure IV. 22. Variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur en eau initiale et du degré de saturation initial.....	126
Figure IV. 23. Variation de l'effusivité thermique en fonction de la teneur en eau et du degré de saturation initial.	128

Figure. V. 1. Evolution de la densité sèche en fonction du temps de séchage pour l'ensemble des échantillons bruts et stabilisés.	135
Figure. V. 2. Coefficient d'absorption capillaire paramétré en temps de séchage pour les échantillons TC-OPM, TC-OPN, TC-4MPa.....	137
Figure. V. 3. Evolution du coefficient A_w en fonction du temps de séchage pour les échantillons stabilisés et non stabilisés.....	138
Figure. V. 4. Evolution du coefficient d'absorption en fonction de la succion initiale pour les échantillons stabilisés et non stabilisés.....	139
Figure. V. 5. Relation teneur en eau en fonction du coefficient d'absorption A_w pour les échantillons stabilisés et non stabilisés.....	140
Figure. V. 6. Relation entre le degré de saturation et le coefficient d'absorption A_w pour les échantillons stabilisés et non stabilisés.....	141
Figure. V. 7. Les courbes caractéristiques des échantillons stabilisés et non stabilisés.	143
Figure. V. 8. Évolution de K_{sat} en fonction du temps de séchage.	144
Figure. V. 9. Variations de la conductivité hydraulique non saturée en fonction de la succion des échantillons stabilisés et non stabilisés.....	145
Figure. V. 10. Relation entre la conductivité hydraulique non saturée et le coefficient A_w ...	146
Figure. V. 11. Front capillaire des échantillons non stabilisés et stabilisés.	147
Figure. V. 12. Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau initiale.	150
Figure. V. 13. Variation de la conductivité thermique en fonction de degré de saturation initial.....	151
Figure. V. 14. Evolution de la capacité volumique thermique en fonction du degré de saturation et de la teneur en eau initiale.	153
Figure. V. 15. Effet de la teneur en eau et du degré de saturation sur la diffusivité thermique.	155
Figure. V. 16. Influence de la teneur en eau et du degré de saturation sur l'effusivité thermique.....	156

Listes de tableaux

Tableau I. 1. les opérations de construction en terre en Algérie(CRENIB, 1992).	8
Tableau I. 2. Quantité d'énergie nécessaire à la production d'un mètre cube de certains matériaux. (Revue « maison écologique », N° 11 : octobre-novembre 2002,p 22. Cité par Hacène, 2012)	15
Tableau I. 3. Comparaison des cycles de vie d'un mur en BTC à un mur en parpaing et un mur en béton armé. (Van Houdenhove, 2012)	15
Tableau I. 4. Caractéristiques thermiques de quelques matériaux. (Cérézo, 2005).....	16
Tableau I. 5. Normes et recommandations destinées la fabrication de BTC (Delgado, 2007).	22
Tableau I. 6. Pourcentage du tamisat de chaque classe du sol selon fuseau granulométrique de la norme (XP P13-901).	23
Tableau I. 7. L'ensemble des caractéristiques de granulométrie et de plasticité des sols utilisés dans la fabrication de BTC dans la littérature.	26
Tableau I. 8. La densité sèche et la teneur en eau de malaxage de la matière première de BTC.	28
Tableau I. 9. Normes et recommandations pour la teneur des sels dans un matériau en terre. (Schroeder ,2012)	30
Tableau. III. 1. Paramètres physiques de matériaux étudiés.....	74

Tableau. III. 2. La surface spécifique des argiles selon (Young et Waikentin, 1975 ; Zelazny et Calhoun, 1977; Mitchell,1993).....	80
Tableau. III. 3. Les valeurs des optimums de Proctor (PN et PM) du tuf de Béni-Saf.....	81
Tableau. III. 4. Les valeurs des optimums du compactage dynamique et statique.	83
Tableau. III. 5. Les solutions salines saturées de la série C utilisées pour déterminer la perméabilité à la vapeur.	92
Tableau. IV. 1. Les caractéristiques initiales des échantillons non stabilisés (série 1).	99
Tableau. IV. 2. Exemple de valeurs de A_w obtenues dans la littérature.	103
Tableau. IV. 3. Les caractéristiques initiales des échantillons compactés.	106
Tableau. IV. 4. Variation des paramètres d'état en fonction du domaine de succion sur chemin de séchage-humidification.	107
Tableau. IV. 5. Les valeurs de conductivité hydraulique saturées et les paramètres de l'équation de Van Genuchten (VG).....	110
Tableau. IV. 6. Valeurs de perméabilité à la vapeur δ et le facteur de résistance à la vapeur d'eau μ	116
Tableau. IV. 7. Valeurs du facteur de résistance à la vapeur d'eau de la littérature.....	117
Tableau. IV. 8. Caractéristiques initiales des échantillons non stabilisés (série 2).	118
Tableau. IV. 9. Les capacités thermiques volumique et massique ainsi que la diffusivité thermique des échantillons testés.	124
Tableau. IV. 10. Récapitulation des résultats hydriques et thermiques.....	130
Tableau. V. 1. Caractéristiques du compactage du tuf de Béni-Saf non stabilisé et stabilisé à 4% chaux.....	133
Tableau. V. 2. Analyse physico-chimique de la chaux vive utilisée dans cette étude issue de la région de Hassasna à Saida (Izemmouren, 2016).....	133
Tableau. V. 3. Les caractéristiques initiales des échantillons stabilisés à la chaux (série 3)...	134
Tableau. V. 4. Les valeurs du coefficient d'absorption par capillarité A_w des échantillons stabilisés et étuvés à 105°C.....	136
Tableau. V. 5. Les caractéristiques initiales des échantillons compactés et stabilisés.....	141
Tableau. V. 6. La variation de la teneur en eau volumique pour chaque domaine de succion.	142
Tableau. V. 7. Paramètres d'ajustement de l'équation de (Van Genuchten, 1980)(VG).....	142
Tableau. V. 8. Les caractéristiques initiales des échantillons stabilisés.	148
Tableau. V. 9. La capacité thermique volumique et massique des échantillons (T) et (TC). .	152

Listes symboles

w	Teneur en eau (%)
A	La surface de la face immergée des échantillons (m ²)
A _t	La section traversée (m ²)
a, n, m	des paramètres d'ajustement
A _{scf}	Surface de la couche filtrante (m ²)
A _w	Le coefficient d'absorption par capillarité (Kg.m ² .s ^{-1/2})
C	La capacité volumique thermique (J. m ⁻³ . K ⁻¹)
C	La chaleur spécifique volumique (J.m ⁻³ .K ⁻¹)
C _c	coefficient de courbure
C _{PEG}	La concentration de PEG en g PEG/g d'eau
C _s et C _w	La capacité thermique massique de solide et de l'eau (J. m ⁻³ .K ⁻¹)
C _u	coefficient d'uniformité

D	La diffusivité thermique (m^2/s)
D_{10}	Diamètre effectif des particules qui correspond à 10 % de passants (mm)
D_{30}	Diamètre effectif des particules qui correspond à 30 % de passants (mm)
D_{60}	Diamètre effectif des particules qui correspond à 60 % de passants (mm)
D_{max}	Diamètre maximale des granulats (mm)
e	Indices de vides
E_{app}	L'énergie appliquée (kJ)
ep	L'épaisseur de l'échantillon (m)
F(x)	La force appliquée (kN)
G	Le débit de vapeur d'eau (kg/s)
G	La variation de masse Δm (Kg) de l'échantillon sur l'intervalle de temps Δt (s)
i	Gradient hydraulique
I_p	Indice de plasticité (%)
K_{sat}	La conductivité hydraulique à saturation (m/s)
K_u	la conductivité hydraulique non saturée (m/s)
l	Le coefficient généralement pris égal 0.5
m_1	La masse du pycnomètre vide (g)
m_2	La masse du pycnomètre contenant l'échantillon(g)
m_3	La masse du pycnomètre au cours de l'essai(g)
m_4	La masse du pycnomètre rempli d'eau jusqu'au trait(g)
Q	Volume par unité de temps, (débit), (m^3/s)
Q_m	La quantité de bleu de méthylène (g)
Q_s	La quantité du sol (g)
R^2	Coefficient de régression
S	La sorptivité ($L/T^{1/2}$)
S_r	Degré de saturation (%)
S_{ri}	Degré de saturation initial (%)
Sst	La surface spécifique (m^2/g)
t	La durée d'immersion (s)
V	Le volume final de l'échantillon (m^3)
w	La perméance ($Kg.m^{-2}.s^{-1}.Pas^{-1}$)
w_i	Teneur en eau initiale
W_L	limite de liquidité (%)
W_P	limite de plasticité (%)
w_{SL}	Teneur en eau de retrait (%)
x	Le déplacement (mm)
Δh	La différence de potentiel hydraulique (m)
Δl	La longueur de l'échantillon (m)
ΔP_v	Le gradient de pression de vapeur d'eau calculé à partir des mesures de température et d'humidité relative
Δt	Variation du temps (s)
ΔV	Variation du volume traversant l'échantillon (m^3)
A_c	activité d'argile
E_{vol}	La densité énergétique (kJ/m^3)

ρ_s et ρ_w	La masse volumique du solide et de l'eau respectivement (Kg/m^3)
Θ	La teneur en eau volumique effective
θ_r	Teneur en eau volumique résiduelle (m^3/m^3)
θ_s	Teneur en eau volumique de saturation (m^3/m^3)
ϕ	La porosité
Δm_i	La masse d'eau absorbée (Kg)
γ_d	La densité sèche (kN/m^3)
ρ	La masse volumique (kg/m^3)
ψ	La succion (MPa)
ψ_i	La succion initiale (MPa)
ψ_{re}	La succion d'entrée d'air ou de resaturation (MPa)
ψ_{SL}	La succion de retrait en MPa
δ_{air}	La perméabilité à la vapeur d'eau de l'air ($2 \cdot 10^{-10} \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pas}^{-1}$)
$\delta_{matériau}$	La perméabilité à la vapeur d'eau du matériau ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pas}^{-1}$)
λ	La conductivité thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
φ	L'humidité relative à chaque essai (%)
C_p	La chaleur spécifique massique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

RESUME

La présente thèse fait partie d'un projet qui vise à développer une brique de terre comprimée (BTC) à partir d'un matériau local de la région de Béni-Saf (Ouest algérien). Il s'agit de caractériser le comportement hydrique, hygrométrique et thermique de cette BTC. Différents essais expérimentaux ont été conduits en mettant en œuvre divers protocoles expérimentaux parfois innovants. En effet, on a réalisé des essais d'absorption, de séchage humidification, de conductivité hydraulique et de perméabilité à la vapeur d'eau ainsi que des essais de mesure des propriétés thermiques comme la conductivité et la diffusivité thermiques. Différents états initiaux ont été considérés (OPN, OPM et 4 MPa) en explorant l'influence du temps de séchage (de 0 à 28 jours). L'effet du traitement à la chaux sur le comportement hygrothermique a aussi été examiné.

Les résultats montrent que le coefficient d'absorption d'eau est lié à la succion, la teneur en eau ou le degré de saturation, la densité, énergie de compactage. De plus, le comportement thermique est très influencé par l'état hydrique initial des échantillons compactés. L'incorporation de 4% de la chaux induit une augmentation du coefficient d'absorption, de la conductivité hydraulique saturée et non saturée, et la réduction des paramètres thermiques tel que la conductivité et la diffusivité.

Mots clés :

Sol compacté, succion, absorption, séchage-humidification, propriétés thermiques, comportement hygrothermique, brique de terre comprimée, traitement à la chaux.

ABSTRACT

The present thesis is part of a project, which aims to develop a of a compressed earth brick (CIB) from a local material of the region of Beni-Saf (West Algeria). The objective is to characterize the hydric, hygrometric and thermal behavior of this BTC. Various experimental tests were conducted by applying various experimental protocols that are sometimes innovative. Indeed, we carried out tests of absorption, drying-wetting, hydraulic conductivity and vapor permeability as well as tests of measurement of the thermal properties like the thermal conductivity and diffusivity. Different initial states were considered (OPN, OPM and 4 MPa) by studying the influence of drying time (from 0 to 28 days). The effect of lime treatment on hygrothermal behavior was also examined.

The results show that the water absorption coefficient is related to suction, water content or saturation degree, density, compaction energy. In addition, the thermal behaviour is strongly influenced by the initial water state of the compacted samples. The incorporation of 4% of the lime induces an increase in the absorption coefficient, saturated and unsaturated hydraulic conductivity and reduction of thermal parameters such as conductivity and diffusivity.

Key words:

Compacted soil, suction, absorption, drying-wetting, thermal properties, hygrothermal behavior, compressed earth brick, lime treatment.

ملخص

هذه المذكرة تندرج ضمن مشروع يعتمد على تطوير الطوب الترابي المضغوط (BTC) من مادة محلية من منطقة بني صاف (غرب الجزائر). الهدف هو وصف السلوك الهيدروليكي والحراري لهذا BTC. تم إجراء العديد من الاختبارات التجريبية من خلال تنفيذ العديد من البروتوكولات التجريبية و المبتكرة في بعض الأحيان، وكل ما يتعلق بأداء الامتصاص والتشبع بالماء والتجفيف والناقلية الهيدروليكية واختبارات نفاذية بخار الماء أو حتى اختبارات قياس الخواص الحرارية مثل الناقلية الحرارية وسرعة انتشار الحرارة. تم العمل على الحالات الأولية المختلفة (OPN، OPM و 4MPa) في استكشاف تأثير مدة التجفيف (من 0 إلى 28 يومًا). كما تم معرفة تأثير معالجة التراب بالجير على السلوك الهيدروليكي و الحراري. وتبين النتائج أن معامل امتصاص المياه يتصل بالامتصاص، أو محتوى الماء أو درجة التشبع، أو الكثافة، أو طاقة الضغط. وبالإضافة إلى ذلك، يتأثر السلوك الحراري بشدة بالحالة المائية الأولية للعينات المضغوطة BTC. إن دمج 4% من الجير يؤدي إلى زيادة معامل الامتصاص، المشبع وغير المشبع في التوصيل الهيدروليكي والحد من العوامل الحرارية مثل التوصيل والانتشار.

الكلمات الدالة :

تراب مرصص ، امتصاص ، تجفيف - التشبع بالماء ، خواص حرارية ، سلوك هيدروليكي و حراري ، طوب مضغوط ، المعالجة بالجير.

INTRODUCTION GENERALE

Depuis longtemps, la terre crue a été utilisée comme matériaux de construction à cause de sa disponibilité et de son abondance. Cette utilisation de la terre crue en tant que matériau de construction a été entreprise avec plusieurs modes constructifs comme l'adobe, la bauge, le torchis, le pisé, les blocs damés et, récemment, la brique de terre comprimée (BTC). Ce matériau de construction présente de nombreux avantages. D'abord, c'est une matière naturelle qui évite la consommation d'énergie grise nécessaire à la fabrication des matériaux traditionnels comme le béton. En Algérie, la consommation d'énergie finale des bâtiments représente plus de 34% de la totalité d'énergie consommée (El Hassar, 2016). Selon (APARUE) entre 2016 et 2017, le secteur « Industries et BTP » a connu une hausse de la consommation de 7,6%, passant de 9,2 M Tep (Million de tonnes équivalentes de pétrole) à 9,9 M Tep, suite à la hausse de la consommation du sous-secteur des matériaux de construction (+7,5%).

De ce fait, l'orientation vers la terre peut diminuer considérablement cette consommation en raison de sa disponibilité, son transport moins coûteux et sa faible énergie grise. Sa disponibilité partout et en grande quantité minimise le transport et les inconvénients qu'il induit (consommation d'énergie grise, surcoûts).

L'inconvénient majeur de la terre crue est lié à sa faible durabilité. Ainsi, de nombreuses anciennes constructions en terre sont aujourd'hui des vestiges à cause des pluies battantes et des fluctuations de température. De ce fait, l'étude de ses propriétés est très importante avant son utilisation comme matériau de construction. L'évaluation de ses caractéristiques hygrothermiques est également importante afin d'estimer son aptitude aux échanges hygrométriques et thermiques avec l'environnement extérieur.

L'objectif de cette thèse est d'abord de réaliser une caractérisation complète d'un matériau local, à savoir le tuf de Béni-Saf afin de vérifier son adaptation à la fabrication d'une brique de terre comprimée (BTC). Ensuite, il a été question d'étudier le comportement hygrothermique de ce matériau compacté à différentes énergies de compactage et de caractériser l'influence de son état initial notamment la succion, la teneur en eau et le degré de saturation. La succion est en effet un paramètre pertinent puisqu'il s'agit d'un paramètre de loi de comportement qu'il soit considéré comme une variable indépendante ou comme un élément dans une combinaison pour une contrainte effective généralisée. Le matériau d'étude a été considéré à l'état naturel et traité à la chaux.

Le manuscrit est structuré en cinq chapitres. Les deux premiers chapitres constituent l'analyse bibliographique.

Le chapitre 1 présente un aperçu général sur l'utilisation de la terre crue comme matériau de construction à travers le monde et en particulier en Algérie. Ensuite, on aborde les principaux avantages et inconvénients du matériau terre ainsi que les critères de sélection adoptés pour la fabrication des briques de terre comprimée.

Le deuxième chapitre est dédié à la présentation des travaux scientifiques antérieurs liés aux propriétés physiques (aspects de compactage), hydriques et thermiques du matériau terre brut et stabilisé, notamment avec la chaux et le ciment.

L'étude expérimentale est déclinée en trois chapitres.

Le troisième chapitre consiste à présenter les résultats de sélection et d'identification du matériau d'étude, à savoir le tuf de Béni-Saf, ainsi que les différentes techniques utilisées dans la caractérisation hydrique et thermique de ce matériau. Les essais hydriques projetés correspondent à des essais d'absorption capillaire, les essais de mesure de la conductivité hydraulique saturée et non saturée ainsi que la perméabilité à la vapeur d'eau et les essais de séchage-humidification. On présente aussi les techniques de mesure des paramètres thermiques tel que la conductivité thermique, la capacité thermique massique et volumique ainsi que la diffusivité thermique en régime transitoire.

Les deux derniers chapitres abordent les principaux résultats expérimentaux obtenus sur le tuf de Béni-Saf brut (chapitre 4) et stabilisé à 4% de chaux (chapitre 5). Ces résultats porteront essentiellement sur l'influence des conditions initiales en termes d'énergie de compactage, teneur en eau, degré de saturation et succion sur les caractéristiques hydriques et thermique du matériau étudié. L'effet de la chaux sur ces propriétés sera illustré à travers une comparaison entre les résultats obtenus sur des échantillons stabilisés et non stabilisés.

Enfin, la thèse sera clôturée par une conclusion générale qui est une synthèse des principaux résultats obtenus ainsi que des perspectives pour les travaux futurs.

CHAPITRE I :

Généralités sur la construction en terre

1 Introduction

Les premières tentatives de construire en terre par l'homme ont été effectuées depuis longtemps. Comme le bois et la pierre, la terre a été utilisée dans le passé comme un noble matériau. Actuellement, l'orientation vers l'utilisation des matériaux naturels et écologiques dans les bâtiments est devenue une nécessité. Les matériaux de construction à base de la terre crue constituent une alternative très intéressante par rapport aux matériaux traditionnels tels que le béton et l'acier, notamment du point de vue économique, écologique et du confort hygrothermique.

A travers l'histoire, plusieurs techniques de construction en terre ont été élaborées dans le monde. Parmi ces techniques on cite par exemple : l'adobe, le torchis, la bauge, le pisé, la brique de terre comprimée (BTC).

Dans ce chapitre, nous avons essayé de donner un rappel de certains anciens édifices historiques, en montrant les techniques les plus utilisées dans le monde. Par la suite, nous allons présenter les normes et recommandations qui préconisent la granularité, la plasticité, le compactage, la teneur en sulfate adéquat à la fabrication des matériaux de terre.

2 Rappel historique sur la construction en terre dans le monde

L'histoire de la terre crue est très vaste. Elle est l'un des principaux matériaux de construction utilisés par l'homme depuis le néolithique. Les différentes procédures de constructions à travers l'histoire sont liées aux conditions de vie et la disponibilité des matériaux sur place. Les grandes civilisations perses, assyriennes, égyptiennes et babyloniennes sont parmi les premiers qui ont utilisés la terre comme matériau noble dans les constructions.

En 814 avant J-C, la première construction en pisé a été érigée à Carthage en Tunisie ([Champiré, 2018](#)). Cette construction en pisé, c'est une tradition vieille de 11000 ans ([Serbah, 2018](#)). En Allemagne (Weilburg) on trouve un bâtiment de 5 étages en pisé 1841 ([Chabriac, 2014](#)). En plus, en Espagne, la muraille de l'Alhambra construite en pisé au 14^{ème} siècle ([Walker et col, 2004](#)). En France, 40% de la construction dans la région Rhône-Alpes sont en pisé ([Collectif FFB, 2012](#))

Selon ([Unesco.org](#)), entre le XII^{ème} et la fin du XV^{ème} siècle, l'oasis de Bahla (tour de brique en terre crue) à Oman doit sa prospérité aux Banu Nabhan. On trouve également l'adobe, plus connue sous l'appellation du 'thob', est une des techniques de construction les plus anciennes. Elle a été utilisée dans la construction de la grande mosquée de Djenne (figure I.1) au XIII^{ème} siècle, rénovée en 1906-1907. La ville de Shibam au Yémen est l'une des plus belles constructions en adobe (figure I.2) datant du XVI^{ème} siècle.

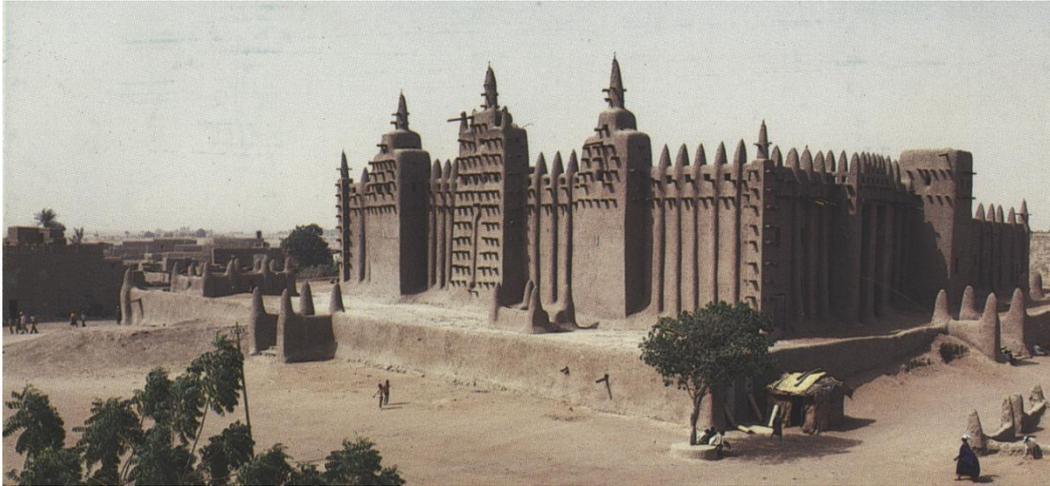


Figure. I. 1. La grande mosquée de Djenne au Mali.

<https://whc.unesco.org>



Figure. I. 2. La ville de Shibam, Yémen. (<https://whc.unesco.org>)

Entre 1945 et 1948, le nouvel village de Gourna (Figure I.3) en Égypte constitue actuellement un héritage archéologique en terre, plus précisément en adobe. Ce village a été conçu par l'architecte égyptien Hassan Fathy (www.archnet.org). Il a été nominé à la World Monuments Watch en 2010. Cette façon de construction en adobe a été apparue en Libye dans lesquelles des maisons traditionnelle en Adobe ont été contruuites (figure).

Depuis 1946-1976, des projets de construction en pisé (reconstruction et agrandissement des villages) ont été lancés en France (la somme, Isère). Un grand projet de 4000 logements en pisé en 1950 pour réfugiés a été programmé et exécuté en Inde (Doat et col, 1979). La construction en pisé est très répandue dans les pays développés à savoir l'Allemagne, USA, Canada, Australie, Corée du nord. En Australie, l'industrialisation du pisé à grande échelle a débuté dans les années 1980 en prenant en compte des normalisations et recommandations de la construction en terre (Paulus, 2015).

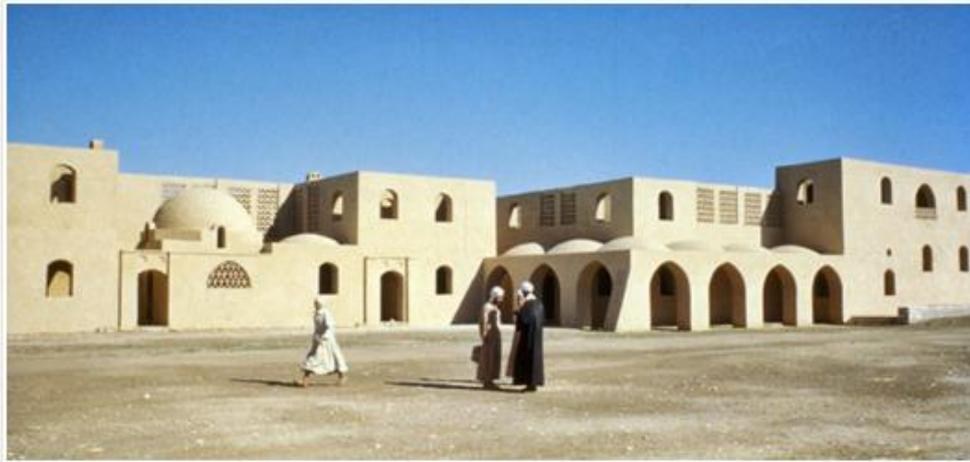


Figure. I. 3. Village de Gurna-Egypte.
(<https://whc.unesco.org>)

3 Rappel historique en Algérie

Timgad est un monument de l'époque romaine (100 apr. J.-C) situé à la wilaya de Batna (Algérie) conçu avec la pierre et le mortier de terre (figure I.5). Des fouilles récentes menées dans la Maison de la Tigresse à Lambèse ont dévoilé l'existence de types constructifs basés fortement sur la terre crue.

La mosquée de Mansourah à Tlemcen (figure I.4) est l'un des monuments historiques les plus connus en Afrique du nord. Elle a été construite en 1303 à base de terre avec la technique du pisé à l'exception du minaret. Le site de Honaïne, Bab al Qarmadin représentent des monuments en pisé qui sont tombés en ruine (figure I.5).

Près de la capitale de l'Algérie (Ténès, Blida, Koléa et Cherchell), en 1492, des constructions en terre avec des murs banchés particuliers à la tabia (figure I.6) ont été batti par des musulmans venant d'Andalousie (Foufa, 2016).



Figure. I. 4. Le muret de Mansourah à Tlemcen.
(<http://dta-tlemcen.dz>)



Figure. I. 5. Site de Honaine, wilaya de Tlemcen, Algérie
Remparts en pisé dont un pan de mur est tombé en ruine (Ghomari, 1999)

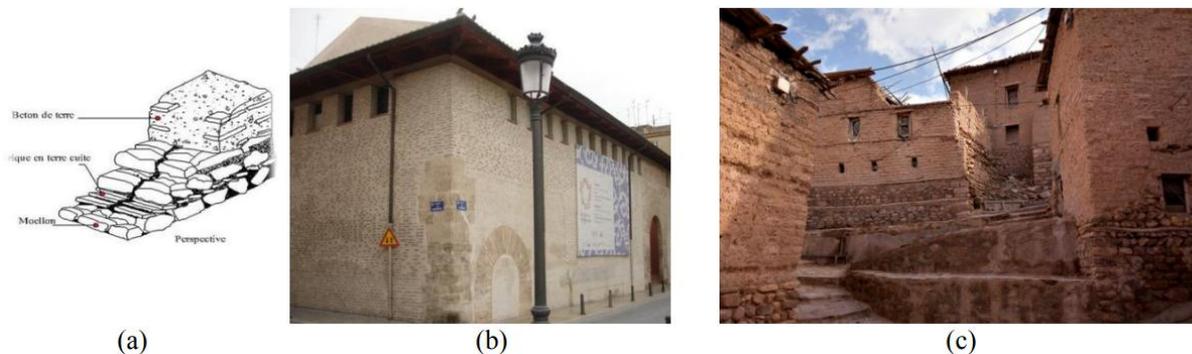


Figure. I. 6. Typologie constructive du pisé renforcé (tabia renforcée)(a) (© [Abdessemed-Foufa Amina,2010](#)); Almudin de Valence en tapia valenciana (b) (© <https://tierrah.wordpress.com> Le 13-05-2015); Mesures constructives sismo-résistantes à Mena-Aurès (c) (© [Kais Djillali. Minsitère de la Culture](#)).

Après l'indépendance, plusieurs programmes constructifs en terre (tableau.I.1) ont été lancés à l'instar du village de sidi Brahim à Sidi Bel Abbès (figure I.7). Il s'agit de la réalisation, en 1973, de 30 maisons en Briques de terre stabilisées (BTS) (Doat et col, 1979).

100 autres logements ont été construits au village de Felliache à Biskra et 40 logements ont été réalisés à Chéraga près d'Alger en blocs de terre comprimée en 1981 (Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment, CNERIB, 1992). Dans les années 1990, le groupe d'entreprise « Hasnaoui » a construit des autres logements en briques de terre stabilisées (BTS) à sidi bel Abbès. Ces constructions ont été programmées par le gouvernement algérien notamment pour diminuer l'exode rural. Ces projets ont été considérablement freinés par le manque des connaissances requises et par l'absence de normes concernant ce type de construction.



Figure. I. 7. Logements collectifs R+1 à Sidi Bel Abbès, Algérie.
(Guettala ,2003)

Dans le sud algérien, la ville ksour de Timimoune est un patrimoine architectural et archéologique de terre crue (construit en thob) et désigne un symbole de la civilisation algérienne dans les époques précédentes. Malheureusement, ce patrimoine a connu des dégradations causées par les pluies battantes et les fluctuations de température. Par la suite, le bâti en terre s'est étendu dans le sud de l'Algérie après le lancement de la production de la brique silico-calcaire (composée de sable et de calcaire).

Tableau I. 1. les opérations de construction en terre en Algérie(CRENIB, 1992).

1969	Réalisation de 136 logements en pisé au village agricole de Bouhlilet à Batna
1971	Une équipe franco-belge réalise à Zéralda un groupe expérimental d'habitations rurales.
1973	30 des 300 logements du village de Mustapha ben Brahim, sont réalisés en pisé
1975	Le village d'Abadla a été construit selon le procédé de la terre remplissant
1976	100 logements du village agricole de Felliache à Biskra sont réalisés en Toub
1980	120 logements du village agricole de Madher à Boussaada sont réalisés en BTS
1981	40 logements sont réalisés à Chérag après d'Alger en blocs de terre comprimée (BTC).
1984	Un prototype bioclimatique fut réalisé à Tamanrasset en BTC. Un prototype fut réalisé au CNERIB en BTC.
1986	10 logements sont réalisés à Adrar en BTC. 10 logements sont réalisés à Reggane en BTC
1994	24 logements sont réalisés à Tamanrasset par l'office de promotion et de gestion Immobilière en BTC. 44 logements sont réalisés par l'ETR de Tamanrasset en BTC.
1998	Un prototype en pisé fut réalisé au CNERIB.
2006	Un projet intitulé «réalisation d'un logement rural avec efficacité énergétique » est lancé au CNERIB et financé par l'union européenne.

La terre a été développée dans l'Algérie dans le cadre de recherche de (CNERIB, 2007), en construisant des logements ruraux en BTC avec une surface de 80 m² (Figure.I.8) pour minimiser le coût de la consommation d'énergie. En plus de plusieurs projets de réhabilitation de constructions en terre à savoir à Timimoune et à Tlemcen (Figure.I.9).



Figure. I. 8. Prototype d'une maison solaire réalisée par le CNERIB (a) (©www.cnerib.edu.dz, Le 14-05-2015); Atelier de formation sur les techniques de fabrication de BTC à Tamanrasset (b)(©prescriptor.info/.../cap-terre-des-ateliers-de-formation-sur-les-techniques, Le 14-05-2015) (Abdessemed-Foufa Amina, 2010)



Figure. I. 9. Restauration de la mosquée Zahra à Béni-Snouss. Tlemcen. Avant (a) et après (b)(© Abdessemed-Foufa Amina, 2010)

4 Les techniques de construction en terre crue

À travers l'histoire, plusieurs techniques de construction en terre ont été développées. Douze techniques, recensées par (Houben et Guillaud, 1995), et illustrées dans la figure I.10, montrent la diversité des techniques de mise en œuvre de la terre crue : remplissage, porteur, garnissage, etc.

Selon (Jeannet et col, 1997, cité dans Salmi, 2014), ces techniques peuvent être classées en trois grandes familles à savoir :

- ❖ Les murs monolithiques (pisé, bauge, etc);

- ❖ Les murs mixtes (terre paille, torchis, etc);
- ❖ Les murs appareillés (briques de terre crue, adobe, etc);

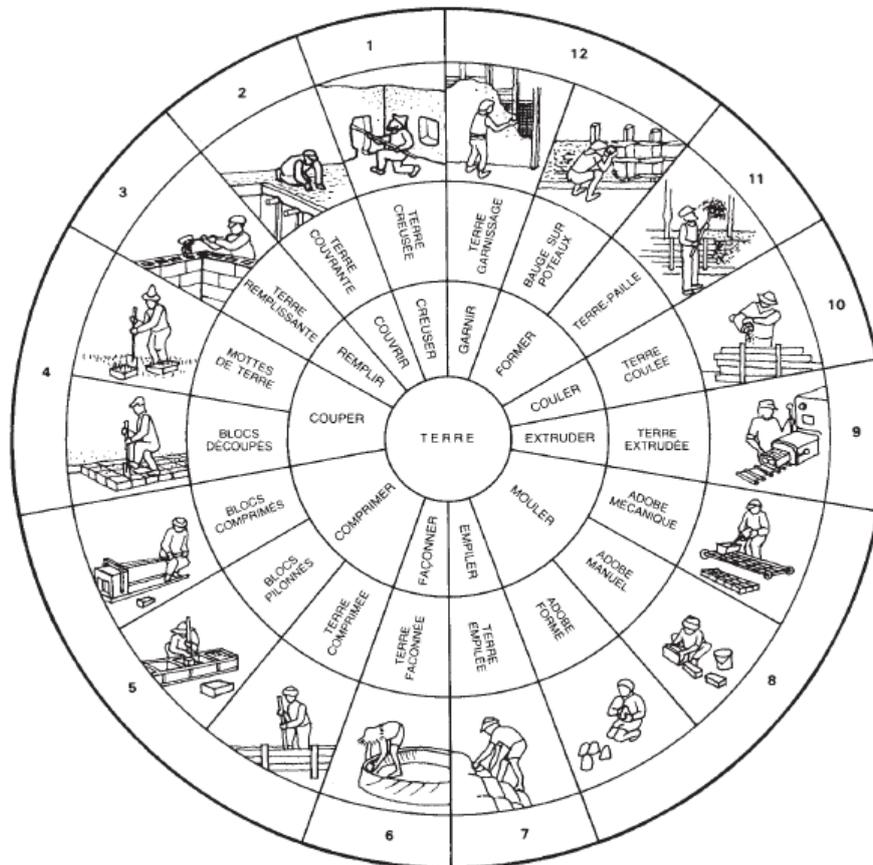


Figure. I. 10. Les techniques de construction et de mise en œuvre de la terre.
(Houben et Guillaud, 1995)

➤ **Le pisé**

La construction en pisé est un procédé de construction de murs en terre crue ou stabilisée le plus répandu dans le monde (Paulus, 2015). Cette technique (figure. I.11) consiste à placer des coffrages (banches) et à introduire la terre humide sans paille. Le mélange est compacté par des dames qui s'appellent les pisoirs, en couches successives qui permettent d'obtenir un mur solide. Le pisé donne un bel aspect esthétique surtout avec une peinture sophistiquée comme le cas de l'ancienne usine en pisé à Saint Simeon de Bressieux (figure I.12) et le pisé du Dauphiné et du lyonnais en France.

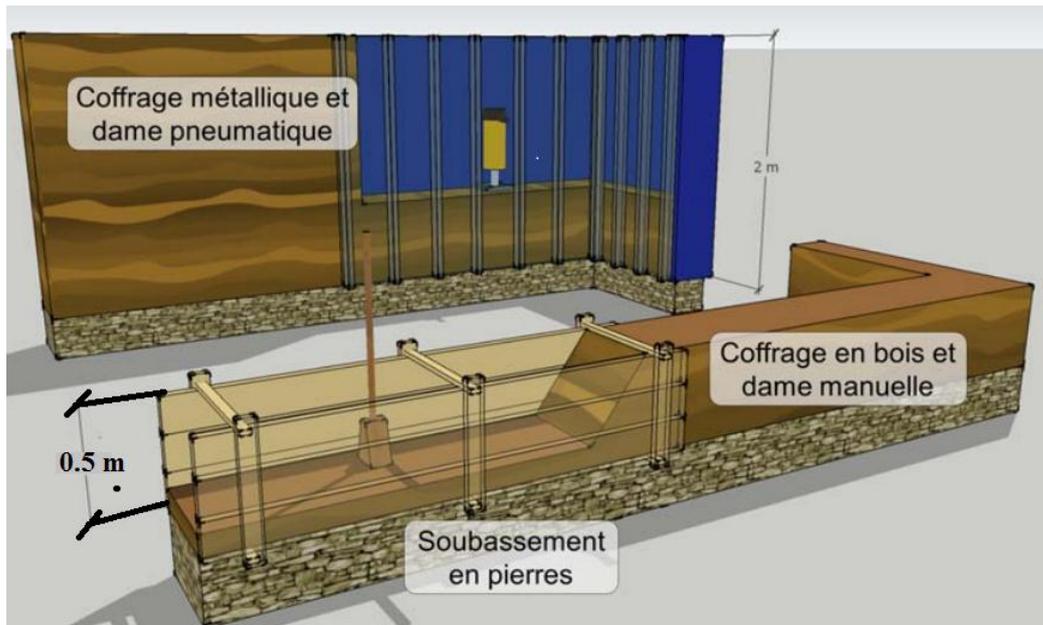


Figure. I. 11. Les outils utilisés dans la fabrication du pisé. (Champiré, 2017)



Figure. I. 12. L'usine en pisé à Saint Simeon de Bressieux dans l'Isère réhabilitée en logements. (Chabriac, 2014).

➤ Le torchis

Le torchis est un procédé de hourdage qui est basé sur la mise en œuvre d'une terre mélangée à la paille sur clayonnage placé dans une ossature porteuse en bois (Pignal, 2005). La terre est utilisée comme matériau de garnissage et mélangée à l'eau jusqu'à ce qu'elle soit plastique puis placée sur des lattis de bois (figure I.13). Cette procédure, qui s'appelle la technique de colombages, est moins utilisée par rapport à d'autres techniques comme l'adobe et la brique de terre.

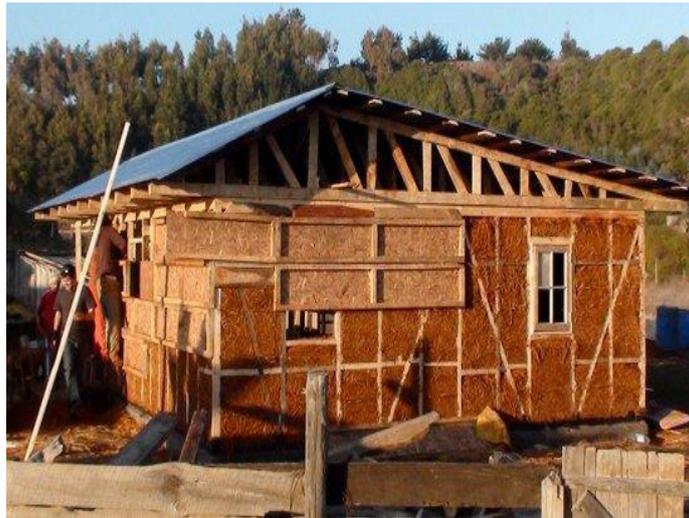


Figure. I. 13. Maison en torchis de paille légère à Pullay, au Chili. (Wafer, 2010)

➤ **L'adobe**

L'adobe ou "thoub" est un matériau de construction composé essentiellement de terre, d'eau et rarement de paille. Ce matériau de construction est une version classique de la brique. La granulométrie de la terre convenable à la fabrication des adobes ne doit pas contenir trop de cailloux. Sa fabrication consiste à couler le mélange terre-eau dans des moules carrés ou parallélépipédiques puis les exposer à l'air libre pour séchage (figure I.14).



Figure. I. 14. Image de fabrication d'adobe.
(<https://associationlevillage.fr>)

➤ **La brique de terre comprimée**

La brique de terre comprimée (BTC) souvent nommée bloc de terre comprimée, est un matériau de construction issu de la procédure de l'adobe. Elle est adaptée aux besoins d'une architecture plus moderne et permet aussi une restauration des architectures de terre dans le monde. La BTC est basée sur la confection des briques par des presses manuelles ou mécaniques. Le mode de fabrication de la brique de terre comprimée est très intéressant pour améliorer le comportement mécanique et hygrothermique.

La BTC offre l'avantage d'être souple dans sa mise en œuvre et résistante notamment après stabilisation. Parmi les plus belles constructions en briques de terre comprimée, on peut citer celles de Mayotte (figure I.15) et en RhôneAlpes, France (figure. II.16).



Figure. I. 15. Constructions en BTC à Mayotte : Préfecture ; Logements sociaux, Ecole.
(Source : craterre.org)



Figure. I. 16. Maison construite avec des BTC (dont la tour est en pisé) en RhôneAlpes, France. (Champire, 2017)

5 Les avantages de la terre crue

Le matériau local à base de terre crue stabilisée ou non présente beaucoup d'avantages. Les principaux intérêts sont axés sur les aspects écologiques, économiques, mécaniques et hygrothermiques.

5.1 Avantages écologiques

Vu que les situations actuelles dans lesquelles le changement climatique s'aggrave de plus en plus, une maison à vocation écologique est devenue incontournable pour offrir des bienfaits environnementaux. Ainsi, l'utilisation du matériau terre comme matériau de construction s'avère d'un intérêt environnemental très important.

Concernant le cycle de vie, la terre pourra prendre le même chemin dans son parcours à savoir : en premier, l'opération d'extraction et d'utilisation jusqu'à la démolition (figure I.17), enfin, la réutilisation en matière de recyclage. Le processus de fabrication des matériaux de construction à la base de la terre crue permet aussi de limiter les émissions de CO₂ en éliminant la phase de calcination à de grandes températures ayant un impact négatif sur l'environnement.

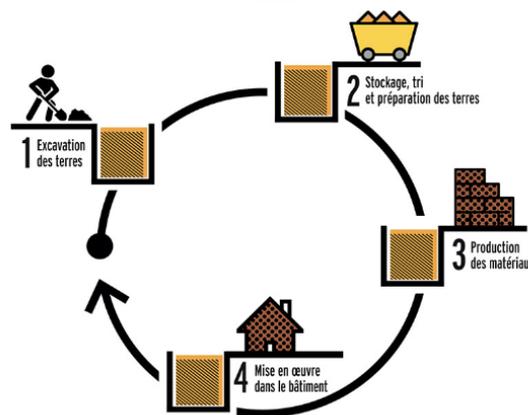


Figure. I. 17. Cycle de vie du matériau terre. (<https://www.cycle-terre.eu/>)

5.2 Avantages économiques

En Algérie, la consommation d'énergie finale des bâtiments représente plus de 41% de la totalité d'énergie (APRUE, 2017). Le bilan énergétique national (année 2017) du ministère de l'énergie montre que l'électricité représente un tiers de la consommation totale (figure I.18).

D'un point de vue énergétique, le tableau (Tableau I.2) liste l'énergie requise pour produire un mètre cube de matériaux de construction parmi les plus employés. Les valeurs des énergies consommées lors de la fabrication de matériaux de construction comme l'acier et la brique cuite sont alarmantes. Par contre, les matériaux en terre crue telle que la brique compactée et le pisé nécessitent une quantité ne dépassant pas 120 kWh/m³. L'analyse et la comparaison de ces résultats avec les chiffres du (Tableau I.3) ont ouvert le débat dans le

monde afin de répondre à cette préoccupation importante dans le domaine de la construction.

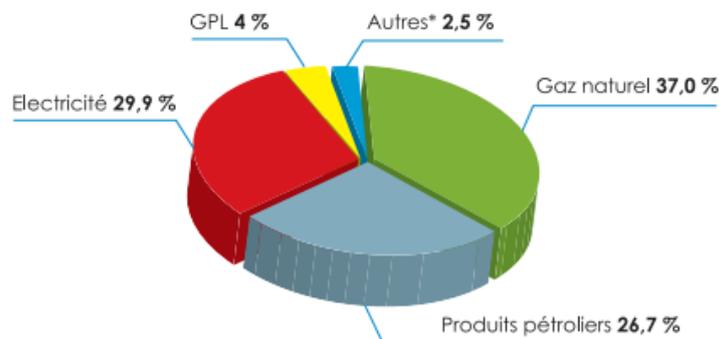


Figure. I. 18. La consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment en Algérie. (APRUE, 2017).

Tableau I. 2. Quantité d'énergie nécessaire à la production d'un mètre cube de certains matériaux. (Revue « maison écologique », N° 11 : octobre-novembre 2002,p 22. Cité par Hacène, 2012)

Matériaux de construction plus utilisés	kWh/m ³
Acier	57000
Panneau fibre bois dur	3800
Béton ordinaire	500
Plaque de carton plâtre	850
Brique de terre cuite	700
Laine de verre	250
bois d'oeuvre	180
Brique de terre comprimée	100-120
Terre crue et la paille	25-30

Tableau I. 3. Comparaison des cycles de vie d'un mur en BTC à un mur en parpaing et un mur en béton armé. (Van Houdenhove, 2012)

Contenu en énergie	Mur en BTC	Mur maçonnerie parpaing + enduit ciment	Mur en béton armé
En équivalent en litres de diesel	5.9	10.2	25.5
En MJ (Méga joules)	211	363	912
Valeurs comparatives	1	2	4

5.3 Avantages thermiques

L'isolation thermique est une propriété permettant d'améliorer le confort thermique constructif. Un bâti en terre doit se conformer aux règlements thermiques : [DTR-C.3.2\(Algérie\)](#), [DTR-C.3.4 \(Algérie\)](#), [RT 2012 \(France\)](#) etc... Le tableau. I.4 représente les caractéristiques thermiques de différents matériaux. Les mesures de conductivité thermique des blocs de terre crue comprimée ([Zhang et col, 2018](#) ; [Oti et col, 2010](#) ; [El Fgaier et col, 2015](#) ; [Liuzzi et col, 2013](#) ; [Ouedraogo et col, 2015](#)) donnent des valeurs qui ne dépassent pas 0.8 (W.m⁻¹.K⁻¹).

Le tableau I.4 montre l'ensemble des caractéristiques thermiques (la capacité thermique massique, la conductivité thermique et la diffusivité thermique) de différents matériaux de construction. On remarque par exemple, que la conductivité thermique des blocs de terre comprimée est inférieure à celle du béton (béton hydraulique) et la brique cuite, ce qui offre des meilleures conditions d'isolation thermique.

Tableau I. 4. Caractéristiques thermiques de quelques matériaux. ([Cérézo, 2005](#)).

Matériaux	ρ (kg/m ³)	Porosité	C _p (J/Kg.K)	λ (W/m.K)	D (m ² /s)
Cuivre	8900	-	390	400	1.2 E-04
Contre-plaqué	700	-	1500	0.12	1.1 E-07
Béton hydraulique	2330	8%	1050	1.8 à 20	7.4 à 8.2 E-07
Béton d'argile expansé	1600	36%	900	0.46	3.2 E-07
Béton cellulaire	350 à 650	75 à 82%	880	0.16 à 0.33	5.2 à 5.8 E-07
Béton de bois	600 à 900	52%	1200	0.09 à 0.3	1.2 à 2.8 E-07
Brique de terre cuite	1800	-	860	1.15	7.40E-07
Terre compactée	1600 à 2200	-	960 à 2200	0.5 1.7	3.4 E-07

5.4 Les inconvénients de la terre crue (non stabilisée)

À l'exemple des ksour dans le Sahara algérien (figure I.19), la construction en terre souffre d'une sensibilité flagrante vis-à-vis de l'eau (pluie battante, capillarité, etc.). Son caractère hydrophile est considéré comme le point faible de la terre crue.

Le village de Ait Itchir en pisé dans la wilaya de Tizi Ouzou a souffert de plusieurs désordres engendrés principalement par le climat et le séisme (47% de pathologies sont dus à la pluie battante et les vents ainsi que 23% par le séisme) (Salmi, 2014).

Un deuxième exemple concernant des essais d'absorption par capillarité ont été effectués par (Flament, 2017) sur des briques comprimées composées d'une mixture d'argile et de calcaire ($w_L=33\%$, $I_p=12\%$). Un délitement a été observé lors du contact entre l'échantillon et l'eau (Figure I.20). Ces exemples montrent la fragilité des échantillons vis-à-vis de l'eau et la nécessité d'un traitement par un stabilisant adéquat.



Figure. I. 19. Un exemple de Ksar dans le Sahara algérien (Timimoune) (Zerari et col, 2019)



(a) Echantillon en contact avec l'eau

(b) Un délitement de l'échantillon

Figure. I. 20. Brique après le test d'absorption d'eau par capillarité. (Flament, 2017)

À partir d'une étude sur la durabilité de la brique de terre comprimée, (Ghomari, 1989) a formulé les recommandations suivantes:

- ❖ Le choix judicieux de la terre (granulométrie, plasticité) ;
- ❖ Un traitement de surface (enduits, badigeons, hydrofuges) contre les pluies battantes ;

- ❖ L'amélioration de la sensibilité à l'eau par un stabilisant physico-chimique (compactage+ traitement).

6 Les techniques de stabilisation

Il existe plusieurs types de stabilisation afin d'améliorer le comportement thermo-hydro-mécanique d'un matériau en terre compactée. La densification avec à une énergie de compactage est une phase indispensable. Dans le cas de la médiocrité du matériau, une stabilisation est préconisée. Selon (Doat et col, 1979), cette stabilisation peut se traduire par un ajout de ciment, de la chaux ou du bitume et se fait suivant des fuseaux granulométriques (figure I. 21) et de plasticité du sol utilisé (figure. I 22).

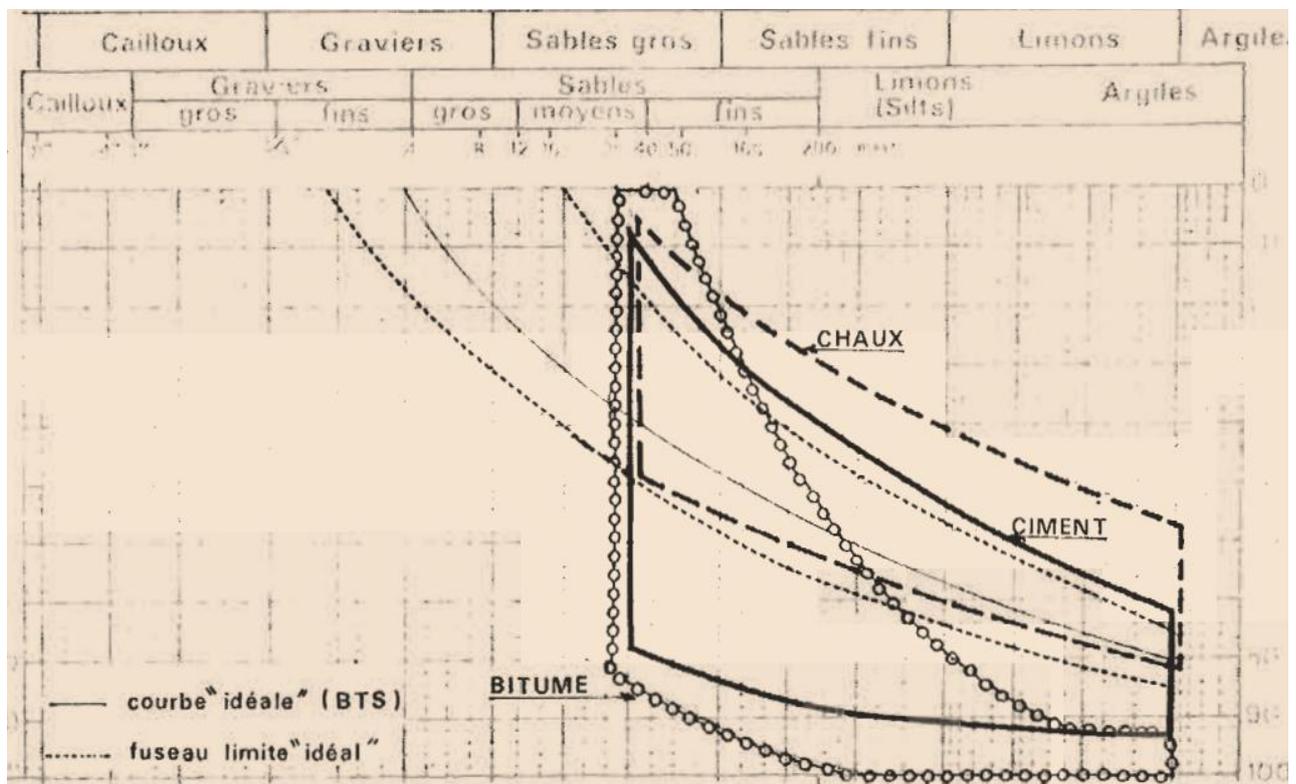


Figure. I. 21. Stabilisants et fuseaux granulométriques. (Doat et col, 1979).

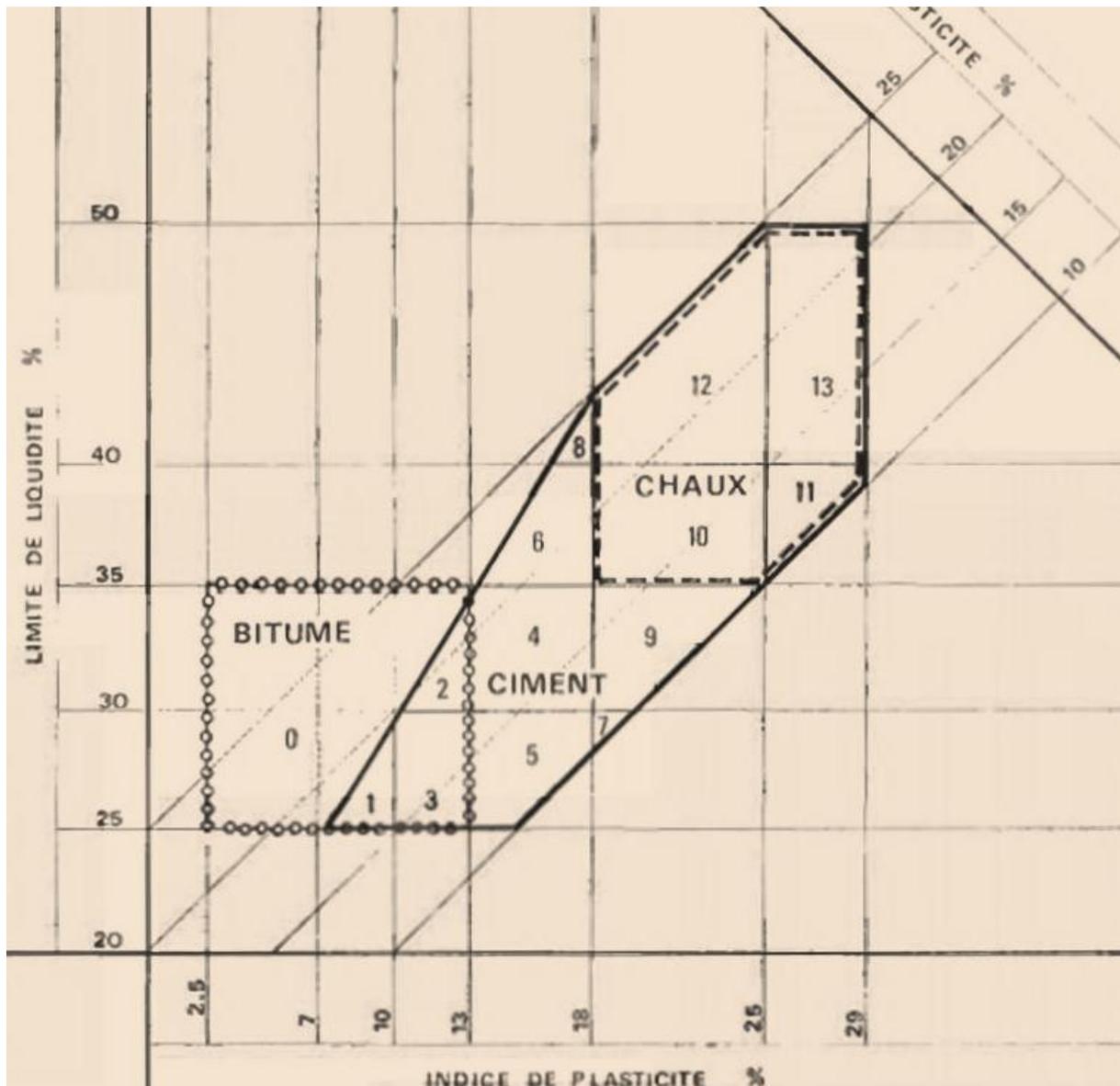


Figure. I. 22. Stabilisants et limites d'Atterberg. (Doat et col, 1979).

6.1 Compactage et dessiccation

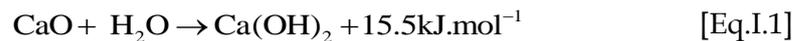
Le compactage consiste à densifier le matériau mélangé à une teneur en eau présumée par une compression uniaxiale (par vibro-compression, dynamique et statique). Cette densification est obtenue par augmentation de l'énergie de compactage qui réduit l'écartement entre les particules et augmente les pressions de contact qui sont de types répulsives et attractives (Lambe, 1958).

En outre, la dessiccation est une opération très utilisée dans le domaine de la construction en terre comme l'adobe séché au soleil. (Taallah, 2014 ; Izemmouren, 2013, Hakimi, 1996 ; Soudani et col, 2016 ; Miraucourt, 2017) ont procédé à une cure des blocs de terre comprimée afin d'améliorer le comportement hydromécanique et thermique. Pour augmenter la résistance mécanique, des blocs doivent être conservés à l'abri du soleil et du

vent direct et placés dans une humidité relative très élevée puis séchés l'air libre pendant 14 jours selon les études ont été entrepris par (CRA-Terre-Rigassi, 1995) pour éviter l'apparition de microfissures dû au retrait suite à un séchage accéléré.

6.2 Stabilisation à la chaux

La chaux vive est fabriquée à partir de la calcination de calcaire CaO. La chaux éteinte (CaOH)₂ est obtenue par hydratation de la chaux vive selon la réaction chimique donnée par l'équation I. 1.



L'ajout de la chaux à un sol provoque une modification de la microstructure de la terre suivant des processus (la saturation de la capacité d'échange cationique, la floculation/agglomération, réaction pouzzolanique et carbonatation). Ces processus physico-chimiques ont un effet très important sur la variation du comportement d'un matériau. Une quantité de l'ordre de 6 à 12 % est employée généralement pour stabiliser la terre crue (CRAterre-Rigassi, 1995).

Parmi les avantages de la stabilisation à la chaux on peut citer (CRAterre-Rigassi, 1995) :

- Une quantité de chaux éteinte de 2% peut diminuer la nocivité de la matière organique ainsi que l'ajout d'un pourcentage 0.3 à 2% de calcite accélère la prise du ciment.
- La réaction exothermique produite lors de l'ajout de la chaux vive peut enlever les moisissures de 0.5 à 1%.

6.3 Stabilisation au ciment

Malgré le coût de fabrication du ciment reste une solution pour pallier à la sensibilité de l'eau (gonflement, retrait, érosion).

Parmi les avantages de la stabilisation au ciment, on cite :

- Elle permet de diminuer le retrait, en augmentant le pourcentage du ciment (Doat et col, 1979).
- Elle diminue la profondeur des trous lors des essais de l'érosion (un pourcentage peut minimiser l'effet de l'érosion des échantillons de terre) (Doat et col, 1979).
- Elle augmente la résistance à la compression en présence de l'eau.

Dans la littérature, la stabilisation de terre crue avec des teneurs en ciment ne doit pas dépasser 12% et ceci notamment pour des raisons économiques. Il est aussi conseillé d'utiliser le ciment avec des sols sableux (Doat et col, 1979).

(Jayasinghe et Kamaladasa, 2007 ; Olivier et Mesbah, 1986 ; Walker et Stace, 1997 ; Kouakou et col, 2009 ; Seco et col, 2018) ont procédé un traitement au ciment pour améliorer

le comportement mécanique des briques de terre comprimée. Dans toutes ces études, l'ajout du ciment lors du compactage engendre une diminution de la densité sèche maximale et un décalage de la teneur en eau optimale vers le côté humide. Cela a été expliqué par le degré de finesse très élevé du ciment (Doat et col, 1979). A titre indicatif, le même comportement est observé après l'ajout de la chaux (auteurs). La réponse à la stabilisation dépend fortement sur la nature du matériau et du stabilisant utilisée ainsi que du pourcentage ajouté.

6.4 Stabilisation avec fibre

Actuellement, une tendance vers la stabilisation de la terre crue par des fibres végétales est observée (Taallah, 2014), les celluloses (Ouedraogo et col, 2015), la paille (Kiki et col, 2020), la chènevotte (Laborel-preneron et col, 2015), le kénaf (Millogo et col, 2014) et de la mélasse de canne à sucre (Malanda et col, 2017).

Les fibres sont des améliorants du comportement thermique des matériaux de terre dans laquelle la conductivité thermique des blocs de terre comprimée et stabilisées avec 3% de fibre est de 0.314 W/m. K. Par contre, pour un matériau non stabilisé, elle est de 0.961 W/m.K. Du point de vue mécanique, les valeurs de (Phung, 2018) évoquent que l'ajout successif de fibre (paille de blé) fragilise la bauge (décroissance de la résistance mécanique de 3 MPa vers 1 MPa).

Cette diminution de la conductivité thermique et de la résistance mécanique après incorporation des fibres est directement liée à la diminution de la densité et l'augmentation de la porosité (Laurent, 1987).

6.5 Stabilisation par le bitume

Une remédification de la terre crue vis-à-vis de l'eau consiste à rajouter une quantité du bitume lors de la fabrication ou la confection des échantillons de BTC. Cette stabilisation au bitume a été redéveloppé en 1940 aux USA mais avec le temps a été négligé au vu du coût élevée des produits du pétrole (Paulus, 2015). Le bitume généralement utilisé avec des solvants tels que du gasoil, du kérosène ou du naphta. (Guillaud et Houben, 1995).

(Doat et col, 1979) a évoqué l'influence du bitume sur :

- Les optimums de Proctor : une baisse de la densité et augmentation de la teneur en eau optimale.
- L'absorption : une diminution de l'absorption d'eau après l'ajout d'un pourcentage de 2% du bitume.
- La résistance mécanique : une augmentation de la résistance mécanique à sec entre 0 et 2% du bitume au-delà, elle diminue à cause de la présence du bitume en abondance qui joue dans ce cas le rôle d'un lubrifiant. Cette résistance mécanique peut atteindre des valeurs de 30 kg/cm².

7 Normes et recommandations liées à la construction en terre

Vu la disponibilité et la variété de la terre crue à travers le monde, sa sélection est un véritable enjeu. Des recommandations et normes ont été publiées traitant différents aspects liés aux critères de choix du matériau terre dans le domaine de la construction ainsi que ses caractéristiques hydromécaniques et hygrothermiques. Des exemples de normes et recommandations sont donnés dans le (Tableau. I.5).

Tableau I. 5. Normes et recommandations destinées la fabrication de BTC (Delgado, 2007)

Normes et recommandations	Références
XP P 13-901 (2001)	AFNOR. XP P13-901, Compressed earth blocks for walls and partitions: definitions - Spécifications - Test methods - Delivery acceptance conditions. Saint-Denis La Plaine Cedex : AFNOR, 2001
MOPT (1992)	MOPT. Bases Para el Diseno y Construcccion con. Madrid, Spain : Centro de Publicaciones, Secretaria General Técnica, Ministerio de ObrasPublicas y Transportes, 1992.
NZS 4297 (1998)	SNZ. New Zealand Standard 4297:1998. Engineering design of earth buildings. Wellington: Standards New Zealand, 1998.
Houben et Guillaud	Houben H, Guillaud H. Earth construction: a comprehensive Guide. London: Intermediate Technology Publications; 1994.
Lehmbau-Regeln (1999)	LehmbauRegeln. Begriffe; Baustoffe; Bauteile. Braunschweig/Wiesbaden, Germany: Friedr. Vieweg&SohnVerlagsgesellschaftmbH, 1999.
Smith and Austin (1996)	Smith EW, Austin GS. Adobe, pressed-earth and rammed earth industries in New Mexico, Bulletin 159. Socorro, NM: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources; 1996.
OIA (1970)	Office of Internatinal Affairs (Wolfskill LS, Dunlop WA, Callaway BM) Handbook for building homes of earth. Department of housing and urban development, Office of International Affairs (OIA), Washington, DC 20410, 1970.
CRAterre-Rigassi, 1995	Essential granularity, plasticity and compactibility. Field and laboratory identification soil tests are explained

8 Matériaux et critères utilisés pour la fabrication de BTC dans la littérature

8.1 Présentation de la norme (XP P13-901)

Cette norme a été publiée en octobre 2001 sous l'indice de classement P13-901. Elle a pour objectif de définir les caractéristiques des blocs de terre comprimée destinés à la

réalisation de murs et de cloisons. Elle précise la terminologie, fixe les dimensions et décrit les méthodes d'essai.

La stabilisation chimique est aussi recommandée dans la norme pour un matériau terre. Néanmoins, un liant hydraulique peut être ajouté à la terre pour atteindre ou développer ces caractéristiques.

Dans la norme (XP P13-901), deux critères de sélection, basés sur la granulométrie et la plasticité du matériau terre, sont présentés. Concernant le critère de granulométrie, la norme propose un fuseau granulométrique de bornes : supérieure et inférieure (Figure I.23). Les mêmes valeurs limites des différents composants, exprimées en pourcentage de tamisât cumulés, sont données dans le tableau I.6.

Tableau I. 6. Pourcentage du tamisât de chaque classe du sol selon fuseau granulométrique de la norme (XP P13-901).

Composants du sol	Borne supérieure	Borne inférieure
Gravier (20mm à 2mm)	100%	55%
Gros sable (2 à 0.2mm)	100% à 85%	55% à 30%
Sable fin (0.2mm à 20 μ m)	85% à 55%	30% à 15%
Limons (20 μ m à 2 μ m)	55% à 30%	15% à 12%
Argiles (inf à 2 μ m)	/	/

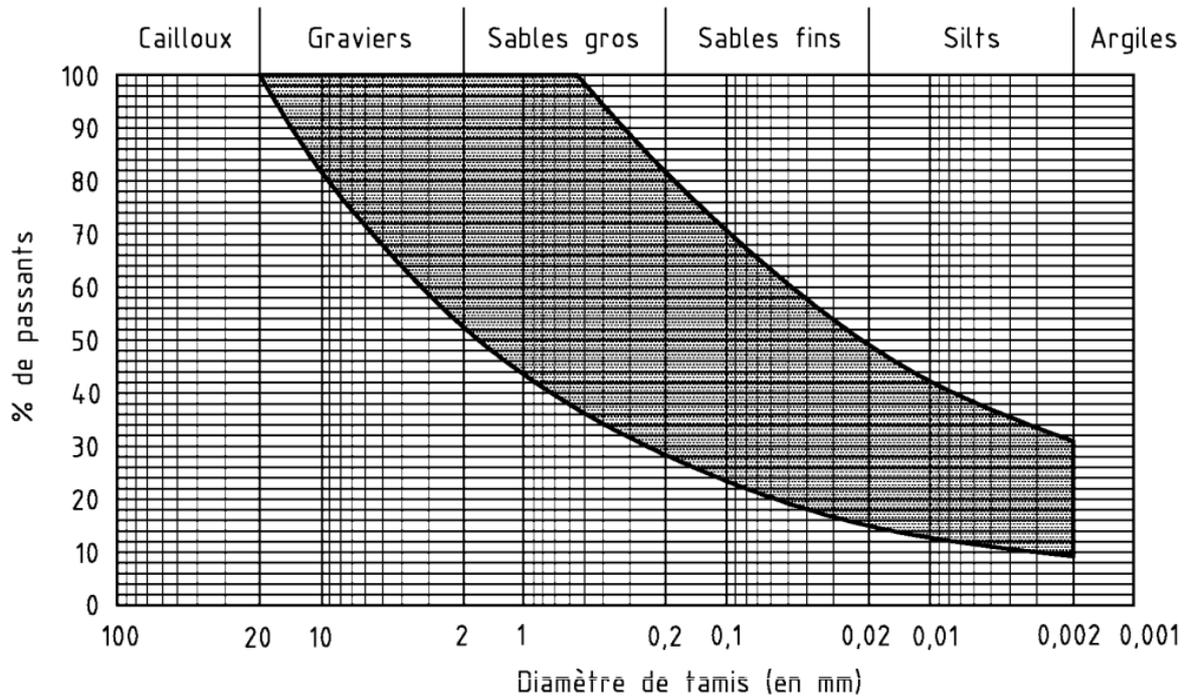


Figure. I. 23. Fuseau granulométrique. (XP P13-901)

Le critère de plasticité est aussi présenté sous forme d'un diagramme tracé dans le plan de l'indice de plasticité I_p en fonction de la limite de liquidité du matériau w_L (Figure I.24). Le diagramme est inclus entre les valeurs de limites de liquidité 21% et 50% et d'indice de plasticité entre 2% et 29%.

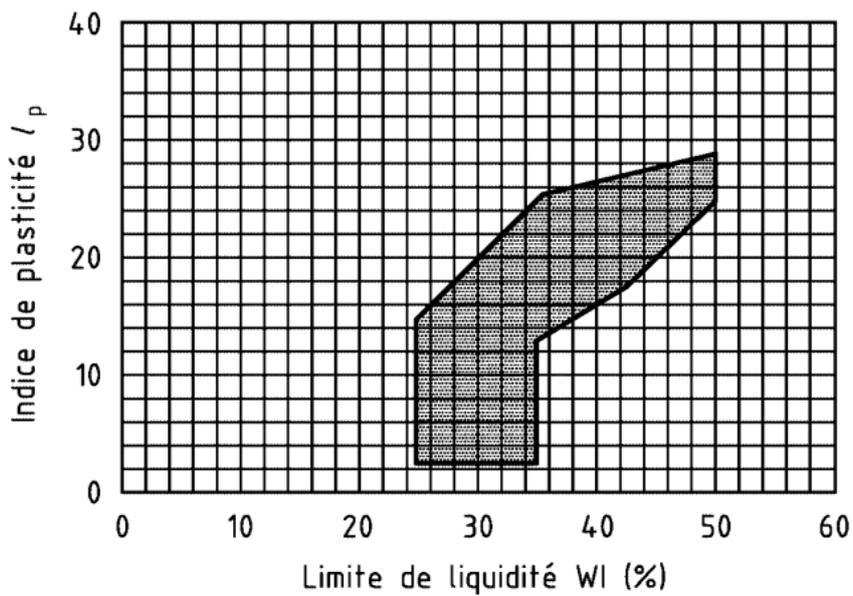


Figure. I. 24. Fuseau de plasticité. (XP P13-901)

Dans la littérature, il n'y a pas une unanimité sur la composition granulaire et la plasticité des sols utilisés pour la fabrication des BTC (Tableau I.7). Concernant la granulométrie, le pourcentage de gravier est presque négligeable dans l'ensemble des études de BTC, par contre la fraction argileuse est généralement supérieure à 5%. Vu les valeurs représentées dans le tableau (Tableau I.6), la quantité de sable et de limon reste très dominante.

Tableau I. 7. L'ensemble des caractéristiques de granulométrie et de plasticité des sols utilisés dans la fabrication de BTC dans la littérature.

Auteurs	Type de matériau	Granulométrie				Plasticité		Stabilisé
		Gr (%)	Sa (%)	Lm (%)	Ar (%)	w _L (%)	I _p (%)	
Kouakou et col,2009	BTC et adobe	non	44.5	30	25.5	38	18	non
Ben Ayed et col, 2011	BTC	non	30	28	42	56	37	oui
Mamba el al, 2013	BTC	non	*	*	99	60.63	9.16	non
Cagnon et col,2014	BTC	0-3	33-42	27-37	23-38	*	*	non
Maillard et col, 2014	BTC	non	0-35	25-42	31-58	*	*	non
Fouchal et col, 2015	BTC	non	8 à 14	32-63	54-29	*	*	non
El Fgaier et col, 2015	BTC	non	5 à 15	81 à 91	4 à 6	3 à 72	24 à 100	non
Bruno et col, 2015	BTC	0.4	40.4	42.9	16.3	33	12.9	oui
Laborel-preneron et col, 2015	Terre compactée	*	*	*	99	30	9	oui
Damfeu et col, 2016	BTC	13.6	43.98	14.51	27.91	53.1	17.1	oui
Touré et col, 2017	BTC	21.8	40.3	19.5	18.4	34	17	non
Champire, 2017	Terre compactée	non	60 à 77	13 à 25	9 à 17	20 à 29	4 à 14	non
Serbah et col, 2018	BTC	non	10	56	34	55	21	non
Zhang et col, 2018	BTC	non	32	51	17	23.7	5.5	non

Gr : Gravier, Sa : Sable, Lm : limon, Ar ; argile

Dans la figure I.25, nous avons essayé de rassembler l'ensemble des points d'intersection entre la limite de liquidité w_L et l'indice de plasticité I_p , issus de la littérature, dans les fuseaux recommandés par (XP-P13 901; Houben et Guillaud, 1994). L'ensemble de ces points d'intersection sont intégrés ou touchent la limite à gauche des fuseaux de plasticité proposés. La fourchette de la limite de liquidité est limitée à la valeur de 60% et l'indice de plasticité varie entre 4 et 37%.

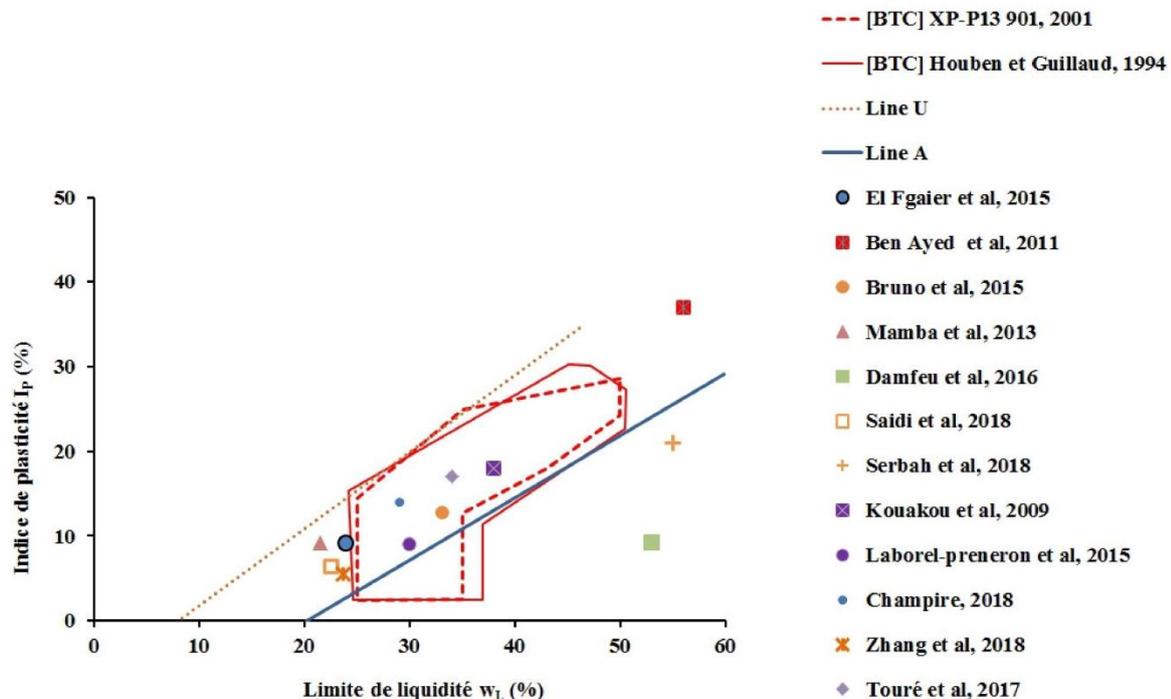


Figure. I. 25. Position des valeurs de w_L et I_p dans la littérature par rapport aux fuseaux recommandés pour la fabrication de BTC.

8.2 Critère de compactage

Une terre compactée nécessite l'élaboration d'une stabilisation mécanique pour déterminer la quantité d'eau et la force de compression convenable à la fabrication d'un matériau en terre (adobe, pisé et BTC). Selon (Mesbah et col, 1999), un compactage statique est préconisé pour le BTC et les règles suivantes doivent être respectées :

- Les sols naturels utilisés en construction doivent impérativement contenir au minimum 10% d'argile.
- Les éléments grossiers ne doivent pas dépasser 10 à 20 mm.
- Dans la fabrication de BTC, le rapport entre la surface de contact le volume de sol compacté est de 21 m^{-1} , donc il est important de mesurer ce rapport après chaque confection d'un échantillon et le comparer avec la valeur de 21 m^{-1} pour minimiser la dissipation d'énergie par frottement.

(Houben et Guillaud, 1994) suggèrent des recommandations relatives aux optimums Proctor (γ_d, ω) pour différentes techniques de construction en terre (adobe, pisé et bloc de terre comprimée), tel que montré dans figure I.26 et le tableau I.8. Pour les blocs de terre

comprimée, la densité sèche maximale doit être comprise entre 17.5 et 23 kN/m³, et la teneur en eau optimale entre 5 et 15%. La confection de BTC nécessite une densité sèche plus importante par rapport à l'adobe, alors il est recommandé dans la littérature (Mesbah et col, 1999 ; Bruno et col, 2015) d'utiliser des presses à une force supérieure à 2 MPa. Comme le montre la figure I.25, le critère de compactage proposé par (Houben et Guillaud, 1994) n'est pas toujours respecté pour l'ensemble des matériaux sélectionnés, ce qui montre peut-être l'utilité de l'amélioration de ces fuseaux à la lumière des résultats récents de la littérature et de l'expérience acquis des constructeurs.

Tableau I. 8. La densité sèche et la teneur en eau de malaxage de la matière première de BTC.

Auteurs	Densité sèche (KN/ m ³)	Teneur en eau optimale (%)
Olivier et Mesbah, 1986	19.16	12
Kakabou et col, 2009	18.3	15
Mamba et col, 2013	13.1 à 14.5	18.64
Bruno et col, 2015	21.50 à 22.50	6 à 8
Hakimi et col, 1998	17.50 à 18.80	12 à 12.6
Champire, 2017	19.5 à 19.8	9 à 11
Serbah et col, 2018	14.9 à 19.1	13.5 à 27
Laborel-preneron et col, 2015	13 à 19	15 à 20
Liuzzi et col, 2013	18.48 à 20.46	8 à 12
Hall et Allinson 2009	19.80 à 21.20	8
Phung, 2018	16 à 20	10 à 23
Mansour et al ,2016	25.97	13

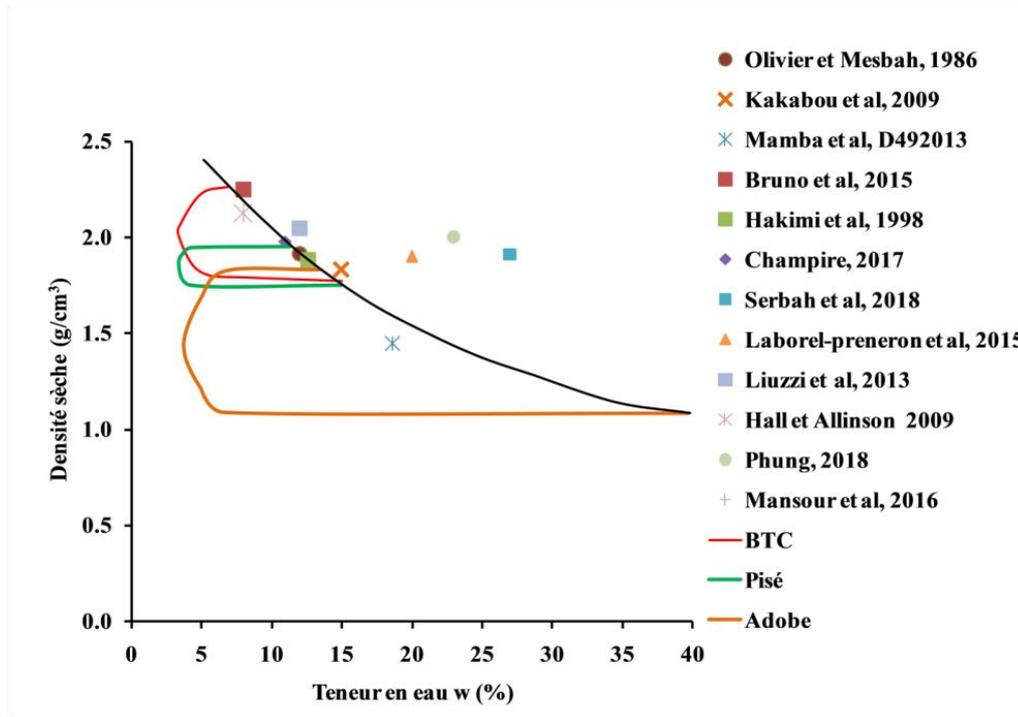


Figure. I. 26. Le positionnement des optimums par rapport au fuseau de compactage de la BTC, du pisé et de l'adobe.

8.3 Quantité de sulfate

Un autre paramètre très important a été signalé dans le document de la construction en terre de (Schroeder, 2012). Les deux sources de sulfates dans les sols sont la pyrite FeS_2 et le gypse ($CaSO_4 \cdot H_2O$) (Bellagh, 2017). La présence de sulfate provoque des fissures et des gonflements, et sont dues à la formation de phases expansives telles que l'ettringite ($Ca_6[Al(OH)_6]_2 \cdot (SO_4)_3 \cdot 26 H_2O$) ou de la thaumasite ($Ca_6[Si(OH)_6]_2 \cdot (SO_4)_2 \cdot (CO_3)_2 \cdot 24H_2O$) (Le Borgne, 2010).

Selon le tableau I.9, la quantité de sel soluble dans l'eau utilisée dans le malaxage pour la fabrication d'adobe, pisé et BTC ne doit pas dépasser un pourcentage de 0.12% pour (TM 02, 03 2011). Par contre, les préconisations sont très strictes dans les recommandations pour la teneur des sels (pas de sel). La détermination de la teneur en sulfate est beaucoup plus exigée dans le cas des matériaux stabilisés à la chaux et au ciment.

Tableau I. 9. Normes et recommandations pour la teneur des sels dans un matériau en terre.
(Schroeder, 2012)

Normes ou recommandations et pays	Type de matériaux	Références	Teneur totale en sulfates solubles (% en masse)
EBAA (2004) Australie	Adobe, BTC, mortier de terre	Earth Building Association of Australia (EBAA) (2004), Building with Earth Bricks and Rammed Earth in Australia, Wangaratta, Australia, EBAA	Dans une mesure qui «n'affecte pas la résistance ou la durabilité d'un mur»
TM 02, 03 (2011) Allemagne	Adobe, BTC, mortier de terre	Dachverband Lehm e.V. (2011), Lehm-Mauermörtel - Begriffe, Baustoffe, Anforderungen, Prüfverfahren, Weimar, Germany, Technische Merkblätter Lehmbau - Blatt 03	< 0.12
14.7.4 NMAC (2006) USA/Nouveau-Mexique	Adobe, BTC, Pisé non stabilisé	Construction Industries Division of the Regulation and Licensing (2006), New Mexico Earthen Building Materials Code, CID-GCB-NMBC-14.7.4, Santa Fe, NM.	≤2
NTE E.080 (2000) Peru	Adobe, BTC	National Building Standards (2000), Technical Building standard NTE E. 080: Adobe, Lima, Peru, SENCICO	Matériau de 100% de pureté

9 Fabrication des briques de terre comprimée

Les briques ou blocs de terre comprimée sont souvent fabriqués de manière quasi statique par des presses travaillant soit à force constante, soit à déplacement imposé (Olivier et Mesbah, 1986). Cette confection passe par plusieurs phases selon le processus suivant :

✚ **Le tamisage** : La méthode la plus répandue dans l'histoire était de mélanger la terre directement ce qui engendrait des pathologies au niveau des constructions. Il faut verser la terre à l'état sec dans système de criblage constitué des grilles métalliques pour garantir un bon tamisage. Les presses sont menées d'une bande transporteuse qui permet d'amener la terre tamisé au malaxeur.

✚ **Le malaxage** : Après avoir été tamisé, la terre crue est mélangée avec une quantité d'eau déterminée. La mise en œuvre ainsi la quantité d'eau sont les facteurs clés afin d'avoir un matériau homogène. Un malaxage approprié est exigé pour obtenir un réarrangement parfait de la matrice granulaire. Il existe trois types de

malaxeurs utilisés pour la confection des BTC à savoir : à arbre horizontale, planétaire, linéaire (figure I.27)

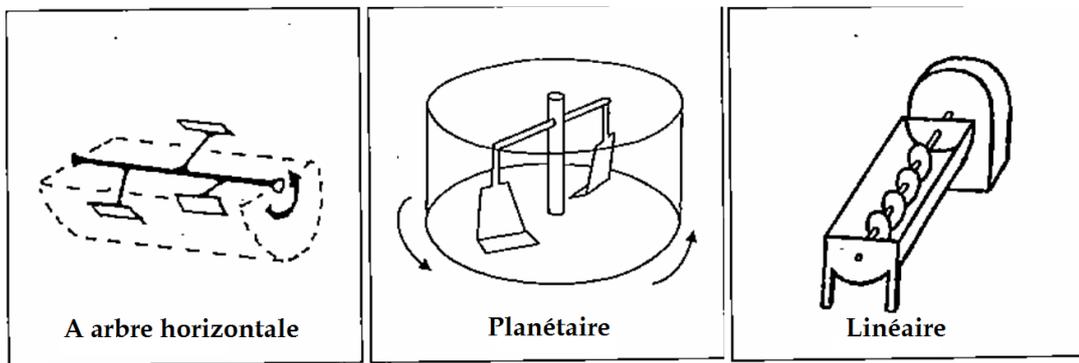


Figure. I. 27. Les malaxeurs utilisés pour la confection des BTC. (Guillard et col, 1995)

✚ **La confection :** La confection est effectuée à l'aide d'une presse soit manuelle ou souvent hydraulique. Cette étape est basée sur l'application d'une force à des échantillons parallélépipédiques. Ces forces de compression diffèrent selon les dimensions souhaitées des blocs finaux. Lors de la confection, le mélange de terre et eau est placé dans un moule puis comprimé.

✚ **Le séchage :** La prise en compte de l'effet de séchage lors de la fabrication de la BTC est primordiale. Cette procédure permet de durcir le matériau après évaporation de l'eau. Dans ce cas, les grains se rapprochent les uns des autres et les ménisques d'eau se renferment pour avoir plus de résistance à la compression. un séchage à l'abri du soleil et du vent est souvent recommandé, et ceci pour éviter l'apparition de microfissures dû au retrait du sol et qui peuvent engendrées de faibles caractéristiques mécaniques.

10 Les dimensions et formes de la brique de terre comprimée

Dans la littérature, les dimensions de la brique de terre comprimée sont multiples et diversifiées. Le manuel de construction (Guillard et col, 1995) préconise des dimensions plus courantes de brique de terre comprimée à savoir un entier, trois quarts et demi (figure I.28).

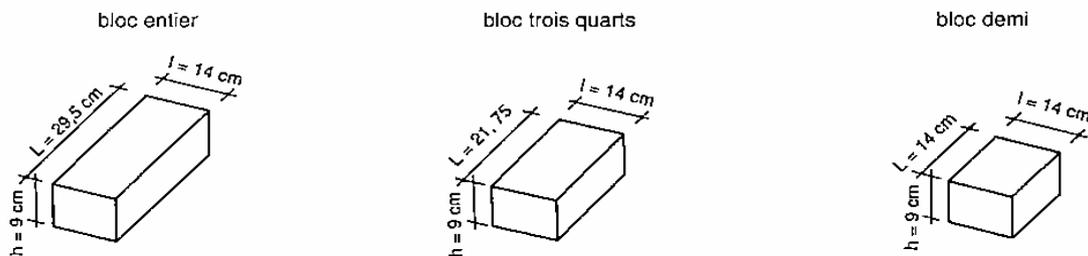


Figure. I. 28. Les dimensions courantes des BTC. (Guillard et col, 1995)

La forme de BTC (figure I.29) dépend des besoins et de la conception architecturale de chaque culture et chaque région. Quatre formes avec leur usage ont été citées dans le même manuel de construction en terre (CRAterre-Rigassi, 1995).

- ✚ **Evidées** : Ce type représente la forme de briques de terre creuse de 5 à 10% d'évidement.
- ✚ **Alvéolaires** : sont des briques les plus légères et sont plus adaptées dans les zones à forte sismicité.
- ✚ **Pleines** : Comme la brique de terre cuite, il existe des formes comme des parallélépipèdes et cubes. Ce type peut être le plus résistant aux efforts de compression ou de traction.
- ✚ **À emboîtement** : C'est un modèle destiné pour des raisons artistiques.

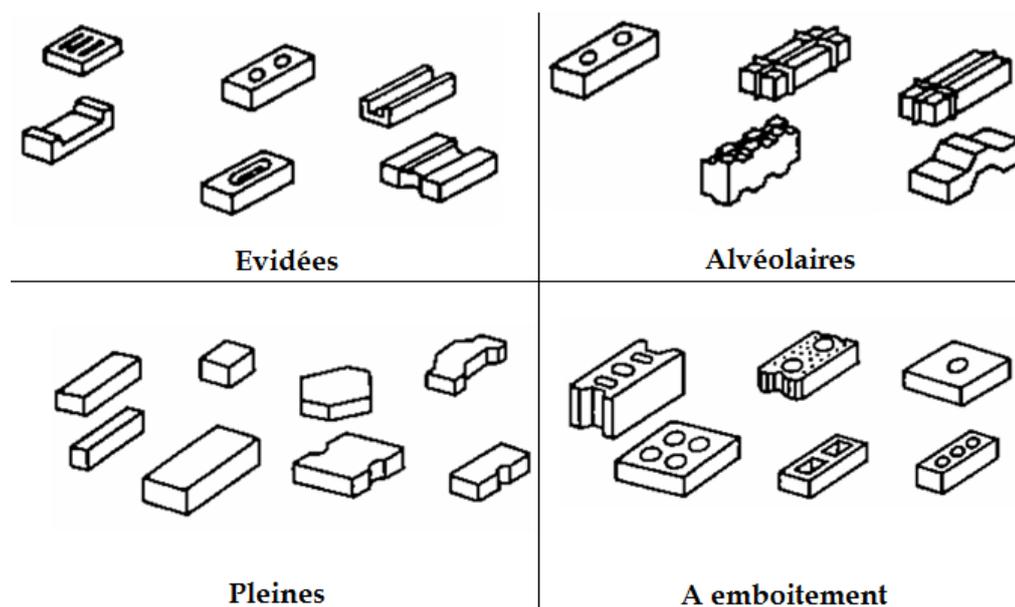


Figure. I. 29. Les différentes formes de BTC (CRAterre-Rigassi, 1995)

11 Types de presses utilisées

La presse utilisée dans la fabrication de brique a connu d'importantes innovations après la deuxième guerre mondiale qui avait induit la destruction d'un très grand nombre de logements et d'usines. En 1956, un ingénieur colombien du nom de Raul Ramirez, invente une presse manuelle d'une conception extrêmement simple, qui permet une grande facilité de mise en œuvre (CRAterre-Rigassi, 1995). Cet appareil manuel s'appelle CINVA-RAM qui permet de fabriquer une brique de terre, a remplacé le moule d'adobe.

En 1974, une presse appelée PALAFITTE a été conçue par le groupe CRAterre à l'unité pédagogique d'architecture de Grenoble avec des dimensions variables et une pression de l'ordre de 16 à 17 Kg/cm² (figure I.30).

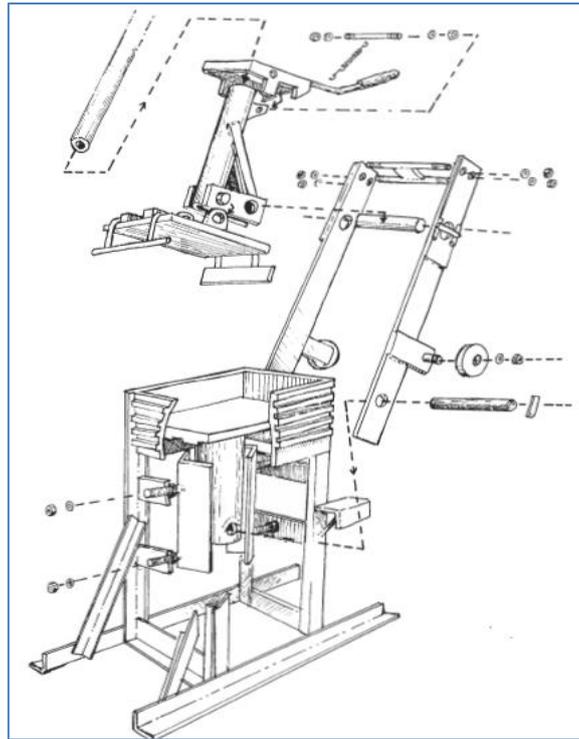


Figure. I. 30. Le montage de la presse PALAFITTE. (Doat et al, 1979).

Plus récemment, la production de la brique de terre comprimée est basée sur une technique qui consiste à placer la terre crue dans une presse évoluée de la version CINVARAM soit hydraulique ou mécanique. Ces presses sont munies de malaxeurs rotatifs pour améliorer l'homogénéité du mélange.

Les briques de terre comprimées sont souvent pressées puis extrudés. Ce mode s'appelle le compactage statique. Le compactage de la terre crue se fait à l'aide des trois catégories de presses classées selon (Mesbah et col, 1999) comme suite:

- ✚ **Mécaniques** : Ces presses permettent de compresser des briques de terre crue par le déplacement d'un piston sur une course imposée. Cependant, la plupart de ces presses ont des contraintes appliquées qui ne sont pas connues, ce qui influe sur l'homogénéité des briques confectionnées.
- ✚ **Manuelles** : En général, les contraintes théoriques appliquées lors d'un compactage par des presses manuelles sont de l'ordre de 2 MPa (Mesbah et col, 1999). Elles sont disponibles en abondance dans les pays en développement car elles ne coûtent pas cher et sont faciles à transporter.
- ✚ **Hydrauliques** : Elles sont beaucoup plus utilisées dans la fabrication de la brique parce qu'elles donnent des blocs qui ont une meilleure compacité (Figure I.31). Il existe des presses dont les contraintes appliquées peuvent aller jusqu'à 100 MPa comme dans le cas de (Bruno et col, 2015).



Figure. I. 31. La presse hydraulique. (Laibi, 2017)

12 Conclusion

Les matériaux de construction issus de la terre crue constituent une alternative très intéressante par rapport aux matériaux tels que le béton, notamment d'un point de vue économique, écologique et confort hygrothermique. À travers l'histoire, plusieurs techniques de construction en terre ont été développées. Ces techniques très courantes ont été présentées dans ce chapitre à savoir le torchis, le pisé et la brique de terre comprimée (BTC).

Le plus important dans cette fabrication est le choix du matériau et son compactage. C'est pour cela, des critères de choix basés sur la granulométrie, la plasticité et le compactage, nous permettent de sélectionner un matériau capable de répondre aux exigences requises dans les bâtiments.

CHAPITRE. II :
Performances hygrothermiques du
matériau terre compactée

1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les caractéristiques hydriques et thermiques d'un matériau à base de terre compactée. Tout d'abord, une synthèse bibliographique a été élaborée sur le compactage statique en raison de son importance dans la fabrication de la brique de terre comprimée (BTC), du pisé et de l'adobe de moyenne densité. Ces techniques ont été abordées dans diverses études scientifiques : l'adobe (Dao et col, 2018; Chaib et col, 2020), le pisé (Chabriac, 2014; Bui, 2008), la bauge (Phung, 2018), le béton de terre (P'Kla, 2002; Ngo, 2017), la brique de terre comprimée (Ghomari, 1989; Kouakou et col, 2009; Taallah et Guettala, 2016; Seco et col, 2018; Zhang et col, 2018).

La plupart des anciennes constructions en terre sont aujourd'hui des vestiges à cause des pluies battantes et des fluctuations de la température, montrant ainsi la nécessité d'évaluer les performances de ce matériau vis-à-vis de l'eau (perméabilité à l'eau et à la vapeur d'eau, coefficient d'absorption de l'eau, etc...).

Dans ce contexte, deux parties seront abordées dans ce chapitre à savoir :

- La partie hydrique : elle consiste à présenter les résultats récents de la littérature à savoir ; la conductivité hydraulique à l'eau et la perméabilité à la vapeur d'eau, l'absorption capillaire d'eau, le chemin de séchage-humidification.
- La partie thermique : met l'accent sur les propriétés thermiques comme la conductivité, la capacité thermique et la diffusivité thermique.

2 Le compactage statique

Plusieurs méthodes ont été adoptées afin d'améliorer le comportement de la terre crue par voie mécanique à savoir : la compression statique, la compression dynamique (par vibration, par impact et par pétrissage), (Guillaud et Houben, 1995).

Le compactage statique a été employé depuis longtemps pour l'amélioration du comportement du matériau terre (Mitchell et col, 1965; Olivier et col, 1986; Mesbah el col, 1986; Venkatarama et Jagadish, 1993; Bruno el col, 2015; Cuisinier et Masrouri, 2003; Milohin et col, 2020). Ce type de compactage est effectué en introduisant le matériau (terre crue humide) dans un moule entre deux pistons, un fixe et l'autre mobile (figure II.1). A l'aide d'une contrainte appliquée, le compactage se fait en haut et en bas pour avoir une meilleure compacité et homogénéité (Olivier et col, 1986). Pour minimiser le frottement entre le plateau de la presse et la surface de l'échantillon lors du compactage, l'auteur préconise l'utilisation du téflon et le néoprène (figure II.1)..

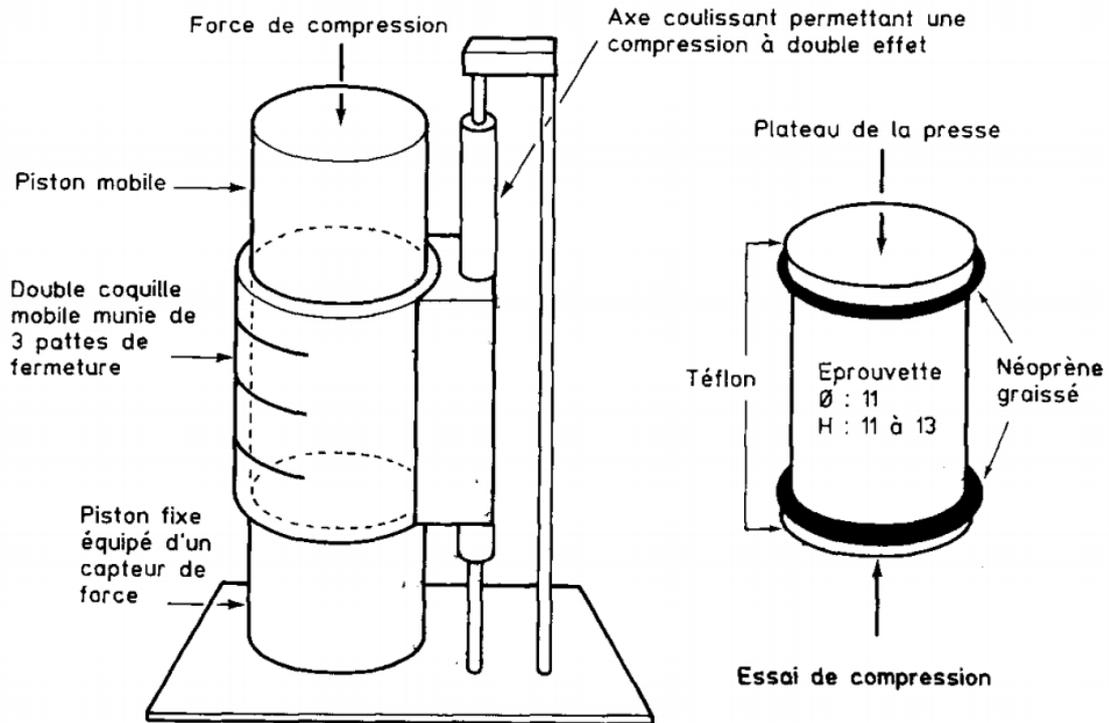


Figure. II. 1. Montage de l'essai de compactage statique. (Olivier et col, 1986).

2.1 Influence de la pression de compactage

Dans un essai de compactage, il est très important de diminuer le gradient de densité et la force de frottement produite par l'interaction sol-moule de compactage. L'appareillage montré dans la figure II. 2 est composé d'un moule à double piston avec une couche de graisse et une membrane afin de minimiser les efforts de frottement.

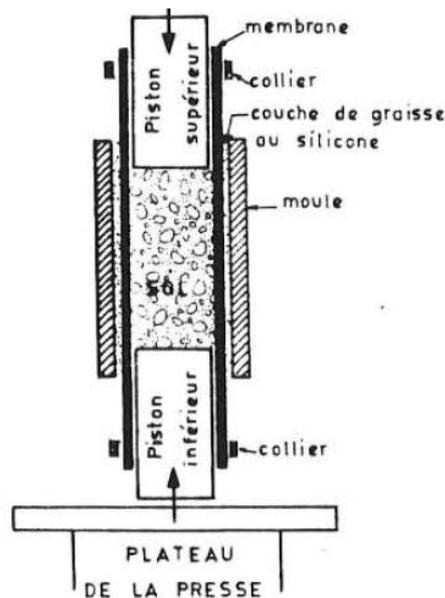


Figure. II. 2. Système de compactage statique dans un moule revêtu de membrane. (Camapum de carvalho et col, 1987).

La figure II.3 met en exergue, la force de frottement F_f par la section transversale initiale S_0 en fonction de la pression de compactage statique (PB), lors d'un essai de compactage statique à double piston. Les éprouvettes (la marne de Layrac) ont été soumises à un compactage statique avec des conditions différentes ; sans et avec membrane en latex, néoprène (0.2 et 0.5 mm) dans un triaxial classique pour la détermination du coefficient de frottement dans un sol partiellement saturé. L'utilisation des compléments comme le latex réduisent l'effet du frottement de près de 25% sur les échantillons compactés statiquement à des pressions de 9 MPa (Camapum de carvalho et col, 1987).

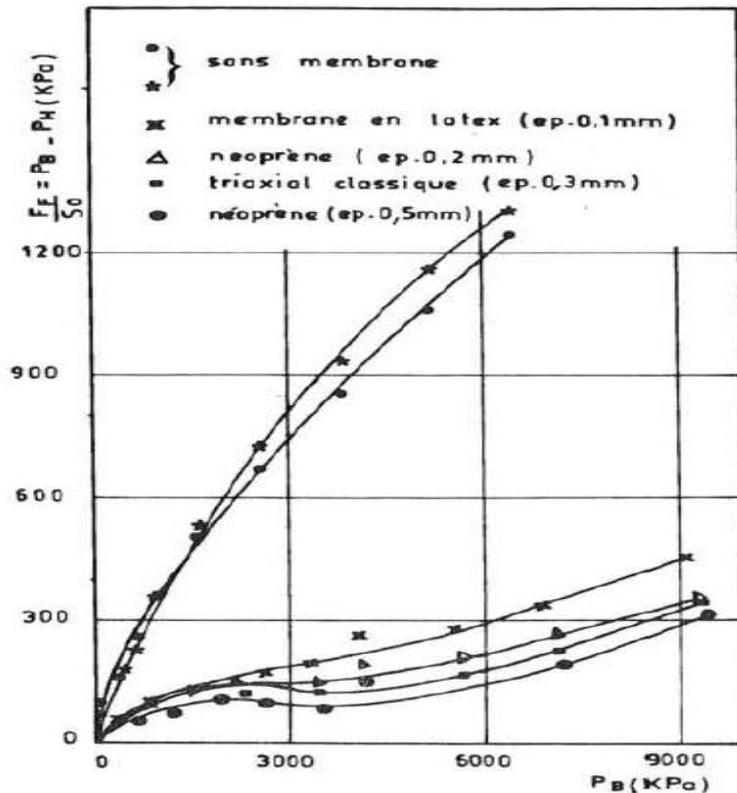


Figure. II. 3. Variation de frottement la force de frottement F_f par la section transversale initiale S_0 en fonction de la pression de compactage statique (PB).

(Camapum de carvalho et col, 1987).

2.2 Influence de l'énergie et de la force de compactage

En cherchant la contrainte pour la fabrication de la brique de terre comprimée, (Mesbah et col, 1999) ont réalisé un compactage dynamique et statique à différentes énergies (figure II.4) sur un matériau composé de 36% de sable, 52% de limon et une quantité d'argile de 12%. Le point A correspond à la plus grande densité enregistrée et à une saturation proche de 95% pour un compactage statique à énergie constante de 550 kJ/m³. Les points O et B ont les mêmes teneurs en eau optimales et les densités sèches maximales. Cependant, le point B correspond à un compactage statique dont l'énergie consommée s'élève à 300 kJ/m³,

par contre, le point O correspond à l'optimum Proctor normal dont l'énergie de compactage est égale à 550kJ/m³.

Dans le travail de (Mesbah et col, 1999), le compactage dynamique à l'OPN correspond à une pression de compactage de l'ordre de 2 à 4.5 MPa. (Ilker, 1969) a déduit que le compactage à l'énergie Proctor normal et modifié correspond à un compactage statique à une pression respectivement de 1.3 MPa et 6.5 MPa. Dans l'étude de (Zhemchuzhnikov, 2015) l'auteur présente une comparaison entre l'OPN et le compactage statique à une force de 2, 8 et 10MPa de quatre matériaux différents. Il a conclu que la nature du sol a une grande influence sur cette équivalence d'énergie.

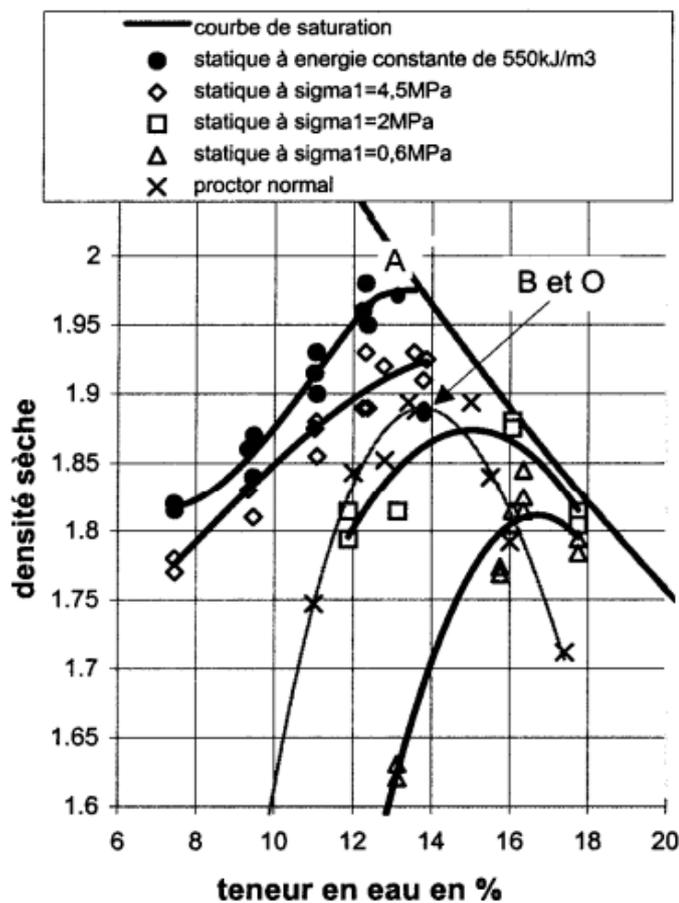


Figure. II. 4. Compactage statique et dynamique. (Mesbah et col, 1999).

Des courbes d'énergie tracées (figure II.5) par (Zhemchuzhnikov, 2015), montrent la variation de la teneur en eau lors du compactage statique de quatre matériaux différents (K10 à K40) à une force appliquée de l'ordre de 2 et 8 MPa. (Zhemchuzhnikov, 2015) a utilisé les deux équations (Eq.II.1 et II.2) afin de déterminer l'énergie correspondant à chaque densité nommée la densité énergétique E_{vol} . La différence entre l'allure des courbes obtenues dans le compactage statique à 2 et 8 MPa est due à la vitesse de déformation et le drainage à la base de l'échantillon. L'auteur a déduit que les courbes ont des pics indiquant une valeur de la teneur en eau optimale à laquelle le compactage est le plus efficace, c'est-à-dire qu'une plus grande quantité d'énergie est transmise au sol pour la même pression de compactage.

Les valeurs de l'énergie correspondent à un compactage 2MPa est la plus faible (ne dépasse pas 300 KJ/m³) et le compactage à 8 MPa requiert une énergie est autour de 1000 KJ/m³.

$$E_{app} = \int_{x_1}^{x_2} F(x)dx \quad [\text{Eq.II.1}]$$

F (x) la force appliquée
x est le déplacement

$$E_{vol} = \frac{E}{V} \quad [\text{Eq.II.2}]$$

E_{app} est l'énergie appliquée (kJ)

V est le volume final de l'échantillon (m³)

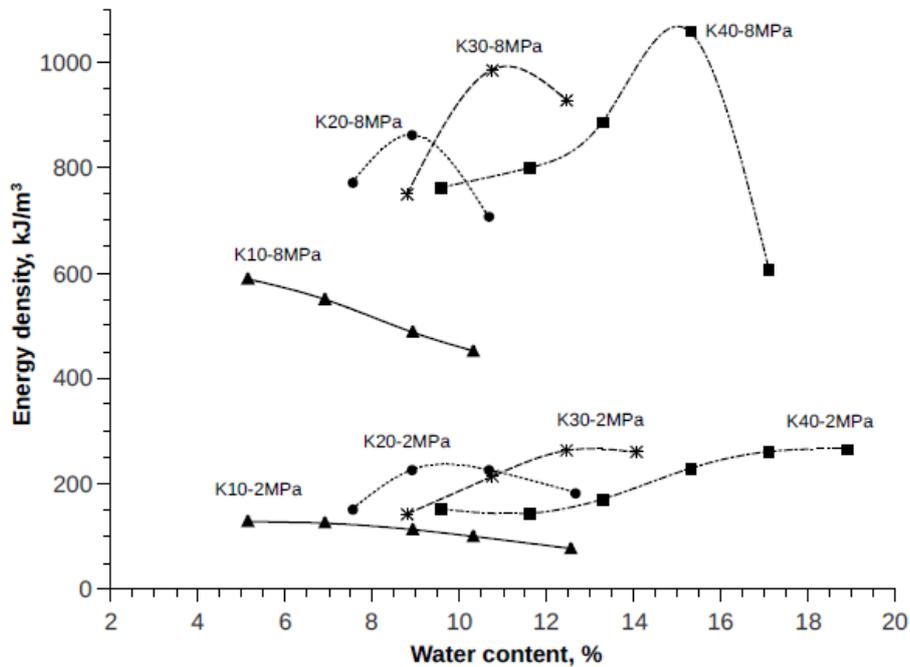


Figure. II. 5. Relations entre la densité d'énergie et la teneur en eau pour des pressions de compactage maximales 2 et 8 MPa. (K10 : mixte contient 10% d'argile, K20 : mixte contient 10% d'argile, K30 : mixte contient 10% d'argile, K40 : mixte contient 10% d'argile) (Zhemchuzhnikov, 2015)

Pour fabriquer des échantillons de BTC (7x7x28 cm), (Mansour et col, 2016) ont réalisé un compactage statique d'un sol (W_L=22%, I_p=6%) à différentes contraintes de compactage de 0.39 à 3.16 MPa correspondant à des densités de 1610 à 2194 Kg/m³. La figure II.6 représente la variation de la masse volumique en fonction de la force de compactage. Cette augmentation a été expliquée par l'effet de la pression de compactage permettant d'avoir un bon réarrangement de la structure interne de la phase solide et une diminution de la quantité de pores microscopiques et macroscopiques.

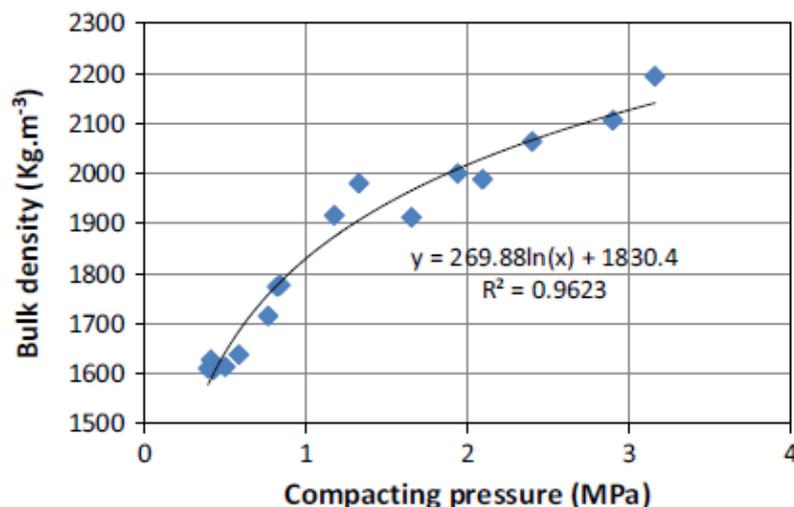


Figure. II. 6. Influence de la pression de compactage sur la masse volumique.
(Mansour et col, 2016).

2.3 Influence de la vitesse de compression

Parmi les paramètres physiques importants dans un essai de compactage statique et dont on doit tenir compte est la vitesse de compression uniaxiale que l'échantillon subit.

(Bruno et col, 2015) ont réalisé un essai de compactage statique dans un moule parallélépipédique (diamètre extérieur 170 mm, diamètre intérieur 50 mm et hauteur de 200 mm) à haute pression (jusqu'à 100MPa) sur un sol fin peu plastique ($W_L = 33\%$, $I_p = 20\%$) en vue de fabriquer des briques de terre crue. À partir de la courbe de la figure (II.7) qui représente l'évolution du déplacement vertical en fonction du temps. La pente est calculée dans la partie linéaire finale dans un intervalle de 60 min. Cette variation de vitesse est constante jusqu'à ce que la valeur du déplacement vertical a atteint 0.6 mm, ce qui explique que la contrainte influence la vitesse de déplacement parce que cette dernière augmente proportionnellement avec la contrainte ou la force appliquée. En outre (Bruno et col, 2015) montrent que cette grandeur est un indice qui permet de déduire que la consolidation est considérée achevée quand la vitesse de déplacement est inférieure à $0,001 \mu.m.s^{-1}$.

(Moussai et col, 1993) ont lié cette vitesse de chargement à la densité sèche maximale. Cette dernière est très dépendante de la vitesse de compression et de la hauteur de l'éprouvette au cours du compactage statique.

Pour combler l'absence d'une norme qui préconisent une vitesse de compactage statique des échantillons, (Zhemchuzhnikov, 2015) a sélectionné une vitesse de 2 mm/min (figure (II.8) après plusieurs tests de compactage, en variant la vitesse de 50 à 0.5 mm/min.

En outre, (Yin et al ,2018) préconise un compactage statique dans moule cylindrique (50 mm de diamètre et 50 mm de hauteur) avec un déplacement contrôlé sous une vitesse sélectionnée de 1 mm/min.

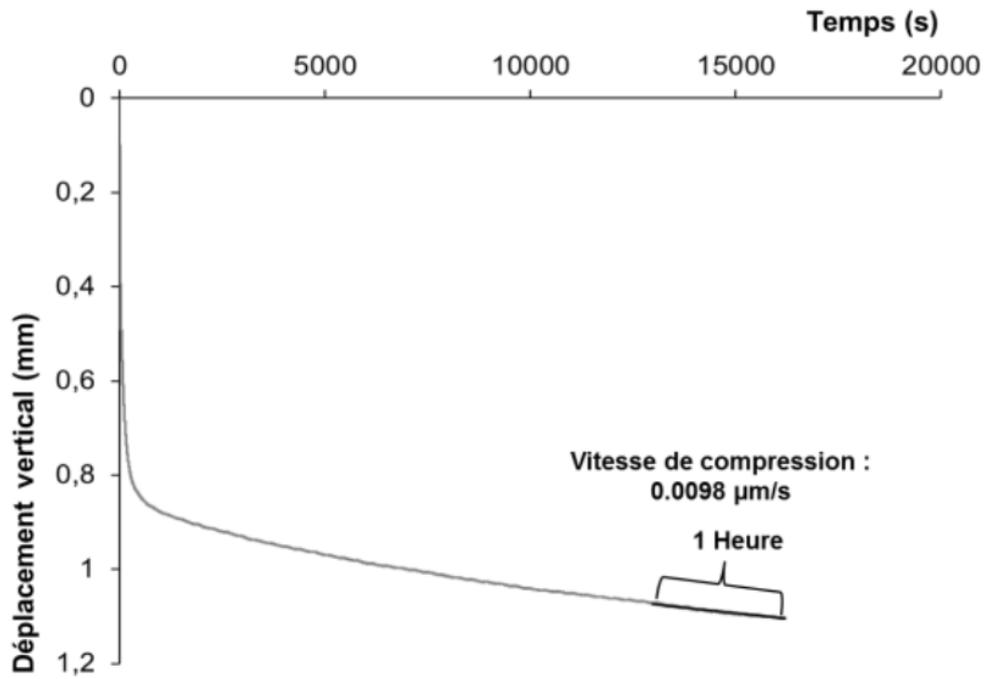


Figure. II. 7. Evolution du déplacement en fonction du temps chargement. (Bruno et col, 2015).

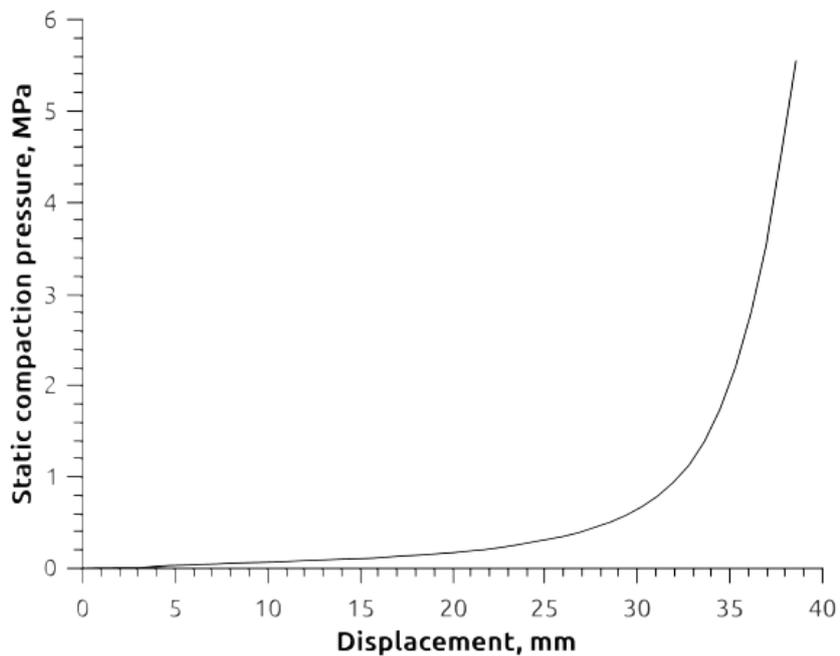


Figure. II. 8. Courbe de compactage statique à une vitesse de 2mm/min. (Zhemchuzhnikov, 2015).

Des échantillons cylindriques (Diamètre =35mm, Hauteur=70mm) ont été confectionnés par (Champiré, 2017) avec un compactage statique à vitesse imposée à partir des optimums Proctor déterminés préalablement. Le compactage statique a été élaboré dans

un moule rigide muni d'un ressort. La figure II.9 représente la variation de la vitesse de compactage en fonction du temps et qui est constituée de deux phases principales :

- La phase de dégagement d'air où la vitesse est très rapide (0.25 mm/s) entre les temps 0 à 200 s >3min.
- La phase dans laquelle l'espace poral devient faible et provoque une réduction de la vitesse (0.03 mm/s) à partir 200s.

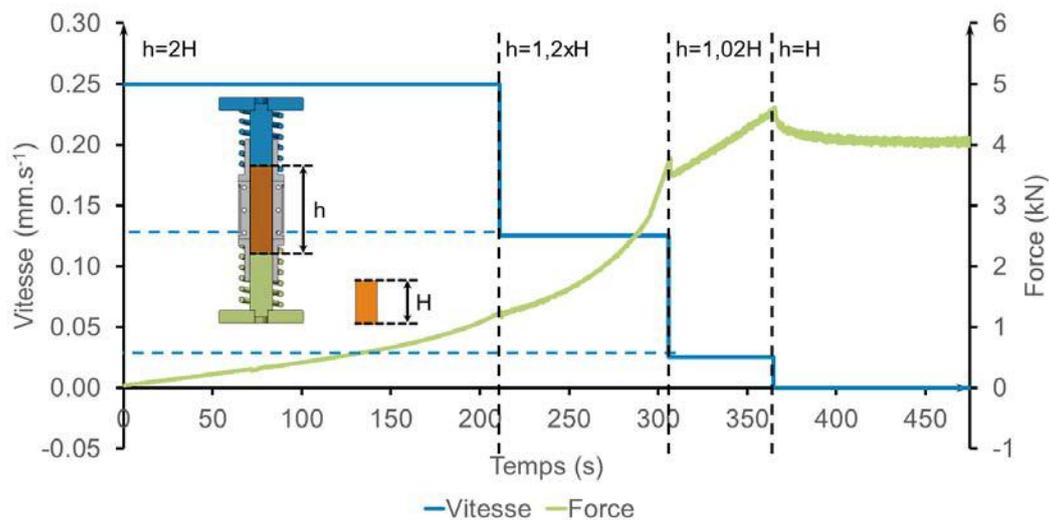


Figure. II. 9. Variation de la vitesse de compactage statique en fonction du temps dans l'essai de (Champiré, 2017).

Ainsi, et d'après les résultats présentés, on constate que la vitesse de compactage statique est généralement inférieure à 2 mm/min.

2.4 Microstructure de la terre compactée

2.5 L'effet de la densité

Des essais de porosimétrie au mercure ont été réalisés par (Fouchel et col, 2015) sur deux briques de terre comprimée. La brique Br1 contient une quantité d'argile de 29% compactée à une densité de 1700 kg/m³ et la brique Br2 contient 54% avec une densité de 2100 kg/m³. L'allure des courbes porosimétriques (Figure II.10) montre que la distribution des tailles des pores est monomodale (5 μm) pour Br1 et bimodale (0,01- 0,80 μm) pour Br2.

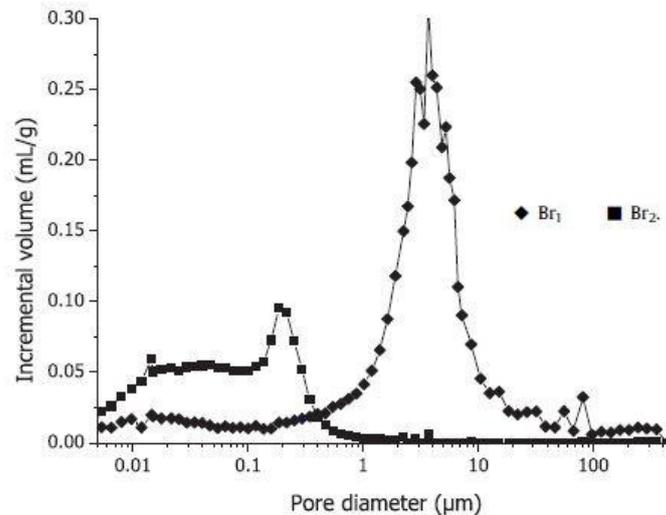


Figure. II. 10. La distribution porale de deux briques de terre comprimée selon [Fouchel et col, 2015](#).

([Sediki et col, 2016](#)) ont réalisé des essais de porosimétrie au mercure (figure II.11) sur trois échantillons compactés statiquement (Sta) à une énergie de 100 kPa , dynamiquement (Dyn) à une énergie de 600kN.m/m³ et un autre compactage avec rouleau en appliquant un chargement compris 50 kPa et 7000 kPa (un prototype de roulement au laboratoire CR-F1). Leurs résultats (figure II.13) montrent que deux pics ont été enregistrés dans le compactage dynamique (0.84 μm et 3.21 μm) et dans le compactage statique (0.84 μm et 6.03 μm) et par roulement (1.06 μm et 21.31 μm). Par la suite, les mêmes auteurs ont déduit que le compactage a un effet prépondérant sur les macropores contrairement aux micropores.

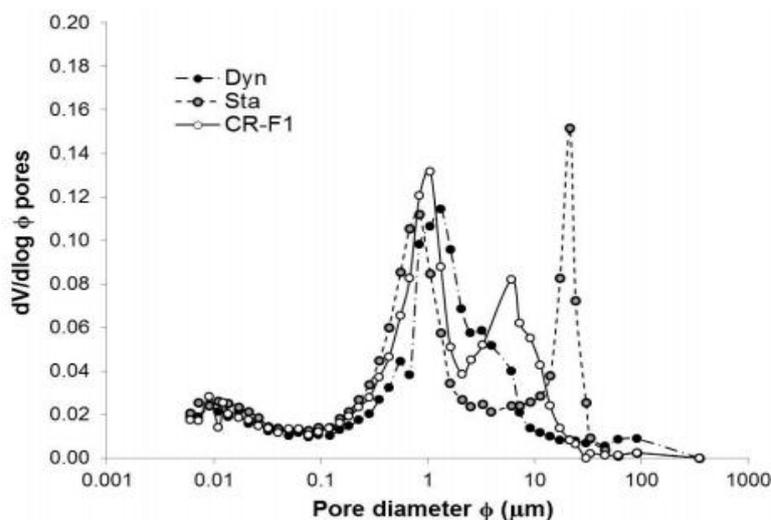


Figure. II. 11. La distribution porale de trois échantillons compactés dynamiquement, statiquement et par roulement. ([Sediki et col, 2016](#))

2.6 L'effet de la teneur en eau et énergie de compactage

Le paramètre teneur en eau a une grande influence sur la microstructure et la distribution porale des sols compactés à différentes énergies.

En prenant le travail de (Delage et col, 1996), trois échantillons compactés à l'optimum ($w_{opt}=18\%$), au côté sec ($w_{opt}=14.9\%$) et au côté humide ($w_{opt}=21.5\%$) ont été étudiés. La figure. II. 12 représente la variation des rayons des pores des trois échantillons. Les résultats des essais porosimétriques montrent une allure des courbes bimodales pour les échantillons compactés à la gauche de l'optimum (côté sec). Par contre, pour les échantillons compactés à l'optimum et au côté humide, l'allure des courbes est unimodale. Ces auteurs, cités dans (Derfouf, 2013), ont constaté que du côté sec, l'échantillon se distingue nettement des deux autres par sa grande famille de macroporosité de rayons d'accès de pore compris entre 1,8 et 6 μm . L'allure des courbes porosimétrique (Figure. II-12) montre que du côté sec la courbe est bimodale et les deux points d'inflexion sont situés à un diamètre d'accès de 0,26 et 4 μm . A l'optimum, un point d'inflexion est apparent à 0,28 μm , et une famille mal classée de rayons d'accès supérieurs à 1 μm est observée. Du côté humide, une seule famille se situant aux alentours de 0,44 μm est observée. La courbe est unimodale. La comparaison du volume poreux de chaque type de porosité a montré que la macroporosité de l'échantillon sec nettement supérieure à celle du côté humide et à l'optimum; ce qui montre que la réduction de certaines classes de macroporosité peut se produire soit par l'énergie mécanique, soit par une augmentation de teneur en eau. Cette réduction se traduit par une augmentation d'autre classe de diamètre d'accès plus petit. Quant aux familles des pores inférieures à 0.03 μm , il semble qu'elle soit la même pour les trois échantillons.

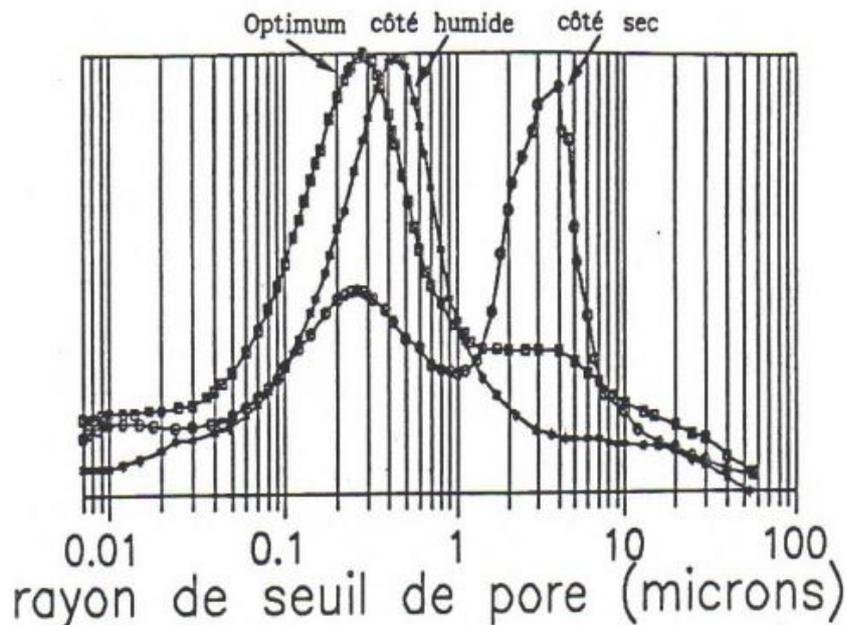


Figure. II. 12. Courbe porosimétriques des échantillons compactés à l'optimum Proctor, côté sec et humide. (Delage et col, 1996)

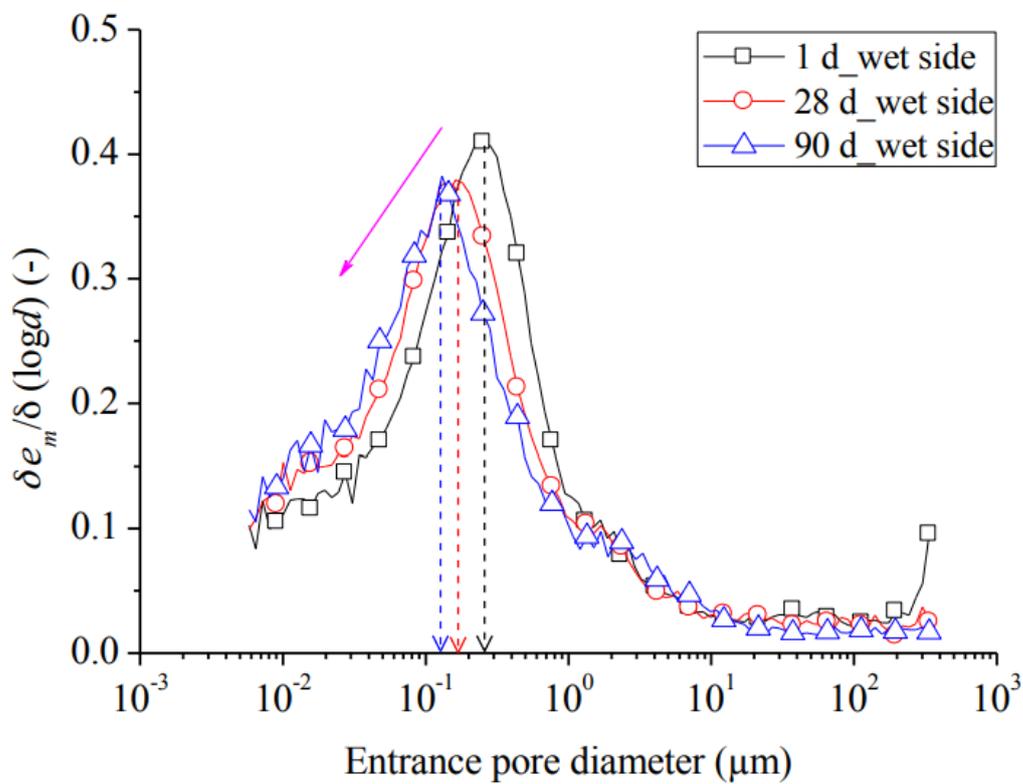
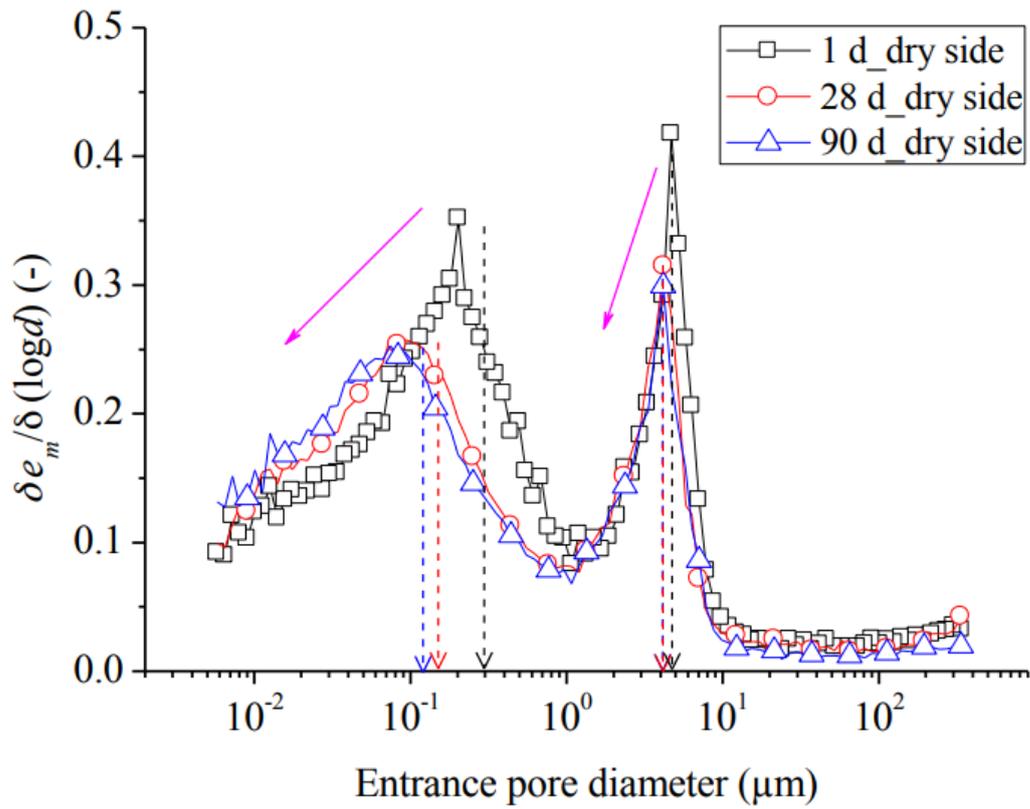


Figure. II. 13. Courbes de distribution de la taille des pores des échantillons traités à la chaux compactés au côté sec (Dry) et au côté humide (Wet). (Wang et col, 2016).

Ces observations rejoignent celles de (Wang et al, 2016) qui ont compacté des échantillons (sol écrêté à 0.4mm mélangé avec 2% de chaux) au côté sec (Dry, $w_{opt}=17\%$) et au côté humide (Wet, $w_{opt}=22\%$) à la même densité sèche de 1.65. Ces échantillons ont été traités à la chaux puis soumis à un temps de cure de 1, 28, 90 jours. Les courbes porosimétriques obtenues sont représentées dans la figure. II. 13.

Ces auteurs ont observé que les échantillons compactés au côté sec indiquent une microstructure bimodale caractérisée par la présence de deux types de pores : macro-pores et micro-pores, tandis que les échantillons compactés au côté humide présentent une microstructure unimodale typique, indiquant la présence d'une seule population de pores.

2.7 Effet du liant

Concernant l'ajout de la chaux, des essais porosimétriques réalisés par (Tran et al, 2014) sont représentés dans la figure II.14.

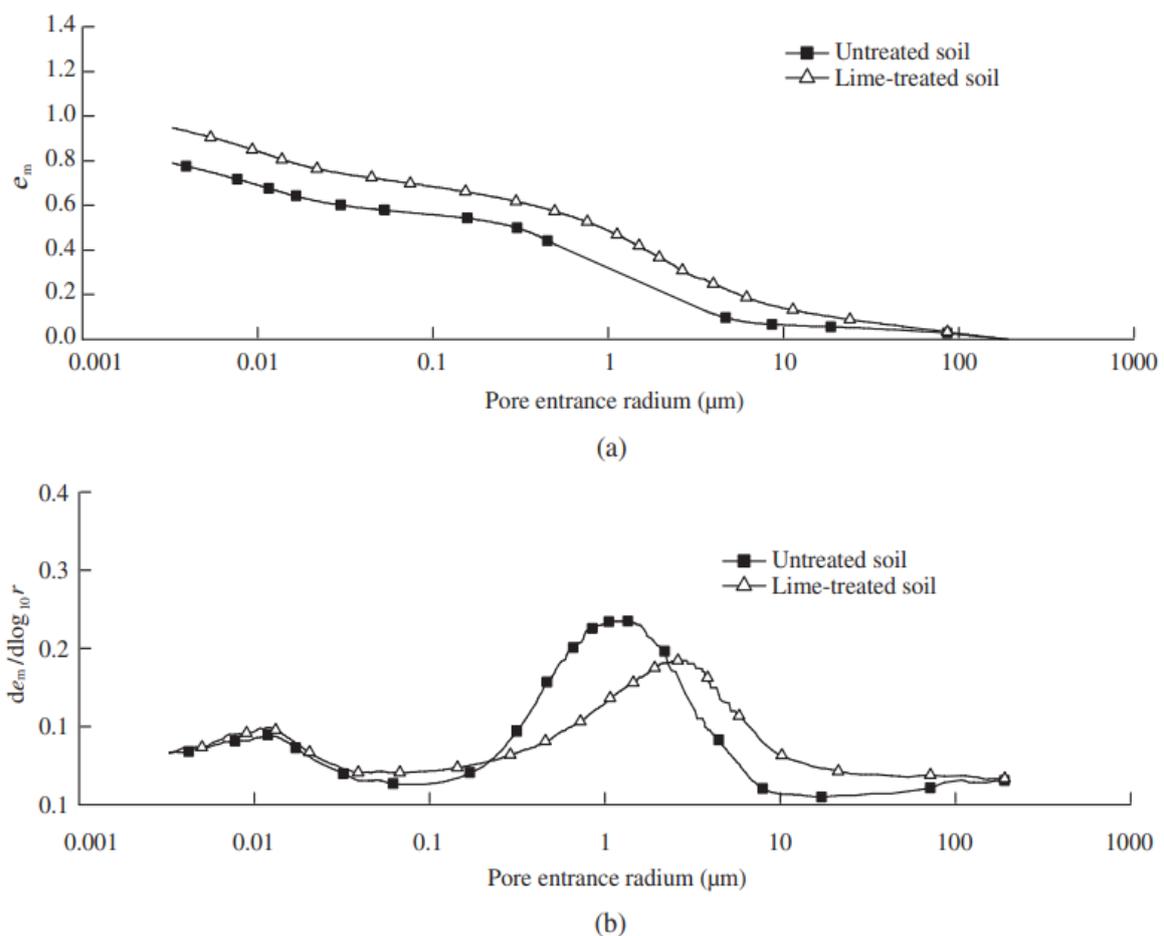


Figure. II. 14. Essai au prosimètre à mercure d'un matériau argileux. (Tran et al, 2014).

Ces résultats montrent l'effet de l'ajout de la chaux sur un matériau argileux compacté. L'indice des vides des échantillons du sol stabilisé à la chaux est un peu plus grand que celui des échantillons du sol non traité. Dans la même figure, (Tran et al, 2014) suggèrent que

l'augmentation du volume total des pores lors du traitement à la chaux est liée à l'augmentation des pores inter-agrégats dû à l'effet floculation-conglomération.

De sa part, (Dao et col, 2018) ont réalisé des essais de microscopie optique et au MEB (figure. II.15) sur des échantillons d'adobe séchés à 28 jours à une température de 25°C (a : matériau brut, b : brut+2% ciment, c : brut+4% ciment, d : brut+12% ciment) afin de voir l'effet de l'ajout du ciment. L'auteur a observé qu'une microstructure hétérogène a été obtenue pour le matériau brut (figure. II.15.a). Le taux de vide a considérablement diminué après l'augmentation de la teneur en ciment donc la microstructure devient plus homogène (figure. II.15.b). Cette homogénéité provient de l'action de cimentation qui dû à la formation des produit spouzzolaniques.

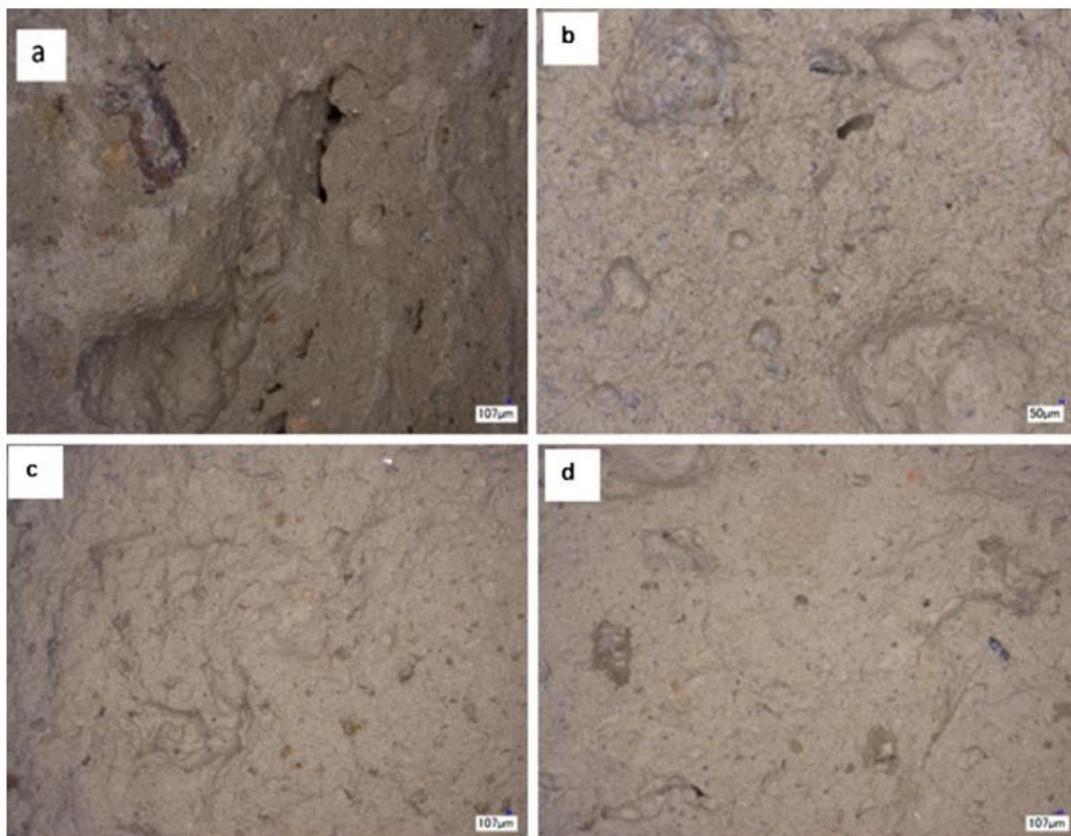


Figure. II. 15. Microstructure d'échantillons d'adobe stabilisés (a: adobe brut; b: adobe avec 2% ciment; c: adobe avec 4% ciment; d: adobe avec 12% de ciment). (Dao et col, 2018)

(Cabane, 2005) explique l'effet de la chaux (1%) sur la microstructure d'un sol (19% de sable, 52% de limon et 29% d'argile) compacté (figure II.16 et 17). Avant le traitement (figure II.16), la représentation schématique de la microstructure montre que le limon compacté est composé d'une quantité de quartz, calcite et une quantité d'eau interstitielle très importante et l'air.

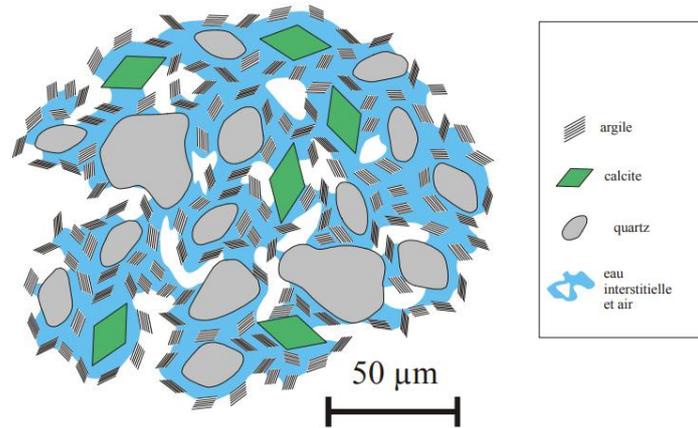


Figure. II. 16. Représentation schématique de la microstructure du limon de Meaux avant traitement. (Cabane, 2005)

L'incorporation d'une faible quantité de chaux (figure II.17) entraîne une modification de la structure du sol compacté par un réarrangement des particules ce qui représente le phénomène de floculation. L'évaporation de l'eau interstitielle conduit à l'apparition des agrégats nommés grumeau (Cabane, 2005). Une apparition des feuilles interstitielles riches en Ca^{+2} et OH^{-2} a été observée dans la figure.II.17. Le même auteur explique que la réaction pouzzolanique est produite au-delà de 90 jours de cure par la réaction des ions de calcium et les argiles des grumeaux (hydrates cristallisés).

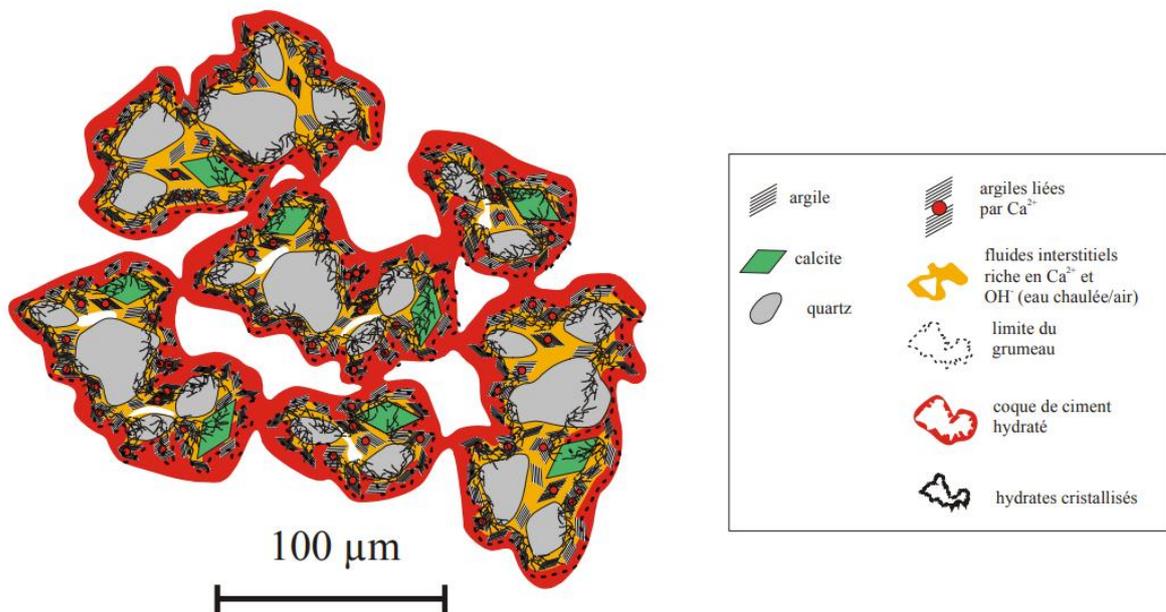


Figure. II. 17. Représentation schématique du limon stabilisé au-delà de 90 jours de cure (Cabane, 2005).

3 Caractéristiques hydriques du matériau terre compactée

La détermination des propriétés hydriques des matériaux de construction est une étape importante afin de cerner les effets de l'eau sous ses différentes formes. Dans les environnements humides ou à fortes précipitations, de nombreux phénomènes doivent être examinés comme la capillarité ou le retrait-gonflement.

Concernant, les propriétés hydriques on met l'accent sur la conductivité hydraulique saturée et l'absorption d'eau par capillarité, en plus, on s'intéresse aux isothermes de sorption-désorption et aux résultats de perméabilité à la vapeur d'eau.

3.1 La conductivité hydraulique saturée

Les études réalisées sur la perméabilité des sols compactés ont montré la sensibilité de cette dernière à plusieurs paramètres tels que la contrainte de compactage (Moussai, 1993), la teneur en eau (Daoud, 1996), la géométrie des éprouvettes (Carpenter et Stephenson, 1986), etc.

(Mitchell et col, 1965; Moussai, 1993 ; Daoud, 1996) ont mis en évidence l'effet du compactage statique et dynamique sur la perméabilité à l'eau à l'état liquide. La figure II.18 illustre l'impact du mode de compactage sur la conductivité hydraulique saturée. Les modes de compactage ont conduit à un réarrangement de sols très différents. L'intensité des déformations améliore la densité et réduit l'écoulement d'une manière significative.

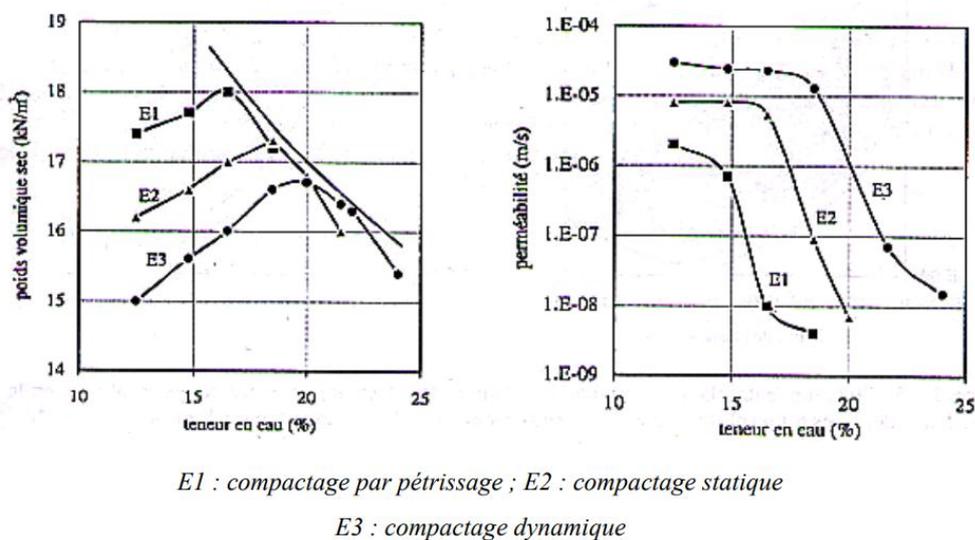


Figure. II. 18. Comparaison entre les valeurs de conductivité hydraulique saturée obtenues sur des éprouvettes compactées par pétrissage et par méthodes statique et dynamique. (Mitchell et col, 1965).

3.2 L'absorption d'eau capillaire

Elle est souvent caractérisée par le coefficient d'absorption d'eau A_w ou parfois par la sorptivité (Eq.II.3). Plusieurs normes existent pour la détermination de ce paramètre ([ASTM C1585](#) ; [XP P13-901](#) ; [UNI 10859-BS 771-1](#)). Le principe consiste à déterminer la courbe représentant la variation de la quantité d'eau absorbée par unité de surface sur la racine du temps.

Une expérience d'absorption par capillarité réalisée par ([Couvreur, 2014](#)), a été menée sur des blocs de pisé est représentée sur la figure (figure II.19). Les échantillons ont été séchés puis placés sur un tissu plongé dans l'eau. Après une durée de 24 heures, la quantité d'eau absorbée est déterminée par mesure d'eau restée dans le récipient en verre.



Figure. II. 19. Essai de capillarité sur des blocs de pisé. ([Couvreur, 2014](#)).

$$S = \frac{A_w}{\rho_w} \quad [\text{Eq.II.3}]$$

S : la sorptivité ($L/T^{1/2}$) ;

ρ_w : la masse volumique d'eau (M/L^3) ;

A_w : le coefficient d'absorption par capillarité ($Kg.m^2.s^{-1/2}$).

3.2.1 L'influence de la densité sèche sur l'absorption capillaire d'eau

([Fabbri et col, 2019](#)) ont confectionné des échantillons cylindriques (10 cm de diamètre) compactés à l'optimum Proctor modifié initialement équilibrés à 20 °C et HR= 50%. Selon la figure II.20, les auteurs ont constaté une dépendance inverse entre la valeur de la densité sèche et le coefficient d'absorption d'eau.

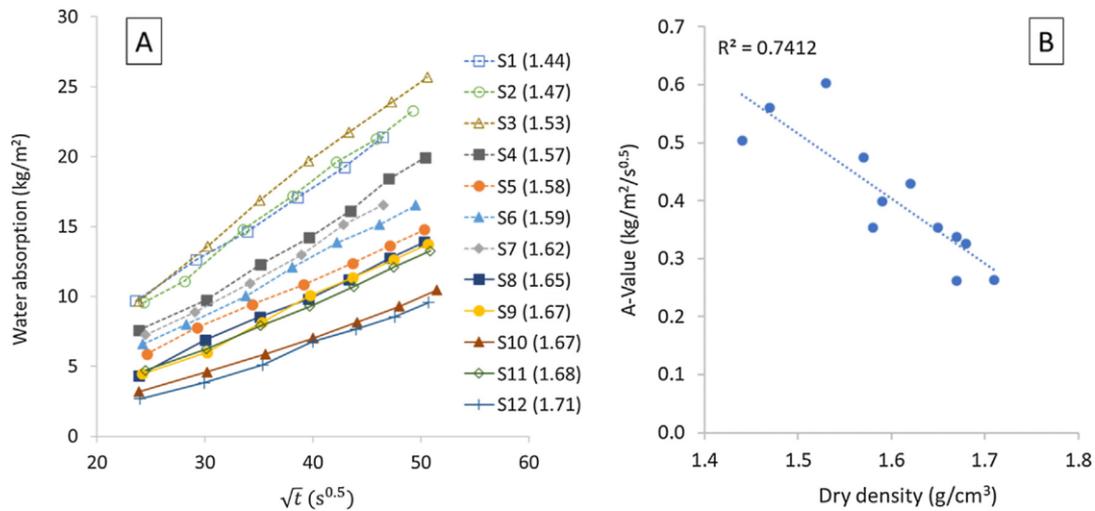


Figure. II. 20. (A) Résultats des expériences d'absorption d'eau; (B) Variation de la valeur de A_w avec la densité sèche initiale des échantillons. (Fabbri et col, 2019)

(Taalah et col, 2016) ont obtenu deux corrélations (figure II.21) entre le coefficient d'absorption d'eau et la densité apparente des blocs de terre traitée avec des fibres (fibre de palmier dattier de diamètre de 0,1 à 0.8 mm et découpé en pièce de 2cm à 3.5 cm puis ont été soumises à un traitement alcalin) et d'autres séries non traitées. Les fibres ont été immergées dans une solution d'hydroxyde de sodium à 6 % en poids pendant 24 h à température du laboratoire. Après traitement, les fibres sont lavées à l'eau distillée pour éliminer l'excès de soude et séchées à 50 C pendant 24 h en laboratoire à température ambiante.

La diminution du coefficient d'absorption d'eau avec l'augmentation de la masse volumique semble être légèrement plus élevée dans les blocs de fibres traitées que dans les blocs de fibres non traitées.

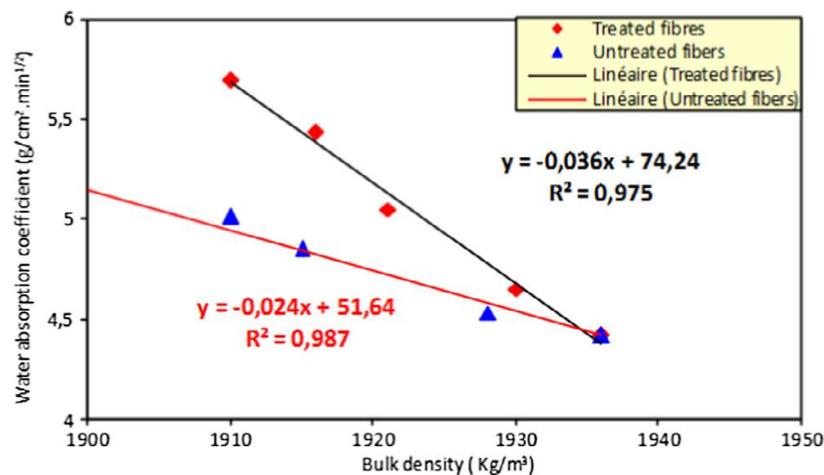


Figure. II. 21. Relation entre le coefficient d'absorption d'eau et la densité apparente de deux matériaux. (Taalalah et col, 2016).

3.2.2 Influence de la température sur l'absorption d'eau

Des échantillons en terre de forme prismatique ont été testés par (Feng et Janssen, 2018) pour déterminer le coefficient d'absorption d'eau à différentes températures (11.2, 22.5, 38 °C). Tous les échantillons testés à une température de 38 °C enregistrent un coefficient d'absorption capillaire le plus élevé pour les trois densités (figure II.22). Le coefficient d'absorption capillaire est fortement dépendant de la température selon l'équation déduite par (Feng et Janssen, 2018) : Des relations similaires pour des pierres et des briques de terre ont été obtenues par (Karagiannis et al, 2016), à des températures de 20, 25 et 30.

$$A_w = k(0.095(T - 273.15) + 6.566) \quad [\text{Eq. II. 4}]$$

A_w : est le coefficient d'absorption d'eau ;

k : est un coefficient qui dépend la microstructure de l'échantillon ;

T : est la température (l'équation est valable pour une température comprise entre 0 et 50°C).

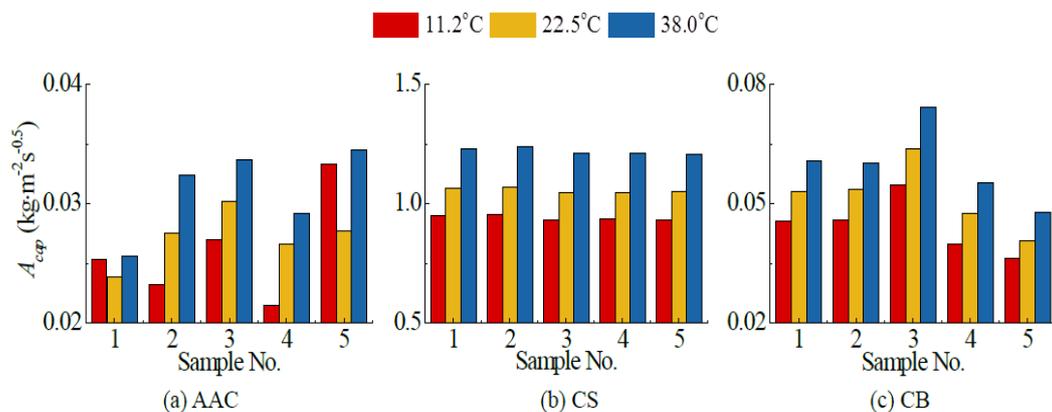


Figure. II. 22. Coefficients d'absorption capillaire à différentes températures. (Feng et Janssen, 2018).

3.2.3 Influence de la taille des échantillons sur l'absorption d'eau

Afin d'évaluer cet aspect, (Feng et Janssen, 2019) ont mis l'accent sur l'influence de la taille de l'échantillon (figure II.23) 16 à 32 cm^2 sur le coefficient d'absorption d'eau. Aucune différence significative n'a pu être observée entre des échantillons de tailles différentes (figure II.22).

Une faible diminution du coefficient d'absorption (0.17 à 0.13 et 0.10) a été observée par (Lu et col, 2020) pour des hauteurs d'échantillons prismatiques respectivement de l'ordre de 50, 100 et 150 mm.

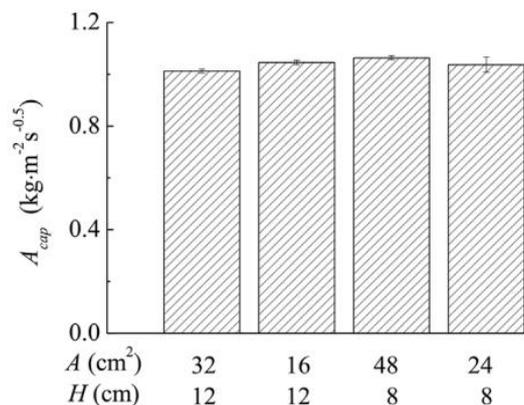


Figure. II. 23. Influence de la taille de l'échantillon sur le coefficient A_w (Feng et Janssen, 2019).

3.2.4 Influence de l'ajout sur l'absorption d'eau

Après l'ajout de fibres à un sol traité à 10% de chaux vive et séché à 7 jours, une augmentation très importante du coefficient d'absorption par capillarité a été observée par (Taallah et Guettala, 2016) (figure II.24). Ceci est lié à la nature des fibres utilisés qui présente un caractère hydrophile (Taallah et Guettala, 2016).

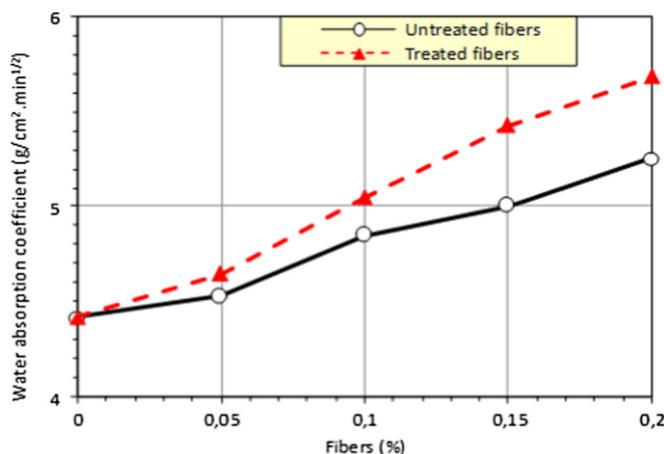


Figure. II. 24. Effet de la variation de la teneur en fibres sur le coefficient d'absorption d'eau de BTC stabilisé avec 10% de chaux vive après 7 jours de cure. (Taallah et Guettala, 2016)

Concernant l'incorporation de la chaux, (Al-Naddaf, 2018) a montré que les échantillons cylindriques de 5,5 cm de diamètre et d'une hauteur de 7cm à base d'un mortier traité à la chaux aérienne absorbent une quantité très élevée d'eau par capillarité.

La figure II.25 montre la variation du coefficient d'absorption d'eau par capillarité A_w des échantillons en fonction de l'ajout du ciment à des échantillons d'adobe (Dao et col, 2018). Un traitement au ciment (de 0 à 12%) permet d'augmenter le coefficient d'absorption d'eau par capillarité A_w (de 0.24 à 0.55 Kg/m²·s^{1/2}).

Selon (Dao et col, 2018) avec l'ajout de 4 % de ciment, la taille des pores est fortement réduite avec le développement de CSH. In addition avec l'augmentation de l'ajout de ciment des composés soufrés comme l'ettringite ont été détectés qui peut être diminué l'absorption d'eau (Dao et col, 2018).

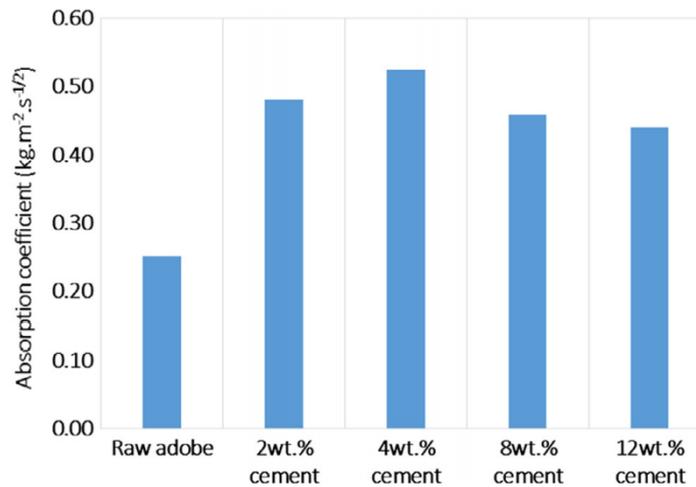


Figure. II. 25. Variation du coefficient d'absorption A_w en fonction de l'ajout du ciment. (Dao et col, 2018)

3.3 Isotherme sorption-désorption et chemin de séchage humidification

Plusieurs travaux dans la littérature se sont intéressés à l'étude des isothermes de sorption et désorption pour caractériser la variation de l'état hydrique du matériau terre par échange de vapeur d'eau (El Fgaier et col, 2016 ; Zhang et col, 2018 ; Seng et col, 2018 ; McGregor et col, 2014 ; Serbah et col, 2018, Bruno et col, 2017 ; Phung, 2018).

La technique de l'essai isotherme de sorption désorption consiste à placer l'échantillon à différentes humidités relatives (HR= 0 à 100 %) comme il est mentionné dans la figure II.26. Cette dernière représente la variation de la teneur en humidité à la fin d'essai en fonction de l'humidité relative imposée à l'échantillon. Cette variation de l'humidité relative permet à l'échantillon de passer de l'état hygroscopique (Les molécules d'eau se fixe au matériau sous forme de couches adsorbées successives, Collet, 2004) vers un état super-hygroscopique (l'adsorption devient multicouche ou polymoléculaire (Collet, 2004) afin d'atteindre l'état saturé (Piot, 2009). Sur le chemin de désorption les échantillons présentent un phénomène d'hystérésis.

Lorsque le matériau a atteint des valeurs de l'humidité relative très importantes (saturation maximale), la résistance mécanique devient faible, et il n'y a plus de transfert par capillarité.

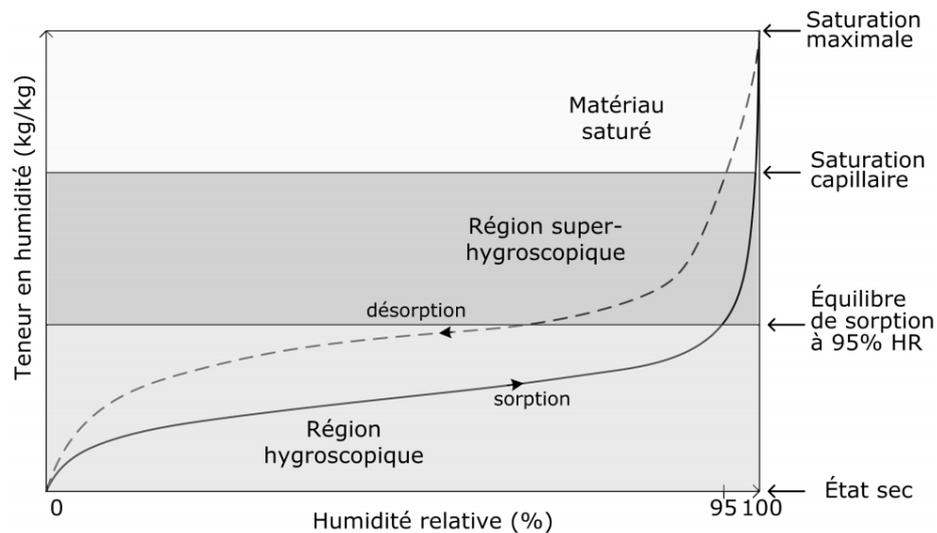


Figure. II. 26. Forme générale de la courbe de sorption. (Piot, 2009)

Un travail de (McGregor et col, 2014) a montré l'influence de la bentonite sur les isothermes de sorption-désorption. Dans la figure II.27, le groupe d'échantillons qui contient une quantité d'argile (bentonite) de 10% a une capacité de rétention plus élevée que celle qui ont une teneur en bentonite de 1%. Le phénomène d'hystérésis est plus prononcé pour le groupe contenant 10% de bentonite.

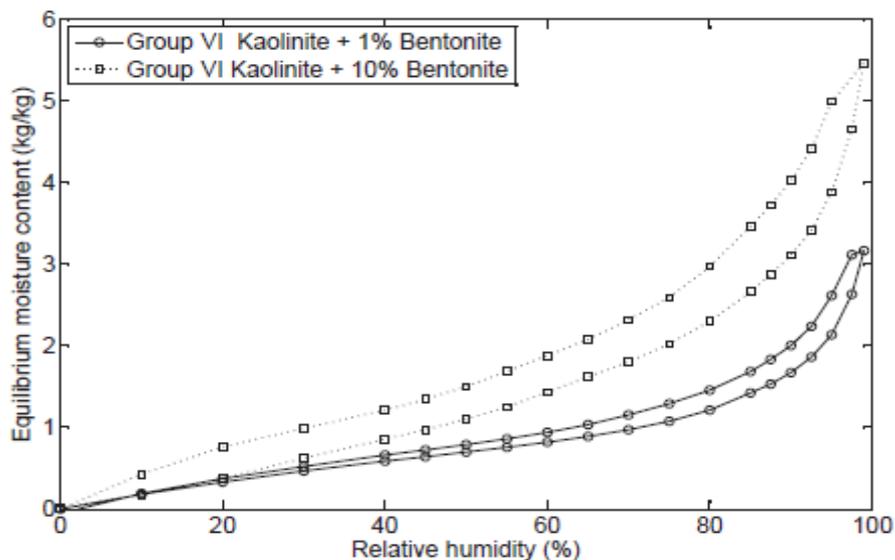


Figure. II. 27. Isothermes de sorption-désorption des échantillons de BTC traités avec la bentonite. (McGregor et col, 2014)

L'étude du chemin de séchage-humidification permet de caractériser les variations hydriques et volumiques des échantillons testés. Dans la figure II.28 le chemin de séchage humidification de deux échantillons destinés à la fabrication de BTC compactés à l'optimum Proctor modifié OPM ($\gamma_d = 18.4 \text{ kN/m}^3, w = 16.4\%$) et OPM+25 coups ($\gamma_d = 19.1 \text{ kN/m}^3, w = 13.5\%$) sont représentés (Serbah et col, 2018). Les techniques d'imposition de succion utilisées sont : la méthode osmotique et la méthode des solutions salines saturées. La

variation des paramètres d'états (indice des vides, degré de saturation et la teneur en eau) en fonction de la succion est donnée dans une représentation plus globale (cinq plans).

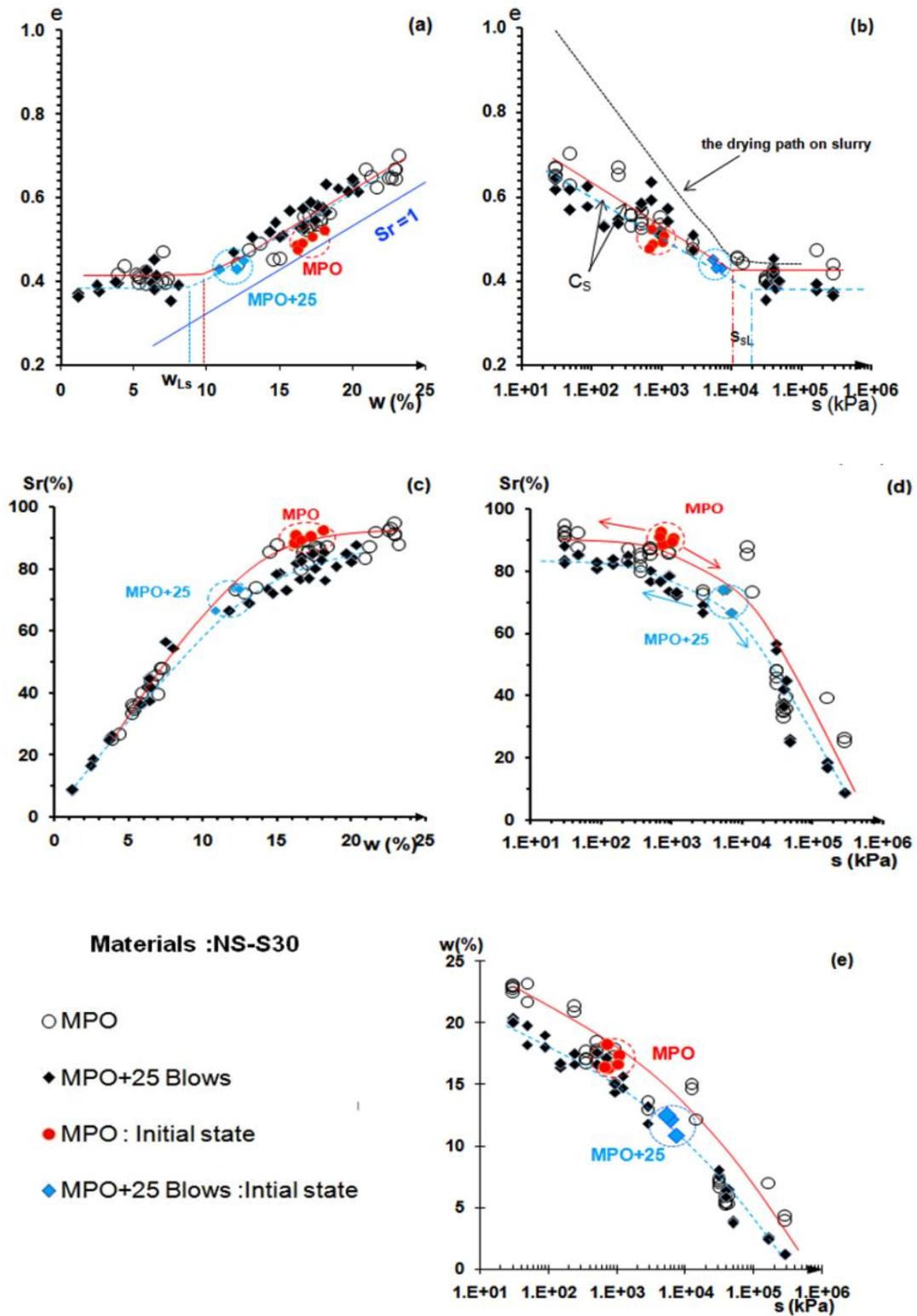


Figure. II. 28. Chemins de séchage-humidification d'un sol compacté à différentes énergies. (Serbah et al ,2018).

L'auteur a constaté les points suivants:

- Le matériau suit le chemin d'humidification de pente OC (chemin surconsolidé) lorsque la succion est inférieure à la succion initiale si non, le matériau suit un chemin de séchage jusqu'à le palier de limite de retrait.
- Le degré de saturation pendant le séchage diminue jusqu'à 24,8% pour l'OPM et 8,4% pour l'OPM+ 25. Lors d'humidification le S_r ne dépasse pas 95% pour les échantillons OPM et ce qui correspond à l'énergie OPM égale à 87%.
- Dans la partie humidification, le matériau OPM suit la ligne OC. Dans le cas de OPM + 25 échantillons, les valeurs initiales (succion OPM et indices des vides OPM) sont très proches des limites de retrait
- L'indice des vides varie théoriquement d'une manière linéaire avec la teneur en eau dans le domaine saturé et reste presque constant pour $w < w_{SL}$.
- Concernant les variations volumiques, l'indice des vides « e » à l'OPM est supérieure à l'indice des vides de limite de retrait (e_{SL} de OPM = 0.41).

3.4 La diffusion à la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur d'eau est un facteur essentiel dans l'hygrométrie d'un matériau de construction. L'humidité relative est présente sous forme de gaz quand elle passe à travers la matrice du matériau. Les techniques de la coupelle sèche (Dry cup) et humide (Wet cup) permettent de mesurer la perméabilité à la vapeur d'eau conformément à la norme ([BS EN ISO 12572](#), [E96-ASTM](#)).

Cette perméabilité est souvent caractérisée par le coefficient μ définissant la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau (Eq.III.17). Les résultats de l'étude réalisée par ([Fouchal et col, 2015](#)) sur trois matériaux : brique de terre, géo-polymères et cadres en bois sont représentés sur la figure II.29 Cette figure montre la différence entre ces matériaux de construction lors du transfert de vapeur d'eau pour les deux méthodes de coupelle sèche et humide. Les briques de terre (Br1 et Br2) ont un facteur de résistance qui varie entre 6.2 et 7.1. Ce facteur est de l'ordre de 15.3 pour le bois et de 34.5 pour le géo-polymère. La différence entre les valeurs de la brique de terre est due essentiellement à la différence du pourcentage d'argile dans chaque brique (Br1=29% et Br2=54%).

Le facteur de résistance diminue lorsque les pores sont remplis d'eau (domaine de la zone capillaire) alors que le phénomène de condensation-évaporation peut être à l'origine de l'accélération du déplacement de la vapeur d'eau à travers le matériau ([Aubert, 2013](#)).

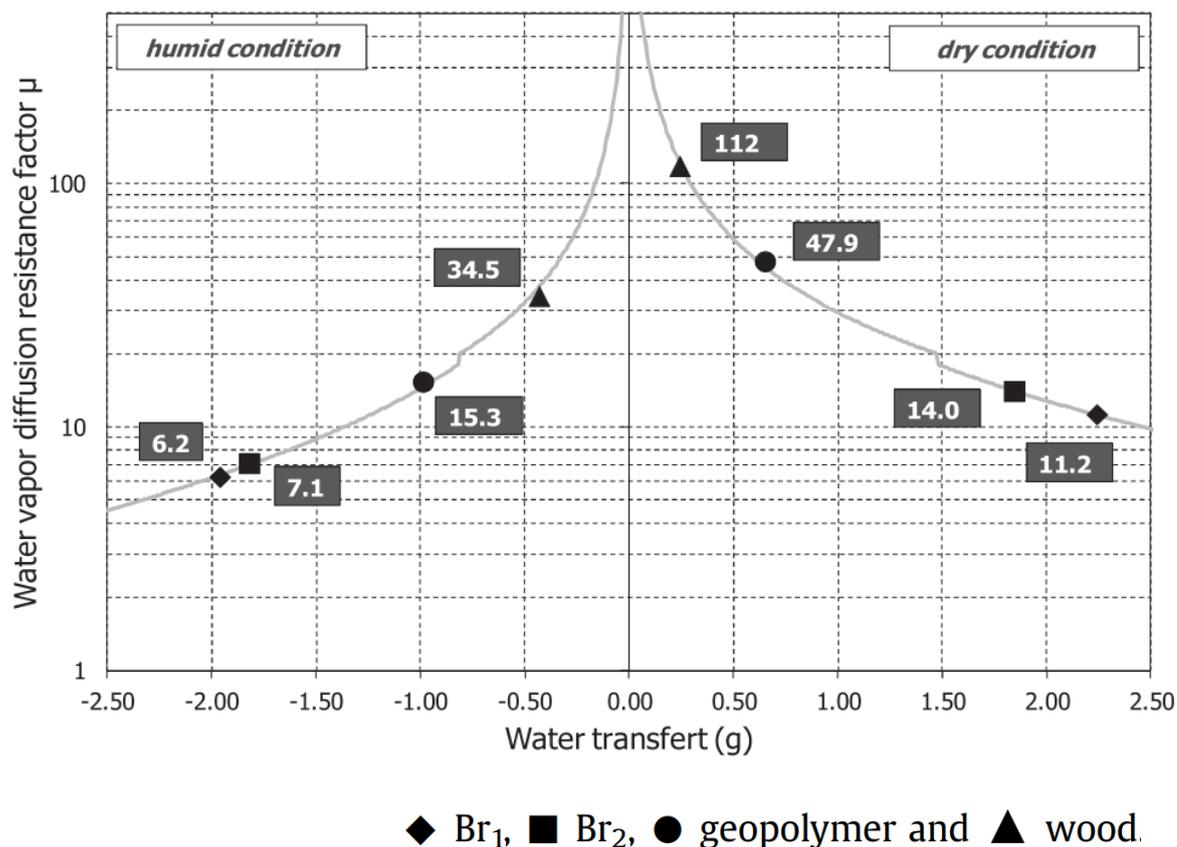


Figure. II. 29. Le facteur de résistance à la vapeur d'eau des matériaux. (Fouchal et col, 2015)

Les résultats du coefficient de la résistance à la vapeur μ obtenus par (Cagnon et col, 2014) sont de 3 à 7 pour la coupelle humide et de 7 à 14 pour la coupelle sèche de six briques de terre comprimées (BTC) (la quantité de l'argile varie entre 23% et 38%). La remarque la plus importante dans cette étude est que les valeurs les plus élevées de μ sont enregistrées pour la brique qui contient une quantité d'argile de l'ordre de 38%.

La brique de terre crue a une résistance à la vapeur qui varie entre 3 et 19 selon les mesures recensées dans la littérature par (Moevus et col, 2012). De faibles valeurs de ce facteur μ ont été obtenues par (Seng et col, 2018) de l'ordre de 1.77 à 2.59 pour des blocs de béton de chanvre. Ce facteur ne dépasse pas 50 pour l'ensemble des matériaux de construction sauf les milieux poreux comme les pierres calcaires ou le béton (figure II.30) (Cagnon et col, 2014).

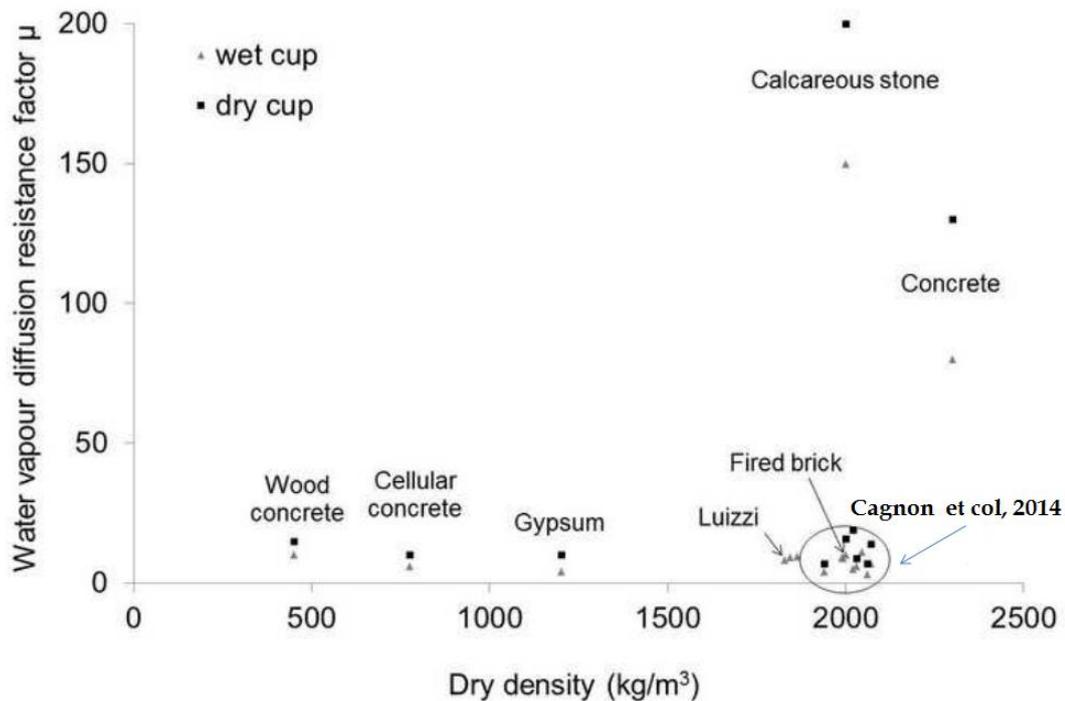


Figure. II. 30. Facteur de résistance à la vapeur d'eau en fonction de la densité sèche des matériaux de construction. (Cagnon et col, 2014)

4 Caractéristiques thermiques d'un matériau terre compactée

Le confort thermique dans les bâtiments dépend essentiellement des propriétés thermiques des matériaux utilisés dans sa construction. Parmi ces propriétés thermiques on cite la conductivité thermique, la diffusivité thermique, la capacité de stockage thermique.

4.1 La conductivité thermique

L'une des propriétés thermiques les plus essentielles est la conductivité thermique λ . Elle correspond à la quantité de chaleur qui passe à travers une épaisseur de ce matériau par mètre carré de surface pour 1 Kelvin (K) d'écart de température entre la face extérieure et la face intérieure.

Sur la figure II.31, on représente la conductivité thermique des matériaux de construction les plus utilisés dans le domaine de l'habitat. Les valeurs de conductivité thermique des différents matériaux de construction en terre (adobe, torchis, mortier de terre, pisé, BTC) donnent une visualisation globale sur ses aptitudes d'isolation thermique. La conductivité thermique (λ) du pisé et de la bauge ont la même fourchette de valeurs et qui varie entre $0.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à environ $2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Les plus faibles valeurs de λ dans les matériaux de construction en terre sont celles du mélange terre avec la paille (entre 0.1 et $0.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). On note que selon la norme française RT 2012, un matériau est considéré comme isolant si sa conductivité thermique est inférieure à $0,065 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

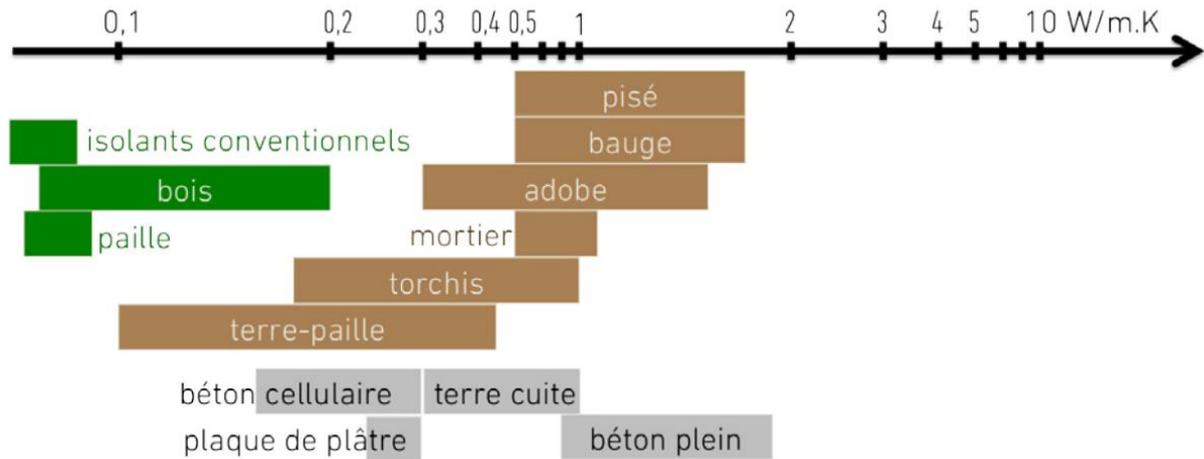


Figure. II. 31. Conductivité thermique de divers matériaux de construction. (Moevus et col, 2016)

4.1.1 Effet de la stabilisation sur la conductivité thermique

(Laborel-Préneron et col, 2015) ont comparé des valeurs de la conductivité thermique de blocs de terre comprimée qui ont été fabriqués à partir des fines argilo-calcaires (Fac) traitées à 3% (C3) et 6% (C6) de chènevotte (figure. II. 32). L'ajout de chènevotte permet de baisser fortement la conductivité thermique ce qui est en accord avec les résultats de (Taalab et col, 2016) avec l'ajout des fibres de palmes. (Laurent, 1987) a expliqué que cette diminution de λ est liée à la diminution de la densité des échantillons et aux faibles valeurs de la conductivité des ajouts.

Dans une autre étude, (Mekhermeche, 2012) a obtenu des résultats thermiques sur des briques en argile très plastique ($W_L=69\%$) mélangée avec du sable propre (0 à 40%) avec un degré de finesse de 1,23. Ce dernier a un impact sur la plasticité du matériau terre d'une part, et d'autre part sur les propriétés thermiques de sorte que la conductivité a diminué de 0,94 à 0,82 $W.m^{-1} K^{-1}$.

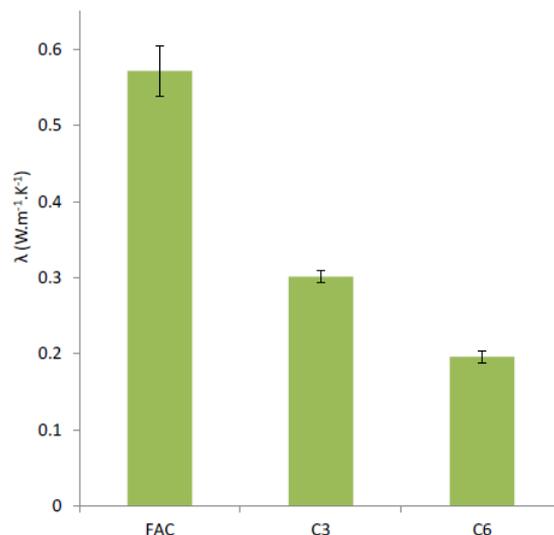


Figure. II. 32. Influence de la teneur en chènevotte sur la conductivité thermique d'un éco-matériau à base de terre crue. (Laborel-Préneron et col, 2015)

L'influence de la stabilisation à la chaux et au ciment étudiée par (Saidi et al ,2018) est présentée dans la figure II.33. Les résultats montrent que la relation conductivité thermique et le pourcentage de ciment ou de chaux peut être exprimé par des corrélations de forme linéaire. Les valeurs de la conductivité thermique enregistrées lors de la stabilisation respectivement au ciment (12%) et à la chaux (12%) sont de 1 et 1.1 (W.m⁻¹.K⁻¹). Dans le même contexte, (Ashour et col, 2015 ; Zhang et col, 2018) ont trouvé que l'ajout de ciment engendre une légère augmentation de la conductivité thermique.

En revanche (Laurent, 1987) a obtenu une diminution de la conductivité thermique lors de l'incorporation du ciment dans la terre crue compactée. En concluant que cette diminution est due à la diminution de la quantité de la phase solide (quartz) attaquée par l'ajout du ciment. Il est à noter que la variation de la conductivité thermique est fortement liée à la nature du sol et le type de stabilisant et les réactions chimiques qui peuvent surgir.

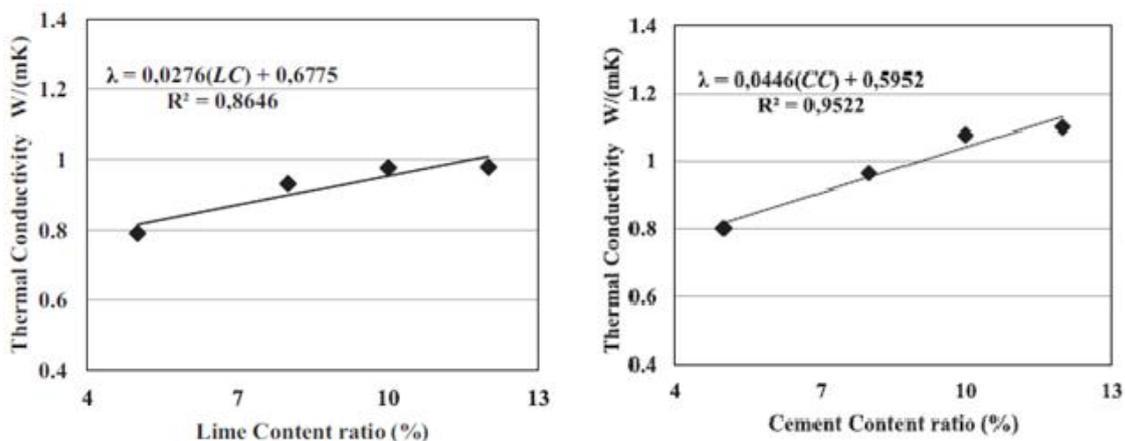


Figure. II. 33. L'effet du ciment et de la chaux sur la conductivité thermique. (Said et col, 2018)

4.1.2 Effet de la densité sèche sur la conductivité thermique

Des blocs de BTC ont été confectionnés à des densités sèches croissantes (1.5, 1.7, 1.9 et 2.1 g/cm³) et pour lesquels (Zhang et col, 2018) ont procédé à des mesures de conductivité thermique. Ces résultats (figure II.34) montrent qu'une augmentation de la densité entraîne une croissance de la conductivité thermique d'une façon linéaire.

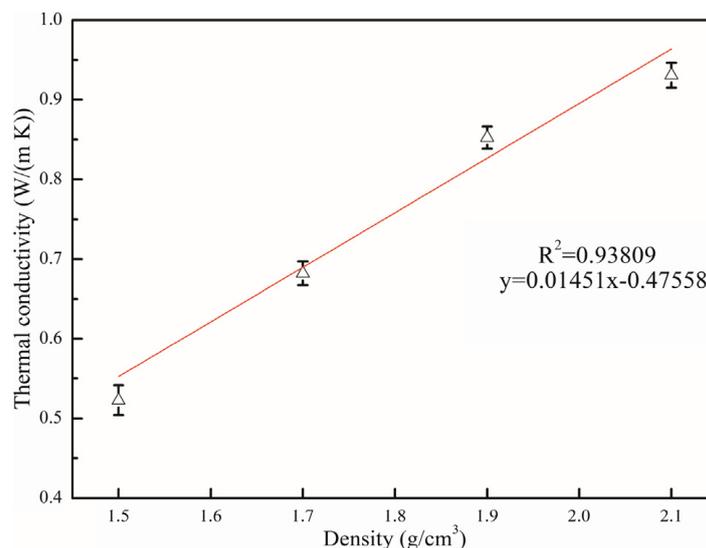


Figure. II. 34. Variation de la conductivité thermique en fonction de la densité. (Zhang et col, 2018).

(Oti et col, 2010) ont exposé la variation de la conductivité thermique en fonction de la densité des briques cuites et non cuites (figure II.35). Les résultats montrent que la brique non cuite a une faible transmission de chaleur par rapport à la brique cuite. La conductivité thermique de la brique cuite a atteint 0.5 W. m⁻¹.K⁻¹, par contre celle de la brique non cuite, elle ne dépasse pas 0.35 W. m⁻¹. K⁻¹ (en augmentant la densité sèche jusqu'à 1700 Kg/m³).

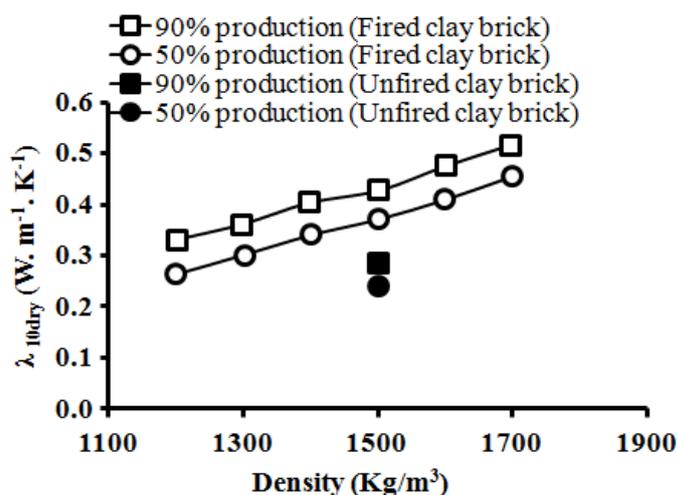


Figure. II. 35. Comparaison entre la conductivité thermique des briques d'argile non cuite par et des briques d'argile cuite. (Oti et col, 2010)

4.1.3 Effet de la teneur en eau et du degré de saturation sur la conductivité thermique

La majorité des résultats de la littérature s'accordent sur le fait que la diminution du pourcentage de l'eau dans un échantillon de sol induit une diminution de la conductivité thermique (Laurent, 1987 ; Mňahončáková, 2006 ; Hall et Allinson 2009 ; Alrtimi, 2016 ; Phung ,2018). Ceci montre que l'absence des molécules d'eau gouverne l'aptitude à l'isolation thermique. Une étude menée par (Moevus et col, 2016) sur deux matériaux compactés à OPN (figure II.36) a montré une proportionnalité entre la conductivité thermique mesurée et la teneur en eau des échantillons compactés.

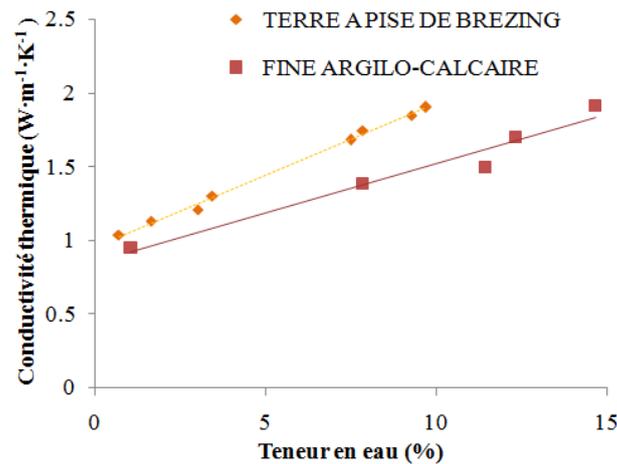


Figure. II. 36. Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau. (Moevus et col, 2016).

(Wang et col, 2016) ont étudié la variation de la conductivité thermique des échantillons traités à la chaux en fonction du temps de cure (figure II.37). La conductivité thermique ne présente pas de changement significatif pour les échantillons compactés au côté humide. Par contre, ceux qui sont compactés au côté sec, ont une faible diminution de la conductivité thermique (5 % après 90 jours de cure). La différence entre les deux courbes est relié à la présence de l'eau qui a une conductivité thermique supérieure à celle de l'air (Wang et col, 2016). Cela explique pourquoi les échantillons humides ont toujours une conductivité thermique plus élevée que les échantillons secs.

Par contre une diminution non linéaire a été observée par (El-Rawi et AL-Wash, 1995) dans la figure II.38 qui représente la variation de la conductivité thermique en fonction du temps de cure (depuis 7 à 90 jours) d'un sol compacté ($W_L=35\%$, $I_p=13\%$) puis stabilisé au ciment (16.7%) et un béton (eau/ciment= 0.5).

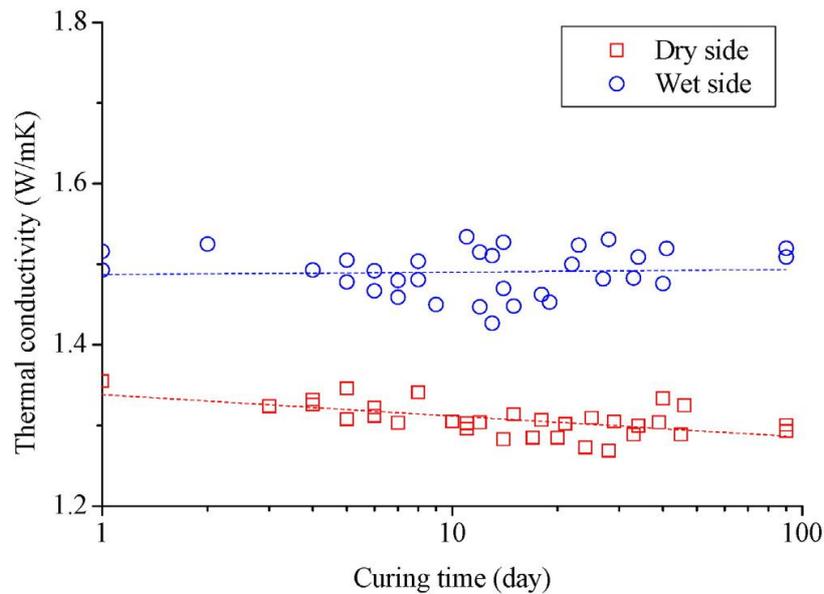


Figure. II. 37. Conductivité thermique des échantillons traités à la chaux en fonction du temps de cure. (Wang et col, 2016)

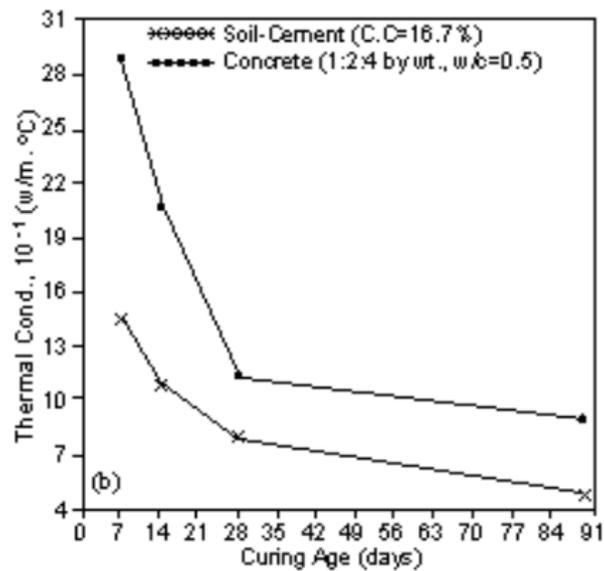


Figure. II. 38. Variation de la conductivité thermique en fonction du temps de cure. (El-Rawi et AL-Wash, 1995).

En ce qui concerne le degré de saturation, les résultats de (Liuzzi et col, 2013, Vitiello et col, 2020) exposent une tendance similaire à celles représentées dans la figure II.39. L'augmentation du degré de saturation engendrera une augmentation linéaire de la conductivité thermique. (Hall et Allinson, 2009) ont mentionné que la raison de l'augmentation de la conductivité thermique en fonction du degré de saturation est liée la conductivité thermique de l'eau et qui est nettement supérieure à celle de la conductivité thermique de l'air.

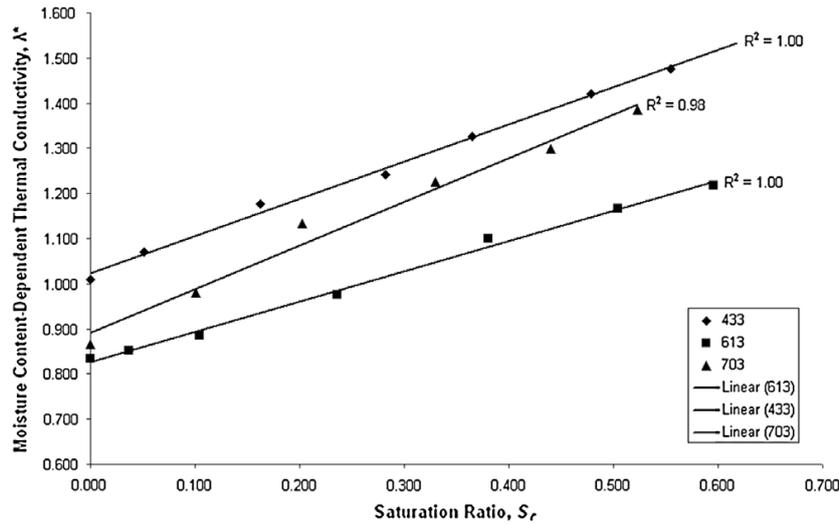


Figure. II. 39. Relation entre la conductivité thermique et le degré de saturation. (Hall et Allinson, 2009).

4.2 La capacité de stockage thermique

C'est une propriété importante pour caractériser le confort thermique d'un mur de construction soumis à un gradient de température. Ce paramètre est lié directement à la capacité thermique et dépend de la masse volumique du matériau selon l'équation [II.5].

$$C_{\rho} = \frac{C}{\rho} \quad [\text{Eq. II.5}]$$

C est la chaleur spécifique volumique ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$) ;

C_p est la chaleur spécifique massique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);

ρ est la masse volumique (kg / m^3).

La capacité thermique massique de plusieurs matériaux de construction est représentée dans figure II.40. La plus grande valeur de C_p est celle de l'eau à l'état liquide ($T=20^{\circ}\text{C}$) et elle est autour de $4000 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$. La BTC a une capacité thermique massique faible ($C_p < 1000$) par rapport aux autres matériaux de construction (béton, pierre, paille).

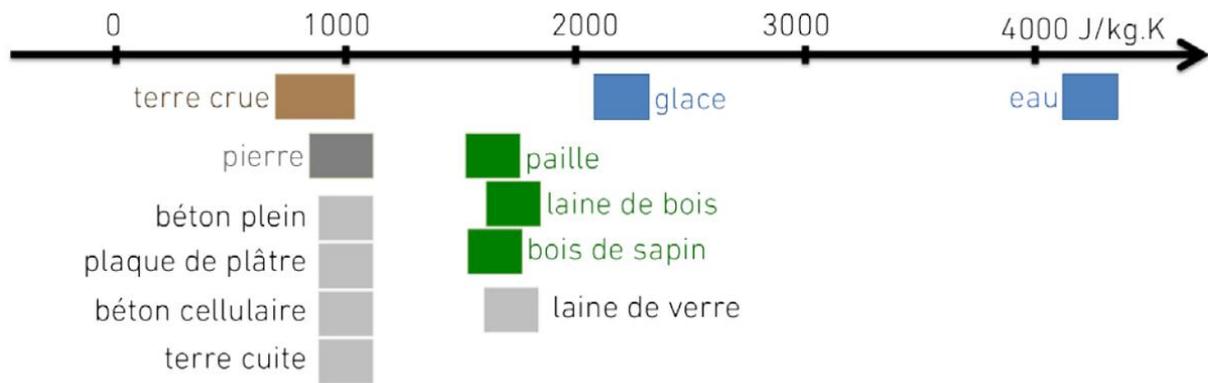


Figure. II. 40. Capacité thermique de plusieurs matériaux de construction. (Moevus et col, 2016).

La capacité thermique volumétrique (C) mesurée par (Ouedraogo et col, 2015) pour un matériau à base de terre compactée ($w_L=40\%$, $I_p=21\%$) est de $2,602 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$. Pour le matériau stabilisé au ciment, elle est de $2,925 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$, ensuite une incorporation d'un ajout comme le papier donne une valeur de $2,925 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$.

Dans l'étude thermique de (Hall et Allinson, 2009), une caractérisation de la capacité thermique volumétrique du pisé stabilisé au ciment (6%) compacté à trois masses volumiques ($2120, 2020$ et 1980 Kg/m^3) donne des valeurs respectives sont de l'ordre $1.754, 1.728$ et $1.719 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$. Ceci signifie que la diminution de la masse volumique engendre une diminution de la capacité thermique volumétrique et cela a été confirmé par (Abu-Hamdeh, 2003).

Concernant l'effet de la teneur en eau sur la capacité thermique volumique d'un limon de Plaisir compacté (limon ecrêté à 2 mm , $I_p= 20,6\%$), ceci est montré par l'exemple de résultats de (Boukelia, 2016) donné dans la figure II.41. Une croissance linéaire de la capacité volumique a été observée jusqu'à la valeur $3.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ avec la croissance de la teneur en eau entre 10 et 16% . Après, une stabilisation est enregistrée malgré l'augmentation de la teneur de 16% à 20 . L'auteur a montré l'existence de la relation (Eq :II.6) en utilisant le modèle (modèle de De Vries).

$$C = \rho_s C_s (1 - \phi) + \phi \rho_w C_w S_r \quad [\text{Eq.II.6}]$$

ρ_s et ρ_w est la masse volumique du solide et de l'eau respectivement (Kg/m^3);

C_s et C_w est capacité thermique massique de solide et de l'eau ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$);

ϕ est la porosité;

S_r est le degré de saturation.

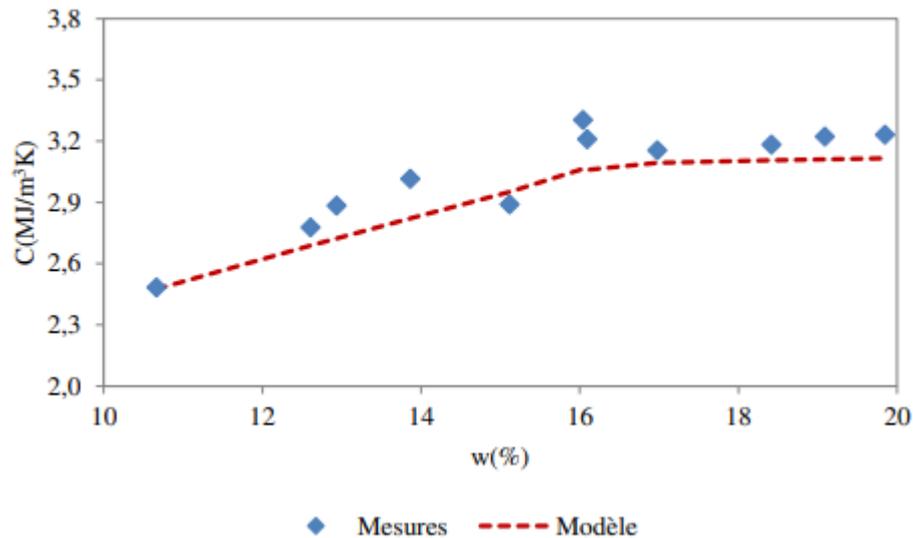


Figure. II. 41. Comparaison de la capacité volumique thermique d'un limon compacté mesurée et calculée suivant le modèle. (Boukelia, 2016)

5 Diffusivité thermique

Elle représente la capacité du matériau à transmettre les variations de température. Elle caractérise aussi la vitesse de déplacement des calories. Elle s'exprime en (m^2/s). Dans la littérature, la méthode la plus utilisée pour sa détermination est celle de flash (boite) (Ezbakhe et col, 2001 ; Meukem, 2004 ; El zahary et col, 2018) en appliquant une impulsion thermique à travers une source de rayonnement (en utilisant une lampe à incandescence).

La figure II.42 représente la variation de la diffusivité thermique (D) des échantillons stabilisés au ciment (0 à 10%) en fonction de la teneur volumique en eau (Ezbakhe et col, 2001). La diffusivité thermique décroît en fonction du pourcentage du ciment. En plus elle augmente avec l'accroissement du pourcentage de la teneur en eau ce qui en concordance avec les résultats de (Meukam, 2004).

La présence de l'eau dans la matrice du matériau entraîne la formation des ponts thermiques ou ponts de conduction de la chaleur ce qui engendre une croissance des deux paramètres essentiels à savoir la conductivité et de la diffusivité thermique (Ezbakhe et col, 2001).

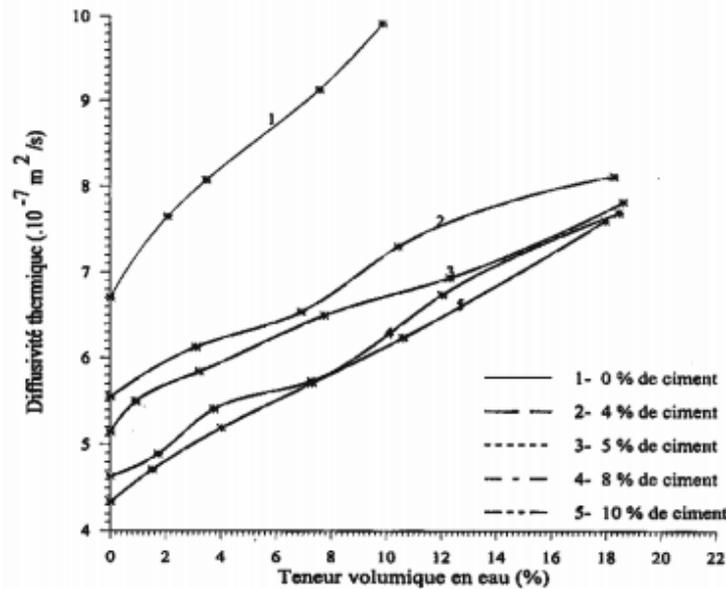


Figure. II. 42. Diffusivité thermique de la terre stabilisée à différents pourcentages de ciment en fonction de la teneur volumique. (Ezbakhe et col, 2001)

Un exemple de l'influence de la masse volumique sur la diffusivité thermique est représenté sur la figure II.43. Une variation de la masse volumique entre 1610 Kg/m^3 à 2200 Kg/m^3 conduit à une augmentation de la diffusivité thermique de $7 \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$ à $14 \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$. La même constatation a été observée par (Meukam, 2004) de sorte qu'une augmentation de la pression de compactage entraîne une croissance de la diffusivité thermique.

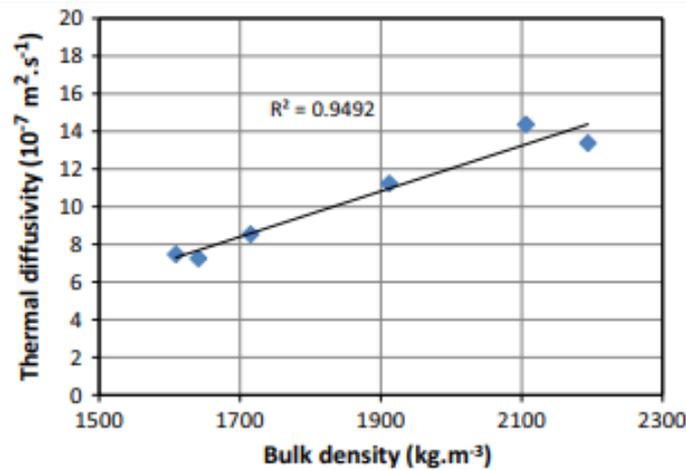


Figure. II. 43. Variation de la diffusivité thermique en fonction de la densité volumique. (Mansour et col, 2016)

6 Conclusion

A travers ce chapitre les conclusions suivantes peuvent être tirées :

Dans la partie hydrique :

- Le mode et l'énergie déployée au cours du compactage ainsi que sa vitesse ont une grande influence sur les caractéristiques finales et le comportement du matériau. Généralement une vitesse de compactage inférieure à 2mm/min est couramment utilisée par les auteurs.
- L'effet de la densité est très prépondérant sur le coefficient d'absorption d'eau dans lequel ce dernier augmente quand la densité décroît. Ce coefficient augmente avec l'ajout de la chaux ou ciment.
- Le comportement sur chemin de sorption et désorption est caractérisé par une hystérésis plus au moins importante entre les deux chemins en fonction de la quantité des fines présente dans le matériau. Cette dernière conditionne aussi la capacité de rétention du matériau.

La partie thermique nous a permis d'explorer l'ensemble des paramètres thermophysiques à savoir la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la capacité de stockage thermique des matériaux en terre compactée, en prenant en compte l'influence de paramètres hydriques. De cette partie, on peut conclure les points suivants:

- Le comportement thermique global du matériau terre dépend des propriétés thermiques de ces composants (phase solide, liquide et gazeuse ainsi que le stabilisant utilisé)
- La conductivité thermique dépend fortement des paramètres initiaux à savoir la teneur en eau, le degré de saturation et la densité ou la masse volumique ainsi que le type de stabilisant.
- La présence de l'eau dans la matrice du matériau entraîne la formation des ponts qui accélèrent la transmission de la chaleur ce qui augmente la conductivité et la diffusivité thermiques.

Nous allons par la suite commencer la partie expérimentale en choisissant le sol adéquat à la fabrication des BTC et en présentant les procédures expérimentales des essais hydriques et thermiques.

CHAPITRE III:
**Matériau d'étude et méthodes
expérimentales**

1 Introduction

L'identification d'un sol est l'une des principales étapes dans un programme expérimental. La classification d'un sol donne une idée préliminaire sur son comportement mécanique, hydrique et thermique. De nombreux essais seront présentés dans ce chapitre tels que ; la granulométrie, la plasticité, la matière organique etc...

Le programme expérimental (figure III.1), consiste en premier lieu à faire une sélection d'un matériau apte à être utilisé dans la fabrication des briques de terre comprimées (BTC). Le sol sélectionné doit répondre à certaines exigences, notamment en matière de granulométrie et de plasticité (XP-P19-901). Après le choix parmi quatre matériaux sélectionnés, une identification complète de ce matériau a été élaborée. Par la suite, les caractéristiques de compactage à l'optimum Proctor normal (OPN) et modifié (OPM) ainsi qu'à une contrainte de compactage statique de 4MPa (densité sèche maximale et teneur en eau optimale) ont été déterminées. Pour ce faire, deux modes de compactage ont été utilisés, à savoir, le compactage dynamique (PM et PN) et le compactage statique (4MPa). Après la confection des échantillons, des essais de caractérisation de comportement hydriques et thermiques sur le matériau brut et stabilisé à 4% de chaux ont été réalisés.

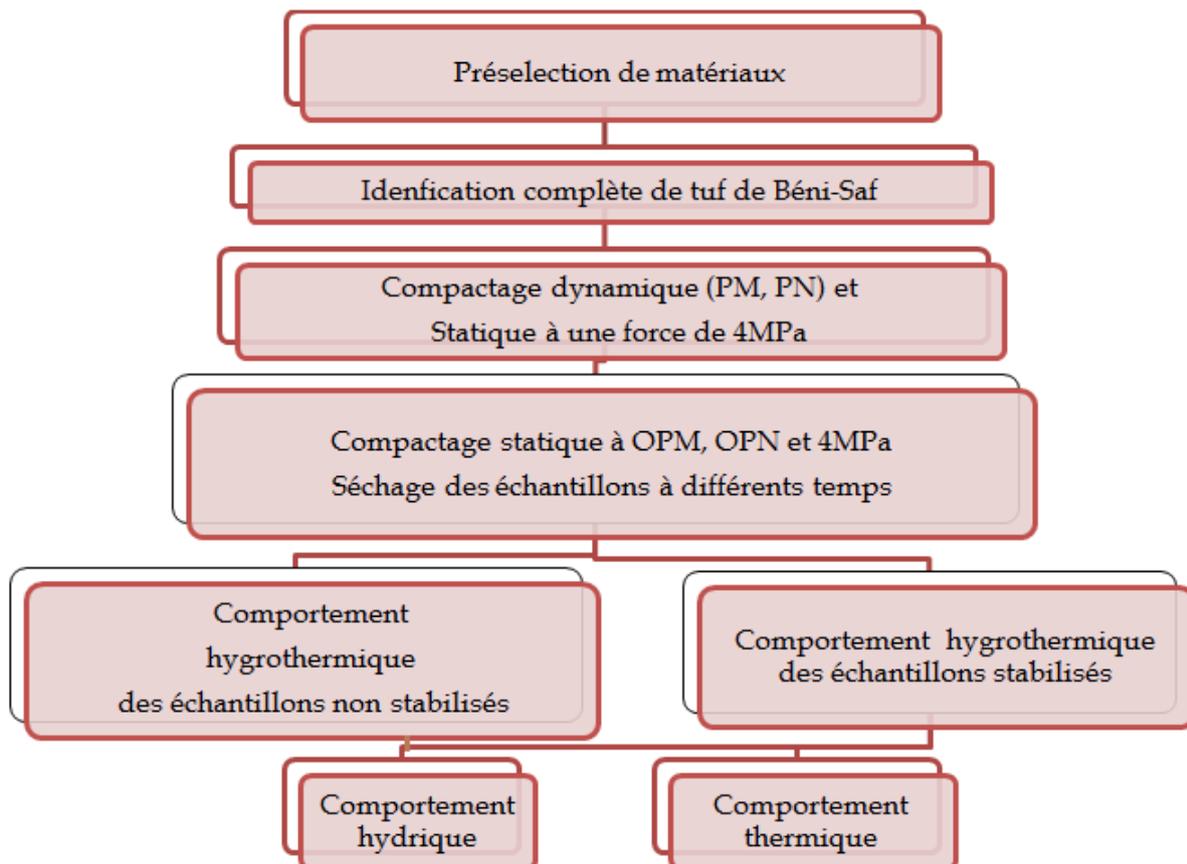


Figure. III. 1. Programme expérimental.

2 Sélection du Matériau

Plusieurs auteurs se sont intéressés au tuf calcaire de la région de Tlemcen et ses applications dans le domaine de la géotechnique et de la construction en terre (Allal et col, 1992 ; Zadjouji, 2007 ; Bezzar et Ghomari 2009).

Selon l'abondance et les conditions d'accès, nous avons choisi des matériaux de la région de Nedroma et Beni-Saf (figure III.2). Pour le cas du site de Nedroma, le prélevement sur sol étudié a été réalisé à une profondeur de 80 cm, par contre celui de Béni-Saf, il se présentait sous forme d'un dépôt utilisé dans le projet du chemin de fer de la ville de Béni-Saf à côté de la cimenterie. Pour cette étude, quatre matériaux ont été testés, à savoir:

- Le tuf de Béni-Saf (TB) provenant d'un déblai des travaux de chemin de fer reliant Ain-Temouchent à Béni-Saf.
- Argile (AN) et sable (SN) provenant de la carrière de Nedroma.
- Mélange de sable et argile (ASN) de Nedroma (70% de sable et 30% d'argile).



Figure. III. 2. Localisation des lieux de prélèvement des matériaux étudiés.

2.1 Détermination de la granulométrie et de la plasticité

Une quantité suffisante de matériau a été prélevé des deux gisements pour effectuer les essais préliminaires de sélection à savoir :

- L'analyse granulométrique par tamisage par voie humide et sédimentation conformément à la norme (NF P94-041) et (NF P94-057).
- Les valeurs des limites d'Atterberg (limite de liquidité W_L , limite de plasticité W_p et indice de plasticité I_p) ont été déterminées à partir de la norme (NF P94-051).

Les paramètres physiques de granulométrie et plasticité des quatre sols étudiés (TB, AN, SN,ASN) sont donnés dans le tableau III.1.

Tableau. III. 1. Paramètres physiques de matériaux étudiés.

Essais	Caractéristiques	Unités	(TB)	(AN)	(SN)	(ASN)
Granulométrie NF P94- 056 et 057	Gravier	%	12	10	0.5	6
	Sable	%	48	23	99.5	71
	Limon	%	21	56	0	15
	Argile	%	19	11	0	8
	D_{max}	mm	5	5	2	5
	D_{60}	mm	0.08	0.05	1.25	1
	D_{10}	mm	0.001	0.002	0.3	0.015
	D_{30}	mm	0.008	0.009	1	0.2
	C_c	/	0.8	0.8	2.7	2.7
	C_u	/	80	25	4.2	66.7
Plasticité NF P94-051	W_L	%	37	37	28	25
	W_p	%	20	21	17	17
	I_p	%	17	16	11	8
	A_c	/	0.90	1.43	/	0.97

2.2 Critères de granulométrie

Les courbes granulométriques des différents matériaux étudiés ainsi que leurs propriétés plastiques sont respectivement reportées sur les fuseaux granulométriques et celui de plasticité (les figures III.3 et III.4).

En ce qui concerne la distribution granulométrique, il apparaît que la courbe du tuf de Béni-Saf se positionne sensiblement au milieu entre les deux bornes limites des fuseaux granulométriques de (MOPT, 1992 ; XP-P19-901; Houben et Guillaud, 1994 ; CRAterre-Rigassi, 1995).

On peut constater que l'argile de Nedroma s'intègre aussi dans les fuseaux granulométriques tout en étant proche de la limite supérieure des fuseaux et déborde par rapport aux recommandations de (Houben et Guillaud, 1994, CRAterre-Rigassi, 1995) concernant la quantité de sable et de limon. Pour le mélange sable-argile, on peut aussi remarquer qu'il s'intègre dans le fuseau granulométrique, tout en se situant à proximité de la limite inférieure. Le débordement de la courbe du sable montre que ce dernier présente une granulométrie serrée comprise entre 2mm et 0.1 mm.

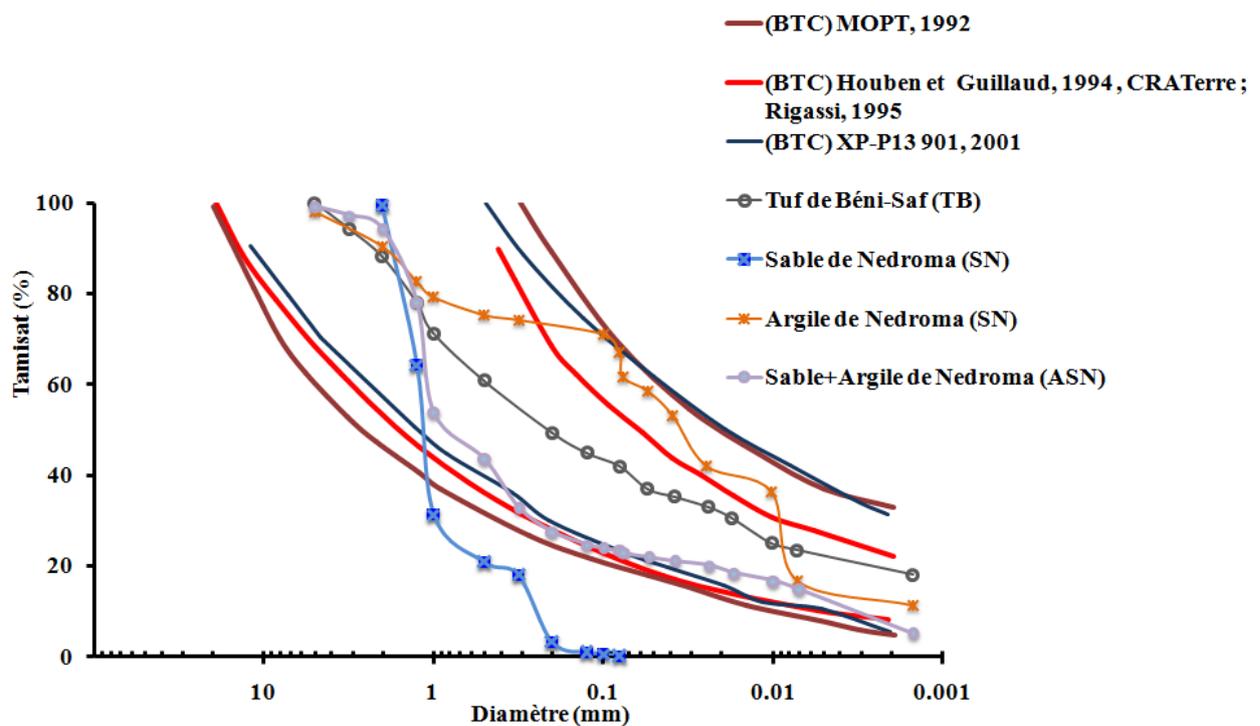


Figure. III. 3. La distribution granulométrique par rapport aux fuseaux granulométriques recommandés par la norme (MOPT, 1992 ; XP-P19-901; Houben and Guillaud, 1994 ; CRAterre-Rigassi, 1995).

2.3 Critère de plasticité

Concernant le fuseau de plasticité, nous avons reporté les points d'intersection des valeurs de w_L et de I_p des différents matériaux étudiés (Figure III.4).

On peut aussi constater que l'ensemble des points projetés se rassemblent dans le fuseau de plasticité préconisé par la norme (XP-P19-901) et les recommandations de (Houben and Guillaud, 1994).

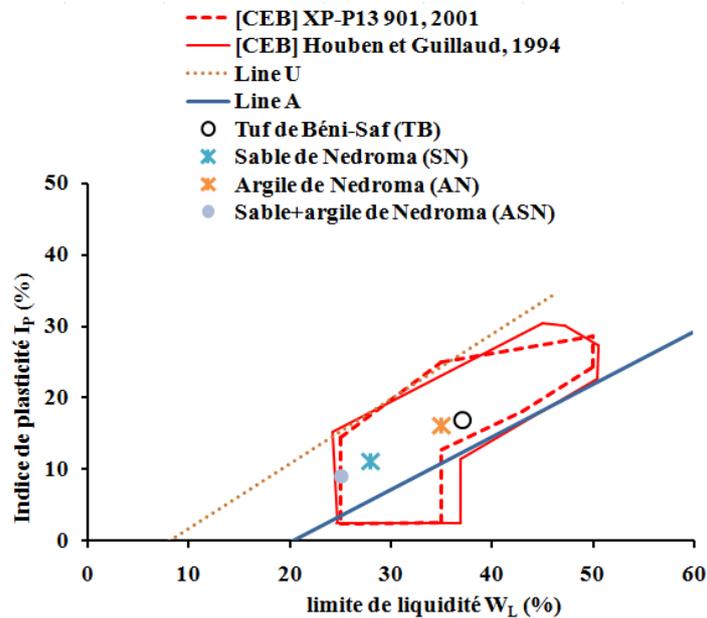


Figure. III. 4. Les points d'intersection entre W_L et I_p par rapport aux fuseaux recommandés de plasticité par la norme (XP-P19-901 ; Houben et Guillaud, 1994).

2.4 Classifications des matériaux selon la norme (NF P 18-592)

D'après la nomenclature de l'annexe A de la norme (NF P 18-592) (Figure III.5), le mélange sable argile et le tuf de Béni-Saf sont classés comme des matériaux sableux contenant une quantité plus au moins des fines.

Le sable de Nedroma est intégré dans la classe D2 relatif aux sols insensibles à l'eau caractérisé par une cohésion nulle et une forte perméabilité. L'argile de Nedroma (classe A2), est un matériau acceptable mais contenant trop de fines.

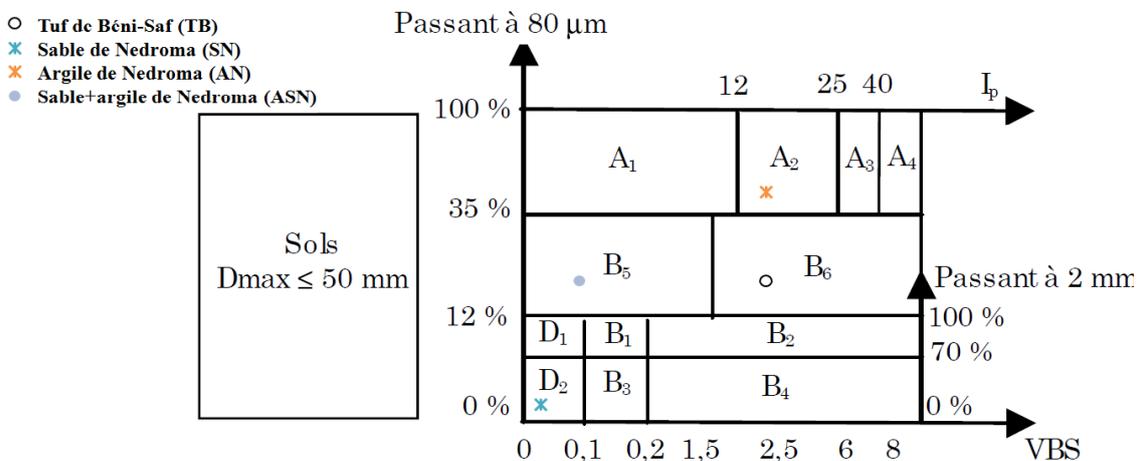


Figure. III. 5. Classifications des matériaux conformément à la norme (NF P 18-592).

D'après l'ensemble de ces résultats et ces observations, on peut dire que le tuf de Béni Saf, paraît le mieux adapté pour l'utilisation dans la fabrication des briques de terre comprimée, et ceci essentiellement grâce à sa granulométrie ainsi que sa plasticité qui s'intègrent parfaitement dans les fuseaux de granulométrie et de plasticité de la norme (XP P13-901). La sélection de ce matériau est basée aussi sur son abondance et son accessibilité dans notre région

Cependant, une attention particulière doit être portée sur le pourcentage de fines (éléments inférieurs à 2 μ m) que contient ce matériau, et qui ne dépasse pas 19 % selon la courbe granulométrique (Figure III.3). (Mesbah et col, 1986) préconisent une quantité d'argile impérativement supérieure à 10%, ce qui est vérifié pour l'argile de Nedroma (11%) et le tuf de Béni-Safi (19%) (tableau.III.1).

Pour cela, l'étape suivante doit comporter des essais complémentaires d'identification, du compactage ainsi que de caractérisation du comportement hygrothermique pour aboutir à un choix judicieux d'un matériau en vue de son utilisation dans la fabrication des briques en terre comprimées.

3 Identification du tuf de Béni-Saf

Le tuf de Béni-Saf écrêté à 5 mm a été choisi selon des critères de granulométrie et de plasticité pour être utilisé dans la fabrication de BTC. Dans cette partie, nous avons effectué une identification complète en termes de caractérisation de la matière organique, de teneur en carbonate de calcium, du poids volumique des grains solides et de compactage dynamique et statique.

3.1 Poids volumique des grains solides

Il est nécessaire de définir le poids volumique des grains solides qui représente l'un des paramètres qui caractérisent le granulats des matériaux terre. La procédure de l'essai au pycnomètre (figure III.6) est basée sur la relation suivante (NF P 94-054) :

$$\rho_s = \frac{\rho_w(m_2 - m_1)}{m_4 + m_2 - m_1 - m_3} \quad [\text{Eq. III. 1}]$$

m_1 est la masse du pycnomètre vide (g) ;

m_2 : est la masse du pycnomètre contenant l'échantillon(g) ;

m_3 : est la masse du pycnomètre au cours de l'essai(g) ;

m_4 : est la masse du pycnomètre rempli d'eau jusqu'au trait(g) .



Figure. III. 6. Détermination du poids volumique des grains solides par le pycnomètre (500ml).

À la fin des essais, nous avons obtenu un poids volumique des grains solides du tuf de Béni-Saf de l'ordre de 27.4 kN/m^3 .

3.2 La teneur en carbonate de calcium CaCO_3

La détermination de la quantité de carbonate de calcium CaCO_3 a été réalisée conformément à la norme (NF P 94-048) en utilisant le matériel de la figure III.7. Le tuf de Béni-Saf comporte une quantité de l'ordre de 85 % de CaCO_3 . On peut classer ce sol comme un matériau fortement calcaire.



Figure. III. 7. Matériels utilisés pour déterminer la quantité de CaCO_3 .

3.3 Essai au bleu de méthylène

L'essai au bleu de méthylène permet de déterminer le taux d'activité de la fraction argileuse d'un échantillon vis-à-vis de l'eau. Cet essai nommé communément aussi le test de la tâche (figure III.8). Il a été élaboré suivant la norme (NF P 94-068).

La valeur de bleu de méthylène (VBS) est donnée par la relation suivante :

$$VBS = \frac{Q_m}{Q_s} * 100 \quad [Eq. III. 2]$$

Q_m : est la quantité de bleu de méthylène (g) ;

Q_s : est la quantité du sol (g).

En outre, la surface spécifique (Sst) est donnée par la relation (Eq.III.3) de (Tran Ngoc Lan ,1977) et elle est exprimée en (m²/g).

$$Sst = 21 * VBS \quad [Eq. III. 3]$$

L'essai a mis en évidence que le tuf de Béni-Safi a une valeur de VBS de 1.5 et sa surface spécifique 31.5 (m²/g) et qui peut être lié à la famille de la kaolinite (tableau.III.2).

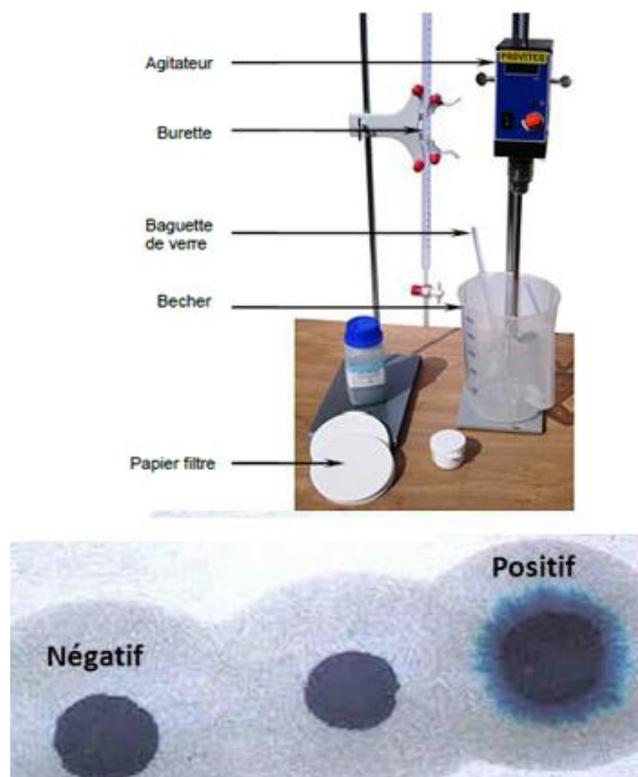


Figure. III. 8. L'essai au bleu de méthylène.

(<http://formationbtph.blogspot.com/2018/10/essais-de-sol-essai-au-bleu-de-methylene.html>)

Tableau. III. 2. La surface spécifique des argiles selon (Young et Waikentin, 1975 ; Zelazny et Calhoun, 1977; Mitchell,1993).

Type d'argile	Kaolinite	Illite	Montmorillonite
Ss (m ² /g)	10-20	80-100	400-800

3.4 La matière organique

L'essai a été effectué sur la base de la norme (NF P 94-047), en utilisant la méthode de pesage pour déterminer la différence entre la masse avant et après une cuisson à une température de 375°C c'est-à-dire la perte de masse à l'étuvage. Cette différence représente la quantité de matière organique incluse dans le sol. Le tuf de Béni-Saf contient un pourcentage très faible de matière organique de l'ordre de 1,8%. Donc selon la classification LPC modifié c'est un sol faiblement organique.

3.5 Classification du tuf de Béni-Saf

Le matériau étudié est un tuf calcaire. L'analyse granulométrique réalisée conformément aux normes (NF P94-041, NF P94-057) a révélé que le sol est constitué de 12% de gravier, 48% de sable, 21% de limon et une quantité d'argile de l'ordre de 19%. Les paramètres de plasticité déterminés conformément à la norme (NF P94-051) ont montré que la limite de liquidité du sol ainsi que son indice de plasticité sont respectivement 37% et 20%. Il est caractérisé par une faible plasticité et une fraction argileuse ayant une activité normale ($A_c=0.90$). L'ensemble des résultats d'indentification sont donnés dans le tableau (III.1). D'après la classification USCS/LCPC, le tuf de Béni-Saf peut être classé parmi les sables argileux (Ap-SA), faiblement organique composé essentiellement de calcaire (85%).

4 Compactage dynamique et statique du matériau sélectionné

Par la suite dans notre programme expérimental, des essais ont été réalisés pour la détermination des optimums Proctor. Dans cette étude, la terre utilisée a été écrêtée à 5 mm et étuvée à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante qui sera mélangée à différentes teneurs en eau.

4.1 Essai Proctor

Nous avons commencé à faire des essais classiques de Proctor à différentes énergies : Proctor normal (PN), modifié (PM) sur le tuf de Béni-Saf conformément à la norme (NF P 94-093). La figure III.9 représente la variation du poids volumique en fonction de teneur en eau lors du compactage dynamique PN et PM. Les valeurs des optimums de Proctor (γ_d , w_{opt}) sont représentées dans le tableau III.3. Une augmentation de 10% de la densité sèche maximale a été obtenue avec l'augmentation de l'énergie à PM. En plus, une diminution de la teneur en eau optimale est de l'ordre de 2.3%.

Tableau. III. 3. Les valeurs des optimums de Proctor (PN et PM) du tuf de Béni-Saf.

Compactage	γ_d (g/cm ³)	w_{opt} (%)
PN	1.79	15
PM	1.98	12.7

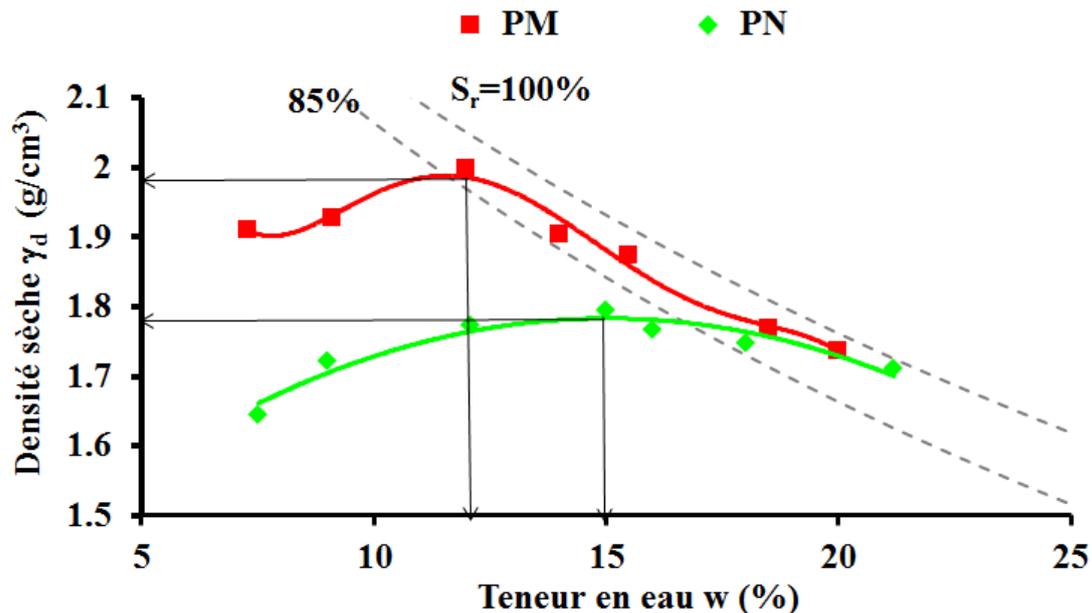


Figure. III. 9. Compactage dynamique PN et PM du matériau sélectionné.

4.2 Le compactage statique et dynamique du tuf de Béni-Saf

Nous avons procédé à deux modes de compactage :

- ❖ Dynamique à PN, PM (réalisé avant §4.1) et PM+25 coups à chaque couche.
- ❖ Statique à une force de 2, 4 et 10 MPa : le matériau brut est écrêté à 5 mm, une quantité de sol est malaxée à la teneur en eau optimale puis stockée durant 24 heures pour homogénéisation. Ensuite, en utilisant un moule à double piston lubrifié préalablement par du huile, une quantité de sol est compactée statiquement à une vitesse de 1 mm/min à la densité sèche maximale. Ce choix nous paraît justifié puisqu'il reste généralement inférieure aux vitesses de compactage adoptées dans la littérature (voir paragraphe 2-3). Aussi, par rapport au type de matériau étudié (sol pulvérulent), la vitesse 1mm/min permet la réalisation d'un compactage statique en conditions drainées (par analogie au cisaillement (NF P94-071)). Un presse à déplacement contrôlée munie d'un capteur de force d'une capacité de 25 kN et une acquisition automatique a été utilisée pour réaliser et suivre à temps réel le compactage réalisé. Les dimensions finales des échantillons obtenus sont de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur (Figure III.10). Un élanement de 2 est choisi et ceci

conformément à la norme de l'essai triaxial de révolution (NF P94-074), préconisant un élanement entre 1.9 et 2.2 avec un diamètre supérieure à 35mm.

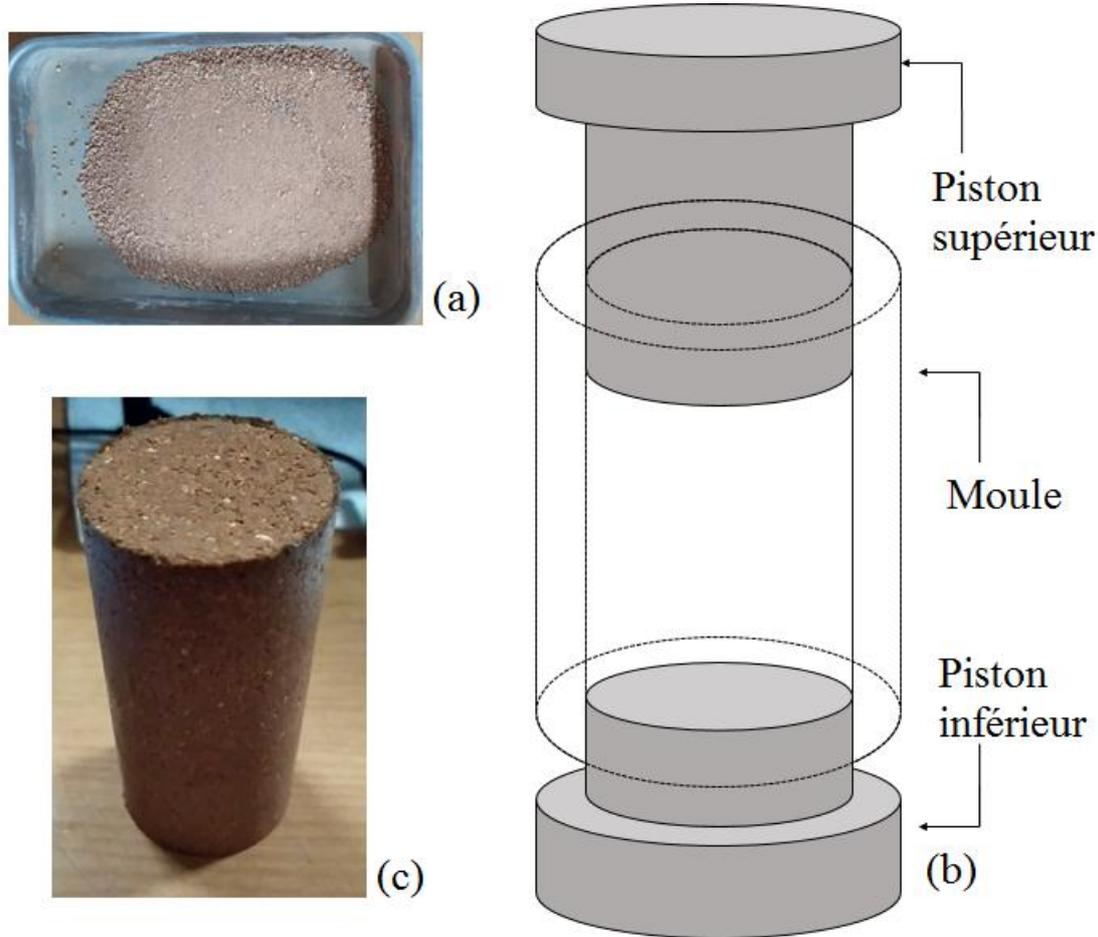


Figure. III. 10. (a) sol écrêté à 5mm (b) moule double piston (c) l'échantillon compacté.

Le tableau III.4 et la figure III.11 représentent l'ensemble des résultats du compactage et ses optimums (γ_d , w_{opt}). L'augmentation de l'énergie progressive qui permet d'appliquer à des échantillons des contraintes engendre un décalage de la teneur en eau optimale vers le côté sec. Les résultats sont similaires à ceux obtenus par (Lamber, 1958). On remarque que la densité sèche du compactage Proctor modifié plus 25 coups a une valeur est 2 (g/cm^3). La valeur de la densité maximale la plus faible a été enregistrée pour le compactage 2MPa (1.71 g/cm^3).

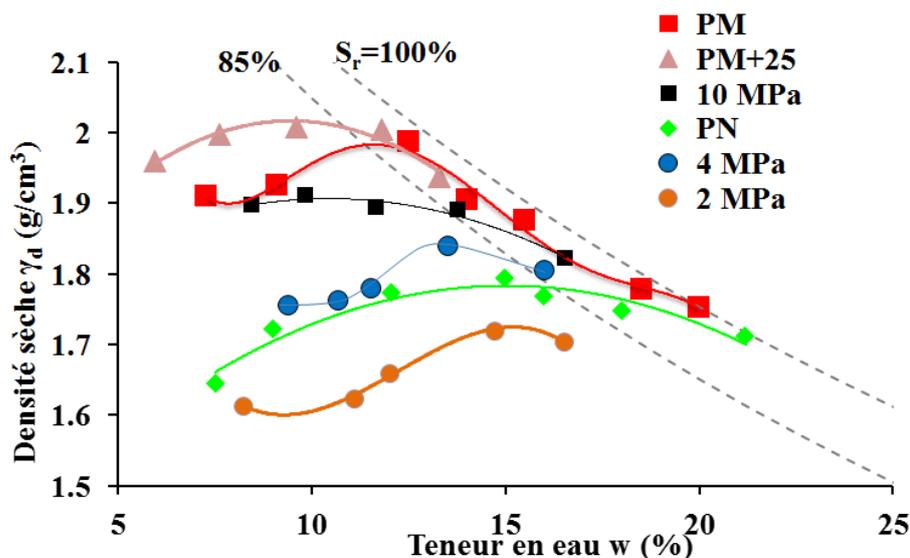


Figure. III. 11. Les courbes de compactage dynamique et statique à différents énergies.

Tableau. III. 4. Les valeurs des optimums du compactage dynamique et statique.

Compactage	γ_d (g/cm ³)	w_{opt} (%)
PM+25	2.00	9.6
PM	1.98	12.7
10MPa	1.90	10
4MPa	1.80	13.5
PN	1.79	15
2MPa	1.71	15

Le choix des énergies adoptées pour la confection des échantillons destinés aux essais hygrothermiques a été comme suit :

- Le compactage de PM+25 coups ne donne pas un gain de densité très important.
- Les courbes du compactage statique de 10MPa est en dessous du compactage dynamique PM.
- Puisqu'il existe une équivalence entre 4MPa et PN donc il est intéressant de garder ces deux énergies afin de voir l'effet du mode de compactage (à contrainte contrôlée et à déplacement contrôlé) sur le comportement hygrothermique.
- Concernant les échantillons compactés à une contrainte imposée de 2 Mpa, ces derniers s'effritaient facilement après démoulage et présentaient des difficultés dans leurs manipulations.

En partant de ces hypothèses, nous avons sélectionné trois énergies de compactage (PM, PN, 4MPa) comme il est montré dans la figure ci-dessous (figure. III.14).

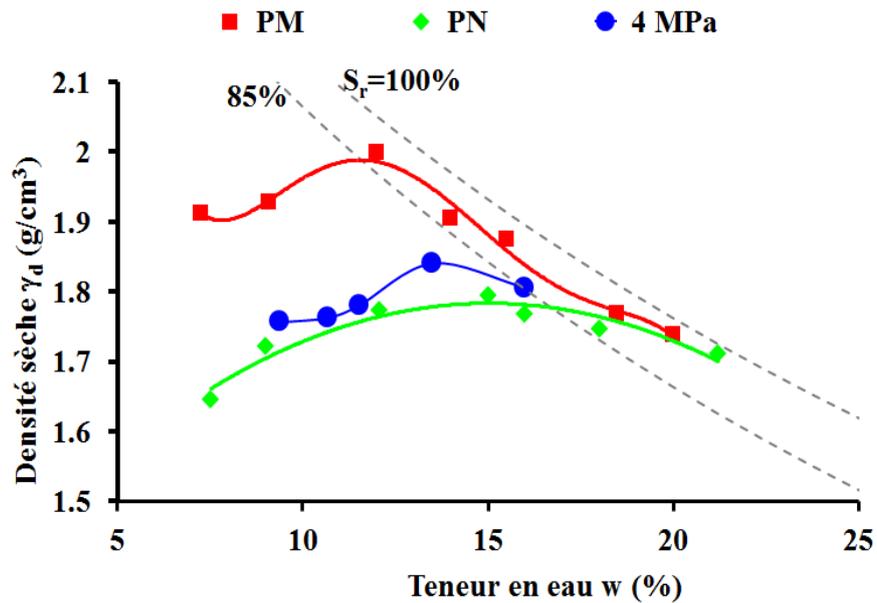


Figure. III. 12. Compactage dynamique et statique du matériau sélectionné.

4.3 Préparation des échantillons compactés statiquement

Les conditions initiales des échantillons correspondent à des échantillons compactés statiquement à l'optimum Proctor normal et modifié et à une contrainte statique à une contrainte de 4MPa.

5 Méthodes et procédures expérimentales

On présente les techniques expérimentales qui nous ont permis la caractérisation du comportement hydrique et thermique du tuf de Béni-Saf.

5.1 Essai d'absorption

Les essais d'absorption d'eau réalisés au laboratoire caractérisent l'effet de la remontée capillaire dans les murs de constructions. Le paramètre essentiel à déterminer est le coefficient d'absorption d'eau par capillarité (A_w) conformément à la norme (XP P13-901). L'essai consiste à immerger une surface de l'échantillon sur une profondeur de 5mm dans l'eau pendant deux heures et de mesurer les variations de sa masse en fonction du temps. Pour éviter les perturbations de mesure, un dispositif a été mis au point permettant la mesure continue des variations de la masse de l'échantillon (Δm_i). Ce dispositif (figure III.13) consiste à placer l'échantillon au contact de l'eau (en respectant la profondeur normalisée) par le biais d'une nacelle reliée à une balance de précision [10^{-2} g] permettant l'acquisition automatique des données.

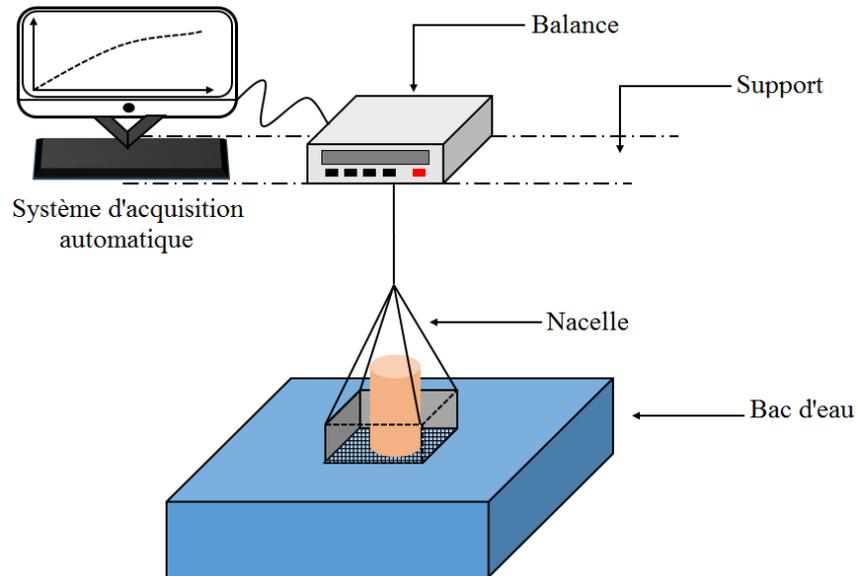


Figure. III. 13. Dispositif de mesure du coefficient d'absorption A_w .

La base de la nacelle est composée d'une grille très fine et d'un papier-filtre permettant d'éviter des pertes de masse de l'échantillon due à un éventuel effritement au contact avec l'eau ce qui pourrait fausser les résultats (Figure III.14).



Figure. III. 14. Effritement de la base de l'échantillon au contact avec l'eau.

Cet essai mesure le coefficient (A_w) qui représente la quantité d'eau absorbée par unité de surface (A) en fonction du temps. Son expression est donnée par l'équation [Eq. III.4]:

$$A_w = \frac{\Delta m_i}{A\sqrt{t}} \quad [\text{Eq. III.4}]$$

Avec : Δm_i est la masse d'eau absorbée (Kg); A est la surface de la face immergée des échantillons (m^2); t est la durée d'immersion (s).

La figure III.15 représente la méthode de la détermination de (A_w) à partir de la pente de la droite de régression exprimant les variations de la quantité d'eau absorbée par l'échantillon (Δm_i) par unité de surface (A) en fonction de la racine carrée de temps (t).

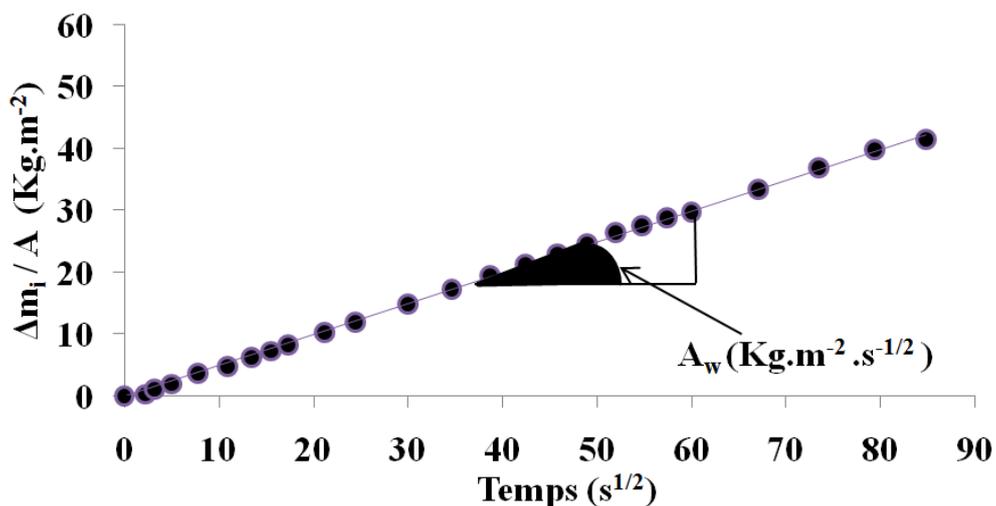


Figure. III. 15. Un exemple de la détermination du coefficient d'absorption par capillarité (A_w).

5.2 Séchage-humidification

Deux méthodes ont été sélectionnées dans cette partie pour la caractérisation du chemin de séchage-humidification. La méthode osmotique (figure III.16) pour contrôler la succion des échantillons compactés à trois états initiaux (OPN, OPM et 4 MPa) ainsi que celle du papier-filtre pour la mesure de succion à différents âges.

Par la suite nous avons tracé les courbes caractéristique sol-eau (SWCC) des trois états OPM, OPN et 4MPa. Une expression analytique a été proposée par (Van Genuchten, 1980) permet déterminer cette courbe (SWCC) qui est donnée par la relation suivante :

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (a\psi)^n\right]^m} \quad [\text{Eq. III.5}]$$

a, n et m: sont des paramètres d'ajustement et ψ : la succion imposée. Les indices s et r indiquent respectivement la valeur à saturation et résiduelle de la teneur en eau volumique θ .

5.2.1 Méthode osmotique

Pour la détermination des courbes de séchage des échantillons, la technique osmotique a été mise en œuvre (Fleureau et col, 1992 ; Delage et col, 1998 ; Derfouf, 2014). Cette technique consiste à placer un échantillon de sol en contact avec une solution de macromolécule (Polyéthylène glycol-PEG6000) via une membrane semi-perméable du type Spectra/Por ® n=°3 avec un MWCO (mass weight cut-off) de 3500 Daltons.

La valeur de la succion imposée est conditionnée par la concentration de la solution de PEG, suivant la relation proposée par (Delage et col, 1998).

$$\psi = 11c^2 \quad [\text{Eq. II. 6}]$$

ψ est la succion en MPa ;

C_{PEG} la concentration de PEG en g PEG/g d'eau.

Un moule de compactage (figure III.16. a) a été réalisé pour confectionner des échantillons ont un diamètre est de 2 cm et une hauteur de 1cm. Ce moule est dimensionné pour résiste aux mêmes forces appliquées sur le moule à double pistons (§4.2). Les conditions initiales correspondent à des échantillons compactés à OPN, OPM et 4 MPa. Ainsi, l'échantillon de sol placé dans récipient à différentes concentrations de PEG peut suivre un chemin de séchage ou humidification en fonction de la succion initiale et de la succion imposée.

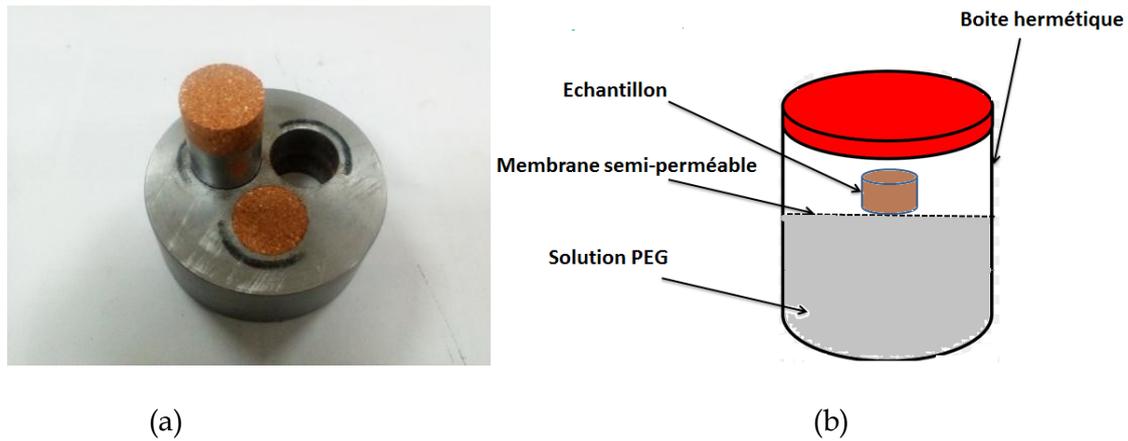


Figure. III. 16. (a) moule+échantillon (c) protocole séchage-humification.

Afin de déterminer l'ensemble des paramètres finaux des échantillons compactés statiquement (w , e , S_r , γ_d), on doit suivre les étapes suivantes :

- ❖ Après l'équilibre dans le PEG, on pèse l'échantillon (P_{hum}) (figure III.17).
- ❖ L'échantillon doit être immergé dans une huile non mouillante (le Kerdane) (durée de 3 à 4 heures). La densité de l'huile de Kerdane est de $0.785 \text{ (g/cm}^3\text{)}$.
- ❖ L'échantillon doit être essuyé et pesé ($P_{hum} + P_{ker}$).
- ❖ L'échantillon sera pesé hydrostatiquement dans le Kerdane (P_{hum}).
- ❖ On sèche l'échantillon complètement (à 105°C) jusqu'à stabilisation, de la masse (P_{seche})

On obtient enfin :

$$V = \frac{(p_{hum} + p_{ker}) - p_{img}}{\frac{\gamma_d}{\gamma_w}} \quad [\text{Eq. III.7}]$$

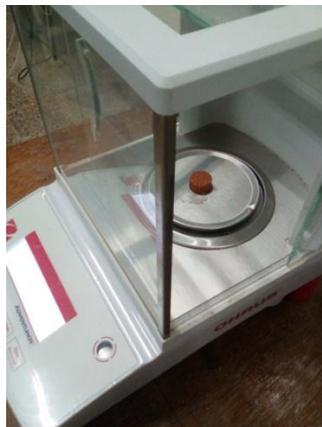


Figure. III. 17. Pesée par une balance de précision 10^{-3}g .

5.2.2 La méthode du papier filtre

C'est une méthode gravimétrique, qui consiste à mettre un papier-filtre de cellulose (le papier Whatman N° 42) dans le matériau étudié pour déterminer la succion suivant la norme (ASTM, D. 5298-03). Le papier filtre doit être protégé et placé entre deux couches de compactage. Ensuite, l'échantillon doit être couvert dans l'aluminium et paraffiné pour garder la teneur en eau initiale constante et assurer son homogénéisation. Après équilibre, on pèse le papier filtre humide puis sec pour déterminer sa teneur en eau. À l'aide de la courbe d'étalonnage, on peut estimer la succion des échantillons (figure III.18).

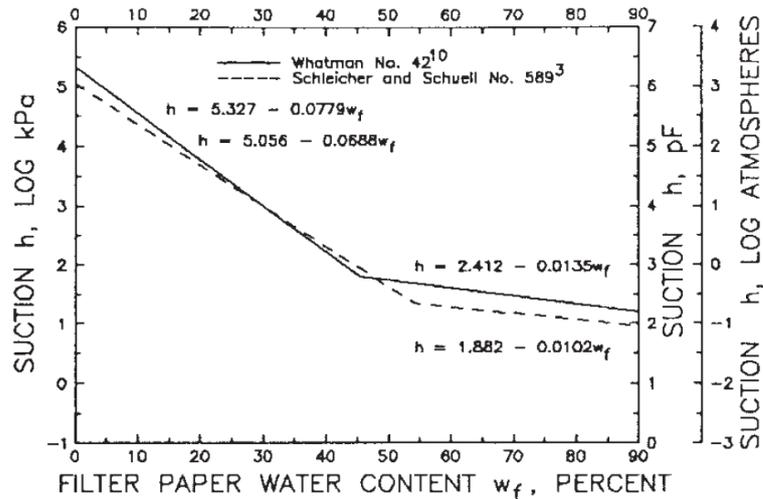


Figure. III. 18. Courbe d'étalonnage pour la détermination de la succion par la méthode du papier filtre. (ASTM, D. 5298-03)

5.3 Détermination de la conductivité hydraulique saturée K_{sat} au triaxial

La conductivité hydraulique saturée K_{sat} des échantillons est déterminée en régime permanent en utilisant un appareil triaxial (figure III.19) muni de :

- deux contrôleurs pression-volume (imposer et mesurer la pression interstitielle des deux faces de l'échantillon).
- un système d'acquisition de données.
- un contrôleur pression-volume permet d'imposer la pression de confinement.



(a)Montage de l'échantillon (b) La cellule triaxial (c) Centrale d'acquisition
Figure. III. 19. Mesure de la conductivité hydraulique saturée (dispositif triaxial).

Après une phase de saturation et de consolidation à une faible contrainte effective de 50 kPa et une contrainte de confinement égale à 100 kPa, l'échantillon de sol est soumis à un gradient hydraulique « i » de l'ordre de 40 au moyen de l'application d'une pression interstitielle entrante $U_e = 75$ kPa (en tête de l'échantillon) et une autre sortante $U_s = 30$ kPa (en bas de l'échantillon). Le régime permanent est considéré comme étant établi quand le volume de l'eau entrant est égal au volume de l'eau sortant (parallélisme des courbes de volumes entrant et sortant montré dans la figure III.20). Ce qui nous permet de déterminer le volume (V_{moy}) traversant l'échantillon.

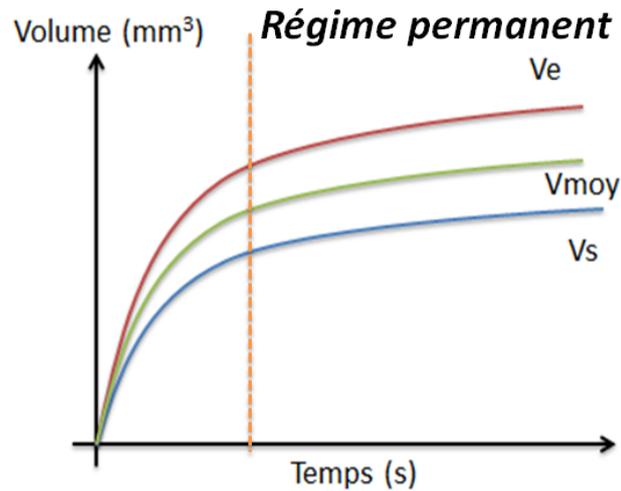


Figure. III. 20. Le principe de mesure du volume traversant l'échantillon.

En suivant les étapes ci-dessous pour déterminer la conductivité hydraulique saturée K_{sat} :

- 1- On sélectionne un intervalle de temps (Δt) et de volume (ΔV) calculé à partir du volume traversant l'échantillon (V_{moy}).
- 2- Le calcul du débit est estimé à partir de la relation suivante :

$$Q = \Delta V / \Delta t \quad [\text{Eq. III. 8}]$$

- 3- L'estimation de K_{sat} est basée sur la loi de (Darcy, 1856) conformément à l'équation suivante :

$$K_{sat} = Q / i * A_{scf} \quad [\text{Eq. III. 9}]$$

$$\text{Avec } i = \Delta h / \Delta l \quad [\text{Eq. III.10}]$$

ΔV est la variation du volume traversant l'échantillon (m^3);

Δt est la variation du temps (s) ;

Q est le volume par unité de temps, (débit), (m^3/s) ;

A_{scf} est la surface de la couche filtrante [m^2] ;

k_{sat} est la conductivité hydraulique (m/s) ;

i est le gradient hydraulique ;

Δh est la différence de potentiel hydraulique (m) ;

Δl est la longueur de l'échantillon (m) ;

5.4 La conductivité hydraulique non saturée

On rappelle que les valeurs de K_{sat} sont déterminées au triaxial dans des conditions saturées. Dans le cas des sols non saturés, plusieurs expressions analytiques de la conductivité hydraulique ont été proposées (Brooks and Corey, 1964 ; Van Genuchten, 1980, Fredlund et Xing, 1994).

Les relations proposées par (Van Genuchten, 1980) sont données par les équations III.9 et III.10.

$$K_u(\Theta) = K_{sat} \Theta_e^l [1 - (1 - \Theta^{1/m})]^2 \quad [\text{Eq. III.11}]$$

$$\text{Avec } \Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad [\text{Eq. III.12}]$$

Avec : $K_u(\Theta)$ est la conductivité hydraulique non saturée, K_{sat} : est la perméabilité à saturation, Θ : la teneur en eau volumique effective, l : est un coefficient généralement pris égal 0.5, a , n et m : sont des paramètres d'ajustement, ψ : est la succion.

Les indices s et r indiquent respectivement la valeur à saturation et résiduelle de la teneur en eau volumique θ .

5.5 Front capillaire

Des mesures ont été effectuées avant et après l'essai d'absorption à savoir la teneur en eau et le poids pour suivre la remontée capillaire sur toute la hauteur de l'échantillon. En le coupant en cinq parties de 2 cm (0-2 cm jusqu'à 8-10 cm) avec un ecscie à fil, nous avons mesuré la teneur en eau correspondant à chaque tranche. L'objectif est de suivre l'évolution de la remontée capillaire sur la hauteur de l'échantillon (figure III.21).

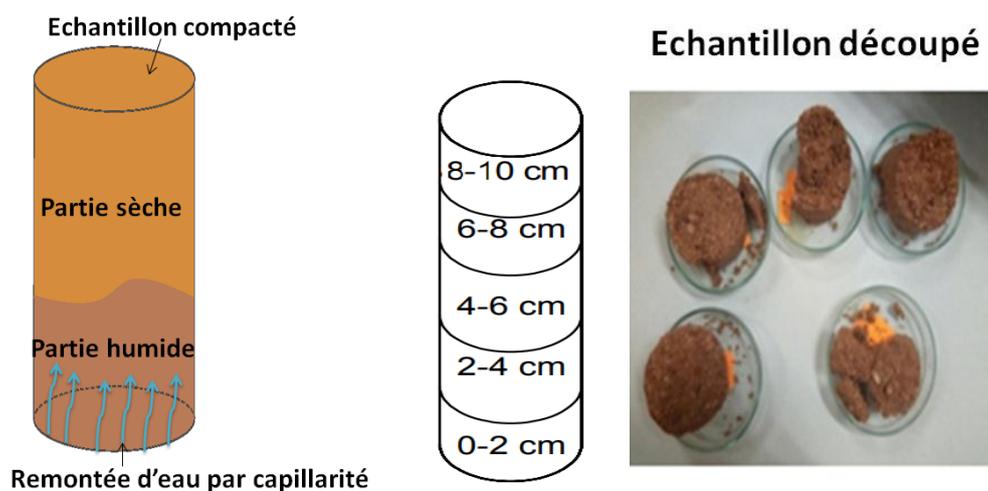


Figure. III. 21. Détermination du front capillaire des échantillons compactés.

2.8. La perméabilité à la vapeur

La perméabilité à la vapeur d'eau dans un matériau de construction est une propriété qui permet de définir sa capacité d'échange d'humidité entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment (Moevus et col, 2012). Cette perméabilité caractérisée par un facteur qui s'appelle le coefficient de perméabilité (δ).

La méthode de la coupelle sèche et humide représentée dans la figure, consiste à imposer un flux ascendant ou descendant à travers un échantillon (figure III.22). Il existe plusieurs conditions de température et humidité relative pour imposer un flux ascendant ou descendant (NF EN ISO 12572), nous avons sélectionné la série C qui consiste à imposer un flux 50 à 93 HR à une température de 23°C. Pour ce faire, nous avons utilisé les deux solutions salines saturées montrées dans le tableau III.

Après compactage à l'état OPM (vu la situation sanitaire à cause de COVID-19, nous n'avons pas fait les états OPN et 4MPa), des échantillons de forme cylindrique ont été placés préalablement dans un dessiccateur dans laquelle la température est environ de 20°C et une humidité est 50HR jusqu'à la stabilisation de la masse.

Après stabilisation de la masse, les échantillons ont été placés dans un récipient et son contour colmaté et scellé avec la colle silicone pour garantir que le flux traversant seulement l'échantillon. Nous avons contrôlé la masse des échantillons à l'aide d'une balance de précision de 10^{-2} .

Tableau. III. 5. Les solutions salines saturées de la série C utilisées pour déterminer la perméabilité à la vapeur.

Solutions salines saturées	Humidité relative	Température
Nitrate de magnésium $Mg(NO_3)$	50%	23°C
Nitrate de potassium KNO_3	93%	23°C

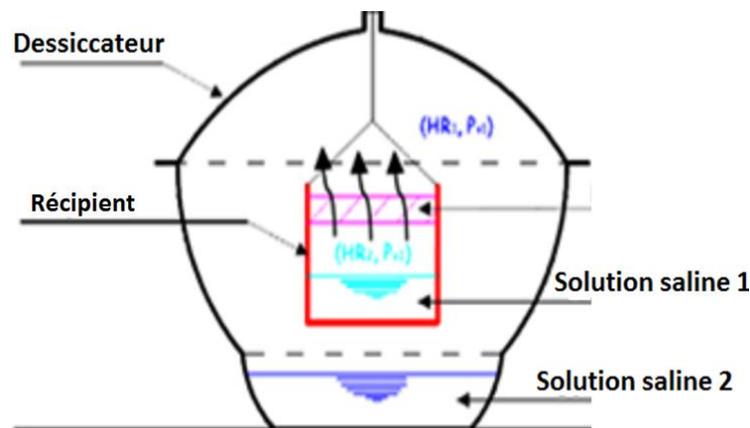


Figure. III. 22. Principe de la mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau d'un matériau non saturé en régime stationnaire. (Hibouche, 2013)

Les démarches de calcul de perméabilité à la vapeur δ et coefficient de perméabilité à la vapeur μ sont comme suit :

❖ **La densité de flux de vapeur g**

Elle représente la variation de masse de l'échantillon en fonction l'intervalle de temps par unité de surface (Kg. m⁻². s⁻¹).

$$g = \frac{G}{A_t} \quad (\text{NF EN ISO 12572}) \quad [\text{Eq. III.13}]$$

G : est la variation de masse Δm (Kg) de l'échantillon sur l'intervalle de temps Δt (s). (Débit de vapeur d'eau).

A_t : La section traversée (m²).

❖ **La perméance w**

Elle s'exprime le rapport entre débit de vapeur d'eau par Le gradient de pression de vapeur d'eau par la section traversé et donnée par (Kg. m⁻². s⁻¹.Pas⁻¹).

$$w = \frac{G}{\Delta p_v * A_t} \quad (\text{NF EN ISO 12572}) \quad [\text{Eq. III.14}]$$

A_t : La section traversée (m²) ;

G : Le débit de vapeur d'eau (kg/s).

ΔP_v : Le gradient de pression de vapeur d'eau calculé à partir des mesures de température et d'humidité relative.

$$p_v = \varphi 610.5 e^{\frac{17.268T}{237.3+T}} \quad [\text{Eq. III.15}]$$

φ : L'humidité relative à chaque essai ;

T : La température mesurée au cours l'essai.

❖ **La perméabilité à la vapeur d'eau δ**

Elle est notée (δ), le rapport entre la perméance (w) et l'épaisseur de l'échantillon(ep) et donnée par (Kg.m⁻¹.s⁻¹.Pas⁻¹).

$$\delta_{matériau} = w * ep \quad [\text{Eq. III.16}]$$

w : la perméance (Kg. m⁻².s⁻¹.Pas⁻¹) ;

ep : L'épaisseur de l'échantillon (m).

❖ **La résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ**

Notée (μ) représente la résistance de matériau à la vapeur d'eau, elle est calculée par la relation suivante :

$$\mu = \frac{\delta_{air}}{\delta_{matériau}} \quad (\text{NF EN 12086}) \quad [\text{Eq. III.17}]$$

δ_{air} : La perméabilité à la vapeur d'eau de l'air (2. 10⁻¹⁰ Kg. m⁻¹.s⁻¹.Pas⁻¹) ;

$\delta_{matériau}$: La perméabilité à la vapeur d'eau du matériau (Kg.m⁻¹.s⁻¹.Pas⁻¹).

5.6 Principe de mesure des propriétés thermiques

Comme nous l'avons présenté dans le chapitre précédent (II), il existe plusieurs techniques de mesure des propriétés thermiques. Notre choix a été porté sur l'appareillage présenté plus bas. Il permet de mesurer la conductivité thermique, la capacité thermique volumétrique (C) et la diffusivité thermique (D) dans un test en utilisant un régime transitoire.

Les valeurs des caractéristiques thermiques de ces matériaux compactés sont mesurées directement l'aide de l'appareil (**Quickline™-30**) représenté sur la figure III.23. Cet appareil est doté d'une sonde de surface permettant d'imposer un flux de chaleur et une sonde (Surface Probe API 210414) qui est connectée à une centrale munie d'un écran de visualisation des résultats figure III-26.

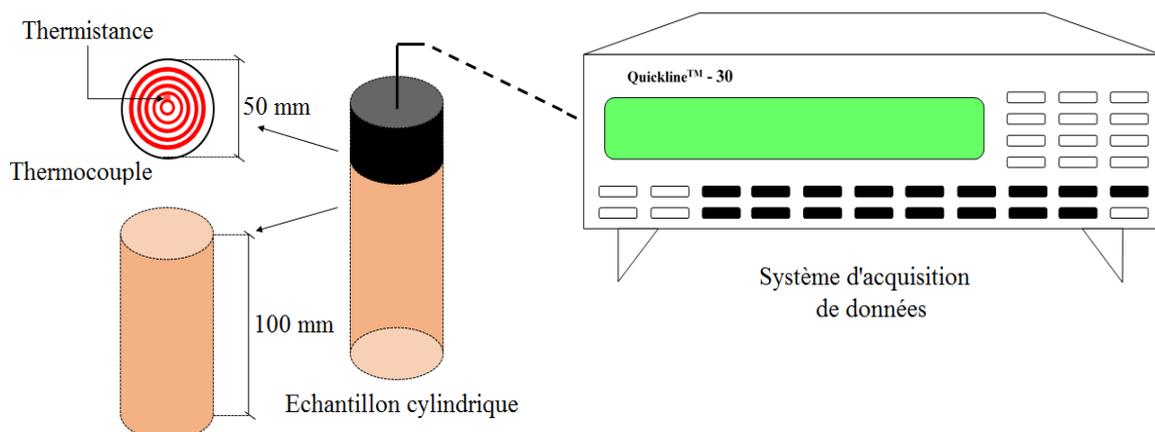


Figure. III. 23. Appareil de mesure des paramètres thermiques (Laboratoire Matériaux "LABMAT" de l'ENP d'Oran).

Le principe de la mesure est basé sur l'imposition d'un gradient de température au sein des matériaux compactés à différentes énergies et âges de séchage. Un flux thermique est généré par la sonde en contact avec l'échantillon testé. Il faut garantir que la surface de contact soit parfaite avec la sonde. Les essais ont été réalisés sur les éprouvettes cylindriques compactées statiquement dont l'élanement est égal à 2.

La réponse thermique de l'échantillon permet d'estimer les valeurs de trois propriétés thermophysiques à savoir la conductivité thermique, la capacité thermique volumétrique (C) et la diffusivité thermique (D) (Figure III.24).

D'autres paramètres peuvent être déduits à partir des équations (Eq. III. 18, 19, 20) :

➤ La capacité massique thermique $C_p = \frac{C}{\rho}$ [Eq. III.18]

➤ L'effusivité thermique $E = \sqrt{C_p \cdot \rho \cdot D}$ [Eq. III.19]

Sachant que :

$$D = \frac{\lambda}{\rho \cdot C} \quad [\text{Eq. III.20}]$$

ρ : est la masse volumique des échantillons (Kg/m^3) ;

C : est la capacité volumique thermique ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$) ;

D : est la diffusivité thermique (m^2/s)

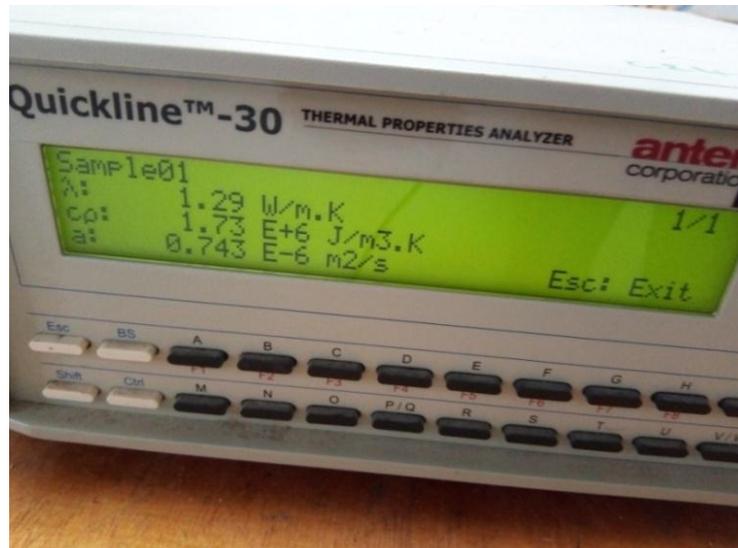


Figure. III. 24. L'écran d'affichage de l'appareil de mesure des propriétés thermophysiques.

6 Conclusion

Après une série de tests, le matériau de Béni-saf apparaît adéquat pour l'utilisation dans la fabrication de la brique de terre comprimée en particulier. C'est un tuf calcaire avec une quantité élevée de CaCO_3 (84%). Il est classé selon la classification USCS/LCPC comme étant un sable argileux (Ap-SA).

Une campagne des essais de compactage (dynamique et statique) a été réalisée pour déterminer les références de compactage (la densité sèche maximale (γ_d) et la teneur en eau optimale (w_{opt}) pour trois énergies différentes (OPN, OPM et 4MPa). En outre, tous les protocoles expérimentaux ont été présentés dans ce chapitre à savoir la détermination de la conductivité hydraulique, le coefficient d'absorption, le chemin de séchage - humidification, perméabilité à la vapeur d'eau et les propriétés thermiques. Dans le prochain chapitre nous allons aborder les résultats obtenus et leurs interprétations pour caractériser le comportement hydrique et thermique de notre matériau compacté.

CHAPITRE IV:
Comportement hygrothermique du
matériau non stabilisé

1 Introduction

La présence d'eau en contact avec les constructions en terre constitue l'une des causes majeures de leur dégradation. Ainsi, la compréhension du mécanisme de transport de l'eau liquide dans le matériau terre notamment le phénomène de capillarité, et la bonne estimation de quantité d'eau au niveau des éléments de constructions en terre reste un élément essentiel dans la bonne tenue de l'ouvrage.

Ce chapitre sera dédié à la caractérisation du comportement hygrothermique du tuf de Béni-Saf compacté statiquement. Les énergies correspondent à l'optimum Proctor modifié (T-OPM, T : Tuf brut), l'optimum Proctor normal (T-OPN) et à une contrainte de 4MPa (T-4MPa), puis séchés à différentes durées. Ainsi, le chapitre sera scindé en deux parties : une partie hydrique et une partie thermique :

- Dans la partie hydrique, des mesures expérimentales ont été effectuées pour déterminer le coefficient d'absorption d'eau par capillarité, les profils de front capillaire, la conductivité hydraulique saturée et non saturée, la diffusion de la vapeur d'eau ainsi que le chemin de séchage-humidification. L'effet de la teneur en eau et du degré de saturation sur le coefficient d'absorption d'eau par capillarité, sera présenté. Après, et puisque le processus de transfert d'eau par capillarité dépend fortement de la valeur de la succion et la conductivité hydraulique non saturée, des simples corrélations entre ces paramètres et le coefficient d'absorption sont proposées.
- Dans la deuxième partie, les propriétés thermiques telles que la conductivité thermique, la capacité volumique thermique, la diffusivité thermique ainsi que l'effusivité thermique ont été déterminées. L'influence de la variation de l'état hydrique (teneur en eau, degré de saturation) sur ces paramètres thermiques sera aussi discutée.

2 Comportement hydrique du tuf de Béni-Saf compacté non stabilisé

Les caractéristiques (succion, teneur en eau et degré de saturation) des échantillons compactés aux énergies correspondant à l'optimum de Proctor modifié T-OPM, de Proctor normal T-OPN et à une contrainte de 4MPa (T-4MPa), testés immédiatement ou séchés à différentes durées de séchage (1, 3, 7, 14, 21, 28 jours) sont données dans le tableau.VI.1.

Nous abordons dans cette partie expérimentale, une caractérisation du comportement hydrique du tuf de Béni-Saf à l'état brut.

Tableau. IV. 1. Les caractéristiques initiales des échantillons non stabilisés (série 1).

Energies	Temps de séchage (jours)	ψ_i (kPa)	w_i (%)	S_{ri} (%)
T-OPM	Immédiat	6.31E+02	12.5	90
	1	3.73E+03	6.7	40
	3	5.79E+04	2.2	12
	7	5.89E+04	1.6	9
	14	1.32E+05	1.7	9
	21	1.59E+05	1.6	9
	28	1.66E+05	1.5	8
T-OPN	Immédiat	3.21E+02	14.2	77
	1	5.28E+03	6	28
	3	3.59E+04	1.7	8
	7	1.23E+05	2	10
	14	1.23E+05	1.6	8
	21	1.41E+05	1.3	6
	28	1.54E+05	1.3	6
T-4MPa	Immédiat	3.51E+02	12.8	74
	1	2.59E+03	5.8	30
	3	6.00E+04	2.2	12
	7	1.19E+05	1.6	10
	14	1.39E+05	1.7	9
	21	1.57E+05	1.6	9
	28	1.65E+05	1.5	8

2.1 Absorption d'eau capillaire

Conformément à la norme (XP P94-901), des mesures du coefficient d'absorption d'eau capillaire « A_w » ont été réalisées. Le protocole expérimental suivi pour la mesure de ce paramètre pendant 2 heures d'absorption d'eau a été présenté dans le chapitre 3 (Cf chap. §5.1).

2.1.1 Détermination du coefficient d'absorption d'eau

La figure IV. 1 représente la variation de la quantité d'eau absorbée (Δm_w) par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps. Une relation linéaire est observée dans laquelle le coefficient de régression est généralement supérieur à 0.94. La valeur de A_w est déduite de la pente de chaque droite.

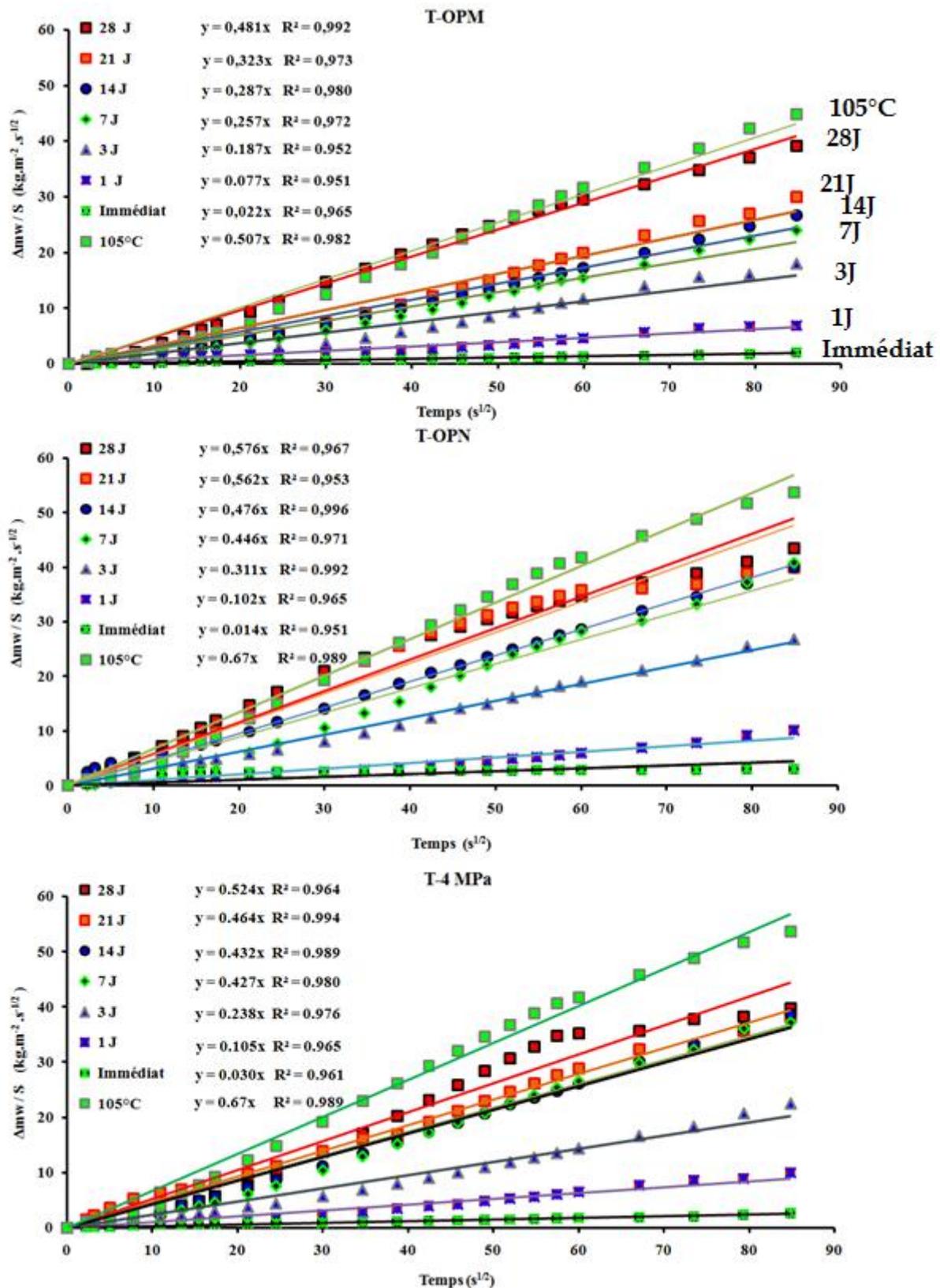


Figure IV. 1. Coefficient d'absorption capillaire paramétré en temps de séchage pour les échantillons T-OPM T-OPN et T-4MPa.

2.1.2 L'effet de la densité et du séchage sur le coefficient d'absorption d'eau

Dans la figure (IV-2), on représente l'influence du temps de séchage sur le coefficient d'absorption d'eau capillaire. Les résultats de la figure (IV. 2) montrent une augmentation du coefficient A_w en fonction du temps de séchage ce qui est en accord avec les résultats de la littérature (Castro et col, 2011). Dans le cas des échantillons T-OPN et T-4MPa, une augmentation respective du coefficient A_w de l'ordre de 80% et 77% est observée pendant les sept premiers jours de séchage.

Les valeurs enregistrées immédiatement après compactage sont de $0.02 \text{ kg.m}^{-2} .\text{s}^{-1/2}$ pour T-OPN et $0.03 \text{ kg.m}^{-2} .\text{s}^{-1/2}$ pour T-4MPa. En revanche, à 28 jours elles sont égales à $0.576 \text{ kg.m}^{-2} .\text{s}^{-1/2}$ (T-OPN) et $0.524 \text{ kg.m}^{-2} .\text{s}^{-1/2}$ (T-4MPa). Dans le cas des échantillons compactés à T-OPM, on observe une croissance moins importante du coefficient A_w de l'ordre de 51% durant les sept premiers jours de séchage. La valeur finale enregistrée est égale à $0.481 \text{ kg.m}^{-2} .\text{s}^{-1/2}$.

En plus, l'étuvage des échantillons à 105°C a permis d'avoir des coefficients A_w plus élevés de 20 et 25% pour les échantillons T-OPN et T-4MPa respectivement. Cependant, une légère augmentation de l'ordre de 5% est observée pour les échantillons T-OPM.

La figure IV.3 représente la variation de la densité en fonction du séchage à différentes périodes de séchage. Les valeurs de la densité sèche de T-OPM demeurent supérieures aux autres densités de T-4MPa et T-OPN au cours des 28 jours de séchage. Cependant, les densités des échantillons T-4MPa et T-OPN restent comparables malgré une légère différence (1%) au profit des échantillons compactés à T-4MPa. Le taux d'augmentation de la densité sèche de chaque échantillon est de l'ordre de 1.4% pour T-OPN, 0.9% pour T-OPM et 1.4% pour T-4MPa.

On peut constater clairement que les valeurs plus faibles du coefficient A_w (figure IV. 3) correspondent aux densités sèches plus élevées (T-OPM). En ce qui concerne les valeurs du coefficient A_w des échantillons T-OPN, elles restent légèrement supérieures à celles des échantillons T-4MPa. Cela s'explique par le faible écart entre les densités sèches des deux échantillons (figure IV.2). Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par (Fabbri et col, 2019) des échantillons compactés ($W_L=52\%$, $I_p=31\%$) à des densités variant de 1.4 à 1.7 g/cm^3 ($A_w=0.6$ à $0.2 \text{ kg.m}^{-2} .\text{s}^{-1/2}$).

(Soudani, 2016) a démontré l'existence d'une relation décroissante entre la densité et le coefficient d'absorption A_w . La densité varie de 1.44 à 1.71 g/cm^3 , A_w varie de 0.45 à 0.15 , sachant que la teneur en eau du matériau est de 4%, 8%, 12%, 15% et 18%. La même tendance linéaire entre la densité et le coefficient A_w a été obtenue par (Shaver et col, 2013).

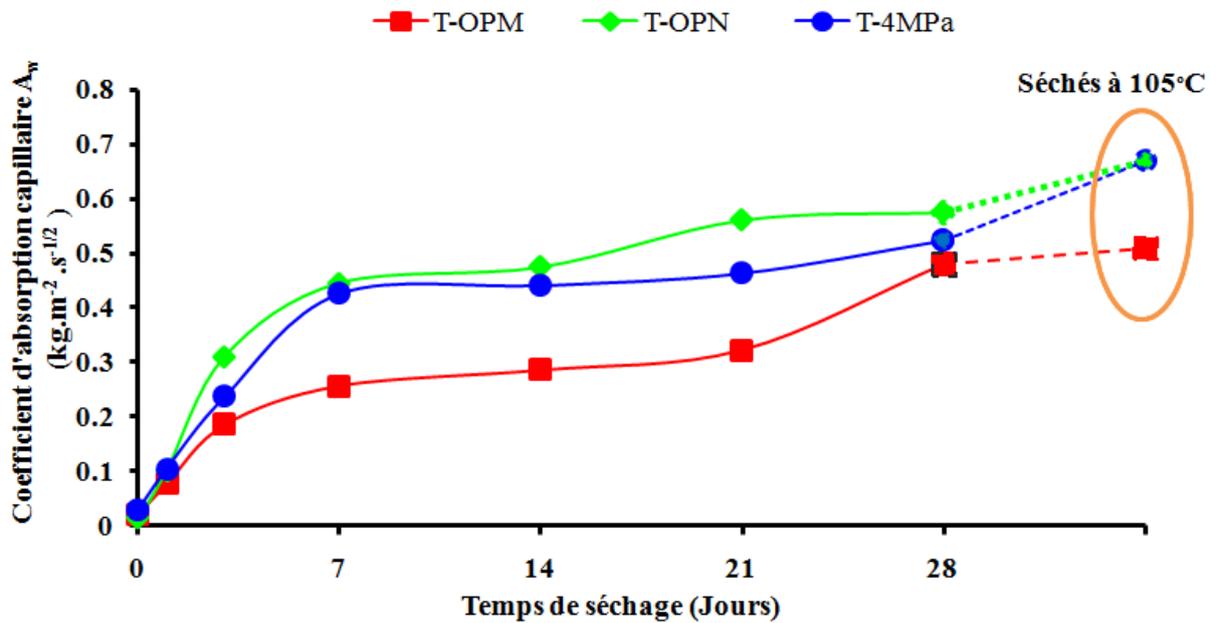


Figure IV. 2. Evolution du coefficient d'absorption au cours du temps de séchage pour les échantillons T-OPN, T-OPM et T-4MPa.

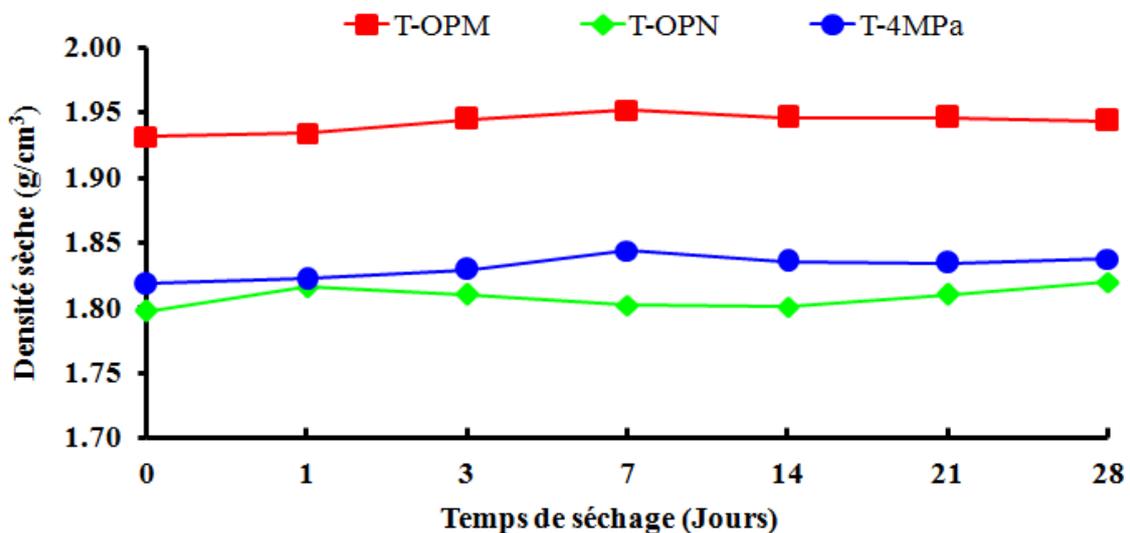


Figure IV. 3. Variation de la densité sèche en fonction du temps de séchage.

Pour l'ensemble des échantillons, les valeurs de A_w obtenues restent entre 0.02 et 0.5 $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}^{1/2}$. Ces résultats sont en concordance avec les résultats obtenus dans la littérature sur des matériaux similaires (tableau. IV. 2) (malgré la différence qui existe entre les différents protocoles expérimentaux et les états initiaux des échantillons et leur nature) et montrent une aptitude du matériau à absorber l'eau.

Tableau. IV. 2. Exemple de valeurs de A_w obtenues dans la littérature.

Auteurs	Matériaux	w (%)	Densité (g/cm ³)	D _{max} (mm)	A _w (kg.m ⁻² .s ^{-1/2})	Temps de séchage
Chabriac, 2014	St Antoine l'Abbaye	18	1.73	40	0.37	Immédiat-ement
	Montseveroux	18	1.62	40	0.62	
	Lyon	18	1.62	10	0.23	
Dao et col, 2018	Brut	/	1.06	5	0.24	28 jours
	Brut+4% ciment	/	1.06		0.45-0.55	
Fabbri et col, 2018	Isère	18	1.4- 2	2	0.2-0.6	Immédiat-ement
Hall et Djerbib, 2004	Brique silico-calcaire	/	/	/	0.88*	Immédiat-ement
	Brique cuite	/	/	/	0.98*	
	Pisé non stabilisé	/	/	/	0.28-1.28*	
	Pisé stabilisé au ciment	/	/	/	0.59-1.61*	
	Brique en béton	/	/	/	0.19*	
	Block en béton cellulaire autoclavé	/	/	/	0.49*	
	Plâtre : Class B, type b2	/	/	/	2.56*	

*des valeurs déduites à partir de la sorptivité

2.1.3 Effet de la succion initiale sur le coefficient d'absorption d'eau A_w

Les mesures de succion ont été réalisées par la méthode du papier filtre (ASTM, D. 5298-03) pour l'ensemble des échantillons (Cf. Chapitre .III, §5.2.2). Les valeurs de succion mesurées varient entre 0.32 et 166 MPa.

La succion induite par le séchage (1, 3, 7, 14 ,21 et 28 jours) est en relation directe avec le coefficient A_w . Sur la figure IV-4, nous avons représenté l'évolution du coefficient d'absorption en fonction de la succion. Une tendance exponentielle est observée entre les valeurs de A_w et la succion initiale ψ_i et dont le coefficient de corrélation est généralement supérieur à 0.95. Les équations obtenues sont comme suit :

$$[T-OPM] \quad A_w = 0.0011 \psi_i^{0.48} \quad R^2 = 0.97 \quad [IV-1]$$

$$[T-OPN] \quad A_w = 0.0006 \psi_i^{0.53} \quad R^2 = 0.99 \quad [IV-2]$$

$$[T-4 MPa] \quad A_w = 0.0028 \psi_i^{0.43} \quad R^2 = 0.98 \quad [IV-3]$$

Ainsi, une relation globale peut être proposée :

$$[T-Relation globale] \quad A_w = 0.0015 \sqrt{\psi_i} \quad R^2 = 0.95 \quad [IV-4]$$

Pour une première estimation, cette corrélation peut être proposée pour le matériau terre compactée. Il est évident que d'autres résultats sont nécessaires pour la validation et l'amélioration de cette corrélation.

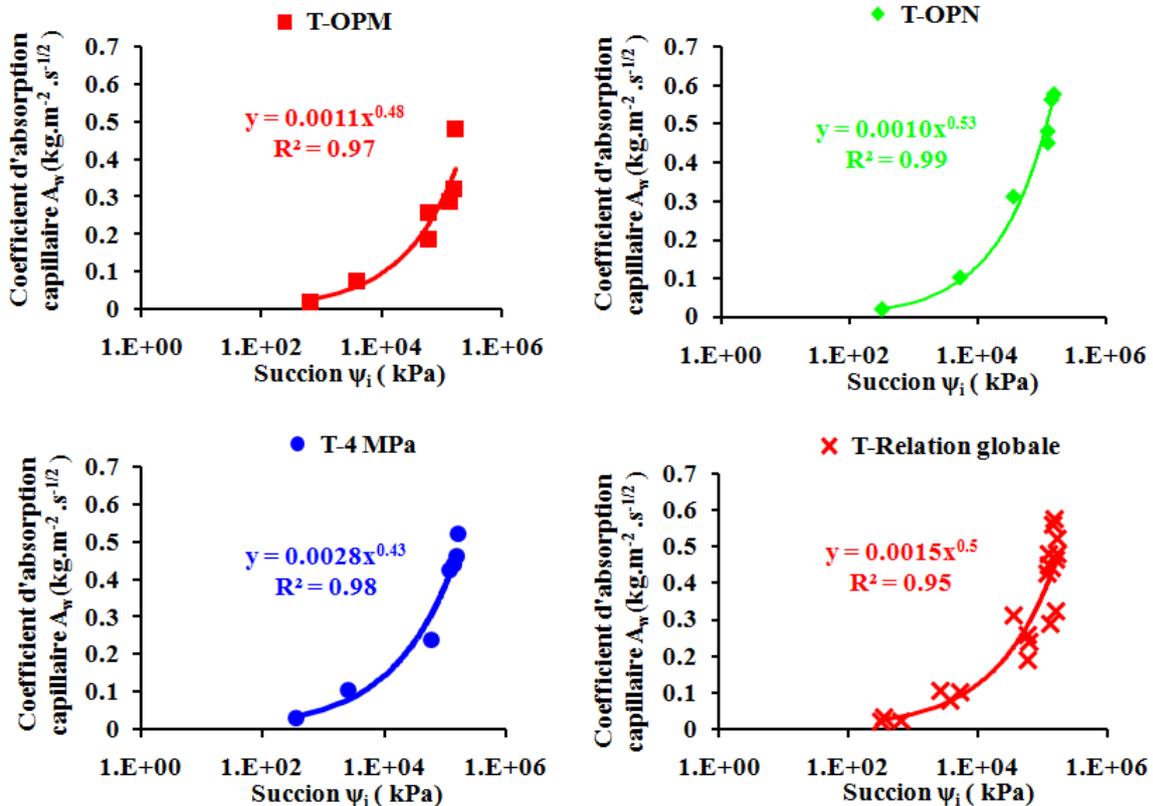


Figure IV. 4. Relation entre le coefficient d'absorption et la succion.

2.1.4 Effet de la teneur en eau et du degré de saturation sur A_w

Pour mettre en évidence l'effet de la teneur en eau initiale (w_i) et du degré de saturation initial (S_{ri}) sur le coefficient A_w , nous avons représenté l'évolution de ce dernier en fonction de ces deux paramètres (figure IV.5 et IV.6).

On constate qu'une diminution de la teneur en eau ainsi que du degré de saturation engendrent une diminution du coefficient d'absorption d'eau ce qui est en accord avec les résultats de (Schwarz 1972 et Janz ,1997). Pour des teneurs en eau variant de 1.52% à 14.24%, le coefficient A_w varie respectivement de 0.020 à 0,576 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$ pour l'ensemble des échantillons testés(T-OPN, T-OPM, T-4MPa).

Les relations entre A_w et w_i pour les différentes énergies sont approchée par les équations suivantes :

[T-OPM]	$A_w = 0.58 w_i^{-1.23}$	$R^2 = 0.95$	[IV-5]
[T-OPN]	$A_w = 0.85 w_i^{-1.34}$	$R^2 = 0.97$	[IV-6]
[T-4 MPa]	$A_w = 0.82 w_i^{-1.27}$	$R^2 = 0.99$	[IV-7]

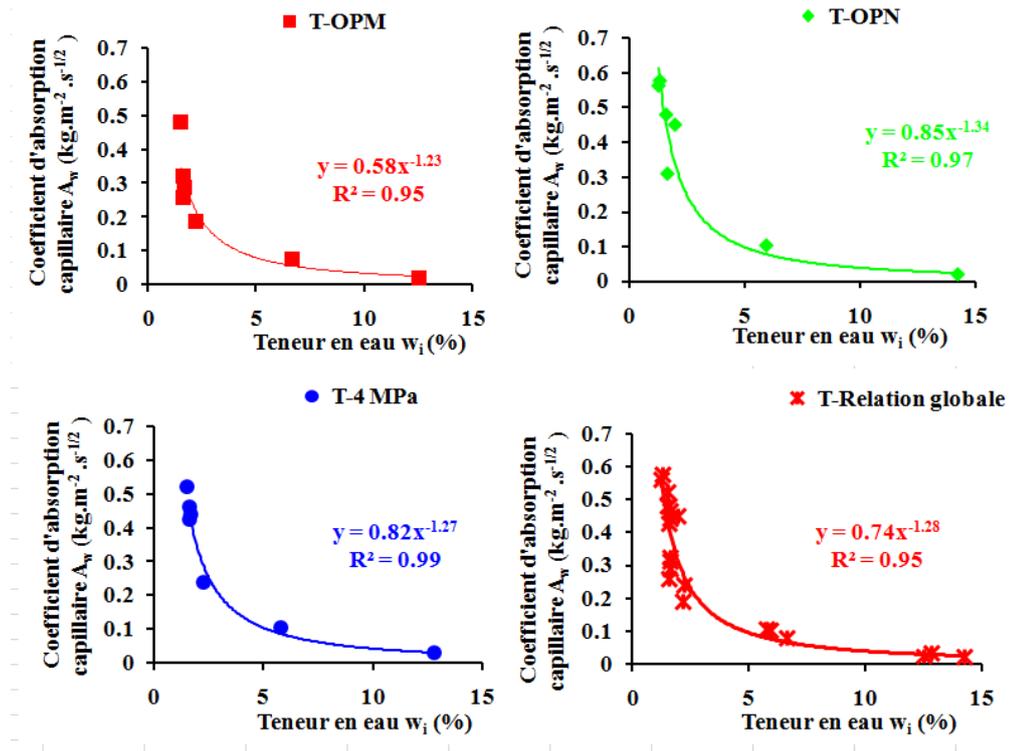


Figure IV. 5. Evolution du coefficient d'absorption en fonction de la teneur en eau initiale.

De même, une variation du degré de saturation de 6% à 90% entraîne une variation de A_w de 0.020 à 0,576 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$ pour T-OPM, T-OPN, T-4MPa. Lorsque les valeurs de teneur en eau dépassent 12.5 % (degré de saturation supérieur à 73%), le coefficient A_w tend vers de très faibles valeurs ($<0.03\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$).

Les relations entre A_w et S_{ri} obtenues sont comme suit :

[T-OPM]	$A_w = 3.68 S_{ri}^{-1.11}$	$R^2 = 0.96$	[IV-8]
[T-OPN]	$A_w = 6.73 S_{ri}^{-1.31}$	$R^2 = 0.98$	[IV-9]
[T-4 MPa]	$A_w = 7.43 S_{ri}^{-1.28}$	$R^2 = 0.98$	[IV-10]

Indépendamment des états initiaux, les relations globales suivantes ont été retenues :

$A_w = 0.74 w_i^{-1.28}$	$R^2 = 0.95$	[IV-11]
$A_w = 5.68 S_{ri}^{-1.23}$	$R^2 = 0.96$	[IV-12]

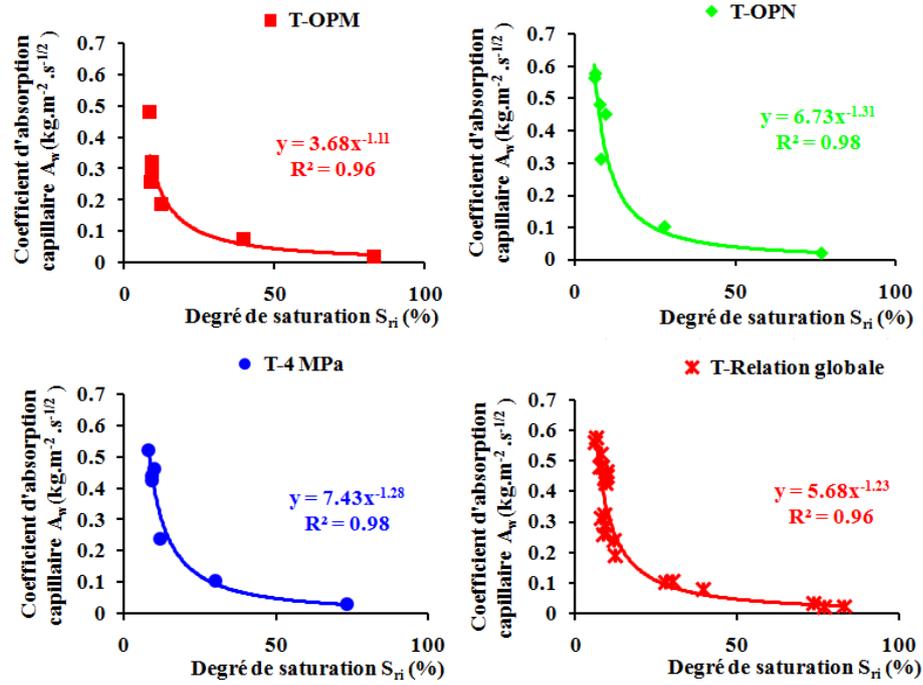


Figure IV. 6. Evolution du coefficient d'absorption en fonction du degré de saturation initial.

2.2 Chemins de séchage-humidification

La détermination des chemins de séchage et humidification a été réalisée en utilisant deux techniques complémentaires à savoir : la technique osmotique et la technique du papier filtre. La technique osmotique a été utilisée pour l'imposition des succions inférieure à 8MPa tandis que la méthode du papier filtre a été utilisée pour la mesure de la succion des échantillons séchés à différents âges.

Les résultats des essais de séchage-humidification des échantillons compactés T-OPM, T-OPN et T-4 MPa sont représentés dans les cinq plans (figure. IV.7) :(a) indice des vides-teneur en eau, (b) indice des vides-succion (c) degré de saturation-teneur en eau (d) degré de saturation-succion (e) teneur en eau- succion.

Les paramètres initiaux des échantillons compactés sont donnés dans le tableau IV.3. Nous avons aussi rapporté les valeurs de succions initiales (Ψ_{OPN} , Ψ_{OPM}) estimées à partir des corrélations de (Fleureau et col, 2002) données par les équations IV.13 et IV.14:

$$[\text{OPN}] \Psi_{\text{OPN}} \quad \Psi_{\text{opt}} = 0.118 (w_L)^{1.98} \quad R^2=0.88 \text{ [Eq. IV.13]}$$

$$[\text{OPM}] \Psi_{\text{OPM}} \quad \Psi_{\text{opt}} = 0.72 (w_L)^{1.64} \quad R^2=0.88 \text{ [Eq. IV.14]}$$

Tableau. IV. 3. Les caractéristiques initiales des échantillons compactés.

Conditions initiales	Succion mesurée (kPa)	Succion estimée (kPa)	w_i (%)	γ_d (g/cm ³)	e_i	S_{ri} (%)
T-OPM	98	641	12.7	1.98	0.44	92
T-OPN	117	150	15	1.79	0.530	78
T-4MPa	119	/	13.5	1.8	0.510	76

Il apparaît que la valeur de la succion initiale mesurée pour l'échantillon T-OPM est très faible par rapport à celle corrélée. Ceci est peut-être dû à une mauvaise isolation de l'échantillon au cours de la période d'équilibre entraînant une humidification de l'échantillon. Ainsi, il nous semble que la valeur corrélée est plus logique et semble s'intégrer parmi les points de mesures expérimentales du chemin de séchage- humidification. En ce qui concerne les échantillons compactés à l'OPN, les valeurs de succion mesurée et corrélée restent comparables. Les échantillons compactés suivent un chemin d'humidification au-delà de la succion initiale et un chemin de séchage pour des succions supérieures à la succion (Ψ_i). En considérant le chemin de séchage on peut noter les remarques suivantes :

Dans le plan (a), étant donné que les échantillons se trouvent dans un état non saturé après compactage (le degré de saturation varie entre 72 et 90%), les points initiaux se situent à gauche de la droite de la saturation. A partir de cet état initial, l'échantillon atteint très vite le palier de retrait qui se caractérise par un indice des vides minimal e_{SL} de l'ordre de 0.43, 0.44 et 0.45 respectivement pour les échantillons :T-OPM, T-OPN et T-4MPa et une teneur en eau correspondant à la limite de retrait (w_{SL}) qui varie entre 10 et 12%. Cette limite de retrait correspond dans le plan (b) à une succion de retrait pour l'ensemble des échantillons de l'ordre de $\Psi_{SL}=10^4$ kPa (tableau IV.3). Après cette valeur, les variations de l'inde des vides restent négligeables (ne dépassent passent 0.03) et les paramètres hydriques (teneur en eau et degré de saturation) chutent d'une manière quasi-linéaire (plan (c), (d) et (e).

Dans le tableau IV.4, on donne pour le chemin de séchage humidification (T-OPM, T-OPN, T-4MPa) la variation de l'indice des vides, du degré de saturation, de la teneur en eau, en fonction du domaine de succion. Le chemin de séchage correspond à des succions supérieures à la succion initiales ($\Psi \geq \Psi_i$) et le chemin d'humidification correspond à des succion inférieures à la succion initiale ($\Psi \leq \Psi_i$). On constate que les grandes variations du degré de saturation sont reliées au chemin de séchage. Par contre, ces variations sont accompagnées par de faibles variations volumiques (retrait) qui restent inférieures à 3.5%. Ceci est due à ce que les caractéristiques de compactage initiales sont très proches à celles de retrait (w_{SL} , Ψ_{SL}) et explique les faibles variations de densité au cours de séchage déjà observées (Figure IV-3). Sur le chemin d'humidification, les variations du degré de saturation sont entre 19% et 23% et qui correspondent à une variation volumique (gonflement) entre 7% et 12%. Toutes fois, les variations de la teneur en eau sont équivalentes entre les deux chemins. Entre les différents états initiaux considérés, on constate que les échantillons compactés à 4 MPa (T-4MPa) représentent les variations volumiques et hydriques les plus importantes par rapport aux échantillons T-OPM et T-OPN.

Tableau. IV. 4. Variation des paramètres d'état en fonction du domaine de succion sur chemin de séchage-humidification.

	Séchage				humidification			
	Δe	$\Delta e / (1+e_0)$ (%)	ΔS_r (%)	Δw (%)	Δe	$\Delta e / (1+e_0)$ (%)	ΔS_r (%)	Δw (%)
T-OPM	0.02	1.38	70	9	0.10	7.04	19	6
T-OPN	0.05	3.29	69	10	0.13	8.78	20	10
T-4MPa	0.05	3.33	63	8	0.18	11.95	23	12

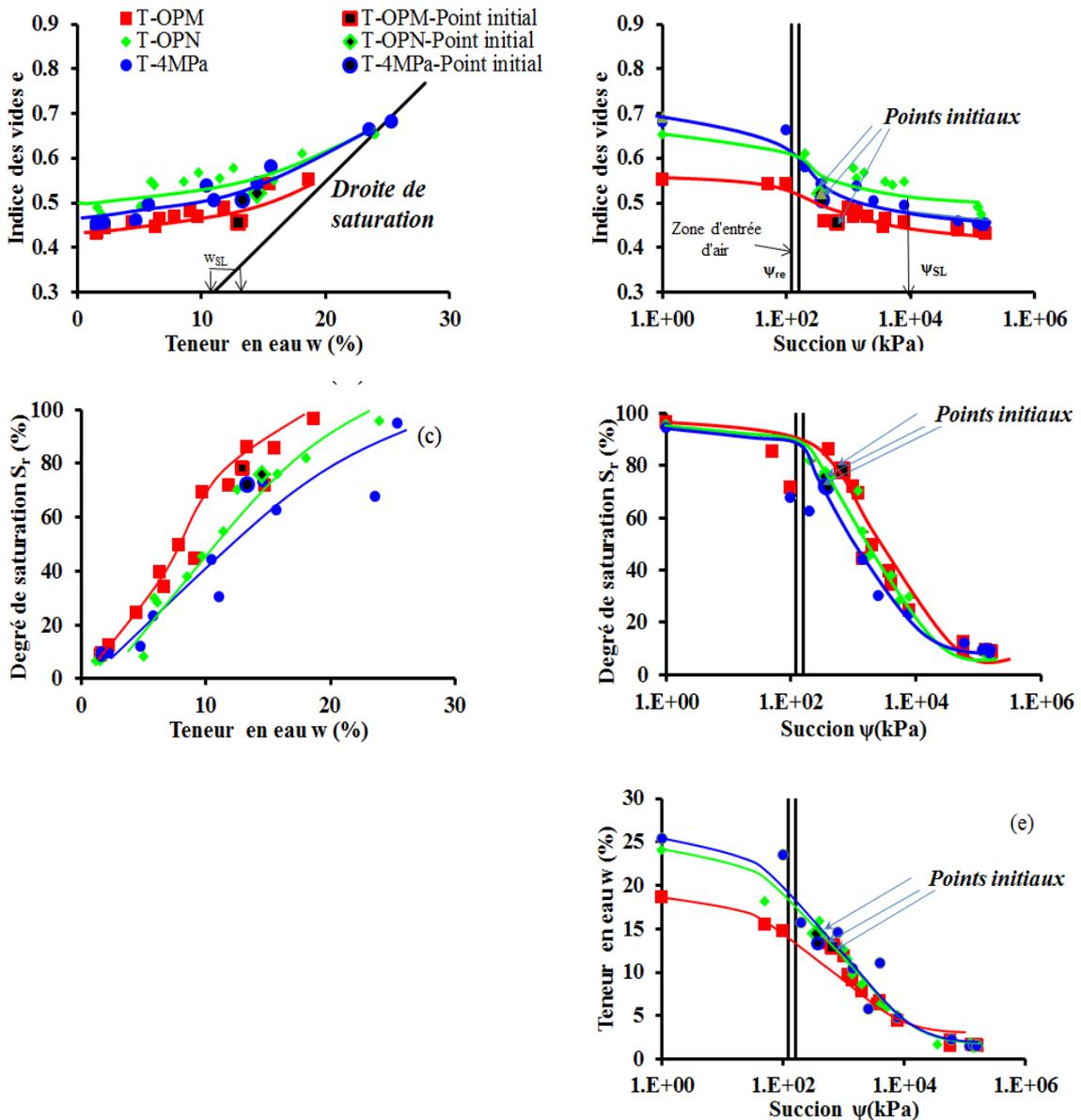


Figure IV. 7. Chemins séchage -humidification (T-OPM, T-OPN et T-4MPa).

Selon les constatations (Fleureau et col, 2002), les courbes d'humidification dans les plans (w, ψ) ou (e, ψ) présentent une allure linéaire pour les échantillons compactés aux conditions de l'OPN et OPM. Ainsi, des corrélations (Eq. IV.15 et IV.16) ont proposées par le même auteur représentant la pente (D_{ms}) entre le la succion et la teneur en eau des échantillons compactés à OPM et OPN en fonction de la limite de liquidité :

$$[\text{OPN}] D_{ms} = \frac{-\Delta w}{[\Delta \log(\psi)]} = -0.54 - 0.030w_L + 3.3 \cdot 10^{-6} w_L^2 \quad R^2=0.85 \quad | \text{Eq. IV.15}]$$

$$[\text{OPM}] D_{ms} = \frac{-\Delta w}{[\Delta \log(\psi)]} = -1.46 - 0.051w_L \quad R^2=0.40 \quad | \text{Eq. IV.16}]$$

IV.16]

La figure IV. 8 représente la variation de la teneur en eau normalisée (w/D_{ms}) en fonction de la succion d'un nombre de sols compactés à l'optimum Proctor normal ou

Proctor modifié de (Fleureau et col, 2002) comparés avec les résultats des échantillons du tuf de Béni-saf compactés à T-OPM et T-OPN en utilisant les équations (Eq. IV. 15 et 16).

Les valeurs de $w/D_{ms}=f(\Psi)$ des échantillons T-OPM et T-OPN se positionnent correctement avec celles de la littérature, montrant ainsi l'unicité de ce chemin quelque soit la limite de liquidité du matériau.

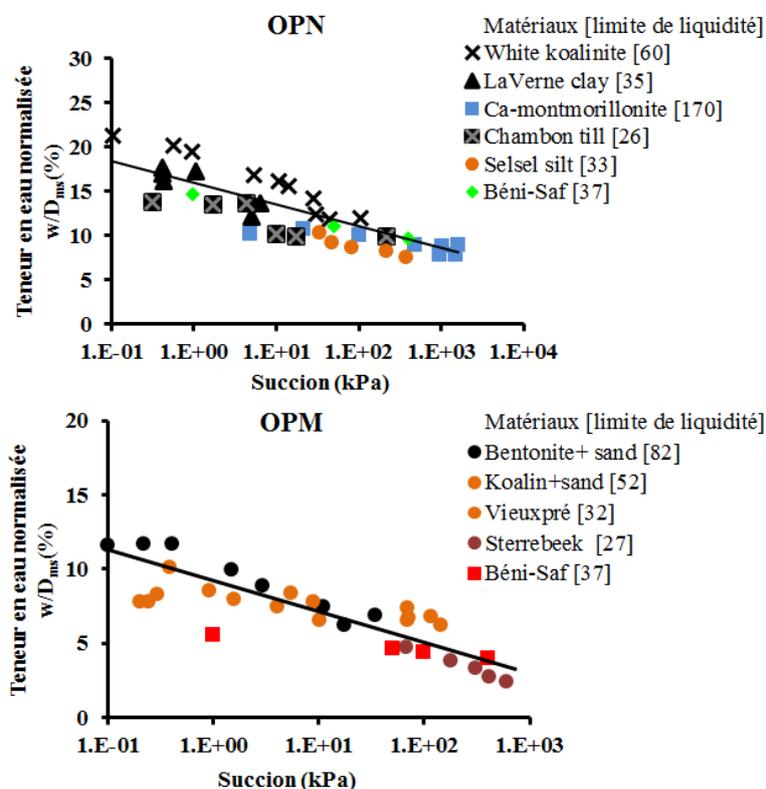


Figure IV. 8. Teneur en eau normalisée en fonction de la succion des sols compactés à l'optimum Proctor ou Proctor modifié comparé avec les résultats T-OPM et T-OPN.

2.3 La conductivité hydraulique saturée

Des mesures de la perméabilité saturée ont été réalisées dans un appareil triaxial sous un régime d'écoulement permanent (Cf. Chapitre. III. §5.3).

Les résultats de la conductivité hydraulique immédiatement après compactage et à différentes durées de séchage (7, 14, 21 et 28 jours) sont présentés dans la figure IV.9. Les courbes montrent une diminution du coefficient de conductivité après 7 jours de séchage. On peut aussi constater qu'après un temps de séchage de 14 jours, la perméabilité tend vers des valeurs asymptotiques respectivement de l'ordre de $3.4 \cdot 10^{-9}$ m/s et de $4 \cdot 10^{-9}$ m/s pour les échantillons T-OPM, T-4MPa et de $7.3 \cdot 10^{-9}$ m/s pour l'échantillon T-OPN. Cette diminution de conductivité reste généralement de l'ordre de 12%(T-OPM), 5%(T-OPN), 30%(T-4MPa) entre l'état immédiat après compactage et à 28 jours de séchage. Cette réduction est due essentiellement à une densification des échantillons au cours du processus de séchage (plan (a) figure IV.7).

On note aussi que les valeurs de k_{sat} des trois états initiaux considérés (T-OPM, T-OPN, T-4MPa), restent pratiquement équivalentes pour toutes les durées de séchage et cela peut être attribué à la texture granulaire dominante du matériau ($\%>80\mu m=48\%$) (Chap.III, Figure III.3).

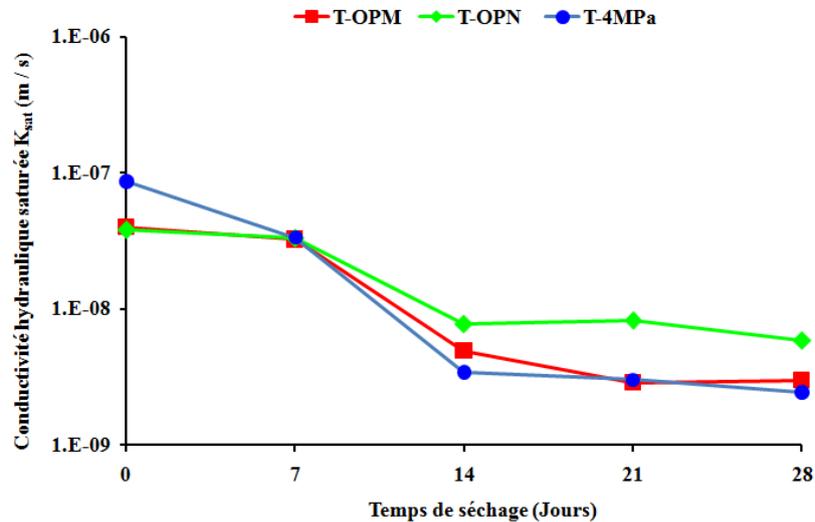


Figure IV. 9. Evolution de la conductivité hydraulique saturée à l'eau au cours de séchage du des échantillons T-OPM, T-OPN et T-4MPa.

2.4 Ajustement de la courbe caractéristique sol-eau (SWCC) par l'équation de Van Genuchten

L'équation de (Van Genuchten, 1980) a été utilisée pour l'ajustement de la courbe caractéristique sol-eau (SWCC, [plan w , Ψ]) par plusieurs chercheurs (Leong et Rahardjo, 1997 ; Fredlund et col, 2011; Derfouf et al, 2013 ; Zhai et al, 2019 ; Bajestani et al, 2020). Les courbes caractéristique sol-eau (SWCC) lors du séchage-humidification des échantillons compactés à T-OPM T-OPN et T-4MPa, simulées par l'équation de Van Genuchten, 1980, sont présentées sur la figure IV.10. Les paramètres (a , n , m) de Van Genuchten, 1980 ont été déterminés par la méthode des moindres carrés. L'ensemble des paramètres d'ajustement obtenus sont rassemblés dans le tableau IV.5.

Tableau. IV. 5. Les valeurs de conductivité hydraulique saturées et les paramètres de l'équation de Van Genuchten (VG).

Paramètres	Symboles	T-OPM	T-OPN	T-4 MPa
Conductivité hydraulique saturée	k_{sat} (m/s)	8.65E-08	3.8E-08	4E-08
Teneur en eau volumique de saturation	θ_s	0.37	0.49	0.51
Teneur en eau volumique résiduelle	θ_r	0.02	0.02	0.04
Ajustement	n	0.892	1.516	0.611
	a	0.005	0.005	0.0035
	m	0.03	0.33	0.83
Coefficient de régression	R^2	0.98	0.98	0.98
Conductivité hydraulique non saturée	K_u (m/s)	4.15E-10	3.19E-10	3.30E-09

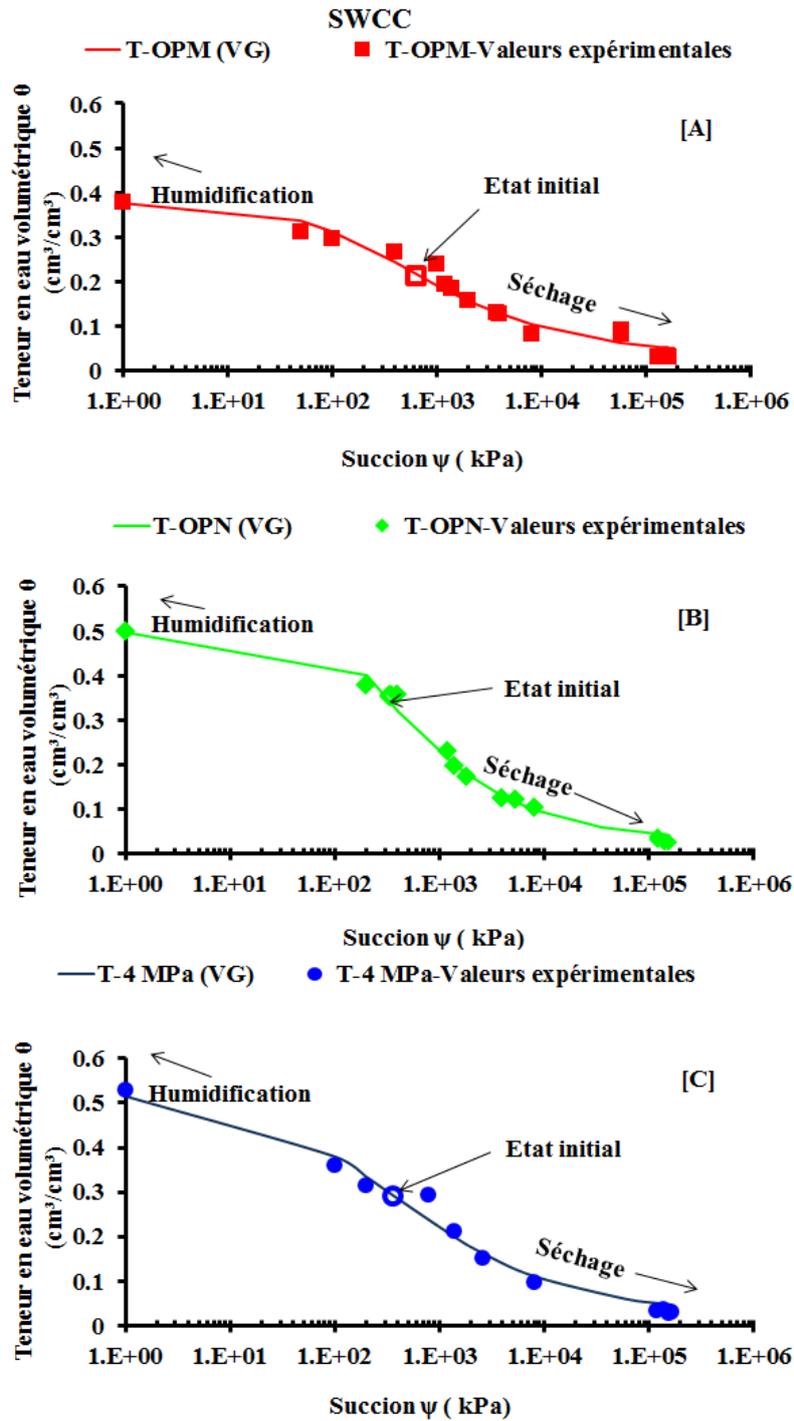


Figure IV. 10. Les courbes caractéristiques des échantillons compactés à T-OPM T-OPN et T-4MPa.

2.5 Conductivité hydraulique non saturée

En utilisant les équations III.9 et III.10 (chap-III) de (Van Genuchten, 1980), on a pu déterminer l'évolution de la conductivité hydraulique non saturée pour les trois énergies considérées (T-OPM, T-OPN, T-4MPa). Les paramètres de l'équation utilisée sont donnés

dans le tableau. IV.5. La valeur de la conductivité hydraulique saturée a été utilisée comme un point de calage (Yates et col, 1992).

La variation de la conductivité hydraulique non saturée en fonction de la succion est représentée dans la figure IV.11. On constate que l'évolution de la conductivité hydraulique non saturée est caractérisée par deux domaines de variation dont la limite est sensiblement positionnée au point d'entrée d'air des trois états initiaux considérés (point de resaturation à $\Psi_{re} \approx 120 \text{ kPa}$ qui correspond à $S_r \approx 90\%$ pour l'ensemble des échantillons). Pour des succions inférieures à la succion initiale, l'échantillon de sol absorbe de l'eau et son degré de saturation augmente (cf figure IV.7 plan d) jusqu'au point d'entrée d'air (Ψ_{re}). Les valeurs de conductivité hydraulique non saturée obtenues : $4.15 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ (T-OPM), $3.19 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ (T-OPN) et $3.30 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ (T-MPa). Après, la phase eau devient continue (Delage et col, 1998) et la variation de la conductivité hydraulique non saturée K_u par rapport à l'état saturé (K_{sat}) reste de l'ordre de 10 à 10^2 . Dans la même figure, on s'aperçoit aussi que l'effet d'une augmentation de la succion (séchage) conduit à une diminution de la conductivité hydraulique non saturée, pour atteindre des valeurs très faibles. Le rapport K_u/k_{sat} atteint des valeurs de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-3} .

Des valeurs de conductivité hydraulique non saturée (10^{-7} à 10^{-15} m/s) ont été obtenues par (Lachgueur, 2007) sur l'argile de Boughrara compactée à OPN, OPN+2%, OPN-2%, en augmentant la succion (10^2 à 10^5 kPa). Suivant l'équation de (Van Genuchten, 1980), (Abdul-Hussain et Fall, 2011) ont obtenues des valeurs de K_u variant entre 10^{-5} et 10^{-22} m/s des échantillons composés de 6% de ciment, de déchets de carrière et 0.4% de silicate de sodium puis séchés à 90 jours.

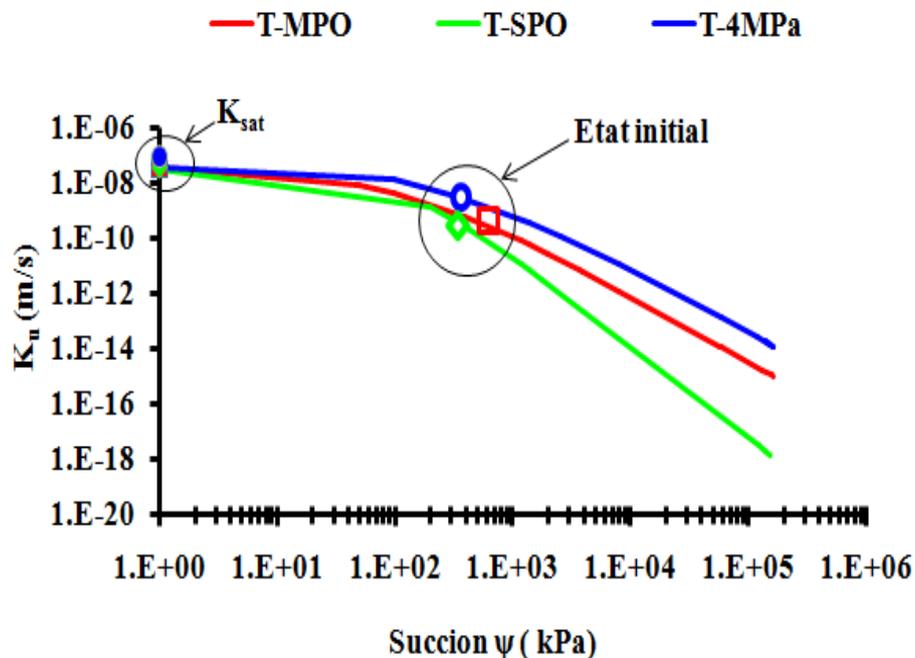


Figure IV. 11. Variation de la conductivité hydraulique non saturée en fonction de la succion des échantillons T-OPM, T-OPN et T-4MPa.

2.5.1 Relation entre la perméabilité non saturée et le coefficient d'absorption

Précédemment, on a vu l'effet de la teneur en eau, du degré de saturation et de la succion sur le coefficient A_w . Dans cette section, nous allons explorer la relation entre la conductivité hydraulique non saturée (K_u) et le coefficient A_w .

La représentation des valeurs de la conductivité non saturée K_u en fonction des valeurs de A_w déterminées expérimentalement a permis d'établir un ajustement de type puissance (figure IV.12). Dans cet ajustement, une régression inversement proportionnelle entre les valeurs de A_w et K_u est observée, de manière à ce que plus A_w augmente les valeurs de K_u diminuent.

La comparaison entre les trois états initiaux, montre que l'évolution de la conductivité hydraulique non saturée des échantillons diminue pour atteindre des valeurs de 10^{-18} , 10^{-14} , 10^{-12} m/s respectivement pour les échantillons à T-OPM, T-OPN, T-4MPa. Cette différence est très influencée par les valeurs de la succion induite après 28 jours de séchage.

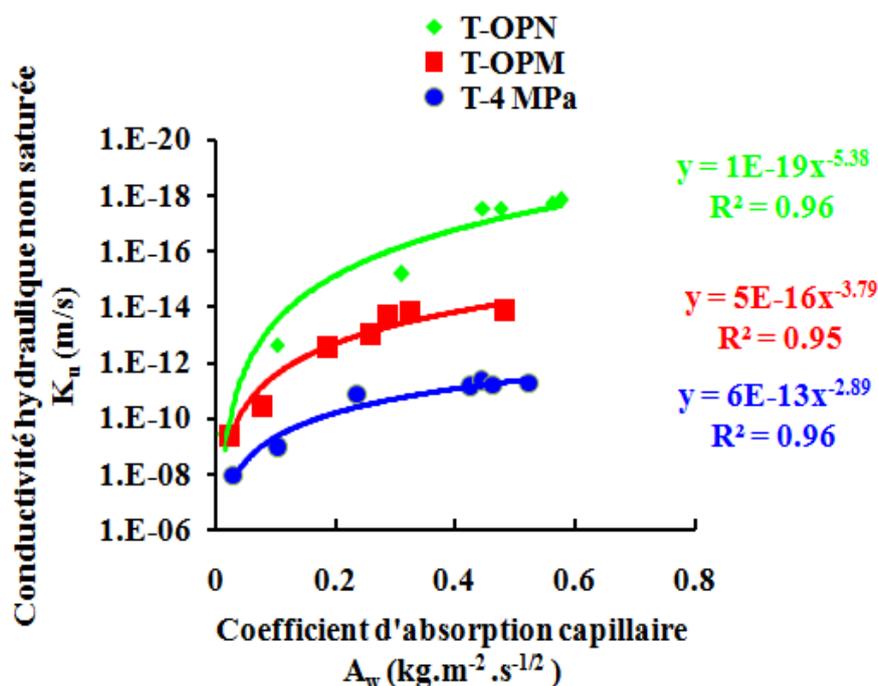


Figure IV. 12. Variation de la conductivité hydraulique non saturée en fonction du coefficient d'absorption d'eau.

Les équations sont données par les relations Eq. IV.17 à IV.19.

[T-OPM]	$K_u = 5E-16A_w^{-3.79}$	$R^2 = 0.95$	[Eq. IV-17]
[T-OPN]	$K_u = 1E-19A_w^{-5.38}$	$R^2 = 0.96$	[Eq. IV-18]
[T-4 MPa]	$K_u = 6E-13A_w^{-2.89}$	$R^2 = 0.96$	[Eq. IV-19]

2.6 Front de remontée capillaire

L'essai consiste à caractériser la variation de l'humidité (eau capillaire) dans un matériau poreux. Cette caractérisation est traduite par la mesure de la variation de la teneur en eau ($\Delta w = w - w_i$) sur toute la hauteur de l'échantillon étudié. Les détails de mesure du front capillaire après (2) deux heures d'absorption ont été présentés dans le chapitre précédent (Cf. Chap.III. §5.5).

La figure IV.13 montre l'évolution de la teneur en eau à chaque 2cm de hauteur (0-2 cm, 2-4 cm jusqu'à 8-10 cm). D'après les courbes obtenues, on peut remarquer que les valeurs des variations de la teneur en eau les plus importantes sont liées aux valeurs des teneurs en eau initiales les plus faibles ou les valeurs de succion les plus importantes et qui correspondent aux échantillons étuvés à 105°C.

(Fredlund and Rahardjo, 1993) affirment que la valeur de la succion des échantillons séchés à des teneurs en eau s'approchant de 0% permettent d'atteindre des succions de l'ordre de 980 MPa. Dans le cas des échantillons compactés et testés immédiatement, les variations de la teneur en eau restent comprises entre 0 et 5%. Le séchage à 28 jours induit une variation de 5 à 6 fois plus que les échantillons testés immédiatement. Ces variations s'annulent pratiquement en s'approchant du sommet (entre 8 et 10 cm).

Aussi, par rapport aux profils hydriques des échantillons testés immédiatement ou séchés à 28 jours, les échantillons étuvés à 105°C présentent un profil hydrique dont les variations d'humidité atteignent le sommet de l'échantillon. Des variations de l'ordre de 9%, 16% et 7 % sont respectivement observées pour les échantillons compactés à T-OPM, T-OPN et T-4 MPa.

Il existe une forte relation entre la teneur en eau initiale (w_i) et les valeurs enregistrées de variation de la teneur en eau (Δw) après l'absorption pour l'ensemble des échantillons. Les échantillons testés immédiatement absorbent une quantité d'eau qui ne dépasse pas 5% dans la partie basse (0-2cm). En revanche, l'ensemble des échantillons séchés à 28 jours ($w_i < 1.8\%$) ou étuvés à 105°C ($w_i < 0.4\%$), ont une aptitude très importante à absorber de l'eau.

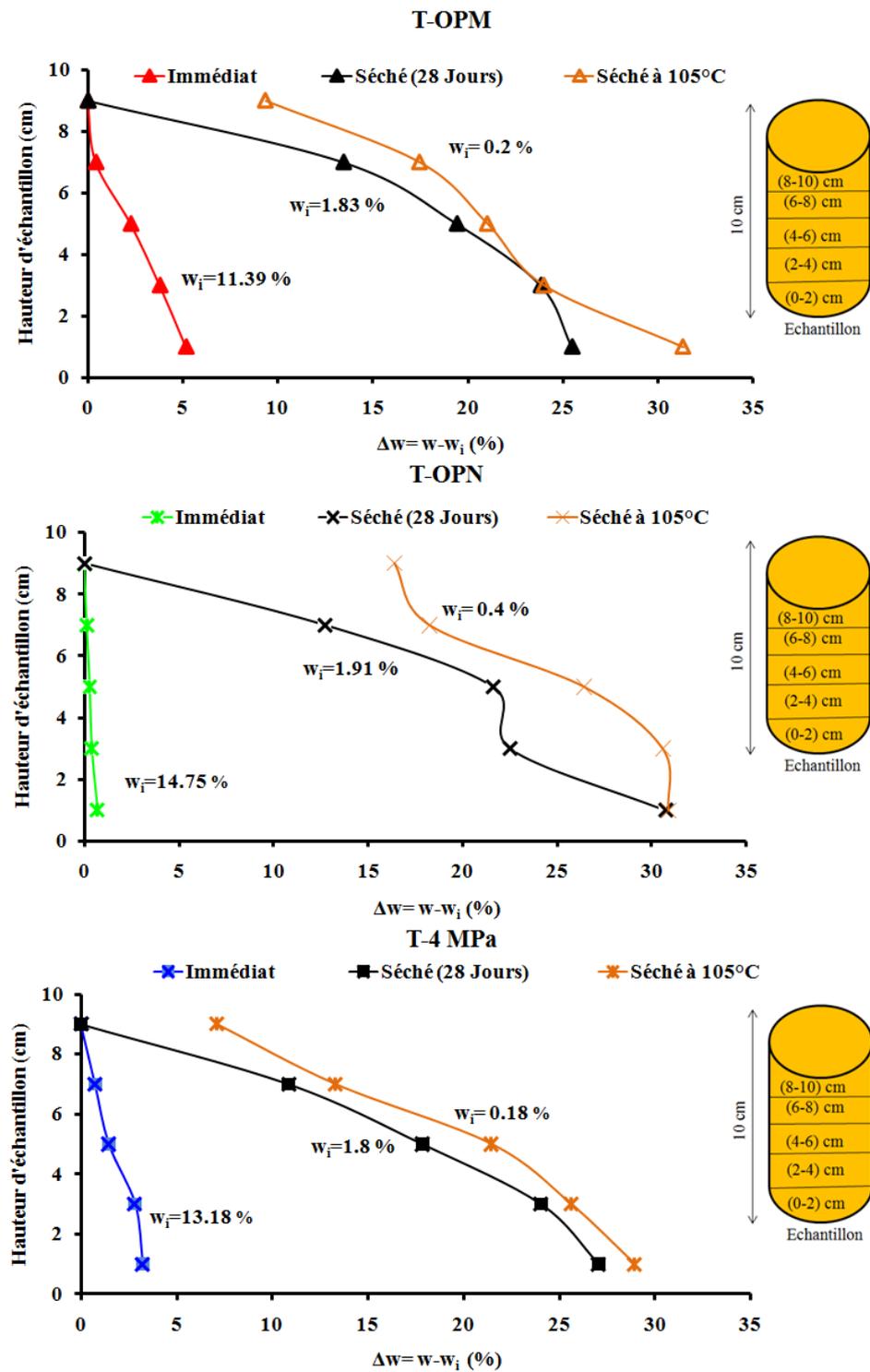


Figure IV. 13. Les courbes de front capillaire des échantillons compactés à T-OPM, T-OPN et T-4MPa.

2.7 Diffusion de la vapeur d'eau

Après avoir imposé les humidités relatives données dans par (NF EN ISO 12572), des mesures de poids des échantillons ont été prises quotidiennement comme est indiqué dans le chapitre précédent (Chap.III. §2.8). On note que seuls les résultats des échantillons T-OPM

seront représentés suite à l'endommagement des autres échantillons. Deux types de coupelles ont été testés : Coupelle sèche et coupelle humide. Les essais en « coupelle sèche » renseignent sur la performance de matériaux en humidité faible quand le transfert d'humidité est dominé par la diffusion de vapeur. Les essais en « coupelle humide » fournissent des indications sur la performance de matériaux en conditions très humides. À des degrés supérieurs d'humidité, les pores du matériau commencent à se remplir d'eau, ce qui accroît le transport de liquide et réduit le transport de vapeur et vis-versa.

Les pentes (G) sont calculées suivant la variation de la masse en fonction du temps (figure VI.14) avec un flux descendant ou ascendant des échantillons compactés à T-OPM des deux coupelles humide et sèche. Les valeurs de perméabilité à la vapeur δ ainsi que la résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ des échantillons compactés à T-OPM obtenues sont données dans le tableau VI.6.

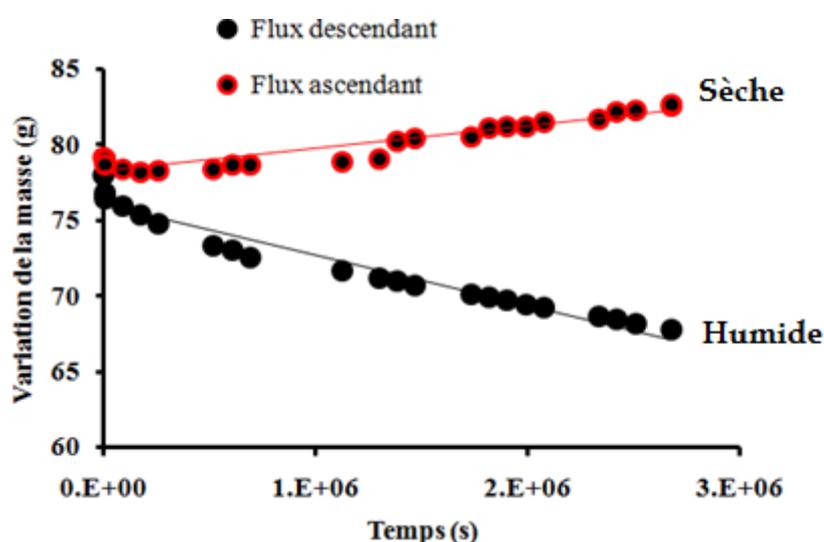


Figure IV. 14. Courbes de la droite de régression entre la masse et le temps des échantillons compactés à T-OPM.

Tableau. IV. 6. Valeurs de perméabilité à la vapeur δ et le facteur de résistance à la vapeur d'eau μ .

Les étapes de calcul de perméabilité à la vapeur	Coupelle sèche (Dry cup)	Coupelle humide (Wet cup)
La pente G (kg. s ⁻¹)	2E-09	- 4E-09
La densité du flux de vapeur g (kg. m ⁻² . s ⁻¹)	1E-06	2E-06
La perméance w (kg.m ⁻² .S ⁻¹ .Pas ⁻¹)	7E-10	1E-09
La perméabilité à la vapeur d'eau δ (kg. m ⁻¹ .S ⁻¹ .Pas ⁻¹)	1E-11	2E-11
La résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ	15	9

Nos valeurs de perméabilité à la vapeur δ sont similaires à celles de (Serbah, 2018) obtenus sur des échantillons compactés (70% de sédiment de dragage et de 30% de sable local) à OPM+25 coups avec une densité sèche de 19.1 kN/m³. Les valeurs obtenues par cet auteur sont 5.6E-11 (kg. m⁻¹.S⁻¹.Pas⁻¹) (Wet cup) et 1.7E-11 (kg. m⁻¹.S⁻¹.Pas⁻¹) (Dry cup). De même pour les résultats de (Cagnon et col, 2014) qui ont obtenus des valeurs moyennes de perméabilités à la vapeur en conditions humide de 3E-11 (kg. m⁻¹.S⁻¹.Pas⁻¹) et en conditions seches de 1.5E-11 (kg. m⁻¹.S⁻¹.Pas⁻¹).

D'autres résultats de la laine de chanvre données par (Collet, 2004) montrent des perméabilités à la vapeur sont autour de 5,5.E-11 kg. m⁻¹.S⁻¹.Pas⁻¹ pour une humidité qui varie entre 0 à 50 %.

Nos échantillons présentent une très faible résistance à la vapeur d'eau. La valeur de la résistance à la diffusion de vapeur d'eau de la coupelle sèche est toujours supérieure à celle obtenue sur une coupelle humide. Ce point a déjà été évoqué par d'autres auteurs utilisant la même méthode d'essai (Cagnon et col, 2014).

Aucune valeur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau des matériaux de construction en terre n'est donnée dans la réglementation thermique française mais, dans la norme allemande sur la brique de terre (DIN 18945), l'utilisation d'une fourchette standard comprise entre 5 et 10 est suggérée. Nos valeurs obtenues restent légèrement supérieures à cette fourchette. D'après le tableau V.7, les grandes valeurs de $\mu = 200$ sont enregistrées pour le Crépi synthétique et les faibles valeurs pour le plâtre sont de 7 à 9. Nos valeurs sont comprises entre les valeurs de la terre crue mentionnées dans la norme (NF EN 1745).

Tableau. IV. 7. Valeurs du facteur de résistance à la vapeur d'eau de la littérature.

Matériaux	μ	Références
Béton plein	20 à 100	Moëvus et col, 2012
Terre cuite	5 à 10	Moëvus et col, 2012
Plâtre	7 à 9	Moëvus et col, 2012
Terre compactée (pisé, BTC)	5 à 20	Moëvus et col, 2012
Béton de granulats légers, béton cellulaire	15 à 35	NF EN 1745
Mortier de ciment (1600 à 2000 kg/m ³)	15 à 35	NF EN 1745

3 Les paramètres thermophysiques des échantillons non stabilisés

Il est indispensable de caractériser le comportement thermique d'un matériau de construction pour évaluer son aptitude à l'isolation thermique. Cette caractérisation est

décrite par des essais expérimentaux pour mesurer des paramètres thermiques essentiels tels que la conductivité thermique, la capacité thermique volumique et la diffusivité thermique. En utilisant ces trois paramètres, on peut déterminer la capacité thermique massique, l'effusivité et la résistance thermique. Les valeurs des états initiaux d'une nouvelle série d'échantillons préparés pour cette caractérisation sont données dans le tableau. IV. 8.

Tableau. IV. 8. Caractéristiques initiales des échantillons non stabilisés (série 2).

Energies	Temps de séchage (jours)	w_i (%)	S_{ri} (%)
T-OPM	Immédiat	12.1	90
	1	6	39
	7	1.6	8
	14	1.7	9
	21	1.6	8
	28	1.5	7
T-OPN	Immédiat	14	77
	1	5.9	28
	7	2	10
	14	1.6	6
	21	1.3	7
	28	1.3	6
T-4MPa	Immédiat	13	74
	1	5.7	31
	7	1.5	10
	14	1.7	9
	21	1.5	10
	28	1.6	8

3.1 La conductivité thermique

L'effet de la teneur en eau (w) sur la conductivité thermique (λ) pour chaque état est représenté dans la figure IV.15. Une décroissance de la conductivité thermique avec la diminution de la teneur en eau est observée. Ce résultat est en accord avec ceux obtenus par (Oti et col, 2010 ; Moevus et col, 2012 ; Chabriac, 2014 ; Phung, 2018). Les valeurs de la conductivité thermique qui ont été obtenues par (Nshimiyimana et col, 2020) sur des échantillons à l'état humide (teneur en eau de 15%) sont deux fois plus élevées que celles à l'état sec.

La variation de λ durant les 14 jours de séchage est de l'ordre de 73%, 65%,58% pour les états initiaux considérés. Ces chiffres s'élèvent à 77%, 92% et 64% après 28 jours de

séchage. Des régressions linéaires (Eq. IV.20 à 22) ont permis d'ajuster les points expérimentaux obtenus avec un coefficient de régression compris entre 0.89 et 0.99.

[T-OPM]	$\lambda = 0.05w_i + 0.74$	$R^2 = 0.89$	[IV-20]
[T-OPN]	$\lambda = 0.04w_i + 0.67$	$R^2 = 0.96$	[IV-21]
[T-4 MPa]	$\lambda = 0.04w_i + 0.75$	$R^2 = 0.99$	[IV-22]

On note que la pente des équations est pratiquement identique (entre 0.04 et 0.05) et l'intersection des droites de régression avec l'axe des ordonnées reste comprise entre 0.67 et 0.75 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Cette valeur peut être définie comme étant la conductivité thermique à sec λ_{sec} (Chabriac, 2014). Ainsi une relation globale, indépendamment de l'état de compacité initiale, peut être proposée pour notre matériau (équation IV-23). Cette indépendance vis-à-vis de la l'état initial de compacité peut être expliquer par les faibles variation de la densité sèche au cours du processus de séchage (Figure IV. 15).

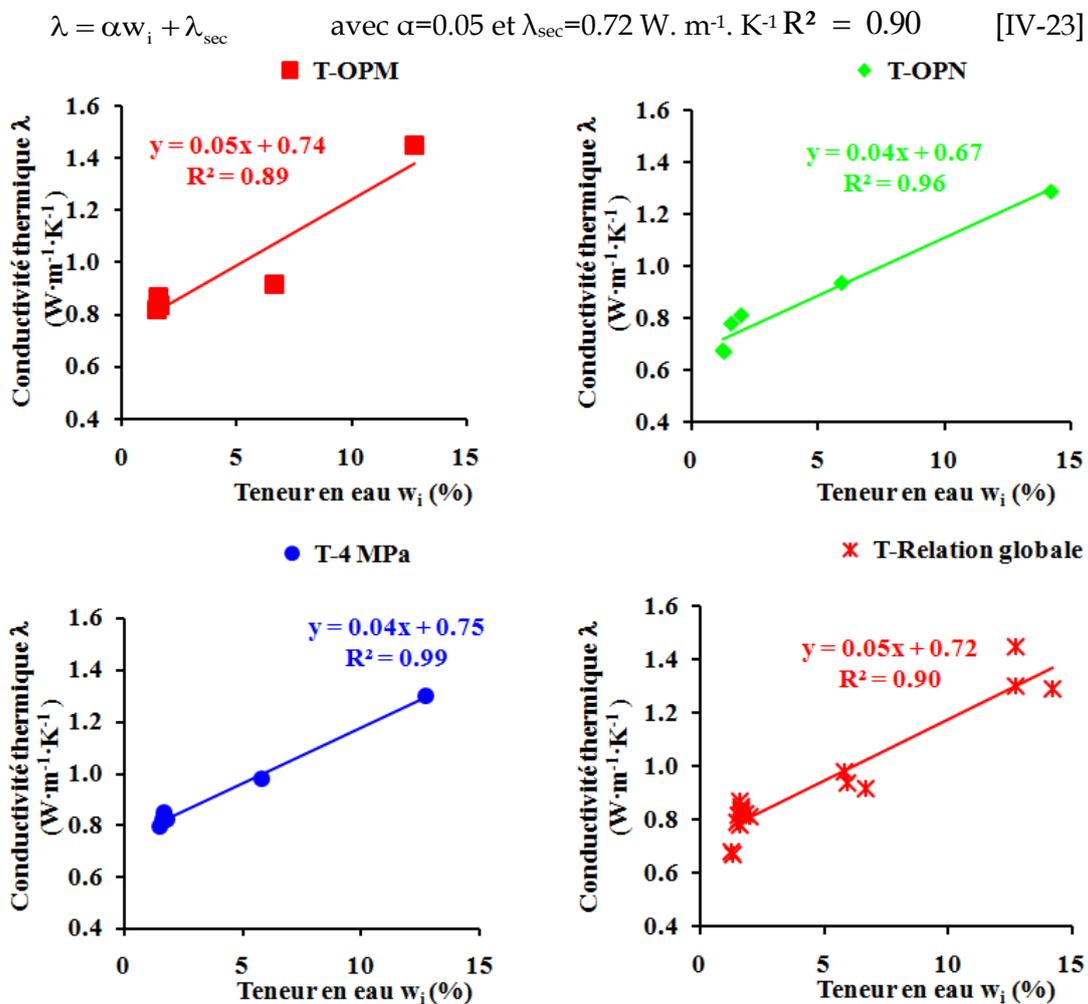


Figure IV. 16. Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau initiale.

La figure IV.16 illustre les courbes représentant la variation de la conductivité thermique (λ) en fonction de la teneur en eau (w), pour le tuf de Béni-Saf compacté (T-cette

étude) comparée à d'autres matériaux de terre compactés statiquement trouvés dans la littérature. Les valeurs sélectionnées ont été collectées à partir d'études portant sur des matériaux de densités sèches équivalentes à celles de nos échantillons (de 1,7 à 1,9 g / cm³). Par rapport au valeurs comparées, il semble que notre matériau présente la plus faible valeur de conductivité thermique et que cette dernière est inférieure de 1 W/mK pour des teneurs en eau inférieures à 7% ($\approx 38\%$) (figure. IV.16 et IV.19).

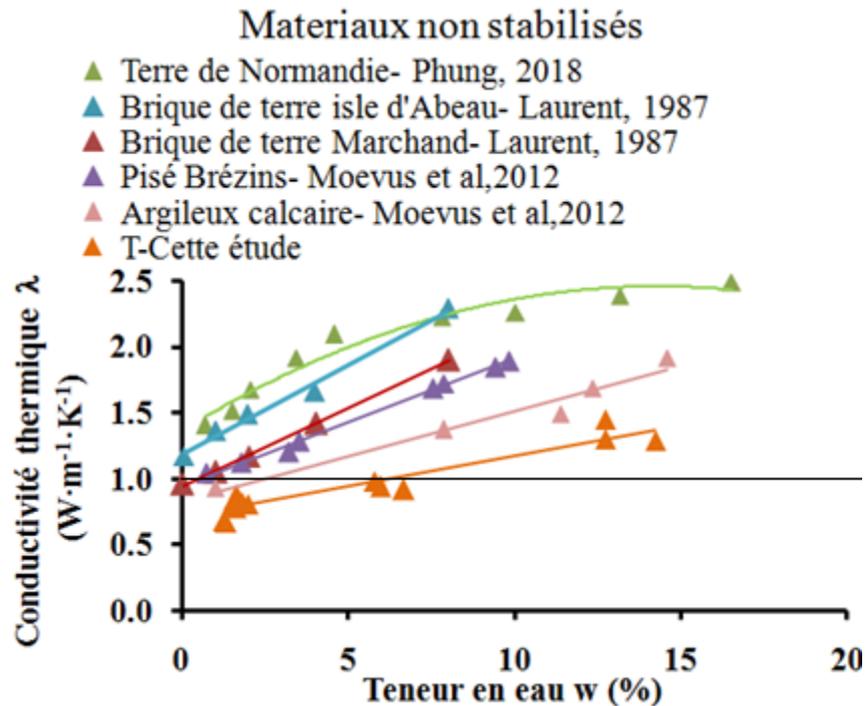


Figure IV. 17. Comparaison entre variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau de cette étude et autres de la littérature.

De même pour l'effet de la teneur en eau initiale (w_i), nous avons examiné l'effet du degré de saturation (S_i) sur la conductivité thermique (λ). Les résultats obtenus sont représentés sur la figure IV.17. Une diminution moyenne de la conductivité thermique de 77% correspond à une diminution du degré de saturation de 67%. L'ajustement des points expérimentaux permet d'avoir une régression linéaire pour les trois états énergies de compactage considérés (OPM, OPN et 4MPa) dont le coefficient de régression est aussi compris entre 0.89 et 0.99 (Eq IV. 24 à 26).

$$[T\text{-OPM}] \quad \lambda = 0.01S_{ii} + 0.73 \quad R^2 = 0.89 \quad [\text{Eq.IV-24}]$$

$$[T\text{-OPN}] \quad \lambda = 0.01S_{ii} + 0.67 \quad R^2 = 0.96 \quad [\text{Eq. IV-25}]$$

$$[T\text{-4 MPa}] \quad \lambda = 0.01S_{ii} + 0.75 \quad R^2 = 0.99 \quad [\text{Eq. IV-26}]$$

Le regroupement de l'ensemble des points expérimentaux permet de proposer une relation globale pour notre matériau et qui est donnée par l'équation IV-27.

$$\lambda = \alpha w_i + \lambda_{\text{sec}} \quad \text{avec} \quad \alpha=0.01 \text{ et } \lambda_{\text{sec}}=0.72 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1} \quad R^2 = 0.92 \quad [\text{Eq. IV-27}]$$

La diminution de la conductivité thermique avec la diminution des paramètres hydriques (teneur en eau et degré de saturation) peut s'expliquer par le fait que la conductivité thermique d'un matériau est le résultat de la combinaison des conductivités thermiques de ses constituants dans toutes les phases (solide, liquide et gaz) (Alrtimi et col, 2016). Ceci a été confirmé par plusieurs modèles basés sur des méthodes d'homogénéisation qui ont été utilisés pour déduire la conductivité thermique d'un matériau en fonction des conductivités de ses différentes phases (Filali, 2006).

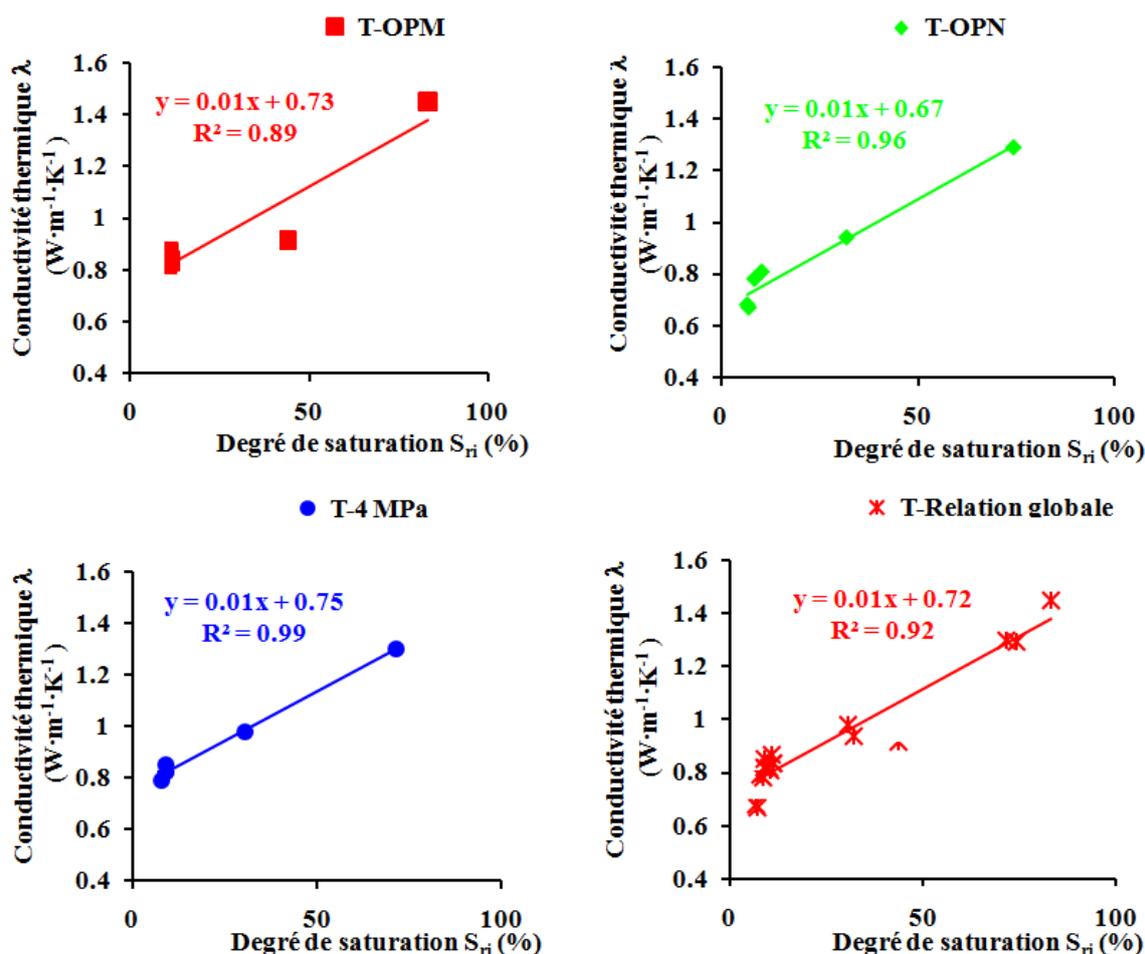


Figure IV. 18. La variation de la conductivité thermique en fonction du degré de saturation initial.

Au cours du processus de séchage, le degré de saturation (teneur en eau) diminue, ce qui se traduit par un remplacement progressif de l'eau contenue dans les pores par des bulles d'air qui formeront alors une phase d'air continue (Fredlund et Rahardjo, 1993, Boutonnier, 2007). Il est communément admis que la conductivité thermique de l'air est environ 20 fois plus petite que celle de l'eau (Mňahončáková, 2006). Par conséquent, le processus de séchage du matériau entraîne une diminution de sa conductivité thermique. Comme indiqué par (Meukamet al ,2004), ces processus se sont déroulés en trois étapes :

(i) Lorsque le sol est quasi saturé (valeur élevée de la teneur en eau), des valeurs élevées de conductivité thermique peuvent être enregistrées. Cet état correspond à un état de formation de chemin continu où le transfert de chaleur se fait à travers des ponts thermiques constitués de phase aqueuse et de contacts entre les grains du sol (figure IV.18.a). Des tendances similaires ont été observées dans d'autres études (Meukam et col, 2004; Phung, 2018).

(ii) La diminution de la teneur en eau conduit à moins de formation de ponts thermiques ou de ponts de conduction thermique à l'intérieur du matériau et par conséquent, sa conductivité thermique diminue (figure IV.18.b).

(iii) Pour une faible teneur en eau ou un faible degré de saturation, le transfert de chaleur se fait essentiellement aux points de contact entre les grains formant le matériau, ce qui peut expliquer les petits pas croissants de conductivité thermique (figure IV.18.c). Ainsi, on peut en déduire que le comportement observé dans cette étude concerne essentiellement les deux dernières phases décrites ci-dessous, puisque le degré de saturation dans la plupart des cas étudiés est compris entre 4% et 90% ($w= 1,5$ à 15%). Cependant, cet intervalle couvre la fourchette de teneur en eau correspondant à celles enregistrées pour les bâtiments en terre (Laurent, 1987).

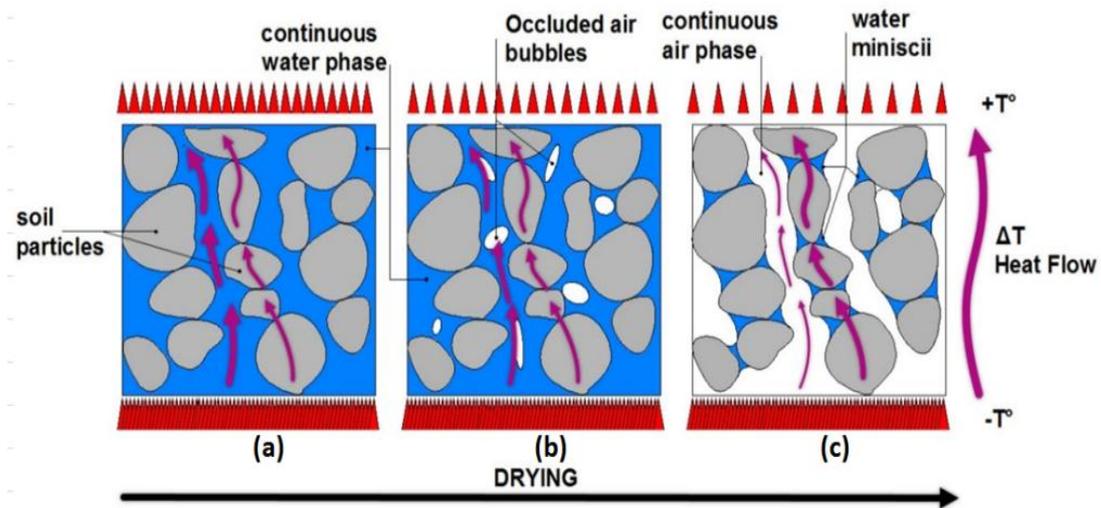


Figure IV. 19. L'effet du séchage sur la conductivité thermique.

D'autres résultats de la conductivité thermique relevés dans la littérature sont représentés en fonction du degré de saturation sur la figure IV.19.

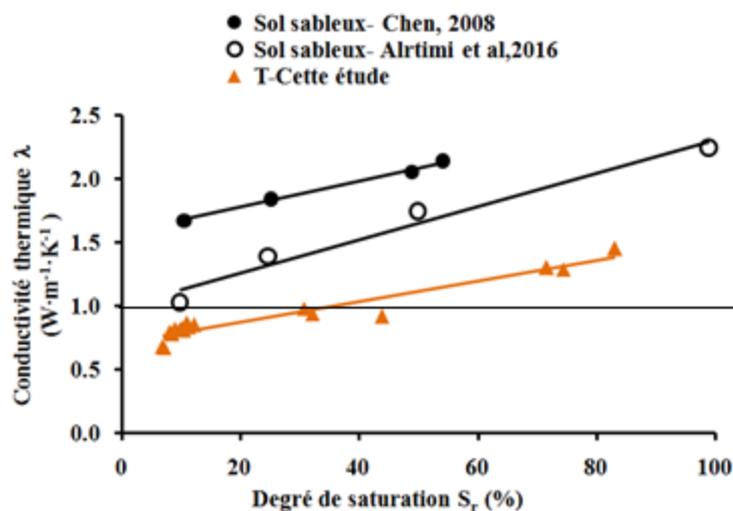


Figure IV. 20. Evolution de la conductivité thermique en fonction du degré de saturation pour différents matériaux.

La grande variation des données collectées montre que la conductivité thermique dépend des types de matériaux, de l'énergie et du mode de compactage utilisés dans chaque étude. Les valeurs de conductivité thermique obtenues dans ce travail semblent suivre le comportement général observé dans les travaux de la littérature.

La figure IV.20 illustre une comparaison entre les conductivités thermiques obtenues dans notre étude et celles de certains matériaux de construction conventionnels tels que le béton, les briques cuites et non cuites et la brique silico-calcaire (DTR C3-2, 1997). A titre de comparaison, la conductivité thermique du béton classique est approximativement égale à $2\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, ce qui indique que la conductivité thermique moyenne de notre matériaux est environ 4 fois inférieure à celle du béton. Nous pouvons également noter que la valeur obtenue dans cette étude est inférieure de 1,15 à 1,4 fois celle des caractéristiques adoptées de la conductivité thermique du matériau terre et de la brique silico-calcaire.

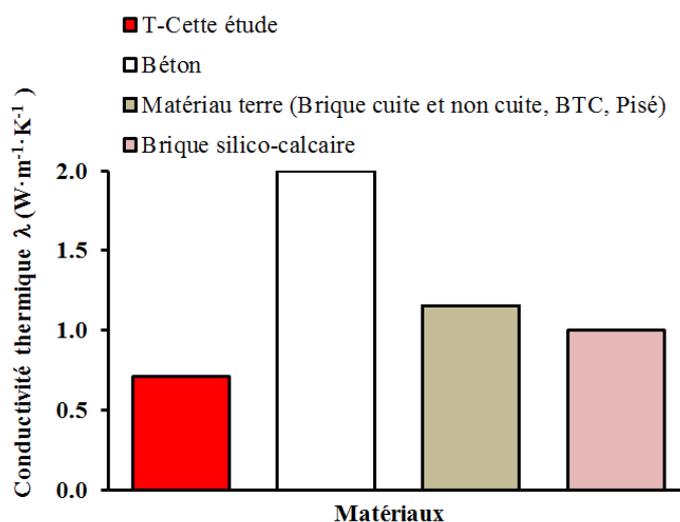


Figure IV. 21. La conductivité thermique de notre matériau comparée à celle d'autres matériaux de construction.

3.2 La capacité thermique volumique et massique et diffusivité thermique

Les valeurs de la capacité thermique massique (C_p) sont données dans le tableau IV.9. Ces valeurs ont été déduites à partir des mesures effectuées de la capacité thermique volumique (C) (Chap.III.Eq. III.11). Dans le même tableau, on donne les valeurs de la diffusivité thermique mesurée.

Tableau. IV. 9. Les capacités thermiques volumique et massique ainsi que la diffusivité thermique des échantillons testés.

Energies	Temps de séchage	ρ (kg/m ³)	$C \times 10^6$ (J/m ³ .K)	C_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	$D \times 10^{-7}$ (m ² /s)
T-OPM	Immédiat	2165	1.7	766	8.30
	1	2050	1.47	709	6.50
	7	1983	1.45	731	6.01
	14	1979	1.4	708	5.95
	21	1977	1.4	708	5.97
	28	1973	1.39	704	5.96
T-OPN	Immédiat	2049	1.72	838	7.48
	1	1923	1.46	759	6.40
	7	1838	1.41	767	5.80
	14	1830	1.4	765	5.43
	21	1834	1.39	758	5.10
	28	1843	1.38	749	5.10
T-4 MPa	Immédiat	2055	1.65	797	7.80
	1	1926	1.51	784	6.47
	7	1872	1.43	763	5.98
	14	1867	1.36	729	6.03
	21	1862	1.39	744	6.01
	28	1867	1.4	751	5.60

Les valeurs de capacité thermique massique reportées, semblent être en cohérence avec celles de la littérature. Les mesures de la capacité volumique entreprises par (Boukelia, 2016), sur des échantillons compactés à l'OPN ont donné lieu à des valeurs de l'ordre 2.4 et 2.9×10^6 ($J/m^3.K$) correspondant à des valeurs de la teneur en eau comprises entre 10 et 15 %. (El Azhary et col, 2017) ont obtenu une valeur moyenne de 2.055×10^6 ($J/m^3.K$) sur des échantillons de terre compactée (sol argileux) de forme cylindrique ($D=47.2$ mm² $\times H=29$ mm). D'une manière générale, une diminution de la capacité thermique volumique après un jour de séchage est observée pour tendre après vers une valeur asymptotique de l'ordre de $1.41 \times 10^6 J/m^3.K$ pour l'ensemble des échantillons étudiés.

L'analyse des variations de la masse volumique des échantillons a montré que le séchage induit une diminution qui reste inférieure à 10% entre le premier jour et 28 jours de séchage. Ainsi, les variations de la capacité thermique massique (valeur incorporant l'effet de la masse volumique, Chapitre III. Eq. III.18), semblent plus apparentes.

Une diminution respective de l'ordre de 7% , 9% et 5% pour les échantillons T-OPM, T-OPN et T-4MPa après $24h$ de séchage. Compte tenu des erreurs de mesure, il semble que les valeurs obtenues convergent vers des valeurs asymptotiques comprises entre 755 et 760 $J.kg^{-1}.K^{-1}$ pour les échantillons T-OPN et T-4MPa et de 712 $J.kg^{-1}.K^{-1}$ pour les échantillons T-OPM.

Par analogie à la conductivité thermique, nous avons représenté les variations de la diffusivité (D) en fonction de la teneur en eau (w_i) et le degré de saturation (S_{ri}) sur la figure IV.21.

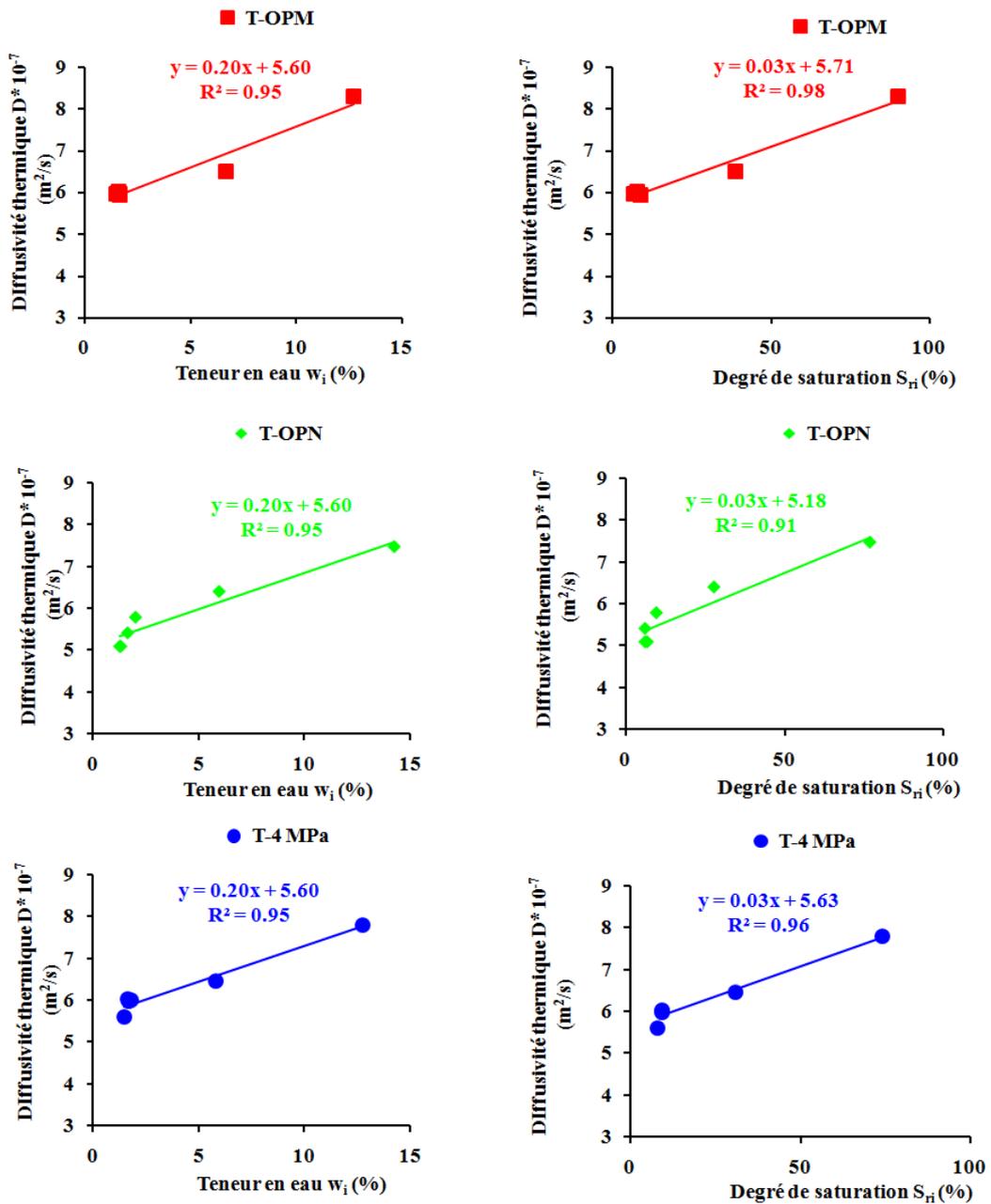


Figure IV. 22. Variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur en eau initiale et du degré de saturation initial.

Une diminution de la diffusivité thermique (D) est enregistrée avec la diminution de la teneur en eau (w_i), ou le degré de saturation (S_{ri}) ce qui est en accord avec les résultats de (Ezbakhe et col, 2001 ; Meukam, 2004 ; Tikhonravova, 2007 ; Taoukil et al ,2013 ; Soudani et col, 2017 ; Nshimiyimana et col, 2020).

De faibles valeurs de diffusivité thermique sont enregistrées pour les échantillons compactés à l'OPN, tandis que les plus fortes valeurs correspondent aux échantillons compactés à l'OPM. Immédiatement après compactage, la diffusivité thermique est égale à $8.30 \times 10^{-7} m^2/s$ (T-MPO), $7.48 \times 10^{-7} m^2/s$ (T-SPO), $7.80 \times 10^{-7} m^2/s$ (T-4MPa). Après 7 jour de

séchage, elle diminue de 27%, 16%, 20%, pour devenir $6.50 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (T-MPO), $6.40 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (T-SPO), $6.47 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (T-4MPa). On note, que durant ce temps de séchage, une réduction de la teneur en eau de l'ordre de 50%, 59% et 57% est observée respectivement pour les échantillons T-OPM, T-OPN, T-4MPa. Après sept jours, les valeurs de la diffusivité restent pratiquement constantes (6.01 à 5.96×10^{-7} et 5.80 à 5.10×10^{-7} et 5.98 à $5.60 \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$) respectivement pour les échantillons T-OPM, T-OPN, T-4MPa. L'intersection avec l'axe des ordonnées permet de définir la diffusivité thermique à sec et qui prend une valeur moyenne de $5.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Une valeur moyenne de la diffusivité thermique est de $3.45 \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$ a été obtenue par (El Azhary et al ,2017) sur un sol composé de 72% d'argile et 22% d'eau, compacté à une densité $2097 \text{ kg}/\text{m}^3$. (Soudani et col, 2017) ont obtenu une diffusivité thermique d'une terre compactée à 10% d'eau de l'ordre de $6,4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

3.3 L'effusivité thermique

L'effusivité thermique est un paramètre très important dans l'évaluation de la capacité d'un matériau à échanger la chaleur avec son environnement. La figure IV.22 illustre sa variation (E) en fonction de la teneur en eau (w) et du degré de saturation (Sr) respectivement pour T-OPM, T-OPN et T-4MPa.

Les valeurs de l'effusivité thermique des échantillons compactés et testés après compactage sont de 1570, 1489 et 1442 $\text{J m}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ s}^{-1/2}$. Après séchage à 28 jours, les valeurs mesurées sont 1066, 961, 1052 $\text{J m}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ s}^{-1/2}$ respectivement pour T-OPM, T-OPN et T-4MPa correspondant à une diminution de 47%, 54% et 36%.

Le remplacement des molécules d'eau dans les pores par l'air au cours de la période de séchage peut justifier la décroissance de l'effusivité (E) en fonction de la teneur en eau ou du degré de saturation. Cette diminution de (E) résulte du fait que la valeur de l'effusivité pour l'eau est environ 270 fois plus forte que celle de l'air à une température ambiante avec $E_{\text{air}} = 5,5 \text{ J m}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ s}^{-1/2}$ et $E_{\text{eau}} = 1580 \text{ J m}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ s}^{-1/2}$ (Pech-May et al. 2015, Bouguerra et col, 1998).

(Bouguerra et al. 1998) expliquent que l'augmentation de la quantité d'eau dans un matériau engendre une augmentation de la formation d'une fine pellicule d'eau dans les pores (les îlots liquides isolés). Ces îlots liquides isolés sont équivalents à des courts-circuits, formés par l'eau, et qui contribuent à l'augmentation de l'effusivité thermique du matériau. Par conséquent, le séchage des échantillons diminue le nombre de ces courts-circuits ce qui induit une diminution de l'effusivité thermique (E) des échantillons.

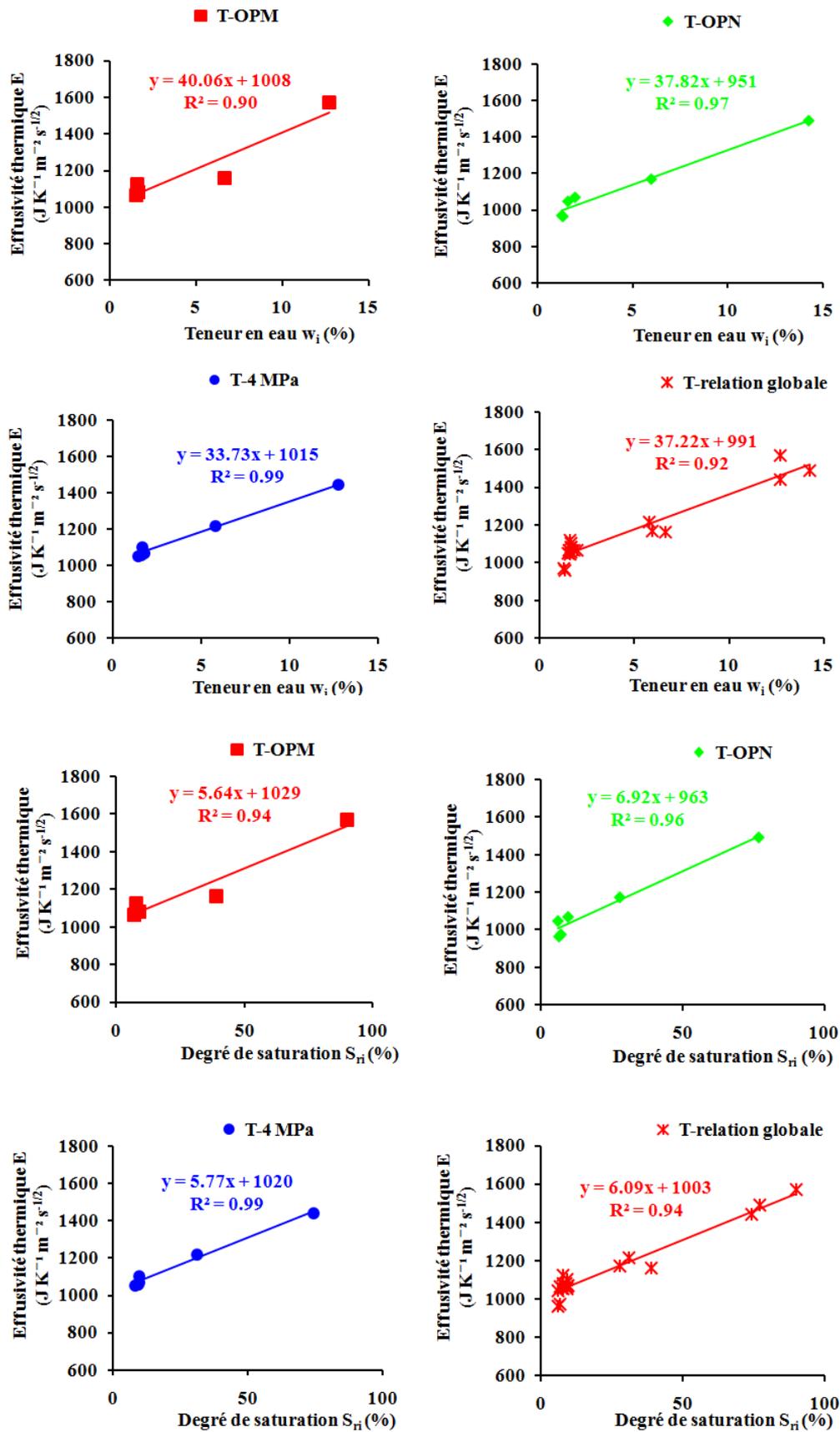


Figure IV. 23. Variation de l'effusivité thermique en fonction de la teneur en eau et du degré de saturation initial.

Des valeurs de l'ordre de 850 à 1450 ($J.m^{-2}.k^{-1}.s^{1/2}$) ont été enregistrées par (Aubert, 2013), en augmentant l'humidité relative de 0 à 3% sur des briques de terre. (Nshimiyimana et col, 2020) ont montré que l'augmentation de la teneur en eau de 10% (entre 0 à 10%) a doublé la valeur de l'effusivité thermique (1000 à $2000 J.m^{-2}.k^{-1}.s^{1/2}$). (Soudani et al. 2017) ont mesuré l'effusivité thermique de plusieurs matériaux de construction à savoir la terre humide ($1158 J.m^{-2}.k^{-1}.s^{1/2}$), la terre sèche ($820 J.m^{-2}.k^{-1}.s^{1/2}$). Nos valeurs obtenues semblent être équivalentes à celles obtenues par (Aubert, 2013) et (Soudani et col, 2017).

Des régressions linéaires ont été tracées, dont le coefficient R^2 reste supérieur à 0.90. Les relations globales obtenues sont données par équations suivantes :

$$[T\text{-Relation globale}] \quad E = 37.22w_i + 991 \quad R^2 = 0.92 \quad [IV-28]$$

$$[T\text{-Relation globale}] \quad E = 6.09S_{ri} + 1003 \quad R^2 = 0.94 \quad [IV-29]$$

4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation de l'ensemble des résultats des mesures hydriques et thermiques obtenus sur les échantillons du tuf de Béni-Saf non stabilisés compactés à différentes énergies :

En ce qui concerne la partie hydrique :

- La diminution de la teneur en eau ou du degré de saturation des échantillons diminue fortement le coefficient A_w .
- L'imposition de la succion a une influence aussi sur le coefficient A_w pour lequel une relation globale a été proposée.
- Les valeurs de A_w de l'ensemble des échantillons compactés varient de 0.020 et 0.576 $Kg. m^{-2}.s^{-1/2}$. Ces valeurs sont inférieures à 0,7 $Kg. m^{-2}.s^{-1/2}$ comme préconisé par (CSTB, 2018).
- Nos échantillons (compactés à l'OPM) présentent une très faible résistance à la vapeur d'eau. La valeur de la résistance à la diffusion de vapeur d'eau de la coupelle sèche est toujours supérieure à celle obtenue sur une coupelle humide. Les valeurs obtenues restent comparables à celles de la littérature et sont généralement proches des valeurs proposées dans la norme Allemande (DIN 18945).

Dans la partie thermique, nous avons constaté que :

- Des échantillons de terre de Béni-Saf compactés à T-OPN puis séchés jusqu'à 28 jours ont une faible conductivité thermique (tableau. IV. 10) par rapport à celle du pisé, la bauge et la terre cuite données par le (DTR.C 3-2-Algérie).
- Il est montré que la diffusivité (D) ainsi que l'effusivité thermique (E) du matériau diminuent lorsque la teneur en eau et le degré de saturation des échantillons diminuent (la plus faible valeur de diffusivité thermique a été obtenue après 28 jours de séchage ($6,4 \times 10^{-7} m^2/s$ pour les échantillons T-OPN).

Tableau. IV. 10. Récapitulation des résultats hydriques et thermiques.

Etats	Temps de séchage (jours)	A_w ($\text{kg.m}^{-2} .\text{s}^{-1/2}$)	λ ($\text{W/m}^*\text{k}$)	$D *10^{-7}$ (m/s)	$C *10^6$ ($\text{J/m}^3.\text{K}$)	E ($\text{J K}^{-1} .\text{m}^{-2} .\text{s}^{-1/2}$)
T-OPM	Immédiat	0.022	1.45	8.3	1.7	1570
	28	0.481	0.82	6	1.39	1067
T-OPN	Immédiat	0.02	1.29	7.5	1.72	1490
	28	0.58	0.67	5.1	1.38	962
T-4 MPa	Immédiat	0.03	1.3	7.8	1.6	1442
	28	0.524	0.79	5.6	1.4	1053

CHAPITRE V:
Comportement hygrothermique du
matériau stabilisé.

1 Introduction

La terre crue a été traitée depuis longtemps par différents types de stabilisants (ciment, chaux, fibres, etc...). Les études réalisées sur la capillarité de la terre crue ont montré la sensibilité du coefficient d'absorption à plusieurs paramètres à savoir la densité (Fabbri et col, 2019, Eliche-quesada and al, 2018), la teneur en eau initiale (Hall, 1989, Janz, 1997), la température (She and Sleep, 1998, Feng and Janssen, 2017, Karagiannis and al, 2016), le type de sol (Hall and Djerbib, 2003), l'âge (Veiga and al, 2004) et le type de stabilisant (Guetalla, 2006, Fragata and al, 2010). Cette stabilisation a pour but d'améliorer le comportement mécanique en premier lieu et en deuxième lieu le comportement hygrothermique.

Le but de ce chapitre est de faire une caractérisation du comportement hydrique et thermique du tuf de Béni-Saf compacté et stabilisé à 4% de chaux vive. Ce choix de 4% de chaux a été basé sur le travail de (Sebaa et col, 2021) qui porte sur le comportement mécanique du tuf de Béni-Saf. Les résultats obtenues par l'auteur ont montré que ce pourcentage représente un optimum du point de vue résistance mécanique, qu'au delà le gain en résistance mécanique devient très faible.

Des essais hydriques à savoir l'absorption capillaire, la conductivité hydraulique saturée, la détermination de la courbe de rétention et le front capillaire du tuf stabilisé ont été réalisés. Aussi, la caractérisation du comportement thermique (conductivité thermique λ , capacité thermique C, diffusivité thermique D, effusivité thermique E) sera présentée. Une attention particulière a été accordée à l'effet de la stabilisation à la chaux ainsi qu'à la variation de la teneur en eau et du degré de saturation à chaque état initial et à différents temps de séchage. Chaque partie comporte en plus une comparaison entre les résultats du matériau stabilisé à la chaux vive et ceux du matériau brut à différents états (OPM, OPN et 4MPa).

2 Paramètres de compactage du tuf de Béni-Saf stabilisé à 4% de chaux

Les résultats du compactage dynamique ; Proctor normal (TC-OPN) et modifié (TC-OPM) ainsi que du compactage statique à une force imposée de 4MPa (TC-4 MPa), du tuf de Béni-Saf stabilisé à 4% chaux sont représentés dans le tableau V.1. La composition physico-chimique de la chaux vive de région de Saida (Hassansa) est donnée dans le tableau V.2. Une diminution de la densité sèche par rapport aux échantillons non stabilisés a été observée de 5.5 %, 4.3% et 5% après l'ajout de la chaux respectivement pour TC-OPM, TC-OPN et TC-4 MPa. De même pour la teneur en eau où une diminution de 2.2 % et 1% pour TC-OPM, TC-OPN est observée. La teneur en eau de compactage des échantillons stabilisés et non stabilisés compactés à 4 MPa demeure globalement sans changement.

Cette diminution est généralement engendrée par le phénomène floculation agglomération suite à des échanges cationiques (George et col, 1992 ; Consoli et col, 2009; Garzón et al ,2016). Ce phénomène physico-chimique est principalement dû à la libération des ions de calcium après l'incorporation de la chaux ce qui engendre une réduction de la charge nette négative des particules argileuses (Le Runigo, 2008). Le phénomène d'agglomération-floculation provoque ainsi une augmentation de la porosité (Consoli et col,

2009, George et col, 1992). Comme suggéré par (Tran et col, 2014), les cations de calcium (Ca^{2+}) migrent de la chaux hydratée vers la surface des minéraux argileux provoquant le déplacement de l'eau et d'autres ions. Par conséquent, les particules ont tendance à s'agglomérer, et le sol devient friable et granuleux conduisant ainsi à une porosité plus élevée.

Tableau. V. 1. Caractéristiques du compactage du tuf de Béni-Saf non stabilisé et stabilisé à 4% chaux.

Etat	Tuf			Tuf +4% Chaux		
	T-OPM	T-OPN	T-4MPa	TC-OPM	TC-OPN	TC-4MPa
Densité sèche γ_d (g/cm ³)	1.98	1.79	1.8	1.88	1.72	1.74
Teneur en eau (%)	12.7	15	13.5	10.5	14	13.5
Degré de saturation (%)	92	78	75	64	66	67

Tableau. V. 2. Analyse physico-chimique de la chaux vive utilisée dans cette étude issue de la région de Hassasna à Saida (Izemmouren, 2016).

Propriétés Physiques	Composition chimique	Valeurs (%)
Masse volumique apparente 1.5 g/cm ³	CaO	> 82,77
	MgO	< 1,88
	Fe ₂ O ₃	< 3,27
	Al ₂ O ₃	< 10,63
Surface spécifique 3000 cm ² /kg	SiO ₂	< 1,35
	SO ₃	< 0,11
	Na ₂ O	< 0,06
	K ₂ O	< 0,15

Les échantillons stabilisés à 4%chaux et compactées à l'OPM (TC-OPM), à l'OPN (TC-OPN) et à 4MPa (TC-4MPa) sont testés immédiatement après compactage puis à différents temps de séchage 1, 3, 7, 14, 21 et 28 jours. Les conditions initiales des échantillons compactés des trois états à savoir la succion, la teneur en eau et le degré de saturation sont représentées dans le tableau V.3.

Tableau. V. 3. Les caractéristiques initiales des échantillons stabilisés à la chaux (série 3).

Energies	Temps de séchage (jours)	ψ_i (kPa)	w_i (%)	S_{ri} (%)
TC-OPM	Immédiat	5.30E+02	10.2	64
	1	1.25E+03	5.7	33
	3	2.08E+04	2.6	14
	7	2.98E+04	1.7	10
	14	1.02E+04	1.6	9
	21	4.39E+04	1.6	9
	28	3.64E+04	1.5	9
TC-OPN	Immédiat	2.40E+02	14.3	64
	1	1.09E+03	6	28
	3	3.28E+04	1.7	8
	7	1.02E+05	2	9
	14	8.05E+04	1.6	7
	21	7.16E+04	1.3	6
	28	7.24E+04	1.3	6
TC-4MPa	Immédiat	3.40E+02	13.5	70
	1	1.00E+03	4	23
	3	3.60E+03	3.6	16
	7	1.96E+04	1.5	7
	14	5.62E+04	1.8	8
	21	8.83E+04	1.8	8
	28	1.07E+05	1.8	8

Les variations de densité sèche en fonction des périodes de séchage du tuf brut et stabilisé pour différentes énergies de compactage (OPM, OPN et 4MPa) sont représentées sur la figure V.1.

Comme on peut le constater, le temps de séchage entraîne une variation limitée de la densité sèche comme dans le cas des échantillons bruts. Ces variations sont inférieures à 2%. De plus, on peut noter qu'environ 60% de ces variations se produisent au cours du premier jour de séchage. Ce comportement est lié à la nature du matériau étudié (sable argileux de faible plasticité) au mode de préparation (compactage statique à densité sèche maximale) et les caractéristiques de compactage (w et Ψ) par rapport aux caractéristiques de retrait (w_{SL} et Ψ_{SL} , (voir §2.2)). Pour cette raison, les résultats et les discussions seront principalement axés sur les effets de la teneur en eau et du degré de saturation sur le comportement hygrothermique.

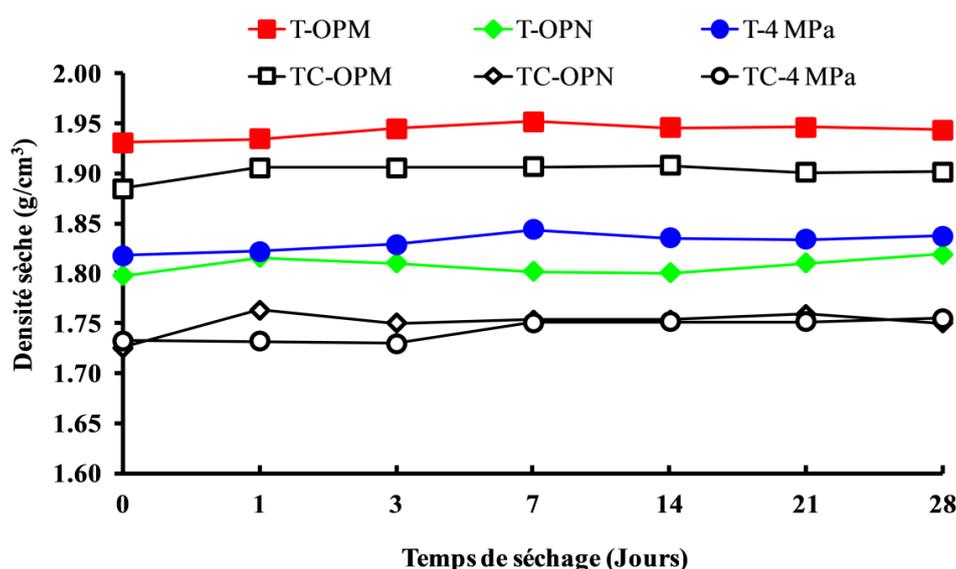


Figure. V. 1. Evolution de la densité sèche en fonction du temps de séchage pour l'ensemble des échantillons bruts et stabilisés.

3 Comportement hydrique des échantillons stabilisés

Dans cette partie nous allons présenter les résultats du comportement hydrique du tuf de Béni Saf stabilisé à 4% de chaux à savoir : le coefficient d'absorption capillaire A_w , la courbe de rétention, la conductivité hydraulique saturée K_{sat} et non saturée K_u .

3.1 Absorption d'eau

Les essais d'absorption d'eau ont été effectués selon la norme (XP P13-901) sur des échantillons stabilisés à différents états initiaux en utilisant le même protocole expérimental présenté dans le chapitre III (figure III. 15).

3.1.1 Détermination du coefficient d'absorption A_w

Le coefficient d'absorption A_w est déterminé suivant les pentes des droites entre la quantité d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure V.2. Les états initiaux utilisés dans ces essais sont représentés dans le tableau V.3 (T-OPM, T-OPN, T-4MPa).

Des échantillons étuvés à 105°C ont été rajoutés pour être testés dans cette partie. Dans la même figure, une tendance linéaire entre la quantité d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps est enregistrée avec un coefficient de régression est supérieur à 0.97.

Pour le cas des échantillons étuvés à 105°C, la stabilisation de la quantité d'eau absorbée après environ une heure d'essai nous a obligé à calculer le coefficient suivant la méthode des « deux tangentes » évoquée dans l'article de (Feng et col, 2018). Cette méthode consiste à déterminer le point d'intersection (x_{inter}, y_{inter}) entre la première droite (1) qui représente une absorption très rapide et la deuxième (2) indiquant une stabilisation de l'absorption d'eau (figure V.2). Ensuite, en utilisant l'équation (V.1), on peut estimer le coefficient d'absorption capillaire.

Les valeurs de A_w des échantillons stabilisés et étuvés à 105°C sont représentées dans le tableau V.4. Les plus grandes valeurs du coefficient A_w sont enregistrés pour les échantillons T-OPN (0.882 kg. m⁻².S^{-1/2}) et T-4MPa (0.885kg. m⁻².S^{-1/2}).

$$A_w = \frac{y_{inter}}{x_{inter}} \quad [\text{Eq. V.1}]$$

x_{inter} et y_{inter} : les coordonnées du point d'intersection entre la droite de régression et deux droites qui représentent la projection par rapport l'axe des ordonnées et des abscisses.

Tableau. V. 4. Les valeurs du coefficient d'absorption par capillarité A_w des échantillons stabilisés et étuvés à 105°C.

Echantillons étuvés à 105°C	$A_w(\text{kg. m}^{-2}.\text{S}^{-1/2})$
T-OPM	0.785
TC-OPN	0.882
TC-4MPa	0.885

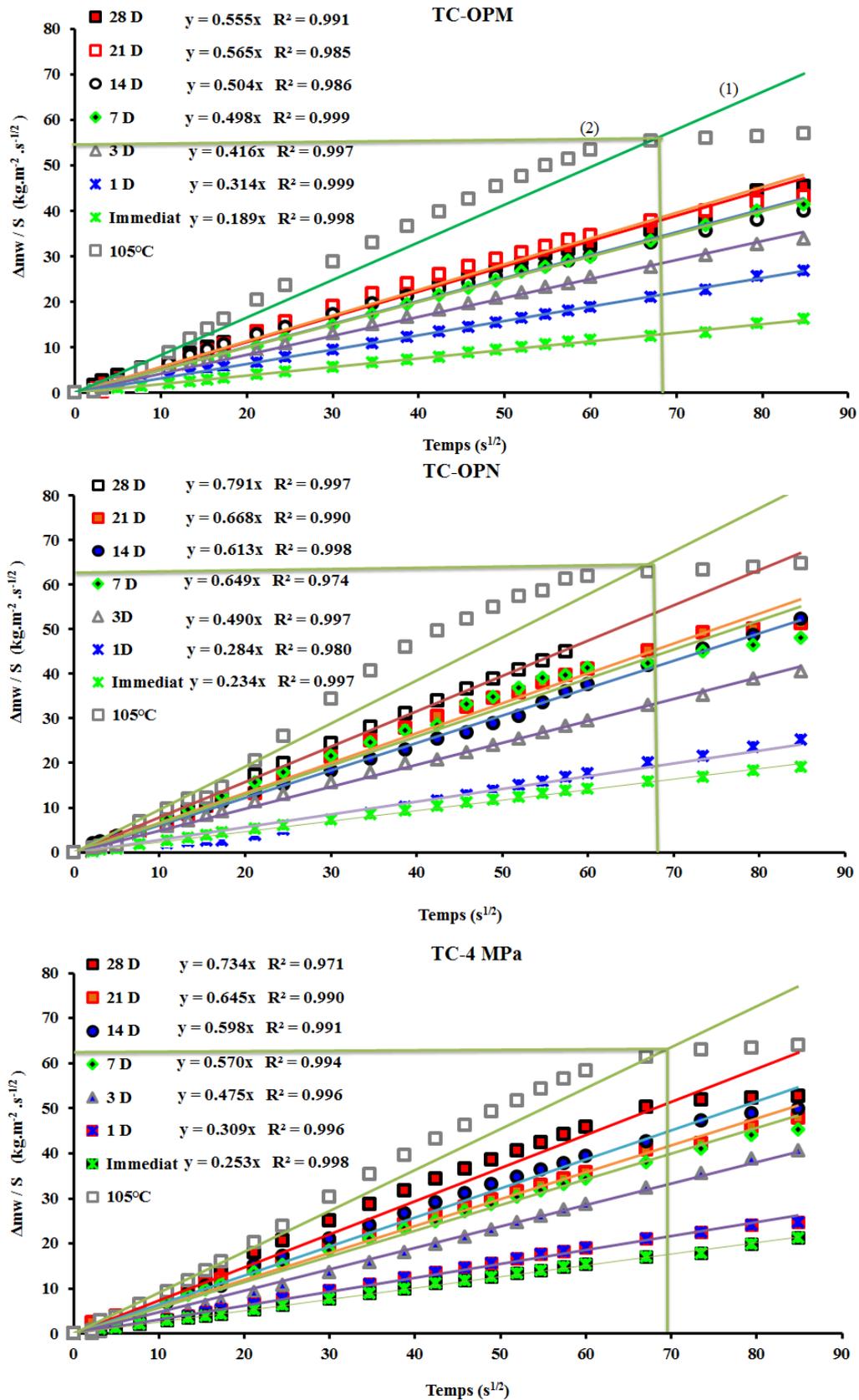


Figure. V. 2. Coefficient d'absorption capillaire paramétré en temps de séchage pour les échantillons TC-OPM, TC-OPN, TC-4MPa.

3.1.2 Effet de la chaux et du séchage sur la variation du coefficient A_w

La figure V.3 représente la variation du coefficient A_w des deux séries des échantillons stabilisés (TC) et non stabilisés (T) en fonction du temps de séchage. Les résultats montrent que ce coefficient croît avec l'augmentation du temps de séchage et l'ajout de 4% de chaux.

Dans le cas des échantillons stabilisés et compactés à TC-OPN et TC-4MPa, une augmentation du coefficient A_w de l'ordre de 90 et 95% par rapport à l'état immédiat est observée après un étuvage des échantillons à 105°C. Pour le temps de séchage entre 7 et 28 jours, les échantillons TC-OPN et TC-4 MPa ont un coefficient A_w qui varie entre 0.58 et 0.70 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$). Durant cette période du séchage, le coefficient A_w du matériau stabilisé TC-OPM varie de 0.49 à 0.55 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$). Elles correspondent à de faibles valeurs de la teneur en eau (de l'ordre de 1,50%) et un degré de saturation de l'ordre de 8%.

Par contre, pour les échantillons non stabilisés, la plus grande valeur de A_w ne dépassent pas 0.58 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$) pour le cas des échantillons (T-OPN). Ces chiffres montrent la grande influence de l'ajout de la chaux sur le coefficient d'absorption d'eau capillaire A_w . Ceci est en accord avec les résultats de (Ngowi, 1997, Kerroum et al. 2018). En fait, l'incorporation de la chaux entraîne la création d'une porosité plus élevée (Kerroum et al. 2018). L'auteur a observé que par rapport à l'ensemble des échantillons testés, l'absorption d'eau par capillarité reste la plus grande pour les échantillons stabilisés à la chaux ($A_w = 0.296 \text{ g/cm}^2/\text{mn}$). Une autre étude de (Maurenbrecher, 2004) confirme que les mélanges à forte teneur en chaux (2 à 3 fois plus de chaux que de ciment en volume) sont plus poreux.

Entre les échantillons testés immédiatement et étuvés à 105°C, on note une augmentation du coefficient A_w de l'ordre de 95%(TC-OPM), 97% (TC-OPN) et 95%(TC-4MPa) pour les échantillons stabilisés. Ce taux était plus faible pour les échantillons non stabilisés (74%(T-OPM), 78%(T-OPN) et 79%(T-4MPa)). Aussi, il est important de montrer que l'ordre des courbes reste identique à celui du matériau non stabilisé (c-a-d : $A_{w\text{OPN}} > A_{w4\text{MPa}} > A_{w\text{OPM}}$). Cet ordre a été expliqué précédemment dans le chapitre V. §2.1.2.

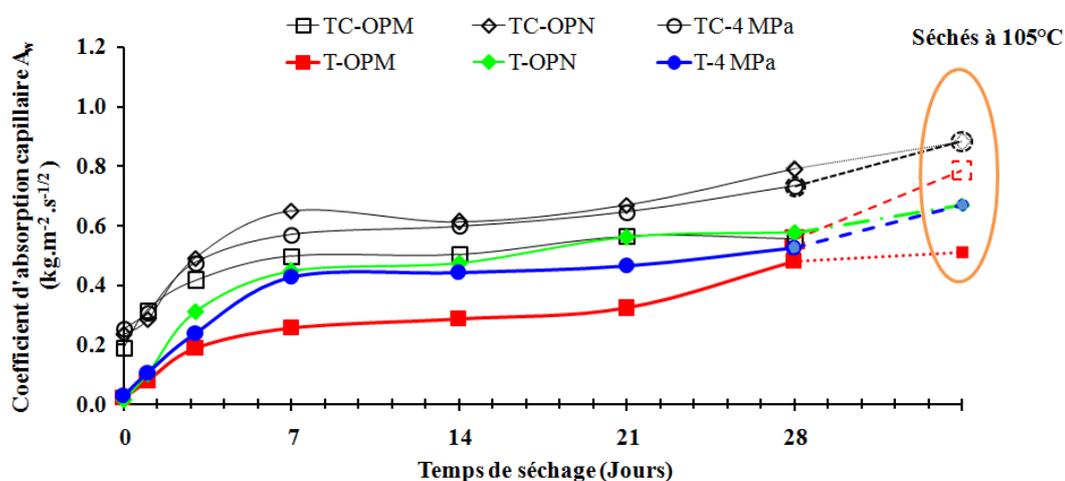


Figure. V. 3. Evolution du coefficient A_w en fonction du temps de séchage pour les échantillons stabilisés et non stabilisés.

3.1.3 Effet de la succion initiale sur le coefficient d'absorption d'eau A_w

Les mesures de la succion à chaque temps de séchage ont été effectuées par la méthode du papier filtre (ASTM, D. 5298-03). Les valeurs obtenues sont données dans le tableau V.3.

La figure V.4 représente l'effet de la succion initiale (ψ_i) sur le coefficient d'absorption d'eau A_w . La succion induite par le séchage à différents âges a une grande influence sur A_w . Une augmentation de ce dernier a été observée avec la croissance de la succion pour tous les échantillons stabilisés. L'effet de la chaux se traduit par une augmentation du coefficient A_w de sorte que les courbes du matériau stabilisé restent au-dessus de celles du matériau brut. Cette différence de succion induite par la stabilisation peut être attribuée à la réaction pouzzolanique des échantillons stabilisés à la chaux qui entraîne une modification de la microstructure du sol (Wang et col, 2016) et l'apparition du silicate de calcium hydraté (C-S-H) et l'aluminate de calcium hydraté (C-A-H) (Bell, 1996). En plus, la chaux réagit avec le CO_2 de l'air pour former des carbonates de calcium et de magnésium qui sont des agents de cimentation relativement faibles (George et col, 1992).

Une représentation dans un plan semi-logarithmique permet de proposer une relation globale indépendante de l'état initial de type puissance entre la succion initiale et le coefficient A_w à travers les équations V.2. Les coefficients de corrélation de l'ensemble des séries (TC) sont supérieurs à 0.90.

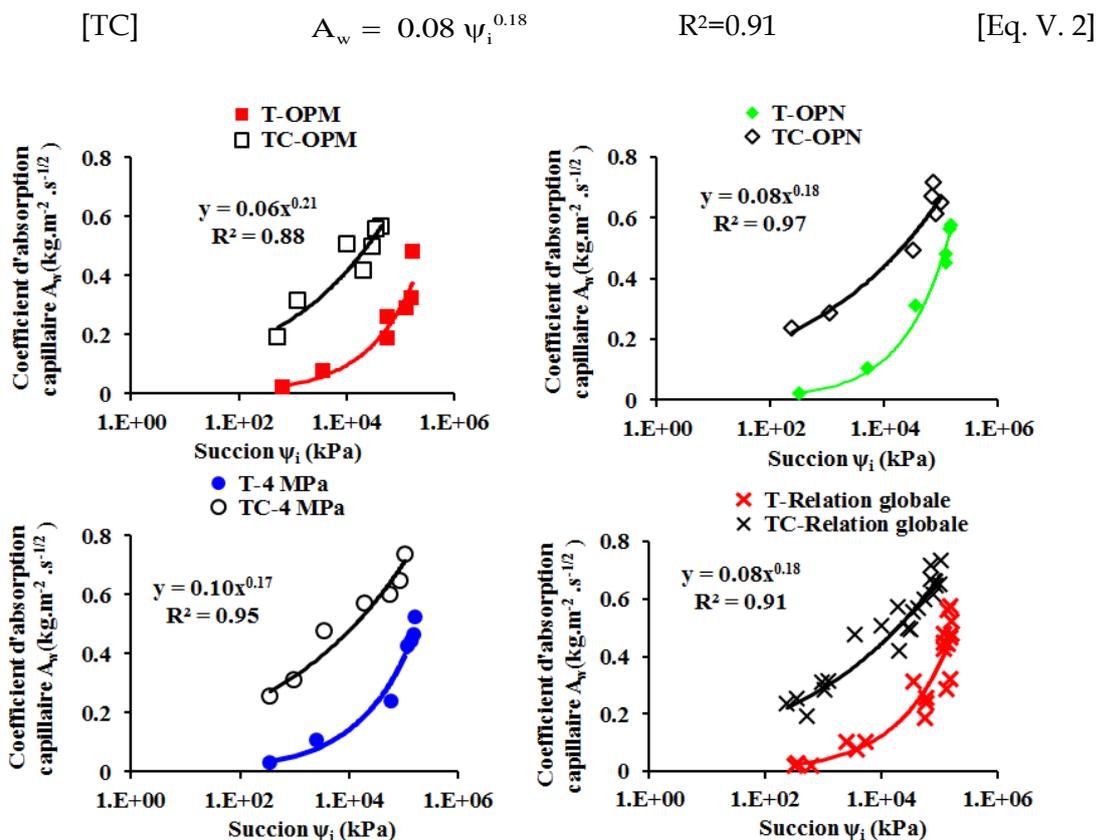


Figure. V. 4. Evolution du coefficient d'absorption en fonction de la succion initiale pour les échantillons stabilisés et non stabilisés.

3.1.4 Effet de la teneur en eau et du degré de saturation sur A_w

Sur les figures V.5 et V.6, on présente l'évolution du coefficient A_w en fonction de la teneur en eau (w_i) et du degré de saturation (S_{ri}) initiaux.

On peut constater que la valeur de A_w est très influencée par les variations de w_i . Une diminution de la teneur en eau de 87%,90% et 94% permet d'avoir une augmentation de A_w de l'ordre de 95%,96% et 94% respectivement pour les échantillons TC-OPM, TC-OPN, TC-4MPa.

D'une manière générale, les courbes obtenues du matériau stabilisé se situent au-dessus des courbes des échantillons en terre crue. Les faibles valeurs de A_w des échantillons non stabilisés ($0.014 \text{ kg.m}^{-2}.\text{S}^{-1/2}$) correspondent à un degré de saturation dépassant 70%, par contre pour les échantillons stabilisés, les plus faibles valeurs de A_w restent autour de ($0.18 \text{ kg.m}^{-2}.\text{S}^{-1/2}$) et correspondent à un degré de saturation supérieur à 60%. Pour le matériau stabilisé (TC), une relation globale est proposée et peut-être définie comme suit :

[TC] $A_w = 0.73 w_i^{-0.47}$ $R^2=0.88$ [Eq. V. 3]

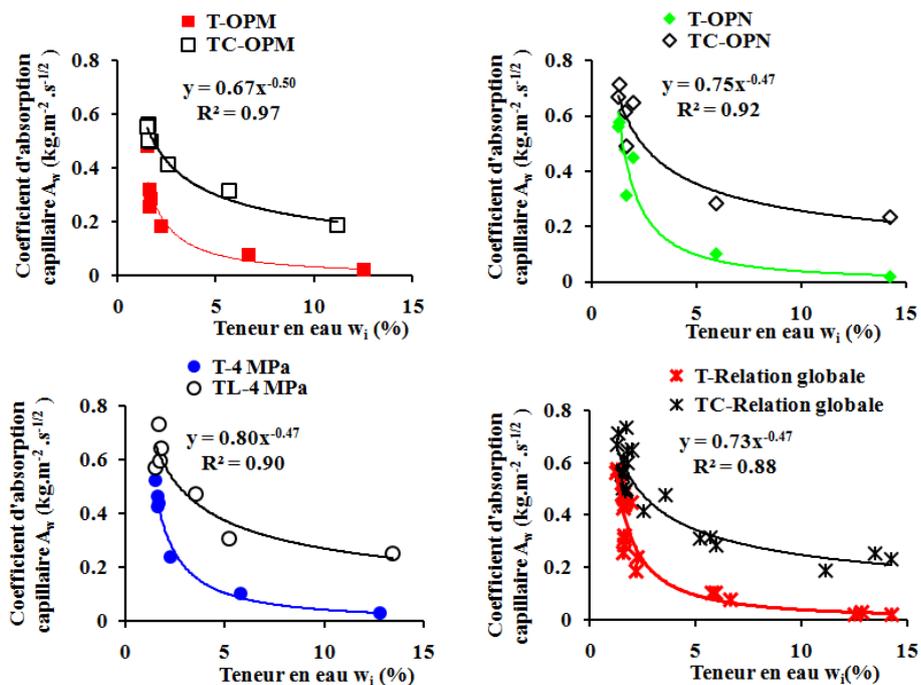


Figure. V. 5. Relation teneur en eau en fonction du coefficient d'absorption A_w pour les échantillons stabilisés et non stabilisés.

Une augmentation de A_w de l'ordre de 95%,96% et 94% est associée à une diminution du degré de saturation de l'ordre de 74%,70% et 65% respectivement pour les échantillons TC-OPM, TC-OPN, TC-4MPa. Concernant la variation de A_w et S_{ri} , une relation globale est donnée par l'équation (Eq.V. 4) du matériau brut (T) et stabilisé (TC) :

[TC] $A_w = 1.59 S_{ri}^{-0.48}$ $R^2=0.92$ [Eq. V. 4]

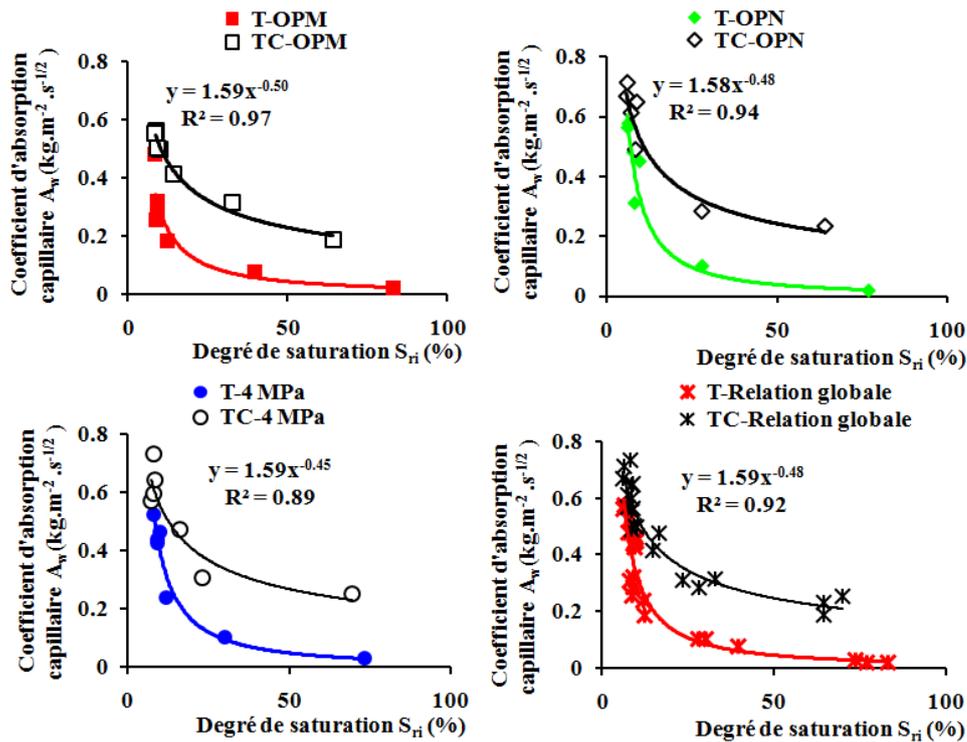


Figure. V. 6. Relation entre le degré de saturation et le coefficient d'absorption A_w pour les échantillons stabilisés et non stabilisés.

3.2 Courbes de rétention des échantillons stabilisés

Il a été impossible de tracer l'évolution des paramètres d'état (e , S_r) sur chemin de séchage- humidification suite à la détérioration des échantillons au cours de leur immersion dans le Kerdane. Ainsi, dans ce qui suit, on se contente de la représentation des résultats des courbes de rétention (variations de la teneur en eau en fonction de la succion).

Les paramètres initiaux des échantillons stabilisés sont donnés dans le tableau V.5. La succion a été mesurée par la méthode du papier filtre (ASTM, D. 5298-03) pour l'ensemble des échantillons.

Tableau. V. 5. Les caractéristiques initiales des échantillons compactés et stabilisés.

Conditions initiales	Succion mesurée (kPa)	w_i (%)	γ_d (g/cm ³)	e_i	S_{ri} (%)
TC-OPM	530	10.5	1.88	0.46	64
TC-OPN	240	14	1.72	0.59	66
TC-4MPa	340	13.5	1.74	0.57	67

Les figures V.7 (A, B, C) représentent les courbes de rétention (ou courbes caractéristiques SWCC) de l'ensemble des états initiaux des échantillons. Les points des

succions initiales sont bien positionnés par rapport à l'ensemble des points expérimentaux des courbes de rétention.

On distingue trois phases dans ces courbes, comme il est montré dans le tableau V.6 :

- Une première phase avec un palier horizontal représente le sol quasi saturé dans le domaine $\psi \leq \psi_e$ où la variation de la teneur en eau volumique θ est très faible, est de 0.07%, 2.3% et 1.24 respectivement pour T-OPM, T-OPN, T-4MPa.
- La deuxième phase ($\psi_e \leq \psi \leq \psi_{SL}$) met en évidence la désaturation du sol qui est traduite par une variation très rapide de la teneur en eau volumique, de l'ordre de 21% pour T-OPM, de 30% pour T-OPN, de 20% pour T-4MPa.
- La dernière phase ($\psi \geq \psi_{SL}$) où la succion est inférieure à la succion de retrait. La variation de la teneur en eau volumique est de 7.5%, 9.5% et 6% correspondant respectivement à T-OPM, T-OPN et T-4MPa. Les valeurs de la teneur en eau volumique deviennent presque négligeables ($\theta_r < 0.003$).

Tableau. V. 6. La variation de la teneur en eau volumique pour chaque domaine de succion.

Etats	$\Delta\theta$ (%)		
	TC-OPM	TC-OPN	TC-4MPa
$\psi \leq \psi_e$	0.07	2.3	1.24
$\psi_e \leq \psi \leq \psi_{SL}$	21	30	20
$\psi \geq \psi_{SL}$	7.5	9.5	6

Un ajustement des points expérimentaux par l'équation de [Van Genuchten, 1980](#) a permis de déterminer pour chaque état initial les paramètres de l'équation. Le tableau V.7 récapitule l'ensemble des paramètres d'ajustement des courbes caractéristiques sol-eau (SWCC). Les valeurs du coefficient de régression obtenues sont généralement de l'ordre de 0.98.

Tableau. V. 7. Paramètres d'ajustement de l'équation de ([Van Genuchten, 1980](#))(VG).

Paramètres	TC-OPM	TC-OPN	TC-4MPa
K_{sat} (m/s)	2.00E-08	2.20E-08	4.00E-08
θ_s	0.3	0.357	0.302
θ_r	0.002	0.002	0.003
n	1.137	1.211	1.138
a	0.0004	0.0006	0.0007
m	1.2	0.85	0.8
l	0.5	0.5	0.5
R ²	0.98	0.98	0.98
K_u (m/s)	1.56E-08	1.11E-8	2.53E-08

Les courbes teneur en eau-succion des échantillons stabilisés à 4 % de chaux se trouvent légèrement en-dessous de celles des échantillons non stabilisés dans la phase $\psi \leq \psi_e$, où pour une succion de 1kPa, la teneur en eau volumétrique θ a diminué de 0.39 à 0.3 pour T-OPM, de 0.5 à 0.35 pour T-OPN et de 0.52 à 0.34 pour T-4MPa). Conformément à ce qui est généralement admis dans la littérature, l'ajout de chaux entraîne généralement une diminution la teneur en eau la courbe SWCC et ceci pour la même succion. On peut citer à titre d'exemple les résultats de (Cuisinier et col, 2010). Cette réduction est importante pour le cas des échantillons compactés à 4MPa et plus faible pour les échantillons compactés à l'OPM. Cependant, on peut aussi constater qu'il existe une similitude des deux courbes dans le domaine ($\psi_e \leq \psi \leq \psi_{sL}$).

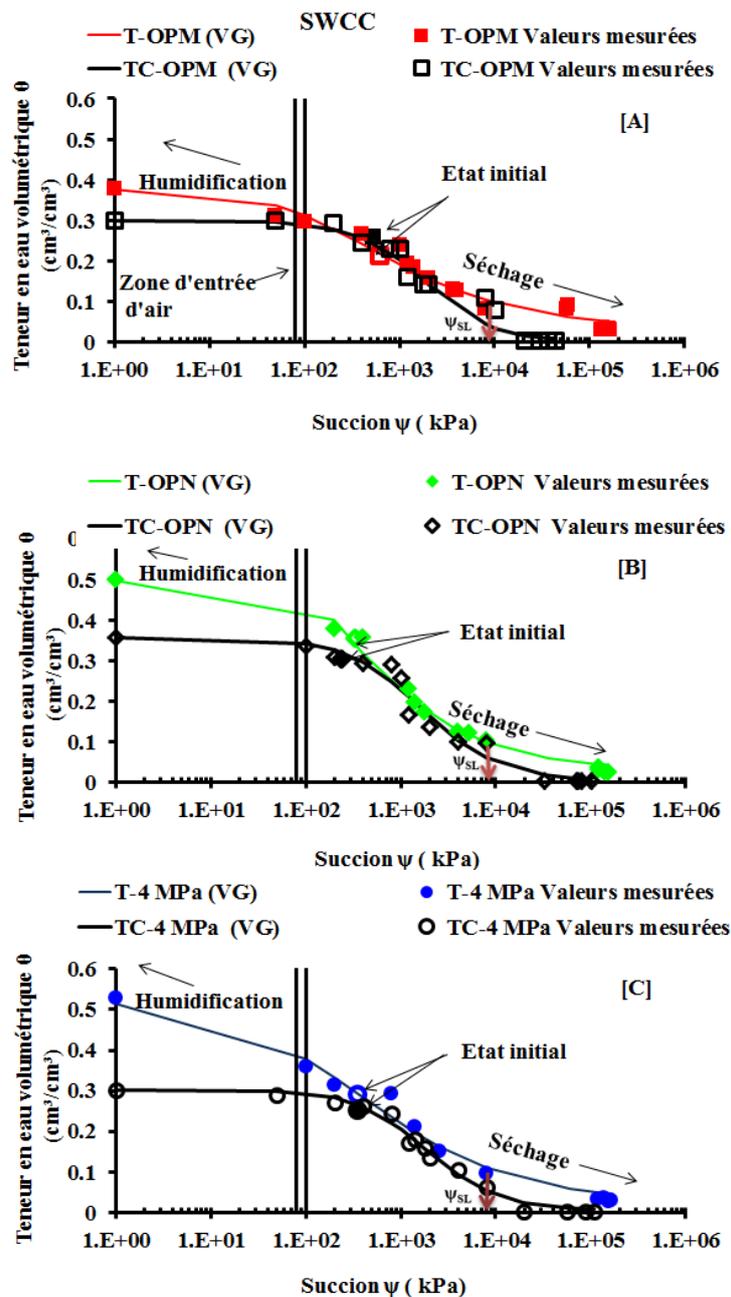


Figure. V. 7. Les courbes caractéristiques des échantillons stabilisés et non stabilisés.

3.3 Conductivité hydraulique saturée

À l'aide de l'appareil triaxial, nous avons pu déterminer la conductivité hydraulique en saturant l'échantillon puis en imposant un flux entrant et sortant. La conductivité hydraulique saturée K_{sat} a été obtenue à partir des équations (Eq.III.9 et 10) de (Darcy, 1856).

La figure V.8 montre l'effet du temps de séchage et de la stabilisation à la chaux sur la conductivité hydraulique à l'état saturé pour les trois états initiaux considérées. Une diminution de la conductivité hydraulique saturée a été observée entre les échantillons testés immédiatement après compactage et après 28 jours de séchage. Cette différence s'élève à 21% pour T-OPM, 34% pour T-OPN et à 10% pour T-4MPa. Après un temps de séchage de 7 jours, les valeurs de la conductivité hydraulique des échantillons stabilisés varient de $5 \cdot 10^{-9}$ m/s à $4.4 \cdot 10^{-9}$ m/s pour T-OPM, de $7 \cdot 10^{-9}$ m/s à $7.6 \cdot 10^{-9}$ m/s pour T-OPN et de $5 \cdot 10^{-9}$ m/s à $4.5 \cdot 10^{-9}$ m/s pour T-4MPa. Pour ce temps de séchage, les valeurs obtenues de K_{sat} sont inférieures à celles du matériau non stabilisé. Après, cette différence devient non significative (un rapport est de l'ordre de 10). Les résultats de la littérature ne sont pas unanimes concernant l'effet de la chaux sur la conductivité hydraulique saturée.

Les résultats de (Nalbantoglu etTuncer, 2001) ont montré une augmentation de la conductivité hydraulique saturée après l'ajout de la chaux. (Brandl, 1981) a constaté une diminution la conductivité hydraulique des sols traités à la chaux avec le temps de séchage. De sa part, (Tran et col, 2014) ont trouvé une conductivité hydraulique des échantillons traités à la chaux supérieure à celle des échantillons non traitée d'un ordre de grandeur (un rapport de 10). (Djelloul, 2018) a constaté que la conductivité hydraulique des échantillons d'argile traités à la chaux à différents temps de cure diminue avec le temps de cure (de 1heure à 180 jours). Ainsi une superposition des courbes des échantillons non traités et traités à 4% de chaux a été représentée. L'auteur a expliqué que la diminution de la conductivité hydraulique des échantillons traités est due essentiellement à l'influence du temps de cure.

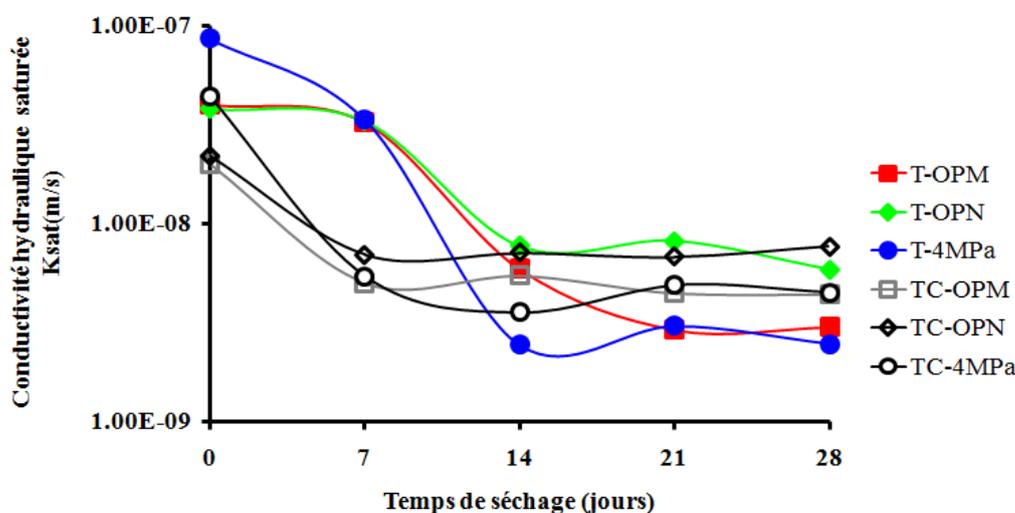


Figure. V. 8. Évolution de K_{sat} en fonction du temps de séchage.

3.4 La conductivité hydraulique non saturée K_u

Nous avons déduit la conductivité hydraulique non saturée de chaque point de mesure de la succion à partir de l'équation (VanGenuchten, 1980) (Chap III. Eq.III.11 et 12). Les résultats de cette conductivité sont présentés dans la figure V.9 pour les trois états non stabilisés T-OPM, T-OPN et T-4 MPa avec les états traités à la chaux TC-OPM, TC-OPN et TC-4 MPa. Les courbes de la conductivité non saturée des échantillons non stabilisés se trouvent en dessous de celles des échantillons stabilisés. L'augmentation de la conductivité hydraulique des échantillons stabilisés est liée au phénomène de floculation agglomération lors de l'ajout de la chaux. On peut aussi remarquer l'effet de la succion sur la conductivité non saturée des échantillons stabilisés. Ainsi, une augmentation de la succion diminue la conductivité hydraulique non saturée ce qui est en concordance avec (Lachgueur, 2007). En fait, le transfert d'eau à des succions très élevée le phénomène de transport liquide est pratiquement inexistant et se fait essentiellement par vapeur. Les valeurs de K_u à des états initiaux du matériau stabilisé restent autour de 10^{-8} m/s et les valeurs pour le matériau brut sont de l'ordre de 10^{-9} à 10^{-10} m/s. Donc le séchage est prépondérant dans le mécanisme de conductivité hydraulique saturée et non saturée en comparaison avec la quantité de chaux incorporée.

En ce qui concerne l'effet de la chaux, on observe une augmentation de K_u du matériau stabilisé par rapport à K_u du matériau brut. Ceci est attribué à la porosité ouverte des échantillons stabilisés (Consoli et col, 2009, George et col, 1992). Des essais de porosimétrie au mercure sont préconisés pour bien comprendre la distribution porale avant et après la stabilisation et pour déduire des explications concrètes concernant la variation de la conductivité hydraulique non saturée.

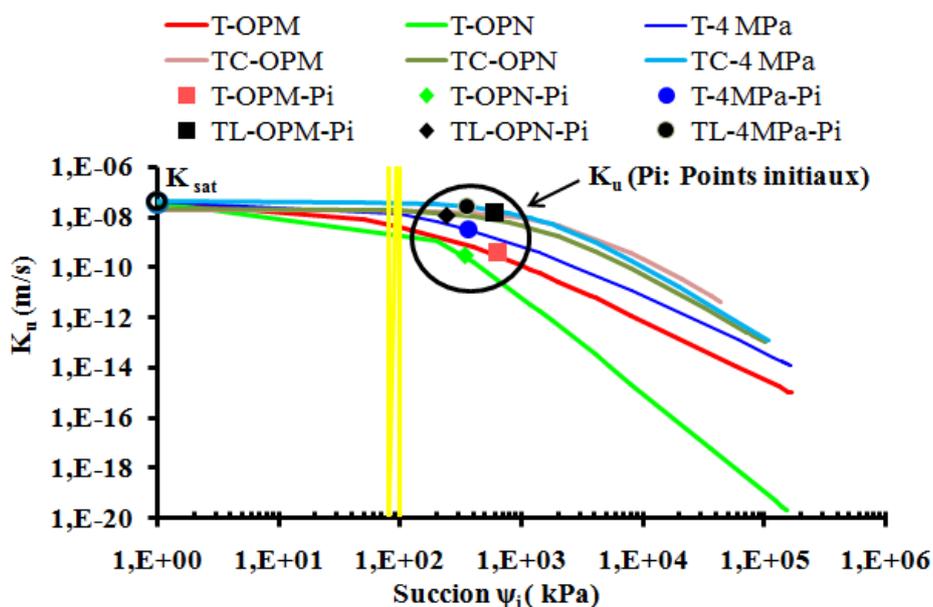


Figure. V. 9. Variations de la conductivité hydraulique non saturée en fonction de la succion des échantillons stabilisés et non stabilisés.

3.5 Relation entre le coefficient d'absorption et la conductivité hydraulique non saturée

Nous avons essayé de relier les valeurs de la conductivité hydraulique non saturée aux valeurs des coefficients d'absorption d'eau, correspondant à chaque état. Les résultats obtenus sont donnés dans la figure V.12. Des corrélations ont été obtenues de forme puissance (Eq. V.13 à V.15) traduisant l'augmentation du coefficient d'absorption d'eau A_w avec la diminution de la conductivité hydraulique non saturée K_u . La comparaison avec le matériau brut montre clairement que les valeurs de K_u des échantillons stabilisés varient entre 10^{-8} et 10^{-13} m/s ce qui correspond à une augmentation de A_w jusqu'à $0.8 \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-1/2}$. Par contre, pour les courbes du matériau brut, les valeurs de K_u dépassent 10^{-14} m/s mais les valeurs de A_w ne dépassent pas $0.6 \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-1/2}$. Les relations (Eq.V.5 à V.7) entre la conductivité hydraulique non saturée et le coefficient A_w sont comme suit :

[TC-OPM]	$K_u = 1E - 13A_w^{-7.56}$	$R^2=0.88$	[Eq. V. 5]
[TC-OPN]	$K_u = 3E - 15A_w^{-10.6}$	$R^2=0.98$	[Eq. V. 6]
[TC-4MPa]	$K_u = 5E - 15A_w^{-12.2}$	$R^2=0.88$	[Eq. V. 7]

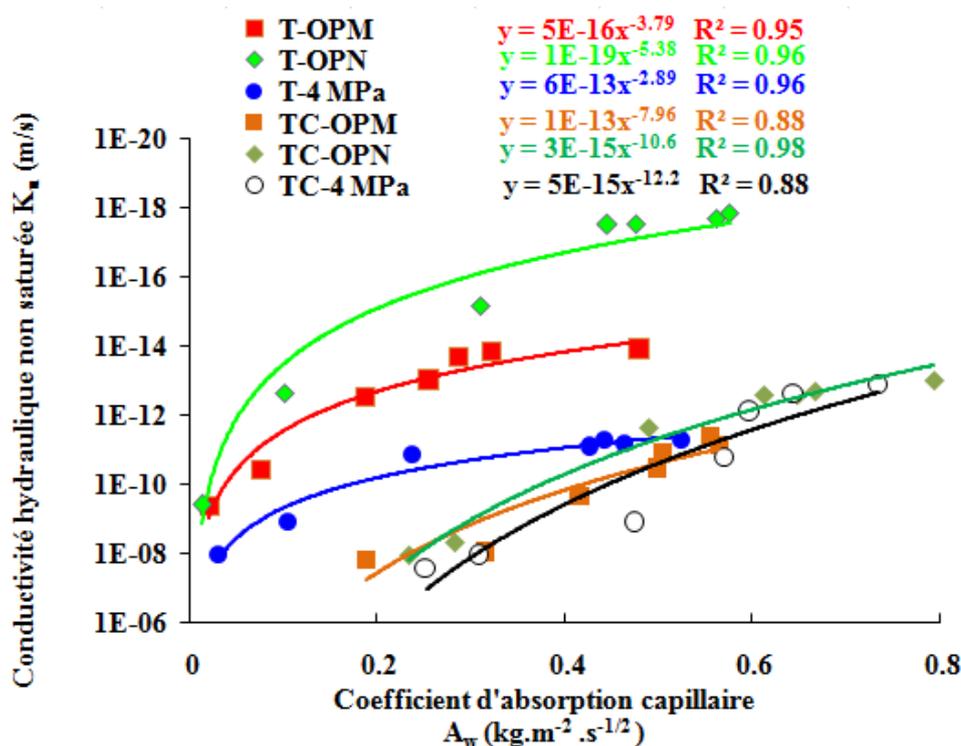


Figure. V. 10. Relation entre la conductivité hydraulique non saturée et le coefficient A_w .

3.6 Front de remontée capillaire

Pour déterminer la variation de teneur en eau en fonction de la hauteur de l'échantillon (front de remontée capillaire) nous avons procédé à des mesures de teneur en eau chaque 2cm. Les fronts capillaires des échantillons stabilisés à 4% de chaux et non stabilisés (immédiatement, séchés à 28 jours et étuvés à 105°C) sont donnés dans la figure V.11.

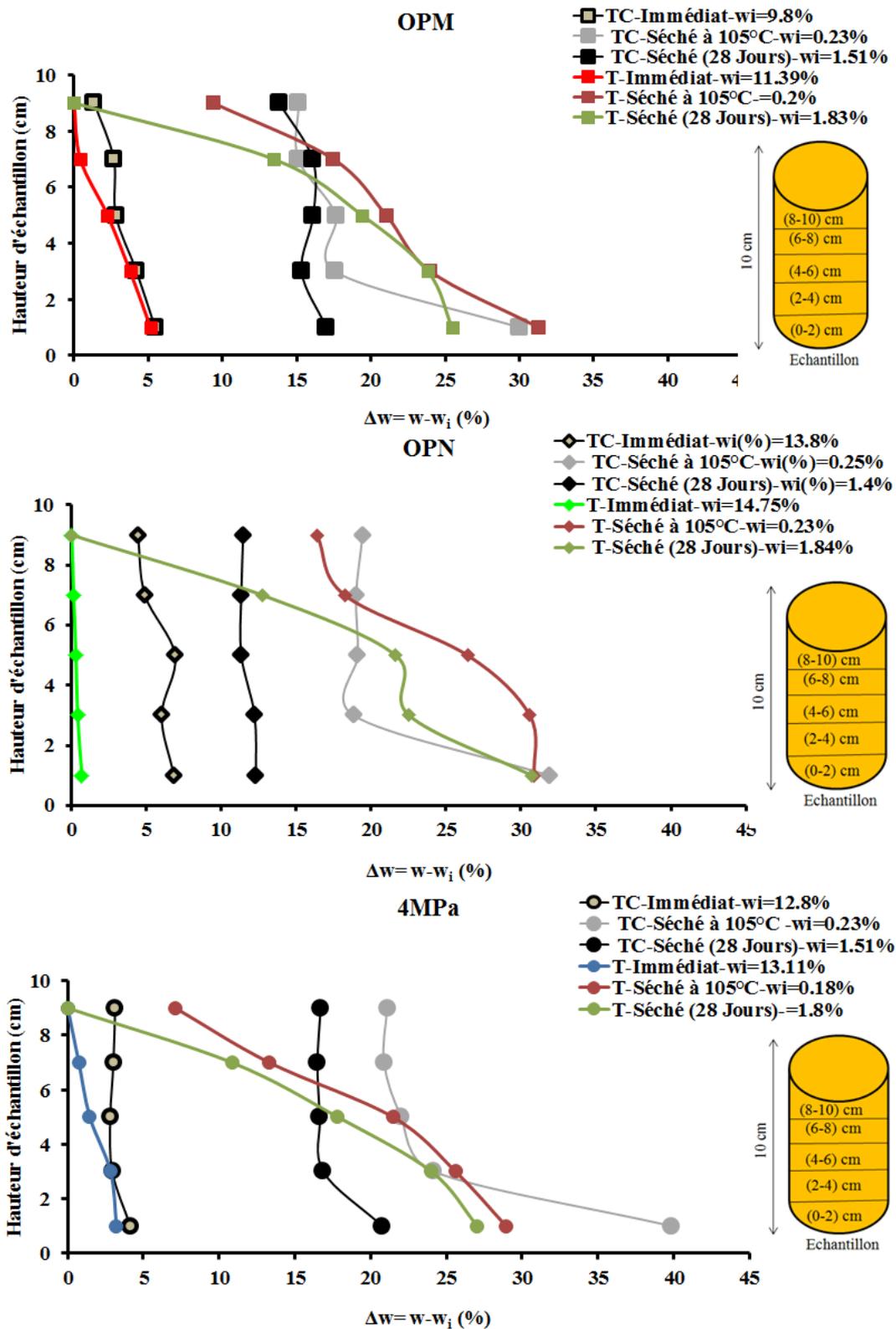


Figure. V. 11. Front capillaire des échantillons non stabilisés et stabilisés.

Dans le cas des échantillons compactés et testés immédiatement, les variations de la teneur en eau restent entre 3% et 6% pour le matériau stabilisé. Pour le matériau brut, cette variation de w est presque négligeable : 0.6% pour T-OPN, 5% pour T-OPM et 3% pour T-4MPa. Contrairement aux échantillons non stabilisés, l'eau a atteint le sommet (partie

supérieures 8-10cm) des échantillons stabilisés et testés immédiatement. Au bout de deux heures, les variations de w dans l'intervalle de hauteur (8-10cm) sont de 1% (TC-OPM), 4%(TC-OPN) et 3%(TC-4MPa). Pour les échantillons non stabilisés et testés immédiatement, les valeurs de w dans l'intervalle de hauteur (8-10 cm) sont négligeables. Les échantillons séchés à 28 jours absorbent l'eau d'une manière uniforme le long de la hauteur de sorte que le pourcentage de Δw varie de 14% à 16% pour (T-OPM), de 11% à 12% pour (T-OPN) et de 16% à 20% (T-4MPa).

Pour les échantillons stabilisés puis à étuvés à 105°C, la partie en contact avec l'eau (0-2cm) enregistre une variation de teneur très élevée 30%, 32% et 42% respectivement pour TC-OPM, TC-OPN, TC-4MPa. De même pour les échantillons non stabilisés puis étuvés à 105°C, on enregistre une variation autour de 32%, 30% et 28% respectivement pour les échantillons (T-OPM, T-OPN, T-4MPa).

4 Les paramètres thermophysiques des échantillons stabilisés

Dans cette partie nous allons présenter les résultats expérimentaux des mesures de la conductivité thermique (λ), la capacité volumique thermique (C), la diffusivité (D) et l'effusivité (E) du matériau stabilisé. Les valeurs des états initiaux sont données dans le tableau. V.8.

Tableau. V. 8. Les caractéristiques initiales des échantillons stabilisés.

Energies	Temps de séchage (jours)	w_i (%)	S_{ri} (%)
TC-OPM	Immédiat	10.1	64
	1	5.7	38
	7	1.7	12
	14	1.6	9
	21	1.3	7
	28	1.5	8
TC-OPN	Immédiat	14.2	66
	1	6.0	34
	7	2.0	8
	14	1.6	6
	21	1.3	7
	28	1.3	4
TC-4MPa	Immédiat	13.5	65
	1	5.0	21
	7	1.5	11
	14	1.8	9
	21	1.8	9
	28	1.4	8

4.1 La conductivité thermique

La variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau et du degré de saturation initiale est représentée sur la figure V.12. On remarque que la diminution de la teneur en eau et du degré de saturation des échantillons entraîne une décroissance de la conductivité thermique « λ ». La variation de λ entre l'état immédiat après compactage et après 14 jours de séchage est de 86% pour T-OPN, de 84% pour TC-OPM et de 95% pour TC-4MPa. Cette variation correspond à une diminution de la teneur en eau de 86% pour l'ensemble des états. En revanche, entre 14 et 28 jours, on note une diminution plus faible de λ estimée à 13%, 5% et 16% respectivement pour les états TC-OPN, TC-OPM et TC-4MPa et qui correspond à une variation de w_i ne dépassant pas 0.5%.

Il est à noter qu'une pente constante $[\Delta(\lambda)/\Delta(w)]$ comprise entre 4% et 5% a été observée suivant une tendance linéaire pour tous les échantillons testés. Cette pente est pratiquement identique à celle du matériau brut. De plus, les courbes représentant la variation de la conductivité thermique du tuf stabilisé sont inférieures à celles du tuf brut de l'ordre de 41% pour OPM, de 48% pour OPN et de 39% pour 4MPa. Cette différence peut s'expliquer par le fait que la conductivité thermique du sol est contrôlée par celle de ses constituants et la présence des hydrates (C-S-H et C-A-S-H), notamment autour des agglomérats (Lemaire et col, 2013), peut avoir aussi un impact significatif sur la conductivité thermique de l'ensemble du système. A titre indicatif, la conductivité thermique des produits de chaux pouzzolanique, tels que l'hydrate de silicate de calcium (C-S-H) et le silicate d'aluminate de calcium hydraté (C-A-S-H) résultant du processus d'hydratation est de l'ordre de $\lambda = 0,1012 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (Norouzian et col, 2018 ; Wang et col, 2016; Mojumdar et col, 2006). Les résultats obtenus sont conformes à plusieurs données de la littérature notamment celles de (Liuzzi et col, 2016) et (Akinmusuru, 1994).

A partir des régressions linéaires obtenues (Eq. 8 et figure.V.12) on peut estimer que la conductivité thermique du matériau stabilisé à l'état sec est égale à $0,56 \text{ W. m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ au lieu de $0.72 \text{ W. m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour le matériau brut.

$$[\text{TC}] \quad \lambda = 0.04w_i + 0.56 \quad R^2=0.85 \quad [\text{Eq. V. 8}]$$

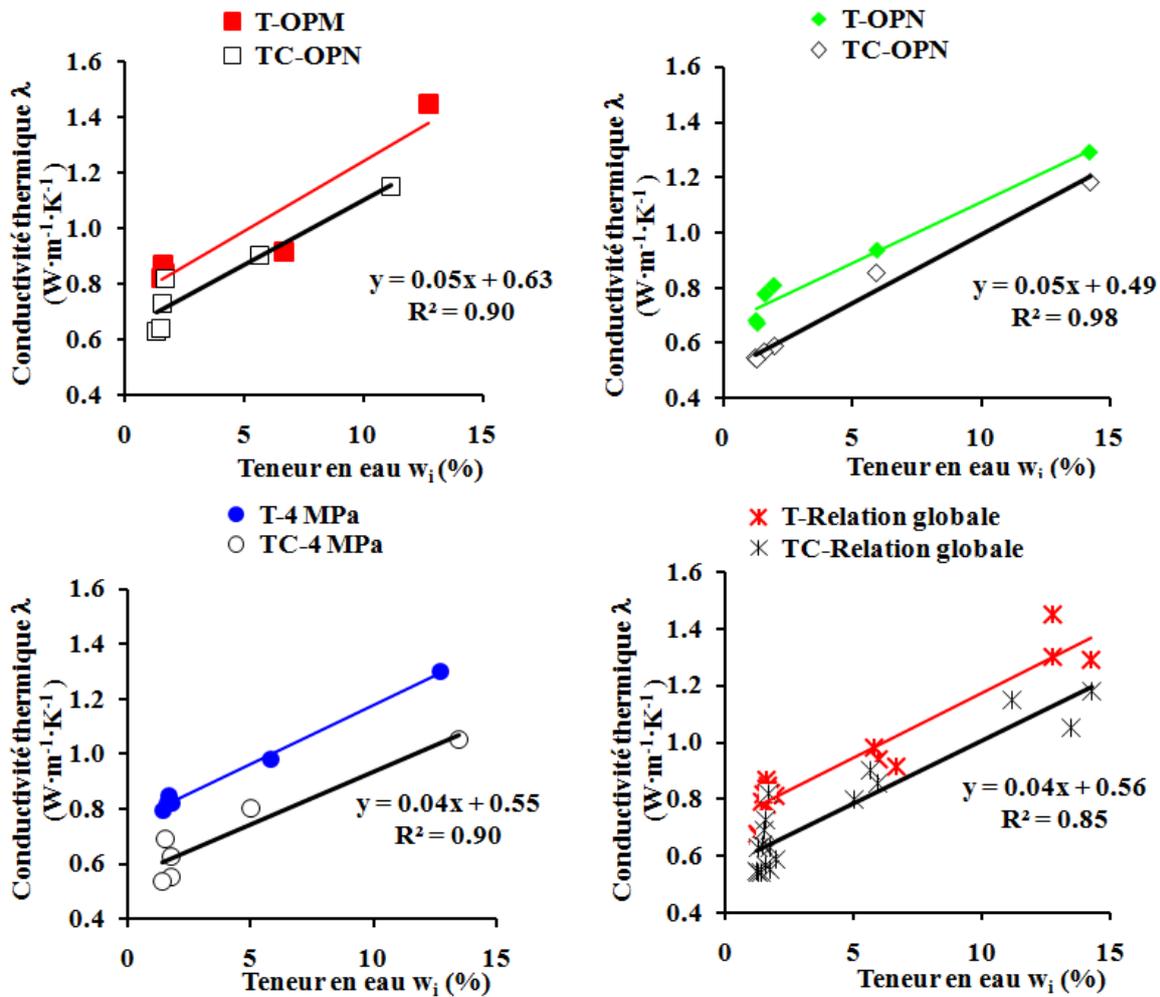


Figure. V. 12. Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau initiale.

Compte tenu de l'effet de la teneur en eau, une tendance de variation linéaire a été observée entre la conductivité thermique et le degré de saturation pour les échantillons non stabilisés (Eq.III.9). L'effet du degré de saturation (S_{ri}) sur la conductivité thermique (λ) pour différents échantillons est représenté sur la figure V.13.

$$[\text{TC}] \quad \lambda = 0.01S_{ri} + 0.56 \quad R^2=0.90 \quad [\text{Eq. V. 9}]$$

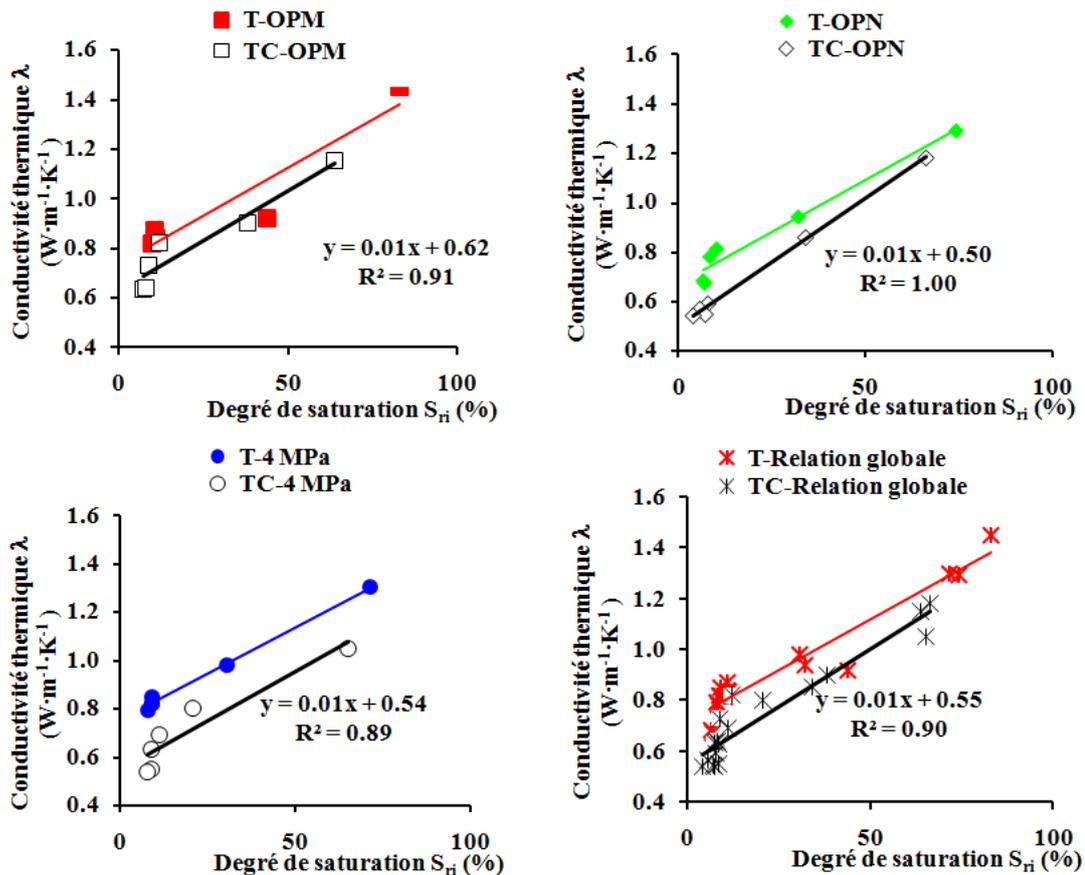


Figure. V. 13. Variation de la conductivité thermique en fonction de degré de saturation initial.

4.2 La capacité thermique volumique et massique et la diffusivité thermique

Le tableau V.9 regroupe l'ensemble des valeurs de la masse volumique, de la capacité thermique volumique et massique des échantillons stabilisés. Entre l'état immédiat et après 28 jours, on note une variation de la capacité thermique massique de 766 à 704 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour T-OPM, de 838 à 749 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour T-OPN et de 797 à 751 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour T-4MPa. Concernant l'effet de la stabilisation, une augmentation moyenne de la capacité thermique massique pour l'ensemble des échantillons de l'ordre de 1.4% a été enregistrée après l'ajout de 4% de chaux. Cependant, cette augmentation est de 2.72%, 1.15% et 0.34% respectivement pour OPM, OPN et 4 MPa.

Dans la figure V.14, on représente la variation capacité thermique volumique en fonction de la teneur en eau initiale ou le degré de saturation des échantillons stabilisés. Une diminution moyenne entre l'état initial et après une durée de 28 jours de séchage de l'ordre de 20%, 22% et 23% respectivement pour les échantillons stabilisés TC-OPM, TC-OPN, TC-4MPa. En termes de comparaison avec les échantillons non stabilisés, les courbes gardent une forme linéaire et semblent très proches du matériau non stabilisé indiquant que le traitement à la chaux a peu d'influence sur la capacité thermique volumique. Une tendance linéaire de variation entre C et w_i ainsi qu'entre C et S_{ri} a été observée (Figure. V.14), ce qui

rejoint les résultats obtenus par (Ahn et col, 2009) sur plusieurs matériaux à savoir la sciure de bois, la paille de soja, la paille d'avoine, la paille de blé etc. Ces matériaux sont utilisés comme stabilisants dans la littérature.

Tableau. V. 9. La capacité thermique volumique et massique des échantillons (T) et (TC).

Energies	Temps de séchage (jours)	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Capacité thermique volumique $C \cdot 10^6$ (J/m ³ *K)	Capacité thermique massique C_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Diffusivité $\cdot 10^{-7}$ (m/s)
T-OPM	Immédiat	2165	1.70	766	8.30
	1	2050	1.47	709	6.50
	7	1983	1.45	731	6.01
	14	1979	1.40	708	5.95
	21	1977	1.40	708	5.97
	28	1973	1.39	704	5.96
T-OPN	Immédiat	2049	1.72	838	7.48
	1	1923	1.46	759	6.40
	7	1838	1.41	767	5.80
	14	1830	1.40	765	5.43
	21	1834	1.39	758	5.10
	28	1843	1.38	749	5.10
T-4 MPa	Immédiat	2055	1.60	797	7.80
	1	1926	1.51	784	6.47
	7	1872	1.43	763	5.98
	14	1867	1.36	729	6.03
	21	1862	1.39	744	6.01
	28	1867	1.40	751	5.60
TC-OPM	Immédiat	2084	1.68	806	6.80
	1	2023	1.50	741	5.80
	7	1944	1.47	756	5.64
	14	1935	1.47	760	4.93
	21	1924	1.47	764	4.25
	28	1927	1.46	758	4.65
TC-OPN	Immédiat	1972	1.68	852	7.04
	1	1886	1.43	758	5.99
	7	1782	1.40	786	4.30
	14	1774	1.38	778	4.11
	21	1785	1.39	779	4.00
	28	1756	1.38	786	3.96
TC-4 MPa	Immédiat	1941	1.66	814	6.36
	1	1799	1.40	744	6.09
	7	1787	1.43	770	4.88
	14	1780	1.40	757	4.48
	21	1780	1.39	751	3.99
	28	1780	1.38	746	4.13

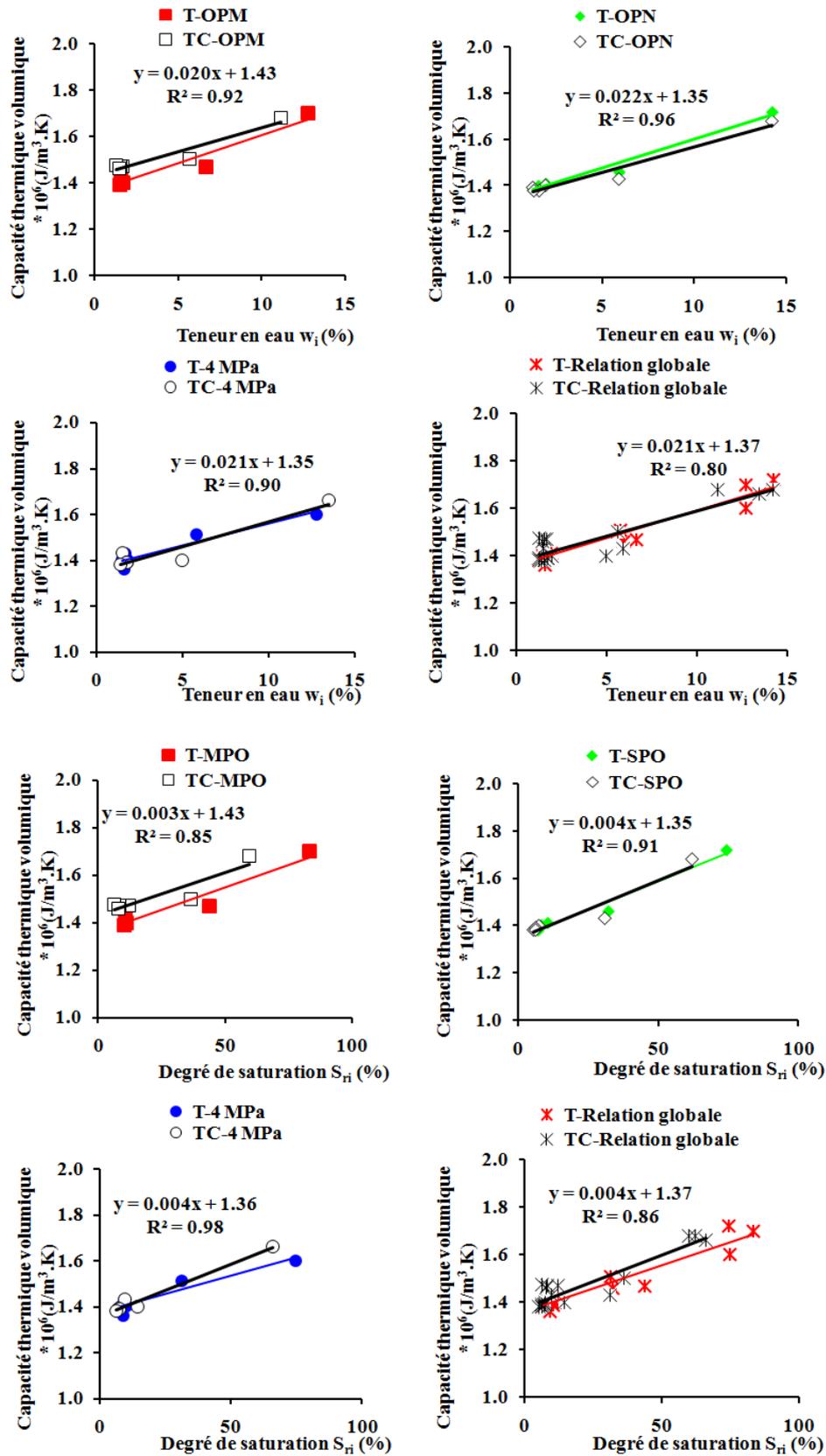


Figure. V. 14. Evolution de la capacité volumique thermique en fonction du degré de saturation et de la teneur en eau initiale.

La figure V.15 regroupe les courbes de la diffusivité thermique des échantillons stabilisés et non stabilisés testés à différents temps de séchage (immédiatement, 1, 7, 14 21, 28 jours) en fonction de la teneur en eau et du degré de saturation. A l'état immédiat, les valeurs sont de l'ordre de 6.80×10^{-7} m²/s (TC-OPM), 7.04×10^{-7} m²/s (TC-OPN), 6.36×10^{-7} m²/s (TC-4MPa). On peut constater que les valeurs de diffusivité des échantillons stabilisés à la chaux diminuent après 28 jours de séchage et tend vers les valeurs 4.65×10^{-7} m²/s, 3.96×10^{-7} m²/s, 4.13×10^{-7} m²/s respectivement pour TC-OPM, TC-OPN et TC-4MPa. Cette baisse de diffusivité est l'ordre de 46% pour (TC-OPM), 77% pour (TC-OPN) et 54% pour (TC-4MPa).

L'incorporation de la chaux dans la terre crue diminue la vitesse de propagation de la chaleur. Les composés cimentaires (pouzzolanique) recouvrent principalement la surface des granulats (Deneele et col, 2010), et cela peut modifier et ralentir le contact thermique dans les sols compactés et stabilisés à la chaux. Il est à noter que pour l'ensemble des échantillons, la valeur de la diffusivité thermique est inférieure à 8×10^{-7} m²/s. Ces valeurs enregistrées se rapprochent des diffusivités mesurées par plusieurs auteurs (EL-Rawi et AL-Wash, 1995 ; Meukem et col, 2004 ; Liuzzi et col, 2016 ; Boukelia et col, 2016). (Meukem et col, 2004) ont adopté la méthode « Flash method » sur des échantillons stabilisés (92% latérite+8% ciment). Ils ont montré que l'ajout d'un stabilisant chimique (ciment, pouzzolane, sciure de bois) diminue la diffusivité thermique pour atteindre une valeur de 4.6×10^{-7} m²/s (correspond à des teneurs est de 3.5%, 7% et 10.5%) Une diminution de 42% de la diffusivité thermique des blocs de terre comprimée (40% de limon+argile et 58% de sable) a été obtenue dans l'étude (Liuzzi et al ,2016) après l'ajout de 2% de la chaux.

Pour l'ensemble des échantillons, des régressions globales de forme linéaire ont été obtenues reliant (D) avec (w_i) ou (S_{ri}). Toutes les formes obtenues sont données par les équations (Eq.V. 10 et 11) dans laquelle les valeurs de R² sont de (T) plus grand que (TC).

$$[TC] \quad D = 0.21w_i + 4.19 \quad R^2=0.79 \quad [Eq. V.10]$$

$$[TC] \quad D = 0.04S_{ri} + 4.18 \quad R^2=0.81 \quad [Eq. V.11]$$

4.3 Effusivité thermique

La figure V.16 présente les valeurs de l'effusivité thermique de l'ensemble des états initiaux en fonction de la teneur en eau ou du degré de saturation. Les résultats montrent une diminution de la valeur de l'effusivité thermique lorsque la teneur en eau ou le degré de saturation diminue. La tendance de diminution observée après 14 jours est de l'ordre de 31%, 47% et 35% respectivement pour TC-OPM, TC-OPN, TC-4MPa. Après 28 jours de séchage, cette diminution atteint 40% pour TC-OPM, 62% pour TC-OPN et 53% pour TC-4MPa.

On remarque que l'incorporation de la chaux (4%) modifie légèrement l'effusivité thermique. Les courbes du matériau stabilisé (TC) se trouvent en dessous de celles du matériau brut (T). Un écart de 5%, 13% et 14% est observé entre les échantillons (T) et (TC) respectivement pour les échantillons compactés à l'OPM, OPN et 4MPa. En partant de l'explication de (Bouguerra et al. 1998) que les îlots liquides isolés sont équivalents à des courts circuits, formés par l'eau, qui contribuent à l'augmentation de l'effusivité thermique

du matériau. La quantité d'eau dans les échantillons stabilisés est légèrement inférieure à celle des échantillons bruts (courbe de rétention d'eau figure V.2), ce qui explique la diminution obtenue de l'effusivité thermique. En suivant la même procédure, on peut relier l'effusivité E à w_i ou S_{Hi} avec un coefficient de régression supérieur à 0.92 et 0.85 respectivement pour le matériau brut et le matériau stabilisé.

[TC] $E = 37.54w_i + 886$ $R^2=0.85$ [Eq. V.12]

[TC] $E = 7.82S_{Hi} + 884$ $R^2=0.88$ [Eq. V.13]

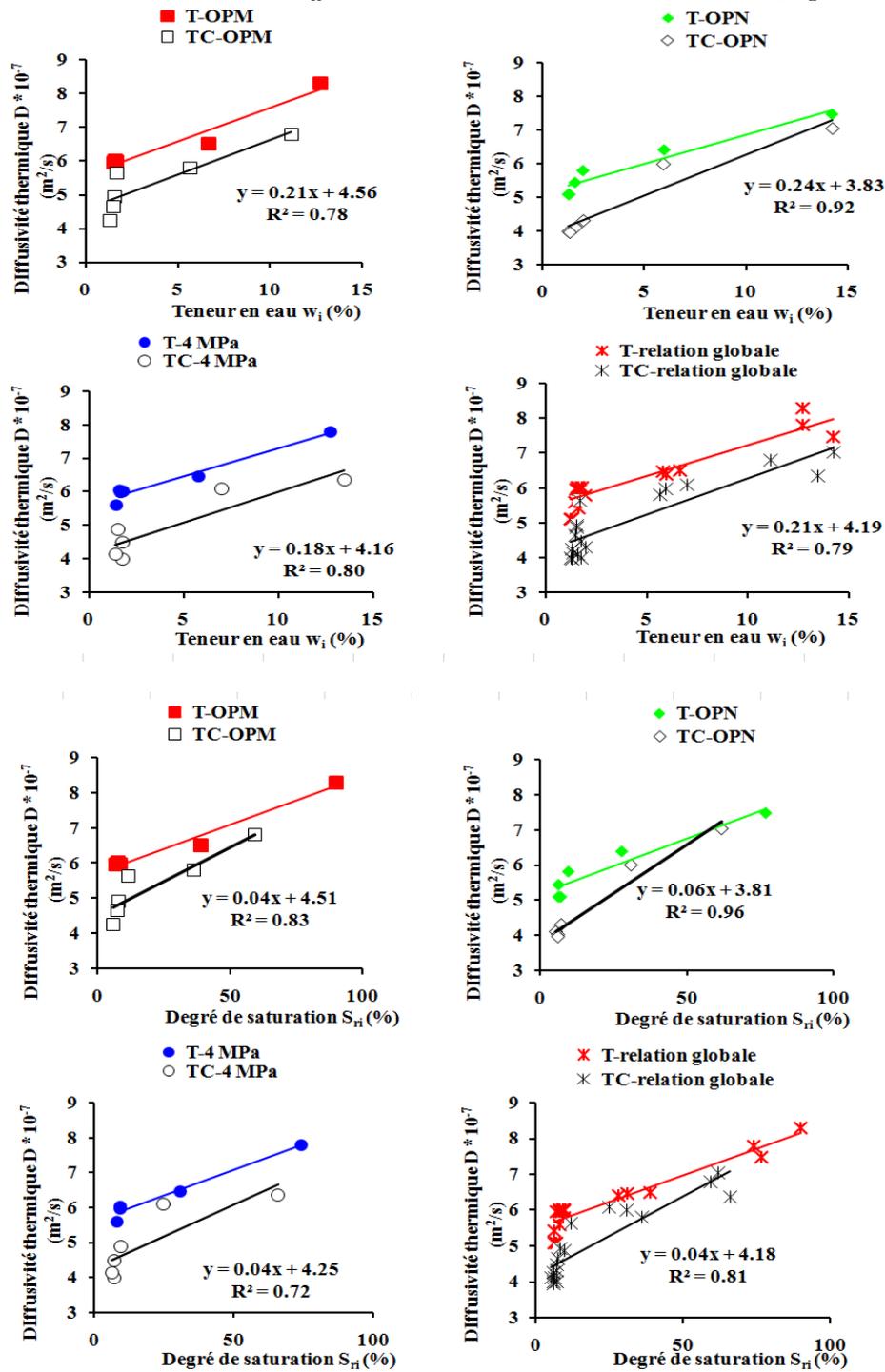


Figure. V. 15. Effet de la teneur en eau et du degré de saturation sur la diffusivité thermique.

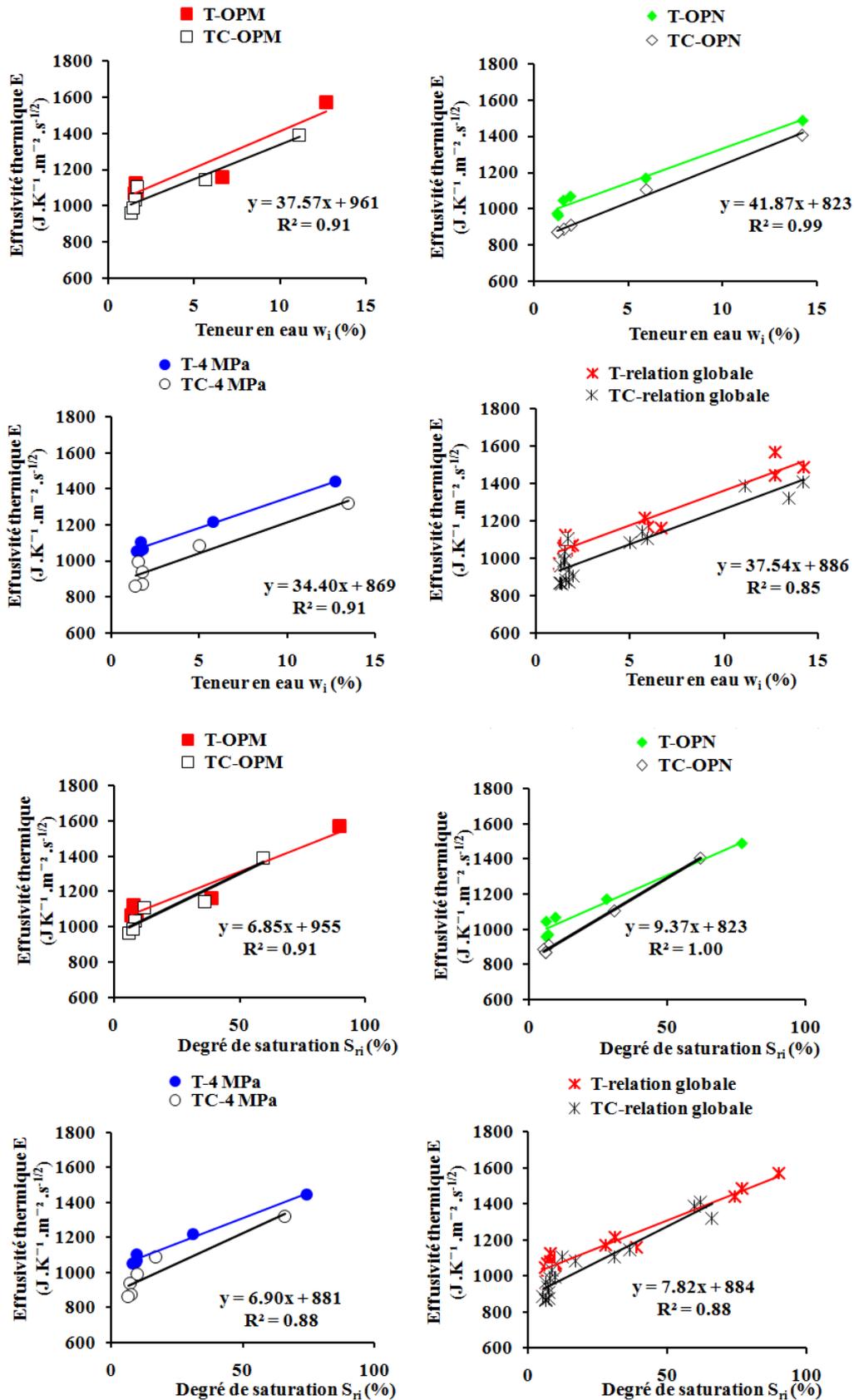


Figure. V. 16. Influence de la teneur en eau et du degré de saturation sur l'effusivité thermique.

5 Conclusion

Une étude hygrothermique a été conduite sur des échantillons compactés à plusieurs états initiaux (OPM, OPN et 4MPa) stabilisés à 4 % de chaux, puis séchés à différents temps de séchage. Les conclusions suivantes ont été tirées :

- Le processus de séchage a une grande influence sur la teneur en eau et le degré de saturation du tuf brut et stabilisé. Par conséquent, la diminution de la teneur en eau et du degré de saturation entraîne une augmentation de la succion initiale, ce qui augmente les valeurs de A_w d'une manière monotone.
- Une corrélation linéaire s'est avérée être la plus appropriée pour décrire la relation entre A_w et ψ_i d'une part, et λ , D , E en fonction de la teneur en eau et le degré de saturation, d'autre part. Ces relations simples peuvent être facilement introduites dans des modèles numériques qui intègrent un comportement hygrothermique.
- L'incorporation de la chaux a engendré une augmentation de A_w , ce qui favorise l'absorption d'eau surtout dans le cas où la teneur en eau est très faible (séchés à 28 jours et séchés à 105°C).
- L'ajout de chaux a un impact sur la conductivité thermique. Une valeur de conductivité thermique de 0,49 W. m⁻¹. K⁻¹ pour T-OPN à 28 jours s'est avérée inférieure à celle de certains matériaux de construction conventionnels tels que : le béton, la brique cuite et la brique silico-calcaire. Cela signifie que le confort thermique peut être sensiblement amélioré en utilisant ce matériau local. Alors l'état de compactage le plus adéquat en termes de comportement hydrique et thermique est TC-OPN.
- Le séchage à l'air libre (1 jour jusqu'à 28 jours) induit une amélioration importante des caractéristiques thermiques (λ , D , E) des échantillons. Notons que les valeurs de ces caractéristiques permettent d'atteindre une meilleure isolation et un meilleur confort hygrothermique (DTR.C 3-2). Ces valeurs sont proches de valeurs de teneur en eau de fonctionnement du matériau terre mesuré par (Laurent, 1986), et qui sont entre 2% et 6%

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le but principal de ce travail est de faire une caractérisation hygrothermique d'un matériau local compacté à différentes énergies en vue de son utilisation comme une brique de terre comprimée. Ainsi, plusieurs techniques expérimentales ont été mises en œuvre pour aboutir à cet objectif.

Le matériau étudié est un tuf calcaire provenant de la région Béni-Saf qui peut être classé parmi les sables argileux de faible plasticité (Ap-SA), composé essentiellement de calcaire (85%). Ce matériau a fait l'objet d'une sélection parmi d'autres matériaux selon les critères de granulométrie et de plasticité conformément à la norme (XP P13-901) et aux recommandations CRAterre. L'état initial considéré correspond à des échantillons cylindriques de diamètre 50 mm et d'un élancement de 2 à l'état brut ou stabilisé à 4% de chaux. Ces échantillons ont été compactés à statiquement à l'optimum Proctor modifié (OPM), l'optimum Proctor normal (OPN) et à une contrainte constante de 4MPa puis séchés à différentes périodes.

A travers le programme expérimental établi et les résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

Du point de vue hydrique et hygrométrique :

- Le processus de séchage des échantillons à des durées supérieures à sept jours induit une réduction très importante des valeurs de teneur en eau et du degré de saturation S_r et une augmentation des valeurs de succion mesurées. Toutefois, une variation très faible de la densité sèche a été observée durant ce processus. Ceci résulte du fait que l'état initial des échantillons après compactage se trouve très proche du palier de limite de retrait (w_{SL} et ψ_{SL}).
- Les valeurs du coefficient d'absorption capillaire sont généralement reliées à la densité la plus importante immédiatement après le compactage, c-a-d à l'OPM. Ceci est vrai aussi bien pour les échantillons stabilisés que non stabilisés.
- L'augmentation de la succion et la diminution de la teneur en eau ou du degré de saturation induisent une augmentation systématique du coefficient d'absorption capillaire. Des relations globales de type puissance entre ces paramètres et le coefficient d'absorption ont été proposées indépendamment de l'énergie de compactage.
- Les valeurs de la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) restent comparables pour l'ensemble des énergies considérées. Après un séchage de l'ordre de 14 jours, ces valeurs se stabilisent autour de 10^{-9} m/s.
- L'ajustement des courbes de séchage humidification par l'équation de [Van Genuchten, 1980](#) ont permis de déterminer l'évolution de la conductivité hydraulique non saturée (K_u). Deux domaines de variations ont été constatés : pour des succions inférieures à la succion d'entrée d'air, la conductivité hydraulique K_u varie légèrement, par contre, une diminution rapide est observée pour des succions plus élevées que la succion d'entrée d'air, pour atteindre enfin des valeurs quasiment nulles lorsque la phase liquide devient discontinue.

- L'incorporation de 4% de chaux induit une augmentation des valeurs des coefficients d'absorption, des conductivités hydrauliques saturée et non saturée. Par contre, une diminution a été observée dans la capacité de rétention d'eau et de densités sèches après compactage et au cours du séchage. Ceci a été expliqué par le phénomène de floculation-agglomération induisant une structure en agglomérats plus ouverte. Bien sûr, des investigations plus approfondies basées sur de la porosimétrie au mercure et de la microscopie électronique à balayage sont nécessaires pour mieux comprendre ce phénomène.
- Les échantillons compactés à l'OPM présentent une très faible résistance à la vapeur d'eau. La valeur de la résistance à la diffusion de vapeur d'eau de la coupelle sèche est toujours supérieure à celle obtenue sur une coupelle humide. Les valeurs obtenues restent comparables à celles de la littérature et sont généralement proches des valeurs proposées par la norme Allemande ([DIN 18945](#)).

Du point de vue thermique :

- L'influence des paramètres d'état hydrique comme la teneur en eau et le degré de saturation a été bien identifiée. Une réduction de ces paramètres induit une réduction linéaire des paramètres thermiques, à savoir la conductivité, la diffusivité et l'effusivité thermiques. Ceci a été expliqué par le fait que le transfert de chaleur dans les milieux polyphasiques résulte des propriétés thermiques de chaque constituant du milieu, notamment l'eau et l'air dont les quantités sont variables au cours du séchage.
- L'ajout de la chaux induit une diminution des paramètres thermiques mesurés. Les courbes des échantillons stabilisés et non stabilisés restent dans la majorité des cas sensiblement parallèles.
- Les échantillons du tuf de Béni-Saf stabilisés et non stabilisés présentent des valeurs de conductivité thermique inférieures à celles de certains matériaux de construction ordinaires recensés dans le ([DTR C3-2, 1997](#)) [béton ordinaire, la brique cuite et la brique silico-calcaire]. Bien-sûr, cet avantage est lié à l'état hydrique des échantillons qui doit être le plus sec possible.

Comme perspectives, une caractérisation du comportement hygrothermique des briques de terre comprimées (BTC) à l'échelle d'une paroi sera effectuée. Un travail préalable de modélisation sera aussi envisagé, visant à évaluer la réponse d'une paroi en BTC vis-à-vis d'une sollicitation climatique. Ceci permettra ensuite l'optimisation des dimensions des parois dans les constructions en terre en vue de l'obtention d'un meilleur confort hygrothermique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- .Amina Abdessemed-Foufa,2016, Identification du corpus des typologies constructives en terre pour la préservation du patrimoine bâti en et la construction en AlgérieIdentification of constructive typologies corpus land for the preservation of built heritage and construction in Algeria. Institut d'Architecture et d'Urbanisme de Blida 1 (I.A.U), Algérie.
- Abdul-Hussain, N., & Fall, M. (2011). Unsaturated hydraulic properties of cemented tailings backfill that contains sodium silicate. *Engineering geology*, 123(4), 288-301.
- Abu-Hamdeh, N. H. (2003). Thermal properties of soils as affected by density and water content. *Biosystems engineering*, 86(1), 97-102.
- Ahn, H. K., Sauer, T. J., Richard, T. L., & Glanville, T. D. (2009). Determination of thermal properties of composting bulking materials. *Bioresource technology*, 100(17), 3974-3981.
- Akinmusuru, J. O. (1994). Thermal conductivity of earth blocks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 6(3), 341-351.
- Allal, M., Ghomari, F., Bensalah, M., & Harbit, Y. (1992). Propriétés géologiques et géotechniques des tufs et croûtes calcaires de la Ville de Tlemcen. In *Séminaire national des Sciences de la Terre*.
- Al-Naddaf, M. (2018). A new automatic method for continuous measurement of the capillary water absorption of building materials. *Construction and Building Materials*, 160, 639-64
- Alrtimi, A., M. Rouainia, and S. Haigh. "Thermal Conductivity of a Sandy Soil." *Applied Thermal Engineering* 106 (August 2016): 551-560. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.06.012.
- Amraoui, T. (2020). La construction en terre crue dans l'Antiquité en Algérie: historiographie et données archéologiques. *Antiquités africaines. L'Afrique du Nord de la protohistoire à la conquête arabe*, (56), 47-59.
- APRUE. (2017) APRUE Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie.
- Ashour, T., Korjenic, A., Korjenic, S., & Wu, W. (2015). Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. *Energy and buildings*, 104, 139-146.
- ASTM C1585-20, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020

- ASTM, D. 5298-03 Standard test method for measurement of soil potential (Suction) Using Filter Paper, (1992), vol. 15, p. 1312-1316.
- Aubert, J. E. (2013). Caractérisation des briques de terre crue de Midi-Pyrénées. Institut National des sciences Appliquées-Université Paul Sabatier Toulouse III, Toulouse.
- Ayed, ben, limam, O., et Kallel, a. (2011). Beton d'argile: application aux briques de terre comprimée. : Séminaire International, Innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction.
- Bajestani, M.S., OH, Won-T., et Nasir, O. (2020). Effect of Soil-Water Characteristic on the Stability of Unsupported Vertical Cuts.
- Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering geology*, 42(4), 223-237.
- Bellagh, K. (2017). *Valorisation des sols urbains faiblement pollués dans les travaux de terrassement: le devenir des polluants dans les sols traités compactés* (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).
- Bezzar, Abdelillah et GhomarI, Fouad.(2001). Etude de la diffusion et l'adsorption des contaminants dans les sols Algériens. Geotechnical conférence,
- Bouguerra, A., Diop, M. B., Laurent, J. P., Benmalek, M. L., & Queneudec, M. (1998). Effect of moisture content on the thermal effusivity of wood cement-based composites. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31(24), 3457.
- Boukelia, A., Rosin-Paumier, S., Masrouri, F., & Le Borgne, T. (2016, May). Stockage de chaleur dans les sols compactés. In Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur.
- Brandl H. (1981). Alteration of soil parameters by stabilization with lime. Actes de la 10ème Conférence Internationale sur la Mécanique des Sols et les Fondations, Stockholm, Suède, pp. 587-594
- Brooks, R., & Corey, T. (1964).Hydraulic properties of porous media.Hydrology Papers, Colorado State University, 24, 37,
- Bruno, A. W., Gallipoli, D., Perlot, C., & Mendes, J. (2017). Effect of stabilisation on mechanical properties, moisture buffering and water durability of hypercompacted earth. *Construction and Building Materials*, 149, 733-740.
- Bruno, A. W., Gallipoli, D., Perlot-Bascoules, C., Mendes, J., & Salmon, N. (2015, May). Briques de terre crue: procédure de compactage haute pression et influence sur les propriétés mécaniques. In Rencontres Universitaires de Génie Civil.
- BS EN ISO 12 572 Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties – Cup method

- Bui, Q. B., Morel, J. C., Reddy, B. V., & Ghayad, W. (2009). Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering. *Building and Environment*, 44(5), 912-919.
- Cabane, N. (2005). Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques: Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation (Doctoral dissertation, Université Jean Monnet-Saint-Etienne, France).
- Cagnon, H., Aubert, J. E., Coutand, M., & Magniont, C. (2014). Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and Buildings*, 80, 208-217.
- Camapum De Carvalho J., Cripsel J.J., Mieussens C., Nardone A. (1987). 'La reconstitution des éprouvettes en laboratoire' : Théorie et pratique opératoire. Rapport de Recherche LPC, n°145, 54p
- Carpenter, G. W., & Stephenson, R. W. (1986). Permeability testing in the triaxial cell. *Geotechnical Testing Journal*, 9(1), 3-9.
- Castro, J., Bentz, D., & Weiss, J. (2011). Effect of sample conditioning on the water absorption of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33(8), 805-813.
- Cérézo, V. (2005). Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- Chabriac, P. A. (2014). Mesure du comportement hygrothermique du pisé (Doctoral dissertation, Laboratoire Génie Civil et Bâtiment (LTDS/UMR 5513)).
- Chaib, H., Kriker, A., Mekhermeche, A. (2020). contribution to the study of the thermomechanical properties of the adobe. (case of the south of Algeria Ouargla).
- Champiré, F. (2017). Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction (Doctoral dissertation, Université de Lyon).
- Chen, S. X. (2008). Thermal conductivity of sands. *Heat and mass transfer*, 44(10), 1241-1246.
- Collectif FFB. Règles professionnelles pour la mise en oeuvre des enduits sur supports composés de terre crue. Recherche et développement métier, 2012.
- Collet-Foucault, F. (2004). Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux (Doctoral dissertation, INSA de Rennes, France).
- Consoli, Nilo Cesar, Luizmar da Silva Lopes, and Karla Salvagni Heineck. "Key Parameters for the Strength Control of Lime Stabilized Soils." *Journal of Materials in Civil Engineering* 21, no. 5 (May 2009): 210-216. doi:10.1061/(asce)0899-1561(2009)21:5(210).
- 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-EAG: Rigassi, Vincent. Compressed earth blocks, vol. 1: manual of production. Braunschweig, Allemagne: Friedrich Vieweg&Sohn, (1995).
- CSTB, 2018 Art.Terre Mayotte, Dossier Technique lié à latex de type A N°2588, ouvrages en maçonnerie de BTC blocs de terre comprimée parois et murs, 2018.
- Cuisinier, O., & Deneele, D. (2010). Effets de sollicitations hydriques cycliques sur le gonflement d'un sol argileux traité à la chaux. *Revue Française de Géotechnique*, (130), 51-60.
- Cuisinier, O., & Masrouri, F. (2003). Comportement hydromécanique d'un sol gonflant compacté sous très fortes succions. *Comptes Rendus Mécanique*, 331(3), 203-210.
- Damfeu, J. C., Meukam, P., & Jannot, Y. (2016). Modeling and measuring of the thermal properties of insulating vegetable fibers by the asymmetrical hot plate method and the radial flux method: Kapok, coconut, groundnut shell fiber and rattan. *Thermochimica Acta*, 630, 64-77.
- Dao, K., Ouedraogo, M., Millogo, Y., Aubert, J. E., & Gomina, M. (2018). Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement. *Construction and Building Materials*, 158, 84-96.
- Daoud, F.Z. La perméabilité des sols fins compactés. 1996. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine, France.
- Darcy H. (1856) Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris : Victor Valmont Ed., 1856, pp. 590- 594
- Delage, P., Audiguier, M., Cui, Y.-J. Howat, D. (1996).¹ Microstructure of a compacted silt. *Can. Geotech. J.*, 33, pp.150-158.
- Delage, P., M. D. Howat, and Y. J. Cui. "The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay." *Engineering geology* 50, no. 1-2 (1998): 31-48.
- Delgado, M. C. J., & Guerrero, I. C. (2007). The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. *Construction and building materials*, 21(2), 237-251.
- Deneele, D., Lemaire, K., 2012. Evaluation de la durabilité des sols - Effet de la circulation 421 d'eau sur la durabilité du limon traité_Approche multi - échelle, Livrables du projet 422 Ter d'ouest (Terrassement Durables - Ouvrages En Sols Traités, 2008-2012)
- Derfouf F.M., (2014), « Contribution à l'étude des sols fins non saturés : Aspects du comportement volumique », Thèse de doctorat, Université Abou-Bakr. Belkaid, Tlemcen.

- Derfouf, F.M., Allal, M. A., Abou-Bekr, H., & Taibi, S. (2013). Mesure et prédiction des chemins de drainage-humidification. Application à l'argile d'un noyau de barrage. *Revue Française de Géotechnique*, (142), 49-60.
- DIN 18945 Earth blocks - Requirements, test and labelling. Standard by Deutsches Institut Fur Normung E.V. (German National Standard), 2013.
- Djelloul, R. (2018) influence de l'ajout de chaux et de ciment sur les propriétés physico-mécaniques d'une argile naturelle de la région d'Oran en vue de sa valorisation en construction routière (doctoral dissertation, université Mohamed Boudiaf des sciences et de la technologie-Mohamed Boudiaf d'Oran).
- Doat, 1979. Livre Construire en terre. Groupe CRAterre.
- DTR-C.3.2(Algérie), DTRC3-2, règles de calcul des déperditions calorifiques des bâtiments, Algérie.
- DTR-C.3.4 (Algérie), DTRC3-4, règles de calcul des apports calorifiques des bâtiments Algérie.
- E96-ASTM 96 ASTM (1993). Standard test methods for water vapor Transmission of Materials. E96-93. In *Annual book of ASTM standards* (pp 701e708). Philadelphia, PA: American Society for testing and materials.
- El Azhary, K., Chihab, Y., Mansour, M., Laaroussi, N., & Garoum, M. (2017). Energy efficiency and thermal properties of the composite material clay-straw. *Energy procedia*, 141, 160-164.
- El Azhary, K., Raefat, S., Laaroussi, N., & Garoum, M. (2018). Energy performance and thermal proprieties of three types of unfired clay bricks. *Energy Procedia*, 147, 495-502.
- El Fgaier, F., Lafhaj, Z., Antczak, E., & Chapiseau, C. (2016). Dynamic thermal performance of three types of unfired earth bricks. *Applied Thermal Engineering*, 93, 377-383.
- Eliche-Quesada, D., Sandalio-Pérez, J. A., Martínez-Martínez, S., Pérez-Villarejo, L., & Sánchez-Soto, P. J. (2018). Investigation of use of coal fly ash in eco-friendly construction materials: fired clay bricks and silica-calcareous non fired bricks. *Ceramics International*, 44(4), 4400-4412.
- El-Rawi, N. M., & AL-Wash, A.(1995). Strength and thermal properties of plain and reinforced soil-cement. *Journal of Islamic Academy of Sciences*, 8(3), 107-118.
- Ezbakhe, H., Bousad, S., El Bakkour, A., Ajzoul, T., & El Bouardi, A. (2001). Etude thermique de la terre stabilisee au ciment utilisee en construction au nord du maroc. *Rev. Energ. Ren*, 69-77.

- Fabbri, A., Morel, J. C., & Gallipoli, D. (2018). Assessing the performance of earth building materials: a review of recent developments. *RILEM Technical Letters*, 3, 46-58.
- Feng, C., & Janssen, H. (2017). The influence of temperature on the capillary absorption coefficient—a confrontation of two recent papers in building and environment. *Building and Environment*, 116, 257-258..
- Feng, C., & Janssen, H. (2018). Hygric properties of porous building materials (III): Impact factors and data processing methods of the capillary absorption test. *Building and environment*, 134, 21-34.
- Feng, C., Roels, S., & Janssen, H. (2019). Towards a more representative assessment of frost damage to porous building materials. *Building and Environment*, 164, 106343.
- Filali, M. (2006). Conductivité thermique apparente des milieux granulaires soumis à des contraintes mécaniques: modélisation et mesures (Doctoral dissertation, université de Toulouse, France).
- Flament, C. (2013). Valorisation des fines de lavage de granulats: application à la construction en terre crue (Doctoral dissertation, université d'Artois, France).
- Fleureau, J. M., Kheirbek-Saoud, S., Soemitro, R., & Taibi, S. (1993). Behavior of clayey soils on drying-wetting paths. *Canadian geotechnical journal*, 30(2), 287-296.
- Fleureau, J. M., Verbrugge, J. C., Huergo, P. J., Correia, A. G., & Kheirbek-Saoud, S. (2002). Aspects of the behaviour of compacted clayey soils on drying and wetting paths. *Canadian geotechnical journal*, 39(6), 1341-1357.
- Fopossi, A. J., Mutuku, R. N., & Ngapgue, F. (2014). Effects of stabilizers on water absorption of compressed earth blocks made from mangu soil. *Int. J. Eng. Sci. Emerg. Technol*, 7(1), 490-495.
- Fouchal, F., Gouny, F., Maillard, P., Ulmet, L., & Rossignol, S. (2015). Experimental evaluation of hydric performances of masonry walls made of earth bricks, geopolymer and wooden frame. *Building and Environment*, 87, 234-243.
- Foufa, A. (2016). "Identification du corpus des typologies constructives en terre pour la préservation du patrimoine bâti en et la construction en Algérie Identification of constructive typologies corpus land for the preservation of built heritage and construction in Algeria."
- Fragata, A., & Veiga, R. (2010). Air lime mortars: the influence of calcareous aggregate and filler addition. In *Materials Science Forum* (Vol. 636, pp. 1280-1285). Trans Tech Publications Ltd.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.

- Fredlund, D. G., Sheng, D., & Zhao, J. (2011). Estimation of soil suction from the soil-water characteristic curve. *Canadian geotechnical journal*, 48(2), 186-198.
- Fredlund, D. G., Xing, A., & Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 533-546.
- Garzón, E., Cano, M., Okelly, B. C., & Sánchez-Soto, P. J. (2016). Effect of lime on stabilization of phyllite clays. *Applied Clay Science*, 123, 329-334.
- George, S. Z., Ponniah, D. A., & Little, J. A. (1992). Effect of temperature on lime-soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 6(4), 247-252.
- Ghomari (1999), "restauration du patrimoine architectural en pisé: cas de site de honaine",1999. <http://www.entp.edu.dz/revue/files/article/31/article%206.pdf>
- Ghomari, F. (1989) Matériau en terre crue compactée: amélioration de sa durabilité a l'eau. Thèse de Doctoral. INSA de Lyon, France.
- Grigoletto, S. (2015). Applications de l'argile crue en construction.
- Guettala, A. (2003). Béton de terre stabilisé: amélioration de sa durabilité à l'eau (Doctoral dissertation, thèse de doctorat, Université de Biskra).
- Guettala, A., Abibsi, A., & Houari, H. (2006). Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. *Construction and Building Materials*, 20(3), 119-127.
- Guillaud H, Thierry J. Pascal O. Compressed earth blocks: Manual of desing and construction. 1995.
- Hacène, S. (2012). Matériaux locaux et développement durable cas de la brique de terre comprimée appliquée au sud algérien (Doctoral dissertation, Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme-Hocine Aït Ahmed, EPAU, Algérie).
- Hakimi, A., Fassi-Fehri, O., & Bouabid, H. (1999). Non-linear behaviour of the compressed earthen block by elasticity-damage coupling. *Materials and Structures*, 32(7), 539-545.
- Hakimi, A., Yamani, N., Ouissi, H. (1996). Rapport: Résultats d'essais de résistance mécanique sur échantillon de terre comprimée. *Mater Struct* 29, 600 - 608.
- Hall, C. "Water sorptivity of mortars and concretes: a review." *Magazine of concrete research* 41, no. 147 (1989): 51-61.
- Hall, M, and Djerbib. Y. "Moisture ingress in rammed earth: Part 3–Sorptivity, surface receptiveness and surface inflow velocity." *Construction and Building Materials* 20, no. 6 (2006): 384-395.

- Hall, M, and Djerbib. Y. "Moisture ingress in rammed earth: Part 1 – the effect of soil particle-size distribution on the rate of capillary suction." *Construction and Building Materials* 18, no. 4 (2004): 269-280.
- Hall, M., & Allinson, D. Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials. *Applied Thermal Engineering*, 29(4), 740-747, 2009.
- 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. et Guillaud, H. *Traité de construction en terre*, Éd. Parenthèse, Marseille, 1995.
- Houboun. H. Guillaud H. *Traité de construction en terre*. (2ed) Parenthèses, 1995.
- Ilker . (1969). Écrouissage et fragilité comparée pour plusieurs argiles, thèse doct.-ingénieur, 4.12.1969, Univ. Grenoble (France).
- Izemouren, w. (2016.). "Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée." PhD diss., Université Mohamed Khider-Biskra, Algérie.
- Izemouren, W., Guettala, A., & Gadri, K. (2013, December). Effet des conditions de cure sur les propriétés physiques et mécaniques des blocs de terre comprimée. In *Congrès français de mécanique*. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc, 92400 Courbevoie, France (FR).
- Janz, M. (1997). *Methods of measuring the moisture diffusivity at high moisture levels*. Lund Institute of Technology, Division of Building Materials, Lund.
- Jayasinghe, C., Kamaladasa, N., 2007. Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls. *Construction and Building Materials* 21, 1971–1976
- Jeannet, J., Pollet, G., & Scarato, P. (1986). *Le pise: patrimoine-restauration-technique d'avenir*.
- Jean-paul Laurent, 1987, propriétés thermique du matériau, cahiers du centre scientifique et technique du bâtiment établissement public PARIS 16 livraison 279 cahier 2156.
- K. Sebâa, K. Mekaideche, A. Benchouk A, F-M. Derfouf, N. Abou-Bekr , S. Taibi. (2018). Mise au point d'une brique de terre compactée: Aspects mécaniques, 4ème Colloque International Sols Non Saturés & Construction Durable, Oran, 30 et 31 Octobre 2018.

- Karagiannis, N., Karoglou, M., Bakolas, A., & Moropoulou, A. (2016). Effect of temperature on water capillary rise coefficient of building materials. *Building and Environment*, 106, 402-408.
- Kerroum, N., Nouibat, B., Benyahia, A., & Redjem, A. (2018). Study of the performance of adobe brick coated for sustainable construction in the Algerian Sahara. *Matériaux & Techniques*, 106(4), 401.
- Kiki, G. J. D., Houngan, A. C., Kouchade, C., Djossou, A., Andre, P., & Vianou, A. (2020). Amélioration du confort thermique des bâtiments par utilisation de l'inertie thermique des composites argile-paille de chiendent. Congrès annuel de la société française de thermique.
- Kouakou, C. H., & Morel, J. C. (2009). Strength and elasto-plastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder. *Applied Clay Science*, 44(1-2), 27-34.
- Kreith, F. et Black, W. Z. *Basic heat transfer*. New York : Harper & Row, 1980. p. 514-520.
- Laborel-Préneron. A, Jean-Emmanuel. A, Aubert., & Camille. A, Magniont. (2015). Influence de la teneur en chènevotte sur les performances mécaniques et les propriétés hygrothermiques d'un éco matériau à base de terre crue. Conférence Internationale Francophone NoMaD 2015 Mines Douai, France.
- Lachgueur, K. (2007). « Mesure de la conductivité hydraulique dans les argiles non saturées - Application au noyau du barrage Boughrara ». Mémoire de Magister. Université de Tlemcen.
- Laibi, B. (2017). Comportement hygro-thermo-mécanique de matériaux structuraux pour la construction associant des fibres de kéraf à des terres argileuses (Doctoral dissertation, Normandie).
- Lambe, T. W. (1958). The structure of compacted clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 84(2), 1654-1.
- Lan, T. N. (1977). Un nouvel Essai d'identification des Sols- L'essai au Bleu de Méthylène. *Bull liaison lab ponts chauss*, (88).
- Le Borgne, T. (2010). *Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols* (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Lorraine).
- Le Runigo, B. (2008). Durabilité du limon de Jossigny traité à la chaux et soumis à différentes sollicitations hydriques: comportements hydraulique, microstructural et mécanique (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Nantes (ECN)/Université de Nantes).

- Lemaire, K., Deneele, D., Bonnet, S., & Legret, M. (2013). Effects of lime and cement treatment on the physicochemical, microstructural and mechanical characteristics of a plastic silt. *Engineering Geology*, 166, 255-261.
- Leong, E. C., & Rahardjo, H. (1997). Review of soil-water characteristic curve equations. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 123(12), 1106-1117.
- Li, Z. S., Benchouk, A., Derfouf, F. E. M., Abou-Bekr, N., Taibi, S., Souli, H., & Fleureau, J. M. (2018). Global representation of the drying-wetting curves of four engineering soils: experiments and correlations. *Acta Geotechnica*, 13(1), 51-71.
- Liuzzi, S., & Stefanizzi, P. (2016). Experimental investigation on lightweight and lime stabilized earth composites. In *Key Engineering Materials* (Vol. 666, pp. 31-45). Trans Tech Publications Ltd.
- Liuzzi, S., Hall, M. R., Stefanizzi, P., & Casey, S. P. (2013). Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate. *Building and Environment*, 61, 82-92.
- Lu, J., Wang, K., & Qu, M. L. (2020). Experimental determination on the capillary water absorption coefficient of porous building materials: A comparison between the intermittent and continuous absorption tests. *Journal of Building Engineering*, 28, 101091.
- Maillard, P., & Aubert, J. E. (2014). Effects of the anisotropy of extruded earth bricks on their hygrothermal properties. *Construction and Building Materials*, 63, 56-61.
- Malanda, N., Kimbembe, P. L., & Tamba-Nsemi, Y. D. (2018). Etude des caractéristiques mécaniques d'une brique en terre stabilisée à l'aide de la mélasse de canne à sucre. *Sciences Appliquées et de l'Ingénieur*, 2(2), 1-9.
- Mamba, M., & Messi, A. (2013). Mise au point d'une méthodologie d'étalonnage d'une presse destinée à la fabrication des blocs de terre comprimée. *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 9(3), 1-25.
- Mansour, M. B., Jelidi, A., Cherif, A. S., & Jabrallah, S. B. (2016). Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). *Construction and building materials*, 104, 44-51.
- Maurenbrecher, A. P. (2004). Mortars for repair of traditional masonry. *Practice periodical on structural design and construction*, 9(2), 62-65.
- McGregor, F, Heath, A., Shea, A., & Lawrence, M. (2014). The moisture buffering capacity of unfired clay masonry. *Building and Environment*, 82, 599-607.

- Mekhermeche A. (2012). Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et Thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des ksours sahariennes, thèse de magister université kasdimerbahouargla.
- Meukam, P. (2004). Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments (Doctoral dissertation, Université de Yaoundé I).
- Milohin, G. S. G., Gbaguidi, S. V., Donnot, A., Anjorin, M., & Benelmir, R. (2020). Mechanical and thermal characterization of compact blocks made of clayey earth with wood ashes addition. In MATEC Web of Conferences (Vol. 307, p. 01030). EDP Sciences.
- Miraucourt, D. (2017). "Stabilisation du matériau terre crue pour application en brique de terre comprimée au Burkina Faso.", université de Burkina Faso.
- Mitchell J.K., Hooper D.R. Permeability of compacted clay. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 41-65, July, SM4, 1965
- Mitchell, J.K. 1993. Fundamentals of soil behavior. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York
- Mňahončáková, E., Jiříčková, M., Pavlík, Z., Fiala, L., Rovnaníková, P., Bayer, P., & Černý, R. (2006). Effect of moisture on the thermal conductivity of a cementitious composite. International Journal of Thermophysics, 27(4), 1228-1240.
- Moëvus, M., Anger, R., & Fontaine, L. (2012, April). Hygro-thermo-mechanical properties of earthen materials for construction: a literature review. In Terra 2012.
- Moëvus, Mariette, Couvreur, Lucile, Cloquet, Basile, Fontaine, Laetitia, Anger, Romain, Doat, Patrice, 2016. Béton d'Argile Environnemental : résultats d'un programme de recherche tourné vers l'application. Villefontaine : CRAterre. 87 p. ISBN 978-2-906901-94-0.
- Mojumdar, S. C., L. Raki, N. Mathis, K. Schimdt, and S. Lang. (2006). "Thermal, Spectral and AFM Studies of Calcium Silicate Hydrate-Polymer Nanocomposite Material." Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 85, no. 1 (2006): 119-124. doi:10.1007/s10973-005-7354-8.
- Mopt.(1992). Bases Para el Diseño y Construcción con Tapial. Madrid,Spain: Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Obras Públicas y Transportes,
- Moussai, B., Didier, G., & Atlan, Y. (1993). Étude d'un appareillage de compactage statique et de mesure de la perméabilité des sols fins argileux. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, (188).
- Moussai. (1993) 'Étude d'un appareillage de compactage statique et de mesure de la perméabilité des sols fins argileux', Bull. liaison Labo. P. et Ch. 188 15-22.

- Nalbantoglu, Z., & Tuncer, E. R. (2001). Compressibility and hydraulic conductivity of a chemically treated expansive clay. *Canadian geotechnical journal*, 38(1), 154-160.
- NF EN 12086 Produits isolants thermiques destinés aux applications du bâtiment - Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau, Mai, 2013.
- NF EN 772-11 Méthodes d'essai des éléments de maçonnerie - Partie 11 : détermination de l'absorption de l'eau par capillarité des éléments de maçonnerie en béton de granulats, en béton cellulaire autoclavé, en pierre reconstituée et naturelle et du taux initial d'absorption d'eau des éléments de maçonnerie en terre cuite
- NF EN ISO 12572 Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau - Méthode de la coupelle.
- NF P 18-592 Granulats - essai au bleu de méthylène - méthode à la tâche. AFNOR 1990.
- NF P 94-047 Afnor-Standards-XP-P94-047 Soils investigation and testing Determination of the organic matter content. Ignition method. - Décembre (1998).
- NF P 94-048 Afnor-Standards NF P 94-048: Soils investigation and testing. Determination of the carbonate content - Calcimeter method. October (1996).
- NF P 94-054 Afnor-Standards NF P 94-054: Soils investigation and testing Determination of particle density. Pycnometer method. October (1991).
- NF P 94-068 Afnor-Standards NF P94-068 ,Soils investigation and testing. Measuring of the methylene blue adsorption capacity of rocky soils. Determination of the methylene blue of a soil by means of the stain test. October (1998).
- NF P 94-093 Afnor-Standards NF P 94-093: Soils investigation and testing. Determination of the compaction reference values of a soil type - Standard proctor test - Modified proctor test -. October (1999).
- NF P94-041 Afnor-Standards Sols : reconnaissance et essais - Identification granulométrique - Méthode de tamisage par voie humide.
- NF P94-051 Afnor-Standards NFP94-051: Soils investigation and testing. Determination of Atterberg's limits. Liquid limit test using Cassagrande apparatus. Plastic limit test on rolled thread. Mars (1993).
- NF P94-057 Afnor-Standards -NFP94-057: Soils investigation and testing. Granulometric analysis. Hydrometer method. , Mai (1992).
- NF P94-071 Sols : reconnaissance et essais - Essai de cisaillement rectiligne à la boîte - Partie 1 : cisaillement direct.

- NF P94-074 Sols : reconnaissance et essais - Essais à l'appareil triaxial de révolution - Appareillage - Préparation des éprouvettes - Essai (UU) non consolidé non drainé - Essai (Cu+U) consolidé non drainé avec mesure de pression interstitielle - Essai (CD) consolidé drainé.
- Ngo, D. C. (2017). Développement d'un nouveau éco-béton à base de sol et fibres végétales: étude du comportement mécanique et de durabilité (Doctoral dissertation, Université de Bordeaux).
- Ngowi, A. B. (1997). Improving the traditional earth construction: a case study of Botswana. *Construction and Building Materials*, 11(1), 1-7.
- Norouzian, K., Abbasi, N., & Koupai, J. A. (2018). Evaluation of softening of clayey soil stabilized with sewage sludge ash and lime. *Civil Engineering Journal*, 4(4), 743-754.
- Nshimiyimana, P., Messan, A., & Courard, L. (2020). Physico-mechanical and hygro-thermal properties of compressed earth blocks stabilized with industrial and agro by-product binders. *Materials*, 13(17), 3769.
- Olivier, M., & Mesbah, A. (1986). Le matériau terre: Essai de compactage statique pour la fabrication de briques de terre compressées. *Bull. Liaison Lab. Ponts et Chaussées*, 146, 37-43.
- Oti, J. E., Kinuthia, J. M., & Bai, J. (2010). Design thermal values for unfired clay bricks. *Materials & Design*, 31(1), 104-112.
- Ouedraogo, E., Coulibaly, O., Ouedraogo, A., & Messan, A. (2015). Mechanical and thermophysical properties of cement and/or paper (cellulose) stabilized compressed clay bricks. *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»*, 2(2), 68-76.
- Paulus, J. (2015). Construction en terre crue: dispositions qualitatives, constructives et architecturales–Application à un cas pratique: Ouagadougou. (Master, Université de Liège).
- PCH-2-87, 1988 State Building Committee of the Republic of Kyrgyzstan/Gosstroï of Kyrgyzstan (1988), Возведение малоэтажных зданий и сооружений изгрунтоцементобетона PCH-2-87 (Building of low-storied houses with stabilized rammed earth), Frunse (Bischkek) Republic of Kyrgyzstan, Republic Building.
- Pech-May, N. W., Cifuentes, Á., Mendioroz, A., Oleaga, A., & Salazar, A. (2015). Simultaneous measurement of thermal diffusivity and effusivity of solids using the flash technique in the front-face configuration. *Measurement Science and Technology*, 26(8), 085017.
- Phung, T. A. (2018). Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales: la bauge (Doctoral dissertation, Normandie Université).

- Pignal, b.(2005) terre crue: techniques de construction et de restauration, Paris.
- Piot. (2009). Thèse: Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique. INSA de Lyon. (p.174).
- P'Kla, A. (2002). Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (BTC): application aux maçonneries" BTC-Mortier de terre" (Doctoral dissertation, INSA de Lyon).
- Saidi, M., Cherif, A. S., Zeghmati, B., & Sediki, E. (2018). Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks. *Construction and Building Materials*, 167, 566-577.
- Salmi, S. (2014) La construction en pisé entre performances énergétiques et perception des usagers: cas du village kabyle Ait Itchir.. Thèse de doctorat. Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
- Schroeder, H. (2012). Modern earth building codes, standards and normative development. In *Modern Earth Buildings* (pp. 72-109). Woodhead Publishing.
- Schwarz, E. M., Grundstein, V. V., & Ievins, A. F. (1972). Thermal investigation of polyols. *Journal of thermal analysis*, 4(3), 331-337.
- Seng, B., Magniont, C., & Lorente, S. (2019). Characterization of a precast hemp concrete block. Part II: Hygric properties. *Journal of Building Engineering*, 24, 100579.
- Serbah, B., Abou-Bekr, N., Bouchemella, S., Eid, J., & Taibi, S. (2018). Dredged sediments valorisation in compressed earth blocks: Suction and water content effect on their mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 158, 503-515.
- Serbah, Boumediene.2018 , Cartographie des sédiments de dragage des barrages de l'ouest Algérien: Une solution de valorisation en BTC. Thèse de doctorat. Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid.
- Shaver, T. M., Peterson, G. A., Ahuja, L. R., & Westfall, D. G. (2013). Soil sorptivity enhancement with crop residue accumulation in semiarid dryland no-till agroecosystems. *Geoderma*, 192, 254-258.
- She, H. Y., & Sleep, B. E. (1998). The effect of temperature on capillary pressure-saturation relationships for air-water and perchloroethylene-water systems. *Water Resources Research*, 34(10), 2587-2597.
- Soudani, L., & Caroline, L. (2016). Modelling and experimental validation of the hygrothermal performances of earth as a building material (Doctoral dissertation, university of Lyon).

- Soudani, L., Woloszyn, M., Fabbri, A., Morel, J. C., & Grillet, A. C. (2017). Energy evaluation of rammed earth walls using long term in-situ measurements. *Solar Energy*, 141, 70-80.
- Taallah, B. (2014). *Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra).
- Taallah, B., & Guettala, A. (2016). The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers. *Construction and Building Materials*, 104, 52-62.
- Taoukil, D., Sick, F., Mimet, A., Ezbakhe, H., & Ajzoul, T. (2013). Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood-concrete composite. *Construction and Building Materials*, 48, 104-115.
- Tikhonravova, P. I. (2007). Effect of the water content on the thermal diffusivity of clay loams with different degrees of salinization in the Transvolga region. *Eurasian Soil Science*, 40(1), 47-50.
- Touré, P. M., Sambou, V., Faye, M., Thiam, A., Adj, M., & Azilinson, D. (2017). Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB). *Journal of Building Engineering*, 13, 266-271.
- Tran, T. D., Cui, Y. J., Tang, A. M., Audiguier, M., & Cojean, R. (2014). Effects of lime treatment on the microstructure and hydraulic conductivity of Héricourt clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(5), 399-404.
- UNI 10859, DIN 52617UNI 10859 Protocol "Cultural Heritage—Natural and artificial stones—Determination of water absorption by capillarity".
- Urmeneta, P., Prieto, E., Marcelino, S., García, B., & Miqueleiz, L. (2018). Estimated and real durability of unfired clay bricks: Determining factors and representativeness of the laboratory tests. *Construction and Building Materials*, 131, 600-605.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- Van Houdenhove, 2012, Redécouvrir la terre matière première innovante, in *L'architecture d'aujourd'hui, hors-série : Perspectives durable 2012*, p. 14-21
- Veiga, M. R., Magalhães, A., & Bokan-Bosilikov, V. (2004, July). Capillarity tests on historic mortar samples extracted from site. Methodology and compared results. In 13th international masonry conference, Amsterdam.
- Venkatarama-Reddy, B. V., & Jagadish, K. S. (1993). The static compaction of soils. *Geotechnique*, 43(2).

- Vitiello, V., Castelluccio, R., & Merino, M. D. R. (2020). Experimental research to evaluate the percentage change of thermal and mechanical performances of bricks in historical buildings due to moisture. *Construction and Building Materials*, 244, 118107.
- Wafer, (2010), *L'adobe, une solution pour la construction d'habitations écologiques dans une zone à forte activité sismique comme le Chili* (Doctoral dissertation, Université de Sherbrooke-Canada).
- Walker, P., Keable, R., Martin, J., Maniatidis, V., 2004. *Rammed Earth: Design and construction guidelines - Dti Partners in Innovation Project: "Developing Rammed Earth for UK Housing."*
- Walker, P.J., Stace, T., 1997. Properties of some cement stabilised compressed earth blocks and mortars. *Materials and Structures* 30, 545-551.
- Wang, Y., Cui, Y. J., Tang, A. M., Tang, C. S., & Benahmed, N. (2016). Changes in thermal conductivity, suction and microstructure of a compacted lime-treated silty soil during curing. *Engineering geology*, 202, 114-121.
- XP P13-901; Afnor Standards- XP P13-901: Compressed earth blocks for walls and partitions : definitions - Specifications - Test methods - Delivery acceptance conditions October (2001).
- Yates, S. R., Van Genuchten, M. T., Warrick, A. W., & Leij, F. J. (1992). Analysis of measured, predicted, and estimated hydraulic conductivity using the RETC computer program. *Soil Science Society of America Journal*, 56(2), 347-354.
- Yong, R.N., and Warkentin, B.P. 1975. *Soil properties and behavior*. Elsevier Scientific Publishing Company, New York.
- Zadjaoui (2007), influence des normes appliquées pour le compactage sur la densification d'un tuf calcaire en Algérie. ', 14ème Congrès Régional Africain de Mécanique des Sols et de la Géotechnique, Yaoundé, Cameroun, 26-28 novembre 2007.
- Zelazny, L.W., and Calhoun, F.G. 1977. Palygorskite (attapulgite), sepiolite, talc, pyrophyllite, and zeolites. In *Minerals in soil environment*. Edited by J.B. Dixon and S.B. Weed. Soil Science Society of America, Madison, Wis., pp. 435-470
- Zerari, S., Sriti, L., et Mansouri, K. (2019) « Dégradation du patrimoine ksouriendu sud algérien. Cas du tissu résidentiel des Ziban (Biskra) », *Al-Sabil : Revue d'Histoire, d'Archéologie et d'architecture maghrébines* [En ligne], n°7,
- Zhai, Q., Rahardjo, H., & Satyanaga, A. (2019). Estimation of air permeability function from soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 56(4), 505-513.
- Zhang, L., Yang, L., Jelle, B. P., Wang, Y., & Gustavsen, A. (2018). Hygrothermal properties of compressed earthen bricks. *Construction and Building Materials*, 162, 576-583.

Zhemchuzhnikov (2015) "Influence of clay content and suction on the strength of compressed earth blocks." PhD diss., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil of the Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, 2015.