



HAL
open science

Étude du gel/dégel de surface des murs d'habitations en terre crue

Lassana Traoré

► **To cite this version:**

Lassana Traoré. Étude du gel/dégel de surface des murs d'habitations en terre crue. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2019. dumas-03197344

HAL Id: dumas-03197344

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03197344v1>

Submitted on 13 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright



Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

Année 2018-2019

Voie d'approfondissement :
Génie Civil

Soutenu le 4 septembre 2019

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Henry Wong
- Maîtres de TFE [ou Tuteur] : Antonin Fabbri
Fionn McGregor
Claudiane Ouellet-Plamondon
Fabrice Rojat
- Expert : Céline Perlot-Bascouès

Par

Lassana Traoré

ETUDE DU GEL/DEGEL DE SURFACE DES MURS D'HABITATIONS EN TERRE CRUE

Organisme d'accueil

Le LTDS de l'ENTPE (Lyon) en partenariat avec l'ETS (Montréal)



Le génie pour l'industrie

Notice analytique

AUTEUR	
Nom	TRAORE
Prénom	Lassana
ORGANISME D'ACCUEIL	
Nom de l'organisme et Localité	Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE) Vaulx-En-Velin (Lyon)
Nom du Tuteur	Antonin Fabbri
ANALYSE DU TFE	
Titre (français)	Etude du gel/dégel de surface des murs d'habitations en terre crue
Titre (anglais)	Study of frost damage due to freezing/thawing cycles on the surface of earthen constructions
Résumé (français)	<p>De nos jours, la construction en terre connaît un regain d'intérêt en raison de son faible impact environnemental et de ses performances thermo-hygro-mécaniques. Néanmoins, le problème de la durabilité à l'eau et l'absence de protocoles standardisés freinent l'essor de ce mode de construction. Dans les régions froides, l'observation d'endommagements au gel (écaillage et fissurations) présente aussi la résistance au gel comme un enjeu majeur de développement des constructions en terre. D'une part, les mécanismes physiques liés au gel engendrent un fort couplage et une complexité supplémentaire. D'autre part, en raison de la sévérité des essais de gel interne et d'écaillage normalisés pour le béton, leur application n'est pas envisageable pour le matériau terre. Ce TFE a alors pour objectif de proposer un protocole expérimental mieux adapté à la reproduction des conditions de gel des constructions en terre. Pour cela, le travail part d'une modification de la méthode expérimentale du gel-dégel des sols stabilisés et compactés afin de tenir compte de l'effet du gel, de la remontée capillaire, de la stabilisation et du type de compactage. Une analyse des variations de teneurs en eau, de déformations géométriques et de pertes de masse par écaillage permettent de conclure sur la validité de la démarche expérimentale proposée.</p>
Résumé (anglais)	<p>Nowadays, earthen construction is gaining more interest because of its low environmental impact and its thermo-hygro-mechanical performances. Nevertheless, the problem of water durability and the lack of standardized protocols are limiting the development of this mode of construction. In cold regions, the observation of frost damage (scaling and cracking) also presents frost resistance as a major development issue for earthen constructions. On the one hand, the physical mechanisms related to frost generate a strong coupling and additional complexity. On the other hand, due to the severity of the standard freezing protocols for concrete, their application to the earth material is not acceptable. This paper aims to propose an experimental protocol better adapted to the reproduction of the freezing conditions of earthen constructions. For this, the work starts from a modification of the experimental method of the freezing-thawing of stabilized and compacted soils to consider the effect of frost, capillary rise, stabilization and compaction. An analysis of the variations in water content, geometric deformations and mass losses allow us to conclude on the validity of the experimental approach proposed.</p>

Mots-clés (français, 5 maxi)	Gel-dégel-terre crue-endommagement au gel-écaillage		
Mots-clés (anglais, 5 maxi)	Freezing-thawing-raw earth-frost damage-surface scaling		
Termes géo- graphique (français)	Lyon-France-Montréal-Canada		
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	117	11	86

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier Henry Wong pour avoir accepté de présider mon jury de diplomation ainsi que Céline Perlot-Bascoulès pour avoir évalué en qualité d'experte ce travail de fin d'études.

Je remercie chaleureusement mes tuteurs de stage : Antonin Fabbri, Fionn McGregor, Claudiane Ouellet-Plamondon et Fabrice Rojat qui m'ont partagé le goût de la recherche et toute la beauté de la thématique de la construction en terre. Je leur suis infiniment reconnaissant de tous leurs enseignements et conseils durant ces derniers mois.

J'exprime également ma reconnaissance envers les techniciens de deux laboratoires notamment Stéphane Cointet et Alexis Vadeboncoeur qui m'ont formé à la vie de laboratoire et m'ont soutenu lors des essais. Je suis reconnaissant envers Victor Brial pour tout le temps qu'il m'a accordé et tous les moyens qu'il a mobilisés afin que je puisse mener à bien les essais de gel-dégel au sein des laboratoires de l'ETS.

Je suis heureux d'avoir eu la chance de travailler avec Meriem Aouinti sur le même sujet lors de mon séjour à Montréal. Sa contribution et ses questions nous ont poussé à enrichir ce travail. Merci à elle pour avoir poursuivi les essais jusqu'à la fin. Au passage, je souhaite adresser un grand merci à Ricardo Infante Gomes pour s'être occupé de mes échantillons lors de l'essai de perméabilité à la vapeur.

Un dernier merci à mes parents, mon frère Harouna et à ma fiancée Bessé dont le soutien et la présence ont contribué à mon bonheur et à ma persévérance dans l'accomplissement de cette étude en vue de ma diplomation.

Sommaire

Notice analytique	3
Remerciements	5
Sommaire.....	7
Liste des illustrations	9
Liste des tableaux.....	13
Chapitre 1	15
Introduction sur l'enjeu de développement de la construction en terre dans les régions froides	15
1. Les systèmes constructifs en terre crue.....	16
2. Les intérêts de la construction en terre	17
3. Les freins au développement de la construction en terre	19
Chapitre 2	21
Problématique de l'impact du gel-dégel cyclique sur la durabilité des constructions en terre	21
1. L'enjeu de durabilité des constructions en terre	22
1.1 L'eau comme principal problème de durabilité	22
1.2 Le gel-dégel comme une menace dans les régions froides	22
2. Les théories d'endommagement au gel dans un milieu poreux	24
3. La physique du gel-dégel d'un matériau poreux saturé.....	25
3.1 L'équilibre liquide-glace en milieu non-confiné.....	25
3.2 L'équilibre liquide-glace en milieu poreux saturé	26
3.3 L'effet de la distribution de pores sur le degré de saturation liquide	28
4. La physique du gel-dégel d'un matériau poreux non-saturé	30
4.1 Equilibre de l'interface gaz-liquide.....	30
4.2 Le processus de gel dans les pores d'un matériau non-saturé	31
4.3 Les mécanismes de transfert de masse et de chaleur	33
5. Les méthodes expérimentales de mesures de la résistance au gel.....	35
5.1 Revue des normes d'essais classiques de mesure de résistance au gel interne	35
5.2 Revue des normes d'essais de mesure de résistance à l'écaillage.....	36
5.3 La norme ASTM D560 pour les sols stabilisés et compactés	37
5.4 Conclusion sur la problématique d'étude	38
Chapitre 3	39
Mise en place d'un protocole expérimental pour l'étude de la résistance au gel et à l'écaillage du matériau terre	39
1. Présentation du matériau terre étudié	40
1.1 Analyse granulométrique	40
1.2 Analyse hygrothermique	40
1.3 Caractéristiques pour la fabrication des échantillons	41
2. Mesure des paramètres hydriques du matériau terre étudié	42
2.1 La courbe caractéristique de rétention d'eau	42
2.2 Le coefficient d'absorption d'eau liquide par capillarité	46
2.3 Le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau	49

3.	Proposition du protocole d'essai de gel-dégel	54
3.1	Fabrication des échantillons	54
3.2	Présentation de la démarche expérimentale	56
3.3	Présentation et nomenclature des échantillons	61
Chapitre 4	63
Analyse de la résistance au gel et à l'écaillage de la terre crue : discussions sur les résultats expérimentaux....		63
1.	Les calculs et hypothèses de calcul	64
1.1	Calculs à partir des mesures géométriques	64
1.2	Calculs à partir des mesures massiques	64
2.	L'influence du gel et de l'absorption d'eau sur le matériau terre	65
2.1	Le gel comme cause principale de l'écaillage : validation d'hypothèse.....	66
2.2	Analyse de l'évolution de la teneur en eau	66
2.3	Analyse de la perte de masse par écaillage.....	70
2.4	Analyse des déformations volumiques	72
2.5	Analyse des déformations radiales différées	74
3.	L'influence de la stabilisation sur la résistance au gel.....	77
4.	Conclusions sur les mécanismes d'endommagement au gel	83
4.1	Les mécanismes d'effondrements	83
4.2	Les mécanismes d'endommagement	85
Conclusions générales et perspectives.....		88
Article de conférence.....		91
Annexes.....		101
Annexe A : la microstructure de la terre crue		101
Annexe B : Le couplage hygrothermique du matériau terre.....		103
Annexe C : Le comportement macroscopique d'un mur en terre		107
Annexe D : Les courbes de déformations radiales moyennes		110
Annexe E : Les courbes de déformations axiales moyennes		111
Bibliographie.....		113

Liste des illustrations

Figure 1 : Cartographie des différentes formes de constructions en terre crue en Europe - Terra Europea. « Earthen Architecture in the European Union »	16
Figure 2 : Différents systèmes constructifs porteurs en terre crue : adobe (a), bauge (b), pisé (c) et le BTC (d).....	16
Figure 3 : Mécanismes thermo-hydro-hydro-mécaniques (THHM) liés à un bon état de fonctionnement d'un mur en terre crue : adapté de (Scarato, et al., 2015).....	17
Figure 4 : Performances écologiques d'une construction en terre vis-à-vis de la fabrication à faible énergie grise (a) et à faible émission de gaz à effet de serre (b) (Soudani, 2016)	18
Figure 5: Capacité d'auto-régulation de l'humidité dans une maison en terre crue (Soudani, et al., 2016).	18
Figure 6: Capacité de stockage thermique d'une maison en terre crue (Soudani, et al., 2016).	19
Figure 7: Synthèse des principaux freins de développement de la terre comme un matériau de construction (Leylavergne, 2016)	19
Figure 8 : Variation de la résistance mécanique et du module de Young suivant l'humidité relative (Champiré, et al., 2016)	22
Figure 9: Erreurs de rénovations engendrant une attaque humide sur une structure en terre au dégel	23
Figure 10: Exemple d'endommagement d'une structure en terre par écaillage (a) ou par gel interne (b) (Illustrations de P. Scarato).....	23
Figure 11: Processus de cristallisation dans les pores dû aux cycles de gel-dégel	25
Figure 12 : Le diagramme de phases de l'eau – (Figure d'Olivier Descout)	25
Figure 13 : Modèle d'équilibre liquide-glace en considérant l'angle de mouillage	27
Figure 14 : Modèle d'équilibre liquide-glace en considérant l'épaisseur d'eau non-gelée	27
Figure 15 : Evolution du rayon d'entrée du gel dans les pores en fonction de la température	28
Figure 16 : Evolution du gel dans le réseau poreux suivant la décroissance des rayons de pores	28
Figure 17 : Schématisation de la fonction de distribution de pores $V(r)$	29
Figure 18 : Détermination de la courbe de gel à partir de la courbe de distribution de pores dans le cas d'un matériau saturé (Liu, et al., 2018)	29
Figure 19 : Equilibre liquide-gaz dans le réseau poreux d'un matériau non-saturé	30
Figure 20 : Evolution de la condensation capillaire dans le réseau poreux suivant la décroissance de la taille des pores	30
Figure 21 : Evolution du rayon d'entrée de condensation en fonction de l'humidité relative HR.....	31
Figure 22 : Représentation globale du domaine d'existence des phases dans le cas d'un matériau non-saturé exposé au gel	32
Figure 23 : Comparaison entre les rayons de pores exposés à la condensation (a) et au gel (b).....	32
Figure 24 : Influence de la saturation liquide initiale sur la courbe de gel d'un matériau cimentaire contenant soit de l'eau (en trait fin) ou du benzène (en pointillés) (Fen-Chong, et al., 2013).....	33
Figure 25 : Sens de transfert de masse d'eau dans un milieu poreux non-saturé	33
Figure 26 : Sens de transfert de masse d'eau dans un milieu poreux gelée et saturé.....	34
Figure 27 : Complexité du mécanisme de transfert de masse lors du gel d'un matériau non-saturé	35
Figure 28 : Courbe granulométrique du sol STA obtenue par (Chabriac, 2014)	40
Figure 29 : Isothermes de sorption-désorption obtenues par solution saline (a) et par DVS (b) (Chabriac, 2014)	41
Figure 30 : Courbes de l'Optimum Proctor pour la terre STA stabilisée à 10%	42
Figure 31 : Mise en place des échantillons et des papiers-filtres pour la mesure de la succion	43
Figure 32 : Courbe de calibration du papier-filtre Whatman 42 adaptée de l'ASTM D5298-10 par (Kim, et al., 2017)	43
Figure 33: Illustrations du protocole expérimental de mesure de la succion de la terre	44
Figure 34 : Courbe caractéristique de rétention d'eau de la terre STA	45
Figure 35 : Comparaison de la courbe de sorption-désorption (a) obtenue par (Chabriac, 2014) à la courbe de rétention (b).....	45
Figure 36: Illustrations du protocole expérimental de la mesure du coefficient d'absorption d'eau par capillarité	47
Figure 37 : Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée de la durée d'immersion.....	48
Figure 38 : Illustrations protocole expérimental de mesure du coefficient de perméabilité à la vapeur	50
Figure 39 : Mesure de la perte de masses des ensembles E2-E3-E4 au cours de l'essai	50
Figure 40 : Courbe d'évolution de $d\delta p_{iso}$ en fonction de l'épaisseur d des trois échantillons	52
Figure 41 : Comparaison des facteurs de résistance à la vapeur suivant la méthode de correction	53
Figure 42 : Répartition des 24 échantillons pour l'étude des effets de la stabilisation et du mode de compactage.....	54
Figure 43 : Mode de compactage et échantillons obtenus par une fabrication à la presse (gauche) et au proctor (droite)	55

Figure 44 : Cure des échantillons stabilisés (à gauche) et conservation des échantillons non-stabilisés (à droite).....	55
Figure 45 : Etapes de fabrication et de mesure au fil des cycles de gel-dégel	56
Figure 46 : Points de mesure des dimensions géométriques d'un échantillon	57
Figure 47 : Mesure de la perte de masse écaillée après brossage	57
Figure 48 : Dispositif de gel dans le congélateur (en haut) et de dégel dans la chambre humide (en bas)	58
Figure 49 : Essai pour la mesure de l'influence du gel avec deux échantillons	59
Figure 50 : Mise en place du dispositif d'absorption d'eau liquide lors du dégel	59
Figure 51 : Essai pour la mesure de l'influence de l'absorption d'eau liquide par capillarité(RC) avec les échantillons GD	60
Figure 52 : Mesure de la teneur en eau de la masse de terre récoltée lors de l'écaillage	65
Figure 53 : Illustration de l'endommagement de surface (écaillage) en raison de la phase de gel	66
Figure 54 : Evolution de la teneur en eau suivant le nombre de cycles (cas des PRESS).....	67
Figure 55 : Evolution de la teneur en eau suivant le nombre de cycles (cas des PROC)	67
Figure 56 : L'influence du gel (à gauche) et de l'absorption d'eau par capillarité (à droite) sur la variation maximale de la teneur en eau (cas des échantillons non-stabilisés)	68
Figure 57 : Evolution de la teneur en eau suivant le nombre de cycles (cas des PRESS-CIM)	68
Figure 58 : Evolution de la teneur en eau suivant le nombre de cycles (cas des PROC-CIM)	69
Figure 59 : L'influence du gel (à gauche) et de l'absorption d'eau par capillarité (à droite) sur la variation maximale de la teneur en eau (cas des échantillons stabilisés)	69
Figure 60 : Masse écaillée par unité de surface des échantillons non-stabilisés type PRESS (à gauche) et PROC (à droite) après chaque cycle de gel-dégel	70
Figure 61 : Masse écaillée par unité de surface des échantillons stabilisés type PRESS-CIM après chaque cycle de gel-dégel.....	71
Figure 62 : Masse écaillée par unité de surface des échantillons stabilisés type PROC-CIM après chaque cycle de gel-dégel.....	71
Figure 63 : Température du congélateur bloquée à -2°C en raison d'un problème de refroidissement pendant 3 jours consécutifs	72
Figure 64 : Evolution de la déformation volumique suivant les cycles (cas des PRESS).....	72
Figure 65 : Evolution de la déformation volumique suivant les cycles (cas des PROC).....	72
Figure 66 : Evolution de la déformation volumique suivant les cycles (cas des PRESS-CIM)	73
Figure 67 : Evolution de la déformation volumique suivant les cycles (cas des PROC-CIM)	73
Figure 68 : Points de mesure des trois diamètres pour le calcul des déformations radiales suivant la hauteur considérée	74
Figure 69 : Endommagement de quelques échantillons non-stabilisés	74
Figure 70 : Forte humidification et sensibilité des échantillons non-stabilisés sans gel	75
Figure 71 : Important écaillage d'échantillons stabilisés après plusieurs cycles de gel-dégel	75
Figure 72 : Déformations radiales mesurées après 1 cycle pour les échantillons non-stabilisés	75
Figure 73 : Déformations radiales mesurées après 3 cycles pour les échantillons non-stabilisés	76
Figure 74 : Déformations radiales mesurées après 1 cycle pour les échantillons stabilisés.....	76
Figure 75 : Déformations radiales mesurées après 3 cycles pour les échantillons stabilisés	77
Figure 76 : Influence de la stabilisation sur le nombre maximal de cycles de gel-dégel atteint par les 24 échantillons étudiés	78
Figure 77 : Influence de la stabilisation sur l'évolution de teneur en eau des échantillons PRESS	79
Figure 78 : Influence de la stabilisation sur l'évolution de teneur en eau des échantillons PROC	79
Figure 79 : Influence de la stabilisation sur l'augmentation de teneur en eau après les cycles gel-dégel.....	79
Figure 80 : Influence de la stabilisation sur les déformations volumiques des échantillons PRESS	80
Figure 81 : Influence de la stabilisation sur les déformations volumiques des échantillons PROC	80
Figure 82 : Evolution de la masse sèche des échantillons soumis aux cycles de gel-dégel	81
Figure 83 : Evolution de la teneur en eau des échantillons soumis aux cycles de gel-dégel.....	81
Figure 84 : Evolution de la masse sèche (ms) et de la masse humide (mw) des échantillons stabilisés et non-stabilisés sans absorption liquide au fil des cycles	82
Figure 85 : Evolution de la masse sèche (ms) et de la masse humide (mw) des échantillons stabilisés et non-stabilisés avec remontées capillaires au fil des cycles	83
Figure 86 : Effondrement des échantillons à la suite de la période de dégel	84
Figure 87 : Effondrements d'échantillons par ouverture de fissurations verticales	84
Figure 88 : Effondrements d'échantillons par perte de stabilité (saturation)	85
Figure 89 : Présence de fissurations horizontales au niveau des interfaces des couches.....	85
Figure 90 : Développement des fissurations après le gel :début d'écaillage.....	86
Figure 91 : Ecaillage des échantillons entraînant des pertes de masse	86
Figure 92 : Erosion de la partie basse des échantillons soumis à l'absorption d'eau par capillarité	86

Figure 93 : La terre crue comme un matériau poreux non-saturé	101
Figure 94 : Etat de ka phase liquide suivant le domaine de saturation du matériau (Salager, 2006)	102
Figure 95 : Comportement hygrothermique d'un mur en terre crue (Soudani, et al., 2016)	103
Figure 96 : Evolution de la conductivité thermique de différentes terres suivant la teneur en eau (Chabriac, 2014) ..	105
Figure 97 : Synthèse des équations de couplage hygrothermique régissant les phénomènes de transfert de masse et de chaleur.....	106
Figure 98 :Variation de la déformation de retrait et de la résistance en flexion suivant la teneur en argile (Hamard, et al., 2013)	107
Figure 99 : Variation de la résistance à la compression mécanique non-confinée (a) et du module d'élasticité dynamique (b) selon la teneur en argile (Helson, et al., 2017)	107
Figure 100 : Evolution de la résistance mécanique suivant la teneur en ciment : cas de différentes densités sèches (Zhang, et al., 2017).....	108
Figure 101 : Valeurs de MBV de différents types de matériaux et de stabilisation (Arrigoni, et al., 2017)	108
Figure 102 : Evolution de la conductivité thermique suivant le niveau de stabilisation : cas (a) relation de proportionnalité (Saidi, et al., 2018) et cas (b) absence de relation générale (Zhang, et al., 2017)	109
Figure 103 : Evolution des déformations radiales moyennes au fil des cycles (cas des PRESS).....	110
Figure 104 : Evolution des déformations radiales moyennes au fil des cycles (cas des PROC).....	110
Figure 105 : Evolution des déformations axiales moyennes au fil des cycles (cas des PRESS).....	111
Figure 106: Evolution des déformations axiales moyennes au fil des cycles (cas des PROC)	111

Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeurs de la tension superficielle liquide-gaz et de la masse volumique de l'eau liquide pour une température T=23°C (Walter Bruno, et al., 2018)	31
Tableau 2 : Définition des paramètres d'un cycle de gel-dégel selon la norme (NF-P18-424, 2008) (A1-7-IFSTTAR, 2015)	36
Tableau 3 : Critères d'évaluation visuelle de l'écaillage selon la norme (ASTM-C-672, 2003)	36
Tableau 4 : Définition des paramètres d'un cycle de gel-dégel selon la norme (ASTM-D560, 2016).....	37
Tableau 5 : Critères d'évaluation de l'écaillage selon la norme suédoise SS 13 72 44	37
Tableau 6 : Résultats de la détermination de l'Optimum Proctor pour la terre STA	41
Tableau 7 : Caractéristiques du compactage au Proctor selon la norme (ASTM-D558, 2011).....	42
Tableau 8 : Résultats de la détermination de l'Optimum Proctor pour la terre stabilisée à 10%	42
Tableau 9 : Résultats de la mesure de la succion matricielle et des teneurs en eau	44
Tableau 10 : Résultats de la mesure des coefficients A-value pour les différents échantillons.....	48
Tableau 11 : Caractéristiques des échantillons de l'essai Wet Cup	49
Tableau 12 : Résultats des calculs des propriétés hydriques des échantillons sans correction	51
Tableau 13 : Résultats des calculs de δ_p et μ après l'ISO correction	51
Tableau 14 : Résultats des calculs de δ_p et μ après la Z-correction	52
Tableau 15 : Valeurs des facteurs de résistance à la vapeur et écart-type suivant la correction utilisée	52
Tableau 16 : Valeurs de facteurs de résistance à la vapeur d'eau obtenues par (Chabriac, 2014).....	53
Tableau 17 : Récapitulatif des caractéristiques de fabrications des échantillons stabilisés et non-stabilisés à l'Optimum Proctor.....	54
Tableau 18 : Présentation des échantillons fabriqués à la presse et nomenclature suivant les paramètres étudiés	61
Tableau 19 : Présentation et caractéristiques des 24 échantillons étudiés	62
Tableau 20 : Méthode de comparaison des échantillons pour l'étude de l'influence du gel et de l'absorption d'eau par capillarité.....	65
Tableau 21: Distribution des tailles de particules recommandée pour une construction en terre.....	101
Tableau 22 : Relation succion/humidité relative suivant la relation de Kelvin	103
Tableau 23 : Classification des matériaux de construction selon leurs MBV	104

Chapitre 1

Introduction sur l'enjeu de développement de la construction en terre dans les régions froides

1. Les systèmes constructifs en terre crue

Les constructions en terre crue sont diverses et répandues dans le monde. De nos jours, près de la moitié de la population mondiale habitent des maisons en terre crue (Guillaud 2008). Même si les constructions en terre sont majoritairement dans les pays en voie de développement, la Figure 1 montre que plusieurs pays européens abritent aussi des habitats en terre construites suivant les différentes techniques de construction .

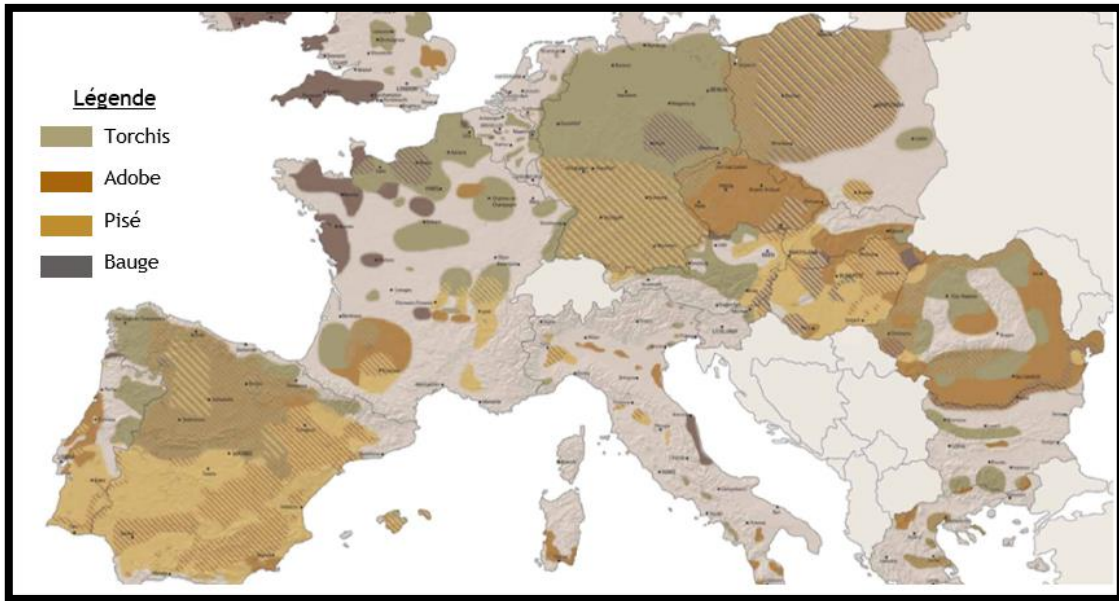


Figure 1 : Cartographie des différentes formes de constructions en terre crue en Europe - Terra Europea. « Earthen Architecture in the European Union »

La revue historique sur les constructions en terre montre d'une part, l'existence d'anciennes techniques de constructions en terre, témoins d'un art de construction durable et d'autre part une modernisation continue de ce mode de construction (Gallipoli, et al. 2017).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 2 : Différents systèmes constructifs porteurs en terre crue : adobe (a), bauge (b), pisé (c) et le BTC (d)

Les premières techniques de constructions sont dites « humides » puisqu'elles consistent à fabriquer les éléments en terre à une forte teneur en eau (proche de la limite plastique) puis à les laisser sécher par dessiccation. Ces éléments en terre sont soit des briques (adobe) soit des murs monolithiques (bauge). La présence de fibres végétales en paille est essentielle pour favoriser une meilleure ductilité du matériau et ainsi limiter le retrait lors de la dessiccation

(Quagliarini et Lenci 2010). Quant aux techniques les plus récentes dites « sèches », une amélioration de la capacité portante est possible grâce aux compactages des éléments à une teneur en eau de fabrication proche de l'optimum proctor (Miccoli and Fontana 2014). Le pisé est une technique de construction « sèche » basée sur la réalisation de murs monolithiques par compactage successif de couches de terres dans un coffrage en bois appelé banche. La technique du BTC (Brique de Terre Comprimé) est considérée comme une évolution de la technique de l'adobe grâce au compactage au moyen d'une presse dynamique ou quasi-statique (Pacheco-Torgal et Jalali 2012). La Figure 2 résume ces quatre types de constructions en terre crue.

Dans la suite, nous nous intéresserons uniquement aux techniques sèches notamment le pisé.

Les différentes techniques de constructions en terre crue reposent toutes sur le même principe constructif : les murs porteurs sont d'une épaisseur moyenne de 50 cm permettant l'auto-régulation hygrothermique et une bonne résistance mécanique. Le mur en terre est supporté par un mur de soubassement formé de galets et de pierres afin d'obtenir une hauteur de soubassement suffisante (variant de 50cm à 100 cm) pour limiter les phénomènes de remontées capillaires. Les mécanismes liés au bon fonctionnement d'une construction en terre sont schématisés dans la Figure 3.

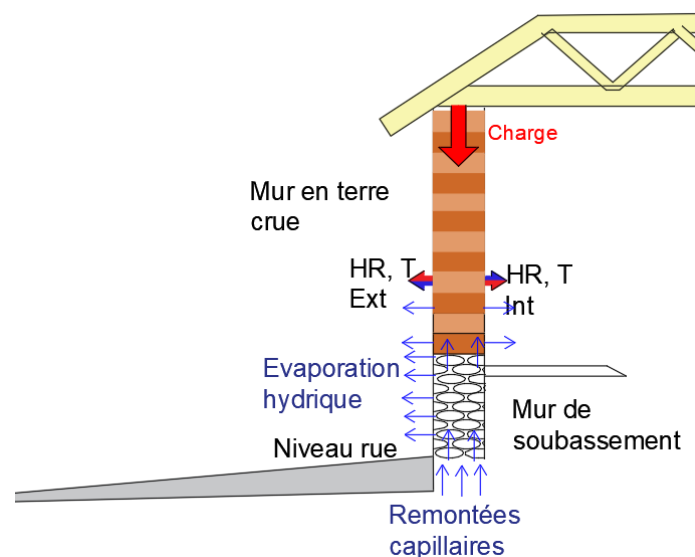


Figure 3 : Mécanismes thermo-hydro-hydro-mécaniques (THHM) liés à un bon état de fonctionnement d'un mur en terre crue : adapté de (Scarato and Jeannet 2015)

2. Les intérêts de la construction en terre

De nos jours, ce principe constructif présente un grand intérêt en raison de ses performances écologiques intéressantes (Pacheco-Torgal et Jalali 2012) . En effet, ce mode constructif présente une faible énergie grise (Morel, et al. 2001) car l'extraction de la matière première s'effectue près du site de construction. En plus de ce faible coût de transport, sa préparation exige très peu de transformations industrialisées. La construction en terre crue repose en grande partie sur la disponibilité d'une main-œuvre qualifiée car elle requière une importante énergie humaine et une longue durée de mise en œuvre. De ce fait, l'émission de gaz à effet de serre d'une construction en terre est inférieure aux quantités de gaz issues de constructions avec des matériaux courants (bois, béton). La Figure 4 synthétise le processus de construction en terre permettant une faible énergie grise et une faible émission à effet de serre par rapport aux constructions en bois et béton.

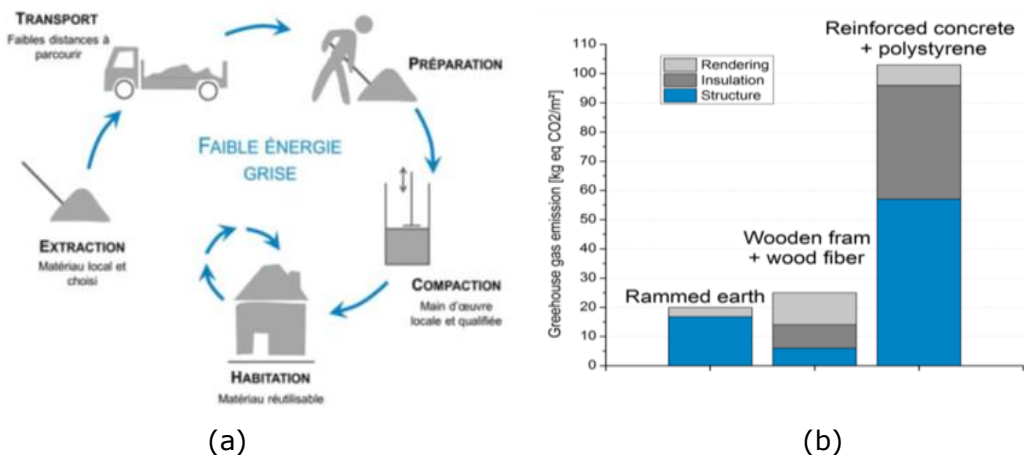


Figure 4 : Performances écologiques d’une construction en terre vis-à-vis de la fabrication à faible énergie grise (a) et à faible émission de gaz à effet de serre (b) (L. Soudani 2016)

Une vertu principale de la construction en terre réside dans sa capacité d’auto-régulation hygrothermique (Fabbri et Morel 2016). En effet, la terre est un matériau hygroscopique (poreux et perméable) donc capable d’échanger des molécules d’eau avec l’air extérieur. Cette propriété se traduit donc par une capacité de régulation de l’humidité, ce qui permet d’améliorer la qualité de l’air intérieur (McGregor, et al. 2014). Également, la terre possède une importante inertie thermique, ce qui lui confère des potentialités de stockage de chaleur issus du rayonnement solaire ou du système de chauffage intérieur. En fonction du climat, une bonne utilisation des effets hygrothermiques et de cette forte inertie peut être un avantage indéniable pour le confort des habitants tout en permettant une réduction de la consommation d’énergie (Woloszyn, et al. 2009). Pour illustrer ce point, (L. Soudani 2016) étudie les valeurs mensuelles d’humidité du bâtiment sur la période de juillet 2014 à juillet 2015. Les résultats sont indiqués dans la Figure 5. Ils montrent un grand écart entre l’humidité relative extérieure (φ_{out}) et l’humidité relative intérieure ($\varphi_{sensor3}$). Les valeurs moyennes mensuelles obtenues à l’intérieur du bâtiment restent généralement dans la gamme d’humidité relative recommandée; ce qui justifie l’intérêt d’une construction en terre pour une bonne qualité d’air à l’intérieur de l’habitat.

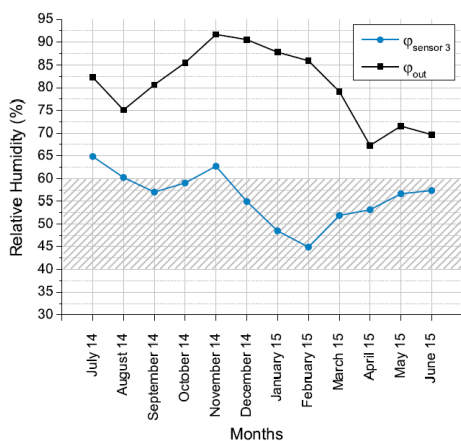


Figure 5: Capacité d’auto-régulation de l’humidité dans une maison en terre crue (Soudani, et al. 2016).

Le profil de la température à différentes heures d’une journée est indiqué dans la Figure 6. Ces profils montrent que les températures à l’intérieur d’un habitat en terre restent satisfaisantes autant en période estivale « spring » qu’en période hivernale « winter ».

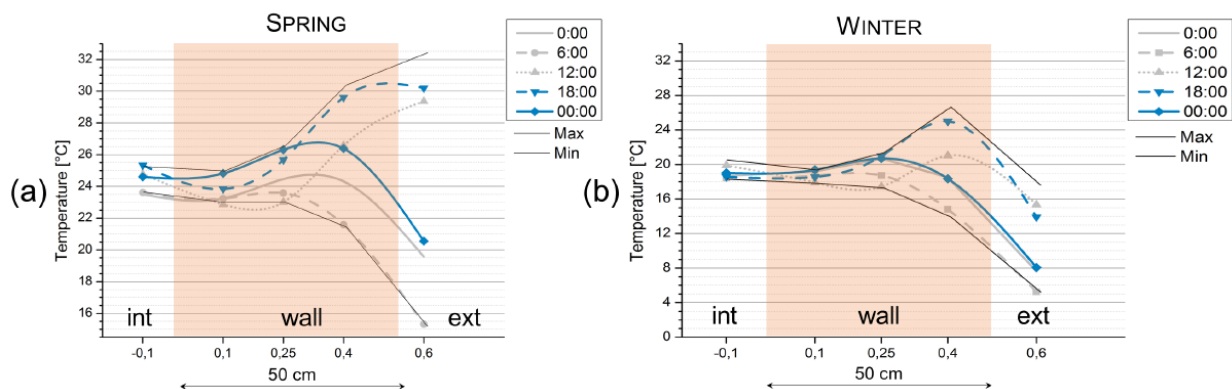


Figure 6: Capacité de stockage thermique d'une maison en terre crue (Soudani, et al. 2016).

3. Les freins au développement de la construction en terre

La construction en terre connaît un regain d'intérêt essentiellement en raison de ses performances écologiques (faible énergie grise, revalorisation de la terre) et bioclimatiques (auto-régulation thermique et hygrométrique) (Fabbri et Morel 2016). En ce sens, la promotion de ce type de construction s'élargit sur la scène régionale (programme ABITerre) pour séduire même des acteurs à l'international (Terra Arward, Terra Lyon 2016). Il est à souligner que la construction en terre est une technique qui continue à évoluer de nos jours. Du point de vue du procédé constructif, la préfabrication des murs en pisé et leur acheminement sur site permet de réduire la durée du projet de construction (Van Damme and Houben 2018). En ce qui concerne le matériau terre, l'ajout d'adjuvants tels que les superplastifiants permet une auto-compaction du matériau dans les coffrages (Ouellet-Plamondon and Habert 2016). L'influence de la méthode de compaction sur les propriétés microstructurales, mécaniques et hygrothermiques a aussi été abordée par (Walter-Bruno, et al. 2016). Ces auteurs montrent l'intérêt de l'hypercompactage (compactage à des pressions proches de 100MPa) pour obtenir des performances mécaniques de la terre crue comparables à des briques en terre cuite.

Malheureusement, si tous ces avancées sont prometteuses pour l'essor de la construction en terre, la promotion de la terre crue comme matériau de construction se heurte malgré tout à plusieurs problématiques qui freinent son développement. Les principaux freins évoqués par (Leylaverigne 2016) sont répertoriés dans la Figure 7.

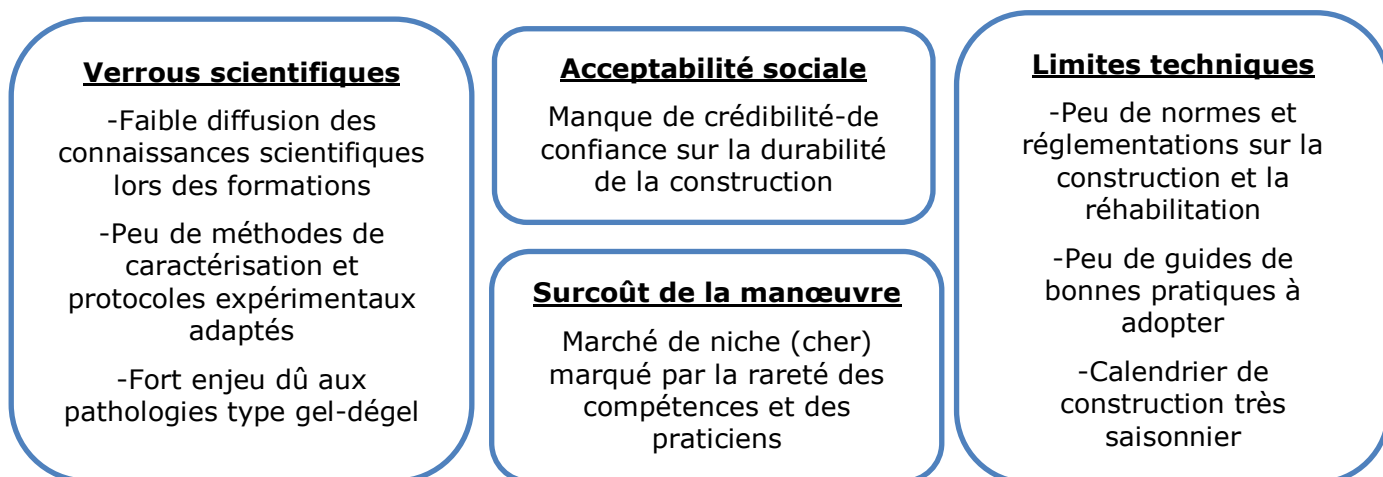


Figure 7: Synthèse des principaux freins de développement de la terre comme un matériau de construction (Leylaverigne 2016)

Globalement, le frein de développement de la construction en terre s'explique par une insuffisance dans la capitalisation et la diffusion des connaissances scientifiques et des savoir-faire techniques. Cela se dénote notamment par l'absence de protocoles standardisés relatifs à la caractérisation du matériau, à l'évaluation de ses performances et l'appréhension de son comportement. Cependant, ce manque commence à se combler grâce à l'intérêt et aux activités

de la communauté scientifique à l'image du comité technique de la RILEM visant à développer des protocoles expérimentaux pouvant constituer des essais normalisés (Fabbri, Morel and Gallipoli 2018).

La terre crue est un matériau multiphysique. En effet, une construction en terre doit résister à des sollicitations mécaniques. En plus, elle est exposée à des sollicitations extérieures dues aux conditions environnementales (pluies-vent-neige) à l'origine des mécanismes d'érosion (Bui 2008) et des gradients hygrothermiques (L. Soudani 2016), qui vont modifier son comportement mécanique (Champiré 2017). Ce couplage d'actions thermo-hydro-hygro-mécaniques génère des mécanismes complexes à modéliser en raison de l'interdépendance des paramètres d'étude. A plus forte raison si des phénomènes de changement de phase se produisent au sein du réseau poreux du matériau, comme le gel-dégel, les mécanismes de transfert de masse et de chaleur peuvent générer une importante humidification de la structure voire l'endommager (Vignes-Adler 1976). La question de la durabilité d'une construction en terre dans les régions froides est intimement liée à la question de la résistance au gel du matériau ; ce qui limite le développement des constructions en terre dans les régions froides. D'autant plus qu'il n'existe pas de normes d'essai permettant d'évaluer la résistance du matériau terre au gel. On appelle résistance au gel la propriété d'un matériau à résister face à des cycles de gel et de dégel sans présenter des signes d'endommagements.

Chapitre 2

Problématique de l'impact du gel-dégel cyclique sur la durabilité des constructions en terre

1. L'enjeu de durabilité des constructions en terre

1.1 L'eau comme principal problème de durabilité

La fabrication à une teneur en eau proche de l'optimum proctor permet d'améliorer la résistance mécanique d'un mur en terre. En effet, la terre crue présente une forte affinité à l'eau ; ce qui va fortement influencer sur ses performances mécaniques. L'effet de l'humidité relative sur la résistance mécanique a largement été abordé dans (Champiré, Fabbri, et al. 2016) où il est montré une réduction par 3 voire 4 de la résistance mécanique lorsque la teneur en eau chute de 2 à 3 points (cf. Figure 8).

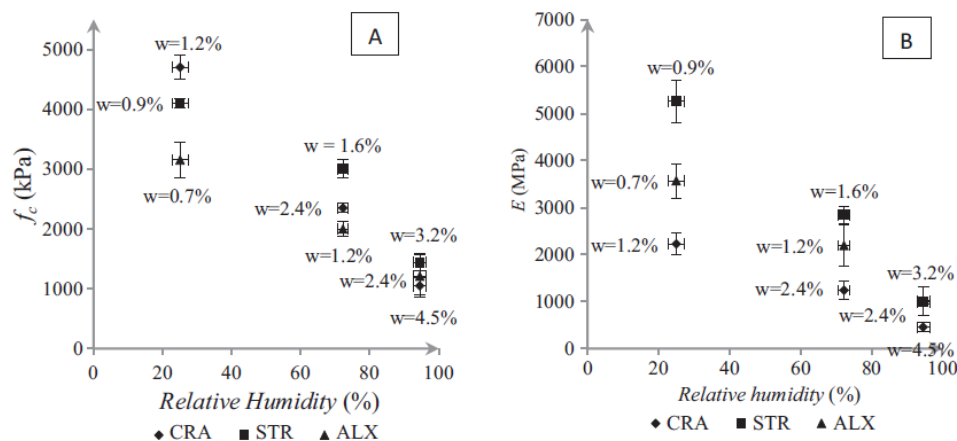


Figure 8 : Variation de la résistance mécanique et du module de Young suivant l'humidité relative (Champiré, Fabbri, et al. 2016)

(Q. Bui, J. Morel et S. Hans, et al. 2014) ont aussi prouvé que les performances mécaniques sont fort liées à la teneur en eau du matériau. Une présence excessive d'eau dans le matériau dégrade les performances du matériau et nuit à sa stabilité et sa durabilité.

La durabilité des constructions en terre est généralement évaluée suivant la sensibilité du matériau terre à l'eau. C'est en ce sens que (Bui 2008) constate que l'évaluation de la durabilité repose essentiellement sur la modélisation de l'attaque humide due au processus d'érosion hydrique. Les essais courants d'érosion sont l'essai d'arrosage (« spray test »), l'essai de goutte-à-goutte (« drip test ») et l'essai de séchage-humidification (ASTM D559). Malheureusement, plusieurs auteurs (Heathcote 1995), (Ogunye et Boussabaine 2002) (Guettala, Abibsi et Houari 2006) ont montré que ces protocoles standardisés aux matériaux industrialisés sont si agressifs pour le matériau terre qu'ils ne sont pas adaptés à l'évaluation de sa durabilité.

Le comportement hydromécanique du matériau se traduit alors par des performances mécaniques suivant la teneur en humidité et par l'évaluation de la durabilité suivant la résistance à l'attaque humide. Une solution courante pour l'amélioration des performances mécaniques et de la tenue à l'eau du matériau terre consiste à ajouter entre 5% à 12% de la masse sèche un liant hydraulique comme la chaux ou le ciment (Van Damme and Houben 2018) . On parle alors de stabilisation. Toutefois, cette stabilisation au ciment dégrade généralement les performances hygrothermiques du matériau terre (voir annexe C).

1.2 Le gel-dégel comme une menace dans les régions froides

Dans les régions à conditions hivernales rudes, une structure est régulièrement exposée à de fortes fluctuations thermiques le long de sa vie. Celles-ci se manifestent généralement par des cycles de gel-dégel qui viennent endommager la structure et mettre en jeu sa durabilité.

Dans le cas des constructions en terre, des erreurs de rénovations peuvent provoquer d'une part une rehausse de voirie, ce qui réduit voire enterre le mur de soubassement ou d'autre part une perméabilisation du mur en terre (couche imperméable empêchant la diffusion de vapeur d'eau). La Figure 9 présente les conséquences des mauvaises réhabilitations de constructions sur les attaques humides provenant des remontées capillaires et de la condensation de vapeur d'eau dans le mur. Ce dernier subit alors de fortes infiltration et rétention d'eau. Cela peut davantage

nuire à la durabilité du matériau dans le cas d'une action couplée avec le gel-dégel. En ce sens, (Scarato and Jeannet 2015) observe que la plupart des effondrements ont eu lieu lors de la période de dégel. En effet, les cycles de gel-dégel vont induire une importante humidification des murs.

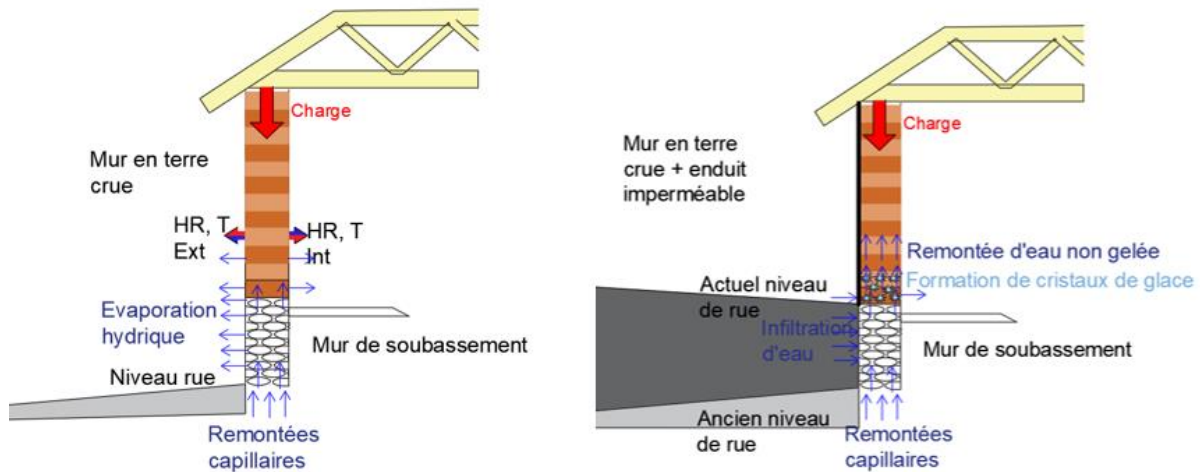


Figure 9: Erreurs de rénovations engendrant une attaque humide sur une structure en terre au dégel

Ainsi, vu la terre est un matériau poreux, il est important de rappeler les principaux mécanismes et théories d'endommagement des matériaux poreux au gel.



(a)

(b)

Figure 10: Exemple d'endommagement d'une structure en terre par écaillage (a) ou par gel interne (b) (Illustrations de P. Scarato)

L'endommagement au gel-dégel se manifeste par deux mécanismes : la microfissuration interne et l'écaillage de surface (Marchand, Sellevold et Pigeon 1994). Bien que ces deux formes de détériorations puissent se produire simultanément, (Pigeon 1989) souligne qu'elles sont distinctes et indépendantes l'une de l'autre. D'une part, l'endommagement interne (dit gel-dégel de volume) se traduit par l'apparition de microfissurations au sein du réseau poreux du matériau et donc d'une modification de la résistance mécanique, d'une diminution du module d'élasticité dynamique (Litvan 1980) et d'une modification des phénomènes de transfert de masse et de chaleur. D'autre part, on parle du gel-dégel de surface dit écaillage, dès lors qu'une dégradation esthétique de la surface est générée. Les principaux signes visibles de ce désordre sont la fissuration externe et l'écaillage qui traduisent une perte de masse modifiant ainsi la perméabilité du matériau.

2. Les théories d'endommagement au gel dans un milieu poreux

Les théories liées aux mécanismes d'endommagement au gel ont été amorcées par les célèbres travaux de Powers. (T. Powers 1949). Elles sont essentiellement basées sur les phénomènes observés sur les matériaux cimentaires.

Au début, (T. Powers 1949) présente la théorie des pressions hydrauliques selon laquelle l'expansion volumique génère un écoulement d'eau non-gelée vers un exutoire type bulles d'air. La baisse de température engendre la nucléation puis la cristallisation de glace dans le réseau capillaire d'un matériau cimentaire. Sachant que le changement de phase liquide-glace s'accompagne d'une expansion volumique de 9%, l'excès d'eau liquide ne pouvant plus être contenu dans les pores gelés est expulsé vers des vides d'air. C'est cela qui justifie l'intérêt d'agents entraîneurs d'air dans la résistance au gel-dégel des matériaux cimentaires (Chatterji 2003). Ce transfert d'eau non-gelé développe une surpression hydraulique. De ce fait, des fissures se développent au sein du réseau poreux dès lors que la pression hydraulique excède la résistance en traction de la matrice solide.

Plus tard, le même auteur observe des phénomènes contradictoires à sa première théorie : de l'eau liquide migrait vers les zones gelées lors de la cristallisation. Ce processus physique s'explique par le fait que la nucléation de la glace s'accompagne aussi d'une concentration locale de sels dissous au voisinage direct de la glace. Ainsi, par effet d'osmose, le gradient de concentration ionique favorise un mouvement d'eau vers les pores gelés. (Powers and Helmuth 1953) présente ainsi cette deuxième théorie complémentaire à la première sous le nom de théorie des pressions osmotiques. Ces pressions osmotiques sont d'autant plus importantes que la concentration en sels augmente ; ce qui explique notamment l'action préjudiciable des sels déverglaçant sur les routes.

Cette théorie selon laquelle l'attraction d'eau liquide vers le front de gel est possible s'explique davantage avec le phénomène de cryosuccion. Il s'agit d'un mécanisme d'équilibrage due à la dépression de l'eau liquide en contact avec le front de gel par rapport à l'eau liquide éloignée. Egalement, la cristallisation dans les pores engendre une absorption d'eau supplémentaire. Au fur et à mesure des cycles de gel-dégel, la re-saturation d'un matériau poreux au contact d'eau lors du dégel produit une augmentation de la teneur en eau et du degré de saturation locale dans les gros pores (Litvan 1980). Ainsi, au-delà d'un degré de saturation critique du matériau, l'effondrement au gel-dégel est imminent (Fagerlund 1973).

A la suite de ces théories, plusieurs auteurs dont G.W. Scherer (Scherer 1999) et Coussy (O. Coussy 2005) ont largement contribué au développement de modèles de comportement poromécanique généralement formulés par une approche thermodynamique de la cristallisation d'eau liquide dans le réseau poreux déformable du matériau. En effet, le processus de cristallisation d'eau liquide dans les pores induit des pressions internes à l'origine de l'endommagement du matériau. Dans leur modèle thermo-poro-élastique saturé, (Coussy and Monteiro 2007) décomposent le phénomène de cristallisation à basses températures en deux processus physiques bien distincts : le changement de phase liquide → glace à volume constant et la déformation mécanique des pores gelées. Ces deux processus sont illustrés dans la Figure 11.

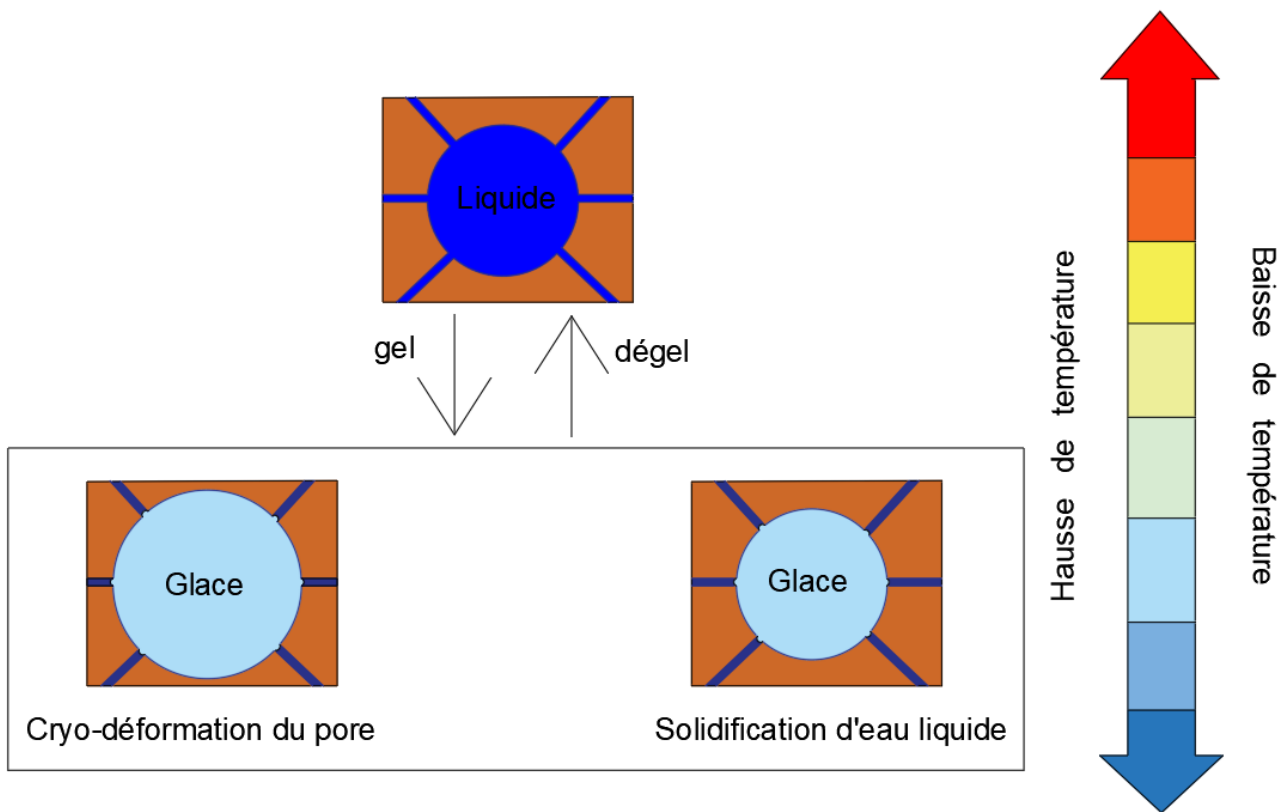


Figure 11: Processus de cristallisation dans les pores dû aux cycles de gel-dégel

3. La physique du gel-dégel d'un matériau poreux saturé

3.1 L'équilibre liquide-glace en milieu non-confiné

Le changement de phase de l'eau est possible sous certaines conditions de température et de pression. La Figure 12 présente le diagramme des phases de l'eau par la fonction température-pression qui détermine les domaines d'existences de trois phases de l'eau. A titre d'exemple, sous pression atmosphérique ($p_{atm}=1 \text{ bar}$), l'eau se solidifie à une température $T_0=273,15 \text{ K}$.

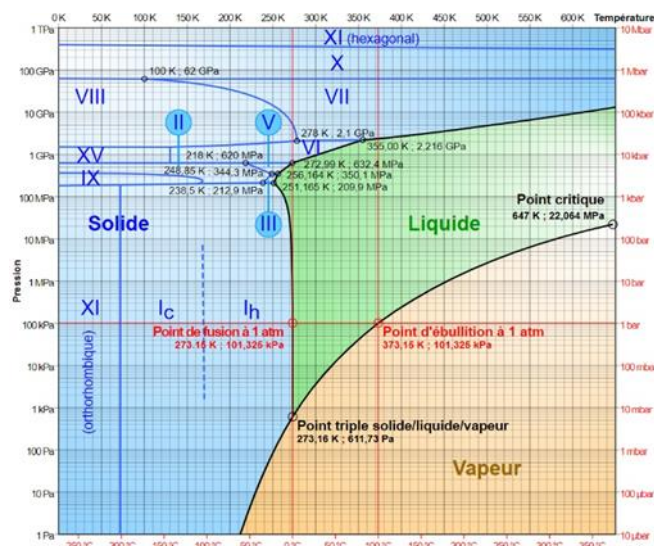


Figure 12 : Le diagramme de phases de l'eau – (Figure d'Olivier Descout)

Il est à noter que la glace est corps pur puisque la solidification de l'eau s'accompagne d'un rejet de toutes les substances chimiques qu'elle contenait.

Pour toute phase i , l'enthalpie libre massique g_i se définit comme :

$$dg_i = \frac{1}{\rho_i} dp_i - s_i dT$$

Avec pour toute phase i , g l'enthalpie libre massique ρ_i la masse volumique, p_i la pression, s_i l'entropie massique et T la température.

Sous l'hypothèse d'un processus de gel instantané, l'équilibre thermodynamique lié au changement de phase liquide \rightarrow glace s'exprime par l'égalité de leur enthalpie libre massique

$$\frac{1}{\rho_L} dp_L - s_L dT = \frac{1}{\rho_C} dp_C - s_C dT$$

Dans un milieu non-confiné, l'équilibre mécanique au niveau de l'interface liquide-glace se traduit par l'égalité de leur pression.

$$p = p_L = p_C$$

La combinaison de l'équilibre thermodynamique et de l'équilibre mécanique donne alors après intégration :

$$\left(\frac{\rho_C^0}{\rho_L^0} - 1 \right) p = \Delta S_f (T_0 - T)$$

Avec T la température considérée, T_0 la température de fusion ($T_0 = 273,15 \text{ K}$), ρ_L^0 et ρ_C^0 les masses volumiques associées à l'état de référence (conditions atmosphériques) respectivement de la phase liquide ($\rho_L^0 = 0,997 \text{ kg/L}$) et de la phase glace ($\rho_C^0 = 0,917 \text{ kg/L}$) et ΔS_f l'entropie de fusion de l'eau par unité de volume de cristal de glace ($\Delta S_f = \rho_C^0 (s_L^0 - s_C^0) = 1,2 \text{ MPa/K}$).

On comprend alors qu'à $T=0^\circ\text{C}$ et sous pression atmosphérique, la solidification de l'eau débute par la nucléation de cristaux de glace en raison de l'équilibre thermodynamique du liquide et de la glace. Au cours du gel, la baisse de température en dessous du point d'équilibre (T, p), les cristaux de glace se développent et auront tendance à grossir. On peut parler de cristallisation. Il faut alors imposer une compression afin d'atteindre la pression correspondant au nouvel état d'équilibre.

Cependant, les résultats sur les points de changements de phase définis dans la Figure 12 ne s'appliquent toujours pas dans le cas du gel dans un milieu poreux. En réalité, même en dessous du point de solidification d'eau libre, le réseau poreux contient toujours de l'eau non-gelée. A ce sujet, (Bouyoucos 1920) a mis en évidence la présence d'une fraction d'eau demeurant non gelée dans un sol argileux exposé à des températures atteignant -78°C . Plus tard ; les travaux de (Miller 1973) justifient ce phénomène par la présence de tensions superficielles due à la capillarité. On parle alors d'un état de surfusion de l'eau.

3.2 L'équilibre liquide-glace en milieu poreux saturé

Nous représenterons le réseau poreux par un modèle idéal constitué des pores ayant géométrie sphérique avec un rayon R_i . Nous allons également considérer une interface liquide-glace de forme sphérique de rayon $r \ll R_i$ et de pression capillaire $p_{cap} = p_C - p_L$. L'équilibre mécanique de l'interface est ainsi donné par l'expression de cette pression capillaire dans la relation de Young-Laplace sous la forme généralisée :

$$p_{cap} = p_C - p_L = \gamma_{CL} \cdot \kappa_{CL}$$

Avec p_C la pression du cristal de glace, p_L la pression du liquide, γ_{CL} la tension superficielle $\gamma_{CL} = 36 - 0,25(T_0 - T)$ (mN/m) selon la relation de Matala et κ_{CL} la courbure de l'interface

L'approche micromécanique de l'interface liquide-glace repose sur deux modèles (Scherer 1999).

Dans le premier cas, on considère un contact direct dans les pores entre le cristal de glace et les parois de la matrice solide. Cela se traduit par un angle de contact entre le cristal et les parois des pores noté θ . Nous allons alors exprimer le rayon d'entrée du front de gel : r .

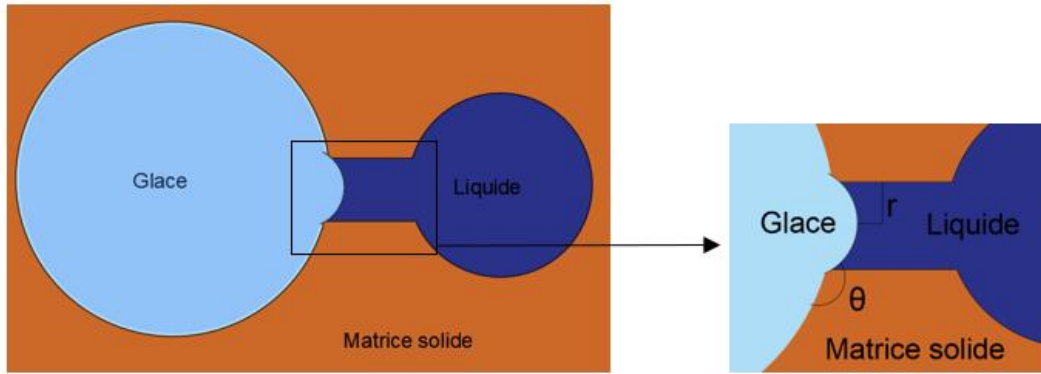


Figure 13 : Modèle d'équilibre liquide-glace en considérant l'angle de mouillage

Dans ce cas, la relation de Young-Laplace donne l'équilibre mécanique liquide-glace sous la forme

$$p_{cap} = \gamma_{CL} \cdot \kappa_{CL} = \gamma_{CL} \cdot \frac{2 \cdot \cos(\theta)}{r_c}$$

Dans la seconde configuration présentée par (Scherer 1999), la courbure interfaciale glace-liquide prend en compte l'existence d'un film d'eau non-gelée exerçant une pression sur les parois des pores gelés. L'existence de cette couche d'eau non-gelable dans une zone gelée est notamment vérifiée par (Fagerlund 1973) qui donne l'expression de l'épaisseur de la couche non gelée δ :

$$\delta_c = 19,7 \sqrt[3]{\frac{1}{T_0 - T}} \text{ (Å)}$$

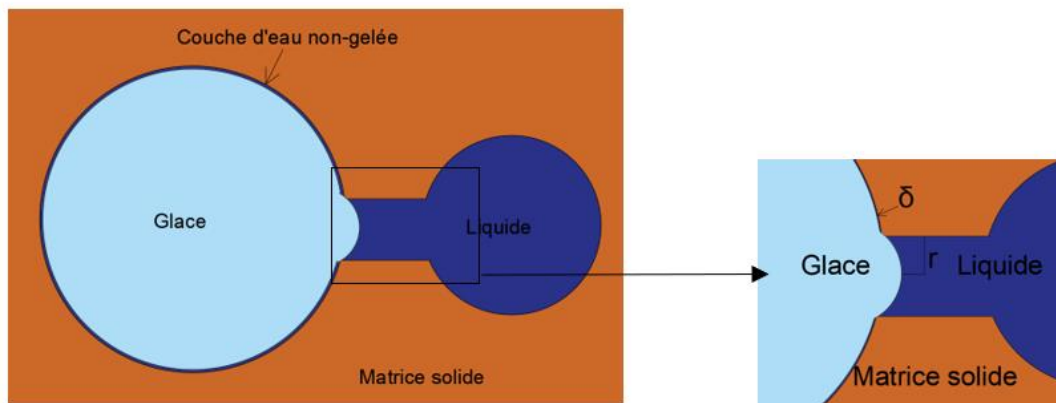


Figure 14 : Modèle d'équilibre liquide-glace en considérant l'épaisseur d'eau non-gelée

Dans ce modèle, il n'y a plus de contact entre le cristal de glace et les parois donc l'angle de mouillage considéré dans le modèle précédent $\theta = 0^\circ$. Ainsi, la pression capillaire s'exprime comme :

$$p_{cap} = \gamma_{CL} \cdot \kappa_{CL} = \gamma_{CL} \cdot \frac{2}{r_c - \delta_c}$$

C'est ce second modèle qui sera retenu dans la suite de notre étude.

Ainsi, dans un milieu poreux, l'équation d'équilibre tient compte de la pression capillaire :

$$\left(1 - \frac{\rho_G^0}{\rho_L^0}\right) (p_L - p_{atm}) + p_{cap} = \Delta S_f (T_0 - T)$$

Avec p_L la pression de la phase liquide et p_{atm} la pression atmosphérique

En considérant $\left(1 - \frac{\rho_G^0}{\rho_L^0}\right) (p_L - p_{atm}) \ll p_{cap}$ la relation retenue est

$$p_{cap} = \Delta S_f(T_0 - T)$$

Nous pouvons alors conclure de conclure sur l'expression de la relation Gibbs-Thomson

$$r_c = f(T) = \frac{2\gamma_{CL}}{\Delta S_f \cdot (T_0 - T)} + \delta_c$$

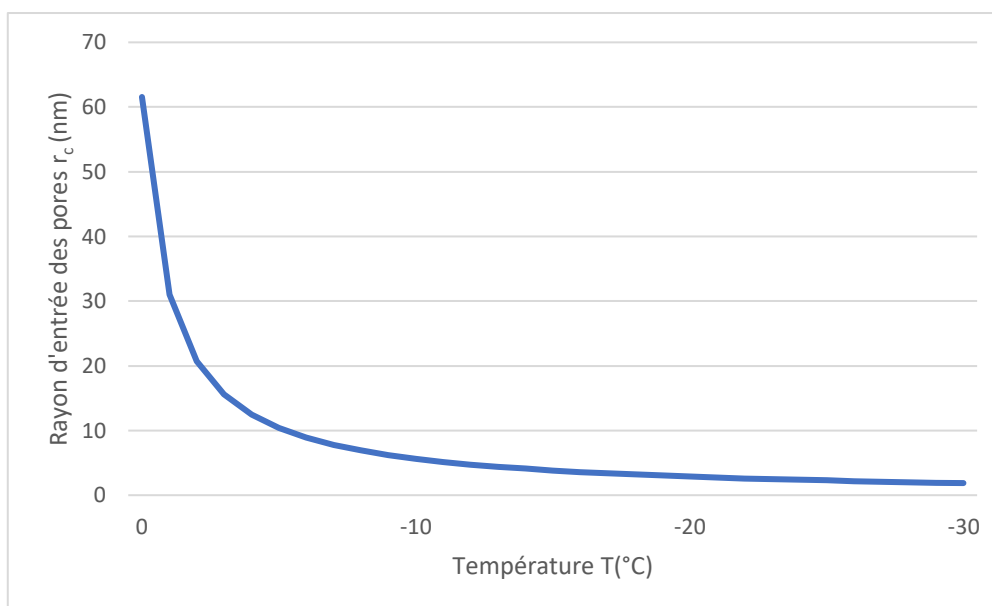


Figure 15 : Evolution du rayon d'entrée du gel dans les pores en fonction de la température

La Figure 15 montre que le gel dans cette gamme de température (entre 0°C et -30°C) concerne essentiellement les mésopores (pores de rayons compris entre 2nm et 50nm). En ce qui concerne les micropores (<2nm), le gel dans ces pores a lieu pour des températures en dessous de -30°C. En milieu poreux, la géométrie des pores s'ajoute alors à la température pour caractériser le point de solidification de l'eau liquide dans les pores et l'évolution du processus de cristallisation. On comprend alors de cette relation $r_c = f(T)$ que la propagation de la cristallisation s'effectue graduellement des pores les plus larges aux plus petits (cf Figure 16).

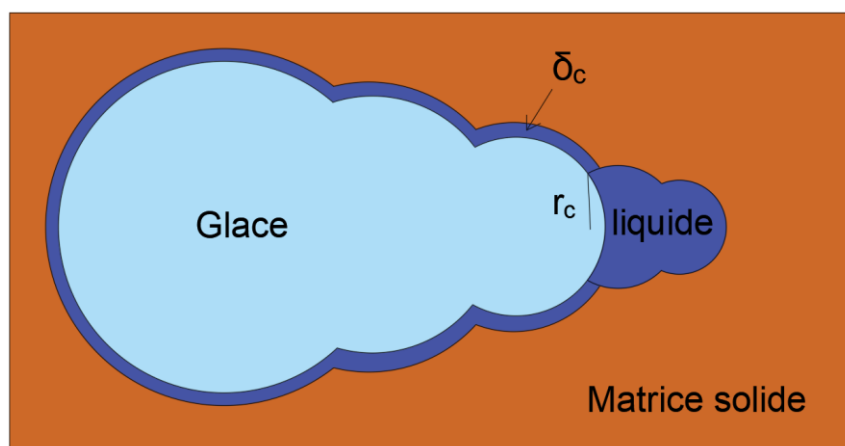


Figure 16 : Evolution du gel dans le réseau poreux suivant la décroissance des rayons de pores
 Une fonction mathématique dite fonction de distribution de pores traduit cette géométrie d'un milieu poreux. Elle est essentielle dans la détermination du degré de saturation en glace ou liquide.

3.3 L'effet de la distribution de pores sur le degré de saturation liquide

La distribution des pores est un concept lié au réseau poreux d'un matériau permettant d'accéder aux propriétés de mouvements de fluides (eau, air) ou de solides comme la glace. Ainsi, la distribution des tailles de pores traduit le volume total des pores dont la géométrie est

strictement supérieure à une valeur r . Mathématiquement, elle s'exprime comme une fonction $V(r)$ telle que

$$V(r_{min}) = \Phi_0 V_0 \text{ et } V(r_{max}) = 0$$

Avec $\Phi_0 V_0$ le volume initial de l'espace poreux.

La Figure 17 illustre cette définition de la fonction de distribution de pores $V(r)$.

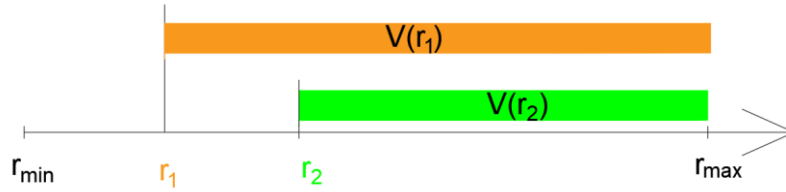


Figure 17 : Schématisation de la fonction de distribution de pores $V(r)$

Expérimentalement, sous l'hypothèse du comportement élastique de la matrice solide, la courbe de la distribution de taille des pores est généralement obtenue par des mesures directes avec un appareil diélectrique ou de manière indirecte comme le « Mercury Intrusion Porosimetry » (MIP) ou la « gravimetric water desorption » (WD) (Fabbri and Chong, Indirect measurement of the ice content curve of partially frozen cement based materials 2013).

De ce fait, le concept de la distribution des tailles des pores peut s'appliquer à l'étude de l'évolution du degré de saturation d'une phase quelconque en l'occurrence la phase glace. En effet, si l'on considère $\Phi_0 V_0$ le volume de l'espace poral initial du matériau et $r = f(\Delta T)$ le rayon de l'interface liquide-glace donné par la relation de Thomson, $V(r)$ traduira le volume des pores occupés par la phase glace. Ainsi, le degré de saturation en glace S_c s'exprime comme suit :

$$(1 - S_L) = S_c \left(r_c = \frac{2\gamma_{CL}}{\Delta S_f \cdot (T_0 - T)} + \delta_c \right) = \frac{V(r)}{\Phi_0 V_0}$$

La courbe de distribution de tailles de pores constitue alors une méthode de détermination de la courbe de gel d'un matériau poreux. Dans les cas des méthodes indirectes, c'est l'utilisation des fonctions inverses $\Delta T = f^{-1}(r_c)$ qui permet d'aboutir à la courbe de gel d'un matériau poreux saturé. Un exemple d'utilisation de la courbe de distribution de taille de pores pour la courbe de gel est donné dans la Figure 18.

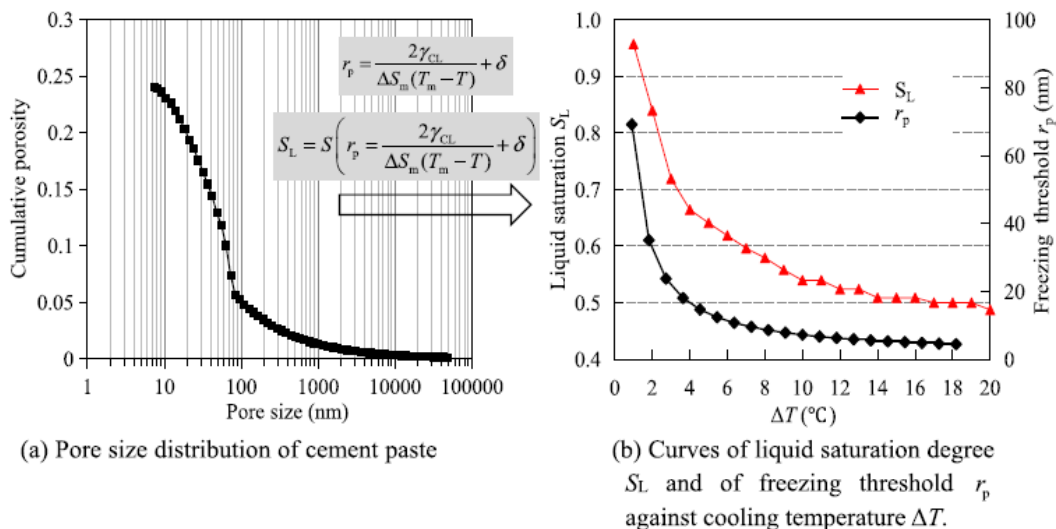


Figure 18 : Détermination de la courbe de gel à partir de la courbe de distribution de pores dans le cas d'un matériau saturé (Liu, Qin and Wang 2018)

4. La physique du gel-dégel d'un matériau poreux non-saturé

4.1 Equilibre de l'interface gaz-liquide

Dans les conditions atmosphériques, un matériau poreux non-saturé est diphasique avec une phase liquide et une phase gazeuse (vapeur d'eau + air sec). La Figure 19 illustre l'état d'équilibre de ces deux phases dans un milieu poreux non-saturé.

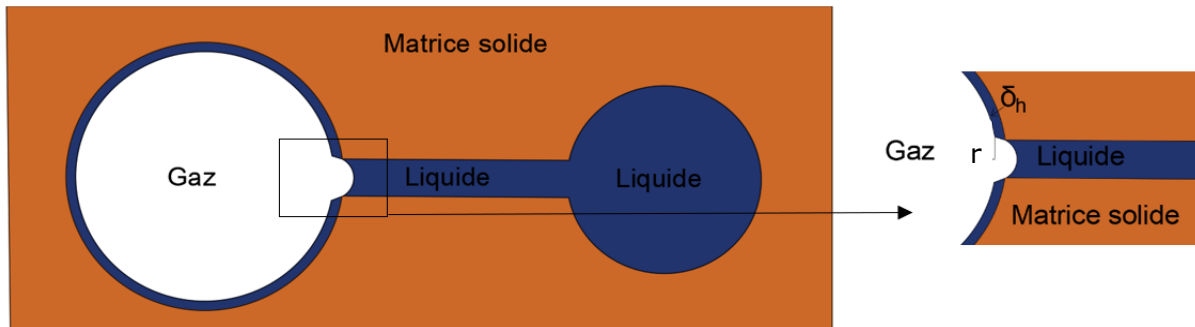


Figure 19 : Equilibre liquide-gaz dans le réseau poreux d'un matériau non-saturé

La prise en compte d'une couche d'eau adsorbée d'épaisseur δ_h sur les parois des pores modifie l'écriture de la loi de Jurin :

$$p_G - p_L = \frac{2\gamma_{GL}}{r_h - \delta_h}$$

Avec p_G la pression dans la phase gazeuse, p_L la pression dans la phase liquide, γ_{GL} la tension superficielle (gaz-liquide), r_h le rayon d'entrée et δ_h l'épaisseur de la couche d'eau adsorbée sur les parois du réseau poreux.

La relation de Kelvin permet de relier la succion à l'humidité relative :

$$s = p_G - p_L = -\frac{\rho_L RT}{M_{H_2O}} \ln(\varphi)$$

Avec s la succion, p_G la pression partielle de tous les gaz (la vapeur d'eau + l'air), p_L la pression d'eau liquide, M_{H_2O} la masse molaire de l'eau ($M_{H_2O}=18$ g/mol), R la constante des gaz parfaits ($R=8,314$ J/mol/k), T la température et φ l'humidité relative.

Les équations permettent de relier l'humidité relative de l'environnement à la géométrie des pores pouvant contenir de l'eau liquide. On définit alors le rayon maximal des pores pouvant contenir du liquide r_h comme :

$$r_h = g(\varphi) = -\frac{2 \cdot \gamma_{GL}}{\frac{\rho_L RT}{M_{H_2O}} \ln(\varphi)} + \delta_h$$

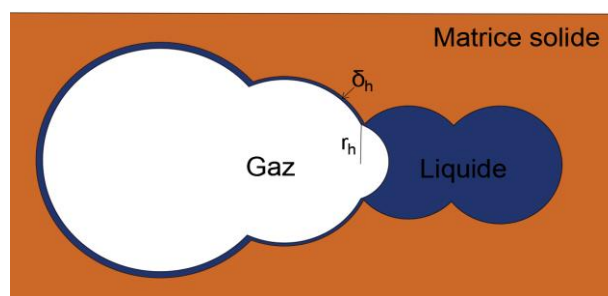


Figure 20 : Evolution de la condensation capillaire dans le réseau poreux suivant la décroissance de la taille des pores

Cette combinaison de la loi de Kelvin et de l'équation de Young-Laplace caractérise les phénomènes de condensation capillaires en fonction de la taille des pores (cf Figure 20). La condensation a lieu généralement pour des humidités importantes ($\varphi > 0,4; 0,5$) (Kaufman 1999).

Ainsi, dans une ambiance d'humidité fixée à φ , les pores de rayon supérieur à $r_h = g(\varphi)$ ne peuvent contenir que la phase gazeuse. A ce sujet, dans l'étude de la capacité de régulation d'humidité du matériau terre (Walter Bruno, Mendes, et al. 2018) proposent une approximation de cette fonction $r_h = g(\varphi)$ en négligeant l'épaisseur de la couche d'eau adsorbée δ_h et l'hystérésis des mécanismes de rétention. L'expression et les grandeurs considérées sont :

$$r_h = g(\varphi) = -\frac{2 \cdot \gamma_{GL}}{\frac{\rho_L RT}{M_{H_2O}} \ln(\varphi)}$$

Grandeurs	Valeurs
γ_{GL} (mN/m)	72,3
ρ_L (g/cm ³)	0,997

Tableau 1 : Valeurs de la tension superficielle liquide-gaz et de la masse volumique de l'eau liquide pour une température T=23°C (Walter Bruno, Mendes, et al. 2018)

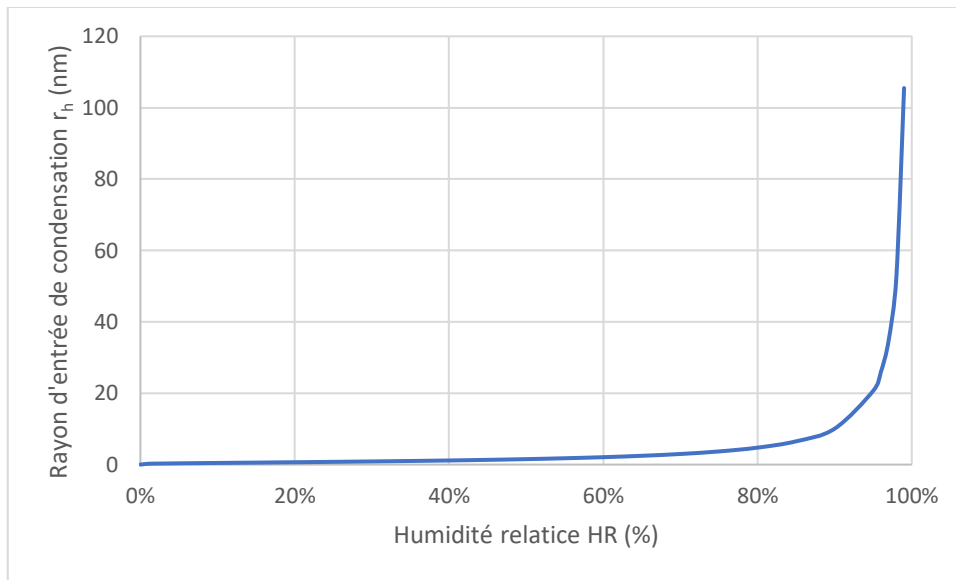


Figure 21 : Evolution du rayon d'entrée de condensation en fonction de l'humidité relative HR

La Figure 21 illustre la taille des pores dans lesquels les phénomènes de condensation et d'évaporation se produisent sous l'effet des cycles de séchage-humidification à une température T=23°C. Ainsi, nous remarquons, à titre d'exemple, que lors d'un essai de sorption-désorption par variation cyclique de l'humidité relative entre 33% et 75%, les phénomènes de condensation et d'évaporation se produisent dans les pores de tailles comprises entre 0,9 nm et 3,7 nm approximativement.

4.2 Le processus de gel dans les pores d'un matériau non-saturé

Dans le cas de matériau non-saturé, le processus de condensation capillaire et de cristallisation est essentiellement piloté par la taille des pores et l'ambiance extérieure (température et humidité relative). En effet, à une température T (T=ΔT+T₀) et une humidité relative $\varphi = \frac{p_v}{p_v^{sat}(T)}$ donnée, la géométrie des pores permet de déterminer le domaine d'existence de différentes phases dans le réseau poreux et ainsi le degré de saturation de chaque phase.

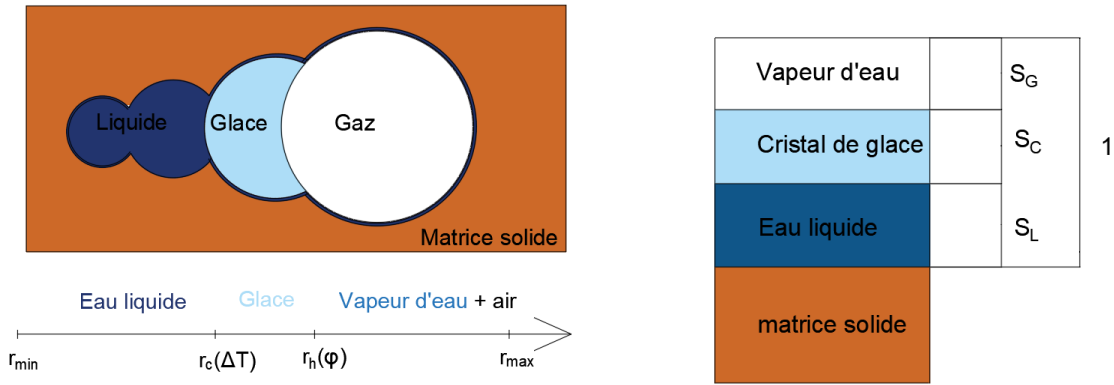


Figure 22 : Représentation globale du domaine d'existence des phases dans le cas d'un matériau non-saturé exposé au gel

La Figure 22 permet de remarquer que pour de faibles différences de températures ΔT ou d'humidité relative HR, le point de gel peut se situer au-delà du point de condensation capillaire ($r_c > r_h$) et dans ce cas, l'eau liquide dans le réseau poreux du matériau ne peut geler. La distribution des pores explique essentiellement l'évolution de chaque phase, en l'occurrence elle illustre le processus de cristallisation dans le réseau poreux.

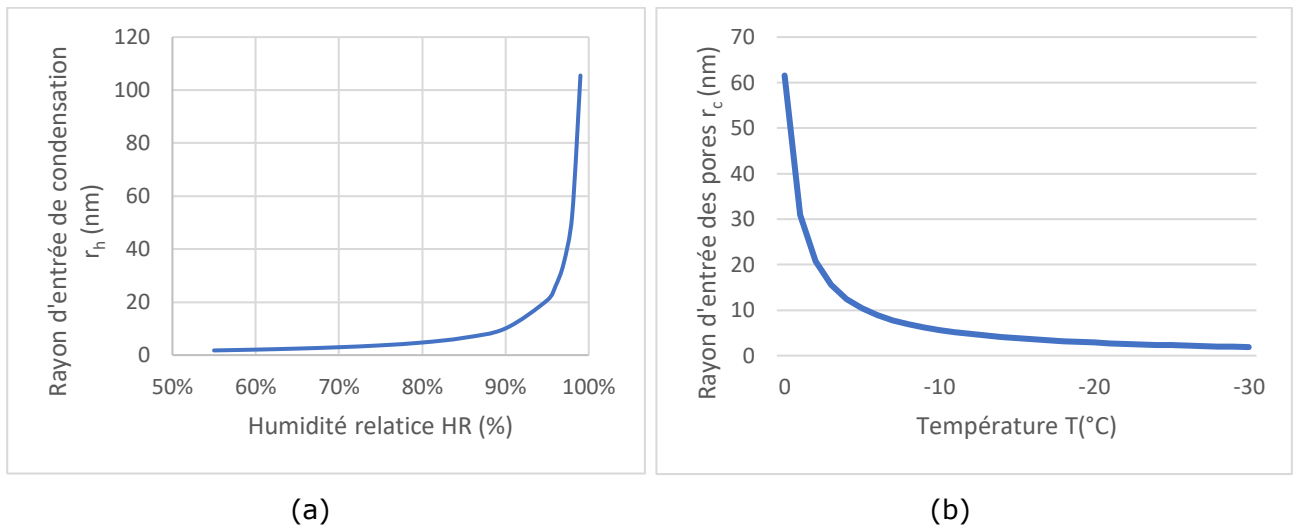


Figure 23 : Comparaison entre les rayons de pores exposés à la condensation (a) et au gel (b)

La Figure 23 montre que pour la gamme de température considérée, le gel se produit essentiellement dans les pores de taille supérieure à 2 nm (courbe b). Dans de tels pores, la condensation capillaire n'est possible que pour des valeurs d'humidité relative HR au-delà à 60% (courbe a). Lors du gel-dégel, à partir de la connaissance de l'humidité relative HR et la température T, il est envisageable d'avoir une indication sur les rayons de pores contenant des cristaux de glace et de l'eau liquide et ainsi déterminer le degré de saturation en glace ou en liquide. En effet, si dans le cas saturé, il est possible d'évaluer le degré de saturation de glace comme une fonction de la température uniquement en utilisant la fonction de la distribution des pores, la condition de non-saturation initiale du matériau introduit le degré de saturation liquide initiale comme un paramètre clé dans la définition du degré de saturation en glace.

$$S_C[\Delta T = f^{-1}(rc)] = 0 \quad \text{si } r_c > r_h$$

$$S_C[\Delta T = f^{-1}(rc)] = \frac{V(r_c) - V(r_h)}{\Phi_0 V_0} \quad \text{si } r_c < r_h$$

Cette caractérisation issue de (Fen-Chong, et al. 2013) permet alors d'illustrer dans le cas d'un matériau cimentaire non-saturé initialement l'effet du degré de saturation initiale sur l'évolution du degré de saturation en glace suivant la chute de température lors du gel. La Figure 24 reporte les résultats de la simulation pour deux types de fluides : l'eau (qui se dilate au gel) et le benzène (qui se contracte en se solidifiant).

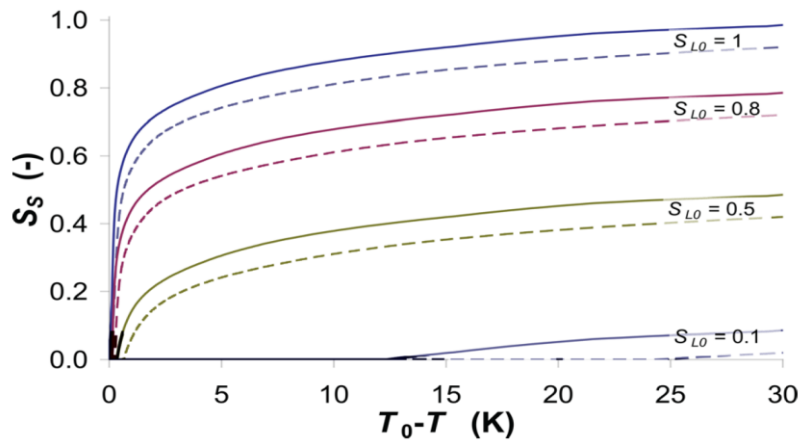


Figure 24 : Influence de la saturation liquide initiale sur la courbe de gel d'un matériau cimentaire contenant soit de l'eau (en trait fin) ou du benzène (en pointillés) (Fen-Chong, et al. 2013)

4.3 Les mécanismes de transfert de masse et de chaleur

4.3.1 Le mécanisme de transfert de masse et de chaleur dans le cas général

Les différences de température et d'humidités relatives sont à l'origine des mécanismes de transfert de masse et de chaleur travers le matériau terre. Les équations relatives à ces mécanismes sont largement abordés dans (Soudani, et al. 2016). L'annexe C de ce rapport présente aussi quelques éléments de compréhension de ces mécanismes.

Le transfert de masse d'eau m_w sous forme liquide et gazeuse est modélisée par l'équation suivante

$$\frac{\partial m_w}{\partial t} = \text{div} \left(\frac{k(S_L)}{\eta_L} (\text{grad}(p_L) - \rho_L \vec{g}) + \frac{M_{H_2O}}{RT} \delta_p \cdot \text{grad}(p_v) \right)$$

Avec $k(S_L)$ est la perméabilité intrinsèque du matériau non-saturé, η_L le coefficient de viscosité dynamique de l'eau, p_L et p_v les pression d'eau liquide et de vapeur d'eau, ρ_L la masse volumique de l'eau liquide, \vec{g} l'accélération de la pesanteur et δ_p le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau.

Le transfert de chaleur par conduction est présenté par l'équation ci-dessous

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(\omega) \cdot \text{grad}(T)) - m_{\rightarrow v}^{\circ} \cdot L(T, \varphi)$$

Où $\rho \cdot c_p$ représente la capacité thermique moyenne du matériau (en considérant toutes les phases et la matrice solide) à pression constante, $\lambda(\omega)$ la conductivité thermique du matériau, $m_{\rightarrow v}^{\circ}$ le taux de variation de la masse d'eau relarguée sous l'effet de la désorption (évaporation) en vapeur d'eau et $L(T, \varphi)$ l'enthalpie massique (ou chaleur latente) d'évaporation.

Le sens de transfert de chaleur obéit à la loi de Fourier. Sous une différence de température, le transfert s'effectue des zones chaudes vers les zones froides. En ce qui concerne le transport de masse d'eau, celui-ci est piloté par le niveau de saturation liquide. Dans un milieu poreux non-saturé, la présence de l'air dans le matériau terre entraîne des phénomènes de succion dus la différence de pression entre le gaz (vapeur d'eau+ air) et de l'eau liquide. De fait, l'eau est conduit des zones saturées vers les zones non-saturées comme l'illustre la Figure 25.

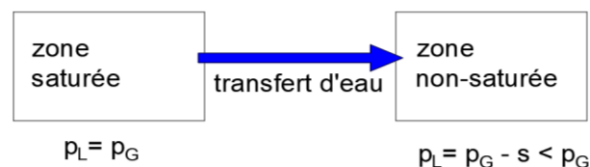


Figure 25 : Sens de transfert de masse d'eau dans un milieu poreux non-saturé

Dans un environnement à une température T , et une humidité relative φ , un matériau poreux non-saturé présente des pores saturés en eau liquide et des pores non-saturés. Cette distinction entre la zone saturée et la zone non-saturée est possible grâce à la fonction $r_h = g(\varphi)$. La succion notée s traduit la différence de pression entre la phase liquide et la phase gazeuse à l'origine du transfert de masse. L'expression de cette succion en fonction de l'humidité relative est donnée par la relation de Kelvin :

$$s = p_G - p_L = -\frac{\rho_L RT}{M_{H_2O}} \ln(\varphi)$$

4.3.2 Le mécanisme de transfert de masse dans le cas du gel

Lorsque la température et l'humidité relative de l'environnement sont propices à la formation de glace dans le réseau poreux du matériau, le milieu poreux est constitué d'une zone gelée et d'une zone non-gelée dont la frontière est fixée par la fonction $r_c = f(T)$. Dans le cas du gel dans un milieu poreux saturé, sous l'hypothèse que le cristal de glace peut se former ($p_c = p_G$), le déplacement de masse s'effectue de la zone non-gelée vers la zone gelée comme l'illustre la Figure 26.

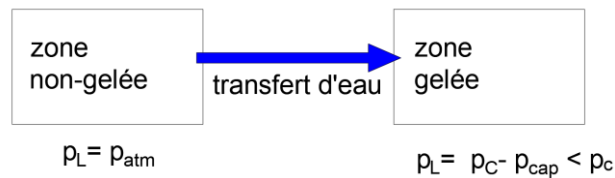


Figure 26 : Sens de transfert de masse d'eau dans un milieu poreux gelée et saturé

Dans un milieu poreux saturé, la présence des cristaux de glace entraîne des phénomènes de cryosuccion dus à la différence de pression entre la glace et de l'eau liquide. Cette différence de pression appelée pression capillaire s'exprime en fonction de la température comme suit :

$$p_{cap} = \Delta S_f (T_0 - T)$$

Dans le cas du gel du matériau terre, le mécanisme de transfert de masse est influencé à la fois par l'état de saturation (transfert d'eau par succion) et par l'état de gel (transfert d'eau par cryosuccion). La combinaison des schémas de transfert de masse des Figure 25 et Figure 26 montre une complexité du mécanisme de transport d'eau à travers le réseau poreux d'un matériau terre qui se traduit par l'absence de connaissance des transferts d'eau faisant intervenir la zone non-saturée et gelée. La Figure 27 illustre cette complexité dans les mécanismes de transfert de masse dans un matériau poreux non-saturé sous gel.

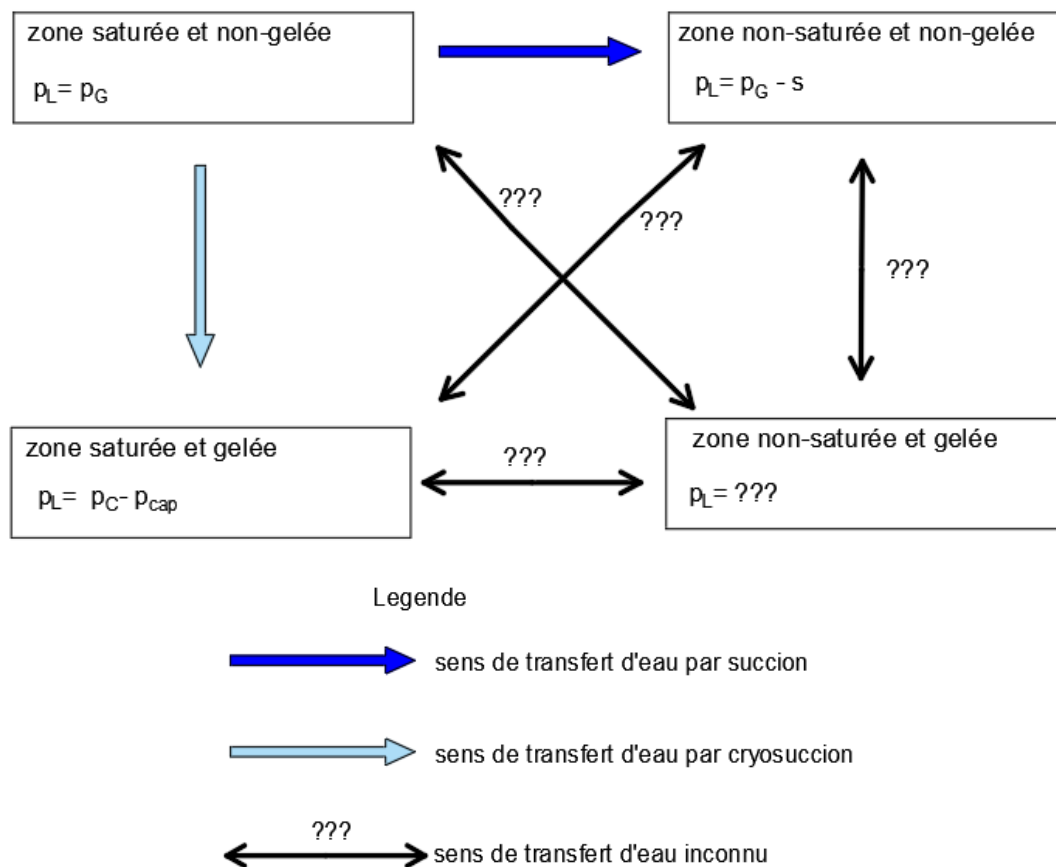


Figure 27 : Complexité du mécanisme de transfert de masse lors du gel d'un matériau non-saturé

5. Les méthodes expérimentales de mesures de la résistance au gel

Les parties précédentes introduisent la problématique de durabilité au gel-dégel des constructions en terre. Sur la base des théories d'endommagement et de la physique de cristallisation, quelques résultats et simulations illustrent le processus du gel dans un matériau poreux non-saturé comme la terre. Dans cette partie, les méthodes expérimentales permettant d'évaluer la résistance au gel sont introduites afin de conclure sur leur application dans le cadre de notre étude.

5.1 Revue des normes d'essais classiques de mesure de résistance au gel interne

L'évaluation de la durabilité au gel interne est effectuée par le biais d'essais de performances suivant la sévérité du gel et le degré de saturation en eau. En effet, pour simuler le cas de gel sévère, le matériau subit un gel et un dégel dans l'eau (NF-P18-424 2008). Pour évaluer la résistance à un gel modéré, le matériau est plutôt exposé à un gel dans l'air et un dégel dans l'eau (NF-P18-425 2008). Les essais sont basés sur la mesure de la déformation longitudinale pour trois éprouvettes prismatiques de géométrie 10x10x40 cm. A la suite d'une période de cure de 28 jours, les échantillons sont placés dans une enceinte climatique pour y subir les cycles de gel-dégel suivant les paramètres normalisés du gel indiqués dans le Tableau 2 :

Paramètres	Valeurs
Durée d'un cycle gel-dégel	10h (4h + 6h)
Nombre de cycles gel-dégel	300
Température de gel	-18 +/- 2°C
Vitesse de refroidissement	6°C/h +/- 1°C/h
Température de dégel	9°C +/- 3°C
Durée de montée en température	>45 mns

Tableau 2 : Définition des paramètres d'un cycle de gel-dégel selon la norme (NF-P18-424 2008) (A1-7-IFSTTAR 2015)

Les mesures de variations dimensionnelles sont prises une fois par semaine, ce qui correspond à une durée de 27-30 cycles. Avec le même essai, il est aussi possible de mesurer le niveau de fissuration interne du matériau par la méthode d'auscultation sonore.

5.2 Revue des normes d'essais de mesure de résistance à l'écaillage

L'évaluation de la résistance à l'écaillage consiste à exposer le matériau à plusieurs cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglace afin de déterminer la quantité de masse perdue par écaillage de la surface exposée au gel. Ces essais reposent principalement sur l'utilisation de solution saline comme agent responsable de l'écaillage.

5.2.1 La norme française XP P 18-420

Cette méthode d'essai (XP-P18-420 2012) est définie pour mesurer la résistance à l'écaillage d'une surface en béton durci exposé à des cycles de gel-dégel. Il s'agit de quantifier la masse des particules écaillées par unité de surface exposée au gel-dégel. L'essai s'applique généralement en présence d'une solution saline du chlorure de sodium (NaCl) à 3% en masse mis en contact avec la surface testée sur une couche de 3mm d'épaisseur. Une période de cure de 26 jours (13 jours à HR=95% et 13 jours à HR=60%) puis d'humidification de 2 jours des échantillons est effectuée avant l'essai. Le contrôle de l'humidité relative, de la rampe de la température est assez fin. En raison de la dispersion des résultats sur des échantillons de même type, un nombre de 5 échantillons est fort recommandé pour cet essai.

5.2.2 La norme américaine ASTM C672

Cette norme consiste à évaluer visuellement l'endommagement des éprouvettes de béton soumis aux cycles de gel-dégel. Le conditionnement s'effectue sur une période de 28 jours dans des conditions semblables à celles définies dans la norme française (XP-P18-420 2012). Les échantillons sont recouverts en surface d'une solution saline contenant du chlorure de calcium (CaCl₂) à 4%. Un cycle comporte une phase de gel d'une durée de 16 à 18h à une température de -18+/-2°C de puis une phase de dégel (à l'air ambiant du laboratoire) de 6 à 18h à une température de 23+/- 2°C et une humidité relative de 45 à 55%. L'évaluation des dégradations est faite tous les 5 cycles jusqu'à l'obtention d'un nombre total de 50 cycles de gel-dégel.

Note	Conditions de surface
0	Pas d'écaillage
1	Très faible écaillage (profondeur max de 3 mm, aucun gros granulats visibles)
2	Ecaillage léger à modéré
3	Ecaillage modéré (quelques gros granulats visibles)
4	Ecaillage modéré à sévère
5	Ecaillage sévère (gros granulats visibles sur l'entière surface exposée)

Tableau 3 : Critères d'évaluation visuelle de l'écaillage selon la norme (ASTM-C-672 2003)

Nous remarquons alors l'existence d'une variété d'essais de résistance au gel interne et à l'écaillage qui permet d'évaluer la durabilité au gel-dégel du béton (Pigeon 1989) et de l'asphalte

(Xu, Guo et Tan 2015). Néanmoins, en raison de la forte vulnérabilité du matériau terre à l'attaque de l'eau et du gel (Fabbri, Morel and Gallipoli 2018), une application directe de ces essais serait trop agressive pour l'évaluation de la résistance de la terre crue à l'écaillage (XP P18-420) et au gel interne (NF P18-424 et XP P18-425). Il existe néanmoins une norme appliquée en géotechnique afin d'évaluer la résistance au gel-dégel des terres stabilisées compactées: la norme (ASTM-D560 2016).

5.3 La norme ASTM D560 pour les sols stabilisés et compactés

La norme américaine (ASTM-D560 2016) décrit une méthode expérimentale de mesures de l'effet des cycles de gel-dégel sur des échantillons en terre stabilisée. Elle propose l'évaluation de la perte de masse, de la variation de la teneur en eau et des changements de volume. La norme préconise l'utilisation de deux échantillons : l'un pour le calcul des variations de teneur en eau et de volume et l'autre pour la détermination de la perte de masse écaillée. Ces deux échantillons stabilisés sont fabriqués dans un moule proctor selon la norme américaine (ASTM-D558 2011). Une cure de 7 jours dans une ambiance humide à HR=100% est exigée après la fabrication des échantillons. Lors du dégel, la norme recommande qu'un dispositif d'absorption d'eau par capillarité soit placé sur les échantillons. Ce dispositif est constitué d'un papier absorbant d'épaisseur de 6mm.

Le Tableau 4 présente les conditions de gel et de dégel recommandées par la norme.

Paramètres	Valeurs
Durée d'un cycle de gel-dégel	2 jours (24h + 23 h)
Nombre de cycles de gel-dégel	12
Durée du gel	24 h
Température de gel	< -23°C
Durée de dégel	23 h
Température de dégel	+23°C +/- 2°C
Humidité relative lors du dégel	100%

Tableau 4 : Définition des paramètres d'un cycle de gel-dégel selon la norme (ASTM-D560 2016)

Pour l'évaluation des variations de masses et de dimensions, les mesures de masse s'effectuent avec une balance d'une précision de 0,1g et la mesure des dimensions avec un pied à coulisse de précision 0,25mm. Ces mesures sont faites après chaque phase de gel et chaque phase de dégel. Pour le calcul de la masse écaillée, un brossage spécifique est recommandé après la phase de dégel. Il s'agit d'appliquer avec une force approximative de 13N, un brossage de 18 et 20 coups sur toute la surface exposée au gel-dégel.

Néanmoins, la norme (ASTM-D560 2016) ne précise pas de valeurs limites à considérer comme critères d'appréciation de la résistance au gel et à l'écaillage du matériau terre. Il existe toutefois une classification de la résistance à l'écaillage comme critère d'appréciation dans la norme suédoise SS 13 72 44.

Résistance à l'écaillage	Exigences du comportement
Excellente	Aucune éprouvette a une perte de masse supérieure à 0,1 kg/m ² après 56 cycles
Bonne	La moyenne de la perte de masse pour quatre éprouvettes est inférieure à 0,5 kg/m ² après 56 cycles
Acceptable	La moyenne de la perte de masse pour quatre éprouvettes est inférieure à 1 kg/m ² après 56 cycles
Non acceptable	La moyenne de la perte de masse des quatre éprouvettes est supérieure à 1kg/m ² après 56 cycles

Tableau 5 : Critères d'évaluation de l'écaillage selon la norme suédoise SS 13 72 44

5.4 Conclusion sur la problématique d'étude

Il ressort de ces deux chapitres que la terre est un matériau dont le comportement multi-physique (thermo-hydro-hygro-mécanique) est fort couplé. L'attaque humide et le gel mettent en danger la durabilité d'une construction en terre crue. D'une part, les mécanismes physiques (changement de phase – expansion volumique – transport d'eau non-gelée) causant l'endommagement au gel d'un matériau poreux sont assez complexes ; ce qui limite le développement de modèles théoriques pour l'étude de l'impact du gel-dégel sur le matériau terre. D'autre part, la sévérité des conditions de gel décrites dans les essais classiques de détermination de la résistance au gel et à l'écaillage pour les matériaux de construction classiques (béton-asphalte) ne permet pas leur application directe pour l'étude du cas du matériau terre. Sur ce point, une reproduction correcte de l'effet du gel-dégel est possible grâce à une modification de la méthode expérimentale issue norme américaine (ASTM-D560 2016) qui traite des sols stabilisés en géotechnique.

Le travail expérimental menée dans le cadre de cette étude consiste à reproduire les conditions de gel-dégel selon la norme (ASTM-D560 2016) . L'objectif de ce travail est de proposer un protocole expérimental de simulation de gel-dégel adaptée aux constructions en terre crue. Ensuite, sur la base de critères de comparaison qui seront définis, les résultats obtenus constituera la base des hypothèses de couplage entre les mécanismes physiques de gel-dégel et le comportement macroscopique du matériau terre. L'analyse critique permettra d'apprécier le protocole mis en place et d'ouvrir sur des perspectives d'amélioration de la méthode expérimentale.

Chapitre 3

Mise en place d'un protocole expérimental pour l'étude de la résistance au gel et à l'écaillage du matériau terre

1. Présentation du matériau terre étudié

Dans le présent rapport, l'étude de la résistance au gel-dégel des constructions en terre repose sur une campagne expérimentale réalisée sur une terre originaire de la commune de Saint-Antoine-l'Abbaye, dans le département de l'Isère. Dans la suite, le sol étudié est noté STA. Les travaux de (Chabriac 2014) ont permis d'effectuer une première caractérisation du matériau terre STA.

1.1 Analyse granulométrique

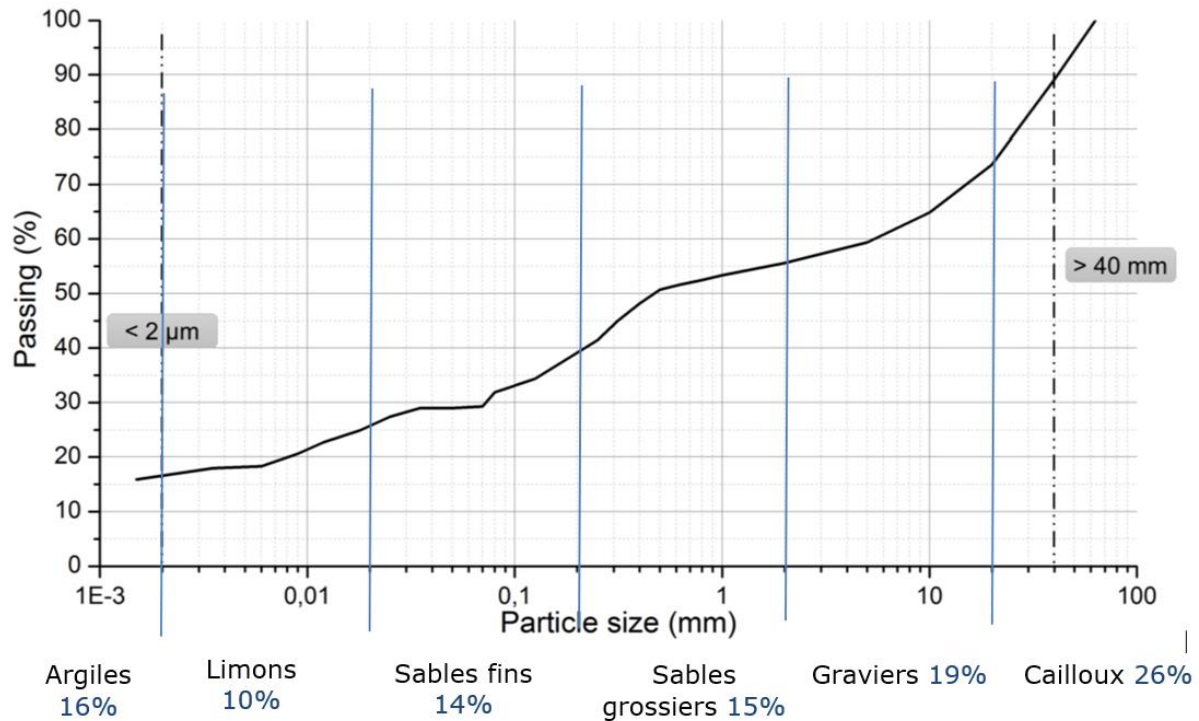


Figure 28 : Courbe granulométrique du sol STA obtenue par (Chabriac 2014)

Selon la classification issue de la norme française NF P-18-560, l'analyse granulométrique de la terre STA met en évidence une teneur en argile (particules passant à 2µm) de 16%. Un essai au bleu de méthylène a donné une valeur de 0.52+/- 0.01. Les argiles contenues dans le sol STA sont alors très peu actives. (Chabriac 2014).

Dans notre étude, le matériau terre est tamisé à 4,75mm afin que le diamètre des plus gros grains n'excède pas le 1/10^e de la dimension des plus petits échantillons réalisés (Champiré 2017).

1.2 Analyse hygrothermique

1.2.1 Isothermes de sorption-désorption

Les courbes de l'isotherme de sorption/désorption reportées dans la Figure 29 sont obtenues suivant la norme NF EN ISO 12571-2016. Ces courbes fournissent une caractérisation de comportement hygroscopique du matériau. En effet, elles expriment la relation entre l'humidité relative de l'environnement et la teneur en eau du matériau à l'état d'équilibre. Ces dernières sont obtenues soit par la méthode des solutions salines soit par un essai de sorption-désorption dynamique dit DVS.

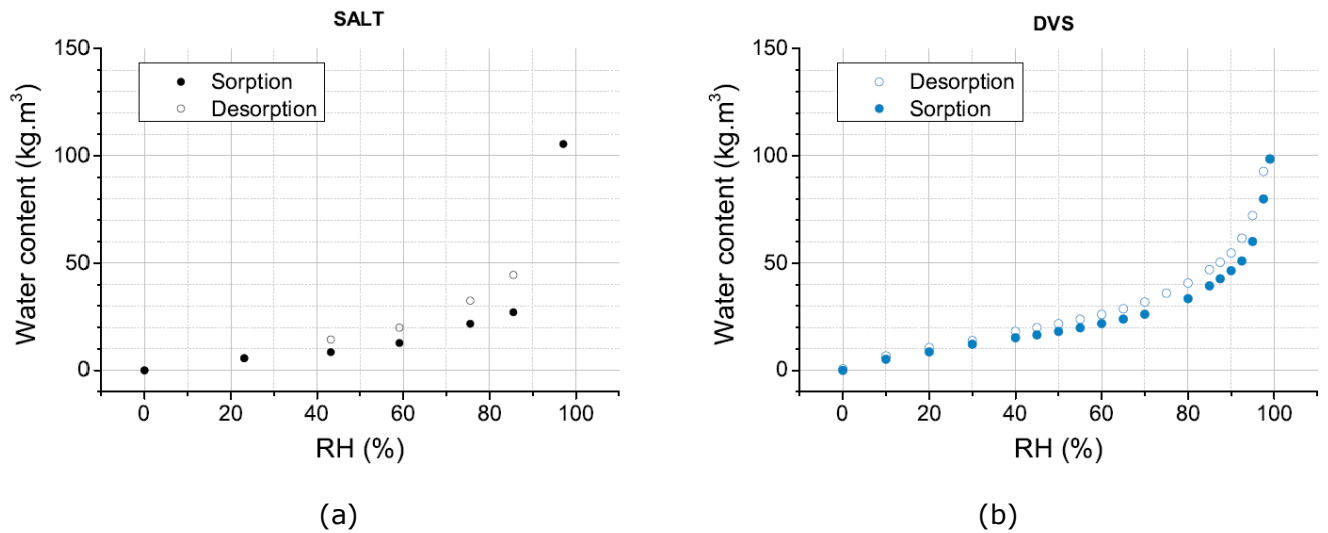


Figure 29 : Isothermes de sorption-désorption obtenues par solution saline (a) et par DVS (b) (Chabriac 2014)

On remarque que les courbes présentent une faible hystérésis entre la sorption et la désorption.

1.2.2 Conductivité thermique

La mesure de la conductivité thermique du matériau est effectuée par (Chabriac 2014) suivant différentes teneurs en eau. Il établit pour la terre STA la relation ci-dessous :

$$\lambda(\theta) = 5.06\theta + 0.64 \text{ (} W.m^{-1}.K^{-1}\text{)}$$

Avec θ la teneur en eau volumique (m^3/m^3) et λ la conductivité thermique en ($W.m^{-1}.K^{-1}$)

1.3 Caractéristiques pour la fabrication des échantillons

1.3.1 Cas des échantillons non-stabilisés

La teneur en eau de fabrication optimale est déterminée par un essai Proctor suivant la norme NF P94-093. Cet essai conduit à déterminer la densité sèche maximale à énergie de compactage donnée. Le Tableau 6 synthétise les résultats que différents auteurs ont obtenu comme caractéristiques optimales (à l'Optimum Proctor) de la terre STA non-stabilisée.

Sources	ρ_d (g/cm^3)	w_{opt} (%)
Thèse L.Xu	1,77	16
Données pisé-thèques	1,73	18
Thèse N,Al Haffar	1,73	19

Tableau 6 : Résultats de la détermination de l'Optimum Proctor pour la terre STA

Pour la fabrication des échantillons non-stabilisés, nous optons pour les résultats issus des données pisé-thèques.

1.3.2 Cas de fabrication des échantillons stabilisés au ciment à 10%

L'ajout de 10% de ciment dans la terre modifie les critères de fabrication des échantillons stabilisés par rapport aux échantillons non-stabilisés. Pour cela, la méthode A (adapté au passant à 4,75mm) de la procédure normalisée décrite dans (ASTM-D558 2011) est utilisée pour définir les caractéristiques à l'Optimum Proctor de la terre stabilisée à 10%. Conformément à la norme citée ci-dessus, l'essai au Proctor s'est effectué dans le laboratoire géotechnique de l'ETS avec un compactage automatique et un moule Proctor Normal dont les caractéristiques sont données dans Tableau 7.

Marteau	Masse marteau	Hauteur de chute	Diamètre moule	Hauteur moule	Nb de couches	Nb de coups par couche	Masse moule	Volume moule
Mécanique	2494,2 g	30,5 cm	10,07 cm	11,645 cm	3	25	4571,64 g	927,445 cm ³

Tableau 7 : Caractéristiques du compactage au Proctor selon la norme (ASTM-D558 2011)

L'essai s'est effectué sur quatre mélanges à des teneurs en eau de fabrication. Les résultats sont répertoriés dans le Tableau 8.

Teneur en eau visée (%)	15	17	19	21
Teneur en eau mesurée (%)	15,10%	17,28%	19,83%	21,91%
Masse volumique sèche (g/cm ³)	1,692	1,716	1,665	1,653

Tableau 8 : Résultats de la détermination de l'Optimum Proctor pour la terre stabilisée à 10%

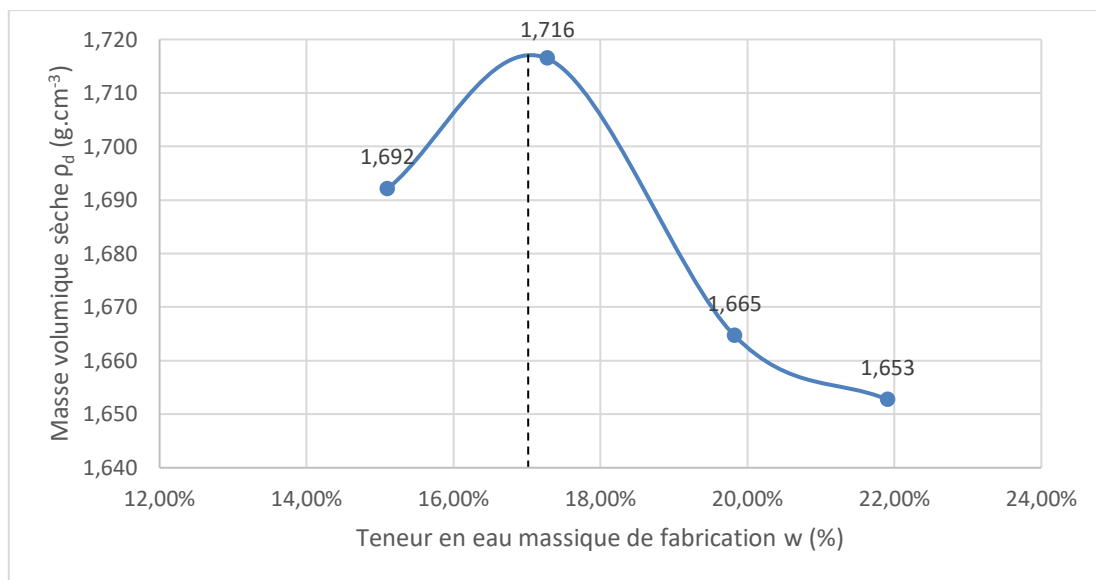


Figure 30 : Courbes de l'Optimum Proctor pour la terre STA stabilisée à 10%

Les caractéristiques pouvant être retenues pour la fabrication des échantillons stabilisés à 10% sont alors une teneur en eau optimale de 17,2% et une densité sèche arrondie à 1,72.

2. Mesure des paramètres hydriques du matériau terre étudié

2.1 La courbe caractéristique de rétention d'eau

2.1.1 Le principe de l'essai pour la courbe de rétention d'eau

La courbe caractéristique de rétention d'eau définit l'évolution de la succion du sol en fonction de sa teneur en eau. Selon (Delage et Cui 2000), la succion d'un sol s'apparente à une énergie potentielle permettant de drainer de l'eau libre éloignée dans le réseau poreux du sol non-saturé. En d'autres termes, la succion mesure l'affinité du sol à retenir de l'eau, ce qui fournit des informations sur les caractéristiques du sol comme la variation de volume ou les déformations géométriques. La succion matricielle se définit comme la différence entre la pression de l'air interstitiel et la pression de l'eau interstitielle.

La méthode du papier-filtre est retenue pour la mesure de la succion matricielle suivant la norme (ASTM-D-5298 2016). Cela est possible en insérant dans l'échantillon de terre une triple épaisseur de papier-filtre dont la courbe de rétention est prédéterminée. Le contact direct du

papier filtre au sol va engendrer une augmentation de la teneur en eau du papier filtre due au flux d'eau liquide dans le sol. L'échantillon est paraffiné pour éviter toute évaporation lors de l'équilibre entre les échantillons de terre et le papier-filtre. La connaissance de la teneur en eau et de la courbe de calibration du papier filtre permet ainsi de trouver la succion du sol. Celle-ci est alors reliée à la teneur en eau du couple d'échantillons pour tracer avec plusieurs points la courbe de rétention du sol.

2.1.2 Le protocole de mesure de la succion matricielle

Six points sont retenus pour tracer la courbe de rétention. Pour obtenir un point, deux échantillons de diamètre 10 cm et d'épaisseur de 2 cm sont confectionnés aux caractéristiques de l'Optimum Proctor par le moyen d'une presse hydraulique. Dès lors que la teneur en eau visée est atteinte pour les deux échantillons, un triplet de papier-filtre « Whatman 42 » est placé entre les deux échantillons et l'ensemble est couvert d'un film plastique étanche. Les papier-filtre du haut et du bas permettent de préserver le papier-filtre du milieu de tout dépôt de particules de sols.

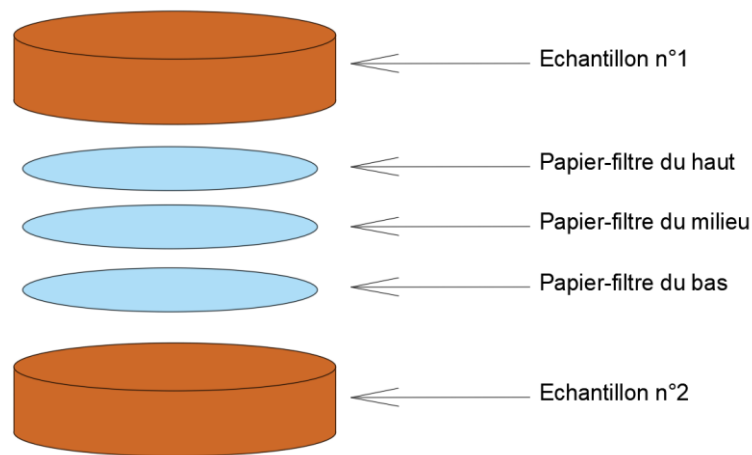


Figure 31 : Mise en place des échantillons et des papiers-filtres pour la mesure de la succion

L'ensemble est ainsi stocké durant une semaine pour permettre un équilibre humide. A la suite de cette période, le papier-filtre du milieu est extrait pour une mesure de teneur en eau. Les échantillons sont aussi repesés avant et après étuvage afin de déterminer leurs teneurs en eau réelles suivant la norme française (NF-P-94-050 1995).

Le passage de la teneur en eau du papier Whatman 42 à la valeur de succion est possible grâce aux relations données par la courbe de calibration issue de la norme (ASTM-D-5298 2016). Cette courbe est donnée dans Figure 32.

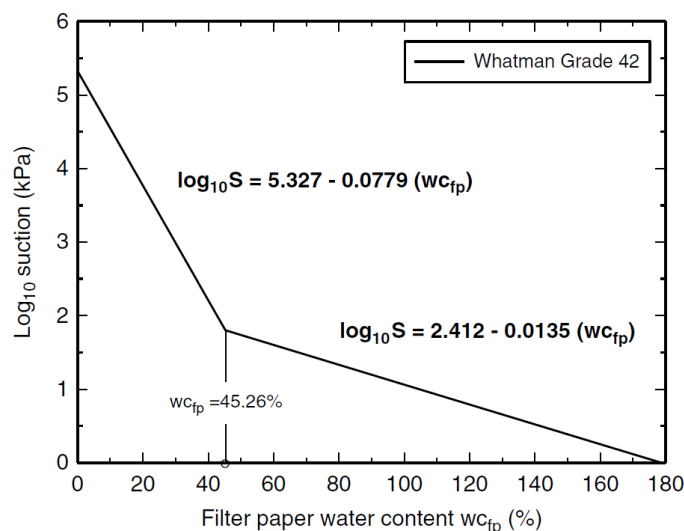


Figure 32 : Courbe de calibration du papier-filtre Whatman 42 adaptée de l'ASTM D5298-10 par (Kim, Prezzi et Salgado 2017)



Figure 33: Illustrations du protocole expérimental de mesure de la succion de la terre

2.1.3 Les résultats et discussions sur la mesure de la succion matricielle

A partir du protocole de mesure précédemment détaillé, les mesures de teneurs en eau et le calcul des valeurs des succions sont synthétisés dans le Tableau 9.

Teneur en eau visée	W=18%	W=15%	W=12%	W=9%	W=6%	W=3%
Mesure de la teneur en eau des papiers filtre et calcul de la succion						
Teneur en eau w (%)	29,22%	21,82%	16,51%	14,33%	10,69%	5,99%
log (s) s en kPa	3,051	3,627	4,041	4,211	4,494	4,861
Calcul de la teneur en eau réelle des échantillons 1 et 2						
W de l'échantillon 1	17,23%	15,40%	11,28%	8,65%	5,16%	2,75%
W de l'échantillon 2	17,24%	14,96%	11,04%	8,34%	4,10%	2,64%
Teneur en eau moyenne d'ensemble	17,24%	15,18%	11,16%	8,49%	4,63%	2,70%

Tableau 9 : Résultats de la mesure de la succion matricielle et des teneurs en eau

Ces valeurs sont obtenues sur différents couples d'échantillons chacun à une teneur en eau donnée. Cette méthode généralement employée présente l'avantage d'être rapide pour donner la courbe caractéristique de rétention d'eau de la terre STA (cf Figure 34).

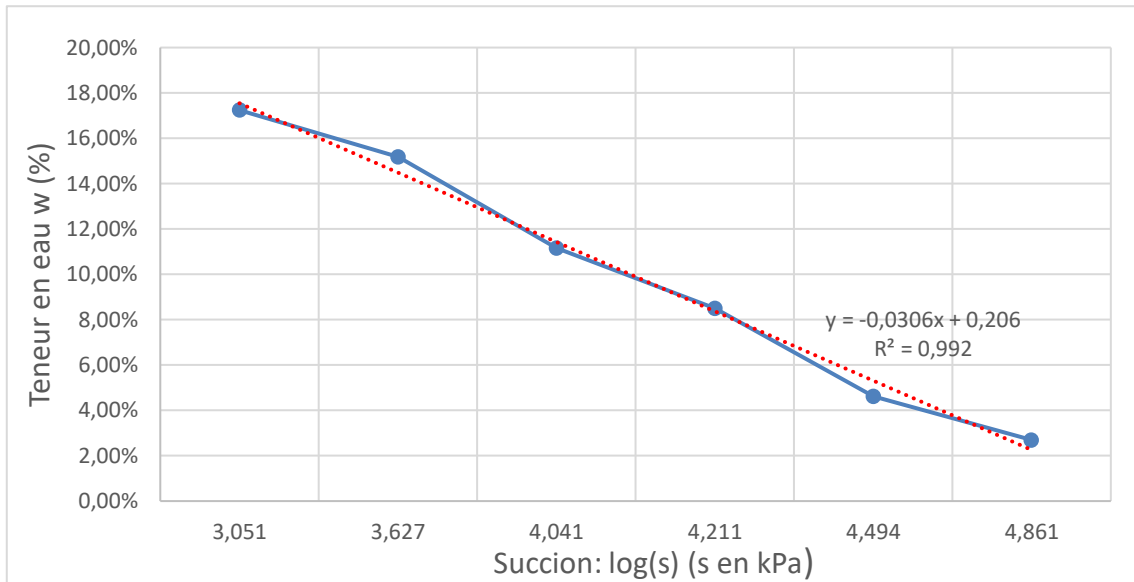


Figure 34 : Courbe caractéristique de rétention d'eau de la terre STA

Cette courbe montre à première vue une baisse de la succion matricielle due une augmentation de la teneur en eau w de l'échantillon. Néanmoins, cette variation du log de la succion en fonction de la teneur en eau présente plutôt une allure linéaire. La régression linéaire sous forme d'une droite affine montre un coefficient de corrélation assez correct de valeur $R^2=0,992$ et permet d'écrire :

$$\omega = \omega_{sat} - \alpha \cdot \log(s) = 0.206 - 0.0306 \cdot \log(s)$$

Où s représente la succion matricielle en kPa et w la teneur en eau en %

Cette expression permet de retenir une valeur de teneur en eau maximale de $\omega_{sat} = 20,6\%$

En utilisant la relation de Kelvin introduite dans le chapitre 1, il est possible d'exprimer l'humidité relative d'équilibre de chaque échantillon en fonction de la succion comme suit :

$$\varphi = \exp\left(-\frac{M_{H_2O}}{\rho_L RT} \cdot s\right)$$

Une application de cette relation permet une comparaison entre la courbe de sorption-désorption obtenue par (Chabriac 2014) et la courbe de rétention que nous avons déterminé. La Figure 35 montre une allure identique des deux courbes pour les HR > 60%. On note également qu'à HR égale, une quantité d'eau de la courbe de rétention est largement supérieure à celle de la courbe de sorption-désorption.

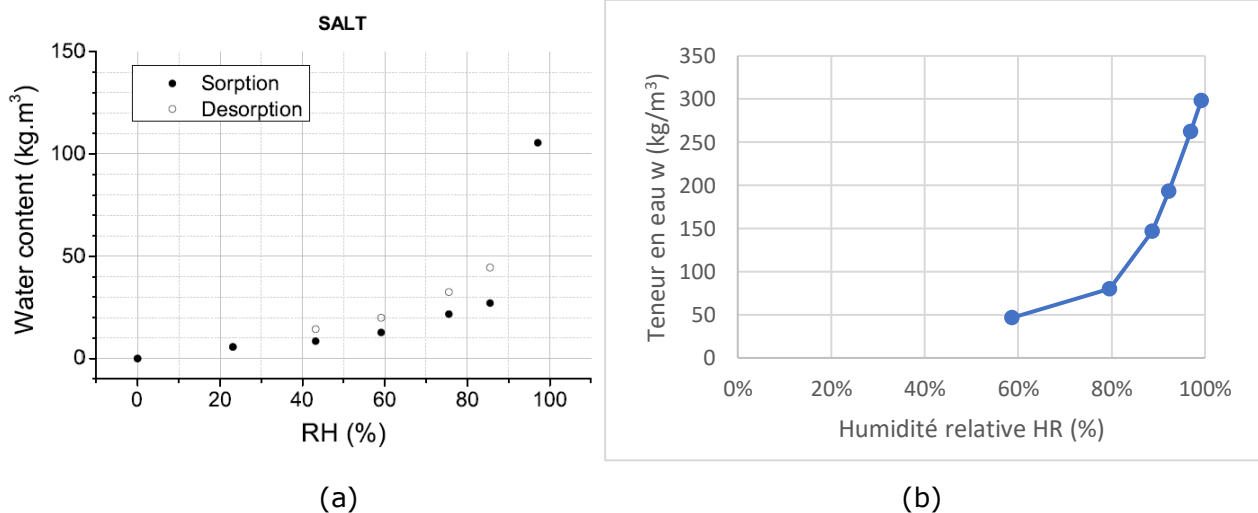


Figure 35 : Comparaison de la courbe de sorption-désorption (a) obtenue par (Chabriac 2014) à la courbe de rétention (b)

Toutefois ce premier résultat ne tient pas compte de la complexité générée par l'hystérésis séchage-humidification. Une autre piste d'approfondissement pourra être le choix de la mesure de la succion matricielle sur un échantillon par séchage continu. Une comparaison des courbes de rétention d'eau suivant plusieurs modes de compactage des échantillons a montré une faible variabilité de la courbe de rétention en fonction de l'énergie de compactage (L. Xu 2018).

2.2 Le coefficient d'absorption d'eau liquide par capillarité

2.2.1 Le principe de l'essai d'absorption d'eau par capillarité

Le matériau terre présente une certaine perméabilité aux molécules d'eau qui est essentiellement due à la géométrie de son réseau poreux et est à l'origine des phénomènes de transfert de masse d'eau (Fabbri, Morel and Gallipoli 2018). Un essai classique de mesure de perméabilité suivant la norme NF EN ISO 17892-11 nécessite la saturation du sol en eau ; ce qui n'est pas approprié pour le matériau de construction en terre. A cet effet, il est alors préférable d'avoir recours à la mesure de l'absorption d'eau liquide par capillarité suivant les normes européennes comme (NF-EN-ISO-15148 2003) ; (NF EN 1015-18 2003). Il s'agit d'évaluer la vitesse d'absorption et de diffusion d'eau par immersion partielle de l'échantillon de terre. Cette vitesse d'absorption est donnée par la détermination du coefficient d'absorption d'eau liquide A. Ce coefficient traduit la quantité d'eau absorbée (en kg) par unité de surface (m^2) et par racine de la durée d'immersion ($s^{-1/2}$).

2.2.2 Le protocole de mesure de la A-value

La mesure du coefficient d'absorption d'eau s'est effectuée sur la base de quatre échantillons dont la géométrie visée est un cylindre de 10cm de diamètre et de 6cm d'hauteur. Les échantillons sont compactés à la presse en une seule couche. Ils sont ensuite séchés dans une étuve à 50°C. Deux échantillons sont séchés pour atteindre une teneur en eau de 12% et les deux autres une teneur en eau de 6%. Ces caractéristiques sont synthétisées dans le Tableau 10. La différence de teneur en eau lors de l'essai permettra de mettre en évidence un éventuel impact de la teneur en eau initiale sur la vitesse d'absorption d'eau par capillarité.

Afin de garantir un transport d'eau liquide uniquement dans le sens vertical, les surfaces latérales des échantillons sont recouvertes de paraffine et d'aluminium.

Le matériel de mesure utilisé est composé d'une balance de précision au 0,01g et d'une cuve contenant un niveau constant d'eau. Le niveau d'eau est maintenu afin que le contact entre la partie basse de l'échantillon et l'eau soit permanent lors de l'essai. Pour cela, les échantillons sont posés sur des grilles afin de faciliter leur manipulation. Un papier-filtre est également disposé à l'interface de la partie basse de l'échantillon et la grille pour pouvoir retenir les fines particules susceptibles de se désagréger lors de l'humidification. L'ensemble (échantillon + papier-filtre + grille) est alors posé dans la cuve et retiré à des intervalles de temps (croissants lors de l'essai) afin de déterminer rapidement la masse totale de l'ensemble. L'ensemble est ensuite remis dans la cuve. L'essai s'est effectué sur une durée moyenne de 3h par échantillon.

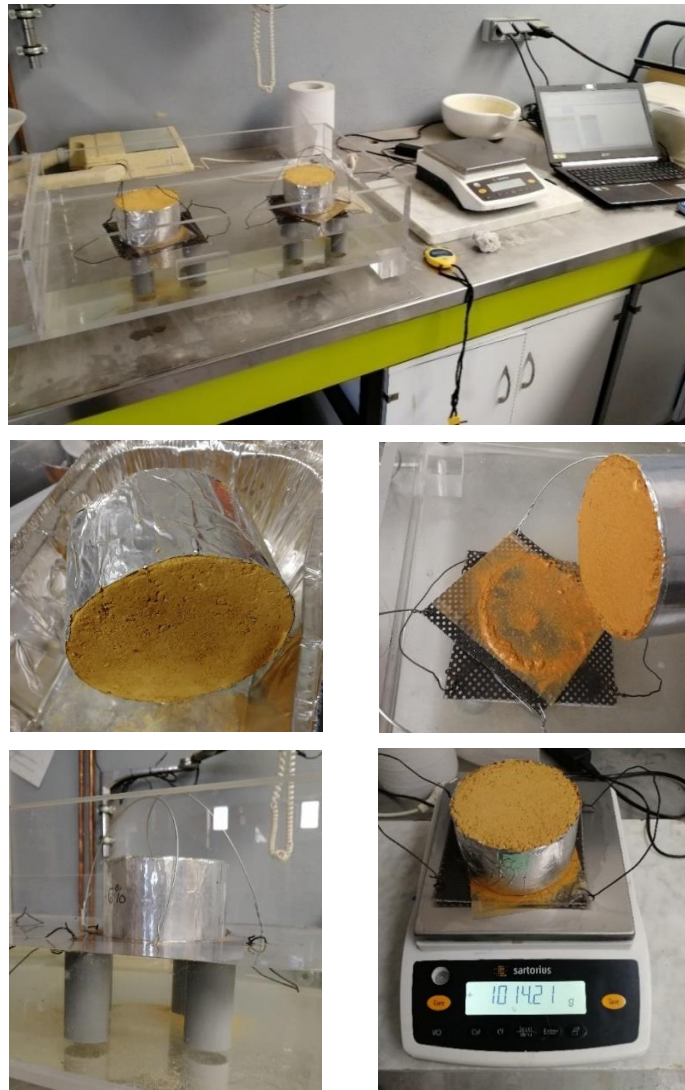


Figure 36: Illustrations du protocole expérimental de la mesure du coefficient d'absorption d'eau par capillarité

2.2.3 Les résultats et discussions de la mesure du coefficient d'absorption d'eau liquide

Le protocole expérimental permet de recueillir les masses des échantillons en fonction des durées d'imbibition dans la cuve de capillarité. En connaissant la surface de contact avec l'eau des échantillons et la masse initiale de l'ensemble, la vitesse d'absorption d'eau par action capillaire est déterminée par régression linéaire des courbes réelles obtenues. La A-value correspond alors au coefficient directeur de ces régressions linéaires. A partir de l'évolution de la masse d'eau donnée Figure 37, les valeurs des A-values sont répertoriées dans le Tableau 10.

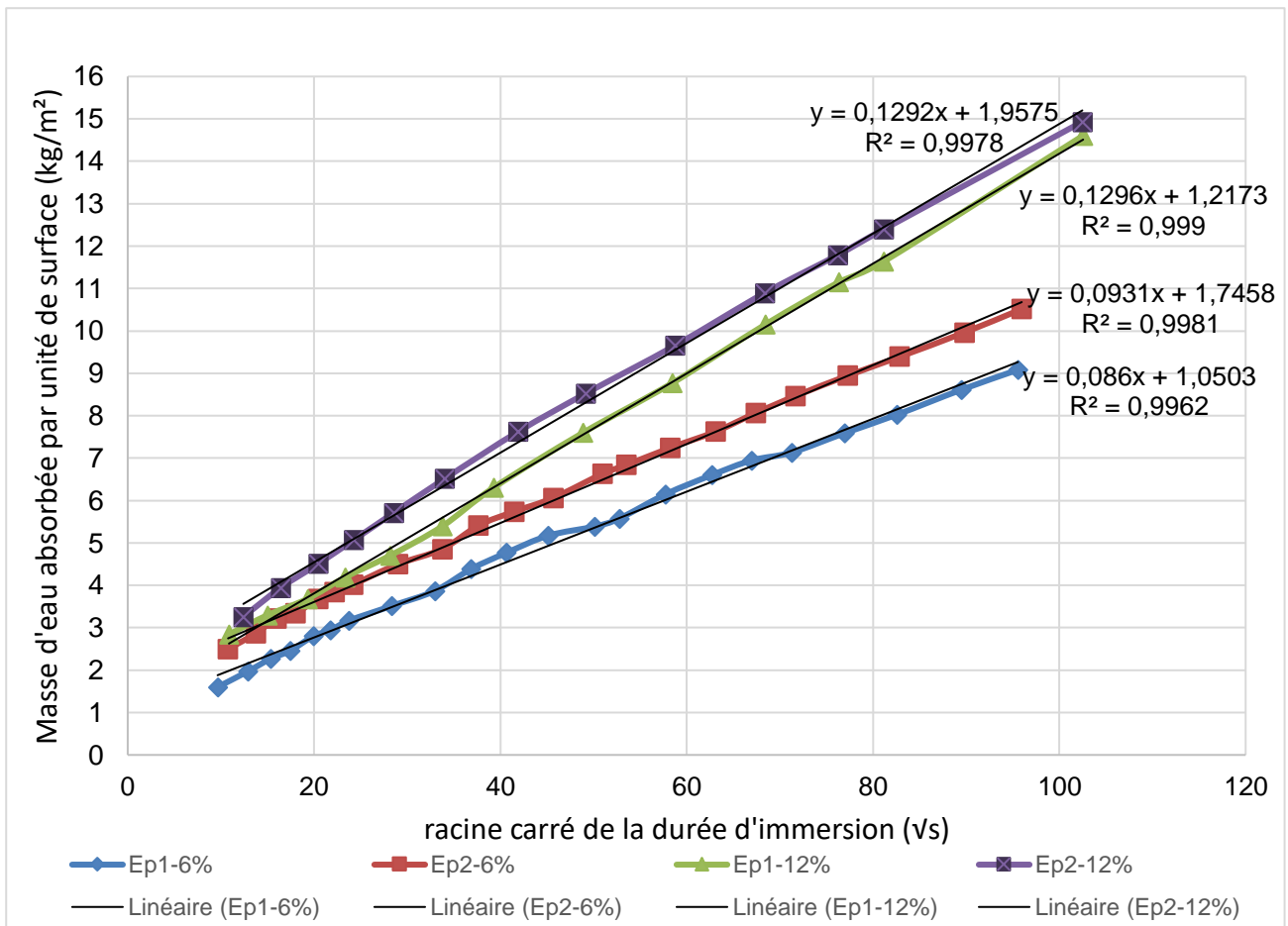


Figure 37 : Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée de la durée d'immersion

Nom	Ep1-6%	Ep2-6%	Ep1-12%	Ep2-12%
Masse avant essai (g)	868,42	869,67	912,51	905,12
Teneur en eau initiale (%)	6,52	6,68	11,93	11,02
Densité humide initiale	1,843	1,845	1,936	1,923
A-value (kg/m ² /s ^{1/2})	0,0860	0,0931	0,1296	0,1292
R ²	0,9962	0,9981	0,999	0,9978

Tableau 10 : Résultats de la mesure des coefficients A-value pour les différents échantillons

Les mesures présentent une bonne répétabilité bien qu'il y a une faible différence des A-value due à l'hétérogénéité des teneurs en eau initiale des échantillons. En effet, nous observons une croissance de la A-value suivant l'augmentation de la teneur en eau initiale. Toutefois, il est préférable de vérifier ce résultat en considérant plusieurs états de saturation initiale des échantillons.

Ces résultats nous paraissent très faibles comparés aux valeurs rencontrées dans la littérature. Par exemple, pour la même terre, (L. Soudani 2016) trouve des valeurs de A-value variant de 0,21 à 0,41 alors que nos valeurs de A-values sont comprises entre 0,09 à 0,13.

2.3 Le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau

2.3.1 Le principe de la mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau

Le phénomène de transfert de masse d'eau fait aussi intervenir les mécanismes d'échanges de vapeur d'eau entre le matériau terre et son environnement. L'équation de conservation de masse de vapeur d'eau qui régit ce mécanisme est pilotée par un paramètre hygroscopique : le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau notée δ_p . Il traduit la masse de vapeur d'eau par unité d'épaisseur (m), par unité de pression (Pa) et par unité de temps (s) susceptible d'être transférée au sein du réseau poreux du matériau considéré. Il s'agit d'un essai très connu et normalisé dans les standards européens (BS-EN-ISO-12572 2001) et dans les standards américains (ASTM-E96/E96M 2016). L'échantillon est placé à l'interface de deux ambiances humides (humidités relatives) différentes mais constantes afin d'observer le flux de vapeur d'eau à travers l'échantillon. Suivant les valeurs de l'humidité relative de la coupelle on parlera de méthode à la coupelle sèche (« dry cup ») ou la coupelle humide (« wet cup »).

La connaissance du coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau a double objectif. D'une part, elle permet la résolution numérique de l'équation de diffusion de vapeur d'eau et ainsi déterminer le comportement hygroscopique d'un matériau de construction. D'autre part, elle sert à évaluer le facteur de résistance à la vapeur d'eau du matériau noté μ avec

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$$

Où δ_a est la perméabilité à la vapeur de l'air ($\delta_a = 2.10^{-10} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$).

Ce facteur est souvent utilisé pour apprécier les performances hygroscopiques du matériau.

2.3.2 Le protocole expérimental avec la coupelle humide « wet cup »

L'essai de perméabilité à la vapeur d'eau est effectué selon la méthode de la coupelle humide dite « wet cup ». Les annexes A et B de la norme (ISO-12571 2013) fournissent les éléments d'information permettant la préparation des solutions salines utilisées. Les règles de fabrication des échantillons, de mesures et de calcul sont fixées par la norme (BS-EN-ISO-12572 2001). Conformément à celle-ci, trois échantillons E2, E3 et E4 d'épaisseurs respectives de 2cm, 3cm et 4cm et de diamètres de 10cm (cf Tableau 11) sont chacun placés sur une coupelle contenant du chlorure de sodium (NaCl) afin d'obtenir une humidité relative de 75,5% dans la coupelle. La quantité de la solution saline introduite dans chaque coupelle est telle que l'épaisseur d'air libre est approximativement de 2cm. Les échantillons sont scellés hermétiquement sur toutes leurs surfaces latérales avec la coupelle pour garantir un flux de vapeur d'eau uniquement ascendant (unidirectionnel). Une mesure de l'humidité relative dans les coupelles confirme une valeur de HR=78,1%.

Noms	E2	E3	E4
Epaisseur (cm)	2	3	4
Masse initiale (g)	276,33	416,54	547,65
Densité humide initiale	1,759	1,768	1,743

Tableau 11 : Caractéristiques des échantillons de l'essai Wet Cup

Les trois ensembles sont ainsi disposés dans des caissons étanches contenant une solution saline en l'occurrence du carbonate de potassium (K_2CO_3) pour maintenir une humidité relative de 43,2% dans le caisson.

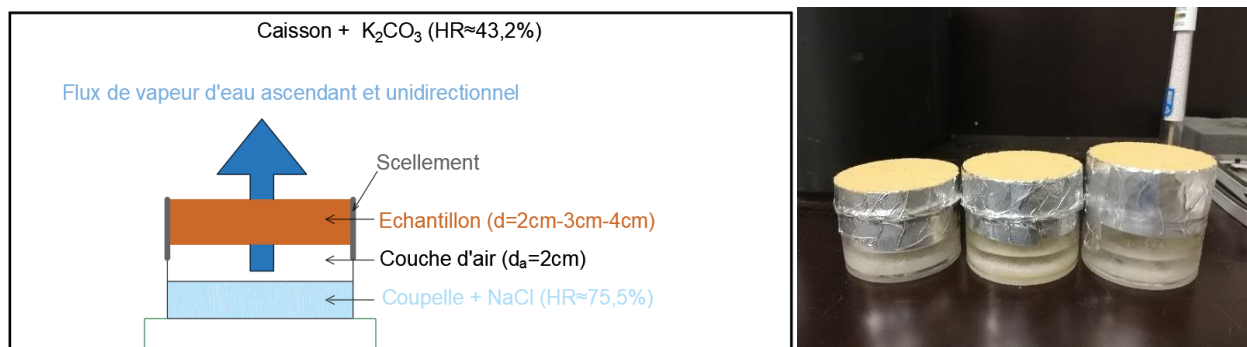


Figure 38 : Illustrations protocole expérimental de mesure du coefficient de perméabilité à la vapeur

L'échantillon E4 est placé dans un caisson noté B et les échantillons dans un autre caisson noté A. La mesure de l'humidité relative dans les deux caissons A et B a donné respectivement 44,6% et 46,0%.

Le calcul de la perméabilité à la vapeur d'eau se fait à partir de la mesure de la variation de masse de l'ensemble (coupelle + échantillon) au cours du temps. Le pesage s'effectue tous les 3 jours.

2.3.3 Résultats et discussions sur le calcul de la perméabilité à la vapeur d'eau

Les calculs s'effectuent dès lors que l'équilibre de l'ensemble avec le caisson est atteint. Le flux de vapeur d'eau est alors en régime permanent après 3 jours. Il est à noter que la durée de l'essai est de 41 jours.

La perte de masse Δm est donnée par la formule $\Delta m(t) = m(t) - m(t_0)$ où $m(t_0)$ et $m(t)$ représentent les masses de l'ensemble considéré au début de l'essai et à l'instant considérée $t = \Delta t$. Les résultats de la perte de masse au cours de l'essai sont donnés dans la Figure 39.

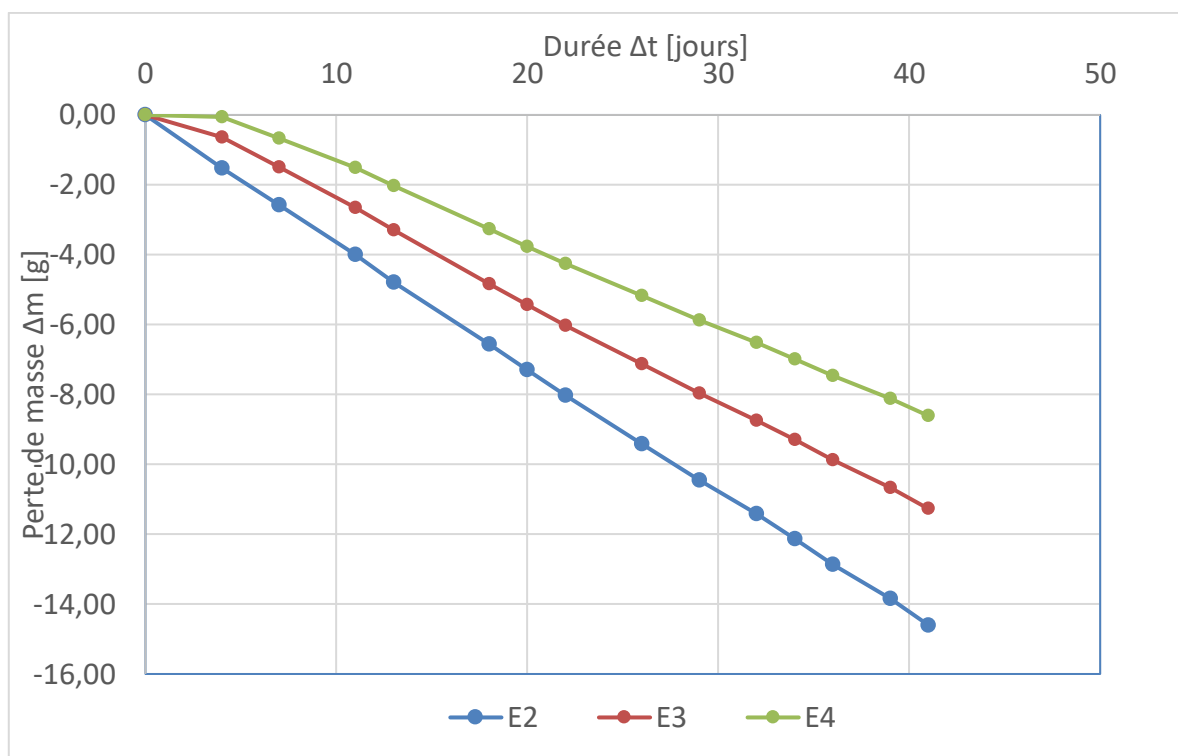


Figure 39 : Mesure de la perte de masses des ensembles E2-E3-E4 au cours de l'essai

Une première série de calculs est effectuée selon la norme (BS-EN-ISO-12572 2001) sans tenir compte de la correction. Les résultats sont présentés dans le Tableau 12.

Grandeurs	Expressions	Echantillon E2	Echantillon E3	Echantillon E4
G (kg.s ⁻¹)	$G = \frac{\Delta m}{\Delta t}$	4,0E-09	3,2E-09	2,7E-09
g (kg.m ⁻² .s ⁻¹)	$g = \frac{G}{A}$	5,1E-07	4,1E-07	3,4E-07
W (kg.m ⁻² .s ⁻¹ .Pa ⁻¹)	$W = \frac{g}{\Delta P_v}$	6,9E-10	5,5E-10	4,3E-10
δ_p (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹)	$\delta_p = W \cdot d$	1,37E-11	1,65E-11	1,73E-11
μ (-)	$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	14,36	11,95	11,40

Tableau 12 : Résultats des calculs des propriétés hydriques des échantillons sans correction

Avec

- G est le taux de perte de masse
- g est la densité de flux de vapeur d'eau
- A est la surface d'échange de l'échantillon (A=78,54 cm²)
- W est la perméance à la vapeur d'eau
- ΔP_v est la différence de pression d'eau entre les deux faces de l'échantillon
- δ_p est la perméabilité à la vapeur d'eau
- d est l'épaisseur de l'échantillon
- μ est le facteur de résistance à la vapeur d'eau
- δ_a est la perméabilité à la vapeur de l'air ($\delta_a = 2 \cdot 10^{-10} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$)

Le facteur de résistance à la vapeur d'eau des 3 échantillons présente un écart-type de 1,19. En effet, il faut tenir compte des phénomènes de convection avec l'air dans la coupelle. Pour cela, la norme (BS-EN-ISO-12572 2001) propose une correction de la perméabilité à la vapeur d'eau. La perméabilité corrigée est donnée par l'expression suivante :

$$\delta_p^{ISO} = \frac{G \cdot d}{A \cdot \Delta P_v - G \cdot \frac{d_a}{\delta_a}}$$

Avec d_a l'épaisseur de la couche d'air dans la coupelle ($d_a=0,02\text{m}$).

La correction donne alors les valeurs suivantes pour les 3 échantillons synthétisés dans le Tableau 13.

Grandeurs	Echantillon E2	Echantillon E3	Echantillon E4
δ_p^{ISO} (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹)	1,47E-11	1,75E-11	1,81E-11
μ (-)	13,36	11,28	10,90

Tableau 13 : Résultats des calculs de δ_p et μ après l'ISO correction

L'ISO correction permet alors de réduire l'écart-type à 1,01 sur les valeurs de résistance à la vapeur d'eau.

Une seconde correction est proposée par (McGregor, et al. 2017). Il s'agit de prendre en considération l'effet de l'épaisseur de l'échantillon sur la perméabilité à la vapeur d'eau. Pour cela, (McGregor, et al. 2017) définissent la résistance surfacique globale Z à partir de la regression linéaire de la courbe $\frac{d}{\delta_p^{ISO}}$ en fonction de d pour les trois échantillons.

$$Z = \lim_{d \rightarrow 0} \left(\frac{d}{\delta_p^{ISO}} = \frac{d}{\delta_p^r} + Z \right)$$

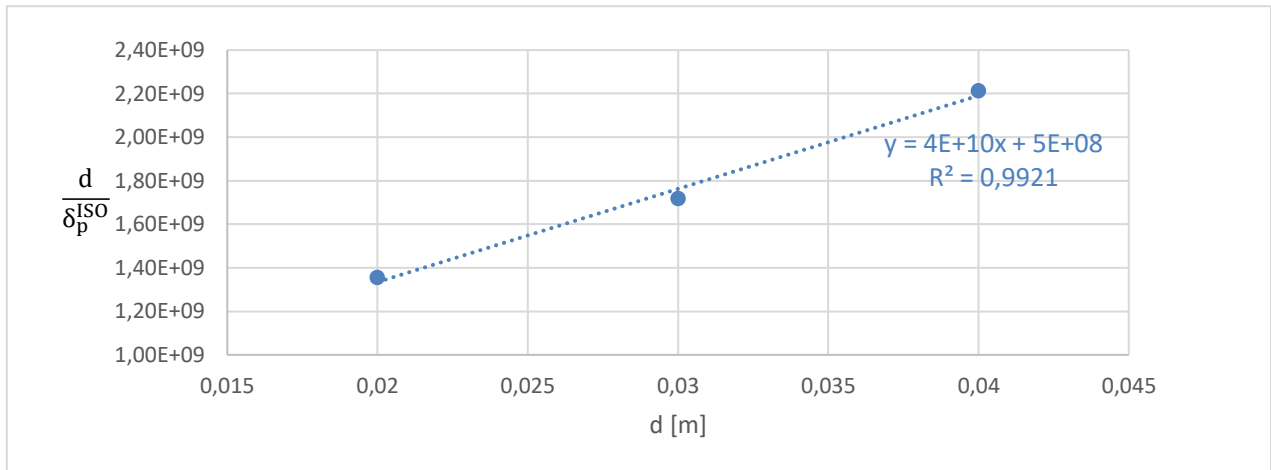


Figure 40 : Courbe d'évolution de $\frac{d}{\delta_p^{ISO}}$ en fonction de l'épaisseur d des trois échantillons

La Figure 40 donne la courbe correspondant aux trois échantillons étudiés ; ce qui permet d'obtenir une valeur de $Z = 5,00E+08 \text{ m}^2.\text{s}.\text{Pa}.\text{kg}^{-1}$.

La Z-correction considère une nouvelle expression de la perméabilité à la vapeur d'eau :

$$\delta_p^Z = \frac{G \cdot d}{A \cdot \Delta P_v - G \cdot \left(\frac{d_a}{\delta_a} + Z \right)}$$

On obtient alors dans le Tableau 14 les valeurs de perméabilité de facteur de résistance suivantes pour chaque échantillon.

Grandeurs	Echantillon E2	Echantillon E3	Echantillon E4
$\delta_p^{ISO} \text{ (kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}\text{)}$	2,34E-11	2,46E-11	2,34E-11
$\mu \text{ (-)}$	8,44	8,00	8,44

Tableau 14 : Résultats des calculs de δ_p et μ après la Z-correction

Ces valeurs présentent un écart-type très faible (égal à 0,19). La Z-correction proposée par (McGregor, et al. 2017) permet alors d'obtenir des valeurs de résistances à la vapeur d'eau davantage homogènes et indépendantes de l'épaisseur de l'échantillon. L'homogénéité des résultats après chaque étape de corrections est donnée dans le Tableau 15 et la Figure 41.

	Echantillon E2	Echantillon E3	Echantillon E4	Ecart-type
Sans correction	14,36	11,95	11,40	1,19
ISO correction	13,36	11,28	10,90	1,01
Z correction	8,44	8,00	8,44	0,19

Tableau 15 : Valeurs des facteurs de résistance à la vapeur et écart-type suivant la correction utilisée

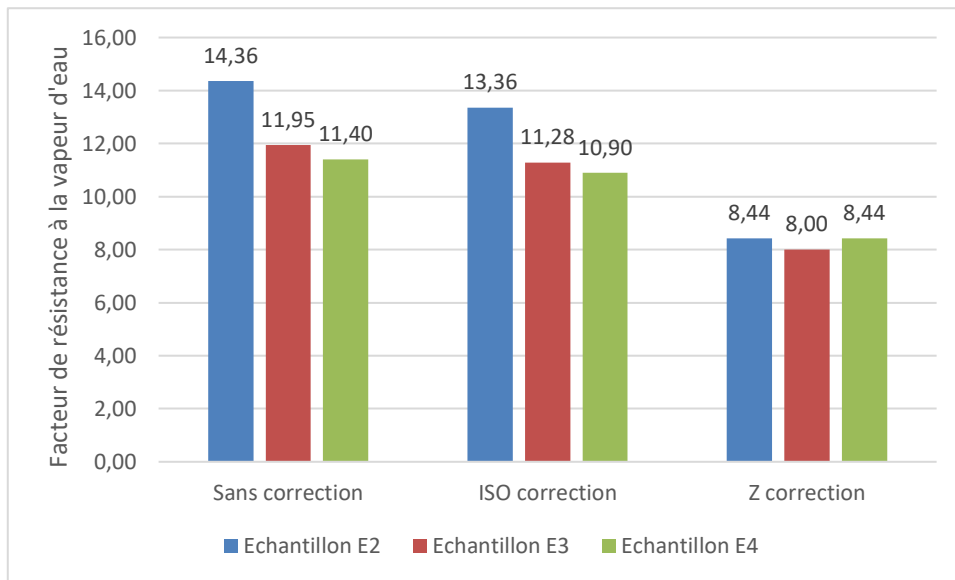


Figure 41 : Comparaison des facteurs de résistance à la vapeur suivant la méthode de correction

Les valeurs retenues sont alors les valeurs moyennes obtenues de la Z-correction en l'occurrence $\delta_p = 2,38 \cdot 10^{-11} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ et $\mu = 8,29$.

Sur le même matériau terre STA, (Chabriac 2014) a également mesuré le facteur de résistance à la vapeur d'eau par les deux méthodes (dry cup et wet cup) dont les résultats sont reportés dans le Tableau 16. Pour l'essai « dry cup », les coupelles utilisés contenaient une humidité relative de 3,3% et pour l'essai « wet cup », l'humidité relative dans les coupelles était de 50%.

Humidités relatives	3,3% - 43,2%	3,3% - 75,5%	50% - 94%
μ (-)	10,6	9,4	7,1

Tableau 16 : Valeurs de facteurs de résistance à la vapeur d'eau obtenues par (Chabriac 2014)

Dans une littérature plus large, les valeurs de μ varient entre 5 et 13 suivant la nature des argiles, la distribution de la taille des pores, la présence de liants (Moevus, Anger et Fontaine 2012). A titre d'exemple, (Al Haffar, et al. 2019) trouvent des valeurs de μ allant de 9 à 10,2 pour des échantillons non-stabilisés et de 11,6 à 15,2 dans le cas des échantillons stabilisés. Nous remarquons donc que les valeurs obtenues sont cohérentes car elles sont du même ordre de grandeur des résultats issus de la littérature.

3. Proposition du protocole d'essai de gel-dégel

Cette partie consiste à mettre en place un protocole expérimental permettant une compréhension et une évaluation de l'endommagement dû aux cycles de gel-dégel du matériau terre. Pour cela, au cours des cycles de gel-dégel, nous évaluerons les modifications et les dégradations subies par les échantillons suivant différentes conditions de fabrication (mode de compactage-avec/sans stabilisant) et différentes conditions d'essai (avec/sans gel, avec/sans remontées capillaires). L'objectif est alors de mettre en évidence les paramètres influents le comportement et la résistance au gel du matériau terre.

3.1 Fabrication des échantillons

Les conditions de fabrication des échantillons permettent l'analyse de deux paramètres : le mode de compactage et l'effet de la stabilisation. Pour cela, vingt-quatre échantillons sont confectionnés suivant la répartition indiquée dans la Figure 42.

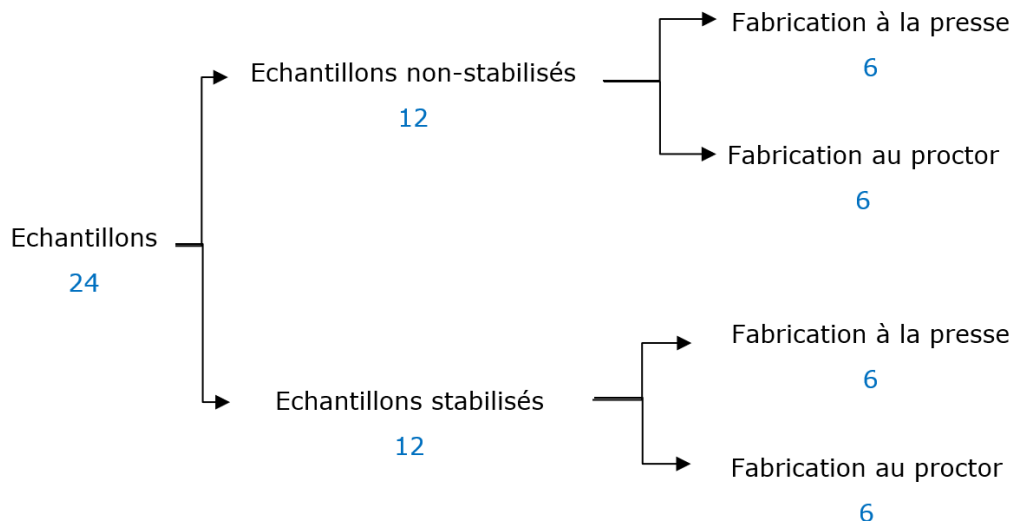


Figure 42 : Répartition des 24 échantillons pour l'étude des effets de la stabilisation et du mode de compactage

Les essais Proctor présentés précédemment donnent les caractéristiques de fabrication des deux types d'échantillons (stabilisés et non-stabilisés) rappelés dans le Tableau 17.

Type d'échantillons	Teneur en eau	Densité sèche
Non-stabilisé	18%	1,79
Stabilisé à 10%	17,2%	1,72

Tableau 17 : Récapitulatif des caractéristiques de fabrications des échantillons stabilisés et non-stabilisés à l'Optimum Proctor

3.1.1 Géométrie des échantillons

La fabrication des échantillons stabilisés au Proctor est encadrée par la norme (ASTM-D558 2011). Néanmoins, cette norme n'indique pas la géométrie des échantillons pour l'étude au gel-dégel suivant la norme (ASTM-D560 2016). En raison de cela, nous choisissons comme géométrie visée pour les échantillons une forme cylindrique avec un diamètre de 10,16 cm correspondant au diamètre intérieur du moule Proctor utilisé. La hauteur souhaitée est de 10 cm afin d'obtenir un élancement proche de 1. Pour cela, la fabrication au Proctor dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 7 permet le compactage successif de 3 couches de même épaisseur alors que l'utilisation de la presse limite le nombre de couches à 2. Cette presse est de type mécanique disposant d'un capteur de force limité à 45 kN. Grâce à cette presse, le compactage des 12 échantillons s'effectue à une vitesse de déplacement de 10 mm/min. L'absence de capteur de déplacement génère une légère disparité des hauteurs des 12 échantillons réalisés à la presse. Les caractéristiques de la fabrication au proctor sont données

dans le Tableau 17. Les 12 échantillons conçus au proctor présentent également des hauteurs relativement hétérogènes.

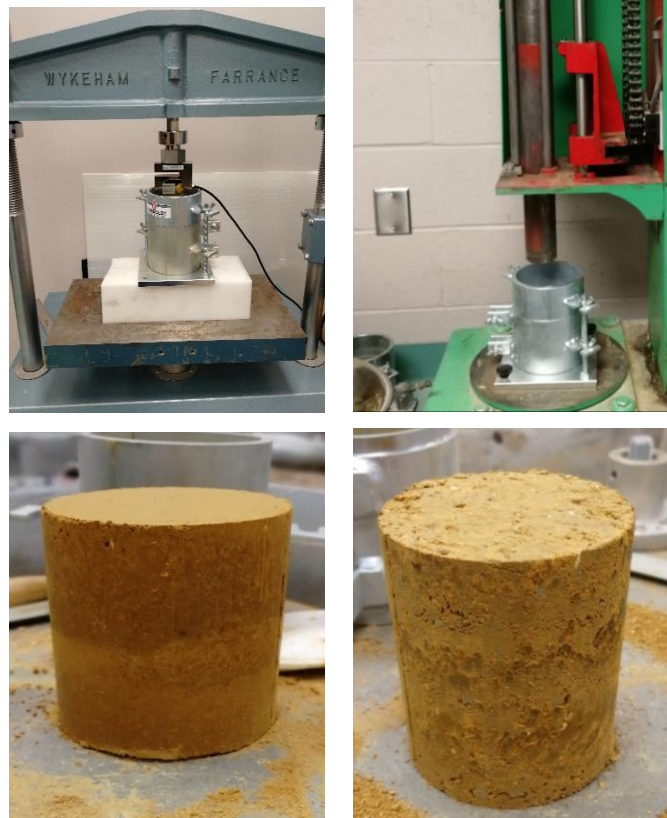


Figure 43 : Mode de compactage et échantillons obtenus par une fabrication à la presse (gauche) et au proctor (droite)

3.1.2 Conditionnement des échantillons

Conformément à la norme (ASTM-D558 2011), les 12 échantillons stabilisés au ciment sont placés après fabrication dans une chambre humide (HR=99.02% et T=22.08°C) durant une période de 7 jours. Cette cure est, en effet, essentielle pour fournir une hydratation suffisante pour la prise du ciment. Chaque échantillon non-stabilisé est placé dans un sac imperméable à l'eau et hermétiquement fermé et stocké durant la période de la cure.



Figure 44 : Cure des échantillons stabilisés (à gauche) et conservation des échantillons non-stabilisés (à droite)

3.2 Présentation de la démarche expérimentale

3.2.1 Méthode de mesures de variations géométriques et massiques

La norme (ASTM-D560 2016) considère deux échantillons (1 et 2) stabilisés et fabriqués au Proctor suivant la norme (ASTM-D558 2011). Elle recommande pour l'échantillon 1 une mesure de variations géométriques (la hauteur h et le diamètre Φ) et massiques (la masse m) après chaque phase de gel et chaque phase de dégel. Pour l'échantillon 2, la perte de masse par écaillage est évaluée après le dégel. Cela consiste à peser l'échantillon 2 avant et après son brossage. La norme préconise un nombre de cycles de gel-dégel de 12 avant une mesure de la teneur en eau finale ω_{fin} . Ainsi, la fin des mesures est indiquée soit par un effondrement ou un fort endommagement de l'échantillon avant les 12 cycles soit par l'obtention des 12 cycles de gel-dégel recommandés.

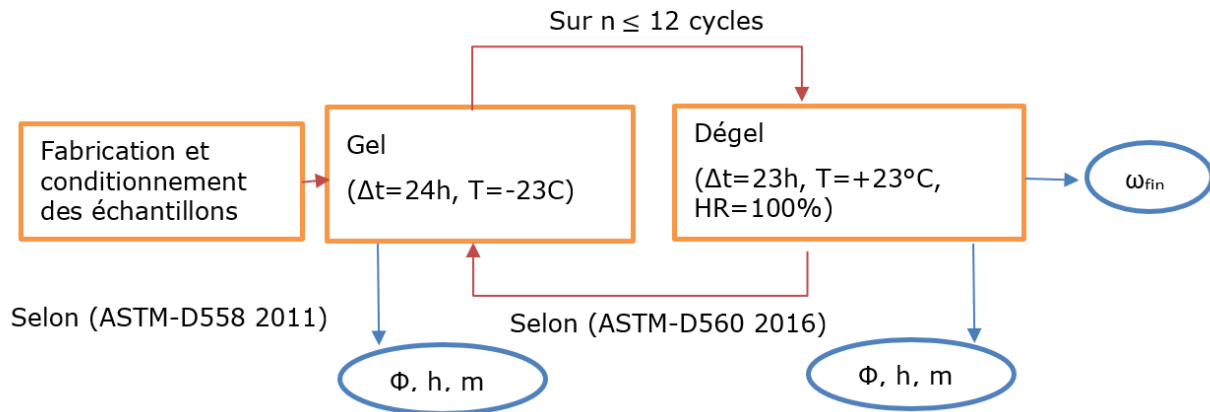


Figure 45 : Etapes de fabrication et de mesure au fil des cycles de gel-dégel

Dans le cadre de cette étude, le protocole expérimental repose essentiellement sur la méthode et le matériel préconisés par la norme (ASTM-D560 2016). Un complément dans la méthode a été toutefois apporté dans notre travail. D'une part, trois points de mesures radiales et trois points de mesures axiales ont été définis sur chaque échantillon. En effet, la prise des mesures n'étant pas définie dans la norme (ASTM-D560 2016), il semble capital de fixer les points de mesures différents dans le but de mettre en lumière d'éventuelles déformations différées.

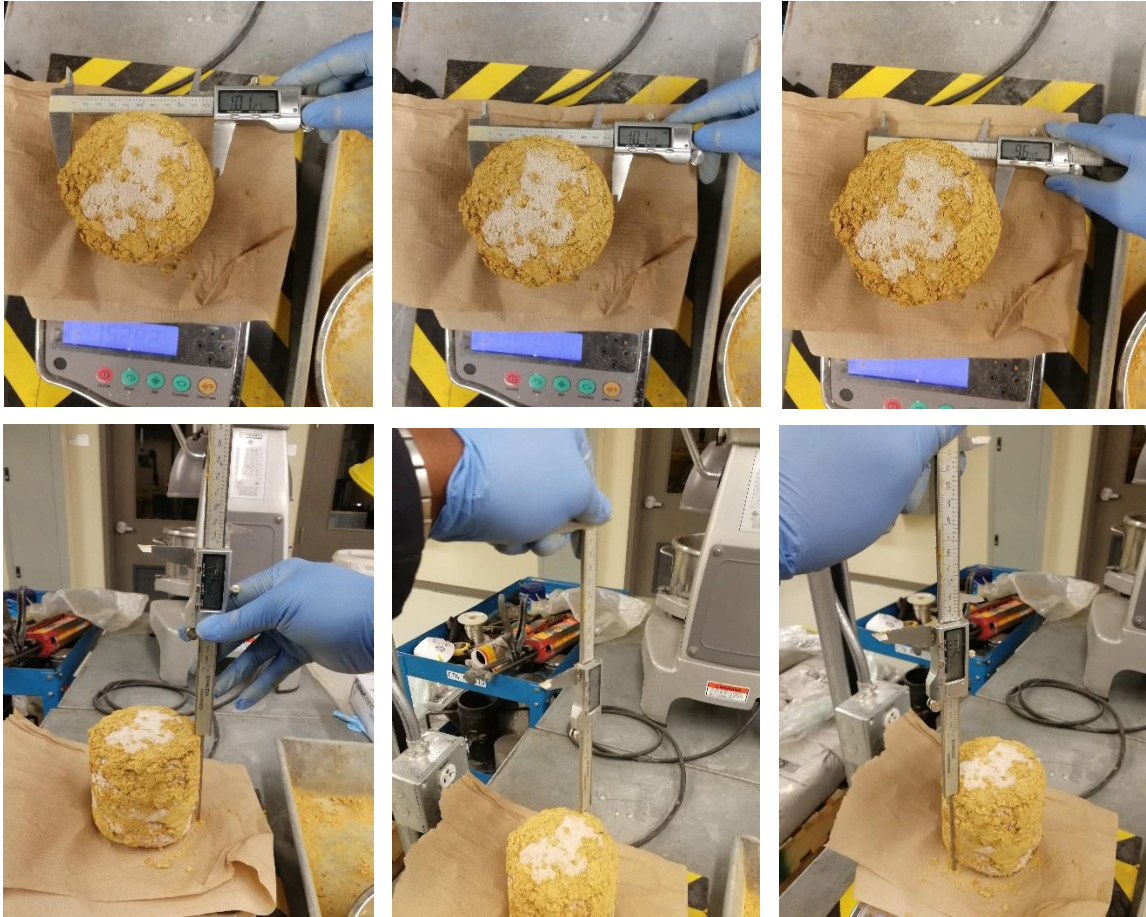
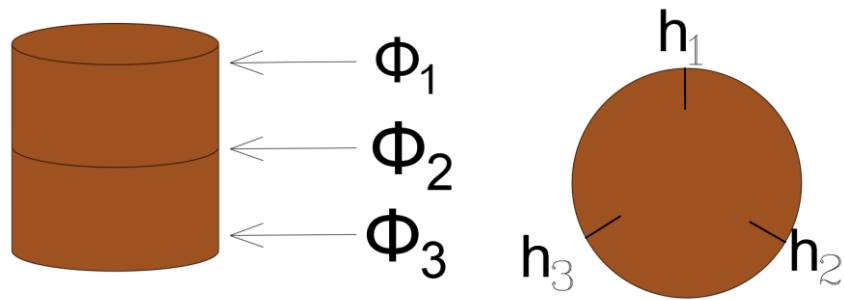


Figure 46 : Points de mesure des dimensions géométriques d'un échantillon

D'autre part, un brossage après le gel a été ajouté au protocole proposé par la norme (ASTM-D560 2016) en plus du brossage après le dégel. Il nous semble que les échantillons au gel présentent une perte de masse par écaillage non-négligeable après la phase de gel.



Figure 47 : Mesure de la perte de masse écaillée après brossage

3.2.2 Paramétrage de l'essai de gel-dégel

L'étude expérimentale a pour but de mettre en valeur les paramètres-clé de l'endommagement des constructions en terre exposés à des cycles de gel-dégel. En ce sens, il semble essentiel de mettre en place des critères de comparaison permettant de définir les paramètres-clé pour l'évaluation de la résistance au gel du matériau terre. Dans le cadre de cette étude, les effets retenus sont:

- l'effet de la stabilisation
- l'effet du mode de compactage
- l'effet du gel
- l'effet de l'absorption d'eau liquide par capillarité

Les deux premiers paramètres sont déjà mis en place lors de la fabrication des échantillons. En ce qui concerne, les deux derniers paramètres, le protocole de l'essai proposé doit permettre une discussion sur leurs influences. Pour cela, la démarche expérimentale s'appuie sur le protocole de la norme (ASTM-D560 2016). Toutefois, ce protocole ne se limite qu'à l'étude de deux échantillons stabilisés dont l'un permet la mesure des variations géométriques et massiques au fur et à mesure des cycles de gel-dégel. Le second échantillon sert à quantifier la perte de masse par écaillage en effectuant un brossage de l'échantillon après la phase de dégel. Dans ce protocole, un cycle de gel-dégel comprend une phase de gel d'une durée de 24h dans un congélateur réglée à une température de -23°C et une phase de dégel pendant 23h dans une chambre humide ($HR \approx 100\%$) avec une température de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.



Figure 48 : Dispositif de gel dans le congélateur (en haut) et de dégel dans la chambre humide (en bas)

Ainsi, l'effet du gel est étudié en comparant deux échantillons ayant les mêmes conditions de fabrication et d'exposition dans la chambre humide. La seule différence se fera lors de la phase de gel : l'un sera placé dans le congélateur pour subir une attaque au gel alors que l'autre sera emballé pour être protégé de toute attaque humide. Ce dernier sera placé dans la chambre humide lors du gel du premier échantillon. Dans la suite, le premier échantillon portera dans son nom la mention GD pour gel-dégel et le second la mention H pour humidification. La Figure 49 illustre la méthode d'étude de l'influence du gel.

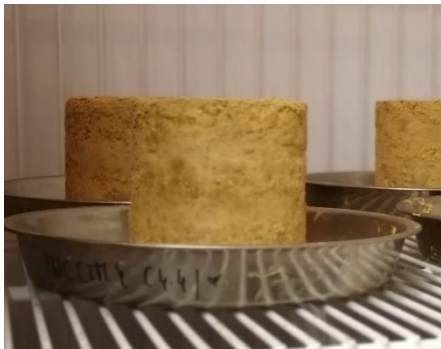



Cycle	Phase 1 pendant 24h	Phase 2 pendant 23h
Echantillon avec gel-dégel (GD)	 Dans le congélateur pour le gel	 Dans la chambre humide pour le dégel
Echantillon sans gel-dégel (H)	 Dans la chambre humide et emballé	 Dans la chambre humide pour l'humidification

Figure 49 : Essai pour la mesure de l'influence du gel avec deux échantillons

L'analyse de l'effet de l'humidification par remontées capillaires repose sur les différences observées entre deux échantillons identiques. Leur différence se marque lors de la phase de dégel ou d'humidification dans la chambre humide. L'un d'eux sera placé dans un récipient contenant suffisamment d'eau pour une absorption d'eau liquide en continu. Comme nous pouvons voir sur la Figure 50, l'échantillon avec remontées capillaires est placée sur des pierres poreuses sur lesquelles est posé un papier absorbant type papier buvard de 5mm d'épaisseur (un papier absorbant de 6mm est recommandé par la norme (ASTM-D560 2016)). Un échantillon avec le dispositif d'absorption d'eau liquide portera dans son nom la mention RC (remontées capillaires). Le schéma d'analyse de l'influence de la remontée capillaire est donné dans la Figure 51.



Figure 50 : Mise en place du dispositif d'absorption d'eau liquide lors du dégel





Cycle	Phase 1 pendant 24h	Phase 2 pendant 23h
Echantillons sans absorption d'eau par capillarité	 <p>Dans le congélateur pour le gel</p>	 <p>Dans la chambre humide sans le dispositif de remontées capillaires</p>
Echantillons avec absorption d'eau par capillarité	 <p>Dans le congélateur pour le gel</p>	 <p>Dans la chambre humide avec le dispositif de remontées capillaires</p>

Figure 51 : Essai pour la mesure de l'influence de l'absorption d'eau liquide par capillarité(RC) avec les échantillons GD

3.3 Présentation et nomenclature des échantillons

La fabrication des échantillons et le protocole expérimental définis précédemment permettent ainsi de nommer les échantillons. L'exemple des 12 échantillons compactés à la presse est donné dans le Tableau 18.

Noms	Compactage (PRESS/PROC)	Stabilisation (CIM)	Gel/Humidification (GD/H)	Remontées capillaires (RC)	Mesures
PRESS-GD-1	Presse	Non	Gel-dégel	Non	Géométrie + masse humide
PRESS-GD-2	Presse	Non	Gel/dégel	Non	Masse écaillée
PRESS-H	Presse	Non	Humidification	Non	Géométrie + masse humide
PRESS-GD-RC-1	Presse	Non	Gel-dégel	Oui	Géométrie + masse humide
PRESS-GD-RC-2	Presse	Non	Gel/dégel	Oui	Masse écaillée
PRESS-H-RC	Presse	Non	Humidification	Oui	Géométrie + masse humide
PRESS-CIM-GD-1	Presse	Oui	Gel-dégel	Non	Géométrie + masse humide
PRESS-CIM-GD-2	Presse	Oui	Gel/dégel	Non	Masse écaillée
PRESS-CIM-H	Presse	Oui	Humidification	Non	Géométrie + masse humide
PRESS-CIM-GD-RC-1	Presse	Oui	Gel-dégel	Oui	Géométrie + masse humide
PRESS-CIM-GD-RC-2	Presse	Oui	Gel/dégel	Oui	Masse écaillée
PRESS-CIM-H-RC	Presse	Oui	Humidification	Oui	Géométrie + masse humide

Tableau 18 : Présentation des échantillons fabriqués à la presse et nomenclature suivant les paramètres étudiés

Pour les échantillons fabriqués au proctor il suffit juste de remplacer PRESS par PROC. Ainsi, à titre d'exemple, l'échantillon PROC-CIM-GD-RC-2 est l'échantillon compacté au proctor à partir d'une terre stabilisée sur lequel des cycles de gel-dégel et une absorption d'eau par capillarité sont effectués. Cet échantillon n°2 permet alors de déterminer la masse écaillée.

A la suite de la période de cure des échantillons stabilisés, les mesures initiales sont effectuées sur l'ensemble des échantillons. Le Tableau 19 rappelle l'essentiel des grandeurs utilisées comme valeurs initiales de l'essai de gel-dégel dont les résultats sont présentés, analysés et discutés dans le chapitre suivant.

Echantillons	Hauteur moyenne h_{moy} (mm)	Diamètre moyen Φ_{moy} (mm)	Masse humide m_h (g)	Teneur en eau ω (%)
PRESS-GD-1	105,40	101,44	1692,9	18,99%
PRESS-GD-2	102,65	101,09	1671	17,45%
PRESS-H	104,56	101,02	1679,3	18,03%
PRESS-GD-RC-1	104,11	100,79	1678,7	17,99%
PRESS-GD-RC-2	103,46	101,03	1671,6	17,49%
PRESS-H-RC	105,95	100,92	1655,8	16,38%
PROC-GD-1	104,15	100,98	1670,9	17,44%
PROC-GD-2	105,94	101,41	1721,7	21,01%
PROC-H	103,72	100,67	1669,5	17,34%
PROC-GD-RC-1	103,99	100,41	1676,5	17,83%
PROC-GD-RC-2	104,06	100,77	1668,73	17,29%
PROC-H-RC	103,33	100,7	1668,63	17,28%
PRESS-CIM-GD-1	103,03	101,09	1631,4	18,39%
PRESS-CIM-GD-2	101,57	101,08	1627,4	18,10%
PRESS-CIM-H	103,24	100,7	1623,7	17,83%
PRESS-CIM-GD-RC-1	103,39	100,95	1624,3	17,87%
PRESS-CIM-GD-RC-2	103,37	101	1607,2	16,63%
PRESS-CIM-H-RC	102,60	101,06	1606,3	16,56%
PROC-CIM-GD-1	103,16	101,14	1661,3	20,56%
PROC-CIM-GD-2	105,73	101,4	1644,0	19,30%
PROC-CIM-H	98,96	101,21	1636,8	18,78%
PROC-CIM-GD-RC-1	99,71	101,46	1654,5	20,06%
PROC-CIM-GD-RC-2	100,92	101,49	1652,9	19,95%
PROC-CIM-H-RC	100,48	100,61	1657,2	20,26%

Tableau 19 : Présentation et caractéristiques des 24 échantillons étudiés

Chapitre 4

**Analyse de la résistance au gel et à l'écaillage de la terre crue :
discussions sur les résultats expérimentaux**

1. Les calculs et hypothèses de calcul

1.1 Calculs à partir des mesures géométriques

La mesure des hauteurs et des diamètres permet de calculer les déformations axiales et radiales selon le point de relevé de mesure après un nombre n de cycles de gel-dégel. Ainsi, au point de mesure i , la déformation radiale après n cycles de gel-dégel est exprimée par

$$\varepsilon_{r_i}^n = \frac{\phi_i^n - \phi_i^0}{\phi_i^0}$$

Où ϕ_i^n représente la valeur du diamètre mesurée au point i au n^e cycle et ϕ_i^0 constitue le diamètre mesuré au point i avant le début des cycles.

On définit aussi la déformation axiale obtenue après n cycles au point de mesure j comme :

$$\varepsilon_{r_j}^n = \frac{h_j^n - h_j^0}{h_j^0}$$

Où h_j^n représente la hauteur mesurée au point j au n^e cycle et h_j^0 constitue la hauteur mesurée au point j avant le début des cycles.

Ces mesures dimensionnelles donnent aussi respectivement une hauteur moyenne et un diamètre moyen d'un échantillon à un cycle n quelconque. En supposant une forme toujours cylindrique de l'échantillon, la déformation volumique subie par l'échantillon après n cycles s'exprime comme

$$\varepsilon^n = \frac{V_{moy}^n - V_{moy}^0}{V_{moy}^0}$$

Avec V_{moy}^n le volume moyen de l'échantillon après n cycles et V_{moy}^0 le volume moyen de l'échantillon à l'état initial.

Les mesures étant effectuées à la fois après la phase de gel et la phase de dégel, les résultats retenus pour l'analyse sont ceux obtenus après le dégel des échantillons.

1.2 Calculs à partir des mesures massiques

La perte de masse par écaillage est déterminée par un calcul de différence de masses avant et après brossage après chaque phase :

$$m_{\text{écaillé}} = (m_{av} - m_{ap})_{gel} + (m_{av} - m_{ap})_{dégel}$$

Avec m_{av} la masse de l'échantillon 2 avant brossage et m_{ap} la masse du même échantillon après brossage.

C'est ainsi que la perte de masse globale $m_{\text{écaillé}}$ pour un cycle est la somme algébrique de la perte de masse enregistrée après la phase de gel et celle après la phase de dégel.

La comparaison des masses écaillées est possible en ramenant la perte de masse à l'unité de surface exposée au gel pour chaque échantillon. Ainsi, pour chaque échantillon, la surface exposée au gel est la surface latérale entière et la surface de la face supérieure

$$S = (\pi \cdot \phi_{moy} \cdot h_{moy}) + \left(\pi \frac{(\phi_{moy})^2}{4} \right)$$

La masse écaillée de chaque échantillon par unité de surface après chaque cycle est alors

$$\bar{m} = \frac{m_{\text{écaillé}}}{S}$$

La mesure de la teneur en eau ω^n d'un échantillon au cycle n s'effectue à première vue par la formule :

$$\omega^n = \frac{m_{hum}^n}{m_{sec}^n} - 1$$

Où m_{hum}^n représente la masse humide de l'échantillon considéré au cycle n et m_{sec}^n sa masse sèche au cycle n.

Ces masses constituent les valeurs obtenues après la phase de dégel. Si m_{hum}^n s'obtient directement par pesage de l'échantillon, la quantification de m_{sec}^n nécessite quelques hypothèses car la masse sèche d'un échantillon diminue au cours des cycles en raison de la perte de masse par écaillage.

Ainsi dans l'hypothèse où l'écaillage est entièrement dû au gel, nous pouvons considérer que la masse sèche des échantillons ne subissant pas de gel reste invariable donc pour tout cycle n, $m_{sec}^n = m_{sec}^0$.

En ce qui concerne les échantillons exposés au gel, nous supposons que deux échantillons identiques (mêmes conditions de fabrication et d'essai) présentent la même perte de masse par écaillage. De ce fait, la connaissance de la masse écaillée $m_{écaillé}^n$ de l'échantillon 2 et de la teneur en eau $\omega_{écaillé}$ de cette masse écaillée permet la détermination masse sèche au cycle n comme

$$m_{sec}^n = m_{sec}^{n-1} - \frac{m_{écaillé}^n}{1 + \omega_{écaillé}}$$

Où m_{sec}^n et m_{sec}^{n-1} représentent les masses sèches de l'échantillon 1 respectivement aux cycles n et n-1 ; $m_{écaillé}^n$ la masse écaillée de l'échantillon 2 au cycle n et $\omega_{écaillé}$ la teneur en eau de la terre écaillée.

On suppose que la terre écaillée présente toujours la même teneur en eau quel que soit l'échantillon et le nombre de cycles effectués. Ainsi, une mesure de la teneur en eau sur une quantité de terre écaillée suffisamment représentative de tous les échantillons a donné une valeur de $\omega_{écaillé} = 6,64\%$. Ce résultat sera retenu pour tous les échantillons présentant de l'écaillage.

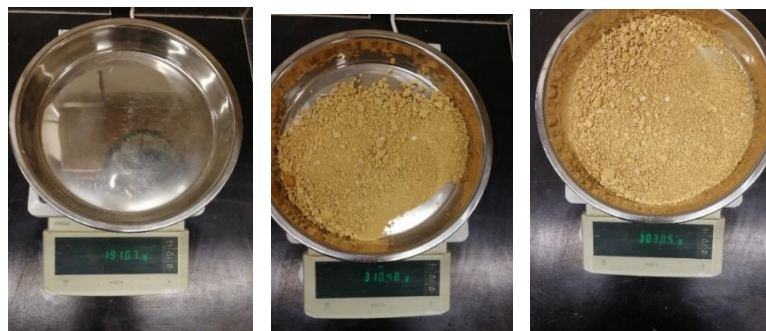


Figure 52 : Mesure de la teneur en eau de la masse de terre récoltée lors de l'écaillage

2. L'influence du gel et de l'absorption d'eau sur le matériau terre

Le Tableau 20 présente les types de comparaisons qui seront effectués. XXXX représente le mode de compactage :PRESS ou PROC.

		Effet du gel	
		Echantillon A	Echantillon B
Effet de l'absorption d'eau sans stabilisation	Echantillon 1	XXXX- GD	XXXX- H
	Echantillon 2	XXXX- GD-RC	XXXX- H-RC
Effet de l'absorption d'eau avec stabilisation	Echantillon 1	XXXX-CIM- GD	XXXX-CIM- H
	Echantillon 2	XXXX-CIM- GD-RC	XXXX-CIM- H-RC

Tableau 20 : Méthode de comparaison des échantillons pour l'étude de l'influence du gel et de l'absorption d'eau par capillarité

L'influence du gel est obtenue par comparaison de l'échantillon A et l'échantillon B d'une même ligne. L'effet de l'absorption d'eau liquide par capillarité est analysé en comparant l'échantillon 1 et l'échantillon 2 d'une même colonne.

2.1 Le gel comme cause principale de l'écaillage : validation d'hypothèse

Le gel est connu pour être le principal responsable de l'écaillage du matériau. Ce constat s'est effectué visuellement en comparant les échantillons ayant subi un gel avec ceux n'ayant pas été gelés. L'écaillage est davantage visible sur les échantillons stabilisés car ces derniers ont effectué plusieurs cycles de gel-dégel. Les échantillons non-stabilisés n'ont pas eu le temps de présenter un écaillage visible car la plupart s'est effondrée avant les cinq premiers cycles. La Figure 53 illustre l'état de la surface des échantillons stabilisés (avec et sans gel) après les 12 cycles de gel-dégel.

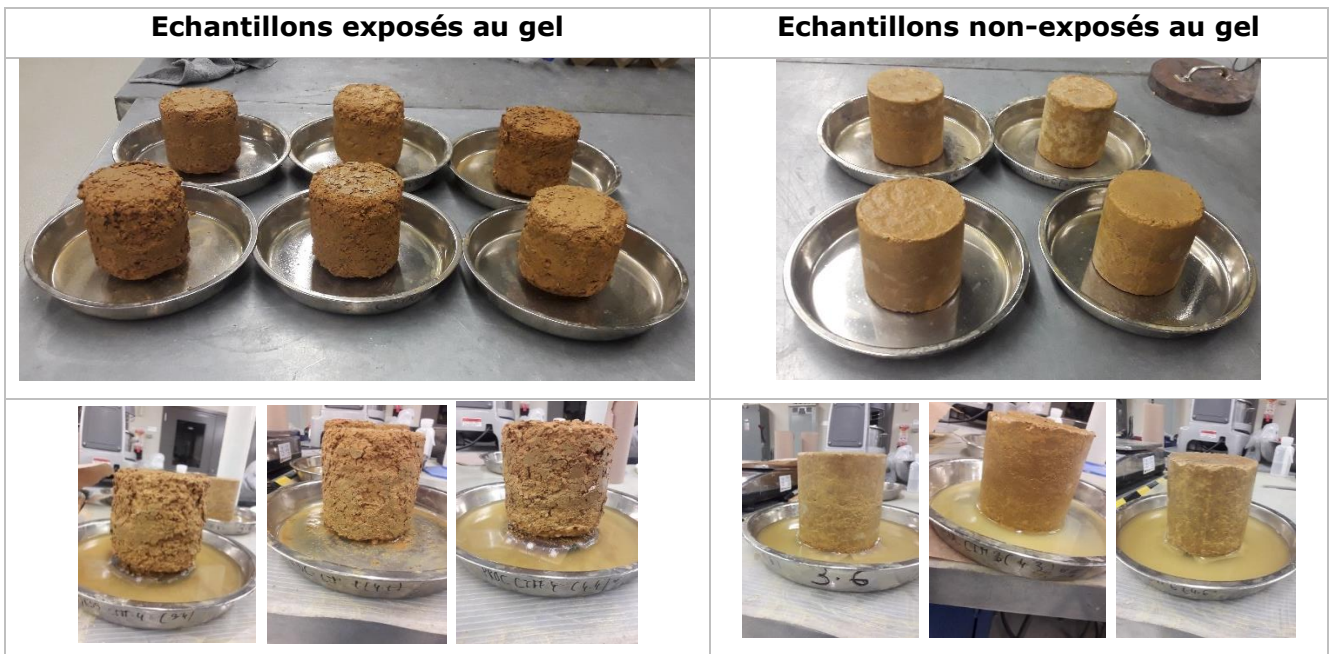


Figure 53 : Illustration de l'endommagement de surface (écaillage) en raison de la phase de gel

L'endommagement de surface des matériaux exposés au gel intervient bien qu'aucune solution saline n'ait été appliquée sur la surface des échantillons. Les sollicitations cycliques de gel-dégel apparaissent comme la cause de la dégradation superficielle des échantillons. La quantité de masse écaillée par unité de surface sera alors analysée suivant des critères de comparaison comme l'effet de la stabilisation ou l'effet d'absorption d'eau liquide.

2.2 Analyse de l'évolution de la teneur en eau

Pour chaque type de fabrication des échantillons (PRESS, PROC, PRESS-CIM et PROC-CIM), l'évolution de la teneur en eau massique au fur et à mesure des cycles de gel-dégel est reportée dans les figures suivantes.

2.2.1 Cas des échantillons non-stabilisés

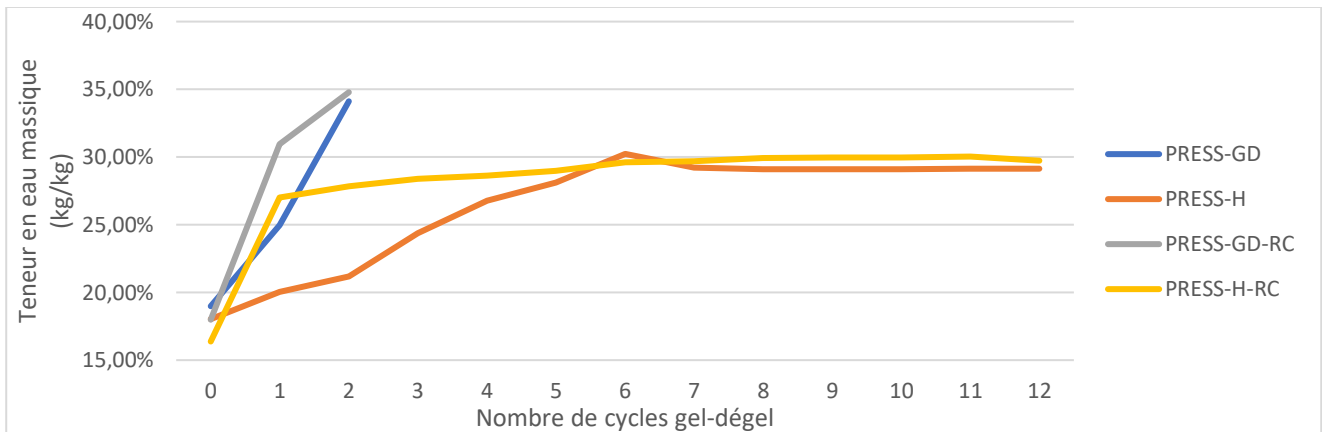


Figure 54 : Evolution de la teneur en eau suivant le nombre de cycles (cas des PRESS)

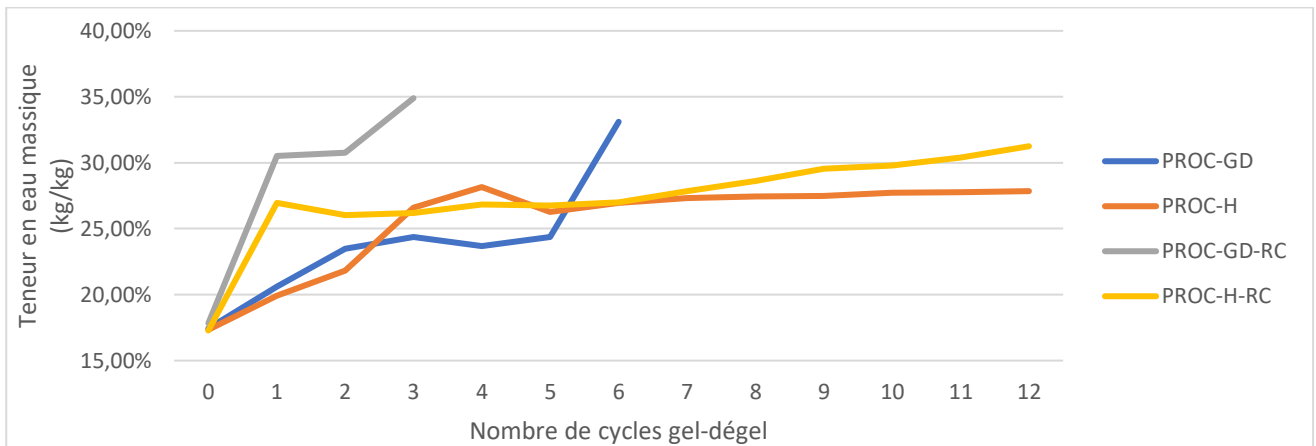


Figure 55 : Evolution de la teneur en eau suivant le nombre de cycles (cas des PROC)

Indépendamment du mode de compactage, nous remarquons dans les Figure 54 et Figure 55 que l'augmentation des teneurs en eau est plus importante pour les échantillons ayant subi une phase de gel. Précisément, le gel augmente la teneur en eau maximale atteinte par les échantillons. L'effondrement de ces échantillons intervient systématiquement à la suite de la phase de dégel ; ce qui est cohérent avec les observations de (Scarato and Jeannet 2015) concernant l'effondrement des habitats en terre lors de la période de dégel post-hivernal . Nous notons aussi une teneur en eau critique de 35% en moyenne pour les échantillons au gel. Cependant, les échantillons n'ayant jamais été gelés présentent des teneurs en eau maximales qui se stabilisent autour de 30%. Cette différence peut s'expliquer par la déformation des pores due à la cristallisation lors du gel qui augmente le volume de l'espace poral et par conséquent la capacité de saturation en eau des échantillons. C'est en ce sens que les échantillons non-stabilisés soumis au gel s'effondrent rapidement après peu de cycles de gel-dégel (2 à 6 cycles de gel-dégel).

Parallèlement, la vitesse de saturation est accélérée par l'absorption d'eau liquide par capillarité. En effet, les teneurs en eau des échantillons avec remontées capillaires augmentent rapidement lors des premiers cycles. Cette forte saturation peut s'expliquer par le mécanisme de succion du matériau à faible teneur en eau. C'est lorsque la teneur en eau est importante, que le mécanisme de succion est amoindri. Aussi, l'absorption d'eau est davantage favorisée par la présence des cristaux de glace au début du dégel. En effet, la glace engendre le mécanisme de cryosuccion qui est d'autant plus important dans le cas où de l'eau liquide est placée au-dessous de l'échantillon. L'absorption d'eau par succion et cryosuccion est le principal facteur de l'accélération de la cinétique de saturation en eau et d'effondrement prématuré au gel.

Il ressort de la Figure 56 que le gel et l'absorption d'eau liquide provoquent une variation plus importante des teneurs en eau entre le début de l'essai ω_0 et le dernier cycle ω_f subi par chaque échantillon. Globalement, ces augmentations ($\omega_f - \omega_0$) de teneurs en eau varient de +10,50% à +17,06%. Mais pour obtenir l'effet du gel et de l'absorption sur l'augmentation de la teneur en

eau, on calcule la différence de ces augmentations entre les échantillons appropriés (de même couleur dans la fig. D'une part, l'effet du gel se traduit par un surplus de 3,09% à 5,16 % dans l'augmentation de la teneur en eau alors que l'absorption d'eau par capillarité est à l'origine d'une hausse de 1,40% à 3,47% de la teneur en eau.

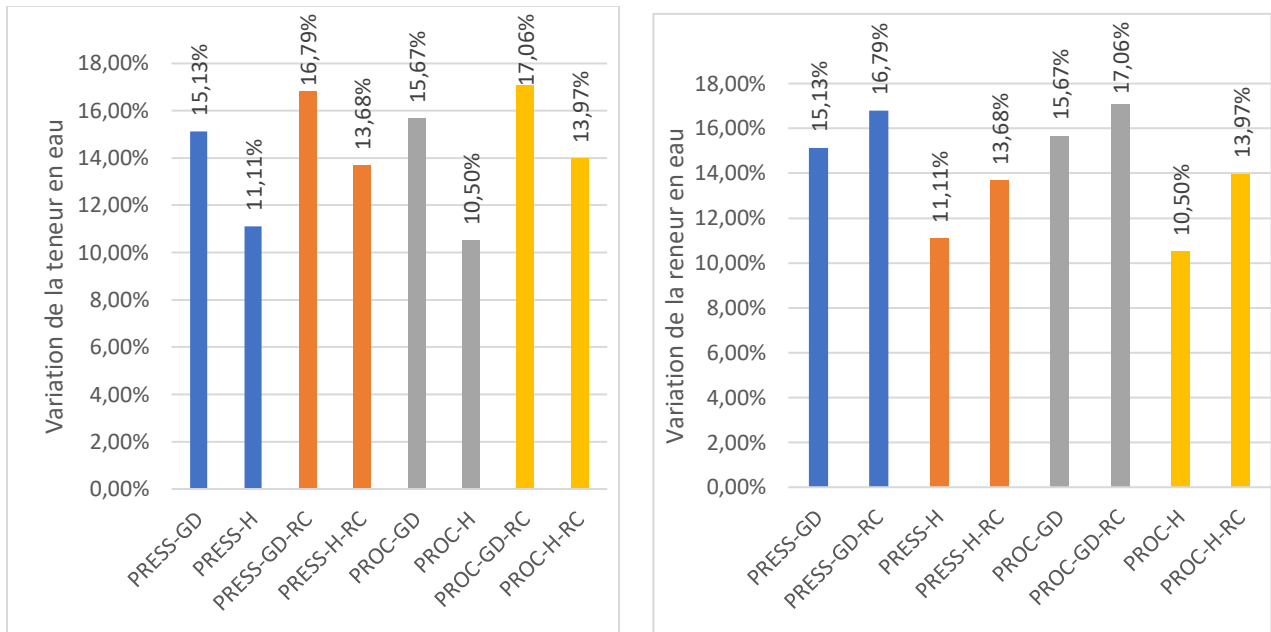


Figure 56 : L'influence du gel (à gauche) et de l'absorption d'eau par capillarité (à droite) sur la variation maximale de la teneur en eau (cas des échantillons non-stabilisés).

2.2.2 Cas des échantillons stabilisés

Les résultats de l'évolution des teneurs en eau pour les échantillons stabilisés sont reportés dans les Figure 57 et Figure 58. Nous observons sur leurs teneurs en eau, des augmentations plus faibles que les variations soulignées pour les échantillons non-stabilisés.

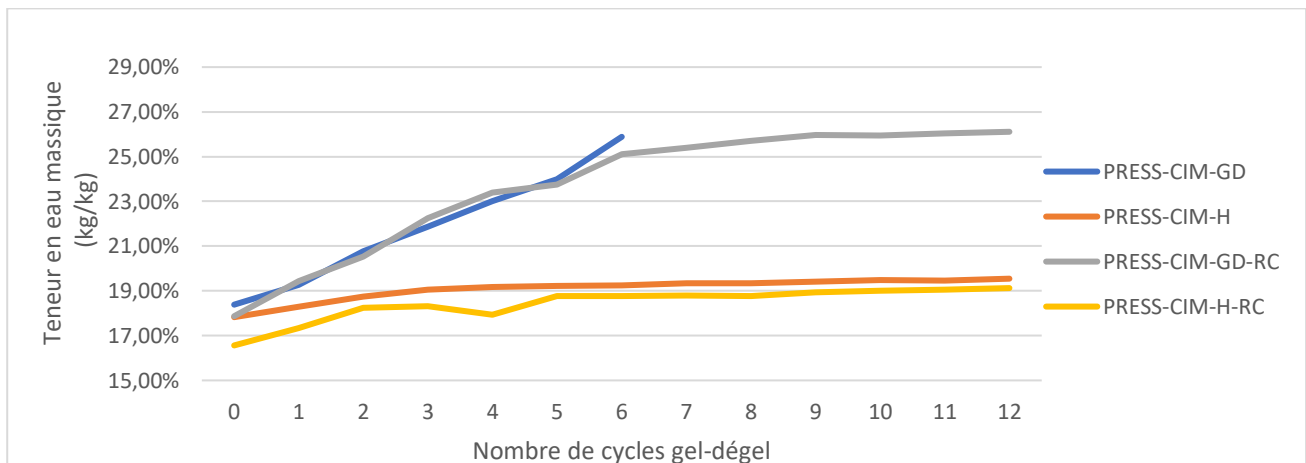


Figure 57 : Evolution de la teneur en eau suivant le nombre de cycles (cas des PRESS-CIM)

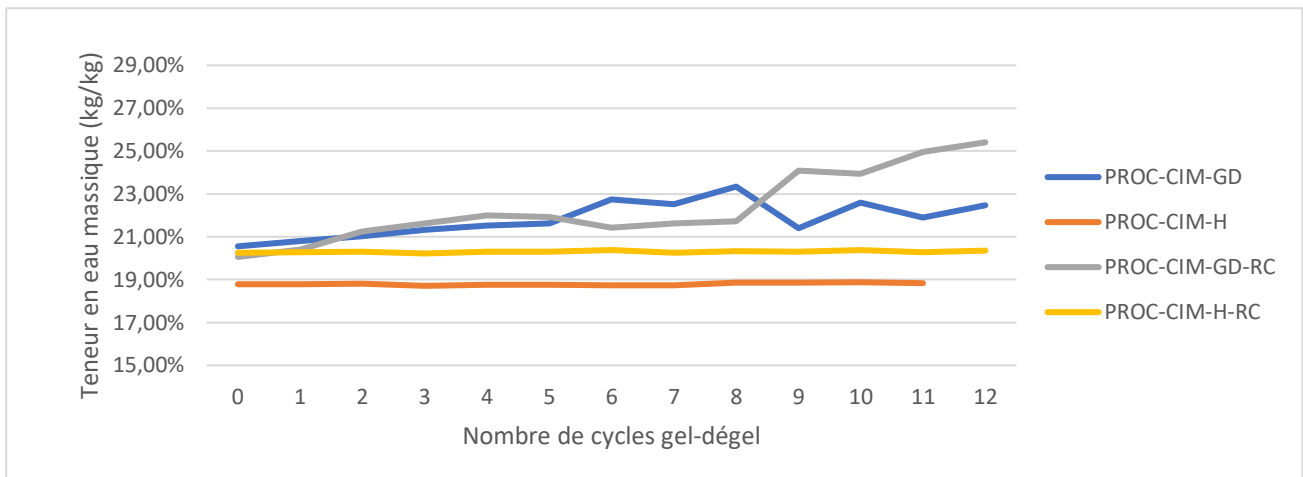


Figure 58 : Evolution de la teneur en eau suivant le nombre de cycles (cas des PROC-CIM)

On note que les échantillons stabilisés confectionnés à la presse présentent une sensibilité plus importante que ceux fabriqués au proctor en ce qui concerne l’attaque humide associée au gel.

Contrairement aux échantillons non-stabilisés soumis au gel-dégel, parmi les échantillons stabilisés, seul l’échantillon PRESS-CIM-GD n’a pas atteint les 12 cycles de gel-dégel. La stabilisation au ciment semble alors protéger le matériau des effets du gel et de l’absorption d’eau liquide par capillarité. La Figure 59 montre globalement que, pour les échantillons stabilisés, les hausses de teneurs en eau entre le début et la fin des cycles s’étendent de +0,11% à +8,24%. D’un côté, l’influence du gel se manifeste par un accroissement de 1,45% à 5,78% dans la variation de teneur en eau. D’un autre côté, l’absorption d’eau liquide par capillarité est responsable d’un surplus de 0,74% à 3,42%.

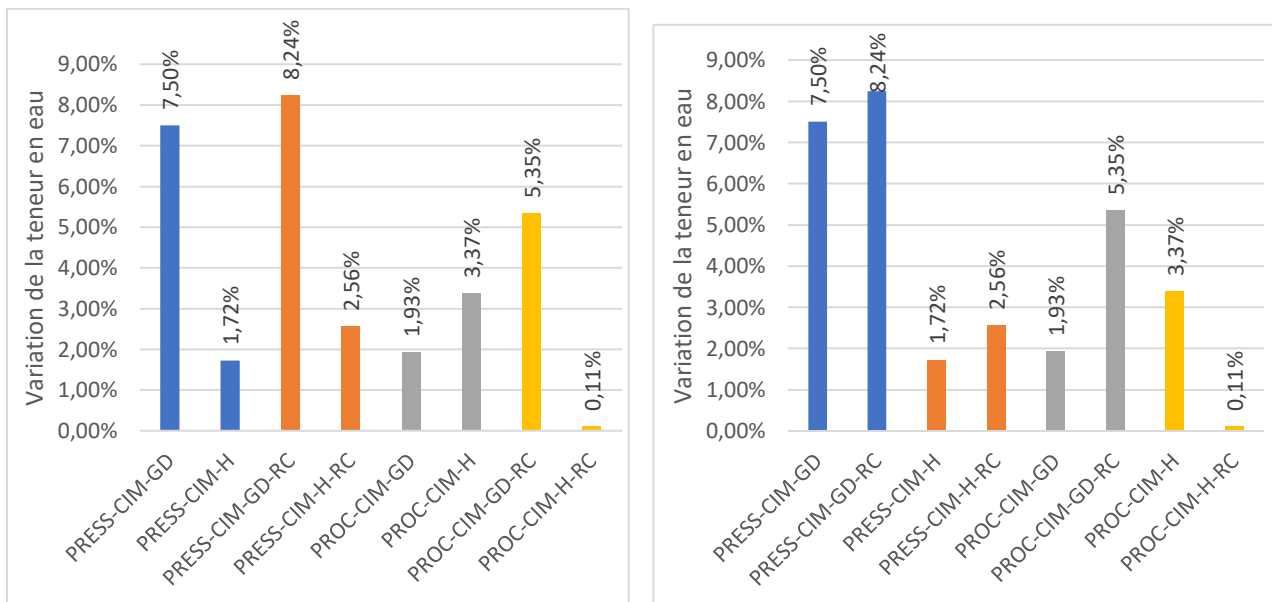


Figure 59 : L’influence du gel (à gauche) et de l’absorption d’eau par capillarité (à droite) sur la variation maximale de la teneur en eau (cas des échantillons stabilisés).

On observe que le résultat obtenu pour l’échantillon PROC-CIM-H conduit à des conclusions erronées. D’une part, l’échantillon PROC-CIM-H (sans gel) présente une augmentation de teneur en eau plus importante que l’échantillon PROC-CIM-GD (avec gel). D’autre part, nous remarquons une augmentation de teneur en eau pour l’échantillon PROC-CIM-H (sans remontées capillaires) plus forte que pour l’échantillon PROC-CIM-H-RC (avec remontées capillaires). Néanmoins, le gel participe fortement à la hausse de la teneur en eau dans le cas des échantillons stabilisés notamment pour la catégorie PRESS-CIM. Cette observation est cohérente avec l’évaluation proposée par (Fabbri, Morel and Gallipoli 2018) de la forte vulnérabilité à l’action du gel de la terre stabilisée. En effet, les échantillons stabilisés exposés au gel présentent des

teneurs en eau maximales entre 22,15% et 26,11% alors que les échantillons sans action du gel atteignent finalement des teneurs en eau entre 19,13% et 22,15.

Généralement pour tous les échantillons, on peut alors conclure que le gel augmente les capacités de rétention d'eau dans le matériau et la teneur en eau maximale. Cela s'explique par la cryo-déformation des pores lors du gel et le mécanisme de cryosuccion au début du dégel. Cette cryosuccion est d'autant plus importante dans le cas où de l'eau liquide est placée au-dessous de l'échantillon. L'absorption d'eau par capillarité accélère davantage la cinétique de rétention d'eau. La saturation des échantillons est plus importante lors des premiers cycles en raison de la forte succion du matériau à faible teneur en eau. C'est lorsque la teneur en eau est importante, que le mécanisme de succion est amoindri.

2.3 Analyse de la perte de masse par écaillage

2.3.1 Cas des échantillons non-stabilisés

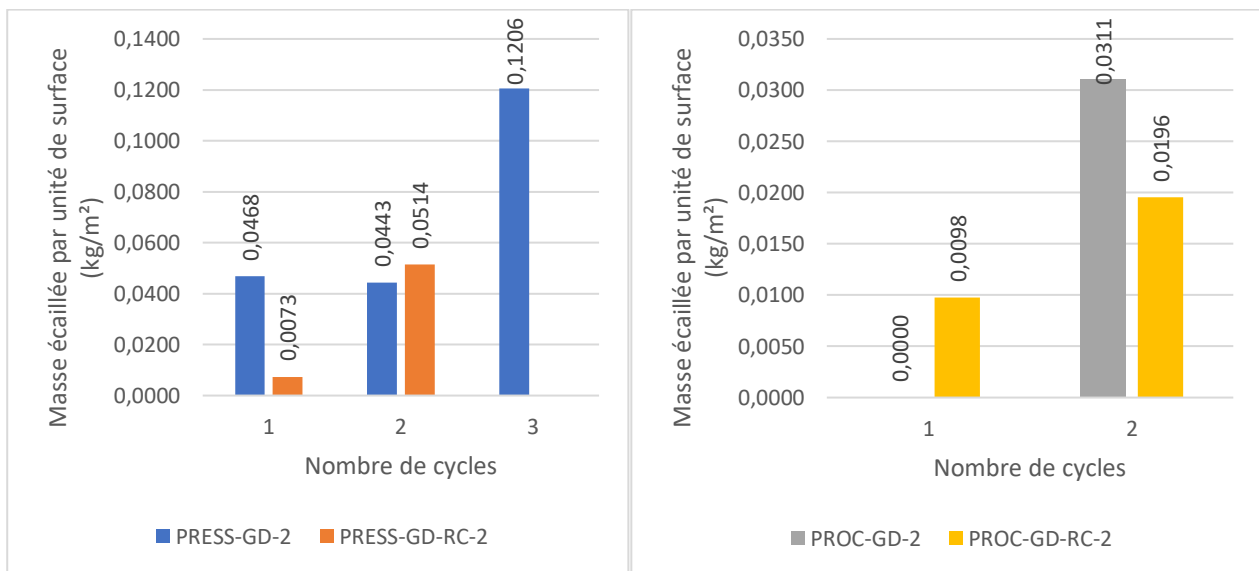


Figure 60 : Masse écaillée par unité de surface des échantillons non-stabilisés type PRESS (à gauche) et PROC (à droite) après chaque cycle de gel-dégel

Nous observons dans la Figure 60 que la perte de masse par écaillage est plus importante au fur et à mesure des répétitions de gel-dégel. Mais, vu que les échantillons non-stabilisés n'ont tenu que très peu de cycles, il est difficile d'établir une relation entre la masse écaillée et l'effet de l'absorption d'eau par capillarité ou du mode de compactage.

2.3.2 Cas des échantillons stabilisés

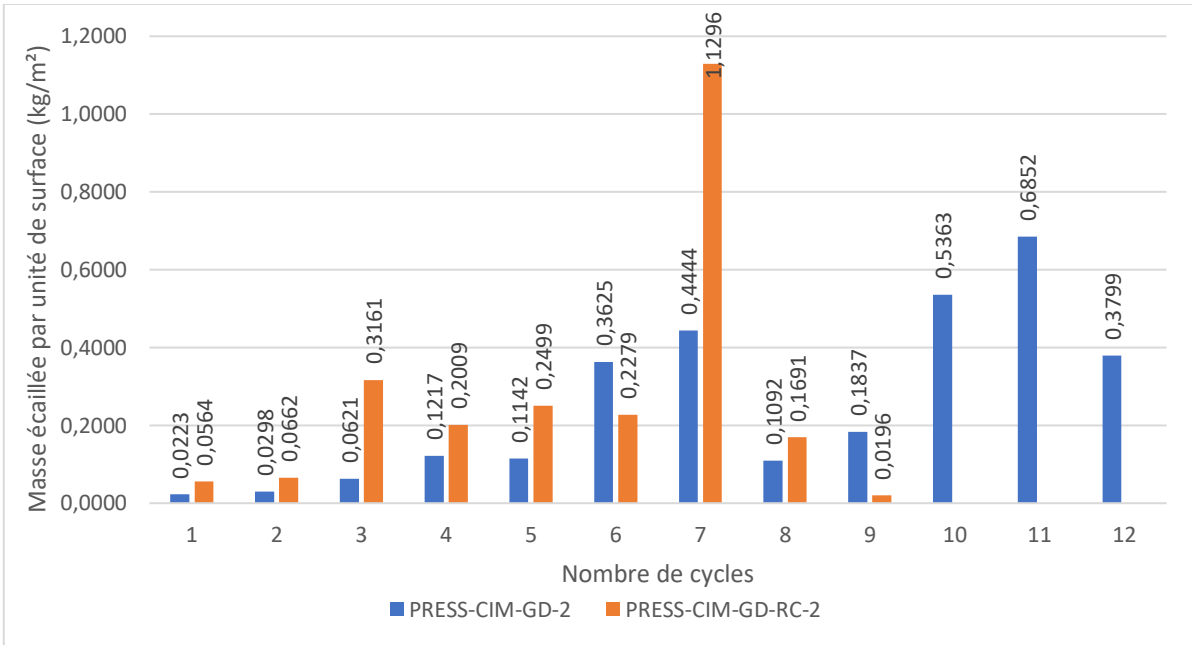


Figure 61 : Masse écaillée par unité de surface des échantillons stabilisés type PRESS-CIM après chaque cycle de gel-dégel

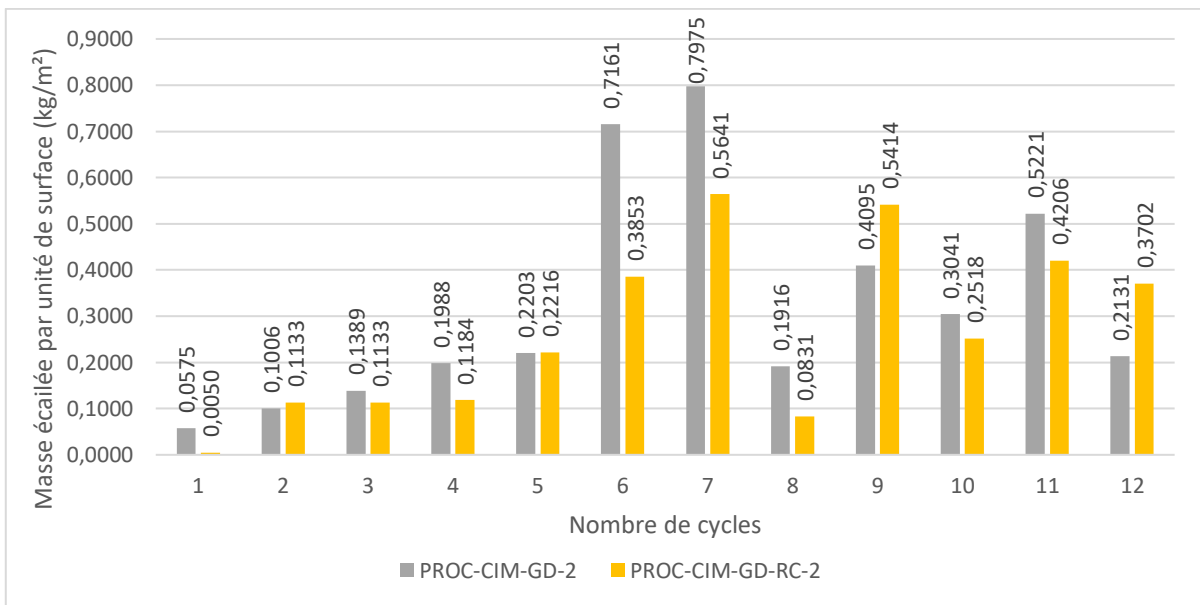


Figure 62 : Masse écaillée par unité de surface des échantillons stabilisés type PROC-CIM après chaque cycle de gel-dégel

La remarque effectuée dans le cas des échantillons non-stabilisés, à savoir une augmentation de la masse écaillée au fil des cycles, se confirme également pour les échantillons stabilisés : les Figure 61 et Figure 62 montrent un écaillage plus important au fil des cycles. Mais il ne s'agit pas d'une croissance continue suivant la répétition de cycles. Le maximum de l'écaillage est atteint au 7^e cycle. Il convient de noter que durant l'expérience, une panne du congélateur est intervenue entre le 6^e et le 7^e cycle et les échantillons ont été laissés dans le congélateur limité à T=-2,0°C durant trois jours consécutifs (cf Figure 63). Cela pourrait alors expliquer cet important écaillage.



Figure 63 : Température du congélateur bloquée à -2°C en raison d'un problème de refroidissement pendant 3 jours consécutifs

Toutefois, il est de même difficile de conclure sur l'influence de l'absorption de liquide sur la perte de masse. D'une part, pour les échantillons PRESS-CIM, elle semble accentuer la perte de masse par écaillage alors que d'autre part, pour les échantillons PROC-CIM, la masse écaillée est parfois atténuée par l'effet de l'absorption par capillarité. Nous remarquons aussi que le mode de compactage ne semble pas influencer sur la quantité de masse écaillée.

2.4 Analyse des déformations volumiques

2.4.1 Cas des échantillons non-stabilisés

Les figures 61 à 64 donnent les courbes de variations de déformations pour les quatre catégories d'échantillons (PRESS, PROC, PRESS-CIM et PROC-CIM).

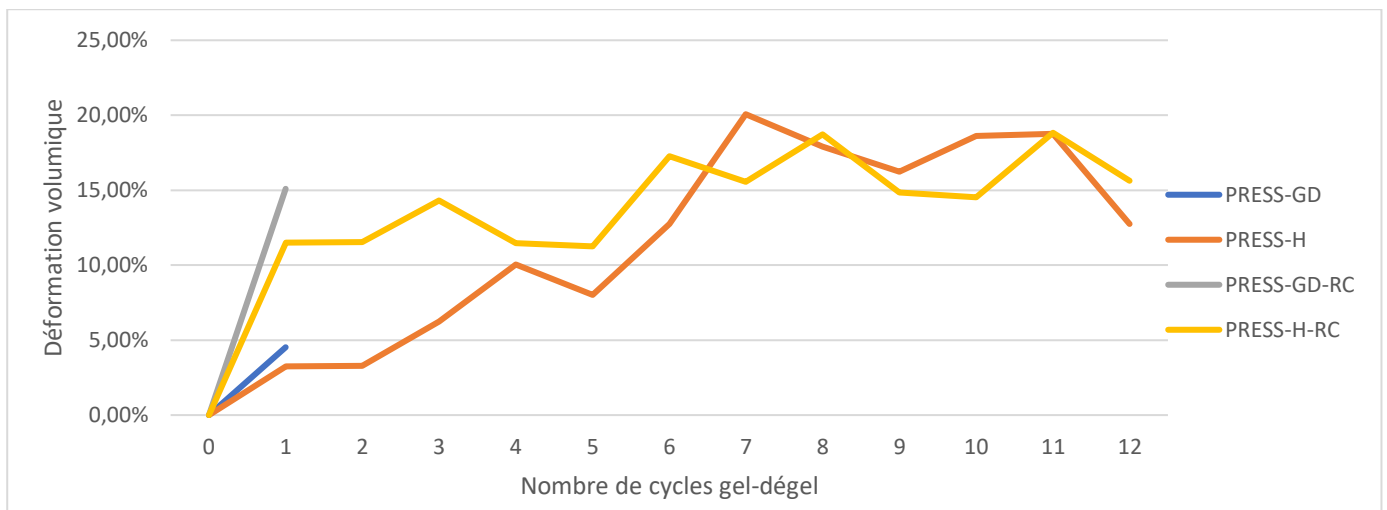


Figure 64 : Evolution de la déformation volumique suivant les cycles (cas des PRESS)

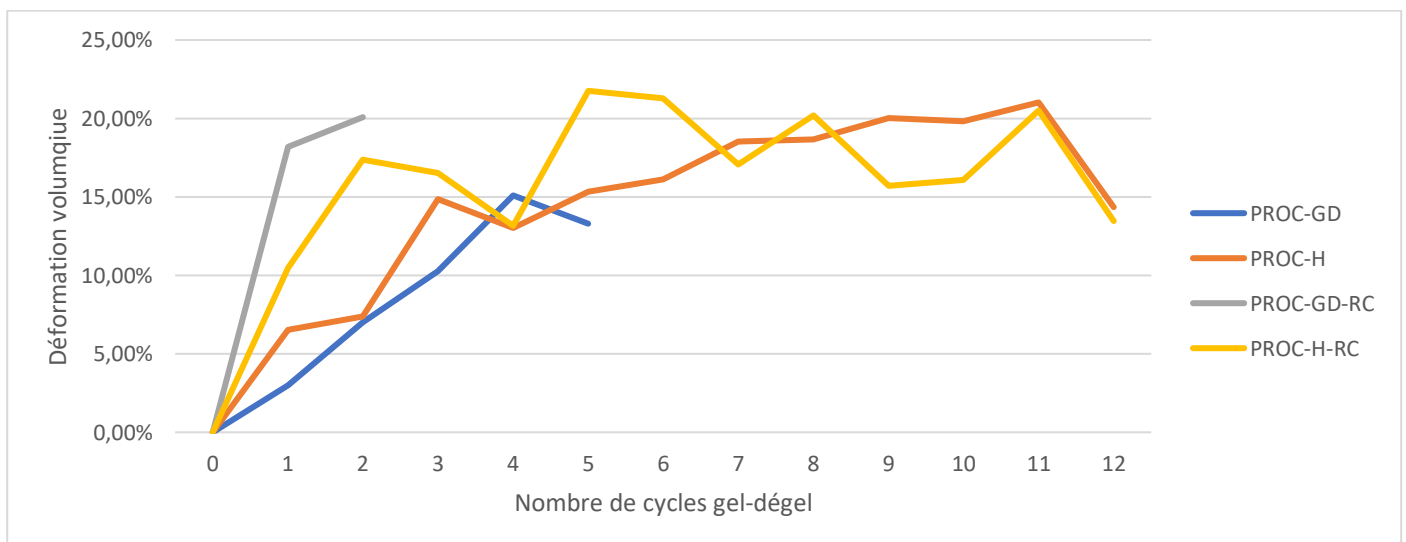


Figure 65 : Evolution de la déformation volumique suivant les cycles (cas des PROC)

Pour les échantillons non-stabilisés, nous observons à partir des Figure 64 et Figure 65 que les déformations volumiques sont croissantes au cours des cycles de gel-dégel. Contrairement aux courbes d'évolution de teneurs en eaux, les courbes des déformations ne présentent pas de valeurs limites pouvant être définies comme point d'effondrement des échantillons. Toutefois, l'augmentation des déformations volumiques se manifeste par deux allures. Les premiers cycles présentent une forte croissance des déformations volumiques. Les échantillons exposés à de l'absorption liquide par remontées capillaires (RC) se distinguent particulièrement par des pentes plus fortes et des déformations maximales dès le début; ce qui semble définir l'absorption d'eau liquide comme principal facteur des déformations volumiques. Cela semble cohérent avec l'analyse des teneurs en eau qui caractérise l'absorption d'eau comme responsable de la cinétique de saturation. Ici, elle influe la cinétique de déformations. En effet, nous nous apercevons que l'effet du gel est peu significatif dans le processus de déformations volumiques. Le rapprochement des deux courbes ne présente pas d'écart significatif de déformations volumiques suivant le mode de compactage. Mais au-delà de six à sept cycles, les déformations volumiques sont quasiment constantes autour de 15% à 20% sans distinction due à l'absorption d'eau liquide par capillarité. Il est à noter qu'il ne s'agit que des échantillons non-gelés. Cette limitation des déformations peut se justifier par l'atteinte de la saturation des échantillons.

2.4.2 Cas des échantillons stabilisés

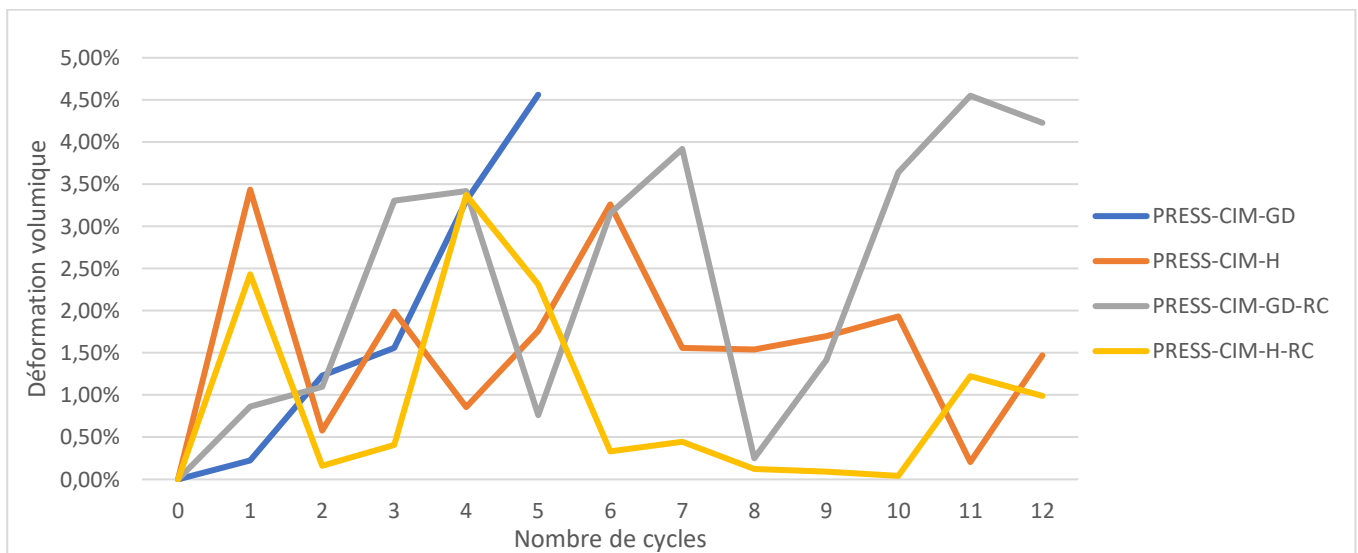


Figure 66 : Evolution de la déformation volumique suivant les cycles (cas des PRESS-CIM)

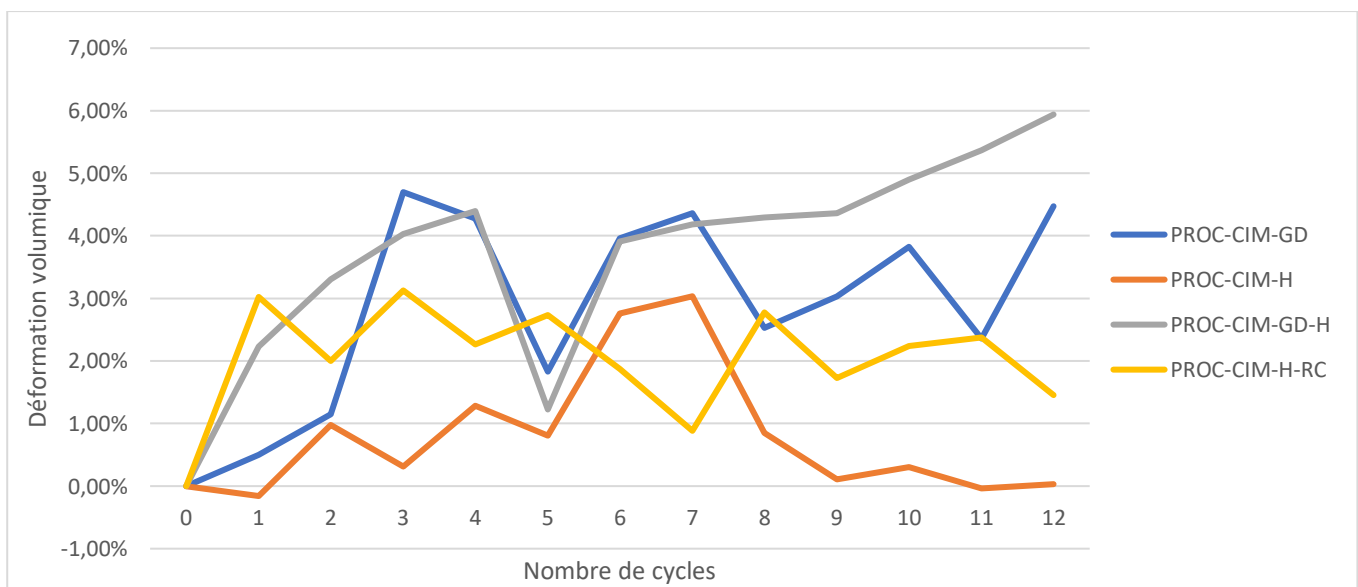


Figure 67 : Evolution de la déformation volumique suivant les cycles (cas des PROC-CIM)

Les Figure 66 et Figure 67 reportent les déformations volumiques mesurées pour les échantillons stabilisés. Nous constatons que la stabilisation réduit les déformations volumiques des échantillons. En effet, les déformations volumiques ne dépassent pas 6% dans le cas des échantillons stabilisés alors que pour les échantillons non-stabilisés, nous avons souligné des déformations à hauteur de 20%. Néanmoins, pour les échantillons stabilisés, les courbes de déformations volumiques présentent d'énormes fluctuations qui ne nous permettent pas de mettre en lumière l'influence du gel, de l'absorption liquide et du mode de compactage. Ces fluctuations sont essentiellement dues à notre imprécision de mesures vu que les échantillons stabilisés présentent peu de variations géométriques, donc les imprécisions de mesure sont quasiment du même ordre de grandeur des déformations de géométrie. Ce constat en est de même pour les courbes de déformations axiales et radiales des échantillons. Ces courbes sont données en annexe D.

2.5 Analyse des déformations radiales différées

Il s'agit d'évaluer les écarts de déformations radiales entre les points de mesure des diamètres afin de souligner l'existence de déformations différées suivant la hauteur de mesure. Nous rappelons dans la Figure 68 les trois points de mesure de diamètre permettant le calcul des trois déformations radiales d'un échantillon donnée.

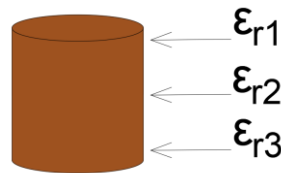


Figure 68 : Points de mesure des trois diamètres pour le calcul des déformations radiales suivant la hauteur considérée

Pour cette étude des déformations géométriques, nous nous limiterons aux premiers cycles de gel-dégel. Ce choix s'explique par les points suivants :

- Plusieurs échantillons non-stabilisés soumis au gel se sont effondrés dès le deuxième cycle de gel-dégel. Les autres présentent au cours des cycles de gel-dégel des déformations géométriques importantes due à la perte de masse par écaillage.



Figure 69 : Endommagement de quelques échantillons non-stabilisés

- Les échantillons non-stabilisés non-soumis au gel présentent après quelques cycles un niveau d'humidification très élevé. Les incertitudes de mesures sont trop importantes et ne permettent pas une analyse des déformations.



Figure 70 : Forte humidification et sensibilité des échantillons non-stabilisés sans gel

- Les échantillons stabilisés soumis au gel présentent après quelques cycles un endommagement superficiel en raison de l'écaillage due au gel. Les faibles déformations de géométrie rendent les imprécisions de mesures au même ordre de grandeur des déformations.



Figure 71 : Important écaillage d'échantillons stabilisés après plusieurs cycles de gel-dégel

2.5.1 Cas des échantillons non-stabilisés

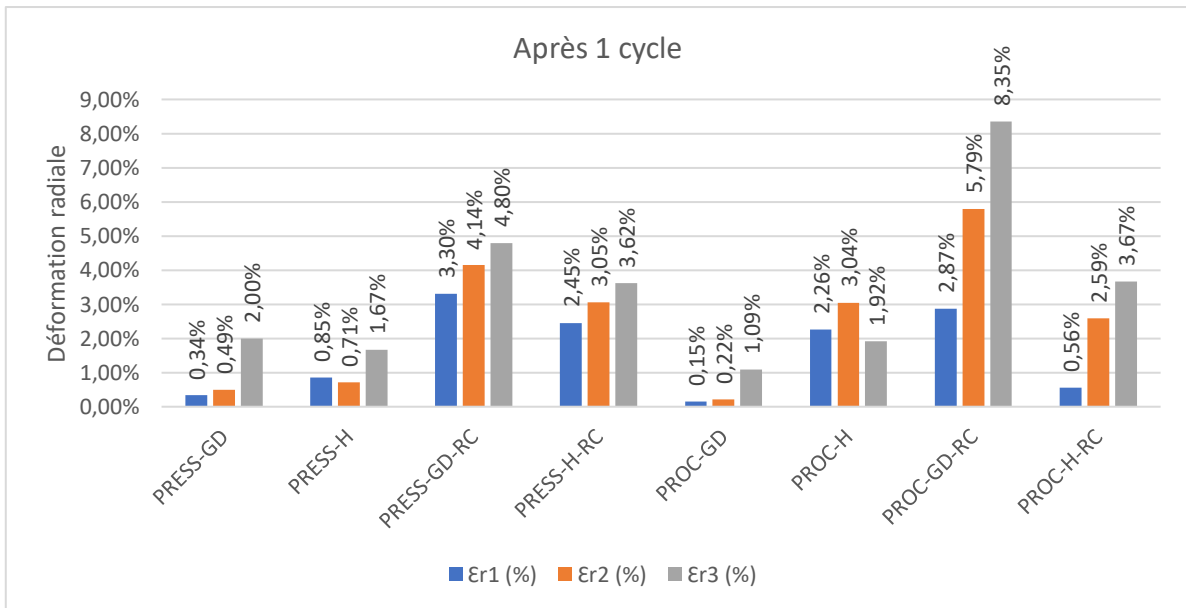


Figure 72: Déformations radiales mesurées après 1 cycle pour les échantillons non-stabilisés

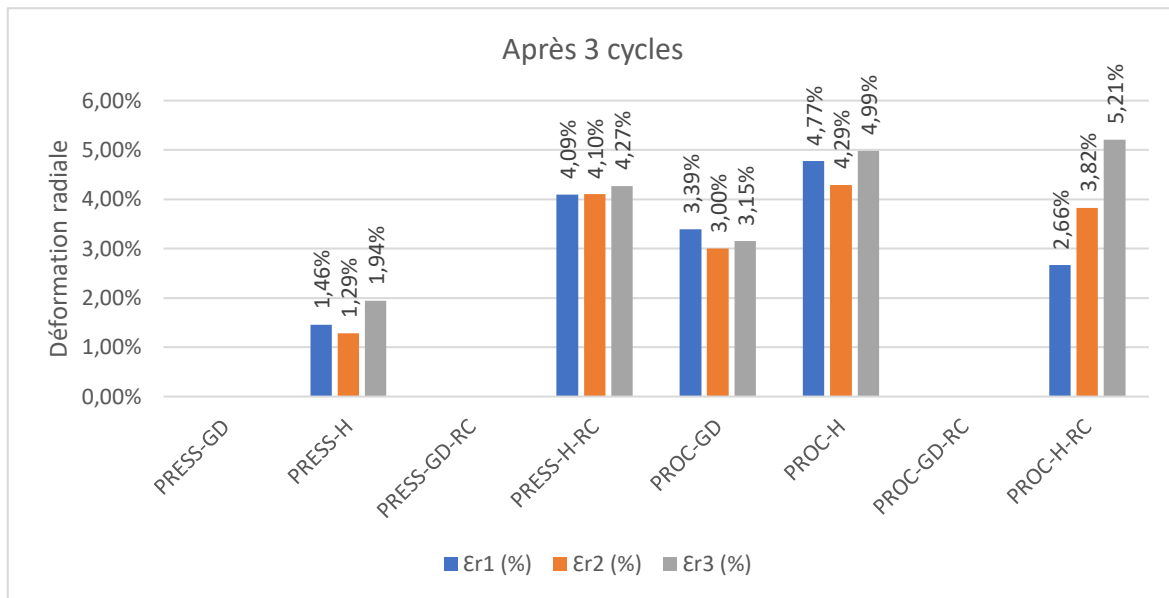


Figure 73 : Déformations radiales mesurées après 3 cycles pour les échantillons non-stabilisés

Les Figure 72 et Figure 73 montrent que les déformations radiales sont davantage importantes en partie basse de l'échantillon. Ce résultat s'observe bien dès le premier cycle de gel-dégel des échantillons non-stabilisés. Cette observation s'explique par une teneur en eau plus importante au pied des échantillons. C'est en sens que l'on peut constater des différences de déformations davantage marquées pour les échantillons avec remontées capillaires. La partie basse de l'échantillon constitue alors la zone la plus vulnérable. Il ressort de ces graphes un faible écart entre les déformations radiales pour les échantillons ne subissant pas de phase de gel. Cela est dû à la phase de stockage dans les emballages hermétiques favorisant une meilleure répartition de l'humidité dans le matériau donc une homogénéisation des déformations radiales. Les échantillons type PROC présentent toutefois des déformations globalement légèrement supérieures à celles du type PRESS.

2.5.2 Cas des échantillons stabilisés

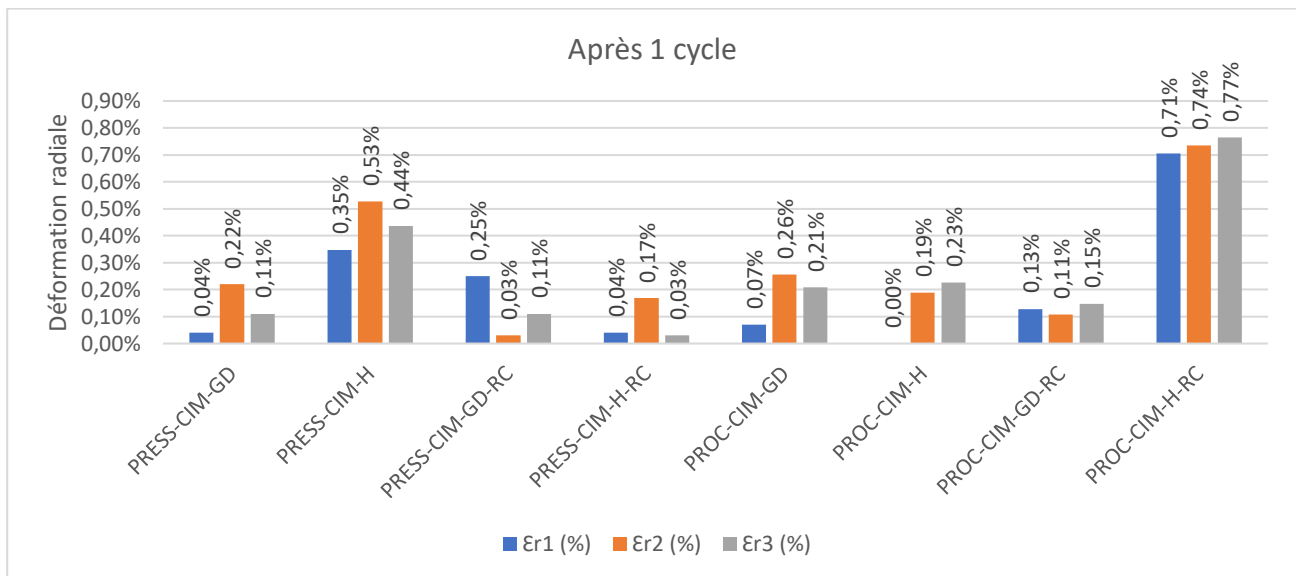


Figure 74 : Déformations radiales mesurées après 1 cycle pour les échantillons stabilisés

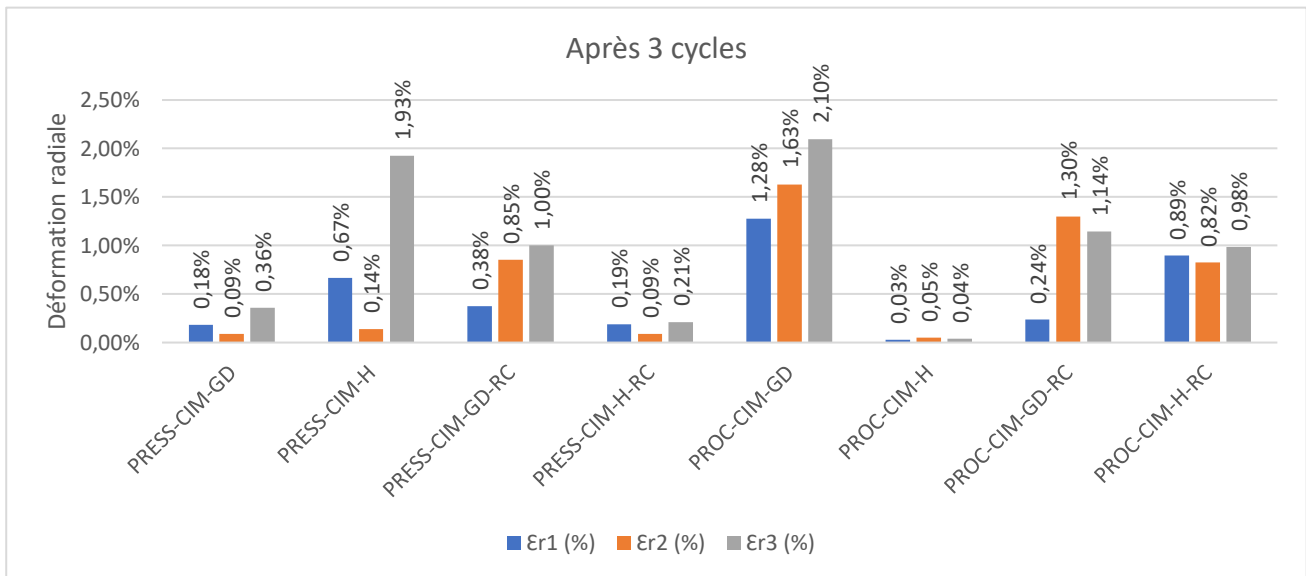


Figure 75 : Déformations radiales mesurées après 3 cycles pour les échantillons stabilisés

La répétition de cycles de gel-dégel provoque clairement des déformations radiales plus importantes. Contrairement aux échantillons non-stabilisés, les échantillons stabilisés présentent peu d'écart de déformations radiales (cf Figure 74 et Figure 75). Ces valeurs permettent difficilement de mettre en valeurs des déformations différés dues à l'absorption d'eau par capillarité. Cela conforte alors l'idée selon laquelle, la stabilisation limite effectivement la sensibilité du matériau terre à l'attaque humide.

3. L'influence de la stabilisation sur la résistance au gel

Dans l'étude de l'influence du gel et de l'absorption liquide par capillarité, une attention s'est particulièrement portée sur l'impact de la stabilisation sur la résistance du matériau terre à l'attaque humide associée au gel-dégel. Nous allons dans cette partie approfondir l'influence de la stabilisation sur le comportement du matériau terre exposé au gel et à l'écaillage.

Premièrement, la présence de ciment améliore la durabilité au gel du matériau terre (cf Figure 76). En effet, hormis deux échantillons stabilisés, tous les échantillons mixés avec du ciment ont résisté aux 12 cycles de gel-dégel tandis que les échantillons non-stabilisés exposés au gel-dégel n'ont pas tenu au-delà de 5 cycles. Nous remarquons également que la seule attaque humide (adsorption de vapeur d'eau et/ou absorption d'eau liquide) n'a pas précipité l'effondrement des échantillons même non-stabilisés si bien que ces derniers présentent des états de saturations critiques. Nous en déduisons que l'effondrement est essentiellement dû à l'attaque au gel et que la stabilisation améliore la longévité du matériau terre exposé au gel-dégel.

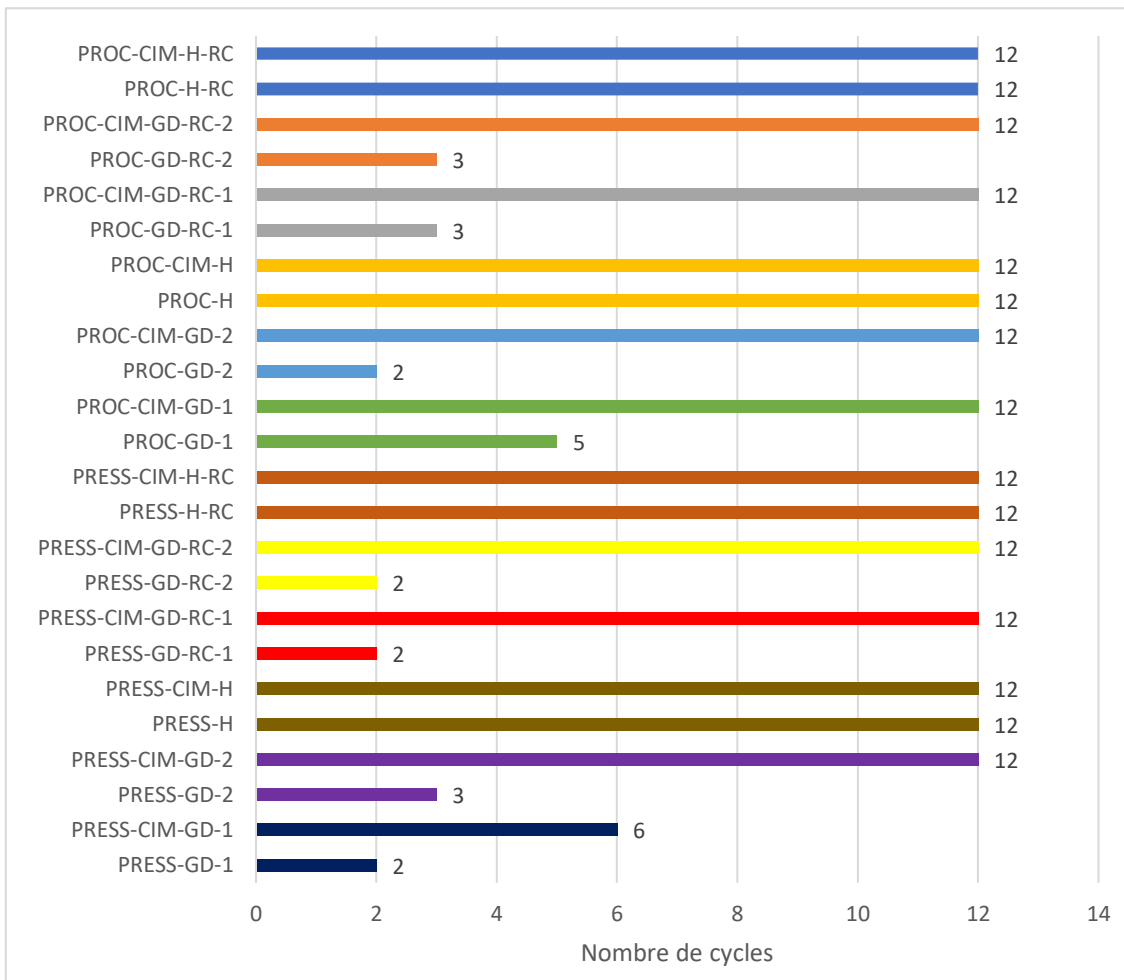


Figure 76 : Influence de la stabilisation sur le nombre maximal de cycles de gel-dégel atteint par les 24 échantillons étudiés

Néanmoins, il ressort des Figure 77 et Figure 78 relatives aux courbes de variations de teneurs en eau que la stabilisation ne préserve pas le matériau de l'effet du gel sur l'augmentation de la teneur en eau. Même stabilisés, les échantillons exposés au gel présentent des hausses de teneurs en eau au fil des cycles. Cette augmentation sous l'effet du gel est davantage significative pour les échantillons compactés à la presse. Les échantillons fabriqués au proctor présentent des variations légèrement inférieures et des écarts plus faibles entre les échantillons gelés et non-gelés. Généralement, la protection contre l'attaque humide est bien visible pour tous les échantillons stabilisés.

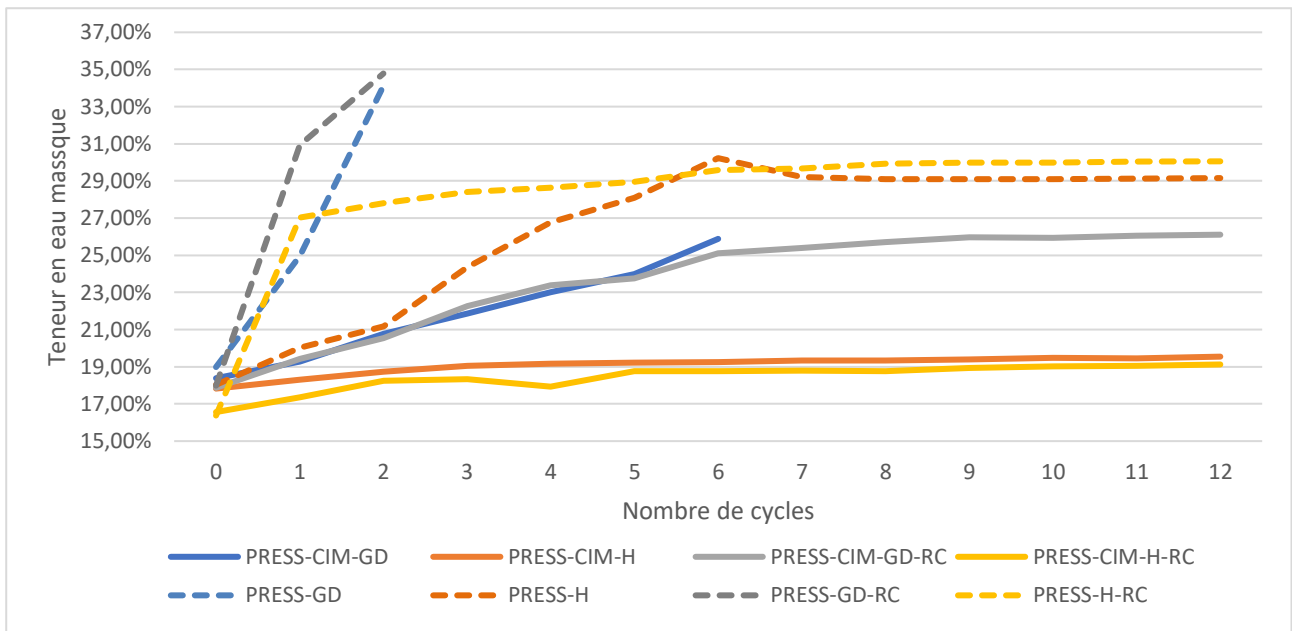


Figure 77 : Influence de la stabilisation sur l'évolution de teneur en eau des échantillons PRESS

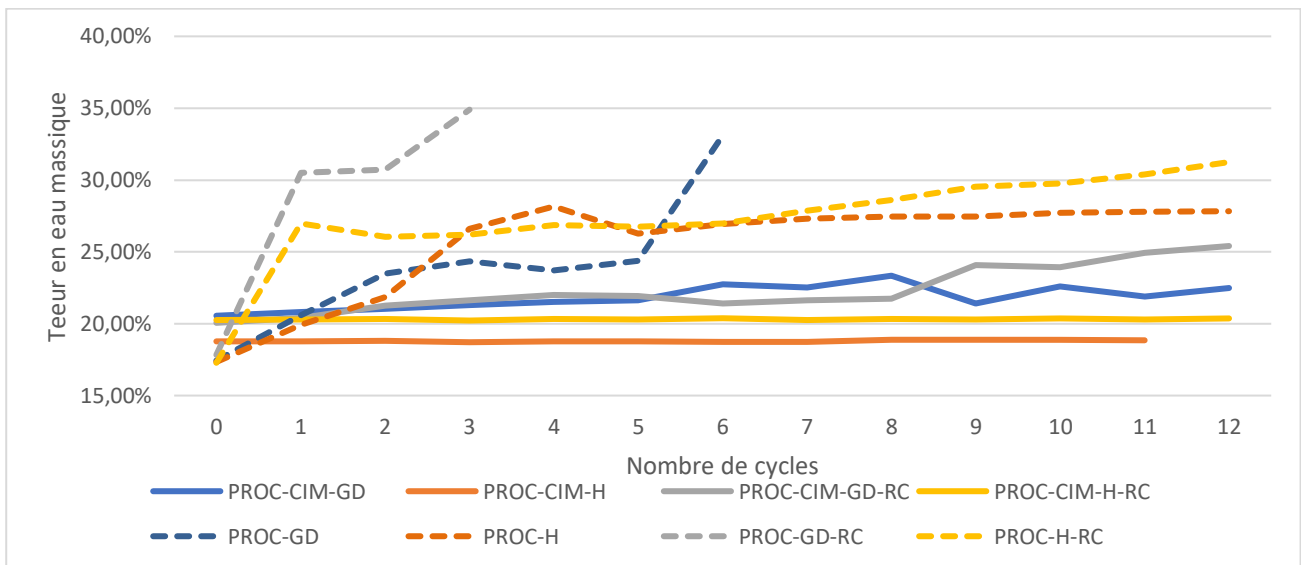


Figure 78 : Influence de la stabilisation sur l'évolution de teneur en eau des échantillons PROC

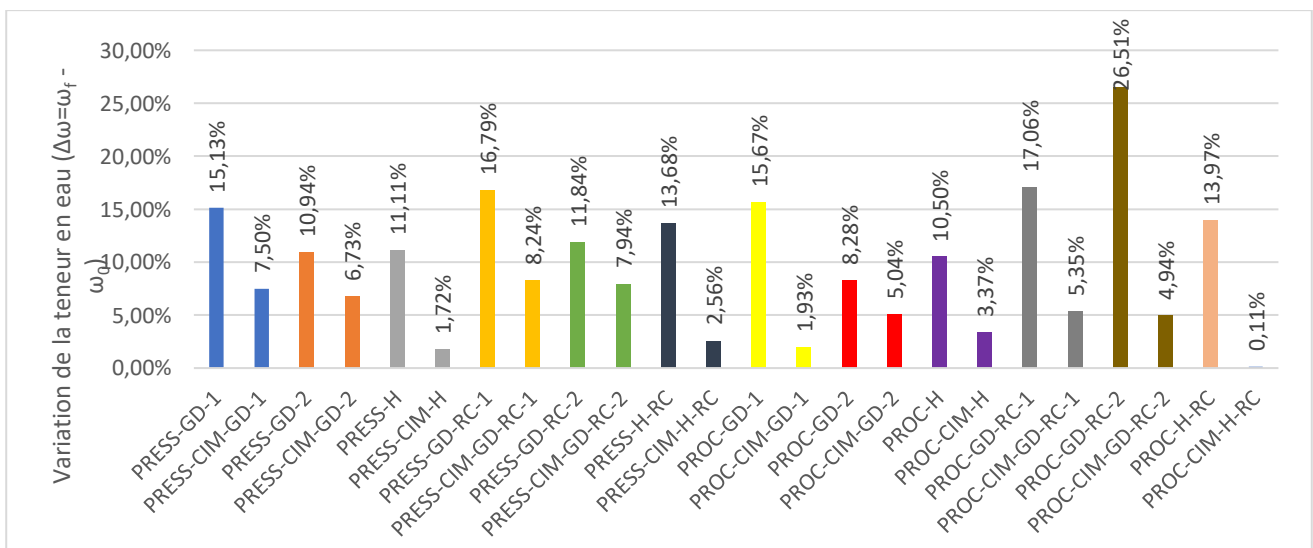


Figure 79 : Influence de la stabilisation sur l'augmentation de teneur en eau après les cycles gel-dégel

Également, les déformations volumiques des échantillons en terre sont amoindries en raison de l'ajout cimentaire. L'effet bénéfique de la stabilisation se traduit par une réduction par 3 voire 4 des déformations volumiques des échantillons.

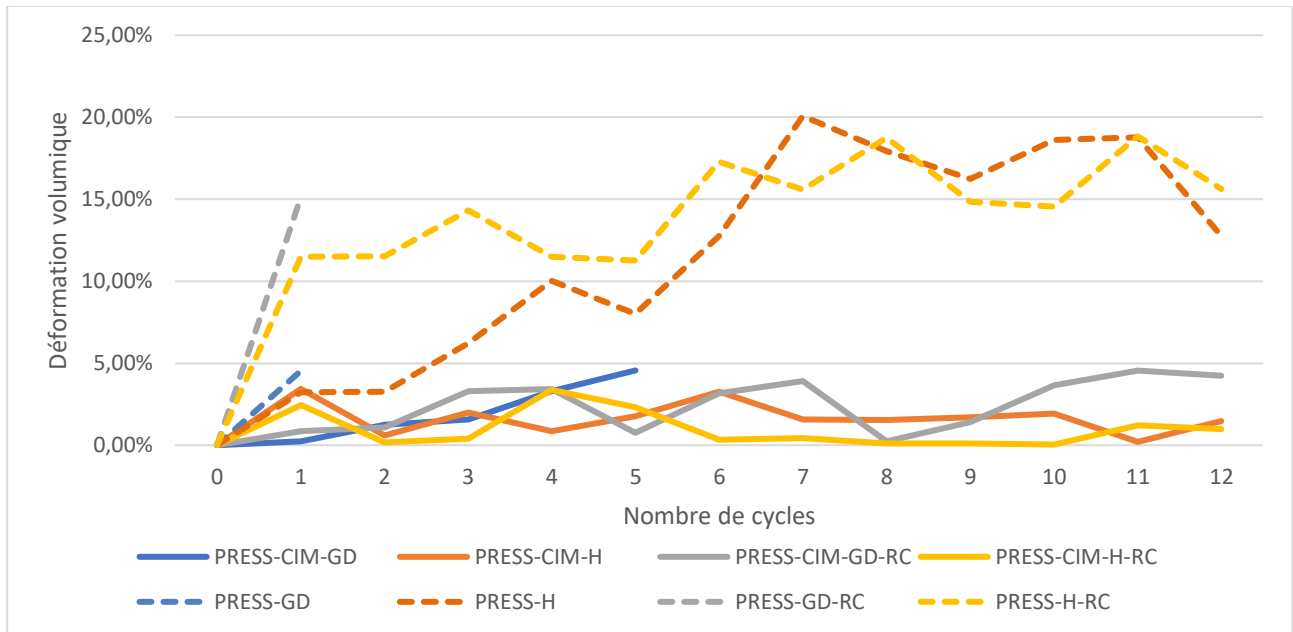


Figure 80 : Influence de la stabilisation sur les déformations volumiques des échantillons PRESS

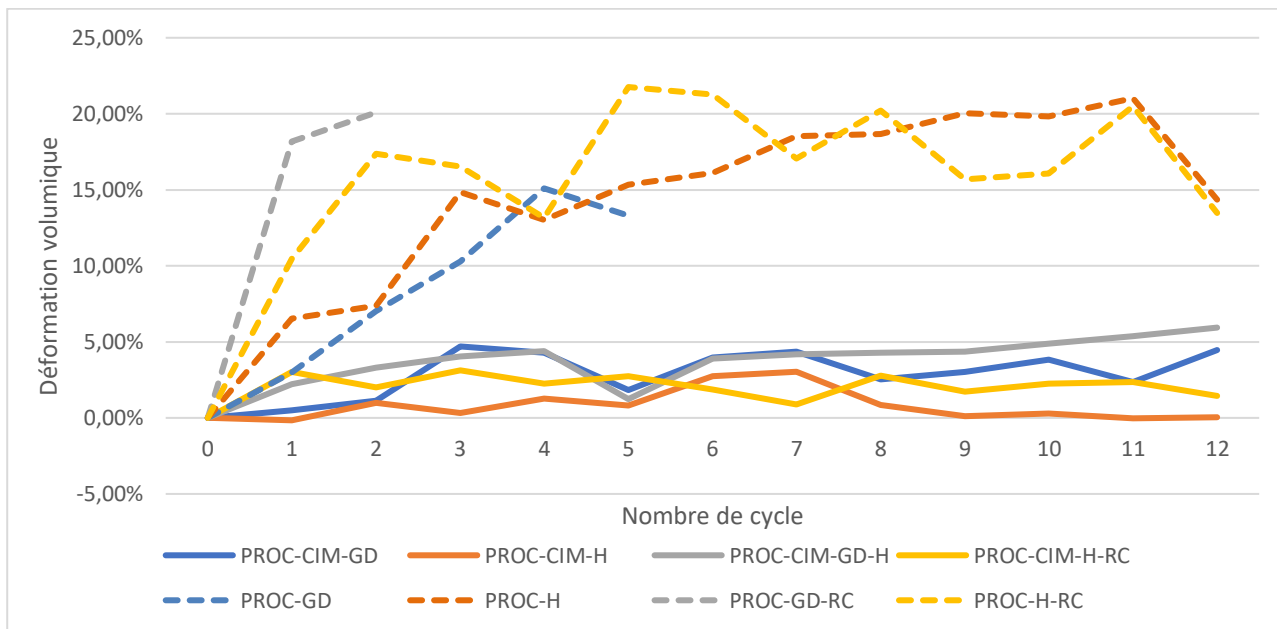


Figure 81 : Influence de la stabilisation sur les déformations volumiques des échantillons PROC

Nous constatons également que les échantillons compactés à la presse présentent des déformations volumiques légèrement inférieures à celles des échantillons fabriqués au proctor.

En raison de l'effondrement prématuré des échantillons non-stabilisés au gel-dégel, l'influence de la stabilisation sur la masse écaillée ne peut être évaluée car il est nécessaire d'avoir un certain nombre de cycles de gel-dégel pour que l'écaillage présente des résultats significatifs.

Malgré tout, nous remarquons que la masse totale d'un échantillon stabilisé exposé au gel-dégel présente deux tendances d'évolution. Durant les 5-6 premiers cycles, l'échantillon s'humidifie davantage qu'il s'écaille ; c'est pourquoi la masse totale augmente. Ensuite au-delà du sixième cycle, la perte de masse par écaillage est prépondérante devant l'humidification de l'échantillon stabilisé de telle sorte que la masse totale est décroissante. Alors que pour l'échantillon non-stabilisé PROC-GD, la masse écaillée devient importante dès le 3^e cycle de gel-dégel avec des

perles plus importantes que l'échantillon stabilisant correspondant (PROC-CIM-GD). Il convient de rappeler que les 4^e et 5^e cycles de gel-dégel de l'échantillon PROC-GD correspondent à la période de panne du congélateur. Ce qui limite notre interprétation de la masse écaillée lors de ces derniers cycles de l'échantillon non-stabilisé. Nous remarquons néanmoins que la perte de masse se traduisant par une baisse de la masse sèche est importante au fil des cycles de gel-dégel.

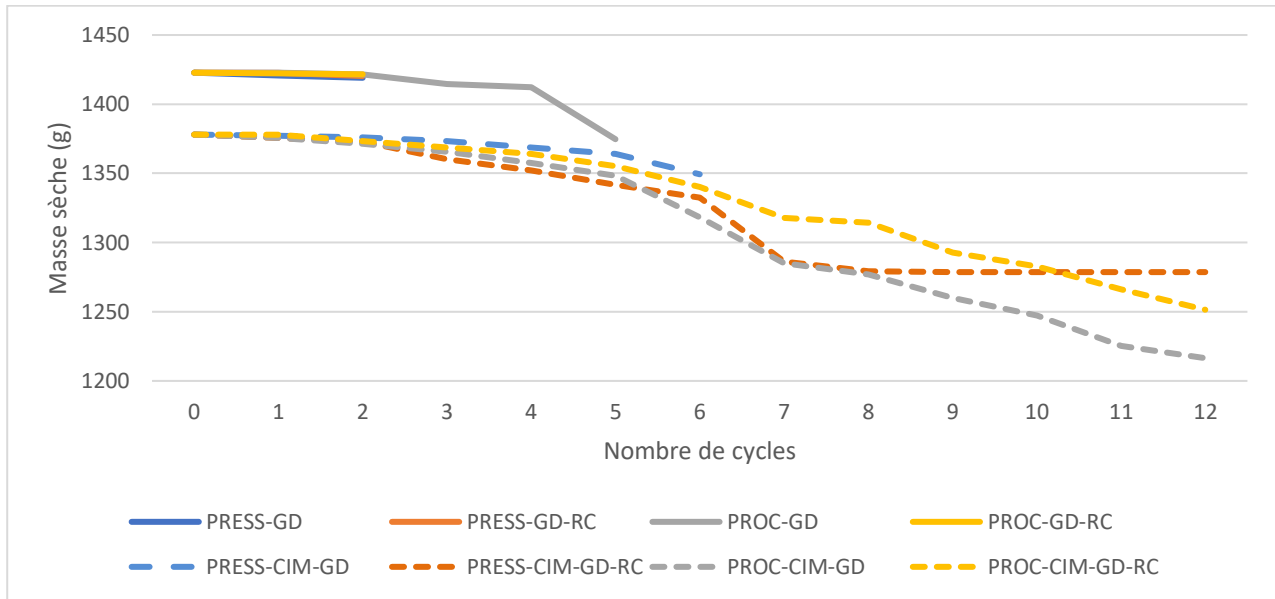


Figure 82 : Evolution de la masse sèche des échantillons soumis aux cycles de gel-dégel

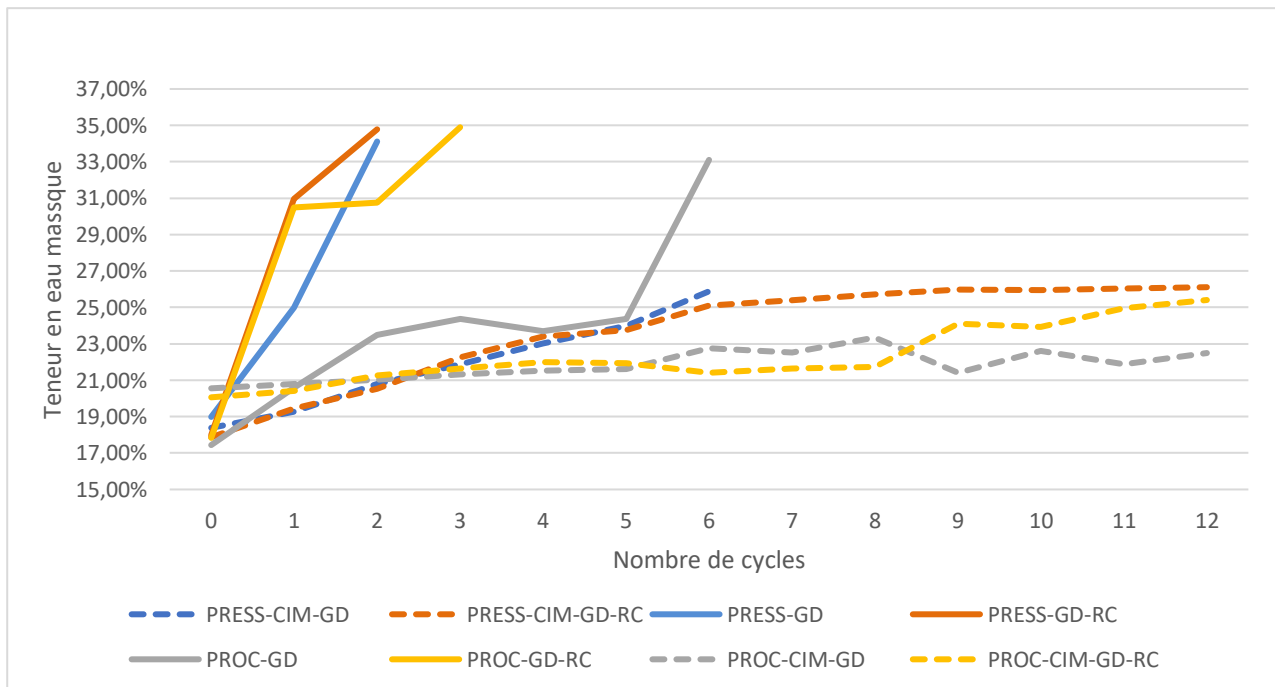


Figure 83 : Evolution de la teneur en eau des échantillons soumis aux cycles de gel-dégel

La comparaison des Figure 82 et Figure 83 montrent bien que lors des six premiers cycles c'est la variation de teneurs en eau qui est plus significative alors que la perte de masse par écaillage impacte davantage le matériau au-delà du sixième cycle. Les détails des variations de masse d'eau et de masse sèche par rapport à la masse totale de chaque échantillon sont reportés dans les Figure 84 et Figure 85.

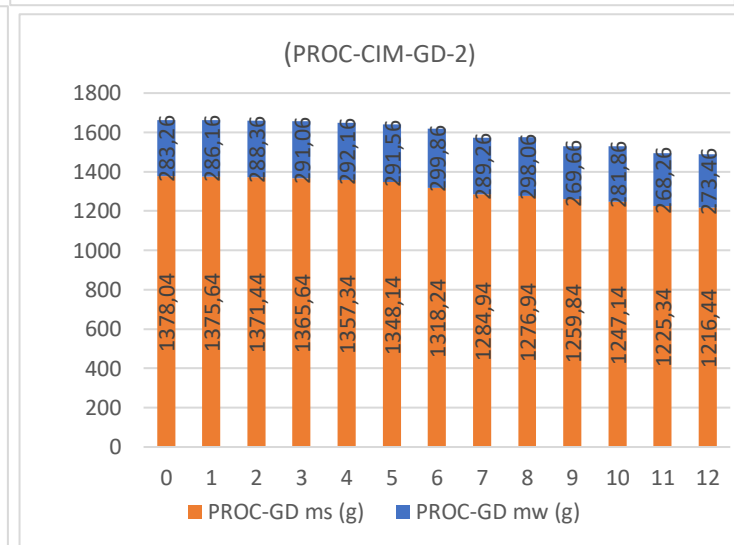
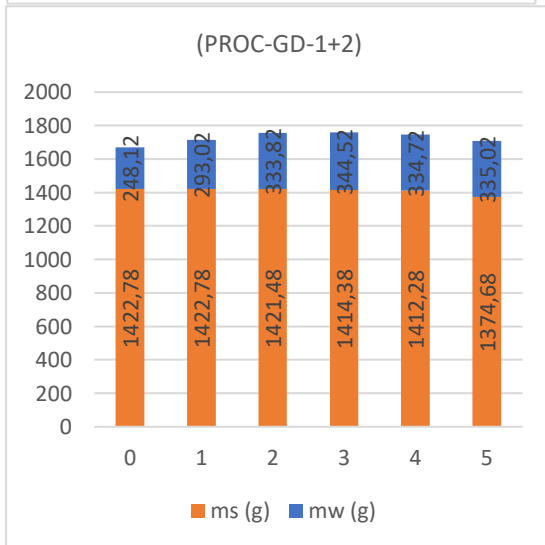
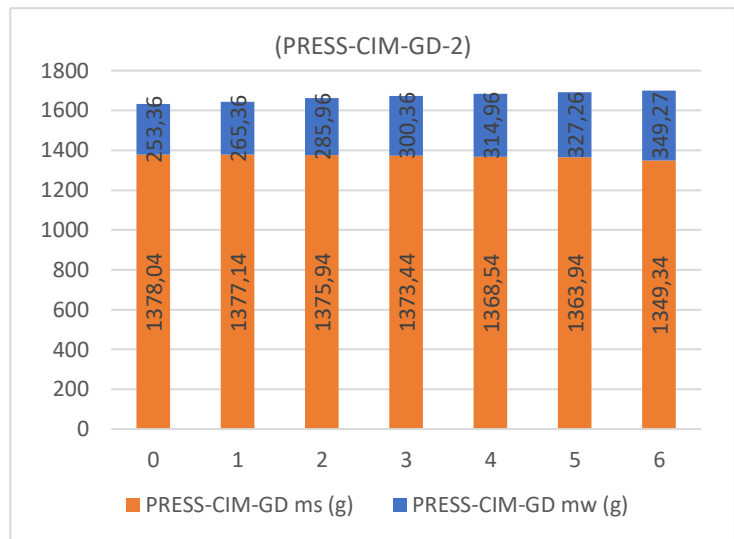
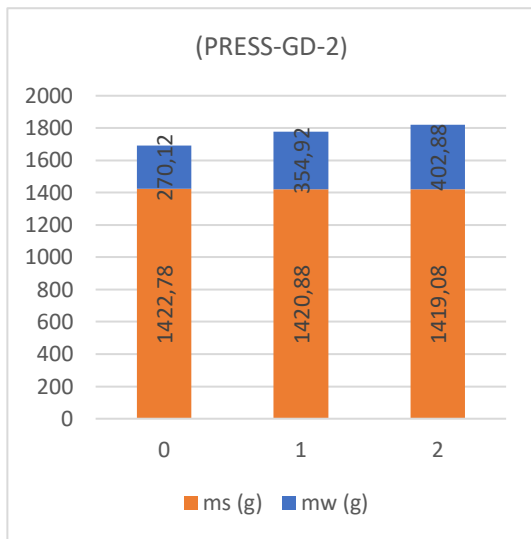


Figure 84 : Evolution de la masse sèche (ms) et de la masse humide (mw) des échantillons stabilisés et non-stabilisés sans absorption liquide au fil des cycles

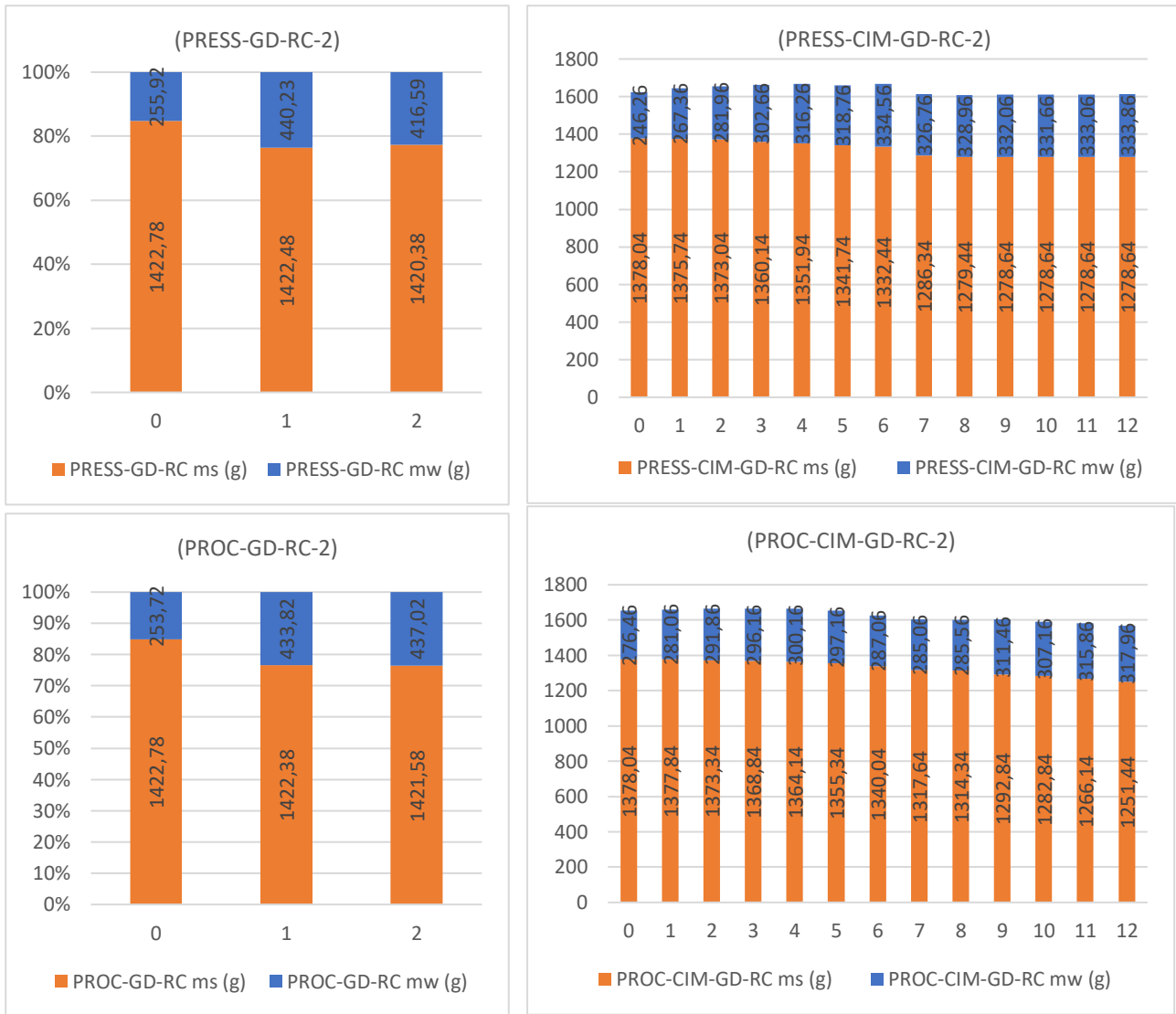


Figure 85 : Evolution de la masse sèche (ms) et de la masse humide (mw) des échantillons stabilisés et non-stabilisés avec remontées capillaires au fil des cycles

4. Conclusions sur les mécanismes d'endommagement au gel

Au cours de l'essai de gel-dégel, les mécanismes d'endommagement et d'effondrement des échantillons permettent de souligner quelques points intéressants.

4.1 Les mécanismes d'effondrements

Les effondrements ont tous lieu après la phase de dégel dans la chambre humide.



Figure 86 : Effondrement des échantillons à la suite de la période de dégel

Deux types d'effondrements ont généralement été observés : le développement de fissurations verticales et la perte de stabilité.

Dans le premier cas, les échantillons sont toujours stables (débout et pas très humides) mais l'ouverture de fissuration est beaucoup trop importante. Ce mécanisme d'effondrement a été généralement observée pour les échantillons non-stabilisés fabriqués à la presse et avec absorption de liquide par capillarité (cf Figure 87).



Figure 87 : Effondrements d'échantillons par ouverture de fissurations verticales

Dans le second cas illustré dans la Figure 88, le échantillon présente une très forte saturation en eau. Le matériau est très humide et perd toute stabilité. Sa manipulation est très difficile. Toutefois, il n'y a de fissurations visibles sur l'échantillon.



Figure 88 : Effondrements d'échantillons par perte de stabilité (saturation)

4.2 Les mécanismes d'endommagement

Certains échantillons développaient au fil des cycles des détériorations superficielles qui ne provoquent toutefois pas d'effondrements. A la suite de la période de gel, des fissures horizontales sont très visibles. Sur la Figure 89, les fissures apparaissent généralement au niveau des interfaces des couches de compactage. Ces fissures verticales sont dues à l'attaque au gel et elles amorcent l'écaillage de l'échantillon. Ces fissures continuent à se développer au fur et à mesure des cycles jusqu'à l'effondrement par ouverture de fissuration alors que la saturation en eau liquide ne semble pas critique (cf Figure 90).



Figure 89 : Présence de fissurations horizontales au niveau des interfaces des couches



Figure 90 : Développement des fissurations après le gel : début d'écaillage

En plus, Les illustrations de la Figure 91 montrent que l'écaillage fragilise et dégrade fortement l'échantillon, ce qui se manifeste par d'importantes pertes de masse au fil des cycles.



Figure 91 : Ecaillage des échantillons entraînant des pertes de masse

Pour les échantillons n'ayant pas subi de gel, la Figure 92 permet d'observer une érosion au pied de l'échantillon lorsque celui-ci est exposé à de la remontée capillaire. Comme nous l'avions aussi souligné, il y a aussi d'importantes déformations radiales différées.



Figure 92 : Erosion de la partie basse des échantillons soumis à l'absorption d'eau par capillarité

Conclusions générales et perspectives

Cette étude a pour objectif principal la mise au point d'un protocole expérimental de gel-dégel pour des échantillons en terre crue en s'inspirant de la norme américaine (ASTM-D560 2016). Il ressort de l'étude bibliographique un comportement multi-physique du matériau fort couplé et davantage complexe avec des phénomènes de changement de phase type gel-dégel. Les théories d'endommagement et les mécanismes physiques liés à ce processus de changement de phase mettent en évidence l'importance de la compréhension des modifications de la microstructure. L'approche théorique est initialement intéressante pour appréhender les processus physiques liés au gel (cristallisation, cryosuccion, transfert d'eau non-gelée, transfert de chaleur...) et dégager les variables clé de la résistance au gel des murs en terre dont entre autres les degrés de saturation liquide et glace. Cette approche est ensuite complétée par une démarche expérimentale consistant à dégager des hypothèses de couplage entre ces processus physiques et le comportement macroscopique de la terre crue. Le protocole expérimental ainsi mis en place permet de déterminer l'influence du gel, de l'absorption de liquide par capillarité, de la stabilisation.

Les principaux résultats sont alors :

- L'influence du gel

Le gel induit un changement de phase liquide-glace qui va générer une déformation du réseau poreux. C'est cette déformation qui accroît les capacités de rétention d'eau liquide dans le matériau. Ce résultat est autant valable pour les échantillons non-stabilisés que pour les échantillons stabilisés. Le gel est aussi la principale cause de l'endommagement de surface (écaillage) du matériau, de fissurations et d'effondrements du matériau.

- L'influence de l'absorption d'eau liquide

La présence d'eau absorbée par capillarité va entraîner une saturation plus rapide du matériau et des déformations géométriques plus importantes. L'attaque humide en partie basse provoque une érosion du matériau assez importante. Des déformations radiales sont davantage importantes sur la zone la plus basse de l'échantillon.

- L'influence de la stabilisation

L'ajout cimentaire limite les effets générés par l'attaque humide à savoir la saturation rapide et les déformations géométriques importantes du matériau. Une variation de teneur en eau divisée par 3 voire 4 est possible grâce à l'ajout cimentaire. Néanmoins, les échantillons stabilisés restent toujours sensibles à l'attaque au gel.

- L'influence du mode de compactage

Le mode de compactage ne présente pas de résultat significatif.

Les critiques et recommandations vis-à-vis du protocole et des résultats :

- La méthode de mesure dimensionnelle

Une incertitude de mesure relativement importante pour les échantillons stabilisés présentant des déformations géométriques du même ordre de grandeur de l'incertitude de mesure. Dans le cas des échantillons non-stabilisés, le contact direct du pied à coulisse avec l'échantillon humide provoque des erreurs assez importantes. La mesure des déformations géométriques proposée par la norme (ASTM-D560 2016) n'est alors adaptée pour l'étude. Il serait plus judicieux d'opter pour un instrument de mesure sans contact avec l'échantillon.

- La méthode de manipulation

L'effondrement prématuré des échantillons non-stabilisés semble être accéléré par la méthode de manipulations. En effet, certaines opérations (installations du papier absorbant, vidange de l'eau contenue dans les récipients) nécessitaient de manipuler directement l'échantillon notamment dans un état de saturation important ; ce qui semble engendrer des déformations géométriques importantes. Toutes ces manipulations constituent une source d'erreurs de mesure et de dégradations du matériau assez considérables.

- Les perspectives

D'une part, le protocole expérimental mis en place constitue, tout de même, un début pour tester ultérieurement des échantillons de géométrie différente ou des conditions de gel-dégel modifiées (changement de température, modification de la durée des cycles). En ce sens, vu que les conditions de gel pour la terre non-stabilisée, des dégels à des HR plus faibles (95%, 90%, ...) et d'autres configurations de gel seraient aussi envisageables. Également, vu que le matériau terre est porteur, il serait intéressant d'envisager une phase de dégel sous chargement mécanique. Le mode de compactage ne présentant pas de résultat significatif, il sera possible d'appliquer le protocole de gel sur plusieurs types de terre à granulométrie et densité différentes.

Article de conférence

CSCE ANNUAL CONFERENCE
GROWING WITH YOUTH – CROÎTRE AVEC LES JEUNES



LAVAL (GREATER MONTREAL)
JUNE 12 - 15, 2019

RAW EARTH CONSTRUCTION: FIRST ANALYSIS OF ITS FROST RESISTANCE

Lassana Traoré^{1,2}, Claudiane Ouellet-Plamondon², Fionn McGregor¹, Antonin Fabbri¹,

¹ LGCB-LTDS, UMR 5513 CNRS, ENTPE, Université de Lyon, France

² ETS, Université de Montréal, Canada

Abstract: Raw earth constructions, under a variety of forms, have been part of human civilization since thousands of years. As an ancient building material, it raises today a huge interest by architects and engineers considering its low ecological impact and its thermo-hygro-mechanical performances. Raw earth is a heterogenous material and is considered as multi-phase (solid matrix, water and air), therefore such material presents multi-physical properties. The highly thermo-hygro-hydro-mechanical coupled nature raises a complexity of laboratory protocols to assess its standard performances. Water in the material, under liquid or vapor phases, plays a key role in its performances as a building material. What's more, in cold regions, the cyclic effects of water freezing and ice thawing on earthen houses cause an extreme moistening which represent a major risk of frost damage. In that context, this paper aims at presenting a review of the principal knowledge on the frost durability of earthen constructions.

1. INTRODUCTION

Long suffering from a lack of acceptability, earthen constructions are regaining now more and more interest considering sustainable development and ecological purposes. Several earthen construction technics exists. They can be gathered as the "wet" techniques (plastic state of the soil) and the "dry" techniques (close to Optimum Proctor state).

All the load-bearing earthen walls have in common an average thickness of at least 50cm and a basement with a height that can reach one meter in order to limit capillary rises. For the "wet techniques", mainly cob (fig 1c) and adobe (fig 1.d), the addition of vegetable fibers (like straw) is essential to limit the shrinkage during desiccation. The adobe is a manually shaped brick and is left to dry in the open air several days before they are used in masonry. Cob consists in the construction of layers of monolithic walls stacked without the use of formwork. The most common "dry techniques" are rammed earth (fig1.e) and compressed earth blocks (fig1.f). Like cob, rammed earth leads to monolithic walls. But it requires to successively compact thin layers of soil moistened at its optimum water content and placed in a formwork. The CEB technique appeared in the nineteenth century. This technique consists of making bricks of compacted soil by using a press (manual or dynamic) and to assembly them with thin joint of earth, lime or cement-based mortar.

The most common non-bearing technique using earth is wattle and daub (cf. fig. 1a). It is a "wet technique" which consists in filling a wooden load-bearing lattice with an earth and straw mixture. Finally, crude earth can be used for rendering purposes (cf. fig 1b). If they are mixed with bio-based materials, earth plasters can also be used to improve thermal insulation.



Figure 1: (a) Timbered houses in Ochsenfurt (Allemagne)-(b) "Maison des Yvelines" rendering with raw earth in Ouroussogui (Sénégal)-(c) Cob wall of the library of Muël (France)-(d) "El casa de Adobe : el poder en el desierto" in Chihuahua (Mexico)-(e) Oaxaca art school in Mexico-(f) "Le Domaine de la Terre" in Villefontaine (France)

Compare to modern constructions, earthen constructions have a low embodied energy because raw earth is a local material which can be extracted directly on or around the construction site and allow to cut down). energy for transformation (fig2.a) and greenhouse gas emissions (fig 2.b).

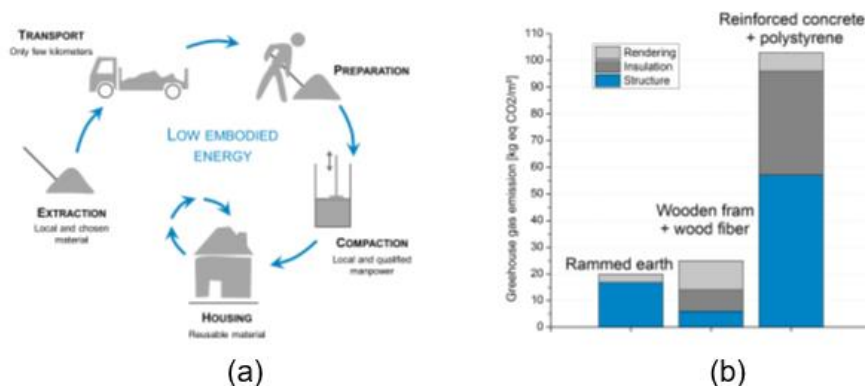


Figure2: (a) embodied energy during earth construction – (b) comparison of greenhouse gas emissions (L. Soudani 2016)

Also, raw earth is a reusable material with a limitless lifespan. By re-wetting, the material can be reused easily (Bui 2008). Nonetheless, new practices raise the question of their low carbon footprint. For instance, industrial prefabricating of the rammed earth in the aim to reduce the time of construction, stabilization of raw earth by adding between 5% to 10% hydraulic binder as lime or Portland Cement to the soil in order to improve its strength, its durability and its

water-resistance (Van Damme and Houben 2018). Furthermore, casting earth can be obtained by mixing adjuvants as superplasticizers with raw earth for self-compaction in the framework (Ouellet-Plamondon and Habert 2016).

In addition to its ecological impact, earth in construction can be used to improve the in-door air quality. Indeed, this material is hygroscopic which is characterized by its ability to capture and release water molecules contained in the surrounding air. In this way, compared to conventional materials, raw earth possesses excellent ability to regulate moisture humidity of indoor environment (fig5.a) associated with an interesting capacity of heating inertia for heat storage (fig4), hence a high capacity to stimulate hygrothermal wellbeing for inhabitants (Woloszyn, et al. 2009). These hygrothermal properties may also cut down energy consumption caused by air conditioning or ventilation systems and limit mould growth (McGregor, et al. 2014).

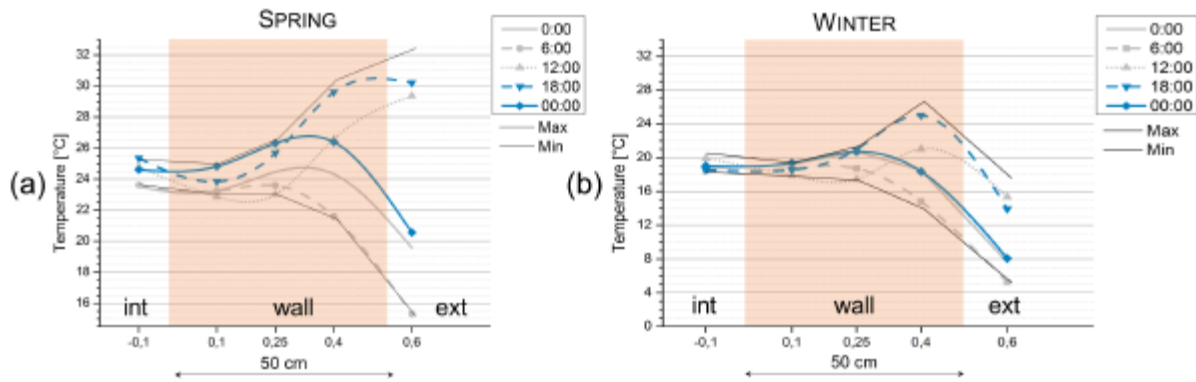


Figure 3 : Thermal comfort zone provides by raw earth heating inertia (L. Soudani 2016)

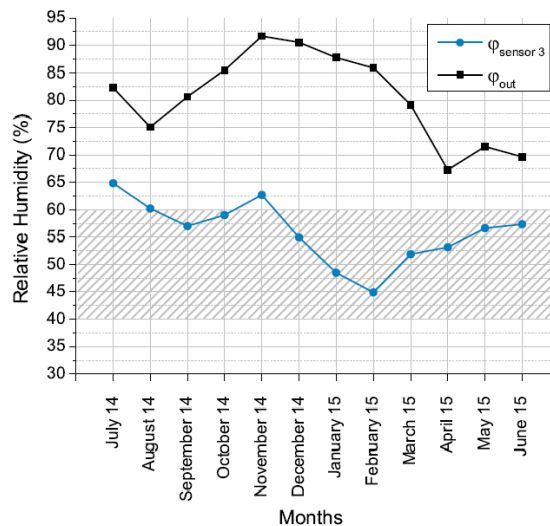


Figure 4: Self-regulation of moisture humidity in indoor environment (L. Soudani 2016)

The low ecological impact of raw earth associated to its high performances to regulate indoor temperature and moisture are inviting to reuse this ancient building material for modern construction. Also, earth construction represents a rich heritage. Indeed, one third of the world population lives in earthen houses. But their maintenance and their rehabilitation rest on an artisanal know-how that curb establishment of scientific consensus. This lack of scientific knowledge is also explained by the heterogeneity of soil and the complexity of the behavior of raw earth as an unsaturated soil. In this case, the water content is the governing parameter of the thermo-hydro-hygro-mechanical (THHM) behavior of the earth structure. In addition, in cold regions, the presence of liquid water raises the question of the freeze/thaw resistance of earth constructions. Better understandings of the multi-physical behavior of raw earth is necessary to evaluate its performances and its durability related to its sensitivity to moisture.

This paper investigates the durability of earth construction as a sustainable building material subjected to frost/thaw cycles. For that purpose, it mainly focuses on previous studies on this subject. At the end, it presents some trials to further examine the frost damage on earthen construction. The following in this paper deals with the impact of moisture content to its THHM behavior, the in-pores crystallization process, poromechanics and coupling models for heat and mass transfers. Analysis mainly focuses on the liquid saturation degree as the key parameter which influences the resistance of raw earth to frost/thaw cycles and therefore on its durability in cold countries.

2. CHARACTERIZATION OF EARTHEN MATERIALS

2.1. Raw earth characterization

Raw earth is a soil composed of aggregates (sand, gravel) bounded by a continuous clay matrix which can be considered as the binder. In fact, it provides cohesion and resistance to the material. The main physical properties which are commonly used to classify a soil are its granulometry (the particle size distribution), its cohesion (ability to resist to tensile stress) and its plasticity (potential to deform without cracking) (Van Damme and Houben 2018). However, in their approaches to study raw earth in the laboratory, many authors (Bui 2008), (Chabriac 2014), (Champiré 2017) have shown the limits of the use of these criteria to identify a good "raw earth" for construction purpose.

Actually, the proportion of clay must be enough to ensure good resistance and strength of the material, but the proportion of expansive clay must remain limited (less than 50% of the total amount of clay) in order to avoid important shrinkage / swelling. However, these thresholds are only indicative, and the granulometric approach is quickly limited because of the important differences in nature of the granulometric clay fraction (<2 μm), which considerably impacts microstructure and the affinity to water. In fact, a large presence of the montmorillonite clay mineral may lead to important dimensional variation due to swelling which can induce cracks or even the loss of building stability. Other types of clay minerals such as chlorite, illite, or kaolinite are less sensitive to swelling-shrinkage phenomenon than they are more suitable for earthen constructions (Van Damme and Houben 2018). In consequence, there are no fixed rules about the proportion of clay, silt, sand and gravel that a "good earth" must contain (Champiré 2017), and many authors found different limits for particle size distribution (table 1).

Table 1: Limits of particles size distribution proposed by various studies (Champiré 2017)

Author/Name	Clay	Silt	Sand and Gravel
IETcc ,1971	10-40%	20-40%	10%-20%
McHenry, 1984	15%	32%	53%
Keable, 1996	5-15%	15-30%	50-70%
Keefe ,2005	7-15%	10-18%	45%+30%
Peter Walker et al, 2005	5-20%	50-80%	10-20%

Given that, earthen construction focus on reaching another parameter: the optimum density that can be obtained. Indeed, several studies indicate that higher is the dry density, higher is the mechanical strength of earthen materials. For the "dry techniques", along similar lines to those of the Proctor test, the optimum density is reached for an optimal water content of fabrication which allows an optimal arrangement of the grains during compaction. For the "wet techniques" the optimum density is also reached through an optimal manufacture water content, but the densification process is different, since it is mainly induced by drying shrinkage.

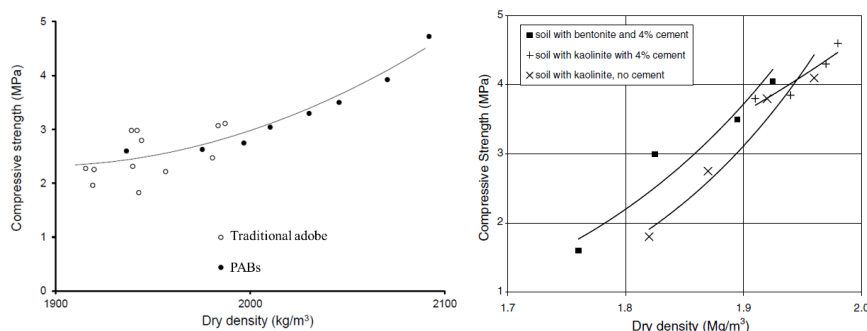


Figure 5: Evolution of compressive strength as a function of dry density (Champiré 2017)

However, if relationships between dry density and compressive strength can be drawn for a given earth, it is not possible to generalize it. Indeed, Table 2 highlights a large variability in the mechanical characteristics of the rammed earth, not attributable solely to the density variation of the materials tested.

It follows that only establishing the intrinsic parameters of a soil is not enough to conclude on its mechanical performances and its durability for construction. Regardless, building an earthen house at the optimum water content allows to reach a better mechanical resistance.

Table 2: Non-constant evolution of compressive strength with dry density (Champiré 2017)

Dry density ρ_d (kg/m ³)	Strength R_c (Mpa)	Size (cm)	Slenderness
1850	3,88	Cyl d10 h20	2
1850	2.46	Cyl d10 h20	2
1763	0.62	30x30x60	2
1971	0.84	31x30x60	2
2027	0.97	32x30x60	2

2.2. Impact of water content on the performance of earthen samples

In addition, the difficulty to *a priori* identify a good soil for construction is coupled with the difficulty to assess correctly the performance of earthen samples. The main reason of this difficulty is the impact of the amount of water which remains within the porous network of the sample on its performance.

One sound example is the mechanical performance: compressive strength and stiffness can be divided by 4 and 3, respectively, when the water content increases by 2 to 3 percentage points. For better mechanical performances, the water content should be maintained as low as possible (Table 3). An excess of moistening jeopardizes the stability of the earthen structure. Investigating in the laboratory the hydromechanical behavior of raw earth raises some complex questions about the choice of the basic representative volume (Q. Bui, J. Morel and S. Hans, et al. 2009) or the representative test protocol (uniaxial compression test or triaxial test) (Chabriac 2014), (Champiré 2017). Indeed, some parameters as the geometry of a sample or the confinement during the test have an important impact on its real load (Miccoli and Fontana 2014). A direct measurement of the compressive strength can give aberrant results (Aubert, et al. 2013) or can be modified considering the anisotropy in rammed earth (Bui and Morel 2009).

Table 3: Evolution of mechanical properties (E_{tan} , q_{max}) with water content w (Champiré 2017)

w (%)	E_{tan} (MPa)	q_{max} (MPa)
11	819	0,38
10	972	0,59
9	1098	0,79
8	1458	1,23
7	1627	1,28
6	1971	1,7
5	2039	1,78
4	2065	1,93
3	2081	1,95

3. ANALYSIS OF THE FROST RESISTANCE OF EARTHEN MATERIALS

3.1. The issue of durability due to the impact of frost/thaw cycles

The previous section underlined that raw earth is very sensitive to moisture. A basement masonry with stones and pebbles is the fundamental element for preventing any contact between moisture and earthen wall. As a perspiring material, the presence of cement coating blocks the evaporation of the water vapor and capillary lifts (Scarato and Jeannet 2015). This condensation is therefore harmful for the durability of raw earth structures even more if it is associated to frost/thaw.

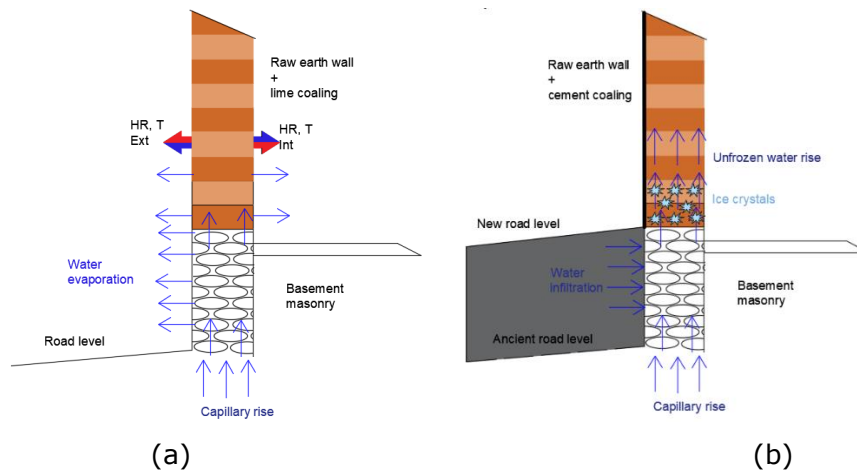


Figure 6: Illustration of moisture ingress in a rammed earth wall with sufficiently exposed basement masonry (a) and in a wall with inadequate basement masonry (b)

In this way, liquid water and ice are defined as the two main actions jeopardizing the durability of earth buildings (Fabbri, Morel and Gallipoli 2018). Indeed, in cold regions, architects and artisans frequently observe pathologies related to the cyclic effect of water freezing which may lead to surface disorders or to a complete collapse disaster of the building (Scarato and Jeannet 2015). This high level of liquid saturation degree reduces the resistance and the consistence of the wall and accelerates its collapse during thaw periods. There are two types of frost damages: surface damage and internal damage. The former is when the deterioration is visible with the development of cracks (peeling) then weight losses. The latter occurs in the microstructure: frost/thaw cycles can generate a loss of intergranular bonding therefore a fall of its resistance and its stability (Fabbri, Morel and Gallipoli 2018). It is the most prejudicial for the stability of earth construction.

In fact, the phenomenon of capillary rise generates a water infiltration in the porous media of the raw earth. As soon as the wall is exposed to low temperatures, the water in the pores can freeze. The change of phase from liquid to ice creates a 9% volume expansion. When this extra volume can no longer be contained within the pores volume, it is expelled under hydraulic overpressure (Powers and Helmuth 1953). Therefore, if the tensile strength of the solid matrix become lower than the stress induced by the increase in hydraulic pressure, then microcracks develop and damage the intergranular bonding of the material. This is more likely due to the theory of overpressure according to which unfrozen water is transferred from frozen pores to an outlet. Moreover, the water content in the material would increase because of the phenomenon of cryo-suction (water absorption by ice crystals) (Vignes-Adler 1976). This is a consequence of the thermodynamic balancing mechanism of pressure gradient between the distant liquid and the unfrozen water close to the ice front which is in depression.

3.2 Some approaches to model frost damage on raw earth

Owing to its water affinity, raw earth is a multi-physical material (Lei, et al. 2014). In fact, rammed earth or CEB is being carrying loads then mechanical stresses appear. In addition, when it is exposed to environmental conditions (pouring rain, wind, snow, capillary rise), its hygrothermal gradients may change and impact its hydromechanical behavior. Moreover, if phase change phenomena as water freezing and ice thawing occurs within the porous network, its thermo-hygro-hydro-mechanical behavior becomes strongly coupled and complex to analyze (Yin, et al. 2018).

The phenomenology of freeze-thaw impacts on raw earth materials is complex because of the unsaturated state of the raw earth: solid matrix, liquid water, ice crystals and water vapor, the chemical reaction with cement in the case of stabilized raw earth, the hysteresis associated to soil-water relationship and the ice lens formation during freezing process (Yin, et al. 2018). In this case, many assumptions are necessary to evaluate the impact of water content on the durability of earth construction under frost-thaw cycles.

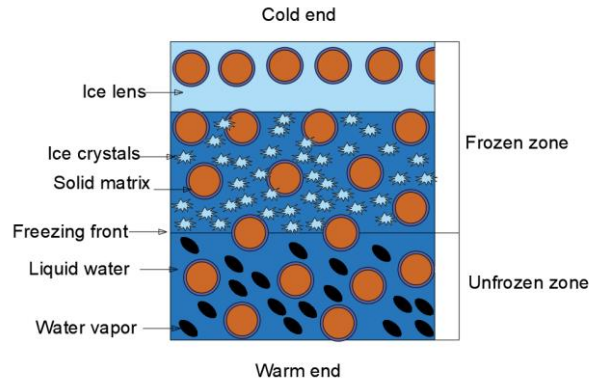


Figure 7: Microstructural complexity of frost/thaw impact on unsaturated material as raw earth (Yin, et al. 2018)

The frost damage of raw earth is mainly due to the process of crystallization of liquid water in the porous media. An extension of the concepts of saturated poroelasticity to unsaturated poroelasticity provides the state equations of unsaturated poroelasticity (Coussy and Monteiro 2007). In pores crystallization involves two distinct physical processes which occurs simultaneously. On the one hand, there is an expansive liquid to ice phase change (liquid water is about 9% denser than ice). If the matrix is not deformable, the excess of unfrozen liquid water in the freezing zone is drained under hydraulic pressures to the eventual air voids. This step also includes the micro-cryo-suction process within the pore entry distribution during which liquid water is drained by the ice-crystal to balance their chemical potentials. This drainage impacts the liquid-ice interface. On the other hand, a mechanical deformation of the porous media occurs due to the volume expansion during the phase change due to the difference of density between the liquid water and the ice crystal. This step explains the mechanical actions of partial pressures on the interfaces with the solid skeleton (O. Coussy 2005).

A better understanding of the poromechanics of freezing materials as raw earth need to pay attention to some microscopic properties as liquid saturation and pore radius distributions (O. Coussy 2005).

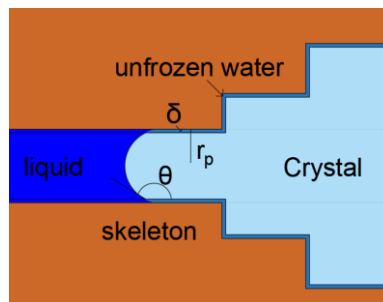


Figure 8: Partial freezing evolution within porous media by decreasing pore radius

Using Gibbs-Thomson equation, some fundamental basis for in-pore crystallization can be underlined. Indeed, during freezing process, when the temperature is below the freezing point, ice crystals are formed in biggest pores at first and the ice crystals start to grow into smaller pores with the decrease of temperature. The liquid saturation degree S_L which represents the volume fraction of water remaining unfrozen at the temperature T is called the Soil Freezing Characteristic Curve (SFCC). In addition, considering the equilibrium at the liquid-ice interface (which is assumed to be spherical), it is possible to link the temperature of the phase change to the radius of the pore in which the phase change occurs (Brin et al., 1977):

$$[1] r_p \approx \frac{2 \gamma_{cl}}{\Sigma_m \Delta T} + \delta$$

Where γ_{cl} is the energy of the liquid/ice interface, Σ_m the entropy of melting per unit of crystal volume,

$\Delta T = T_0 - T$ represents the undercooling temperature and δ the layer of unfrozen water.

The use of this expression can allow to draw the pore size distribution using the SFCC, or alternatively may allow to indirectly determine the SFCC using MIP or water sorption/desorption measurements (Fabbri and Chong 2013).

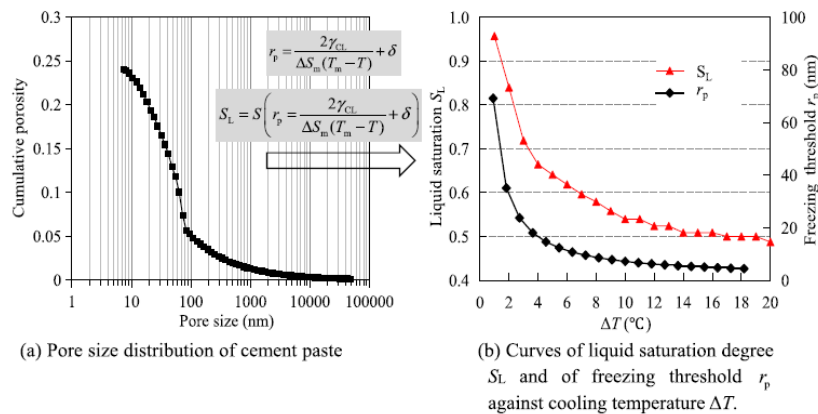


Figure 9: Calculation of the liquid degree saturation from pore size distribution during freezing (Liu, Qin and Wang 2018)

3.3 The heat and mass transfer

When an unsaturated material is exposed to frost/thaw cycles, the freezing/thawing process also includes an important source from conductive heat flow and mass transfer in the porous media; that is more difficult to model mathematically. In an unsaturated soil, some hydrothermal parameters as thermal conductivity λ , hydraulic conductivity are functions of the temperature, soil suction potential, and water content. Direct measurements allow to estimate the thermal properties for raw earth but for its hydraulic properties, their experimental measurement can be difficult. But it is well-known that the hydraulic conductivity is reduced by pore ice in a partially frozen soil (Azmatch, et al. 2012), (Newman and Wilson 1997).

Also, there are many theoretical models that focus on coupling heat and mass transfer equations such as Philip and de Vries model (1957), Künzel model (1995) or Wilson and Newman model (1996). However, experimental tests are needed to choose and confirm the best heat and mass transfer model for raw earth construction. In their approach for modeling heat and mass transfer in freezing unsaturated soil, (Newman and Wilson 1997) showed that their model can predict the ice content and the temperature of an unsaturated soil (Figure 10).

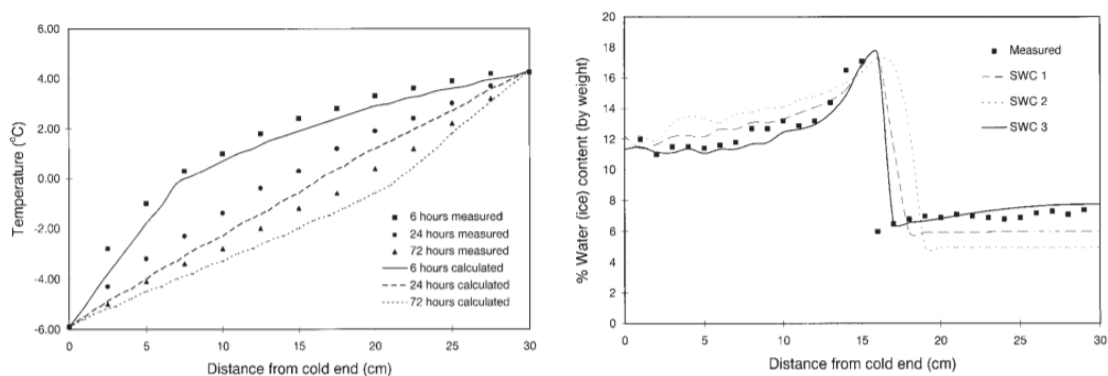


Figure 10: Ice content and the temperature from freezing source distance (Newman and Wilson 1997).

4. CONCLUSION

With a low embodied energy and greenhouse gas emissions, the use of raw earth for construction is motivated by ecological ambitions. It provides good hygro-thermo-mechanical performances for the inhabitants' comfort and the durability of the structure. The raw material is abundant and reusable. The durability of earthen houses is governed by the water content in the material, which is the key parameter impacting the THHM properties. When good technical practices are not respected, an uncontrolled moistening of raw earth can jeopardize its mechanical stability and so its durability. The damage caused by water can be induced by frost-thaw cycles, for

example. In this case, the microstructural deformation modifies the macroscopic behavior during the heat and mass transfer. This multi-physical behavior is quite difficult to model because of the complexity of raw earth. It seems interesting to better investigate the impact of frost damage with a thermo-poromechanical approach of crystallization in pores and a coupling model of heat and mass transfers during freezing to assess the frost resistance of earth constructions in cold regions and eventually lead to an optimized durability for newly built or restored buildings.

Annexes

Annexe A : la microstructure de la terre crue

Le sol extrait pour la construction est un mélange de différentes particules comme le sable, les graviers, les limons et les argiles qui se distinguent par leur taille (granulométrie). Le matériau terre est alors un ensemble d'agrégats (sable, graviers) liés entre eux par les particules fines représentant la matrice argileuse continue. Une quantité suffisante d'eau y est ajoutée afin de favoriser une bonne cohésion du matériau. Dès lors, la terre extraite ne doit contenir des matières organiques ni des argiles gonflantes type montmorillonite. En effet, la présence de l'eau serait favorable à la prolifération des moisissures et à des phénomènes de retrait-gonflement. Les argiles types chlorite, illite et kaolinite sont alors préférables car elles sont moins sensibles aux mécanismes de changement de volume. C'est en ce sens que l'analyse des propriétés physiques d'une terre repose sur certaines caractéristiques physiques comme sa granulométrie (distribution de la taille de ses particules), ses limites d'Atterberg (amplitudes des déformations plastiques) et sa valeur au bleu (capacité d'absorption hydrique). (Van Damme and Houben 2018). Plusieurs auteurs et normes de recommandations se sont intéressés à la caractérisation de la qualité d'un sol pour la construction à partir de ces paramètres physiques comme l'approche granulométrique.

Auteurs/Normes	Argiles	Limons	Agrégats
IETcc ,1971	10-40%	20-40%	10%-20%
McHenry, 1984	15%	32%	53%
Keable, 1996	5-15%	15-30%	50-70%
Keefe ,2005	7-15%	10-18%	45%+30%
Peter Walker et al, 2005	5-20%	50-80%	10-20%

Tableau 21: Distribution des tailles de particules recommandée pour une construction en terre

A ce sujet, les tentatives de caractérisations du matériau terre suivant les propriétés physiques introduits précédemment révèlent une divergence des résultats de plusieurs auteurs et normes de recommandations (BS1377 et XP-P-13-901). Cela a montré que la qualification d'un « bon sol » pour la construction ne permet pas d'aboutir à un consensus général. Il en ressort toutefois que la proportion d'argiles ne devait excéder les 50%.

Dans plusieurs cas, le recours à l'ajout de ciment ou de la chaux permet d'améliorer la durabilité d'une construction en terre à travers la résistance mécanique, la résistance à l'érosion hydrique. Ce procédé dit stabilisation consiste à ajouter une proportion de 5% à 10% de liants hydrauliques ou cimentaires. La stabilisation a aussi la vertu de pouvoir rendre favorable un sol pour la construction en terre.

L'ajout de l'eau est une opération minutieuse sur le terrain lors de la construction. D'une part, une teneur en eau minimale est essentielle pour assurer la cohésion intergranulaire du matériau et d'autre part, au-delà d'une valeur critique de teneur en eau, la structure présente un risque d'effondrement (Lambe,1958). Ainsi, la teneur en eau à l'OPN (Optimum Proctor Normal) est souvent visée pour un comportement mécanique du matériau optimal dès le jeune âge.

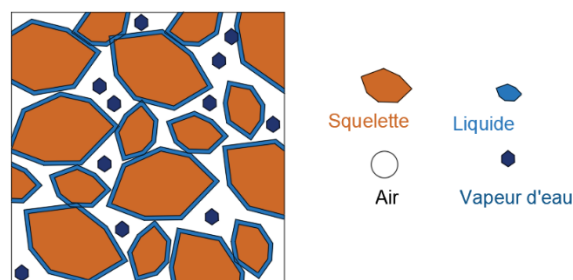


Figure 93 : La terre crue comme un matériau poreux non-saturé

La terre crue est alors un matériau poreux non-saturé ; en d'autres termes un matériau polyphasique constitué d'une matrice solide, de l'eau liquide, de la vapeur d'eau et de l'air. La coexistence de différentes phases va générer des phénomènes d'interactions à l'interface des phases à l'échelle microstructure dits phénomènes de capillarité. Dans le cas de l'interface air-liquide, la pression capillaire dite succion résulte de l'équilibre mécanique traduit par la loi de Jurin :

$$p_A - p_L = \frac{2\gamma_{AL} \cos(\theta)}{r}$$

En considérant la pression atmosphérique p_A comme pression de référence, on est confronté à une pression d'eau négative dite succion. Cette pression capillaire est engendrée par l'action d'adsorption d'eau par les minéraux argileux et est à l'origine de la formation de ménisques capillaires entre les phases liquide et gazeuse. Ces ménisques se situent dans les pores de plus petite taille de la matrice solide. Les rayons de ces ménisques deviennent d'autant plus faibles que le matériau tend à se désaturer, ce qui engendre de plus fortes valeurs succions. La relation succion-saturation représente alors une véritable caractéristique physique du matériau terre. En effet, le passage de l'état faiblement saturé à un état saturé se traduit par des comportements hydriques du matériau intégrant aussi bien les propriétés capillaires et les propriétés d'adsorption des argiles.

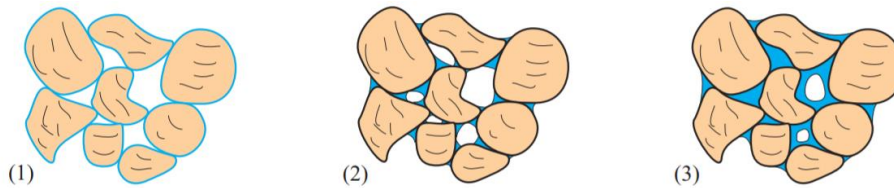


Figure 94 : Etat de la phase liquide suivant le domaine de saturation du matériau (Salager 2006)

Le domaine hygroscopique (1) traduit un état non-saturé dans lequel les molécules d'eau sont adsorbées par les grains solides. La phase gazeuse est continue. Dans cet état, la discontinuité de la phase liquide et les forces d'absorption physico-chimiques exercées par les pores limitent l'écoulement gravitaire de la phase liquide. Les échanges d'eau se font essentiellement par changement de phase (évaporation).

Le domaine capillaire (2) se manifeste par la continuité des phases liquide et gazeuse. En raison de l'importance des forces capillaires, les molécules d'eau non liées aux pores peuvent s'écouler librement dans le réseau poreux.

Le domaine quasi saturé (3) se démarque par la discontinuité de la phase gazeuse formant des poches d'air emprisonnées. La pression d'eau liquide peut dépasser la pression atmosphérique et les phénomènes de succion devenir très faibles.

Dans le matériau, la présence d'eau liée entre les grains et d'eau capillaire (libre) va donc gouverner la caractérisation de la microstructure du matériau. L'eau libre susceptible aux changements de phases et à l'écoulement va alors induire des phénomènes de transferts de masse et de chaleur. L'analyse de ces phénomènes repose sur la connaissance des paramètres hygrothermiques du matériau.

Annexe B : Le couplage hygrothermique du matériau terre

Le matériau terre est hygroscopique, en d'autres termes, il est capable d'échanger des molécules d'eau avec son environnement. A l'échelle macroscopique, ces échanges se manifestent par des transferts de masse incluant des changements de phases et des transferts de chaleur à travers le réseau poreux. Le couplage de l'ensemble de ces mécanismes est nommé couplage hygrothermique.

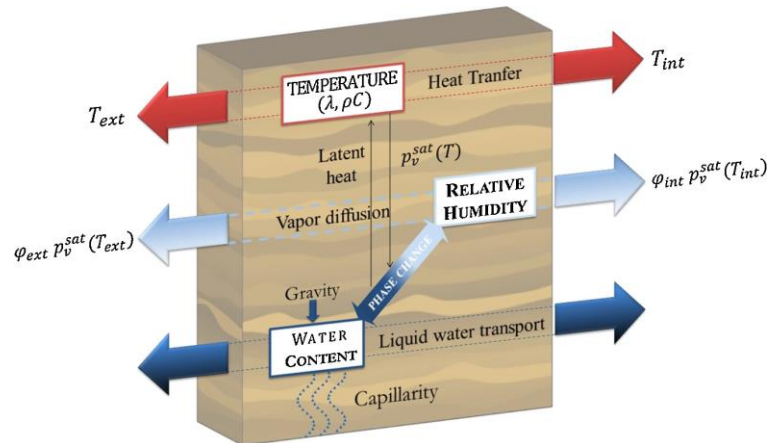


Figure 95 : Comportement hygrothermique d'un mur en terre crue (Soudani, et al. 2016)

En surface, le contact du matériau avec l'air ambiant génère des phénomènes de sorption/désorption traduisant les échanges de molécules d'eau avec l'air ambiant à une humidité relative φ définie à une température T fixée.

$$\varphi = \frac{p_v}{p_v^{sat}(T)}$$

Avec p_v la pression partielle de vapeur et $p_v^{sat}(T)$ la pression de vapeur saturante à une température T donnée.

La teneur en humidité du matériau peut également être reliée à la pression capillaire entre la phase liquide et la phase gazeuse notée p_{cap} . Le rapprochement entre la courbe de sorption/désorption et la courbe de rétention d'eau est donné par la relation de Kelvin.

$$p_{cap} = p_L - p_G = \frac{\rho_L RT}{M_{H_2O}} \ln(\varphi)$$

Avec p_G la pression partielle de tous les gaz (la vapeur d'eau + l'air), p_L la pression d'eau liquide, M_{H_2O} la masse molaire de l'eau, R , la constante des gaz parfaits, T la température et φ l'humidité relative.

Humidité relative (%)	Pression capillaire (suction) (MPa)
100	0
99.9993	10^{-2}
99.927	10^{-1}
99.277	1
60	70
40	126
20	221
10	316

Tableau 22 : Relation suction/humidité relative suivant la relation de Kelvin

Les valeurs du table (1.2) permettent de constater que les valeurs de succions sont importantes dès lors que l'environnement présente une humidité relative inférieure à 99%. Cela traduit alors la propriété du matériau terre à exercer de fortes attraction et rétention de molécules d'eau dans son état désaturé. La relation de Kelvin interviendra alors dans les mécanismes d'échanges de molécules d'eau par sorption et désorption.

Les isothermes de sorption-désorption présentent généralement un phénomène d'hystérésis de la teneur en eau entre la phase de sorption et la phase de désorption à une même humidité relative. On introduit la capacité de stockage hydrique

$$\xi = \frac{\partial w}{\partial \varphi} = 100 \frac{\partial w}{\partial HR}$$

La connaissance de la performance hygroscopique d'un matériau est aussi possible grâce à la détermination expérimentale de la MBV « Moisture Buffering Value » suivant le protocole du « Nordtest project ». Exprimée en $\text{kg.m}^{-2}.\%RH^{-1}$, cette valeur constitue la quantité de masse humide échangée par unité de surface sous variations d'humidité relative $\Delta\%RH$.

$$MBV = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta\%RH}$$

La MBV n'est pas une variable utilisée dans un modèle théorique, elle traduit plutôt la capacité de régulation hygroscopique d'un matériau qualifiée selon le tableau de classifications ci-dessous :

Classes	Minimum	Maximum
Négligeable	0	0,2
Limité	0,2	0,5
Modéré	0,5	1,0
Bon	1,0	2,0
Excellent	2,0	...

Tableau 23 : Classification des matériaux de construction selon leurs MBV

Les transferts d'eau liquide à travers le réseau poreux du matériau terre se modélisent essentiellement par un transport de Darcy généralisé (Richard 1931). Le bilan de conservation de masse d'eau liquide est donné par l'équation ci-dessous

$$\frac{\partial(m_L)}{\partial t} = \text{div} \left(\frac{k(S_L)}{\eta_L} (\overrightarrow{\text{grad}}(p_L) - \rho_L \vec{g}) \right) - m_{\rightarrow V}^{\circ}$$

Où $k(S_L)$ est la perméabilité intrinsèque du matériau non-saturé, η_L le coefficient de viscosité dynamique de l'eau, p_L la pression d'eau liquide et $m_{\rightarrow V}^{\circ}$ le taux de variation de la masse d'eau relarguée sous l'effet de la désorption (évaporation) en vapeur d'eau.

Dans le cas d'un sol non-saturé déformable, la détermination de la perméabilité hydraulique d'un sol est délicate. En plus de sa dépendance aux propriétés physiques du matériau (densité sèche, taille des pores), la conductivité hydraulique est une fonction du degré de saturation et du ratio de volume de vides. En ce sens, (Neuman 1973) introduit le concept de perméabilité relative $k_r(S_L)$ permettant d'exprimer la perméabilité non-saturé comme une fraction de la perméabilité à saturation.

$$k_r(S_L) = \frac{k(S_L)}{k}$$

Au sein du matériau du matériau, la diffusion de la vapeur d'eau respecte la loi de Fick et est pilotée principalement par le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau notée δ_p . Ce paramètre est déterminé par un essai de Wet Cup suivant la norme ISO. Il permet d'établir dans l'hypothèse des gaz parfaits l'équation de conservation de masse de vapeur d'eau

$$\frac{\partial(m_V)}{\partial t} = \text{div} \left(\frac{M_{H_2O}}{RT} \delta_p \cdot p_G \cdot \overrightarrow{\text{grad}} \left(\frac{p_V}{p_G} \right) + \frac{\rho_V}{\rho_G} \delta_a \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(p_G) \right) + m_{\rightarrow V}^{\circ}$$

Ainsi, le transport de masse peut se modéliser par l'équation générale de conservation de masse d'eau $m_W = m_L + m_V$. La combinaison de (1.6) et de (1.8) donne alors

$$\frac{\partial m_W}{\partial t} = \text{div} \left(\frac{k(S_L)}{\eta_L} (\overrightarrow{\text{grad}}(p_L) - \rho_L \vec{g}) + \frac{M_{H_2O}}{RT} \delta_p \cdot p_G \cdot \overrightarrow{\text{grad}} \left(\frac{p_V}{p_G} \right) + \frac{\rho_V}{\rho_G} \delta_a \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(p_G) \right)$$

Ces échanges et ces changements de phase sont généralement associées à des transferts de chaleur majoritairement convectif en surface et conductif en interne. Ces échanges thermiques vont essentiellement générer des changements de phases et impacter la cinétique de transfert de masse dans le matériau. A titre d'exemple, le coefficient de perméabilité à la vapeur s'exprime

$$\delta_p(T) = \delta_p(T_0) \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0,81}$$

On parle alors d'un transfert hygrothermique. Généralement, les modèles de couplage hygrothermique ne tiennent compte que du terme conductif. Ainsi, les propriétés thermiques d'un matériau sont évaluées par sa conductivité thermique et sa capacité calorifique. En considérant, la forte capacité de sorption-désorption du matériau terre associée à la bonne conduction thermique de l'eau, plusieurs auteurs définissent la conductivité thermique et la capacité calorifique comme des fonctions de la teneur en eau.

$$\lambda(\omega) = \lambda^0 \left(1 + \frac{\alpha \cdot \omega}{\lambda^0} \right)$$

Avec λ^0 la conductivité thermique du matériau sec (W/m/K), α une constante, ω la teneur en eau massique.

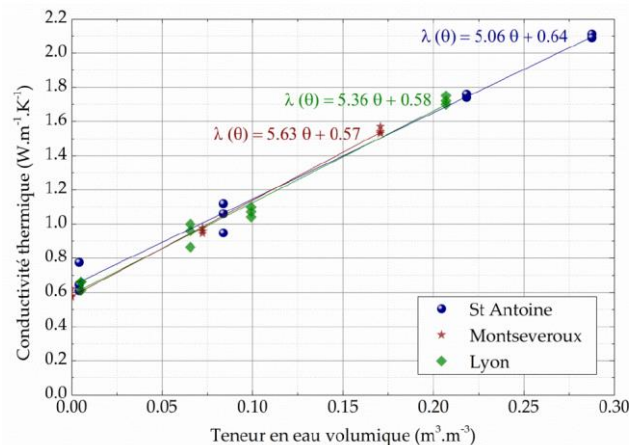


Figure 96 : Evolution de la conductivité thermique de différentes terres suivant la teneur en eau (Chabriac 2014)

$$C_p(\omega) = C_p^0 + \rho_d c_L \omega$$

Où C_p^0 constitue la capacité calorifique volumique du matériau sec (J/m³/K), ρ_d la densité sèche du matériau et c_L la capacité thermique massique de l'eau ($c_L = 4200$ J/kg/K).

Le modèle de couplage hygrothermique permet alors de tenir compte de l'impact des transports hydriques sur l'équation de la chaleur et réciproquement de l'influence du transfert de chaleur sur la cinétique de transfert de masse d'eau et sur les changements de phase de l'eau. Ainsi, un bilan enthalpique permet d'écrire l'équation de transfert de chaleur permettant de tenir compte de ce couplage entre la conduction thermique et la chaleur latente de changement de phase d'eau. Toutefois, nous négligeons les termes d'advection thermique et de compression/dilatation de l'air.

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T)) - m_{\rightarrow V}^{\circ} \cdot L(T, \varphi)$$

Où $\rho \cdot c_p$ représente la capacité thermique moyenne du matériau (en considérant toutes les phases) à pression constante et $L(T, \varphi)$ l'enthalpie massique (ou chaleur latente) d'évaporation.

Bilan (pour $\vec{j}_G = 0$ et $\vec{j}_L = 0$)

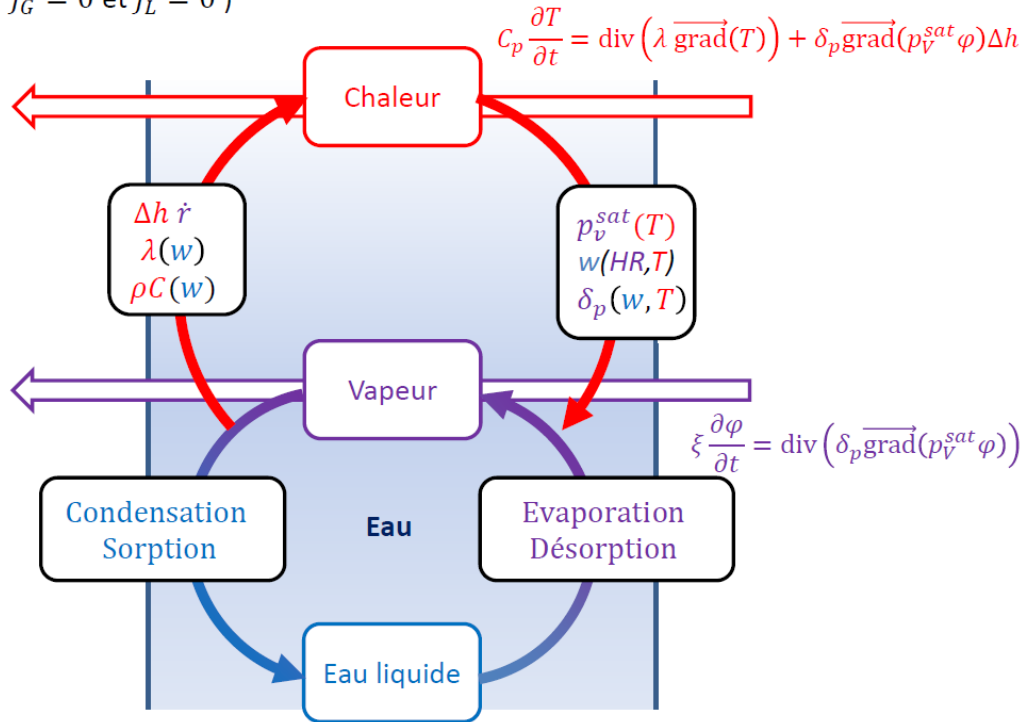


Figure 97 : Synthèse des équations de couplage hydrothermique régissant les phénomènes de transfert de masse et de chaleur

L'évaluation des performances hydrothermiques du matériau nécessitent au préalable la quantification des paramètres thermiques (conductivité thermique, capacité thermique) et des paramètres hygroscopiques (conductivité hydraulique, perméabilité à la vapeur d'eau). L'accès à ces paramètres permet d'évaluer par le biais de modèle de couplage de transferts de masse et de chaleur l'impact de l'humidité sur le comportement hydrothermique du matériau.

Néanmoins, la difficulté principale de cette opération consiste à déterminer expérimentalement ces paramètres notamment la conductivité hydraulique et à prendre en compte les hystérésis des isothermes de sorption-désorption. Également, si bien qu'ils contribuent des résultats fort intéressants, les modèles de couplage hydrothermiques sont souvent difficilement applicables dans la modélisation du comportement du matériau terre et peuvent engendrer des erreurs non négligeables dès lors que soit les hypothèses de simplification comme ne sont plus applicables (modèle de Kunzel) soit nécessitent un grand nombre de paramètres (modèle de Vries).

Annexe C : Le comportement macroscopique d'un mur en terre

L'effet de la présence d'argiles sur les performances mécaniques.

Si les argiles représentent le liant « naturel » du sol dont elles garantissent la cohésion, leur quantité peut être un paramètre clé dans l'augmentation de la résistance mécanique. Dans (Hamard, et al. 2013), une évaluation sur l'amplitude de déformations dues au retrait et sur la résistance mécanique est menée sur une série d'échantillons de teneurs en argile différentes.

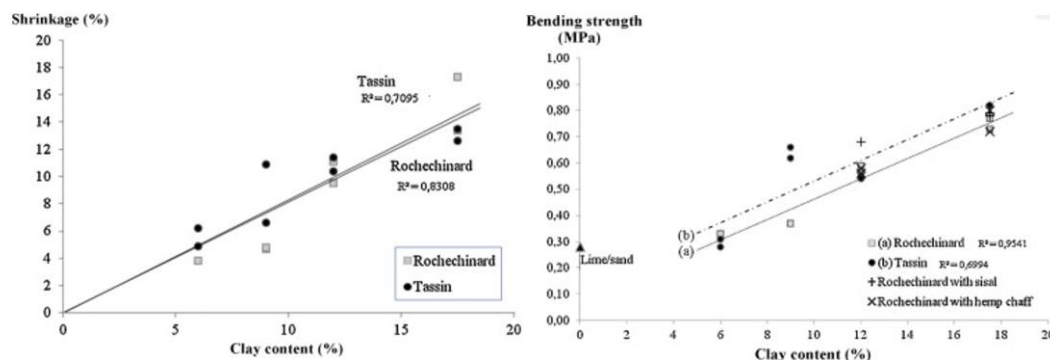


Figure 98 :Variation de la déformation de retrait et de la résistance en flexion suivant la teneur en argile (Hamard, et al. 2013)

Les résultats indiquent qu'une grande teneur en argiles favorise de meilleures performances mécaniques. Toutefois, cette grande quantité en particules fines argiles provoquent des phénomènes de retrait-gonflement très importants. Cependant, d'autres études ont montré qu'une augmentation de la teneur en argiles n'engendre pas systématiquement une meilleure résistance mécanique. Les travaux issus de (Helson, et al. 2017) ont mis en valeur l'existence d'une teneur en argiles optimale, au-delà de laquelle, la résistance à la compression mécanique non confinée est atténuée. Ils soulignent même une baisse du module d'élasticité dynamique est observée en forte présence d'argiles dans le sol.

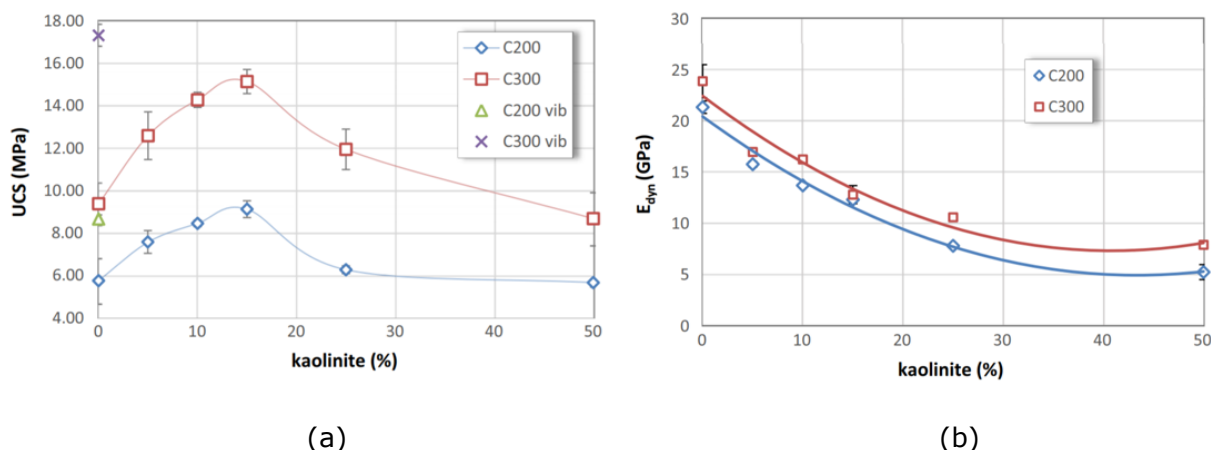


Figure 99 : Variation de la résistance à la compression mécanique non-confinée (a) et du module d'élasticité dynamique (b) selon la teneur en argile (Helson, et al. 2017)

L'effet de la stabilisation sur le comportement hygrothermique du matériau terre

De nos jours, la majorité des constructions neuves en terre crue inclut le processus de stabilisation qui permet d'améliorer les propriétés de liage chimique et mécanique de la matrice argileuse. En effet, cette action favorise principalement une meilleure résistance à une charge mécanique, à une attaque humide et à l'érosion (Bui, Morel et Venkatarama Reddy, et al. 2009). En effet, les travaux de (Kariyawasam et Jayasinghe 2016) ont aussi noté que l'absorption d'eau est une fonction inversement proportionnelle à la teneur en ciment. Une stabilisation avec 10% de ciment permet de multiplier par 2 voire 3 la résistance à la compression. (Van Damme and Houben 2018). Cette augmentation de la résistance à la compression s'explique par la présence d'une matrice cimentaire issue la réaction d'hydratation du ciment. (Zhang, et al. 2017).

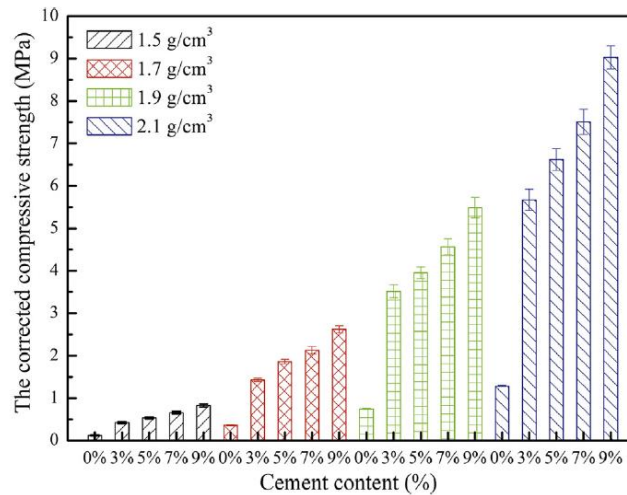


Figure 100 : Evolution de la résistance mécanique suivant la teneur en ciment : cas de différentes densités sèches (Zhang, et al. 2017)

Si l'amélioration du comportement hydromécanique est bien traitée, l'influence de la stabilisation sur les performances hygrothermiques a également fait l'objet de plusieurs études. A titre d'exemple, un matériau terre stabilisé présente également une bonne capacité de régulation hygroscopique (McGregor, et al. 2014). La stabilisation réduit l'adsorption d'eau sur la surface d'un mur donc le risque de moisissure (Allinson, Hall et Matthew 2010). Ce dernier conclut qu'un mur en pisé stabilisé conserve toujours ses performances hygrothermiques. Néanmoins, dans une étude comparative entre des échantillons non-stabilisés (P et ELS) et des échantillons stabilisés au ciment de portland CEM-FA-ELS et au carbure de calcium, (Arrigoni, et al. 2017) montrent que la stabilisation réduit considérablement la MBV du matériau terre à cause de la baisse de l'affinité physico-chimique argile-eau. Néanmoins, cette étude prouve encore que la terre stabilisée conserve de meilleures performances comparées à celles de matériaux de construction courants.

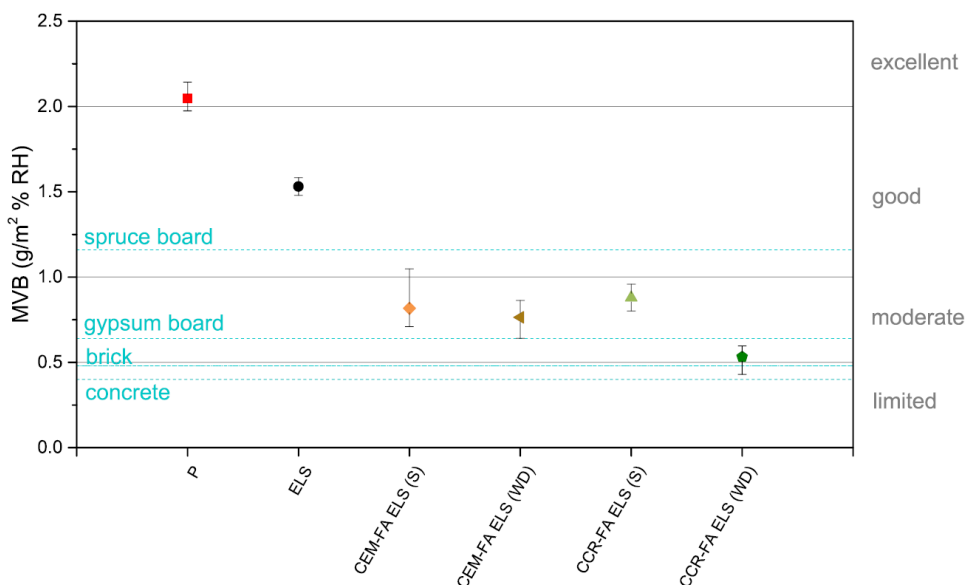
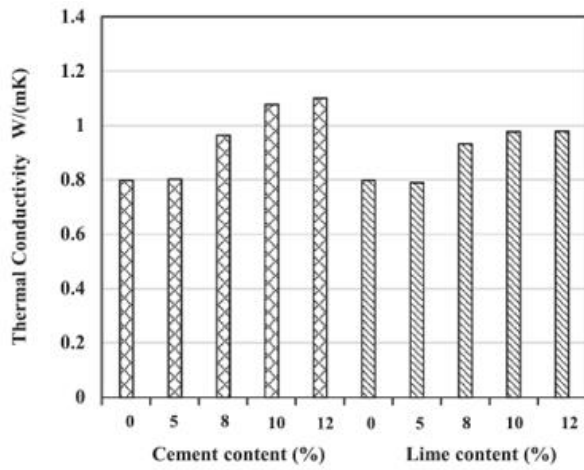
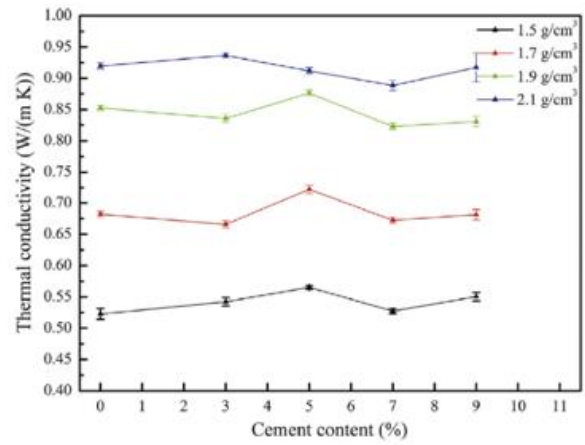


Figure 101 : Valeurs de MBV de différents types de matériaux et de stabilisation (Arrigoni, et al. 2017)

Sous l'effet de la stabilisation, un élargissement de l'hystérésis de la courbe de sorption-désorption est aussi constaté par plusieurs auteurs dont (Arrigoni, et al. 2017) et (Saidi, et al. 2018). Ce dernier souligne de plus un impact bénéfique de l'ajout de ciment ou de chaux sur la conductivité thermique du matériau. Pourtant, d'après (Zhang, et al. 2017), il n'y a pas une tendance générale entre la conductivité thermique et la teneur en ciment.



(a)



(b)

Figure 102 : Evolution de la conductivité thermique suivant le niveau de stabilisation : cas (a) relation de proportionnalité (Saidi, et al. 2018) et cas (b) absence de relation générale (Zhang, et al. 2017)

La stabilisation améliore alors les phénomènes de transfert de chaleur tout en dégradant les performances hygroscopiques. Aujourd'hui, de nouvelles méthodes de stabilisation avec de composants tels les matériaux à activation alcaline sont introduits pour alternatives au ciment puisqu'ils présentent d'excellente capacité d'auto-régulation (Walter Bruno, Gallipoli, et al. 2017).

Annexe D : Les courbes de déformations radiales moyennes

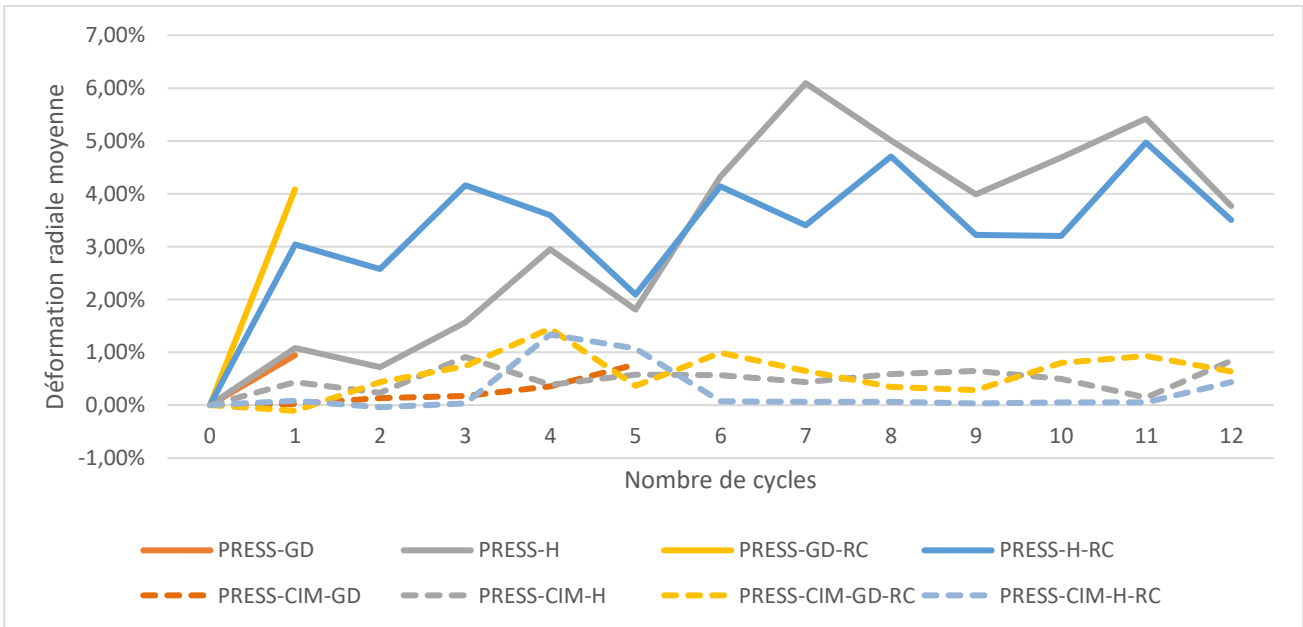


Figure 103 : Evolution des déformations radiales moyennes au fil des cycles (cas des PRESS)

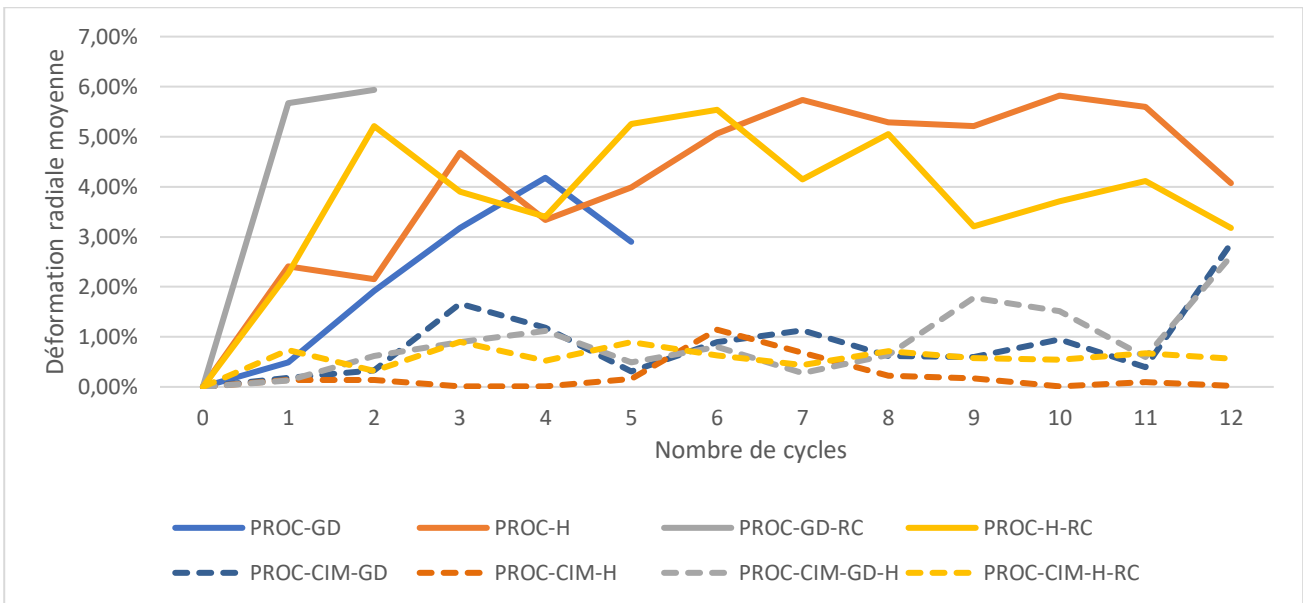


Figure 104 : Evolution des déformations radiales moyennes au fil des cycles (cas des PROC)

Annexe E : Les courbes de déformations axiales moyennes

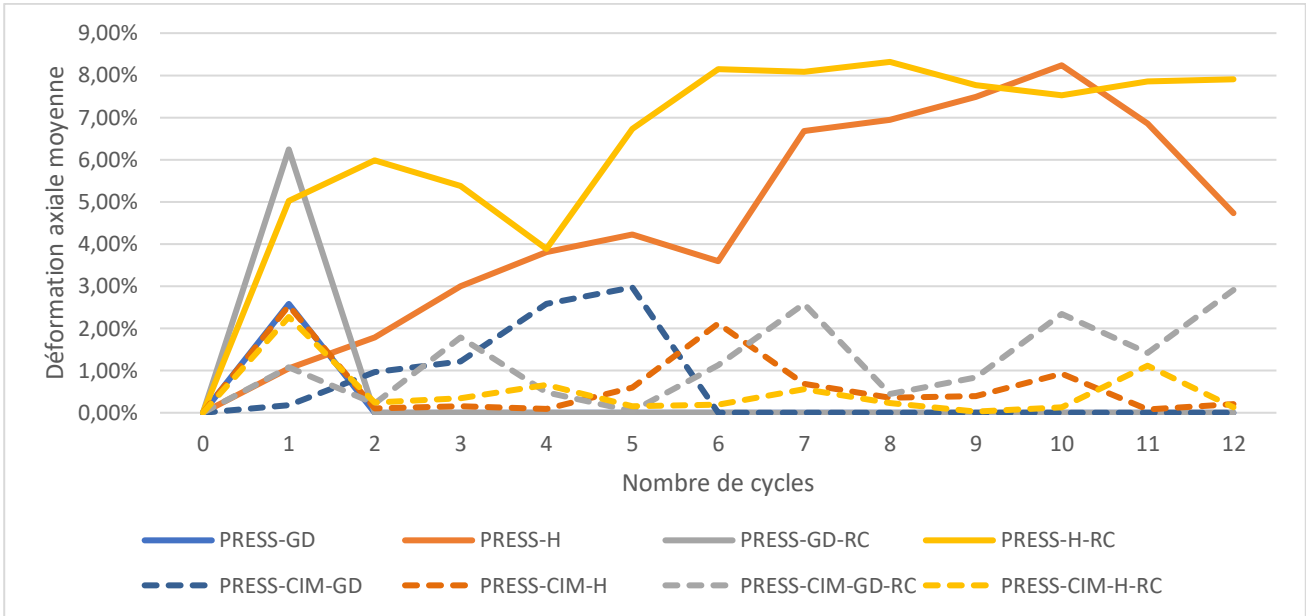


Figure 105 : Evolution des déformations axiales moyennes au fil des cycles (cas des PRESS)

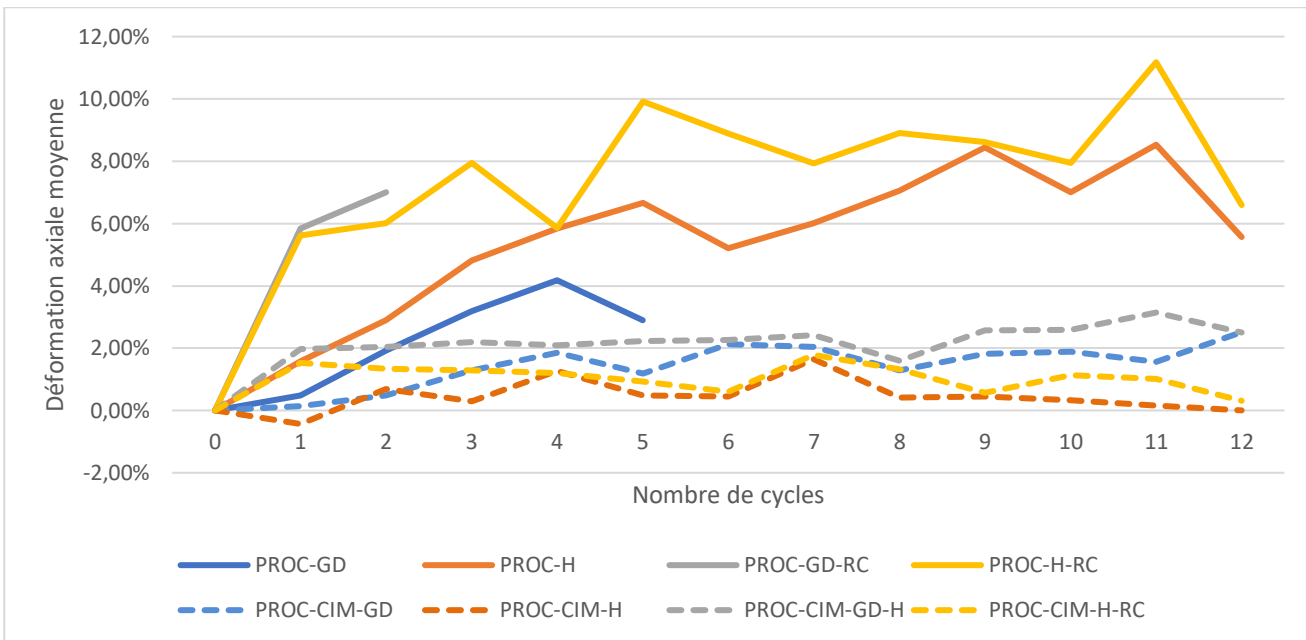


Figure 106: Evolution des déformations axiales moyennes au fil des cycles (cas des PROC)

Bibliographie

- A1-7-IFSTTAR. Méthodes d'auscultation sur prélèvements béton-essai de gel interne d'un béton. octobre 2015.
- Al Haffar, Noha, Antonin Fabbri, Fionn McGregor, et Horacio Colina. «Cement stabilization effect on mechanical and hygric properties of compacted earth.» *Conference: Fifth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 2019.
- Allinson, David, Hall, et Matthew. «Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK.» *Energy and Buildings* 42, n° 42 (2010): 845-852.
- Arrigoni, Alessandro, et al. «Reduction of rammed earth's hygroscopic performance under stabilisation: an experimental investigation.» *Building and Environment* 115, 2017: 358-367.
- ASTM-C-672. Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals. Brevet ASTM C 672/C 672M-03. 2003.
- ASTM-D-5298, American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. Brevet D5298-16. 2016.
- ASTM-D558. Standard Test Methods for Moisture-Density (Unit Weight) Relations of Soil-Cement Mixtures. Brevet ASTM-D558-2011. 2011.
- ASTM-D560. Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures. Brevet ASTM-D560-2016. 2016.
- ASTM-E96/E96M. Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. Brevet ASTM E96/E96M - 2016. 2016.
- Aubert, J.E, A Fabbri, J.C Morel, and P Maillard. "An earth block with a compressive strenght higher than 45 MPa !" *Construction and Building Materials* 47, 2013: 366-369.
- Azmatch, T.F, D.C Segó, L.U Arenson, and K.V Biggar. "Using soil freezing characteristic curve to estimate the hydraulic conductivity function of partially frozen soils." *Cold Regions Science and Technology* 83-84, 2012: 103-109.
- Bouyoucos, G-J. «Degree of temperature to which soils can be cooled without freezing.» *Journal of Agricultural Research*, 20, 1920: 267-269.
- BS-EN-ISO-12572. Hygrothermal performance of building materials and products-Determination of water vapour transmission properties. Brevet BS EN ISO 12572-2001. June 2001.
- Bui, Q.B. *Stabilité des structures en pisé: durabilité, caractéristiques mécaniques*. Thèse de doctorat, Lyon: MEGA, 2008.
- Bui, Q.B, and J.C Morel. "Assessing the anisotropy of rammed earth." *Construction and Building Materials* 23, 2009: 3005-3011.
- Bui, Q.B, J.C Morel, B.V Venkatarama Reddy, et W Ghayad. «Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering.» *Building and Environment* 44, 2009: 912-919.
- Bui, Q.B, J.C Morel, S Hans, and N Meunier. "Compressive behaviour of Non-Industrial Materials in Civil Engineering by Three Scale Experiments: The Case of Rammed Earth." *Materials and Structures* 42, 2009: 1101-1116.
- Bui, Q.B, J.C Morel, Stephane Hans, et Peter Walker. «Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth.» *Construction and Building Materials*, 54, 2014: 163-169.
- Chabriac, P.A. *Mesure du comportement hygrothermique du pisé*. Thèse de doctorat, Lyon: LGCB-LTDS UMR 5513, 2014.
- Champiré, F. *Etude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction*. Thèse de doctorat, Lyon: LGCB-LTDS UMR 5513, 2017.

- Champiré, F. *Etude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction*. Thèse de doctorat, Lyon: LGCB-LTDS UMR 5513, 2017.
- Champiré, F, A Fabbri, J.C Morel, H Wong, and F McGregor. "Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material." *Construction and Building Materials* 110, 2016: 70-78.
- Chatterji, S. «Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents.» *Cement and Concrete Composites*,25(7), 2003: 759-765.
- Coussy, O. "Poromechanics of freezing materials." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 53, 2005: 1689-1718.
- Coussy, O, and P Monteiro. "Unsaturated poroelasticity for crystallization in pores." *Computers and Geotechnics* 34, 2007: 279-290.
- Coussy, Olivier, et Paulo J.M Monteiro. «Poroelastic model for concrete exposed to freezing temperatures.» *Cement and Concrete Research*, 38, 2008: 40-48.
- Delage, Pierre, et Yu-Jun Cui. «L'eau dans les sols non saturés.» *Construction et travaux publics, (C301)*, 2000: 0:20.
- Fabbri, A, and T.F Chong. "Indirect measurement of the ice content curve of partially frozen cement based materials." *Cold Regions Science and Technology* 90-91, 2013: 14-21.
- Fabbri, A, et J-C Morel. «Earthen materials and constructions.» *Nonconventional and Vernacular Construction Materials*,10, 2016: 273-299.
- Fabbri, A, J.C Morel, and Domenico Gallipoli. "Assessing the performance of earth building material: a review of recent developments." *RILEM Technical Letters* 3, 2018: 46-58.
- Fabbri, Antonin. *Physico-mécanique des matériaux cimentaires soumis au gel-dégel*. Thèse de doctorat, Université de Marne la Vallée, 2006.
- Fabbri, Antonin, Olivier Coussy, Teddy Fen-Chong, et J.M Monteiro. «Are Deicing Salts Necessary to Promote Scaling in Concrete?» *Journal of Engineering Mechanics, American Society of Civil Engineers*, 134(7), 2007: 589-598.
- Fagerlund, Göran. «Determination of pore-size distribution from freezing-point depression.» *Matériaux et constructions*, 6 (3), 1973: 215-225.
- Fen-Chong, Teddy, Antonin Fabbri, Mickaël Thiery, et Patrick Dangla. «Poroelastic analysis of partial freezing in cohesive porous materials.» *Journal of Applied Mechanics*, 80(2), 2013.
- Gallipoli, Domenico, Céline Perlot, Agostino Walter Bruno, et Joao Mendes. «A geotechnical perspective of raw earth building.» *Acta Geotechnica*, 12(3), 2017: 463-478.
- Guettala, A, A Abibsi, et H Houari. «Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure.» *Construction and Building Materials* 20, 2006: 119-127.
- Guillaud, Hubert. «Characterization Of Earthen Materials.» *Terra literature review-An Overview of Research In Earthen Architecture Conservation*, 2008: 21-31.
- Hamard, Erwan, J.C Morel, Fernanda Salgado, Alain Marcom, et Nicolas Meunier. «A procedure to assess the suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture.» *Journal of Cultural Heritage* 14 (2), 2013: 109-115.
- Heathcote, K.A. «Durability of earthwall buildings.» *Construction and Building Materials* 9, 1995: 185-189.
- Helson, Olivier, Anne-Lise Beaucour, Javad Eslami, Albert Noumowe, et Philippe Gotteland. «Physical and mechanical properties of soilcrete mixtures:soil clay content and formulation parameters.» *Construction and Building Materials* 131, 2017: 775-783.
- ISO-12571. Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment- Détermination des propriétés de sorption hygroscopique. Brevet ISO-12571:2013 (E). 01 08 2013.

- Kariyawasam, K.K.G.K.D, et C Jayasinghe. «Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material.» *Construction And Building Materials*, 105, 2016: 519-527.
- Kaufman, Josef. *Experimental identification of damage mechanisms in cementitious porous materials on phase transition of pore solution under frost deicing salt attack*. thèse de doctorat, Lausanne: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1999.
- Kim, Hobi, Monica Prezzi, et Rodrigo Salgado. «Calibration of Whatman Grade 42 filter paper for soil suction measurement.» *Canadian Journal of Soil Science*, 97, 2017: 93-98.
- Lei, Xiaoqin, H Wong, A Fabbri, A Liman, and Y.M Cheng. "A thermo-chemo-electro-mechanical framework of unsaturated expansive clays." *Computers and Geotechnics* 62, 2014: 175-192.
- Leylavergne, Elvire. «La filière terre crue en France - enjeux, freins et perspectives.» *Actes du colloque Terra*, 2016.
- Litvan, G.G. «Freeze-thaw durability of porous building materials.» *ASTM Special Technical Publication*, 691, 1980: 455-463.
- Liu, L, Q Qin, and X Wang. "Poro-elastic-plastic model for cement-based materials subjected to freeze-thaw cycles." *Construction and Building Materials* 184, 2018: 87-99.
- Marchand, J, E.J Sellevold, et M Pigeon. «The deicer salt scaling deterioration of concrete-An overview.» *Durability of concrete*, 1994: 1-46.
- McGregor, F, A Heath, A Shea, and M Lawrence. "The moisture buffering capacity of unfired clay masonry." *Building and Environment* 82, 2014: 599-607.
- McGregor, Fionn, Antonin Fabbri, João Ferreira, Tania Simões, Paulina Faria, et Jean-Claude Morel. «Procedure to determine the impact of the surface film resistance on the hygric properties of composite clay/fibre plasters.» *Materials and Structures*, 50:193, 2017.
- Miccoli, L : Müller , U, and P Fontana. "Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob." *Construction and Building Materials* 61, 2014: 327-339.
- Miller, R.D. «Soil freezing in relation to pore water pressure and temperature.» *Proceedings 2nd International Conference on Permafrost*, 1973: 244-352.
- Moevus, Mariette, Romain Anger, et Laetitia Fontaine. «Hygro-thermo-mechanical properties of earthen materials for construction: a literature review.» *Terra* 2012, 2012.
- Morel, J.C, A Mesbah, M Oggero, et P Walker. «Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction.» *Building and Environment*, 36(10), 2001: 1119-1126.
- Neuman, S.P. «Saturated-Unsaturated seepage by fine elements.» *Journal of the hydraulics division, ASCE*, 99, 1973: 2233-2250.
- Newman, G.P, and G.W Wilson. "Heat and mass transfer in unsaturated soils during freezing." *Canadian Geotechnical Journal* 34, 1997: 63-70.
- NF EN 1015-18. Méthode de détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité du mortier durci. Brevet NF EN 1015-18. 2003.
- NF-EN-ISO-15148. Détermination du coefficient d'absorption d'eau par immersion partielle. Brevet NF EN ISO 15148. Octobre 2003.
- NF-P18-424. Bétons-Essai de gel sur le béton durci- Gel dans l'eau-Dégel dans l'eau. Brevet NF P18-424. Mai 2008.
- NF-P18-425. Bétons-Essai de gel sur béton durci-Gél dans l'air-Dégel dans l'eau. Brevet NF P18-425. Mai 2008.
- NF-P-94-050. Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux-méthode par étuvage. Septembre 1995.
- Ogunye, F.O, et H Boussabaine. «Diagnosis of assessment methods for weatherability of stabilised compressed soil blocks.» *Construction and Building* 16, 2002: 163-172.

- Osselin, Florian, Antonin Fabbri, Teddy Fen-Chong, Patrick Dangla, Jean-Michel Pereira, et Arnault Lassin. «Stress from NaCl crystallisation by carbon dioxide injection in aquifers.» *Environmental Geotechnics*, 2, 2015: 280-291.
- Ouellet-Plamondon, C.M, and G Habert. "Self-compacted ckey-based concrete (SCCC): proof-of-concept." *Journal of Cleaner Production* 117, 2016: 160-168.
- Pacheco-Torgal, F, et S Jalali. «Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction.» *Construction and Building Materials*, 29, 2012: 512-519.
- Pigeon, Michel. «La durabilité au gel du béton.» *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, 22, 1989: 3-14.
- Powers, T, and R Helmuth. "Theory of volume changes in hardened portland-cement paste during freezing." *Highway Research Board* 32, 1953: 285-297.
- Powers, T.C. «The air requirement of frost-resistant concrete.» *Proc. Highway Rese. Board* 29, 1949: 184-211.
- Quagliarini, Enrico, et Stefano Lenci. «The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe briks.» *Journal of Cultural Heritage*, 11, 2010: 309-314.
- Richard, L.A. «Capillary conduction of liquids through porous meduims.» *Physics* 1,318, 1931: 169-173.
- Saidi, Meriem, Amel Soukaina Cherif, Belkacem Zeghmati, et Ezeddine Sediki. «Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks.» *Construction and Building Materials* 167, 2018: 566-577.
- Salager, Simon. «Influence de la température sur le comportement hydrique de mlieux poreux partiellement saturés.» 2006.
- Scarato, P, and J Jeannet. *Cahier d'expert bâti en pisé - Connaissance, analyse, traitement des pathologies du bâti en pisé en Rhône-Alpes et Auvergne*. Haute-Rivoire: ABITerre Rhône-Alpes, 2015.
- Scherer, G.W. «Crystallization in pores.» *Cement and Concrete Research* 29, 1999: 1347-1358.
- Soudani, L, et al. «Assessment of the validity of some common assumptions in hygrothermal modeling of earth based materials.» *Energy and Buildings* 116, 2016: 408-.
- Soudani, L.C.L. *Modelling and experimental validation of the hygrothermal performances of earth as a building material*. Thèse de doctorat, Lyon: LGCB-LTDS UMR 5513, 2016.
- Van Damme, H, and Hugo Houben. "Earth concrete. Stabilization revisited." *Cement and Concrete Research* 114, 2018: 90-102.
- Vignes-Adler, M. "On the origin of the water aspiration in a freezing dispersed medium." *J Colloid Interface Sci* 60, 1976: 162-171.
- Walter Bruno, Agostino, Domenico Gallipoli, Celine Perlot, et Joao Mendes. «Effect of stabilisation on mechanical properties, moisture buffering and water durability of hypercompacted earth.» *Construction and Building Materials*, 149, 2017: 733-740.
- Walter Bruno, Agostino, Joao Mendes, Celine Perlot, et Domenico Gallipoli. «A Microstructural Insight into the Hygro-Mechanical Behaviour of Stabilised Hypercompacted Earth .» *Materials and Structures*,, 2018: 32:51.
- Walter-Bruno, Agostino, Céline Perlot, Domenico Gallipoli, et Joao Mendes. «Effect of very high compaction pressures on the physical and mechanical properties of earthen materials.» *E3S Web of Conferences*, 9, 2016.
- Woloszyn, M, T Kalamees, M Olivier Abadie, M Steeman, and A Sasic Kalagasidis. "The effect of combining a relative-humidity-sensitive ventilation system with the moisture-buffering capacity of materials on indor climate and energy efficiency of buildings." *Building and Environment* 44(3), 2009: 515-524.
- XP-P18-420. Béton-Essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline. Brevet XP-P18-420. Mai 2012.

- Xu, Huining, Wei Guo, et Yiqiu Tan. «Internal structure evolution of asphalt mixtures during freeze-thaw cycles.» *Materials and Design*, 86(5), 2015: 436-446.
- Xu, Longfei. *Mechanical behaviour of compacted earth with respect to relative humidity and clay content: experimental study and constitutive modelling*. Thèse de doctorat, Lyon: LGCB-LTDS UMR 5513, 2018.
- Yin, X, E Liu, B Song, and D Zhang. "Numerical analysis of coupled liquid water, vapor, stress and heat transport in unsaturated freezing soil." *Cold Regions Science and Technology*, 2018: 20-28.
- Zhang, Lei, Arild Gustavsen, Petter Jelle, Liu Yang, Tao Gao, et Yu Wang. «Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks.» *Construction and Building Materials* 151, 2017: 504-511.