



HAL
open science

Mesure du comportement hygrothermique du pisé

Pierre-Antoine Chabriac

► **To cite this version:**

Pierre-Antoine Chabriac. Mesure du comportement hygrothermique du pisé. Matériaux composites et construction. École Nationale des Travaux Publics de l'État [ENTPE], 2014. Français. NNT : 2014ENTP0007 . tel-01413611

HAL Id: tel-01413611

<https://hal.science/tel-01413611v1>

Submitted on 10 Dec 2016

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.

THESE

pour l'obtention du grade de
Docteur de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat

Ecole doctorale : MEGA (Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique)

Spécialité : Génie Civil

Préparée au Laboratoire Génie Civil et Bâtiment (LTDS/UMR 5513)

Présentée et soutenue publiquement par

Pierre-Antoine CHABRIAC

MESURE DU COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE DU PISE

Soutenue le 28 juillet 2014 devant le jury composé de

Président du jury :	Henry WONG	Directeur de Recherche, ENTPE
Rapporteurs :	Monika WOLOSZYN Jean-Emmanuel AUBERT	Professeur, Université de Savoie Maître de Conférence, Université de Toulouse
Examineurs :	Jean-Paul LAURENT Antonin FABBRI	Ingénieur de Recherche, Université de Grenoble Chargé de Recherche, ENTPE
Invités :	Fabrice Toussaint Ivan Serclerat	Lafarge Lafarge
Directeur de thèse :	Jean-Claude MOREL	Directeur de Recherche, ENTPE

AVANT-PROPOS

Cette thèse a été financée par l'ADEME, Lafarge et l'ENTPE. Certaines expériences ont été financées par l'ANR (PRIMATERRE - ANR-12-VBDU-0001 Villes et Bâtiments durables) et la Région Rhône-Alpes via le projet Ter-RA (11024835 01 – ENT012v de la Direction du Climat, Environnement, Santé et Energie).

Je tiens à remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration et à la bonne marche de ces travaux de thèse.

Jean-Claude Morel pour son encadrement, sa grande écoute, sa patience et pour l'ambiance de travail qu'il a su établir.

Erwan Hamard, ex-technicien du DGCB (aujourd'hui LGCB), ainsi que Stéphane Cointet, technicien actuel.

Jean-Paul Laurent pour m'avoir guidé à travers le choix des capteurs.

Antonin Fabbri pour son aide précieuse sur les constantes diélectriques.

Joachim Blanc-Gonnet pour son expertise.

Nicolas Meunier, artisan, spécialiste des constructions en pisé.

Et l'ensemble des chercheurs et personnel du LGCB.

Du côté personnel, j'adresse un remerciement tout particulier à ma femme, Sara, que j'ai rencontrée, épousée et qui a donné naissance à notre fils Simon. Tout cela, au cours de ces trois années de thèse ! Ils ont su être là dans les moments les meilleurs comme les plus difficiles.

Je tiens bien évidemment à remercier ma sœur Anne-Sophie, ma mère Aline et son compagnon Philippe qui m'ont toujours soutenu dans mon parcours scolaire et professionnel.

Et je tiens à terminer ces remerciements avec une pensée pour mon père Nicolas qui nous a quitté au début de cette année.

« Question : Comment faire pour ne pas perdre son temps ? Réponse : l'éprouver dans toute sa longueur. Moyens : passer des journées dans l'antichambre d'un dentiste, sur une chaise inconfortable ; vivre à son balcon le dimanche après-midi ; écouter des conférences dans une langue qu'on ne comprend pas ; choisir les itinéraires de chemin de fer les plus longs et les moins commodes et voyager debout naturellement ; faire la queue aux guichets des spectacles et ne pas prendre sa place, etc. »

Albert Camus – La Peste

A mon père,

RESUME

Les murs massifs en pisé sont connus pour leur confort d'habitation et leur capacité à réguler la température et l'humidité à l'intérieur des bâtiments. L'évolution des réglementations – notamment thermiques (RT 2012) – implique aujourd'hui d'avoir des bâtiments répondant à des critères drastiques. Or, le bâti en pisé semble, *a priori*, ne pas s'inscrire dans les références définies par ces règlements. Il semblerait donc qu'il faille prendre en compte d'autres critères que la simple résistance thermique pour caractériser le comportement d'un bâtiment en pisé. Les mécanismes couplés de transferts de masse et de chaleur qui ont lieu au sein d'un matériau poreux comme le pisé et qui conduisent à cette régulation naturelle sont bien connus empiriquement. Cependant, leurs mises en évidence scientifiques sont, quant à elles, plus difficiles.

L'objectif de la thèse a été de développer une chaîne de mesure des transferts hydriques et thermiques dans les bâtiments en pisé afin de les observer et de les quantifier. Une habitation neuve en pisé a été étudiée en particulier durant ces trois ans. La thèse s'est alors déroulée en quatre phases :

1. Développement d'une chaîne de mesure (capteurs de teneur en eau liquide, d'humidité relative, de température, de flux de chaleur). Chacun de ces capteurs a été modifié, adapté et étalonné pour résister au damage et fonctionner dans un matériau dense et contenant de l'argile ;
2. Caractérisation géotechnique, thermique et hydrique du matériau : granulométrie, densité, transferts de liquide et de vapeur, sorption, conductivité thermique, chaleur spécifique ;
3. Essais à l'échelle du mur en laboratoire dans un caisson étanche fonctionnant en double enceintes climatiques conçues au laboratoire. Quatre murs en pisé ont été équipés des capteurs développés en phase 1 ;
4. Essais à l'échelle de l'habitation : la maison référence a été équipée des mêmes capteurs durant sa construction et un monitoring des transferts a été établis pour au moins 5 ans.

Les objectifs principaux étaient d'instrumenter des murs en pisé durant leur fabrication en prenant en compte l'énergie de compaction, d'avoir un étalonnage des capteurs tenant compte des variations importantes de températures *in situ* et, d'enregistrer sur une longue période (au moins 5 ans) les conditions hydriques et thermiques dans les murs, ainsi qu'à l'intérieur et à l'extérieur de l'habitation.

Les résultats obtenus mettent en évidence les phénomènes de transferts thermiques et hydriques se produisant dans le pisé. Les résultats expérimentaux permettent d'envisager la mise au point de modélisations adaptées à la terre compactée.

ABSTRACT

Massive rammed earth walls are known for their comfort of living and their ability to regulate the temperature and humidity inside buildings. The evolution of regulations – particularly the thermal ones (RT 2012) - now involves having buildings that meet stringent criteria. However, rammed earth buildings seem not to be in accordance with the references defined by these regulations. This suggests that criteria, other than the simple thermal resistance, should be taken into account to characterize the behavior of a rammed earth building. The coupled heat and mass transfers mechanisms occurring within a porous material such as rammed earth – which lead to this natural regulation – are well known empirically. However, their set scientific evidences are more difficult.

The aim of the thesis was to develop a measurement chain of water and heat transfers in rammed earth, to observe and quantify them. A new rammed earth house has been studied during these three years. The thesis was then carried out in four phases:

1. Development of a measurement chain (liquid water content probes, relative humidity, temperature and heat flux sensors). Each of the sensors was modified and adapted and calibrated to resist compaction and run in a dense material and containing clay;
2. Geotechnical, hydric and thermal characterization of the material: particle size distribution, density, transfer of liquid and vapor, sorption, thermal conductivity, specific heat;
3. Testing in laboratory at wall scale in a sealed box working as double climatic chambers designed in the laboratory. Four rammed earth walls were equipped with sensors developed in phase 1;
4. Testing at a house scale: the reference house was equipped with the same sensors during construction and monitoring of transfers has been set up for at least 5 years.

The main objectives were to instrument rammed earth walls during their manufacturing taking into account the compaction energy, to have a sensor calibration taking into account significant variations of *in situ* temperatures and record over a long period (at least 5 years) hydric and thermal conditions in the walls, as well as inside and outside the building.

The obtained results demonstrate the phenomena of heat and water transfers occurring in the walls. The experimental results allow considering the development of models adapted to compacted earth.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	9
INTRODUCTION.....	15
PARTIE 1 : LE PISE.....	19
1.1. LA CONSTRUCTION EN TERRE	21
1.1.1. <i>Une présence globale.....</i>	21
1.1.2. <i>Une présence historique</i>	23
1.2. LE PISE EN PARTICULIER.....	24
1.2.1. <i>Présentation</i>	24
1.2.2. <i>Pisé traditionnel.....</i>	26
1.2.3. <i>Pisé moderne</i>	29
1.2.3.1. Technique	29
1.2.3.2. Pisé non-stabilisé	30
1.2.3.3. Pisé stabilisé	31
1.2.3.4. Pisé préfabriqué.....	32
1.2.4. <i>Le confort du pisé.....</i>	33
1.3. SUJET D’ETUDE : SAINT ANTOINE L’ABBAYE	34
1.3.1. <i>Origine du projet</i>	34
1.3.2. <i>La construction en pisé de la Chabeaudière</i>	36
1.4. CONCLUSION SUR LA PARTIE 1	40
PARTIE 2 : MISE AU POINT D’UNE CHAINE DE MESURE	41
2.1. CENTRALE D’ACQUISITION CR1000 ET AM16/32B	43
2.1.1. <i>Présentation</i>	43
2.1.2. <i>Programmation.....</i>	44
2.2. LES CAPTEURS DE TEMPERATURE ET D’HUMIDITE RELATIVE	44
2.2.1. CS215	44
2.2.1.1. Présentation.....	44
2.2.1.2. Principe de mesure.....	45
2.2.1.2.1. Température.....	45
2.2.1.2.2. Humidité relative	46
2.2.1.3. Renforcement	47
2.2.1.4. Adressage	48
2.2.2. <i>Hygromètre à miroir refroidi</i>	49
2.2.3. <i>Capteur de température/Humidité relative USB</i>	51
2.2.4. <i>Thermistance 107.....</i>	53
2.3. LES SONDES DE TENEUR EN EAU	54
2.3.1. <i>Lien entre la teneur en eau et la permittivité diélectrique</i>	54
2.3.2. <i>Principe du TDR</i>	57
2.3.3. CS616	59
2.3.4. CS650	61
2.4. ETALONNAGE DES SONDES DE TENEUR EN EAU	61
2.4.1. <i>Etalonnages constructeur</i>	61
2.4.1.1. CS650.....	61
2.4.1.2. CS616.....	63
2.4.1.3. Conclusion sur l’étalonnage par défaut.....	65

2.4.2.	<i>Méthode par relation bilinéaire</i>	65
2.4.2.1.	Fabrication des échantillons.....	65
2.4.2.2.	Etalonnage des sondes.....	66
2.4.2.3.	Vérification de l'étalonnage.....	68
2.5.	CONCLUSION SUR LA PARTIE 2	69
PARTIE 3 : COUPLAGE HYGROTHERMIQUE ET CARACTERISATION DU PISE		71
3.1.	MODELES DE COUPLAGE HYGROTHERMIQUE.....	75
3.1.1.	<i>Modèle de Philip et De Vries</i>	75
3.1.2.	<i>Modèle de Kunzel</i>	78
3.2.	DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DES PISES ETUDIES.....	80
3.2.1.	<i>Paramètres physiques</i>	81
3.2.1.1.	Granulométrie et sédimentométrie	81
3.2.1.2.	Densité sèche.....	82
3.2.1.3.	Porosité	84
3.2.1.4.	Valeur de bleu (VBS).....	85
3.2.1.5.	Analyses chimique	86
3.2.2.	<i>Paramètres hydriques</i>	87
3.2.2.1.	Coefficient d'absorption d'eau (A-Value)	87
3.2.2.2.	Sorption/désorption	89
3.2.2.3.	Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur.....	91
3.2.3.	<i>Paramètres thermiques</i>	97
3.2.3.1.	Conductivité thermique.....	97
3.2.3.2.	Absorption solaire	101
3.2.3.3.	Capacité calorifique.....	106
3.3.	CONCLUSION SUR LA PARTIE 3	108
PARTIE 4 : ESSAIS EN LABORATOIRE A L'ECHELLE D'UN MUR.....		109
4.1.	LE PROJET TER-RA	111
4.2.	CONCEPTION DES CHAMBRES CLIMATIQUES.....	111
4.2.1.	<i>Fabrication des murs</i>	111
4.2.2.	<i>Instrumentation des murs</i>	114
4.2.3.	<i>Double enceintes climatiques</i>	118
4.2.4.	<i>Système de régulation de température et d'humidité relative</i>	119
4.3.	VALIDATION DE LA PROCEDURE EXPERIMENTALE.....	124
4.3.1.	<i>Etanchéité des caissons et étalonnage des sondes de teneur en eau CS616 et CS650</i>	124
4.3.1.1.	Conditions hydriques et thermiques dans les ambiances	126
4.3.1.2.	Etanchéité des caissons	129
4.3.1.2.1.	Température et humidité relative du caisson B50.....	129
4.3.1.2.2.	Température et humidité relative du caisson A50.....	131
4.3.1.2.3.	Teneurs en eau dans les murs A50 et B50 lors des tests d'étanchéité.....	133
4.3.1.3.	Validation de l'étalonnage des sondes de teneur en eau.....	135
4.3.2.	<i>Mise en évidence de l'effet de la gravité lors du séchage</i>	138
4.3.3.	<i>Système de régulation</i>	141
4.3.3.1.	Essai 1 – Cycle de température et humidité relative constante	141
4.3.3.2.	Essai 2 – Température et humidité relative constantes.....	143
4.3.4.	<i>La sonde A30-CS215 mid. et la mesure de l'humidité relative dans le pisé</i>	145

4.4.	COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE DU PISE : EVAPORATION DANS LE MUR A50	147
4.4.1.	<i>Mesures</i>	147
4.4.2.	<i>Introduction à la modélisation</i>	152
4.5.	CONCLUSION SUR LA PARTIE 4	154
PARTIE 5 : ESSAIS A L'ECHELLE DE L'HABITATION : ST ANTOINE L'ABBAYE.....		157
5.1.	INSTRUMENTATION.....	159
5.1.1.	<i>Dans le mur</i>	159
5.1.2.	<i>Ambiances extérieure et intérieure</i>	163
5.1.3.	<i>Résumé de l'instrumentation</i>	165
5.2.	RESULTATS	167
5.2.1.	<i>Fonctionnement des sondes</i>	167
5.2.1.1.	Teneur en eau du pisé.....	167
5.2.1.2.	Humidité relative et température.....	167
5.2.2.	<i>Premières observations</i>	168
5.2.2.1.	Effet de la gravité.....	168
5.2.2.2.	Pression de vapeur saturante.....	168
5.2.2.3.	Variations de teneur en eau saisonnières	169
5.2.2.4.	Températures et humidité relatives	173
5.2.2.4.1.	Période estivale : du 20 juin au 21 septembre 2013.....	173
5.2.2.4.2.	Période automnale : du 22 septembre au 19 novembre 2013.....	176
5.2.3.	<i>Le cas particulier de l'Hiver 2012</i>	178
5.2.3.1.	Températures dans le mur.....	178
5.2.3.2.	Teneurs en eau durant cet hiver	180
5.2.3.3.	Gel de l'eau dans le mur ouest.....	182
5.3.	CONCLUSION SUR LA PARTIE 5	184
CONCLUSION ET PERSPECTIVES		185
RÉFÉRENCES		191
TABLE DES FIGURES		203
TABLE DES TABLEAUX		213
ANNEXE A : LE PISE COMME MILIEU POREUX		217
A.1.	DESCRIPTION PHYSIQUE.....	219
A.1.1.	<i>Le milieu poreux : phase solide</i>	219
A.1.1.1.	Définition.....	219
A.1.1.2.	Caractéristiques	220
A.1.1.3.	Volume élémentaire représentatif (VER).....	220
A.1.1.4.	La cohésion du matériau terre	221
A.1.2.	<i>Le milieu poreux : phases fluides</i>	223
A.1.2.1.	Pression capillaire.....	223
A.1.2.2.	Loi de Kelvin.....	223
A.1.2.3.	Sorption/désorption	224
A.1.2.4.	Teneur en eau.....	226
A.2.	LES TRANSFERTS HYDRIQUES	227
A.2.1.	<i>La conservation de la masse</i>	227

A.2.2.	<i>Loi de Darcy</i>	228
A.2.3.	<i>Loi de Fick et effet Knudsen</i>	229
A.3.	LES TRANSFERTS THERMIQUES.....	231
A.3.1.	<i>Transferts de chaleur par conduction</i>	231
A.3.2.	<i>Transferts de chaleur par convection</i>	232
A.3.3.	<i>Transferts de chaleur par rayonnement</i>	232
A.3.4.	<i>Transferts de chaleur par changement d'état</i>	232
A.3.5.	<i>Modèles d'estimation des paramètres thermiques équivalents</i>	233
A.3.5.1.	<i>Capacité calorifique</i>	233
A.3.5.2.	<i>Conductivité thermique</i>	234
A.3.5.2.1.	<i>Le modèle de De Vries</i>	234
A.3.5.2.2.	<i>Le modèle de Kirkpatrick</i>	235
A.3.5.2.3.	<i>Les modèles par analogie électrique</i>	235
A.3.5.2.4.	<i>Le modèle par homogénéisation auto-cohérente</i>	237
A.3.5.2.5.	<i>Les modèles empiriques ou semi-empiriques</i>	238
A.3.5.3.	<i>Méthodes de mesure des paramètres thermiques</i>	238
A.3.5.3.1.	<i>Régime permanent</i>	239
A.3.5.3.2.	<i>Régime transitoire</i>	239
ANNEXE B : CONDUCTIVITE THERMIQUE ET DENSITE DU PISE		241
B.1.	ARNOLD (1969) DANS HEATHCOTE (2011).....	243
B.2.	PISE, TERRE D'AVENIR (1985).....	243
B.3.	LAURENT (1986).....	243
B.4.	VOLHARD (1983) DANS MINKE (2000).....	244
B.5.	ADAM & JONES (1995) ET ADAM (2001).....	244
B.6.	WALKER ET AL. (2004).....	245
B.7.	TAYLOR ET AL. (2008).....	245
B.8.	HALL & ALLINSON 2009	246
B.9.	ALLINSON ET HALL (2010).....	246
B.10.	OTI ET AL. (2010).....	246
B.11.	CSTB (2011).....	247
ANNEXE C : PROGRAMMATION DE LA CENTRALE D'ACQUISITION.....		249
C.1.	PROGRAMMATION DES MAQUETTES.....	251
C.2.	ST ANTOINE L'ABBAYE	262

INTRODUCTION

Les matériaux de construction non-industriels (peu transformés) permettent de réduire les consommations d'énergie lors de leur extraction, leur mise en œuvre et leur recyclage. C'est ce qu'on appelle l'énergie grise. Morel et al. ont montré que l'utilisation de matériaux locaux dans le bâtiment permettaient de diviser par trois l'énergie grise (Morel et al., 2001). Cette réduction prend tout son sens quand on sait que le secteur du bâtiment représente à lui seul 71% de la production de déchets lors de la construction (INSEE, 2012) et 44,5% de la totalité de l'énergie consommée en France pendant la phase d'habitation (INSEE, 2013). La réduction de la consommation de l'énergie dans le bâtiment est donc un enjeu majeur pour l'avenir et les constructions en terre crue peuvent s'inscrire dans cette démarche de par leur faible impact environnemental et l'utilisation d'un matériau de construction local et peu énergivore. La France possède un patrimoine vernaculaire en terre crue exceptionnel et le pisé est, de loin, la technique de construction en terre la plus utilisée en Région Rhône-Alpes.

Certaines constructions en pisé, qu'il soit stabilisé ou non, sont connues pour leur confort d'habitation (Paul and Taylor, 2008). En effet, les murs massifs en pisé jouent un rôle de régulateur de la température et de l'humidité relative à l'intérieur de l'habitation.

L'évolution des réglementations – notamment thermique (RT 2012) – implique aujourd'hui d'avoir des bâtiments répondant à des critères drastiques. Or, le bâti en pisé semble, *a priori*, ne pas s'inscrire dans les références définies par ces règlements. Il semblerait donc qu'il faille prendre en compte d'autres critères que la simple résistance thermique pour caractériser le comportement d'un bâtiment en pisé.

Le pisé est un matériau dans lequel se produisent des changements de phases. Ces types matériaux sont capables de stocker des quantités d'énergie thermique beaucoup plus importantes que les matériaux conventionnels et permettent de fournir une stabilité thermique aux constructions. Ainsi, lorsque la température augmente, l'eau contenue dans les murs en pisé se vaporise. Ce changement de phase de l'eau consomme alors de l'énergie et participe au refroidissement du mur. Inversement, lorsque la température diminue, l'eau sous forme de vapeur se condense et de la chaleur est dégagée.

Les mécanismes couplés de transferts de masse et de chaleur qui ont lieu au sein d'un matériau poreux comme le pisé et qui conduisent à cette régulation naturelle sont bien connus. Cependant, leurs mises en évidence sont, quant à elles, plus difficiles. Il faut alors s'attacher à montrer la présence de ces phénomènes afin que la preuve de leur existence et leurs effets puissent fournir des indications pour l'établissement de nouveaux règlements.

Ces dernières années, de nombreuses recherches ont été lancées dans de nombreux pays afin d'approfondir la connaissance de ces mécanismes et d'adapter ou de corréliser des modèles de calculs de couplage hygrothermique. On peut, par exemple, citer les études des très prolifiques Hall et Allinson qui travaillent sur du pisé stabilisé (Allinson and Hall, 2010; Hall

and Allinson, 2009a) ou encore celles de Walker qui s'attachent à dresser un état des lieux particulièrement exhaustif de la construction en pisé dans le monde (Walker et al., 2004).

Dans la continuité de trois thèses déjà réalisées au Laboratoire Génie Civil et Bâtiment de l'ENTPE sur le matériau terre – une sur des BTC (P'Kla, 2002), une sur le mortier de terre (Azeredo, 2005) qui a une rhéologie proche de celle des adobes puis une sur la stabilité des structures en pisé (Bui, 2008) – celle-ci étudiera le pisé et plus particulièrement la mise au point d'une instrumentation capable de mesurer les caractéristiques hydriques et thermiques du pisé pour mettre en évidence les effets hygrothermiques.

Nous allons, dans une première partie, présenter le matériau terre dans la construction puis le pisé en particulier. Nous présenterons une maison neuve en pisé qui sera le fil rouge tout au long de cette thèse pour l'étude de ce matériau.

Dans une seconde partie, nous aborderons l'instrumentation qui a été mise en œuvre pour l'étude des caractéristiques hydrique et thermique du pisé. Cette instrumentation consiste en un ensemble de capteurs et de sondes dont le fonctionnement et l'étalonnage seront détaillés.

Puis, dans une troisième partie, nous présenterons deux modèles de comportement hygrothermique et les paramètres nécessaires à leur exploitation. Ces modèles théoriques impliquent la détermination des caractéristiques physique, hydrique et thermique du pisé au niveau du matériau ; ce que nous présenterons dans cette même partie. Nous passerons, comme évoqué précédemment, à l'échelle supérieure.

Dans une quatrième partie, nous passerons à l'échelle du mur en pisé étudié en laboratoire. En partenariat avec la Région Rhône-Alpes, nous avons construit des murs en pisé (1,5x1x0,5 m), nous les avons ensuite instrumentés avec la chaîne de mesure présentée dans la seconde partie, puis nous les avons installés dans des caissons isolés (développés au laboratoire) nous permettant de maîtriser les conditions hydriques et thermiques des ambiances.

Enfin, dans une dernière partie, nous passerons encore à l'échelle supérieure, c'est-à-dire celle de l'habitation. Nous étudierons donc la maison en pisé que nous présentons dans la première partie. Cette habitation a également été instrumentée et nous présenterons les relevés des capteurs.

PARTIE 1 : LE PISE

Dans cette partie, nous nous attacherons à présenter le pisé comme matériau de construction. Pour cela, nous présenterons dans un premier temps la construction en terre en général et à travers l'histoire dans un court historique. Ensuite, nous nous attarderons sur les habitations en pisé traditionnelles puis modernes. Nous finirons enfin cette partie en détaillant une construction neuve en pisé qui servira à étudier le comportement hygrothermique de ce matériau. Cette habitation sera notre référence tout au long de cette thèse et en sera donc le « fil rouge ».

1.1. LA CONSTRUCTION EN TERRE

1.1.1. UNE PRESENCE GLOBALE

Issu d'un matériau naturel disponible en grande quantité et partout sur le globe, la construction en terre s'est développée de manière traditionnelle sur les cinq continents. On peut citer par exemple la Grande mosquée de Djenné au Mali (figure 1-1), construite en adobe, qui est actuellement le plus grand édifice en terre au monde (Delahousse, 2011). On peut également citer la grande muraille de Chine dont une partie est constituée de briques de terre ou encore le temple Horyu-Ji au Japon, construit en pisé il y a plus de 1300 ans (Hall, 2004a). En Afrique et au Proche-Orient, des villes entières sont constituées d'immeubles de plusieurs étages en terre crue et abritent depuis des siècles les populations locales. L'exemple le plus frappant étant sans doute la ville de Shibam au Yémen, la « Manhattan du désert ».

Pour ce qui est de l'Europe, en Allemagne, à Weilburg, on peut trouver un immeuble de 5 étages en pisé datant de 1841. En Espagne, des portions entières de la muraille de l'Alhambra de Grenade, construite au 14^{ème} siècle sont construites en pisé (Walker et al., 2004). En France (Rhône-Alpes et Bourgogne) et en Angleterre, notamment dans le Wessex, où il s'agit plus particulièrement de pisé de craie (Maniatidis and Walker, 2003), on trouve un patrimoine vernaculaire en pisé extrêmement riche pour ne citer que cette technique.

La figure 1-1 est un montage des types de constructions en terre que l'on peut trouver à travers le monde.

Ces quelques exemples que nous venons de citer, associés à la carte de la figure 1-2 montrent que l'Europe possède un formidable patrimoine varié de construction en terre.

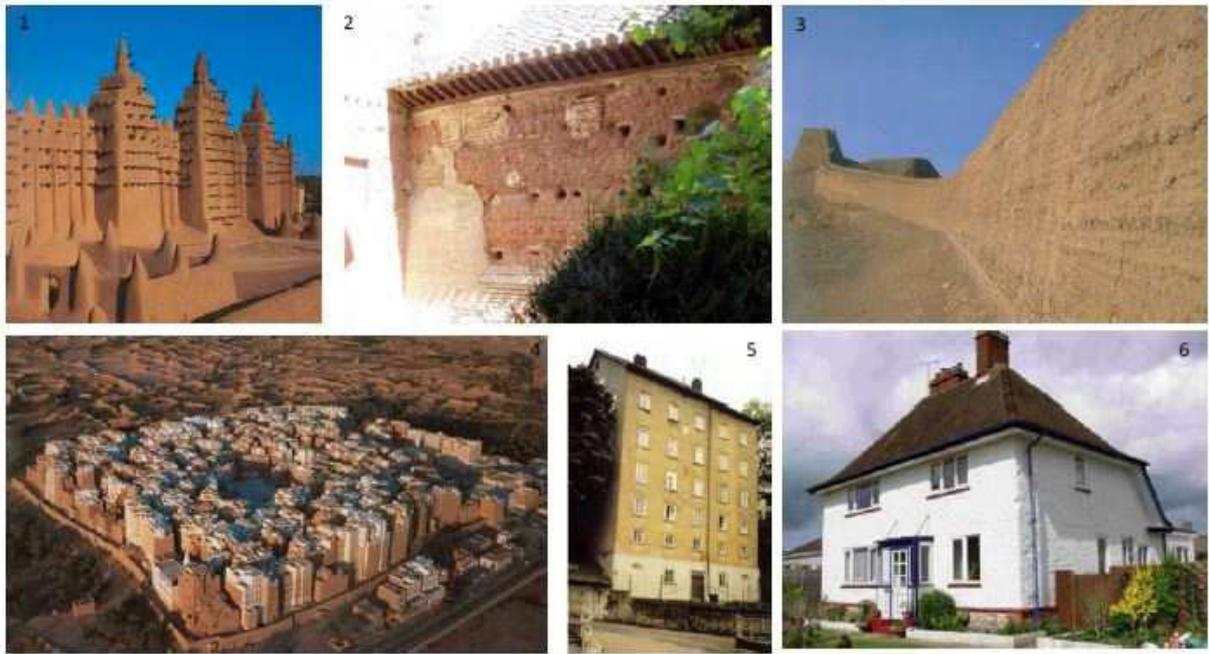


Figure 1-1 : 1. Grande Mosquée de Djenné (Mali) 2. Alhambra de Grenade (Espagne) 3. Grande muraille de Chine dans la province du Jiayuguan (Chine) 4. Shibam (Yémen) 5. Immeuble de 5 étages à Weilburg (Allemagne) 6. Maison en craie compactée à Amesbury (Wiltshire – Angleterre) – Montage (Contet, 2012)

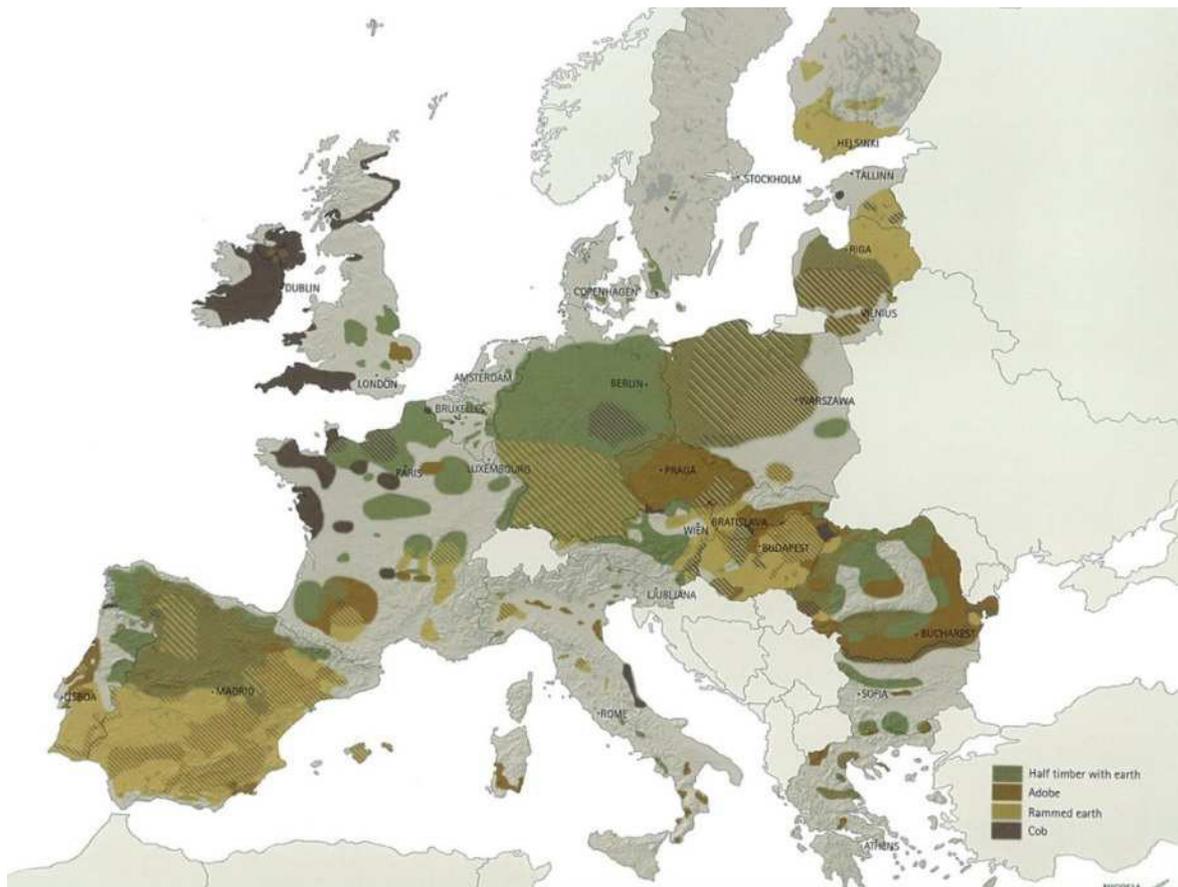


Figure 1-2 : Présence de la construction en terre crue en Europe (Lotti and Mecca, 2011)

1.1.2. UNE PRESENCE HISTORIQUE

Depuis la nuit des temps, la terre a été utilisée comme matériau de construction et les plus anciennes traces archéologiques remontent à plus de 10 000 ans.

De nombreux auteurs, de l'antiquité à nos jours, font mention de la construction en terre crue au cours de l'histoire et sur tous les continents (Maison de Pays (association loi 1901), 2010).

Dès l'époque grecque et romaine, Hérodote (v. -484 – v. -425) relate dans *Histoires* des témoignages d'architectures en terre, glanés lors de ses grands voyages entrepris en Afrique, Asie ou Europe. L'historien, géographe et philosophe Dicaarque (v. -347 – v. -285) évoque les quartiers populaires d'Athènes construits en briques de terre et toitures de chaume. Plus tard, César (v. -100 – -44), dans ses deux ouvrages *De Bello Gallico*, observe les constructions en terre des gaulois et leurs ouvrages de défense appelés *muris gallicis*. Dans *De Architectura* (livre II, 1-3-8), Vitruve (v. -90 – v. -20) traite de la construction en brique de terre crue. A la même époque, Strabon (v. -59 – v. 25) fait référence aux constructions en bois et en terre des gaulois dans *Geographia*. Ce seront les murailles de pisé construites par les carthaginois en Afrique et en Espagne qui attire l'attention de Pline l'Ancien (v. 23 – v. 79) dans *Naturae Historiarum*. Enfin, Dion Cassius (v. 155 – v. 234), dans *Histoire Romaine*, décrit des maisons en terre touchées par une crue du Tibre.

Au 15^{ème} siècle, *De Re Aedificatoria* témoigne de l'intérêt de Leon Battista Alberti (1404-1472) pour les constructions en terre foulée et battue entre deux tables d'ais (banches) qu'il a pu observer en Afrique du Nord et en Espagne. Il note la grande solidité de ces édifices en terre.

De la même manière, Louis Liger (1658 – 1717) évoque les techniques de la bauge, du torchis et du pisé et reconnaît la solidité des murs en pisé, dans son *Oeconomie générale de la campagne, ou Nouvelle maison rustique*.

Au 18^{ème} siècle, Guillaume Marie Delorme (1700 – 1782) fournit un texte de référence sur le pisé, qui sera repris par plusieurs auteurs de ce siècle (*Mémoire pour la construction des murs de terre*). Dans *l'Encyclopédie*, Denis Diderot (1713 – 1784) et Jean le Rond d'Alembert (1717 – 1783) publient un article intitulé « pisay, pisey, pisé » et font référence à des habitats ruraux de la région de Châlons (Saône). *L'art du maçon piseur* est la première forme de traité technique sur ce mode de construction, publiée en 1772 par Georges-Claude Goiffon (1712 – 1776). En 1790, François Cointeraux édite plusieurs *Cahier de l'Ecole d'Architecture Rurale* (figure 1-3). Ses ouvrages seront traduits ou adaptés dans les principales langues européennes et auront un impact jusqu'aux Etats-Unis et l'Australie.

Au 19^{ème} siècle, l'architecte Jean-Baptiste Rondelet (1743 – 1829) édite un *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir* en 1817 et consacre un chapitre entier à la construction en terre.



Figure 1-3 : Première page d'un « Cahier de l'École d'Architecture Rurale » de François Cointeraux de 1790

Dans cette thèse, nous allons nous intéresser aux constructions en pisé. Il s'agit donc maintenant de présenter ce matériau de construction plus en détail.

1.2. LE PISÉ EN PARTICULIER

1.2.1. PRÉSENTATION

La définition la plus usitée du pisé est sans doute celle donnée par l'architecte rural F. Cointeraux dans *Les Cahiers de l'École d'Architecture Rurale* en 1790 (Cointeraux, 1790) :

« Le pisé est un procédé d'après lequel on construit les maisons avec de la terre, sans la soutenir par aucune pièce de bois, et sans la mélanger de paille ni de bourre. Il consiste à battre, lit par lit, entre des planches, à l'épaisseur des murs ordinaires, de la terre préparée à cet effet. Ainsi battue, elle se lie, prend de la consistance et forme un mélange homogène qui peut être élevée à toutes les hauteurs données pour les habitations (...). »

Le pisé est donc une technique de construction de mur en terre crue monolithique par superposition de couches de terres damées dans un coffrage (banches). Les murs obtenus sont porteurs et mesurent en moyenne 50 cm d'épaisseur en Rhône-Alpes. La densité du pisé

traditionnel est comprise entre 1,7 et 1,9 (Pignal, 2005). Les habitations en pisé se présentent généralement sur deux niveaux, mais on peut trouver des constructions plus imposantes comme, par exemple, ce château situé dans la Loire (42) (figure 1-4) construit en pisé vers 1880 ; On peut citer aussi cette immense usine-pension des soieries Girodon située à Saint Siméon de Bressieux dans l'Isère, à quelques kilomètres de St Antoine l'Abbaye, bâtit en 1870. C'est une des plus grandes constructions en pisé d'Europe (figure 1-5).



Figure 1-4 : Château de Chabet dans la Loire (42) (Guibaud, 2005)



Figure 1-5 : Une ancienne usine à Saint Siméon de Bressieux dans l'Isère réhabilitée en logements

La technique de construction en pisé varie suivant les régions (Ministère de la culture et de la communication, 2006; Pignal, 2005) et au fil du temps (Guibaud, 2005). Il y a aujourd'hui deux grands types de pisé : les traditionnels et les modernes à partir des années 1980.

1.2.2. PISE TRADITIONNEL

La pisé traditionnel est fabriqué dans des banches en bois avec une dame manuelle, appelée pisolir ou encore fouloir (figure 1-6), et monté sur un soubassement en maçonnerie de pierres, de briques ou de galets hourdés au mortier de chaux avec une hauteur moyenne de 50 cm (Pignal, 2005). Les soubassements peuvent néanmoins avoir une hauteur variable dépendante de la topologie du terrain, des conditions extérieures (notamment ruissellement éventuel à proximité) et de l'utilisation qui sera faite du bâtiment (figure 1-7) – particulièrement dans le cas d'écuries ou d'étables où les animaux se frottent aux murs, les érodant à leur hauteur.

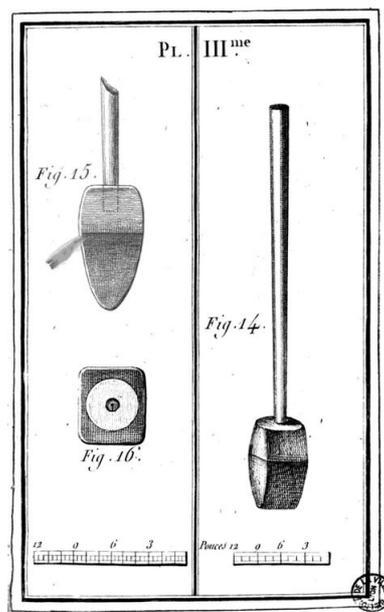


Figure 1-6 : Description d'un pisolir d'après les carnets de F. Cointeraux (Cointeraux, 1790)



Figure 1-7 : Maison en pisé datant de la fin du 19^{ème} siècle avec un soubassement en maçonnerie de pierres

Pour des raisons géographiques et historiques, liées en particulier aux travaux de F. Cointeraux, le pisé du Lyonnais est souvent considéré comme la première référence en la matière tant au niveau des outils que de la mise en œuvre (Pignal, 2005). Les pratiques du Bugey et Auvergnate apparaissent donc comme des variantes régionales.

Le schéma supérieur de la figure 1-8 présente la technique de banchage pratiquée dans le Lyonnais tandis que le schéma inférieur présente la technique du Bugey (Cointeraux, 1790). Cette dernière autorise une mise en œuvre rapide et permet de s'affranchir des trous, dus au passage des tirants mais limite la hauteur de construction et nécessite un matériel lourd, encombrant et donc difficile à transporter.

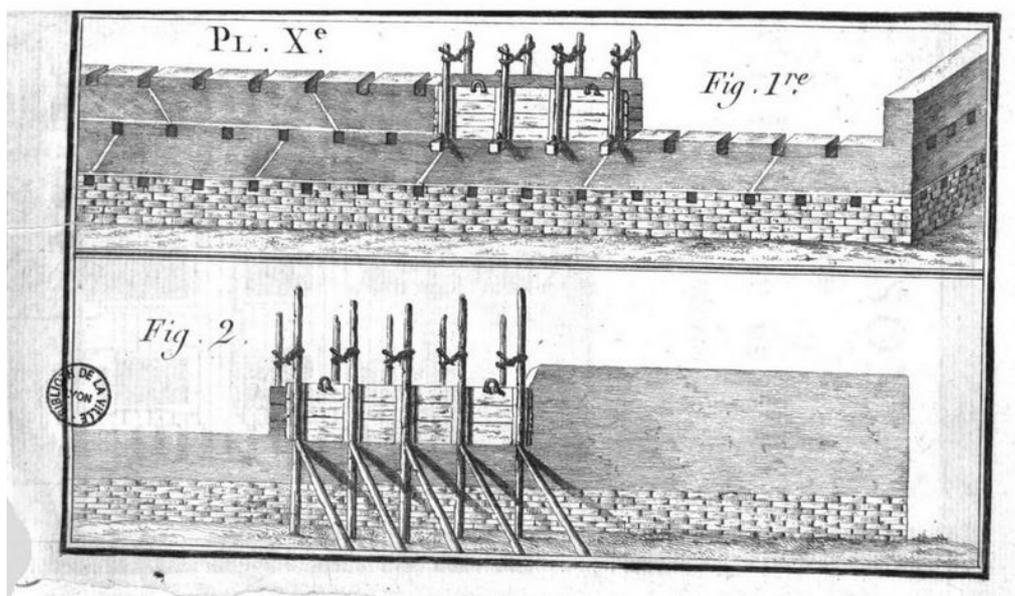


Figure 1-8 : Technique de banchage du pisé dans le Lyonnais (figure supérieure) et dans le Bugey (figure inférieure) d'après les carnets de F. Cointeraux (Cointeraux, 1790)

Dans la technique traditionnelle, des cordons de mortier de chaux peuvent être appliqués en fond de banche et sur les côtés (cordons non traversant) afin de renforcer la ligne de jointure entre banches, zone plus difficile à damer.

Une fois la banchée terminée, il est possible de décoffrer immédiatement et de débiter la banchée voisine car les murs sont montés par assise successives. Afin d'améliorer la cohésion de la terre, l'artisan piseur doit prendre soin de croiser ses coups de piseoir en faisant tourner l'outil d'un quart de tour entre chaque coup, ainsi que de croiser les banches, c'est-à-dire d'adopter un sens de construction opposé d'une assise du mur à l'autre. On peut voir sur la figure 1-9, une même construction avec deux types de soubassements et de joints : un soubassement faible avec des joints obliques et un soubassement élevé avec des joints verticaux.



Figure 1-9 : Technique de jointure à la chaux oblique à gauche (17^{ème} siècle) et verticale à droite (19^{ème} et 20^{ème} siècle) sur une même construction en pisé (Guibaud, 2005)

C'est vers la fin du 18^{ème} siècle que les joints de chaux deviennent systématiques et que le raccord entre banchées tend à s'incliner jusqu'à atteindre environ 45°. Cette méthode, associée au croisement des assises (les raccords de deux assises sont inclinés en sens contraire), limiterait la fissuration du mur. Néanmoins, et comme on l'a vu sur la figure 1-9, l'observation *in situ* montre qu'un même mur peut présenter les deux types de raccords, inclinés ou verticaux, la raison étant certainement la difficulté qu'il y avait à faire des jointures obliques.

Jean-Baptiste Rondelet, dans son *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*, décrivait alors la construction en pisé au 19^{ème} siècle en ces termes (Rondelet, 1817):

« Lorsque les murs en pisé sont bien faits, ils ne forment qu'une seule pièce, et lorsqu'ils sont revêtus à l'extérieur d'un bon enduit, ils peuvent durer des siècles. En 1764, je fus chargé de restaurer un ancien château dans le département de l'Ain. Il était bâti en pisé depuis plus de 150 ans. Les murs avaient acquis une dureté et une consistance égales aux pierres tendres de moyenne qualité, telles que la pierre de St-Leu. On fut obligé, pour agrandir les ouvertures et faire de nouveaux percements, de se servir de marteaux à pointe et à taillant, comme pour la pierre de taille. »

1.2.3. PISE MODERNE

1.2.3.1. Technique

Dans les années 1980, la construction en pisé a connu un renouveau. En effet, les apports de la technique ont permis de moderniser un mode constructif qui n'avait pas évolué depuis des centaines d'années. Par exemple, le fouloir manuel est devenu pneumatique (figure 1-10) et le coffrage est désormais métallique (figure 1-11) – tout cela permettant d'obtenir des densités plus élevées (entre 1,7 et 2,2 t/m³ (CSTB, 2011)).



Figure 1-10 : Un fouloir pneumatique non-modifié (à gauche) ainsi qu'un autre muni d'un morceau de bois carré (à droite). Photo : N. Meunier



Figure 1-11 : Un coffrage moderne en métal sur un chantier en France. Photo : N. Meunier

1.2.3.2. Pisé non-stabilisé

Le choix de la terre est aujourd'hui toujours lié à l'appréciation de l'artisan. Il convient de choisir une terre adéquate, i.e. non-organique. Elle ne doit être ni trop argileuse afin d'améliorer la compaction et d'éviter les fissures de retrait, ni trop sableuse pour obtenir une bonne cohésion. Il n'existe à l'heure actuelle aucune règle précise pour le choix d'une « bonne » terre à pisé, l'artisan la choisissant toujours grâce à son expérience.

D'une manière générale, la teneur en eau de fabrication d'un pisé ne doit être ni trop élevée ni trop faible. Dans le premier cas, on aboutirait à un compactage faible dû à l'incompressibilité de l'eau et dans le deuxième cas, l'énergie de compactage se dissiperait dans le frottement entre grains. Ci-après est retranscrite la méthode utilisée par un artisan, Nicolas Meunier, pour déterminer la teneur en eau de fabrication et la hauteur des lits des murs en pisé qu'il construit (Meunier, 2003) :

Détermination de la teneur de fabrication de manière empirique :

« Sur chantier, il n'est pas possible de perdre du temps à vérifier la teneur en eau par des méthodes fastidieuses de laboratoire.

Avant le début du chantier, de petites éprouvettes sont fabriquées à partir de plusieurs terres sélectionnées. Cela consiste à compacter de la terre dans un petit moule en bois à l'aide d'une massette. Après le séchage complet, le comportement de différentes éprouvettes est analysé. Des observations similaires sont faites après humidification des éprouvettes.

D'autres observations peuvent informer sur la teneur en eau de la terre à bâtir. « C'est la dame qui parle ». Après quelques passages, si le matériau a atteint la densité voulue, le bruit de compactage est clair et net. Si la terre est trop mouillée, un bruit sourd est entendu à la

place d'un bruit sec. D'autre part, la surface de compactage doit rester légèrement poudreuse. »

Détermination de la hauteur de chaque couche du pisé :

« Les artisans essaient de faire le lit le plus haut possible, en fonction de la terre employée, pour économiser le temps de mise en œuvre. Ils déterminent la hauteur optimale du lit en réalisant une banchée d'essai au début du chantier et éprouve sa solidité. »

On voit aujourd'hui très peu de constructions modernes n'utilisant que l'argile comme liant. On peut néanmoins citer un cas de construction récente en pisé non stabilisé en Autriche et visible sur la photo de la figure 1-12.



Figure 1-12 : Bâtiment en pisé non-stabilisé en Autriche. Photo : M. Rauch

1.2.3.3. Pisé stabilisé

La stabilisation consiste à rajouter du ciment ou de la chaux (hydraulique ou aérienne) à la terre avant sa compaction. Cette adjonction de liant a pour objectif de diminuer la sensibilité à l'eau et la résistance à la compression. Cette technique est pratiquée particulièrement dans les pays anglo-saxons comme en Australie où la stabilisation est d'usage courant et pouvant aller de 4 à 12% en masse (Walker et al., 2004).

Néanmoins, les avantages précédemment cités doivent être modulés entre le gain apporté par la stabilisation et l'impact environnemental qu'elle implique. En effet, la production de ciment est responsable de 8% des émissions mondiales de dioxyde de carbone (Pritchett, 2004) et la réutilisation du matériau devient alors compliquée voire impossible (Walker et al., 2004).

1.2.3.4. Pisé préfabriqué

En sus de la méthode moderne, on peut citer la technique du pisé préfabriqué. Nicolas Meunier, artisan piseur, a développé la technique du pisé préfabriqué qui lui permet de le construire en atelier puis de transporter les blocs afin de les monter une fois arrivé sur le chantier. Cette technique permet de s'affranchir des aléas climatiques qui font partie des impondérables du chantier. Cette technique a ensuite été reprise et s'est peu à peu développée.

Sur les trois séries de photos suivantes, on montre du pisé préfabriqué depuis sa fabrication jusqu'à son acheminement sur chantier et sa mise en œuvre (figure 1-13 à figure 1-15).



Figure 1-13 : Préfabrication du pisé en usine en Autriche. Photo : M. Rauch



Figure 1-14 : Transport et mise en œuvre sur chantier d'un pisé préfabriqué. Photo : M. Rauch



Figure 1-15 : Un bâtiment composé de 160 éléments de pisé préfabriqué. Photo : M. Rauch

1.2.4. LE CONFORT DU PISE

Ces dernières années, le pisé a connu un regain d'intérêt dans les pays industrialisés. Les particuliers et les artisans s'attachent à (re)découvrir ce matériau de construction. Le pisé est surtout connu pour son confort d'habitation l'été. A partir des années 1980, des constructions en pisé ont surpris les constructeurs et les habitants par leur confort thermique (Mortensen, 2008). Par la prise de conscience des populations de leurs impacts sur l'environnement et les problèmes liés aux besoins accrus en énergie, le matériau terre est redéveloppé pour ses performances thermiques mais aussi hygrique.

On trouve aujourd'hui de plus en plus de constructions en pisé dans les pays comme les Etats-Unis, le Canada ou l'Australie où, dans certaines régions, elles représentent jusqu'à 20% des bâtiments neufs (Easton, 1996). Il a été remarqué une baisse drastique des consommations d'énergie annuelle sur ces bâtiments, comparativement à des constructions conventionnelles en béton (Paul and Taylor, 2008), mais aussi une amélioration du confort des habitants par la régulation des fluctuations des températures et de l'humidité intérieure grâce aux qualités thermiques et hygroscopiques – que l'on appelle comportement hygrothermique – de la terre dont nous parlerons de manière plus détaillée par la suite (Partie 3 et Annexe A).

Il est connu que la terre crue est un bon régulateur de l'humidité ambiante d'un bâtiment. En plus de limiter la prolifération de moisissures potentiellement néfastes pour la santé, la gestion de l'humidité dans un bâtiment est primordiale du point de vue du confort. Comparativement à la thermique, peu d'études ont porté sur ce sujet, certainement du fait que les règlements et standards de construction actuels ne prennent pas (ou peu) ce

comportement en considération. Sur le sujet de la terre, on peut citer Hall et Allinson (Allinson and Hall, 2011, 2010, 2007; Hall and Allinson, 2010, 2009b, 2009c, 2008; Hall and Djerbib, 2006a, 2006b; Hall, 2007, 2004a, 2004b).

La communauté scientifique commence à démontrer la nécessité de tenir compte du comportement hygrique aussi bien que du comportement thermique d'un bâtiment. En ce sens, Allinson et Hall proposent de calculer un coefficient de stockage d'humidité (Moisture Buffer Value, MBV) qui impacterait sur le confort d'une habitation (Allinson and Hall, 2011). Une thèse est également en cours à l'Université de Bath sur ce sujet (dont un article a déjà été tiré (McGregor et al., 2014)).

Les études actuelles sur le pisé s'attardent particulièrement à des mesures à l'échelle du matériau ou du bâtiment dans son ensemble (avec des capteurs dans les pièces qui le composent) – aucune encore n'a mis en place un système complet permettant de rendre compte et de mesurer les phénomènes ayant lieu au sein du pisé et qui lui confère cette aptitude de régulation de l'ambiance. C'est ce que nous allons nous attacher à accomplir dans cette thèse à travers l'étude d'une habitation neuve en pisé que nous allons présenter.

1.3.SUJET D'ETUDE : SAINT ANTOINE L'ABBAYE

1.3.1. ORIGINE DU PROJET

Dans le courant des années 2000, un groupe de citoyens engagés écologiquement, a décidé de se constituer en association, Ecosite Sud-Grévisaudan sur le secteur de St Marcellin (Isère) avec pour objectifs (<http://chabeaudiere.over-blog.com/>) :

- La pratique écologique (construction et vie quotidienne)
- Le lien social, le partage et l'échange de services entre voisins, l'implication dans la vie locale
- La complémentarité intergénérationnelle
- La mixité sociale
- Les économies de construction

Au cours de l'hiver 2008/2009, ce groupe s'est lancé dans la construction d'un « éco-hameau », de six à dix constructions, sur la commune de St Antoine l'Abbaye (figure 1-16),

Le projet de construction démarre donc en 2009 au lieu-dit *Chabeaudière*, Le Laris, 38160 St Antoine l'Abbaye (Long. : 05 13 32, Lat. : 45 10 29). Le terrain a une superficie totale de 1,7 ha avec, pour commencer, l'installation de cinq à six familles. L'objectif principal de la phase de construction est l'optimisation équitable de l'espace et la mise en commun des équipements et des savoir-faire (figure 1-17).

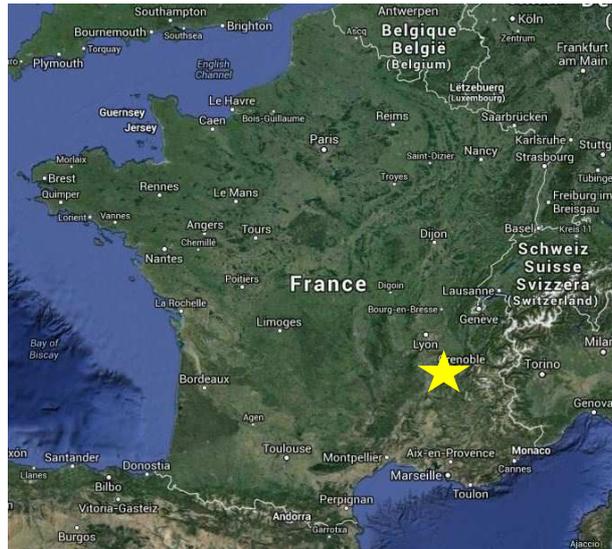


Figure 1-16 : Situation géographique de St Antoine l'Abbaye (Google Maps ©)



Figure 1-17 : Implantation des différentes constructions sur le site de la Chabeaudière à St Antoine l'Abbaye

Sur ce hameau, plusieurs types d'écoconstructions sont réunis : chanvre, bois/paille et une construction en pisé dont les propriétaires habitants sont Cyrille et Karine Lemaître ainsi que leurs enfants.

1.3.2. LA CONSTRUCTION EN PISE DE LA CHABEAUDIÈRE

La construction que nous allons étudier est mixte : on trouve quatre murs en « L » en pisé, et le mur nord ainsi que l'étage sont en bois/paille. Les plans du rez-de-chaussée et de l'étage de la maison étudiée sont donnés sur la figure 1-18.

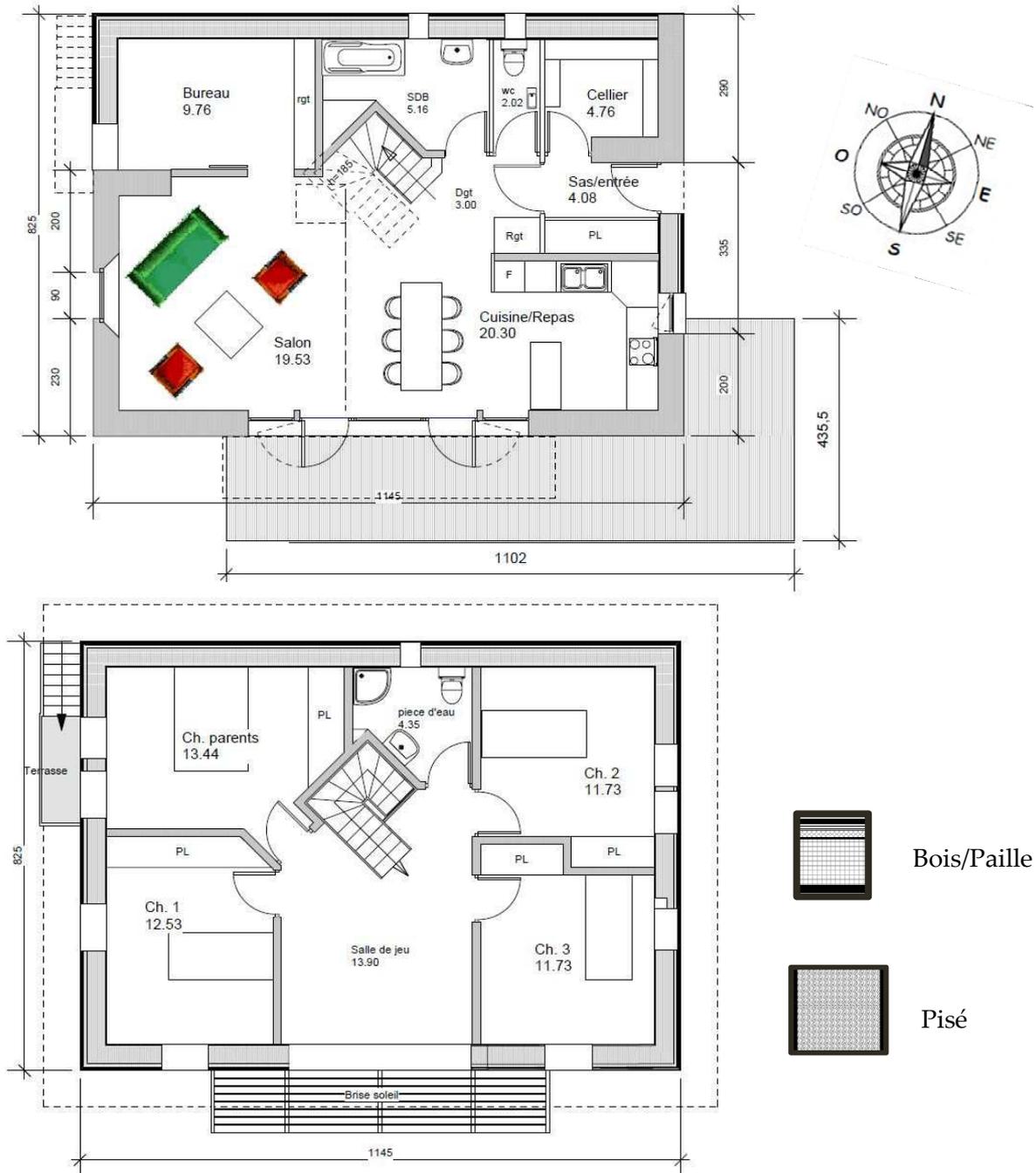


Figure 1-18 : Plan du rez-de-chaussée (en haut) et de l'étage (en bas) de la maison étudiée dans cette thèse à St Antoine l'Abbaye. Jérôme Boucq Architecte

Cette construction en pisé possède deux types de matériaux de construction :

- Pisé : prélevé sur la commune de Roybon à 6 km (à vol d'oiseau) du site de construction (9 km par voie routière). Quatre murs d'angle porteurs forment la partie pisé de cette construction. Deux de ces murs ont un retour vers l'intérieur de la maison. Les angles des murs en pisé sont formés par un triangle de chaux pour des raisons esthétiques (« à l'ancienne ») tout autant que pour des raisons pratiques (renforcement)
- Bois et paille : il s'agit de Douglas produit dans la région Rhône-Alpes et de paille du canton de St Marcellin monté comme présenté sur la figure 1-19. L'isolation du toit est également en paille

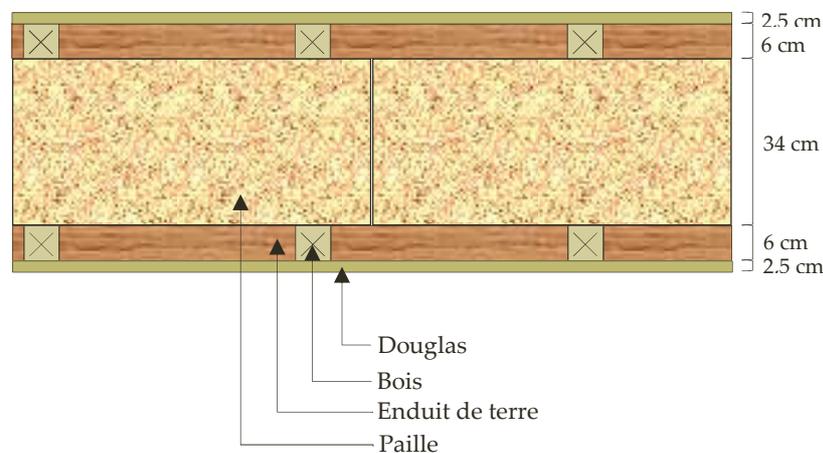


Figure 1-19 : Partie bois/paille de l'habitation étudiée

Une partie de la construction s'est faite en auto-construction et par chantiers associatifs. Le gros œuvre en pisé a été effectué par Nicolas Meunier, déjà cité, artisan piseur expérimenté.

La construction des murs en pisé a débuté au mois de juin 2011 sur un soubassement en béton cyclopéen dépassant de 15 cm de hauteur par rapport au niveau du sol. Sélectionnée par N. Meunier, l'artisan piseur qui a construit cette maison. L'artisan a effectué un criblage de la terre, ne conservant que les granulats inférieurs à 60 mm. Ces murs en pisé font 50 cm d'épaisseur (épaisseur moyenne en Rhône-Alpes) et sont stabilisés à 2,5% en masse de chaux NHL5. Cette chaux n'a pour objectif que de permettre à l'artisan de contrôler la teneur en eau de mise en œuvre de la terre. Cette teneur en eau de fabrication est de 18 à 20% en masse.

Le chauffage à l'intérieur est assuré par un poêle de masse à bois en brique conçu sur mesure par un artisan de la région.



Figure 1-20 : Poêle à bois sur mesure

Quelques étapes de la construction de la maison sont reportées sur les photographies de la figure 1-21.

Le propriétaire, Cyrille Lemaitre, a eu l'amabilité et la gentillesse de nous autoriser à placer des capteurs de teneur en eau, de température et d'humidité relative dans les murs et dans sa maison afin que nous puissions étudier son comportement hygrothermique sur plusieurs années. L'ensemble de cette instrumentation sera décrite dans la partie suivante.



Figure 1-21 : Quelques étapes de l'édification de la maison. En haut à gauche, le chantier avant la construction du mur sud/ouest et en haut à droite, la construction de ce mur. Au milieu à gauche, le mur sud/ouest instrumenté fini. Au milieu à droite, la mise en place des armatures bois et remplissage à la paille. En bas à gauche, la pause du Douglas extérieur. En bas à droite, la perspective d'intégration par l'architecte.

1.4. CONCLUSION SUR LA PARTIE 1

Dans cette partie, nous avons présenté la technique de construction en terre puis, plus particulièrement, celle en pisé traditionnelle et moderne. Ce type de construction est millénaire et répandu sur l'ensemble de la planète.

Cette méthode de construction a connu un déclin en France au cours du dernier siècle mais voit un regain d'intérêt ces dernières années pour ses qualités de confort d'habitation et est de plus en plus étudiée.

Nous avons également présenté l'habitation en pisé qui sera le fil conducteur de cette thèse pour l'étude des caractéristiques physique, hydrique et thermique de ce matériau. C'est à travers celle-ci que nous allons pouvoir développer et installer une chaîne de mesure permettant d'observer en continu le comportement hygrothermique du pisé.

PARTIE 2 : MISE AU POINT D'UNE CHAINE DE MESURE

Afin d'étudier le comportement hygrothermique du pisé de St Antoine l'Abbaye, nous avons utilisé plusieurs types de sondes et capteurs et développé une chaîne de mesure spécifique comprenant des capteurs de teneur en eau, de température et d'humidité relative. Nous avons choisi de placer plusieurs types de capteurs et sondes dans des échantillons puis dans des murs en pisé (échelle 1). Le choix du matériel et sa description, son adaptation pour des mesures dans le pisé ainsi que l'étalonnage des sondes de teneurs en eau sont présentés dans cette partie.

2.1. CENTRALE D'ACQUISITION CR1000 ET AM16/32B

2.1.1. PRESENTATION

Pour collecter les données des capteurs, notre choix s'est porté sur la centrale d'acquisition CR1000 fabriquée par Campbell Scientific pour son prix abordable et sa simplicité d'utilisation. Sa technologie permet de connecter tous les capteurs utilisés pour les expériences de cette thèse. Elle sera couplée à un multiplexeur AM16/32B afin d'augmenter sa capacité d'accueil (figure 2-1).



Figure 2-1 : Centrale d'acquisition CR1000 et multiplexeur AM16/32B

La centrale d'acquisition permet d'accueillir différents capteurs pouvant fonctionner indépendamment en numérique ou en analogique. La centrale possède 16 entrées simples analogiques qui peuvent être converties en 8 entrées différentielles en les accouplant. Elle possède en outre 4 bornes d'excitation pour le fonctionnement de certains capteurs (les ponts par exemple), 3 sorties 12V et une de 5V, ainsi que 4 ports numériques entrées/sorties.

Le multiplexeur permet quant à lui d'accueillir trente-deux capteurs analogiques en entrées simples ou seize en entrées différentielles.

La centrale ainsi que le multiplexeur sont connectés à une batterie 12V pour leur alimentation. Cette dernière peut être connectée directement au réseau 230V en continu dans une utilisation de laboratoire.

2.1.2. PROGRAMMATION

La centrale d'acquisition est fournie avec un méta-logiciel multitâche appelé Loggernet afin de programmer les capteurs. Il existe deux techniques de programmation des capteurs connectés à la centrale d'acquisition :

- Une programmation symbolique via le logiciel ShortCut avec lequel on sélectionne simplement le(s) capteur(s) souhaité(s) à partir d'une liste et les paramètres que l'on veut collecter. Le logiciel fournit ensuite un plan de branchement des câbles.
- Une programmation via le logiciel CRBasic dans un langage propre à Campbell – mais se rapprochant fortement du bien connu BASIC – dans lequel l'utilisateur doit écrire l'ensemble de son programme lui-même.

L'inconvénient de la première méthode est la limitation du nombre de capteurs que l'on peut brancher sur la centrale. En effet, la centrale ne comporte que 6 bornes de masse et 12 de terre. Le logiciel ShortCut considère alors qu'il n'est plus possible de rajouter de sonde lorsque toutes ces bornes sont occupées ; occupation programmée automatiquement.

Il est en réalité possible d'augmenter la capacité de la centrale en bornes de terre et en masse en connectant plusieurs sondes sur une même borne ou en rajoutant des barrettes de connexion type domino. Ainsi, le passage par la deuxième méthode de programmation devient nécessaire puisque limité par la première.

Les capteurs connectés à la centrale ne sont pas alimentés en permanence afin d'économiser la batterie dans une utilisation sur site. La lecture des capteurs se fait donc par scan, c'est-à-dire que l'utilisateur définit dans son programme la fréquence à laquelle il souhaite alimenter les capteurs pour faire un relevé. Il choisit également la fréquence à laquelle il souhaite enregistrer les données. En effet, chacun des scans peut être stocké dans une mémoire vive pour ensuite être moyennés et enregistrés à une fréquence définie. Par exemple, on pourra faire un scan toutes les 15 min, et enregistrer la moyenne de 4 points toutes les heures. Les données sont ensuite enregistrées dans des tables sauvegardées dans la mémoire de la centrale (4 Mo) que l'utilisateur va pouvoir télécharger sur son ordinateur.

2.2. LES CAPTEURS DE TEMPERATURE ET D'HUMIDITE RELATIVE

2.2.1. CS215

2.2.1.1. Présentation

La sonde CS215 (figure 2-2) est également conçue et vendue par Campbell Scientific permettant de mesurer la température et l'humidité relative (Campbell Scientific, 2011a). Ce sont des sondes numériques dont l'élément sensible est fabriqué par Sensirion modèle SHT75 et fonctionnant selon le protocole SDI12. L'embout de la CS215 est composé d'un

bouchon en plastique perforé dans lequel se trouve une membrane en Téflon perméable à la vapeur d'eau.



Figure 2-2 : CS215 et son élément sensible SHT75

2.2.1.2. Principe de mesure

2.2.1.2.1. Température

Le principe de mesure de la température dans ce type d'élément sensible repose sur la dépendance de la tension aux bornes d'un semi-conducteur avec la température selon l'expression (Asch et al., 2010) :

$$v = v_{\phi} + \frac{\mathcal{K}T}{q} \log I - \frac{\mathcal{K}T}{q} m \log T - \frac{\mathcal{K}T}{q} \log C \quad (2.1)$$

où v est la tension aux bornes de la diode [V], v_{ϕ} est la hauteur de bande interdite [V] (soit pour le silicium 1,12V), \mathcal{K} est la constante de Boltzmann ($\approx 1,38.10^{-23}$ J.K⁻¹), T la température [K], q la charge d'un électron ($-1,602.10^{-19}$ C), I le courant [A], m une constante dépendante du semi-conducteur et généralement égale à 3 (Asch et al., 2010) et C une constante indépendante de la température mais dépendante de la géométrie de la jonction P-N et des niveaux de piégeage dans le semi-conducteur.

La gamme d'utilisation de ce capteur en température est -40°C à 123,8°C, donc la gamme de mesure qui sera la nôtre, -15 à 50°C environ, respectera largement ces limites. Dans ce cas, d'après le fabricant, la précision de la sonde sera meilleure que $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (figure 2-3).

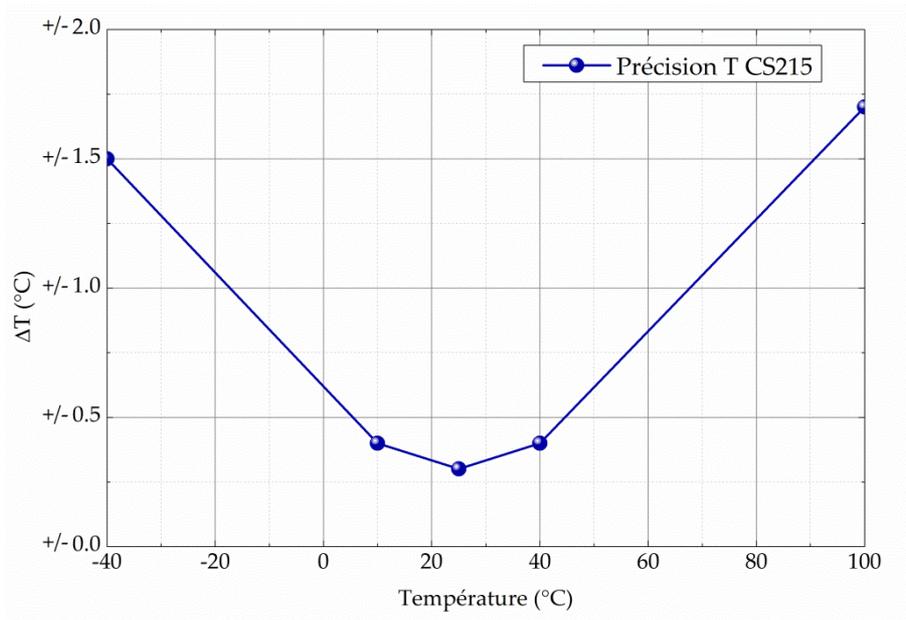


Figure 2-3 : Précision de la sonde CS215 sur la mesure de la température

2.2.1.2.2. Humidité relative

La mesure de l'hygrométrie est capacitive, c'est-à-dire que l'élément sensible est un condensateur dont le diélectrique est constitué d'une substance hygroscopique (polymère) de quelques micromètres d'épaisseur qui absorbe les molécules d'eau contenues dans l'air ambiant (figure 2-4). On observe alors une variation de la constante diélectrique de la couche hygroscopique et, par conséquent, une variation de la capacité du condensateur (Asch et al., 2010).

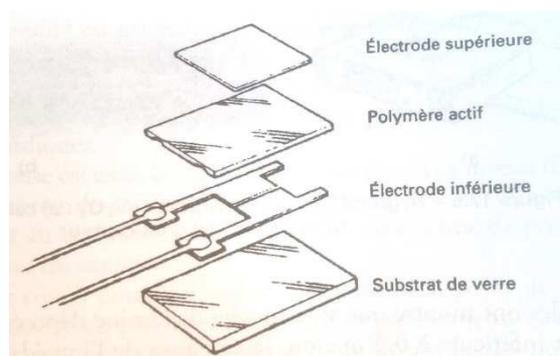


Figure 2-4 : Capteur HR capacitif (Source :(Asch et al., 2010))

Les variations de mesure de l'humidité relative dues à la température (pour les températures significativement différentes de 25°C) sont compensées automatiquement par le logiciel de la centrale au moment de la programmation suivant une relation fournie par Sensirion. Cette relation corrige environ de 0,12%HR/°C à 50%HR.

La précision de la mesure est donnée sur la figure 2-5. D'après le fabricant, elle sera de $\pm 1,8\%$ sur la plage 10-90% d'humidité relative.

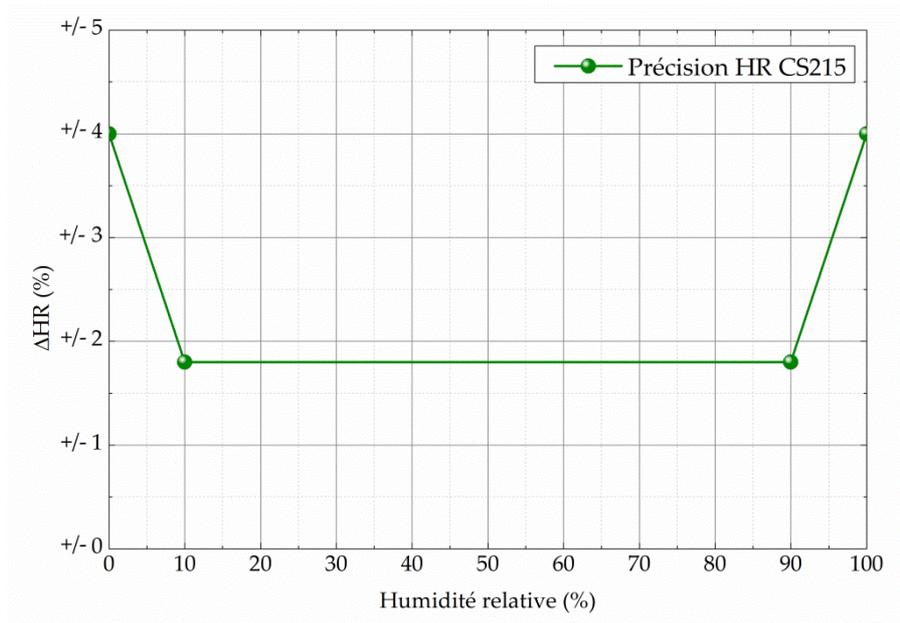


Figure 2-5 : Précision de la sonde CS215 sur la mesure de l'humidité relative

2.2.1.3. Renforcement

Dans l'application qui est la nôtre, les CS215 vont être placées dans un mur en pisé alors qu'elles sont théoriquement prévues pour mesurer la température et l'humidité relative dans l'air. Les sondes destinées à être placées dans le mur ont donc été modifiées pour résister à la compaction. Dans un premier temps, six d'entre elles ont été modifiées par la société Cementys comme montré sur la figure 2-6.



La sonde est en fait simplement renforcée avec un tube de PVC tourné. L'embout original en plastique et la membrane PTFE sont remplacés par un bouchon GoreTex perméable à la vapeur d'eau.

Le prix de cette modification nous a conduit par la suite à modifier nous-mêmes les sondes pour les applications qui ont suivies. S. Cointet, technicien du laboratoire LGCB, a renforcé les sondes en utilisant un tube métallique et de la visserie en laiton. L'étanchéité des pas de vis est assurée par du ruban Téflon. Afin que l'embout soit perméable à la vapeur d'eau, la membrane d'origine a été perforée à l'emporte-pièce pour s'adapter au diamètre d'une grille de protection de robinetterie qui, elle, empêchera la terre de pénétrer dans la sonde (figure 2-7).

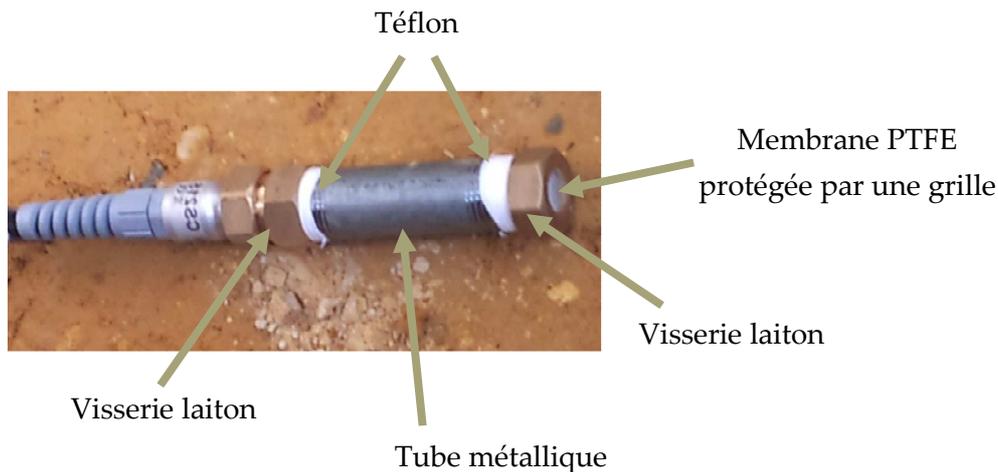


Figure 2-7 : Sonde CS215 modifiée au laboratoire pendant sa mise en place dans un mur en pisé

2.2.1.4. Adressage

La sonde CS215 étant numérique, il est possible d'en brancher plusieurs sur un même port entrée/sortie moyennant un adressage. Il est alors théoriquement possible, sur la CR1000, d'en brancher jusqu'à 40 (10 par bornes). Au passage, on notera qu'au-delà de 12 capteurs, on se trouve dans le cas où l'on doit programmer la centrale manuellement via CRBasic, le logiciel ShortCut n'acceptant pas plus de 12 sondes – pas assez de bornes G –, alors que c'est tout à fait possible techniquement (2.1.2).

L'adressage des sondes s'effectue via le logiciel Device Config Utility de Loggernet, sous l'onglet Terminal. Les adresses s'étendent de 0 à 9 pour chaque sonde sur chaque borne.

La procédure à suivre dans le Terminal est la suivante :

- Taper « Entrée » jusqu'à l'affichage de **CR1000>**
- Taper ensuite : **SDI12**
- Le Terminal renvoi alors : **Enter port Cx 1, 3, 5 or 7**
- Il faut alors rentrer le numéro du port (donc 1, 3, 5 ou 7) sur lequel est branché la CS215 (fil vert)
- Puis le Terminal renvoi : **Entering SDI12 Terminal**
- Pour connaître l'adresse SDI12 actuelle de la sonde, taper **?!**

- Le Terminal renverra alors un chiffre compris entre 0 et 9
- Pour changer cette adresse, taper *xAy!* – Où *x* est le chiffre de l'adresse actuelle et *y* l'adresse que l'on veut lui affecter (donc entre 0 et 9)
- Le Terminal répondra en donnant la nouvelle adresse
- Appuyer sur *Echap* pour sortir du mode adressage SDI12 et le Terminal renvoi finalement **Exit SDI12 Terminal**

A la fin de la programmation, la page du Terminal doit ressembler à la figure 2-8.

```

CR1000>
CR1000> SDI12
Enter port Cx 1, 3, 5 or 7
7
Entering SDI12 Terminal
?!
4
4A8!
8
Exit SDI12 Terminal

```

Figure 2-8 : Terminal pour l'adressage des sondes CS215. Dans cet exemple, on a affecté l'adresse 8 à une sonde connectée sur le port 7 dont l'adresse précédente était 4

2.2.2. HYGROMETRE A MIROIR REFROIDI

Un hygromètre à miroir refroidi a été utilisé pour vérifier le bon fonctionnement des sondes d'humidité relative. Ce type d'appareil est généralement utilisé comme référence pour l'étalonnage des autres humidimètres.

L'hygromètre utilisé est un Edgetech modèle Dewtrack II (figure 2-9). Un tel appareil fonctionne sur le principe de la mesure du point de rosée. On refroidit un poli-miroir, dont on peut à chaque instant mesurer la température, jusqu'à ce qu'il y ait formation d'un dépôt de rosée sur sa surface. Le refroidissement est alors stabilisé de façon à maintenir un état d'équilibre entre l'air et le dépôt de rosée. La température mesurée est alors le point de rosée T_a à partir de laquelle on peut en déduire la tension de vapeur dans l'air humide.



Figure 2-9 : Hygromètre à miroir refroidi Edgetech Dewtrack II (Source : Edgetech)

La figure 2-10 est un schéma de fonctionnement d'un hygromètre à miroir refroidi. La température du miroir est mesurée grâce à une résistance de platine. Le système de refroidissement est un élément de régulation à effet Peltier et la source lumière est un laser.

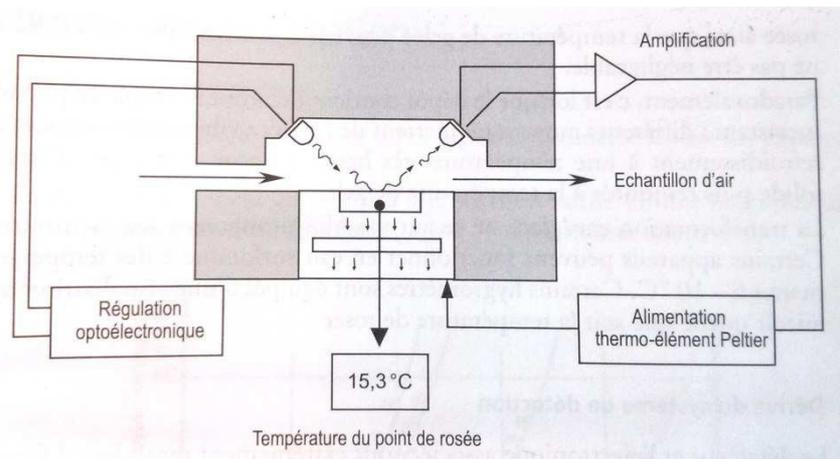


Figure 2-10 : Schéma de principe d'un hygromètre à miroir refroidi (Source : Asch et al., 2010)

La source lumineuse éclaire le miroir métallique sur lequel elle se réfléchit vers un détecteur. La régulation provoque alors le refroidissement du miroir jusqu'à l'apparition de condensation. Lorsqu'apparaît une couche de rosée, c'est alors de la lumière diffusée qui atteint le détecteur qui va ensuite, par l'intermédiaire de la régulation, commander le réchauffement du miroir. La température remontant, la rosée disparaît, et donc la lumière diffusée, ce qui entraîne un nouveau refroidissement du miroir.

Ce capteur offre plusieurs possibilités pour le signal de sortie : 4-20 mA, 0-5Vdc ou 0-10Vdc. Il est connecté à la centrale d'acquisition via la deuxième possibilité, c'est-à-dire 0-5Vdc, où 0V = 0% d'humidité relative et 5V = 100%. La centrale est donc un simple voltmètre dans ce

cas dont l'unité de mesure de base est le mV, il faut donc multiplier le signal reçu par 0,02 pour obtenir une valeur d'humidité relative en « % » dans le tableau de données sauvegardé dans la centrale.

D'après le fabricant, la précision de mesure est de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ sur la mesure du point de rosée et de la température sur une plage de température s'étendant de -20 à 60°C .

2.2.3. CAPTEUR DE TEMPERATURE/HUMIDITE RELATIVE USB

L'avantage des capteurs présentés précédemment est leur précision. En revanche, leur inconvénient majeur réside dans le fait qu'ils soient filaires.

Pour certaines applications, nous avons donc eu recours à des capteurs sans fil. Ces capteurs programmables sont des sondes USB sans fil Lascar Electronics EL-USB-2 (figure 2-11). Equipés d'une pile au lithium, leur autonomie est de plusieurs mois pour une fréquence d'acquisition d'un point par heure. Les données sont enregistrées dans la clef et leur extraction se fait simplement en connectant la sonde à un ordinateur ; ce qui permet également de recharger la pile. Le logiciel fourni, Easylog, calcule automatiquement le point de rosée.



Figure 2-11 : Sonde de température et d'humidité relative USB

Aucune indication n'est donnée par le fabricant concernant le mode de fonctionnement et les éléments sensibles effectuant les mesures.

Ces capteurs sans câble sont moins précis que les filaires. Les caractéristiques fournisseurs donnent une plage de mesures de température de -40 à 80°C ($\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ min. et $\pm 2,25^{\circ}\text{C}$ max.) et de 0 à 100% ($\pm 3\%$ min. $\pm 5\%$ max.) en humidité relative (figure 2-12 et figure 2-13).

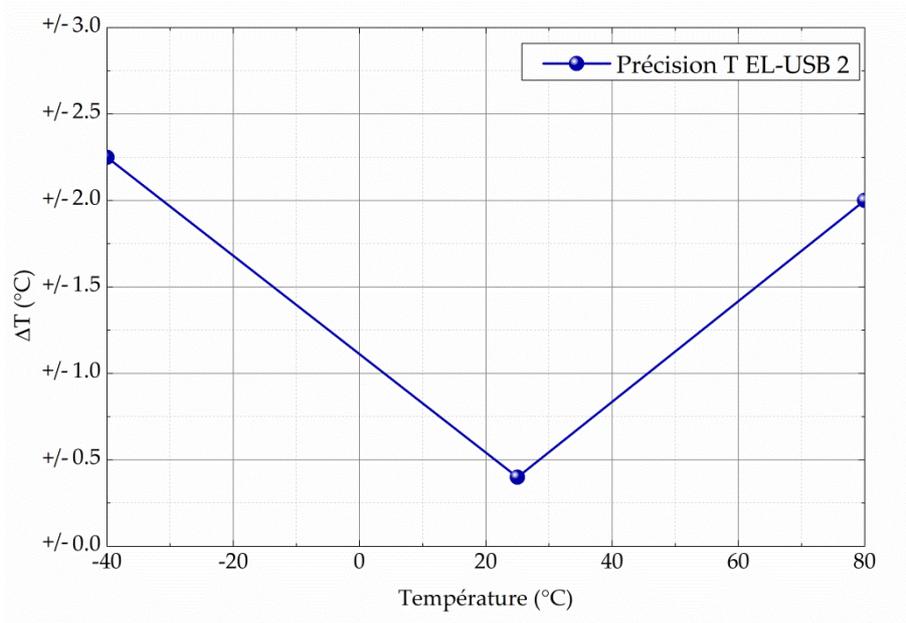


Figure 2-12 : Précision du capteur EL-USB 2 en température

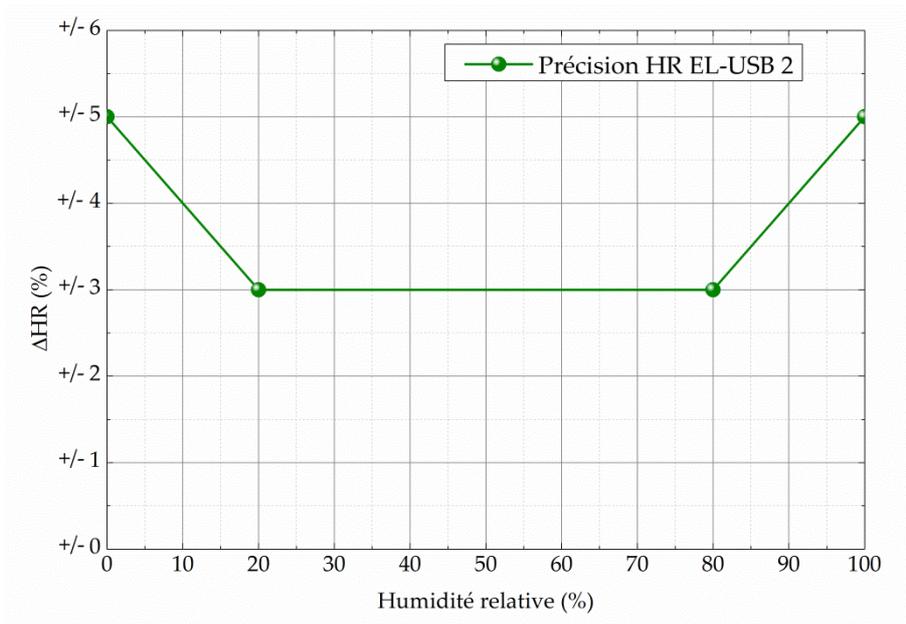


Figure 2-13 : Précision du capteur EL-USB 2 en humidité relative

2.2.4. THERMISTANCE 107

Les sondes 107 sont des capteurs de température de type thermistance. Ce capteur, d'un prix abordable et de faibles dimensions (100 mm de longueur pour 6 mm de diamètre), sera utilisé pour mesurer la température de surface des murs étudiés. L'intérêt de ce capteur réside dans le fait qu'il soit de taille réduite et offre donc une mesure de la température relativement localisée.



Figure 2-14 : Capteur de température 107

L'élément sensible est une thermistance BetaTHERM 100K6A. Le principe de fonctionnement de ce type de capteur est la variation de la résistance électrique avec la température. L'élément est composé d'oxyde en poudre aggloméré, mis en forme par compression et durci par frittage à des températures de l'ordre de 1000°C sous atmosphère contrôlée.

Le lien entre la température et la résistance dans ce type de composant est donné par la relation de Steinhart-Hart :

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C(\ln(R))^3 \quad (2.2)$$

où T est la température [K], R la résistance [Ω] et A , B et C les coefficients de Steinhart-Hart qui caractérisent chaque thermistance à partir de trois températures de référence.

A partir de la relation (2.2) on peut alors déduire la résistance :

$$R = \exp \left[\left[-\frac{A - T^{-1}}{2C} - \sqrt{\frac{(A - T^{-1})^2}{4C^2} + \frac{B^3}{27C^3}} \right]^{\frac{1}{3}} + \left[-\frac{A - T^{-1}}{2C} + \sqrt{\frac{(A - T^{-1})^2}{4C^2} + \frac{B^3}{27C^3}} \right]^{\frac{1}{3}} \right] \quad (2.3)$$

Pour ce modèle de thermistance, BetaTHERM 100K6A, les coefficients Steinhart-Hart sont :

$$\begin{cases} A = 8,271111.10^{-4} K^{-1} \\ B = 2,088020.10^{-4} K^{-1} \\ C = 8,059200.10^{-4} K^{-1} \end{cases}$$

Avec les trois températures de références 0, 25 et 70°C.

D'après le fabricant, la précision générale de la mesure est une combinaison entre la caractéristique d'interchangeabilité de la thermistance, la précision du pont de mesure et l'erreur de linéarisation du polynôme. Dans le pire des cas, l'addition de toutes les erreurs conduit à une précision de $\pm 0,3^\circ\text{C}$ pour une plage de mesure de -25 à 50°C . La composante majeure de cette erreur est la tolérance (interchangeabilité) de la thermistance qui est de $\pm 0,18^\circ\text{C}$ entre -25 et 70°C . Cette erreur d'interchangeabilité est principalement une erreur d'offset qui peut être compensée au moment de la programmation après un étalonnage en un point.

2.3. LES SONDES DE TENEUR EN EAU

On mesure aisément la teneur en eau d'un échantillon de sol en laboratoire par la méthode gravimétrique (pesée du matériau humide, étuvage puis pesée du matériau sec). La chose devient plus ardue quand il s'agit de mesurer la teneur en eau d'un mur en pisé sur lequel il est évidemment impossible d'avoir accès à la perte de masse. Le passage par d'autres paramètres, comme la permittivité diélectrique par exemple, peut alors s'avérer commode.

2.3.1. LIEN ENTRE LA TENEUR EN EAU ET LA PERMITTIVITE DIELECTRIQUE

Afin de mesurer la teneur en eau d'un matériau comme la terre, il est possible de passer par la permittivité diélectrique, aisément mesurable *in situ*, et fortement dépendante de la quantité d'eau présente dans le matériau (Cosenza and Tabbagh, 2004). Ce principe repose sur la grande différence entre la permittivité diélectrique de l'eau – de l'ordre de 80 pour l'eau pure à 20°C (e.g. Lide, 2001) – vis-à-vis de celle de l'air (=1) et de la matrice solide d'un milieu poreux, pouvant être de l'ordre de 14 pour les minéraux argileux (Fabbri et al., 2006). Ainsi, toute modification de la teneur en eau liquide dans un matériau va induire une modification sensible de sa permittivité diélectrique globale, notée ϵ'_r .

Il existe plusieurs méthodes avec différents types de sondes permettant de mesurer la permittivité diélectrique (et donc, par extension, la teneur en eau) d'un sol. On peut citer les méthodes dites TDR (pour Time Domain Reflectometry), capacitive ou encore la mesure d'impédance. Chacune d'elle a fait l'objet d'études approfondies afin de relier la permittivité diélectrique d'un type de sol donné à sa teneur en eau.

Le tableau 2-1 est une liste des équations reliant la permittivité diélectrique d'un sol à sa teneur en eau (Fen-Chong et al., 2004). Dans cette liste, on mettra en avant la relation de Topp qui, dès 1980, a tenté de trouver une équation d'étalonnage universelle pour les mesures en TDR et qui reste aujourd'hui bien souvent utilisée, au moins en première approximation (Noborio, 2001).

Auteur(s)	Type de matériau	Equation
(Topp et al., 1980) TDR (50 MHz)	Sols minéraux avec traces organiques, sables, argiles + eau avec 0,01M CaSO ₄	$\varepsilon = 3,03 + 9,3\theta_l + 146\theta_l^2 - 76,7\theta_l^3$
(Campbell, 1990) Impédance (50 MHz)	Argile et limons (avec densité apparente, densité minérale et porosité proche de la pierre de Caen) + eau	$\varepsilon = 3,27 + 0,48\theta_{l(\%)} - 0,012\theta_{l(\%)}^2 + 0,00037\theta_{l(\%)}^3$
(Gaudu et al., 1993) Capacitif (38 MHz)	Granulats de limons (4mm) + eau	$\varepsilon = 2,8 + 27,4\theta_l$
(Eller and Denoth, 1996) Impédance (32 MHz)	Sols divers + eau	$\varepsilon = 123,667 - 0,333\sqrt{1,371 \cdot 10^5 - 1500\theta_{l(\%)}}$
(Malicky et al., 1996) TDR	Sols divers + eau	$\sqrt{\varepsilon} = 0,819 + 0,168\rho + 0,159\rho^2 + 7,17\theta_l + 1,18\theta_l\rho$
(Fen-Chong et al., 2004) Capacitif (33 MHz)	Pierre de Caen + eau	$\varepsilon = 2,1 + 24,1\theta_l$

Tableau 2-1 : Exemples d'équations reliant la permittivité diélectrique d'un milieu à sa teneur en eau

Ces relations conduisent à des résultats très éparés, comme on peut le voir sur la figure 2-15.

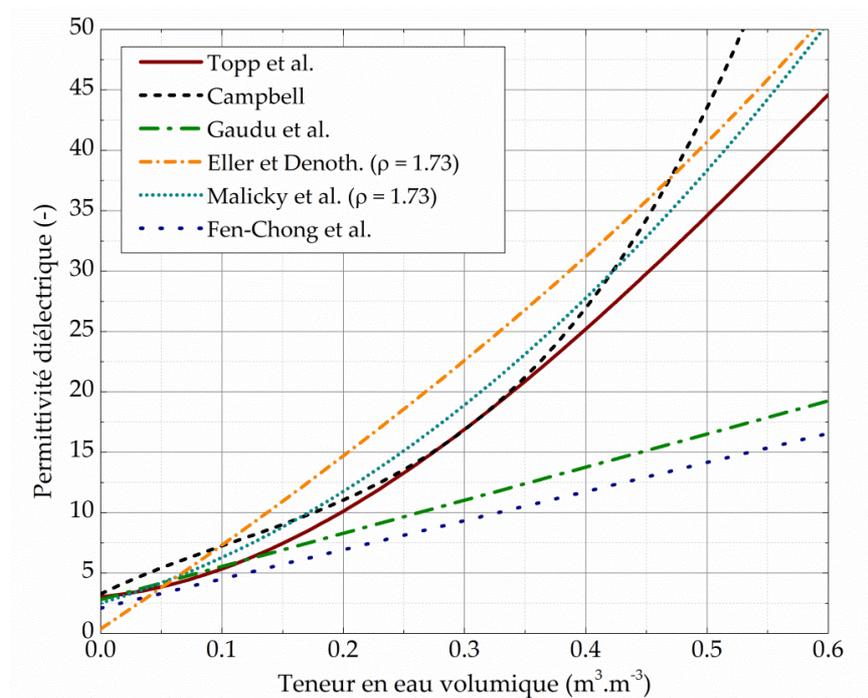


Figure 2-15 : Equations d'étalonnage pour des sondes de teneurs en eau

En outre, comme le montre l'étude de Malicky (Malicky et al., 1996) ainsi que celle de Gong (Gong et al., 2003), ces relations ne sont valables qu'à une température donnée, ce qui pose des problèmes dans le cas de mesure sur site où des fluctuations de températures importantes sont à prévoir. En effet, la permittivité diélectrique du liquide interstitielle d'un matériau, qui conditionne le comportement diélectrique du sol, varie fortement avec la température (Kaatze, 1997), la concentration en ions (Barthel et al., 1992) ou encore les phénomènes d'adsorption d'eau sur la paroi des pores (Barthel et al., 1992). Dès lors, il devient délicat de prédire un comportement dans le cas d'un matériau contenant de l'argile pour lequel la maîtrise et le contrôle de ces paramètres ont été (et sont encore) l'objet de nombreuses études (e.g. Zerwer and Santamarina, 1994 ou encore Ghorbani et al., 2009)).

Sur la figure 2-16, on a représenté la variation de la permittivité diélectrique en fonction de la température pour l'eau pure suivant la relation (Catenaccio et al., 2003) :

$$\epsilon_{eau} = 5321T^{-1} + 233,76 - 0,9297T + 0,1417 \cdot 10^{-2}T^2 - 0,8292 \cdot 10^{-6}T^3 \quad (2.4)$$

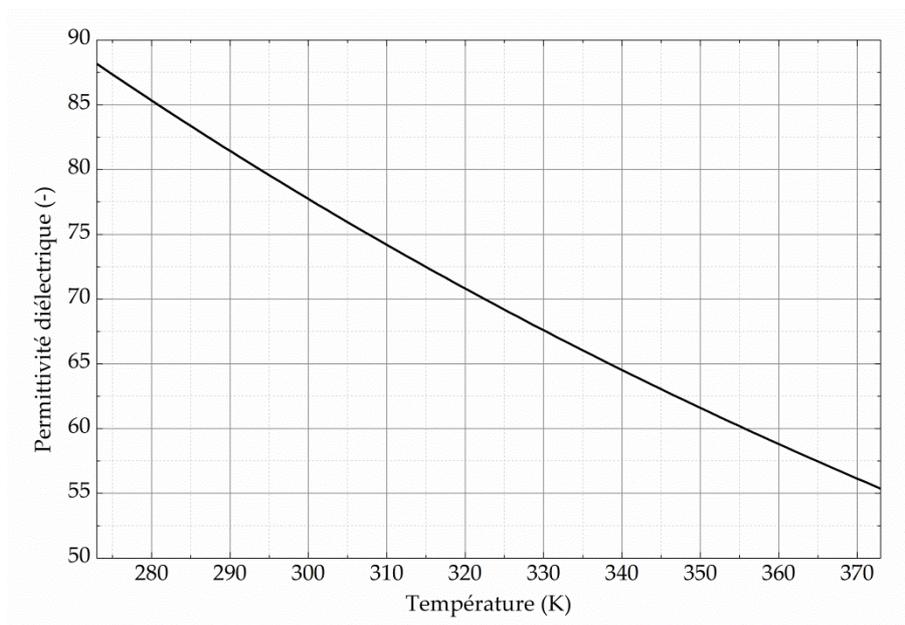


Figure 2-16 : Permittivité diélectrique de l'eau pure en fonction de la température (Catenaccio et al., 2003)

2.3.2. PRINCIPE DU TDR

La quantification sur site de la constante diélectrique des sols est bien souvent réalisée par le biais de sondes TDR – principalement en raison de leur robustesse, de leur prix et de la facilité de mise en œuvre. Cependant, une sonde TDR ne mesure pas directement la constante diélectrique du matériau, mais le temps de parcours τ d'une onde électromagnétique entre deux tiges conductrices (guides d'onde) de longueur L au bout desquelles une partie de l'onde va se réfléchir (figure 2-17).



Figure 2-17 : Principe de fonctionnement d'une sonde TDR

Le principe de la mesure en TDR est la propagation d'une onde dans un milieu absorbant. La solution de l'équation de Maxwell pour le champ électrique E dans une direction z est :

$$E = E_0 e^{-i(\omega t - k^* z)} \quad (2.5)$$

où ω est la fréquence angulaire et k^* le nombre d'onde (complexe).

$$k^* = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\varepsilon_r^*} \quad (2.6)$$

où c_0 est la vitesse de la lumière dans le vide ($2.9979 \cdot 10^8$ m.s⁻¹) et ε_r^* la permittivité diélectrique complexe du milieu.

Si on note :

$$k^* = k' + i k'' \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' + i \varepsilon_r'' \quad (2.8)$$

On peut alors écrire :

$$\sqrt{\varepsilon_r^*} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\sqrt{\left(\sqrt{(\varepsilon_r')^2 + (\varepsilon_r'')^2} + \varepsilon_r' \right)} + i \sqrt{\left(\sqrt{(\varepsilon_r')^2 + (\varepsilon_r'')^2} - \varepsilon_r' \right)} \right) \quad (2.9)$$

D'où les parties réelle et imaginaire du nombre d'onde k^* :

$$k' = \frac{\omega}{\sqrt{2}c_0} \sqrt{\sqrt{(\varepsilon_r')^2 + (\varepsilon_r'')^2} + \varepsilon_r'} \quad (2.10)$$

$$k'' = \frac{\omega}{\sqrt{2}c_0} \sqrt{\sqrt{(\varepsilon_r')^2 + (\varepsilon_r'')^2} - \varepsilon_r'} \quad (2.11)$$

Le champ électrique E peut alors se réécrire :

$$E = E_0 \exp(-i(\omega t - k'z - i k''z)) = E_0 \exp(-k''z) \exp(-i(\omega t - k'z)) \quad (2.12)$$

$$E = E_0 e^{\left(-\frac{\omega z}{\sqrt{2}c_0} \sqrt{\sqrt{(\varepsilon_r')^2 + (\varepsilon_r'')^2} - \varepsilon_r'}\right)} e^{-i\omega \left(t - \frac{z}{\sqrt{2}c_0} \sqrt{\sqrt{(\varepsilon_r')^2 + (\varepsilon_r'')^2} + \varepsilon_r'}\right)} \quad (2.13)$$

$$E = A(z) e^{-i\omega \left(t - \frac{z}{c_f}\right)} \quad (2.14)$$

où $A(z)$ est l'amplitude de l'onde et c_f la vitesse de l'onde dans un matériau non absorbant. Le temps de traversée de l'onde au travers du matériau d'épaisseur Δz est la plus petite valeur de t , notée Δt , permettant d'annuler la partie imaginaire de E , soit :

$$\Delta t = \frac{\Delta z}{c_f} = \frac{\Delta z}{\sqrt{2}c_0} \sqrt{\sqrt{(\varepsilon_r')^2 + (\varepsilon_r'')^2} + \varepsilon_r'} \quad (2.15)$$

$$\Rightarrow 2 \left(\frac{c_0 \Delta t}{\Delta z}\right)^2 = \sqrt{(\varepsilon_r')^2 + (\varepsilon_r'')^2} + \varepsilon_r' \quad (2.16)$$

Ce qui permet d'écrire la partie réelle de la permittivité diélectrique sous la forme:

$$\varepsilon_r' = \left(\frac{c_0 \Delta t}{\Delta z}\right)^2 - \left(\frac{\Delta z}{2\Delta t c_0}\right)^2 (\varepsilon_r'')^2 \quad (2.17)$$

Si, pour un réflectomètre avec des tiges de longueur L sur lesquelles on mesure l'aller-retour, on pose :

$$\Delta z = 2L \quad (2.18)$$

Et si on néglige les pertes dues à la relaxation diélectrique (très petites devant t):

$$\varepsilon_r'' = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (2.19)$$

On trouve alors :

$$\varepsilon'_r = \left(\frac{c_0 \Delta t}{2L}\right)^2 - \left(\frac{L}{c_0 \Delta t}\right)^2 \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}\right)^2 \quad (2.20)$$

où c_0 est la célérité de la lumière ($= 2,9979.10^8 \text{ m.s}^{-1}$) dans le vide, L la longueur des guides d'onde, σ est la conductivité électrique du milieu, ω la pulsation de l'onde et ε_0 la permittivité diélectrique du vide ($= 8,85.10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$).

Pour les sols non-ferromagnétiques et non argileux le second membre de l'équation (2.20) est négligeable, ce qui permet d'avoir une relation directe entre la constante diélectrique et le temps de parcours. En revanche, dans le cas d'un matériau comme le pisé, pouvant contenir jusqu'à 20% d'argile en masse (Minke, 2000), l'influence de la conductivité électrique du milieu peut devenir non négligeable, notamment pour les fortes teneurs en eau (Gong et al., 2003). Dans ce cas, le temps de parcours de l'onde ne donne plus accès à la constante diélectrique, mais une grandeur physique apparente appelée « permittivité apparente », ε'_a (Bittelli et al., 2008), qui est fonction de la conductivité électrique du milieu et de la pulsation du signal, les deux étant fortement dépendant de la saturation. Ce point pose un problème majeur compte tenu du fait que la plupart des sondes TDR ne permettent pas la mesure simultanée du temps de parcours et de la conductivité électrique du milieu.

2.3.3. CS616

La CS616, fabriquée par Campbell Scientific, est une sonde qui fonctionne sur le principe du TDR – même si d'un point de vue technologique, on ne peut pas strictement la qualifier de sonde TDR car elle fonctionne dans le domaine fréquentiel où les fréquences en jeu sont très différentes. Elle est très largement utilisée dans l'étude des sols en raison de sa simplicité d'utilisation et de son faible coût (O'Brien and Oberbauer, 2001). Cette sonde a également déjà été utilisée par O. Grossein dans sa thèse (Grossein, 2009) pour mesurer l'évolution de la teneur en eau d'un mur en terre crue soumis à des remontées capillaires dans le Khorezm (Ouzbékistan).

Il s'agit d'un oscillateur (dit Transmission Line Oscillator) conçu par Campbell (Campbell and Anderson, 1998). Elle est composée d'un bloc en résine de dimensions 85x63x18 mm et de deux tiges en acier inoxydable qui sont des guides d'ondes de 300 mm de longueur, 3,2 mm de diamètre et espacées de 32 mm sur lesquelles une onde électromagnétique est envoyée (figure 2-18).



Figure 2-18 : La sonde CS616

Ce sont des sondes dont le fonctionnement est analogique. D'après le fabricant, la précision de la sonde est de $\pm 2,5\%$ pour des sols de conductivité électrique inférieure à $\sigma = 0,5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ et une densité sèche de 1,55. L'erreur est inférieure à 0,1% (Campbell Scientific, 2011b).

La CS616 mesure le nombre de réflexions par seconde sur ses tiges et la fréquence est asservie au temps de propagation aller-retour de l'onde sur les tiges. Ce temps de propagation est divisé par un facteur d'échelle afin que la centrale d'acquisition puisse enregistrer les données. Le temps de parcours mesuré de l'onde est donc (Campbell and Anderson, 1998) :

$$\tau = \frac{1}{2} \left(\frac{\tau_m}{S_f} - 2t_d \right) \quad (2.21)$$

où, S_f (= 1024) est le facteur d'échelle, τ_m est le temps de parcours de l'onde renvoyé par la sonde [μs] et t_d est un delay time (= $5,5 \cdot 10^{-9}$ s).

En outre, la CS616 ne permet pas d'avoir accès à la conductivité électrique du matériau ni à la pulsation de l'onde mais uniquement à τ_m . Ainsi, comme l'ont déjà souligné Bittelli (Bittelli et al., 2008) et Černý (Černý, 2009) et mentionné un peu plus haut, ce n'est pas directement la permittivité diélectrique qui est estimée, mais une permittivité diélectrique apparente égale à :

$$\varepsilon'_a = \left(\left(\frac{\tau_m}{S_f} - 2t_d \right) \frac{c_0}{4L} \right)^2 \quad (2.22)$$

où L correspond à la longueur effective des tiges, estimée à 0,26 m d'après l'étude de Kelleners (Kelleners et al., 2005) sur ces sondes.

On notera que, d'après la notice de la sonde (Campbell Scientific, 2011b), une différence sensible entre ε'_a et ε'_r apparaît pour des valeurs de conductivité σ supérieures à $0,5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$.

2.3.4. CS650

La CS650 fonctionne sur le même principe de réflectométrie et est physiquement identique à la CS616. Elle est en revanche plus chère. C'est une sonde qui renvoie un signal numérique et fonctionnant selon le protocole SDI12, ce qui permet, moyennant un adressage rigoureux (présenté précédemment figure 2-8), de brancher plusieurs de ces sondes sur le même port d'une centrale d'acquisition comme la CS215.

Il existe également la sonde CS655 chez le même fabricant, mais la CS650 a été préférée car :

- Les tiges de la CS650 sont plus longues que celles de la CS655 (originellement prévue pour les sols durs dans lesquels il est difficile d'enfoncer les tiges), elle mesure donc sur un plus gros volume que la CS655 qui, elle, mesure plus localement
- La CS650 est plus précise que la CS655 dans la mesure de la permittivité diélectrique ($\pm 2\% + 0,6$ dans la gamme 1 à 40 contre $\pm 3\% + 0,8$ dans la même gamme pour la CS655)

La CS650 détermine la conductivité électrique en mesurant l'atténuation du signal entre l'aller et le retour (de 0 à 3 dS.m⁻¹ avec une précision de $\pm 5\% + 0,05$ dS.m⁻¹). Elle mesure en outre la pulsation du signal, la température et corrige automatiquement le temps de parcours mesuré. On a donc accès à la « vraie » permittivité diélectrique et non à une permittivité apparente dans laquelle la conductivité électrique serait négligée.

2.4. ETALONNAGE DES SONDES DE TENEUR EN EAU

Etant donné l'importance de l'étalonnage de ces sondes dans cette thèse, il a été préféré de les présenter dans une partie qui lui est propre. Le principe d'étalonnage de base constructeur est présenté dans un premier temps, suivi de la méthode d'étalonnage que nous avons effectué au laboratoire.

2.4.1. ETALONNAGES CONSTRUCTEUR

2.4.1.1. CS650

Campbell Scientific propose, pour la sonde CS650, une équation d'étalonnage par défaut pour obtenir la teneur en eau en fonction de la permittivité diélectrique mesurée par la sonde. Cette équation d'étalonnage est la relation de Topp pour des sols génériques contenant des minéraux, déjà évoquée (Topp et al., 1980) :

$$\theta_{ITopp} = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \varepsilon_r' - 5,5 \cdot 10^{-4} \varepsilon_r'^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \varepsilon_r'^3 \quad (2.23)$$

Cette relation « universelle » a été établie pour des températures comprises entre 10 et 36°C et des sols de densités 1,14 à 1,44.

Comme nous l'avons remarqué précédemment, s'il est reconnu que cette relation fonctionne très bien en première approximation (Noborio, 2001), elle présente le défaut de ne pas prendre en considération la température au moment de la mesure.

Les variations de la permittivité diélectrique de l'eau dans un matériau en fonction de la température dépendent fortement des caractéristiques intrinsèques du matériau telles que la densité, la porosité ou encore la permittivité diélectrique de la matrice solide.

Pour cette sonde, le constructeur propose tout de même une relation pour corriger l'effet de la température, mais uniquement pour les sols de type sables quartziques (Campbell Scientific, 2012) :

$$\theta_{lcorr} = \theta_{ITopp} - 0,0044T\theta_{ITopp}^3 + 0,0014T\theta_{ITopp}^2 + 0,0029T\theta_{ITopp} - 0,0002T + 2,4\theta_{ITopp}^3 - 1,6\theta_{ITopp}^2 + 0,32\theta_{ITopp} - 0,046 \quad (2.24)$$

où θ_{lcorr} est la teneur en eau volumique corrigée [$m^3.m^{-3}$], θ_{ITopp} est la teneur en eau volumique mesurée par la sonde via la relation de Topp [$m^3.m^{-3}$] et T la température [°C].

Sur la figure 2-19, on a représenté la teneur en eau en fonction de la permittivité diélectrique et de la température en combinant les équations par défaut de la CS650 de calcul de la teneur en eau et de correction en température (équations (2.23) et (2.24)).

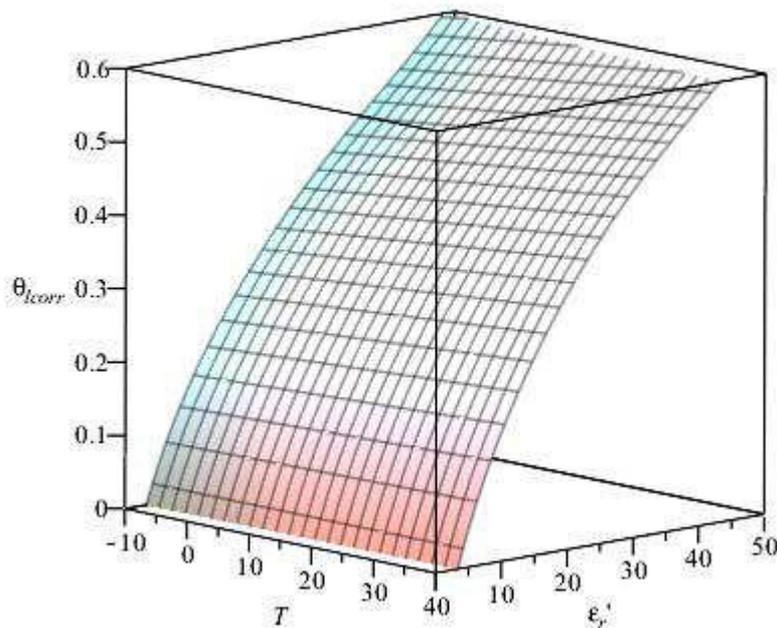


Figure 2-19 : Teneur en eau volumique calculée par défaut par la sonde CS650 en fonction de la température (-10-40°C) et de la permittivité diélectrique

Sur cette figure 2-19 on peut voir que la correction en température n'a que très peu d'effet sur la valeur de la permittivité diélectrique – et par conséquent sur la teneur en eau volumique corrigée – bien que la température ait une influence pourtant sensible sur cette permittivité diélectrique (figure 2-16). La relation (2.24) ne semble donc pas suffisamment puissante pour corriger des variations de températures importantes, comme on pourrait les trouver sur un mur en pisé en conditions climatiques réelles.

2.4.1.2. CS616

A l'instar de la CS650, Campbell Scientific propose un étalonnage par défaut. Comme la CS616 ne renvoie que le temps de parcours de l'onde mesuré sur la tige τ_m , l'étalonnage de la teneur en eau se fait donc en fonction de ce paramètre. Le temps de parcours dans l'air est de 14 μ s et de 42 μ s dans l'eau.

Trois relations sont proposées pour déterminer la teneur en eau volumique dans trois types de sols, mais dont la constitution exacte n'est pas connue (Campbell Scientific, 2011b) :

- Sol limoneux 1 à faible conductivité électrique à saturation, 0,4 dS.m⁻¹, et densité 1,4 :

$$\theta_{l1} = -0,0663 - 0,0063\tau_m + 0,0007\tau_m^2 \quad (2.25)$$

- Sol limoneux 2 à faible conductivité électrique à saturation, 0,4 dS.m⁻¹, et densité 1,6 :

$$\theta_{l2} = 0,095 - 0,0211\tau_m + 0,0010\tau_m^2 \quad (2.26)$$

- Sol limoneux 3 haute conductivité électrique à saturation, 0,75 dS.m⁻¹, et densité 1,6 :

$$\theta_{l3} = -0,0180 - 0,0070\tau_m + 0,0006\tau_m^2 \quad (2.27)$$

Pour cette sonde également, le fabricant fournit une équation de correction en température déduite de tests de son laboratoire sur une plage de 10 à 40°C. Cette correction ramène le signal à la température de référence 20°C pour obtenir un temps de parcours corrigé τ_{corr} telle que :

$$\tau_{corr} = \tau_m + (20 - T)(0,526 - 0,052\tau_m + 0,00136\tau_m^2) \quad (2.28)$$

La CS616 ne mesurant pas directement la permittivité diélectrique, cette grandeur doit être calculée par l'application de l'équation (2.22). Cette permittivité diélectrique apparente se

calculé en fonction du temps de parcours corrigé en température par l'équation (2.28). Le graphe (a) de la figure 2-20 représente la permittivité diélectrique apparente en fonction de la température et du temps de parcours de l'onde mesuré par la sonde.

Sur ce graphe (a), on peut voir que, contrairement à la CS650, la correction en température a un effet notable sur la valeur de la permittivité diélectrique et donc sur le calcul de la teneur en eau, comme on peut le remarquer ensuite sur les courbes (b), (c) et (d) qui représentent les équations d'étalonnage (2.25), (2.26) et (2.27), proposées par défaut par Campbell Scientific, corrigées en température.

Néanmoins, ces équations d'étalonnage par défaut ont été établies pour des sols dont les caractéristiques correspondent peu à une terre à pisé, particulièrement en ce qui concerne la densité.

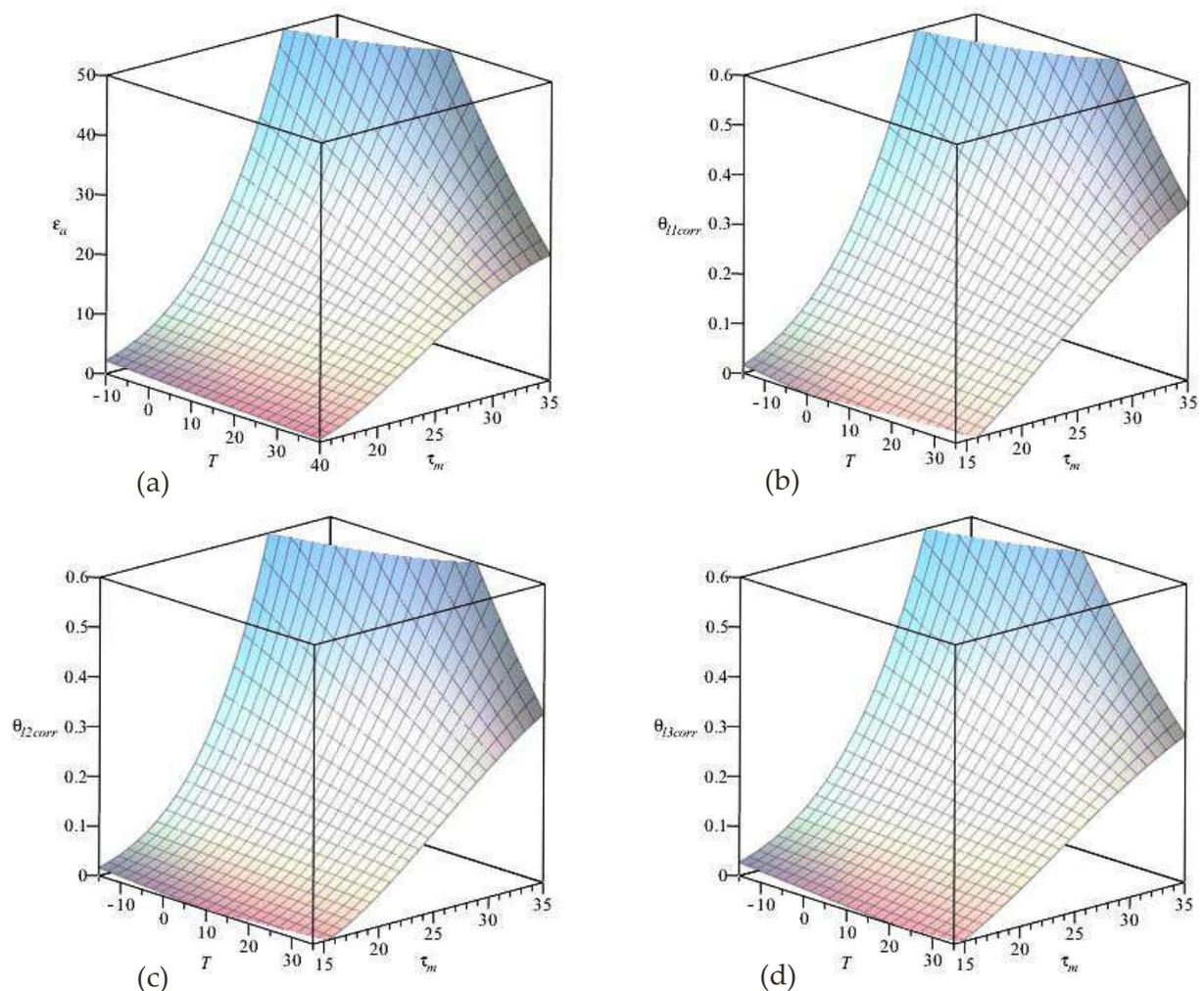


Figure 2-20 : Permittivité diélectrique apparente en fonction du temps de parcours de l'onde mesuré par la sonde et de la correction en température par défaut (a) et les trois équations d'étalonnages proposées par Campbell Scientific en fonction du temps de parcours de l'onde mesuré par la sonde et de la correction en température (b), (c) et (d)

2.4.1.3. Conclusion sur l'étalonnage par défaut

Dans le cas de la CS650, on a pu voir que la correction en température proposée par le constructeur n'était pas satisfaisante dans le sens où elle avait une influence minime sur la mesure de la permittivité diélectrique.

Dans le cas de la CS616, si la correction en température a effectivement une influence significative sur le traitement du signal, les équations proposées ne correspondent pas à un matériau dense comme le pisé qui contient de l'argile.

En conséquence, l'utilisation de l'étalonnage brut proposé par le fabricant ne saurait être satisfaisante pour l'application qui est la nôtre.

2.4.2. METHODE PAR RELATION BILINEAIRE

2.4.2.1. Fabrication des échantillons

La première partie de l'étalonnage consiste à reproduire un échantillon de taille réduite et donc aisément transportable pour être pesé, mais étant représentatif de la relation teneur en eau/constante diélectrique d'un mur en pisé. Or, pour un matériau donné, cette dernière dépend fortement du volume et de la géométrie du réseau poreux (e.g. Zakri et al., 1998). Dans le cas du pisé, le volume de pore peut être contrôlé via la densité sèche, tandis que, pour une même densité, la géométrie du réseau poreux sera impactée par le mode de compactage et la teneur en eau lors du compactage (Mesbah et al. 1999).

Ainsi, afin d'étalonner les sondes, nous les avons insérées lors de la fabrication dans respectivement deux blocs en terre compactés de dimension 45x15x9 cm et de densité sèche 1,73. Les blocs ont été fabriqués à la dame pneumatique, par le même maçon ayant fabriqué la maison de St Antoine l'Abbaye d'où provient la terre, et avec une teneur en eau massique (ϑ_l) la plus proche possible, à savoir $\vartheta_l = 20,1\%$ pour le bloc contenant la CS616 et $\vartheta_l = 19,6\%$ pour le bloc contenant la CS650.

Lors de la fabrication des blocs, on ne maîtrise que le rapport entre la masse d'eau et la masse de terre sèche utilisée (i.e. teneur en eau massique). Cependant, la constante diélectrique dépend de la proportion volumique des phases en présence (e.g. Zakri et al., 1998), et donc de la teneur en eau volumique ($\theta_l = \text{volume d'eau} / \text{volume du bloc}$). Ainsi, dans la suite, la fraction (massique ou volumique) à laquelle on se réfère sera précisée. Le lien entre les deux est :

$$\theta_l = d_s \vartheta_l \quad (2.29)$$

avec d_s la densité sèche de la terre. Ainsi, considérant une densité sèche de 1,73, la teneur en eau volumique initiale est respectivement égale à 34,8% pour le bloc contenant la CS616 et 33,9% pour le bloc contenant la CS650.

2.4.2.2. Etalonnage des sondes

Nous avons alors opté pour l'approche proposée par Fabbri qui consiste à poser que la permittivité diélectrique (ε'_r mesurée par la CS650 et ε'_a calculée suivant (2.22) pour la CS616) peut s'exprimer sous forme d'une relation bilinéaire entre la teneur en eau volumique et la température (Fabbri et al., 2006) :

$$\varepsilon'_r = AT\theta_l + BT + C\theta_l + D ; \text{ pour la CS650} \quad (2.30)$$

$$\varepsilon'_a = A'T\theta_l + B'T + C'\theta_l + D' ; \text{ pour la CS616} \quad (2.31)$$

où A, B, C, D et A', B', C', D' sont les coefficients d'étalonnage respectivement de la CS650 et de la CS616. On notera que l'applicabilité de cette relation a déjà été vérifiée pour des cycles de gels/dégels sur des matériaux argileux (Fabbri et al., 2009)

L'intérêt majeur de cette relation est de permettre un étalonnage simple et rapide n'utilisant que quatre paramètres au lieu de douze comme le préconise le fabricant (quatre pour la relation permittivité diélectrique-teneur en eau (2.23) puis huit pour la correction en température (2.24)). En effet, les coefficients d'étalonnage sont directement accessibles via la mesure de l'évolution de la permittivité avec la température pour trois teneurs en eau fixées.

Afin d'étalonner ces deux sondes, les blocs, pour trois teneurs en eau volumique connues (0%, 7.1% et 13.9% pour la CS650 et 0%, 9.8% et 14.8% pour la CS616), sont enveloppés dans un film plastique pour éviter le séchage (figure 2-21) et placés dans une étuve à température contrôlée et fixe jusqu'à stabilisation du signal des sondes. L'homogénéité de la température est vérifiée en comparant la température de l'étuve et celle du bloc contenant la CS650 (qui renvoie la température). Nous utilisons ici trois teneurs en eau, bien que seulement deux soient en réalité nécessaires avec cette méthode, afin d'estimer l'erreur sur les coefficients.



Figure 2-21 : Etalonnage des sondes CS616 et CS650. Le bloc de gauche est nu tandis que le bloc de droite est emballé dans un film plastique

Les résultats sont reportés dans les deux tableaux suivants :

θ_l (m ³ .m ⁻³)	T (°C)	ε'_r (-)
0	13.5	2.6
	50	3.1
0.071	20	7.2
	50	9.5
0.139	20	11.6
	50	15.3

Tableau 2-2 : Variation de la permittivité diélectrique ε'_r avec la température T à trois teneurs en eau θ_l pour la CS650

θ_l (m ³ .m ⁻³)	T (°C)	ε'_a (-)
0	13.5	2.6
	50	3.1
0.098	20	10.7
	50	14.5
0.148	20	14.2
	50	20.7

Tableau 2-3 : Variation de la permittivité apparente ε'_a avec la température T à trois teneurs en eau θ_l pour la CS616

Les coefficients d'étalonnage résultant de ces mesures sont donc :

- Pour la CS650 :

$$\left\{ \begin{array}{l} A = 0,84 \pm 0,07 \\ B = 0,014 \pm 0,001 \\ C = 47,07 \pm 1,79 \\ D = 2,41 \pm 0,01 \end{array} \right.$$

- Pour la CS616 :

$$\left\{ \begin{array}{l} A' = 1,38 \pm 0,18 \\ B' = 0,014 \pm 0,001 \\ C' = 51,06 \pm 4,69 \\ D' = 2,40 \pm 0,01 \end{array} \right.$$

2.4.2.3. Vérification de l'étalonnage

La précision de la procédure d'étalonnage par relation bilinéaire est évaluée sur un test de séchage de deux blocs contenant l'un une sonde CS650 et l'autre une CS616. Ces deux blocs ont les mêmes dimensions et la même densité que ceux utilisés pour l'étalonnage.

Immédiatement après leur fabrication, les blocs sont pesés et emballés dans un film plastique afin d'homogénéiser leurs teneurs en eau sur tout leur volume. Les sondes sont ensuite connectées à la centrale d'acquisition et un point est enregistré toutes les quinze minutes. Une fois le signal renvoyé par les sondes stabilisées (i.e. teneur en eau homogène dans tout le volume), les blocs sont pesés pour déterminer leurs teneurs en eau et placés à sécher dans une pièce à température régulée à 20°C. Ils sont ensuite emballés à nouveau dans un film plastique étanche jusqu'à homogénéisation de la teneur en eau dans tout le volume. Cette opération est répétée jusqu'à ce que la variation de masse durant le séchage devienne négligeable. Les blocs sont finalement séchés à l'étuve à 50°C jusqu'à atteindre l'état de référence $\theta_l = 0$. Le séchage de chacun des deux blocs est effectué simultanément et dans les mêmes conditions. Durant tout le séchage, les teneurs en eau sont contrôlées par des pesées et le signal renvoyé par les sondes à partir duquel on recalcule la teneur en eau via $\theta_{BL650} = (\varepsilon'_r - BT - D)/(AT + C)$ pour la CS650 et $\theta_{BL616} = (\varepsilon'_a - B'T - D')/(A'T + C')$ pour la CS616. Les comparaisons entre ces deux valeurs pour les deux blocs sont données sur la figure 2-22.

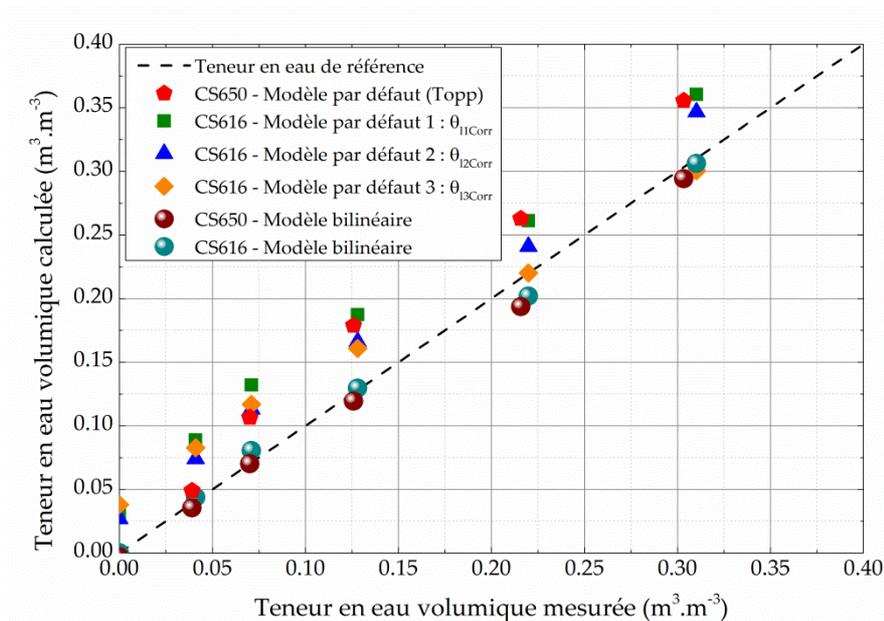


Figure 2-22 : Teneurs en eau volumique obtenue par pesée dans les blocs comparées à l'étalonnage par défaut et au modèle bilinéaire

On observe ainsi une différence moyenne inférieure à 0,7% entre la teneur en eau mesurée par pesée et celle obtenue par la relation bilinéaire pour chacune des deux sondes. On peut voir également que la relation de Topp surévalue en moyenne de 4% la teneur en eau réelle

et la relation par défaut de la CS616 qui s'approcherait au mieux de notre matériaux (θ_{l3corr}) présente quant à elle un écart moyen de 2,6% par rapport à la référence.

Les tracés en trois dimensions des équations d'étalonnage déterminées pour la CS650 et la CS616 sont donnés sur la figure 2-23. On voit sur ces figures que la correction en température est plus importante qu'avec les équations par défaut qu'on a pu voir dans la partie 2.4.1.

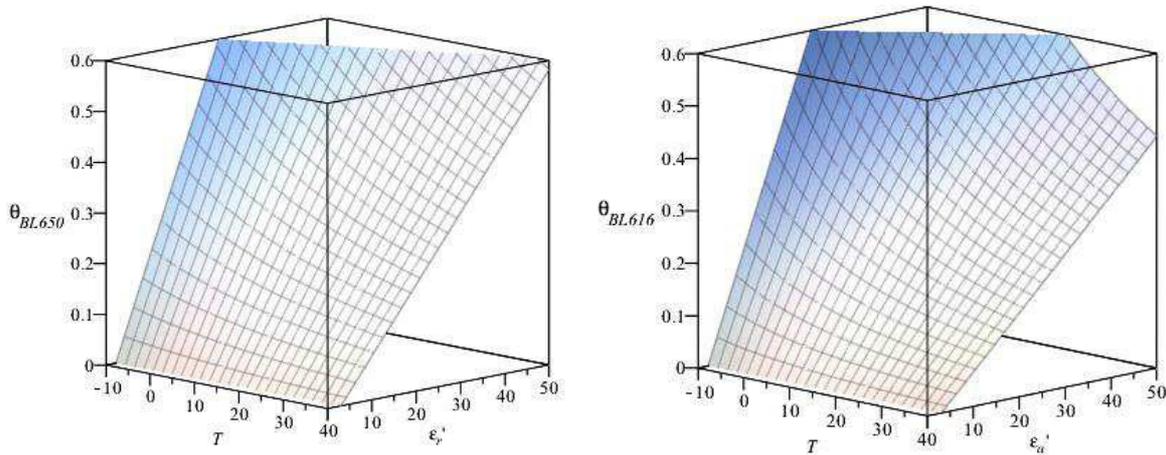


Figure 2-23 : Etalonnages de la sonde CS650 (à gauche) et de la CS616 (à droite) à partir du modèle bilinéaire sur la plage de température -10 à 40°C et une permittivité diélectrique de 0 à 50

2.5. CONCLUSION SUR LA PARTIE 2

Dans cette partie, les capteurs utilisés pour la mesure du comportement hygrothermique du pisé ont été présentés. Leurs modes de fonctionnement ainsi que les relations nécessaires afférentes ont également été exposés.

Les capteurs de températures et d'humidité relative (CS215), pour être implantés dans un mur en pisé durant sa fabrication, ont dû être modifiés pour résister à la compaction. Cette modification a tout d'abord été effectuée par une entreprise extérieure, mais le prix nous a poussé à développer notre propre modèle.

On a pu voir que pour les sondes de teneurs en eau, l'étalonnage constructeur n'était pas satisfaisant. Les sondes CS616 et CS650 ont donc été étalonnés suivant un modèle de calibration bilinéaire fiable et robuste, et qui ne comporte que quatre paramètres alors que l'étalonnage « classique » en requiert douze.

L'ensemble de ces capteurs et sondes vont donc être placés dans des murs en pisé, durant leur fabrication, afin d'étudier leur comportement hygrothermique.

PARTIE 3 : COUPLAGE
HYGROTHERMIQUE ET
CARACTERISATION DU PISE

Le pisé peut être considéré comme un matériau poreux, c'est-à-dire composé d'une matrice solide et d'un réseau poreux, tous deux continus (Hall and Allinson, 2009a; Laurent, 1986). De fait, il est possible d'étudier son comportement et les différents transferts – hydrique et thermique – s'y déroulant à travers la physique des milieux poreux. La physique de ces transferts est donnée en annexe A de la présente thèse.

On appelle alors « couplage hygrothermique » ou « transferts hygrothermiques » l'ensemble des interactions entre les transferts de masses (eau liquide et vapeur) et de chaleur ayant lieu au sein d'un matériau poreux. Appliqués à un matériau comme le pisé, les transferts hygrothermiques peuvent être représentés comme sur la figure 3-1. Il existe plusieurs modèles de couplage intégrant plus ou moins de paramètres et qui sont plus ou moins exploitables d'un point de vue pratique.

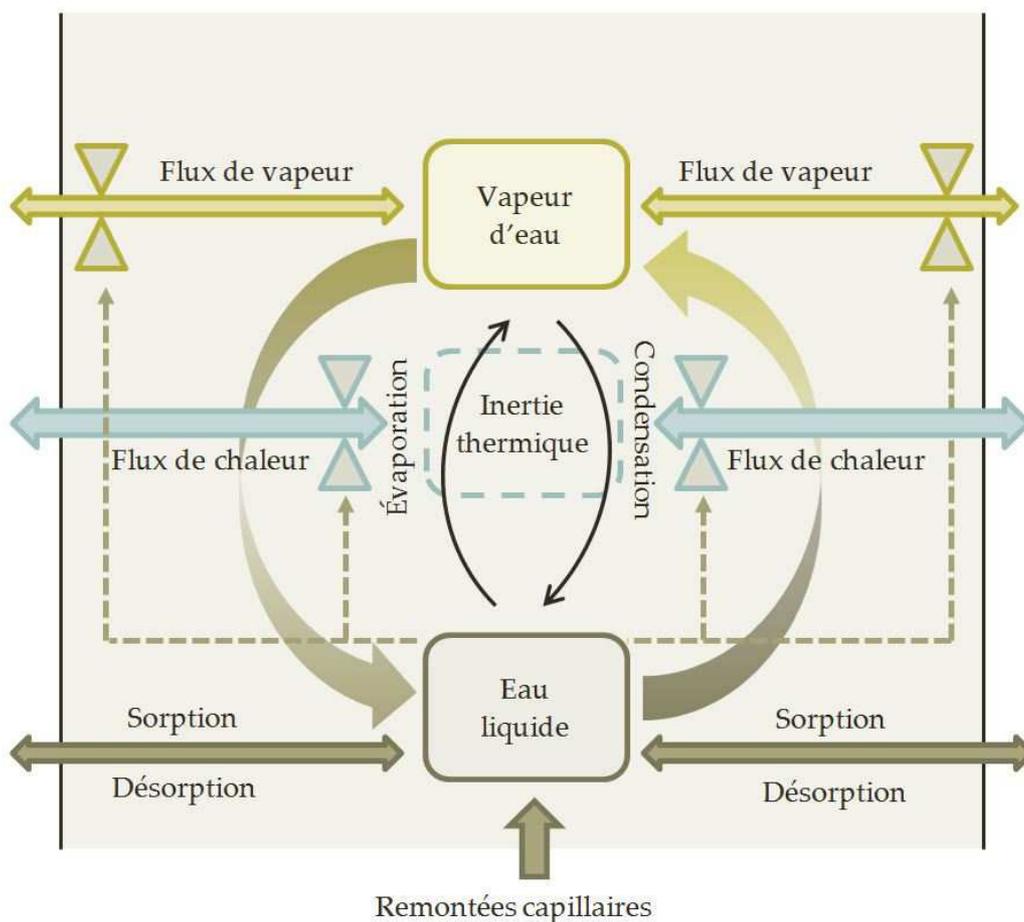


Figure 3-1 : Le couplage hygrothermique dans le pisé

Dans cette partie, nous présenterons deux modèles de couplage hygrothermique : le premier, le modèle de Philip et De Vries, est probablement le plus connu et l'un des plus complets. Le second, le modèle de Künzle, est l'un des plus utilisés en pratique et implémenté dans le logiciel de modélisation de transferts hygrothermiques Wufi utilisé par plusieurs auteurs et organismes (Casey et al., 2013; CSTB, 2009; Hall and Allinson, 2010; Lohonyai and Korany, 2013; Pasztory et al., 2012).

Dans cette partie, nous nous attacherons également à caractériser le pisé des points de vue physique, hydrique et thermique. Les paramètres ainsi mesurés permettent alors d'alimenter les modèles de couplage.

Le pisé principalement étudié dans cette thèse provient de la construction de l'habitation neuve en pisé à St Antoine l'Abbaye. Les échantillons utilisés pour effectuer tous les essais présentés dans cette partie proviennent du mur « test » monté par le maçon avant la construction de la maison. Ce mur est composé de cinq lits de pisés de $18 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ d'épaisseur. D'après le maçon, les trois derniers lits (donc les trois supérieurs) de ce mur test sont parfaitement représentatifs de la construction dans son ensemble. Ce pisé est donc, comme la maison, stabilisé avec 2,5% de chaux NHL 5 en masse. Les échantillons pour la caractérisation du pisé ont été prélevés dans le pénultième lit monté par le maçon, c'est-à-dire le deuxième depuis le haut. Ce deuxième lit a été choisi car le premier, qui pourrait être le plus représentatif, n'étant pas protégé des intempéries, était lixivié au moment où les prélèvements ont été effectués. En plus de ces échantillons, de la terre brute a été récupérée sur le site d'extraction (figure 3-2), nous permettant de fabriquer des Blocs de Terre Comprimée (BTC).



Figure 3-2 : Extraction de la terre de St Antoine l'Abbaye pour la préparation des échantillons à tester

Dans cette partie, et lorsque tous les essais auront été effectués, le pisé de St Antoine l'Abbaye sera comparé à deux autres terres à pisé qui ont été également étudiées au cours de cette thèse : un pisé provenant d'une construction ancienne (plus de 100 ans) du centre de Lyon, effondrée au cours de l'hiver 2011/2012, ainsi qu'un autre provenant de d'Isère, de Montseveroux plus précisément, extrait lors de la réfection d'une grange ancienne (plus de 100 ans également).



Figure 3-3 : Les trois pisés étudiés au cours de cette thèse

3.1. MODELES DE COUPLAGE HYGROTHERMIQUE

3.1.1. MODELE DE PHILIP ET DE VRIES

Le modèle de Philip et De Vries (Philip and De Vries, 1957) est probablement le modèle de couplage hygrothermique le plus connu. Il est fondé sur l'identification du milieu poreux à un milieu continu fictif équivalent pour lequel les variables et paramètres physiques sont identifiés à des valeurs moyennes sur un certain volume du milieu poreux. Les hypothèses qu'il implique sont :

- La phase solide est homogène et indéformable
- Toutes les phases sont en équilibre thermique
- La phase gazeuse est à pression constante dans tout le milieu poreux
- L'existence en tout point d'un équilibre permanent mais local entre le liquide et sa vapeur (validité de la loi de Kelvin)
- Les gaz sont assimilés à des gaz parfaits
- L'hystérésis entre l'adsorption et la désorption n'est pas pris en compte

Ce modèle est en fait un assemblage des lois de Darcy, de Fick et de Fourier et des équations d'état du fluide intégrés dans les lois de conservations de masses et de chaleur (cf. annexe A). Il se présente donc sous la forme de deux équations : une pour les transferts de masses, une

autre pour les transferts de chaleur, le tout en 1D suivant z. Dans sa thèse, Obeid les reporte comme suit (Obeid, 1998) :

- Diffusion de l'humidité :

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} + \underbrace{\alpha \frac{\partial \theta_l}{\partial t} + \beta \frac{\partial T}{\partial t}}_{(a)} = \text{div}(D_{\theta} \text{grad} \theta_l + D_T \text{grad} T) - \frac{\partial K}{\partial z} \quad (3.1)$$

- Diffusion de la chaleur :

$$\begin{aligned} (\rho C_p)^* \frac{\partial T}{\partial t} &= \text{div}(\lambda^* \text{grad} T) \\ &+ \underbrace{\rho_l L_v \text{div}(D_{\theta_v} \text{grad} \theta_l + D_{T_v} \text{grad} T - \alpha \frac{\partial \theta_l}{\partial t} - \beta \frac{\partial T}{\partial t})}_{(b)} \\ &+ \underbrace{\rho_l C_v (D_{\theta_v} \text{grad} \theta_l + D_{T_v} \text{grad} T)}_{(c)} \text{grad} T \\ &+ \underbrace{\rho_l C_l (D_{\theta_l} \text{grad} \theta_l + D_{T_l} \text{grad} T - K)}_{(d)} \text{grad} T \end{aligned} \quad (3.2)$$

où θ_l est la teneur en eau liquide [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$], T la température [K], D_{θ} le coefficient de diffusion hydrique [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], D_T le coefficient de diffusivité thermique [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], $(\rho C_p)^*$ la chaleur volumique équivalente du milieu [$\text{W} \cdot \text{m} \cdot \text{K}^{-2} \cdot \text{s}^2$], λ^* la conductivité thermique équivalente [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], ρ_l la masse volumique du liquide [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], L_v la chaleur latente de vaporisation de l'eau [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$], D_{θ_v} le coefficient de diffusion dû à un gradient de l'humidité en phase vapeur [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], D_{T_v} le coefficient de diffusion dû à un gradient de température en phase vapeur [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], C_v la concentration de la phase vapeur dans le mélange gazeux [-], C_l la chaleur volumique à pression constante du liquide [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$], D_{θ_l} le coefficient de diffusion dû à un gradient de l'humidité en phase liquide [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], D_{T_l} le coefficient de diffusion dû à un gradient de température en phase liquide [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], K la conductivité hydraulique [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] et, enfin, α et β sont des coefficients qui traduisent l'accumulation de phase vapeur.

Les termes avec un astérisque, $(\rho C)^*$ et λ^* , sont des paramètres dits « équivalents » c'est-à-dire transposés du niveau microscopique au niveau macroscopique considéré comme homogène (cf. annexe A).

Dans ces équations :

- Le terme (a) représente le taux d'accumulation en masse de vapeur exprimé en équivalent liquide condensé (θ_l^*) tel que $\theta_l^* = \frac{\rho_v}{\rho_l} \theta_v = \frac{\rho_v}{\rho_l} (\eta - \theta_l)$

$$\text{Ce qui implique : } \frac{\partial(\rho_l \theta_l^*)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial \theta_l}{\partial t} + \beta \frac{\partial T}{\partial t}$$

- Le terme (b) représente l'énergie fournie par le processus de changement de phase

- Le terme (c) représente l'énergie convective de la vapeur
- Le terme (d) représente l'énergie convective propre à la phase liquide

Les coefficients de ces équations sont :

$K = \frac{kg}{\nu_l}$	$\Psi = -\frac{P_c}{\rho_l g}$
$D_{\theta_l} = K \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \theta_l} \right)_T$	$D_{T_l} = K \left(\frac{\partial \Psi}{\partial T} \right)_{\theta_l}$
$D_{\theta_v} = \gamma D_{v_0} \left(\frac{M_v}{\mathcal{R}T} \right)^2 \frac{g P_{vs}}{\rho_l} e^{\left(\frac{M_v g \Psi}{\mathcal{R}T} \right)} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \theta_l} \right)_T$	$D_{T_v} = \gamma D_{v_0} \frac{P}{P - P_v} \left(\frac{M_v}{\mathcal{R}T} \right)^2 \frac{P_{vs}}{\rho_l} e^{\left(\frac{M_v g \Psi}{\mathcal{R}T} \right)} \frac{L_v}{T}$ $+ \gamma D_{v_0} \frac{P}{P - P_v} \left(\frac{M_v}{\mathcal{R}T} \right)^2 \frac{g P_{vs}}{\rho_l} \left(\left(\frac{\partial \Psi}{\partial T} \right)_{\theta_l} - \frac{\Psi}{T} \right) \varphi$
$D_\theta = D_{\theta_l} + D_{\theta_v}$	$D_T = D_{T_l} + D_{T_v}$
$\alpha = \frac{(\eta - \theta_l) D_{\theta_v}}{\gamma D_{v_0} \frac{P}{P - P_v}} - \frac{P_v M_v}{\rho_l \mathcal{R}T}$	$\beta = \frac{(\eta - \theta_l) D_{T_v}}{\gamma D_{v_0} \frac{P}{P - P_v}} - \frac{(\eta - \theta_l) P_v}{\rho_l \mathcal{R}T}$

où k est la perméabilité intrinsèque [m^2], g l'accélération de la pesanteur ($= 9,81 \text{ m.s}^{-2}$), ν_l la viscosité cinématique du liquide [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$], Ψ la succion [Pa], P_c la pression capillaire [Pa], γ une fonction de pondération traduisant l'influence de la présence de la phase liquide ainsi que de la tortuosité de la phase solide, D_{v_0} le coefficient de diffusion de la vapeur dans l'air [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$], M_v la masse molaire de la vapeur d'eau ($= 18,01.10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}$), \mathcal{R} la constante des gaz parfaits ($= 8,3144621 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$), P_{vs} la pression de vapeur saturante [Pa], P la pression [Pa] et η la porosité [-].

Dans sa thèse, Larbi (Larbi, 1990), cité par Obeid (Obeid, 1998), a montré que le terme (a) n'a d'influence qu'aux faibles taux de saturations et, plus précisément, dans le domaine d'adsorption. En dehors de ce domaine, les termes d'accumulation en phase vapeur de l'équation du bilan de masse peuvent être négligés.

De plus, les transferts par convection sont également bien souvent négligés devant les transferts par conduction pour les faibles variations de températures.

Il existe d'autres modèles basés sur les mêmes hypothèses que le modèle simplifié de Philip et De Vries. On peut citer notamment celui de Luikov (Luikov, 1966), dans lequel on retrouve la même équation que le modèle de Philip et De Vries pour les transferts de chaleur mais un terme de « taux de changement de phase » a été ajouté dans l'équation de diffusion de l'humidité.

3.1.2. MODELE DE KÜNZEL

Le modèle de Philip et De Vries est difficile à exploiter d'un point de vue pratique car il requiert un grand nombre de paramètres difficilement accessible expérimentalement. On peut alors utiliser des modèles couplés comme celui développé par Künzel par exemple (Künzel, 1995).

Dans son étude, Künzel a développé un jeu d'équations de couplage « simplifiées » – en comparaison de celles de Philip et De Vries. Il a ensuite développé un algorithme de résolution numérique implémenté dans le logiciel de modélisation Wufi. Pour arriver à cela, Künzel pose bien entendu une série d'hypothèses simplificatrices.

La première hypothèse qu'il pose est, lui aussi, de considérer l'air comme un gaz parfait et l'eau comme étant pure.

Il débute alors son raisonnement à partir des équations de bilan d'humidité et de chaleur où, dans la première, il pose comme hypothèse que la présence de source d'humidité dans le matériau étant très rare, ce terme source peut être négligé (Holm and Künzel, 2000). De plus, il suppose que la diffusion surfacique du liquide a lieu simultanément à la diffusion capillaire et ignore la dépendance en température de la pression de liquide (le gradient de température n'a donc aucune incidence sur le transport par capillarité). Cette dernière hypothèse peut conduire à des erreurs non négligeables lorsqu'interviennent de forts gradients de température.

Dans la seconde équation bilan – celles des transferts de chaleur –, il ne considère que les transferts de chaleur par conduction et néglige les variations de la conductivité thermique en fonction de la température. Dans le terme des transferts par changements de phase, l'hypothèse posée par Künzel est de considérer constante la masse de vapeur. Les conséquences de cette simplification peuvent être ignorées lorsque le gradient d'humidité relative est le principal moteur du processus d'évaporation. Cependant, celui-ci se produit également suite à un accroissement de la pression de vapeur saturante lié à une augmentation significative de la température. Dans de telles conditions, cette approximation conduit à des erreurs non négligeables.

Künzel utilise également un formalisme différent pour la teneur en eau. Il ne raisonne pas en termes de teneur en eau massique ϑ_l [kg.kg⁻¹] ou volumique θ_l [m³.m⁻³] mais en teneur en eau dite spécifique w telle que :

$$w = \rho\vartheta_l \quad (3.3)$$

où w est la masse d'eau présente dans un volume de solide s'exprimant donc en [kg.m⁻³].

Les deux équations de transferts sont donc :

- Transferts de chaleur :

$$\frac{dH}{dT} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad}T) + L_v \text{div}(\delta_p \text{grad}(\varphi P_{vs})) \quad (3.4)$$

- Transferts d'humidité :

$$\frac{dw}{d\varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \text{div}(D_\varphi \text{grad}\varphi + \delta_p \text{grad}(\varphi P_{vs})) \quad (3.5)$$

dans lesquelles H est l'enthalpie [J], T la température [K], λ la conductivité thermique [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$], L_v la chaleur latente de vaporisation de l'eau [J.kg^{-1}], δ_p est la perméabilité à la vapeur [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$], φ est l'humidité relative [-], P_{vs} la pression de vapeur saturante [Pa], w la teneur en eau spécifique [kg.m^{-3}] et D_φ le coefficient de diffusion liquide [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$].

Le coefficient de diffusion liquide D_φ est défini par :

$$D_\varphi = D_w \frac{dw}{d\varphi} = P_{vs} \delta_a \left(\frac{1}{\mu_f(\varphi)} - \frac{1}{\mu} \right) \quad (3.6)$$

où D_w est le coefficient de transport de la phase liquide [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$], $dw/d\varphi$ est la dérivée de la courbe de sorption, P_{vs} la pression de vapeur saturante [Pa], δ_a la perméabilité à la vapeur de l'air ($= 2.10^{-10} \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$), μ le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur [-] et $\mu_f(\varphi)$ un coefficient de résistance à la diffusion de vapeur dit « fictif » pour les hautes humidités relatives [-].

Le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur μ représente la capacité d'un matériau à s'opposer à la diffusion de vapeur et caractérise donc la perméabilité à la vapeur de ce matériau. C'est une grandeur relative résultant du rapport entre la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air δ_a et celle du matériau δ_p . Plus μ est élevé, plus la résistance est élevée (infini pour un métal et valant donc 1 par convention dans l'air).

Le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur fictif $\mu_f(\varphi)$ est une fonction de l'humidité relative et s'exprime pour les hautes valeurs d'humidité relative. La valeur de ce coefficient de résistance à la diffusion de vapeur fictif μ_f est généralement plus faible que celle du coefficient de résistance μ . Cette différence est imputable aux effets du transport de liquide (i.e. diffusion surfacique) qui apparaissent aux humidités élevées, en même temps que le transport de vapeur. Il est donc qualifié de fictif car il n'est pas strictement un coefficient de résistance à la vapeur d'eau du matériau, qui serait uniquement fonction de sa structure poreuse, mais il dépend également de son état hydrique.

Ces deux grandeurs, μ et μ_f , sont bien souvent confondues dans la littérature même si leurs valeurs et leurs significations ne sont pas strictement identiques.

Le coefficient de diffusion D_w est difficile à déterminer expérimentalement. On lui préfère donc souvent un terme approché, D_{ws} , qui est le coefficient de diffusion par capillarité au contact de l'eau. D'après Krus, cette valeur approchée est parfaitement satisfaisante dans la grande majorité des cas (Krus et al., n.d.).

C'est un paramètre que l'on peut retrouver dans le logiciel de modélisation Wufi. Il est défini par la relation (Künzel, 1995) :

$$D_{ws} = 3,8 \left(\frac{A}{\theta_s} \right) 1000 \left(\frac{w}{w_s} \right)^{-1} \quad (3.7)$$

où A est le coefficient d'absorption d'eau [$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$] aisément mesurable expérimentalement et w_s est la teneur en eau à saturation [kg.m^{-3}].

3.2.DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DES PISES ETUDIES

La détermination des coefficients des modèles de couplage requiert la mesure des paramètres propre à chacun des matériaux que l'on souhaite étudier.

Ces paramètres sont de trois types :

- Les paramètres physiques :

On considèrera comme paramètres physiques la densité du matériau (et par extension sa masse volumique), sa granulométrie, sa porosité, sa valeur de bleu (VBS) et sa chimie (constituants). La densité et la porosité dépendent de la mise en œuvre du matériau (la force et le type de compaction par exemple) tandis que les paramètres comme la granulométrie, la VBS ou sa composition chimique sont des paramètres intrinsèques et dépendent du choix du matériau par le maçon. Bien que ces derniers n'interviennent pas directement dans les modèles, ils ont pour objectif de caractériser et de catégoriser le matériau d'un point de vue géotechnique.

- Les paramètres thermiques :

Ceux que l'on étudiera sont la conductivité thermique, la capacité calorifique et l'absorptivité lumineuse. La conductivité thermique sera mesurée à sec ($\theta_l = 0$) et en fonction de la teneur en eau ($\lambda = f(\theta_l)$), celle-ci favorisant les transferts de chaleur par conduction en créant des ponts liquides entre les grains du matériau. La capacité calorifique dépend des constituants du matériau et de la température. Elle sera donc déterminée à deux températures. L'absorptivité lumineuse est utilisée dans le logiciel de modélisation Wufi (via le modèle de

Künzel). Elle permet de connaître la part de chaleur émise par le rayonnement solaire à considérer dans les apports d'énergie externe.

- Les paramètres hydriques :

Ceux que l'on présentera dans cette partie sont ceux mesurés classiquement lorsque l'on étudie l'hygrothermie d'un mur. Il s'agit donc du coefficient d'absorption d'eau (A-Value), des isothermes de sorption/désorption et des coefficients de résistance à la diffusion de vapeur μ et μ_v .

3.2.1. PARAMETRES PHYSIQUES

3.2.1.1. Granulométrie et sédimentométrie

La granulométrie et la sédimentométrie des trois terres étudiées dans cette thèse ont été effectuées suivant les normes NF P 94-056 et NF P94-057, i.e. la granulométrie a été effectuée au tamis après avoir lavé la terre et la sédimentométrie a été effectuée dans une colonne d'eau par sédimentation des particules inférieures à $80\mu\text{m}$ (cf. loi de Stokes) et mesurée à l'aréomètre.

Les résultats pour les trois terres sont donnés sur le graphe ci-après.

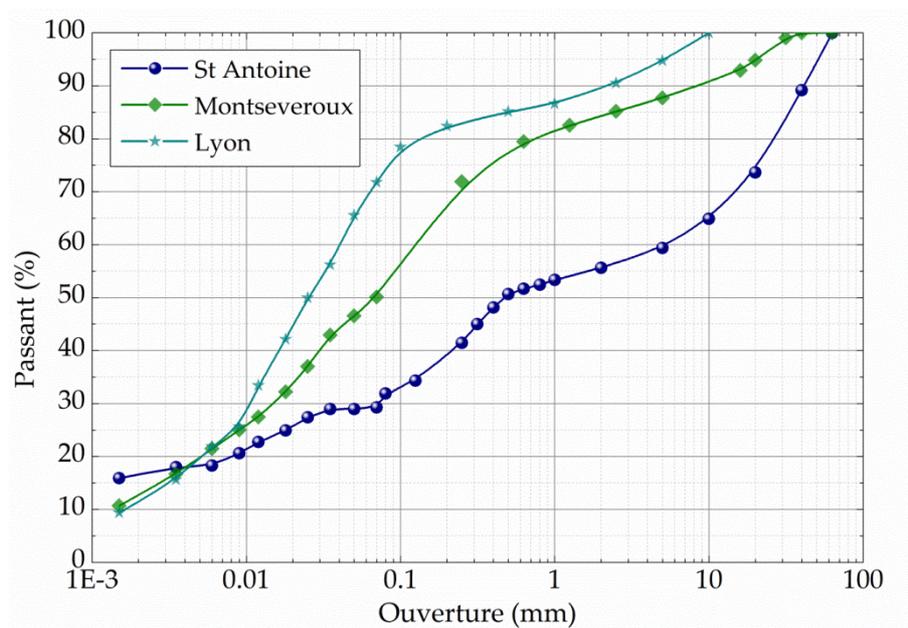


Figure 3-4 : Granulométrie des trois pisés étudiés

Sur la figure 3-4, on peut remarquer que la terre de St Antoine contient près de 10% de granulats dont le diamètre est supérieur à 40 mm, typique des constructions environnantes, alors que les constructions de Lyon et de Montseveroux n'en contiennent pas du tout. En

effet, les anciennes constructions, dans la zone de St Antoine, sont pour beaucoup en pisé, avec un soubassement en galet parfois très haut (plus de 2 m), dont le diamètre peut être très supérieur à 40 mm. Ces constructions ont parfois des pans entiers en galets.

Le dernier point mesuré par sédimentométrie donne la quantité d'argile. On peut donc lire, pour les grains inférieurs à 0,0015mm, une quantité d'argile de 16% environ pour St Antoine et, 9% pour Lyon et 10% pour Montseveroux respectivement. On se trouve, pour ces trois terres, dans la moyenne des terres à pisé (Walker et al., 2004).

3.2.1.2. Densité sèche

Dans le mur test de St Antoine l'Abbaye, douze échantillons ont été prélevés, dont l'un pesant plus de 7kg. Nous avons pu récupérer trois échantillons exploitables pour de telles mesures après l'effondrement de l'habitation de Lyon, ainsi que trois autres lors de la réfection de la grange de Montseveroux.

La densité de la terre après avoir été mise en œuvre a été mesurée par la méthode de la pesée hydrostatique. Cette technique consiste à peser un échantillon sec, puis à l'enduire de paraffine, à le peser, puis à le peser une troisième fois alors qu'il est plongé dans l'eau (figure 3-5). Connaissant la densité de la paraffine (0,88), on peut remonter à la densité du matériau sec par le principe d'Archimède tel que:

$$m_{h(s+p)} = m_{s+p} - \rho_{eau} V_{s+p} \quad (3.8)$$

d'où

$$V_{s+p} = \frac{m_{s+p} - m_{h(s+p)}}{\rho_{eau}} \quad (3.9)$$

On calcule ensuite le volume de paraffine :

$$V_p = \frac{m_p}{\rho_p} = \frac{d_p(m_{s+p} - m_s)}{\rho_{eau}} \quad (3.10)$$

Et on obtient donc la densité :

$$V_s = V_{s+p} - V_p \quad (3.11)$$

$$d_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (3.12)$$

où $m_{h(s+p)}$ est la masse de l'échantillon enrobé de paraffine dans l'eau [kg], m_{s+p} est la masse de l'échantillon enrobé de paraffine dans l'air [kg], ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau [kg.m⁻³], V_{s+p} est le volume de l'échantillon enrobé de paraffine [m³], V_p le volume de paraffine [m³], m_p la masse de paraffine [kg], ρ_p la masse volumique de la paraffine (= 880

kg.m^{-3}), m_s la masse de l'échantillon [kg], V_s le volume de l'échantillon [m^3] et d_s est la densité de l'échantillon [-].

La balance utilisée pour les mesures est une Precia Molen XB300C ayant une portée de 3,2kg avec une précision de 0,01g et une Precia Molen IBK30000G d'une portée de 30,1kg et une précision de 1g pour l'échantillon de 7kg hors de l'eau.



Figure 3-5 : Détermination de la densité d'un échantillon de pisé par pesée hydrostatique. Le plus gros échantillon testé (7kg) enduit de paraffine (à gauche) et le dispositif de pesée (à droite) avec un panier plongé dans l'eau

Les résultats pour les trois terres sont reportés dans les tableaux suivant :

St Antoine l'Abbaye												
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
d_s	1,76	1,69	1,66	1,73	1,69	1,72	1,75	1,82	1,77	1,70	1,71	1,72
d_s moyen	1,73 ± 0,04											

Tableau 3-1 : Mesure de la densité du pisé de St Antoine l'Abbaye par pesée hydrostatique

Montseveroux			
N°	1	2	3
d_s	1,62	1,56	1,67
d_s moyen	1,62 ± 0,05		

Tableau 3-2 : Mesure de la densité du pisé de Montseveroux par pesée hydrostatique

Lyon			
N°	1	2	3
d_s	1,70	1,56	1,61
d_s moyen	1,62 ± 0,07		

Tableau 3-3 : Mesure de la densité du pisé de Lyon par pesée hydrostatique

On trouve alors une densité moyenne de 1,73 pour le pisé de St Antoine l'Abbaye avec une excellente répétabilité. Cette densité se trouve plutôt dans la partie basse de la fourchette de densité des pisés modernes que l'on peut trouver dans la littérature (Allinson and Hall, 2010; Pisé terre D'avenir (association loi 1901), 1985; Walker et al., 2004). On peut expliquer ceci par la teneur en eau de mise en œuvre de cette terre. Cette teneur en eau est de 18% environ en masse, quantité élevée pour un pisé (Bui et al., 2009), ce qui explique une densité faible après compaction (l'eau étant incompressible) créant ainsi un volume important de vides dans la terre. De plus, dans les douze mesures qui ont été réalisées, l'échantillon de 7kg donne un résultat incroyablement similaire aux autres avec une densité de 1,72 pour cet échantillon. La fiabilité de cet essai, même sur de gros échantillons, est donc excellente. En outre, les échantillons ont été prélevés indépendamment sur le dessus ou le dessous du mur test. Or, on pourrait penser que la densité est moins importante sur le dessous du lit que sur le dessus, mais les résultats ne montrent pas d'écart significatif dans les mesures entre les échantillons, exception faite des 3^{ème} et 8^{ème} échantillons qui fournissent les résultats les plus éloignés de la moyenne (respectivement 1,66 et 1,82).

A titre de comparaison, les deux autres pisés testés dans cette thèse, Lyon et Montseveroux, présentaient tous les deux des densités de 1,62 ($\pm 0,05$ pour Montseveroux et $\pm 0,07$ pour Lyon); valeur de densité faible mais logique étant donné que ces deux pisés sont anciens (100 ans ou plus), donc damés au fouloir manuel, et par conséquent moins dense.

3.2.1.3. Porosité

N'ayant pas eu accès à un dispositif de porosimétrie mercure au cours de cette thèse, les porosités des pisés étudiés sont déduites des mesures de densité en considérant une densité de grain d_g classiquement évaluée à 2,7 (Laurent, 1986).

Le passage de la densité à la porosité se fait donc par :

$$\eta = 1 - \frac{d_s}{d_g} \quad (3.13)$$

On en tire donc une porosité moyenne de 0,345 pour le pisé de St Antoine l'Abbaye, 0,39 pour Montseveroux et 0,387 pour Lyon.

Ces valeurs de porosité se trouvent également dans la moyenne des valeurs courantes de la littérature (Allinson and Hall, 2010).

3.2.1.4. Valeur de bleu (VBS)

L'essai au bleu de méthylène permet de déterminer l'activité des argiles. En effet, le bleu de méthylène est préférentiellement adsorbé par les argiles de type montmorillonite (argile gonflante) et les matières organiques (peu présentes en théorie dans le pisé) plutôt que par les autres argiles de type illites et kaolinites.

Cet essai est réalisé selon la norme NF P 94-068. Le mode opératoire est défini comme suit : on prélève une quantité de terre (en gramme) supérieure à 200 fois le diamètre du plus gros granulat. Si le diamètre du plus gros granulat est supérieur à 5 mm, la terre est lavée et on prélève la fraction 0-5 mm. Trois prises d'essais de 30 à 60 g sont ensuite prélevées pour lesquelles on mesure la teneur en eau par étuvage et pesée. La prise d'essai est ensuite placée dans 500 ml d'eau distillée et agitée pendant 5 min à 700 tr/min. Durant toute la durée de l'essai l'agitation est maintenue à 400 tr/min. Une dose connue de bleu de méthylène est ensuite ajoutée régulièrement et un prélèvement effectuée périodiquement dans le liquide en suspension. Les gouttes prélevées sont déposées sur un papier filtre jusqu'à l'apparition d'une auréole bleue claire sur le papier filtre autour de la tâche (figure 3-6).

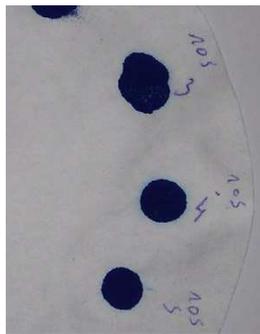


Figure 3-6 : Résultat d'une VBS où l'on voit l'auréole bleu clair autour d'une goutte sur un papier filtre

La VBS, pour les sols dont la fraction est inférieure à 5 mm, se calcule via :

$$VBS = 100 \frac{B}{m_0} \quad (3.14)$$

où B est la masse de bleu (en solution à 10 g/l) introduite durant l'essai soit $B = 0,01V_{total}$ [g] et m_0 la masse sèche de la prise d'essai [g].

La VBS, pour les sols dont la fraction est supérieure à 5 mm, se calcule quant à elle par :

$$VBS = 100 \frac{B}{m_0} C \quad (3.15)$$

où C est la proportion de fraction 0-5mm.

L'essai au bleu a été effectué uniquement sur la terre de St Antoine l'Abbaye. La valeur mesurée est $0,52 \pm 0,01$. Cette valeur de bleu indique que l'on se trouve en présence d'un sol limoneux aux argiles très peu actives, c'est-à-dire avec une infime proportion d'argiles gonflantes ou de matériaux organiques ce qui est tout à fait normal pour une terre à pisé avec laquelle on souhaite justement éviter les gonflements et retraits lors des périodes d'imbibition et de séchage.

3.2.1.5. Analyses chimique

Seule la terre de St Antoine l'Abbaye a été caractérisée chimiquement. Cette caractérisation a été effectuée par le Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) de l'INSA de Toulouse par Spectrométrie par Torche à Plasma (ICP). Cette méthode consiste à ioniser l'échantillon en l'injectant dans un plasma d'argon. Il en résulte alors que les atomes constituant le matériau sont transformés en ions et analysables sous cette forme.

Cet essai a porté sur la terre non stabilisée de St Antoine l'Abbaye (terre foisonnée, en « vrac ») et sur un échantillon prélevé sur le « mur test » de la maison, donc stabilisé à 2,5% (en masse) de chaux NHL5. Les résultats sont présentés dans le tableau 3-4. La différence entre les deux échantillons tient principalement à la présence de calcite (CaO) dans l'échantillon de pisé stabilisé.

	Eléments	St Antoine non stabilisée	St Antoine stabilisée
% massique	SiO ₂	65,4	67,2
	CaO	0,1	2,0
	Al ₂ O ₃	9,4	8,6
	Fe ₂ O ₃	5,6	4,7
	K ₂ O	1,3	0,9
	Na ₂ O	-	-
	MgO	0,4	0,4
	MnO	-	-
	TiO ₂	0,4	0,3
	Perte au feu	5,2	6,5
	Total (%)	87,9	90,7

Tableau 3-4 : Résultats des analyses chimiques de la terre de St Antoine l'Abbaye sur de la terre foisonnée et sur la terre stabilisée à 2,5% de chaux NHL5

3.2.2. PARAMETRES HYDRIQUES

3.2.2.1. Coefficient d'absorption d'eau (A-Value)

On l'a vu dans le modèle de Künzel (paragraphe 3.1.2), la détermination du coefficient de diffusion liquide (équation (3.7)) passe par la mesure d'un coefficient A. Ce coefficient est déterminé en suivant la méthode décrite par Krus (Krus and Holm, 1999) et par Hall avec son adaptation du BS-3921 au pisé (Hall, 2004b). Elle consiste à plonger la face inférieure d'un échantillon sec dans un réservoir d'eau et de mesurer, à intervalles réguliers, en le pesant, la quantité d'eau absorbée par capillarité dans l'échantillon. Sur un échantillon de pisé, cette manipulation est très délicate du fait que, une fois imbibé, le matériau se désagrège fortement et il devient délicat d'effectuer des pesées convenables.

Il nous a donc été nécessaire d'utiliser une cuve de capillarité. Le fond de cette cuve est recouvert d'un lit de gravier, puis de sable maintenus par un caillebotis plastique. Cette couche de granulats est immergée dans quelques centimètres d'eau (figure 3-7). Ce procédé a été mis au point par A. Mesbah du Laboratoire Génie Civil et Bâtiment de l'ENTPE.

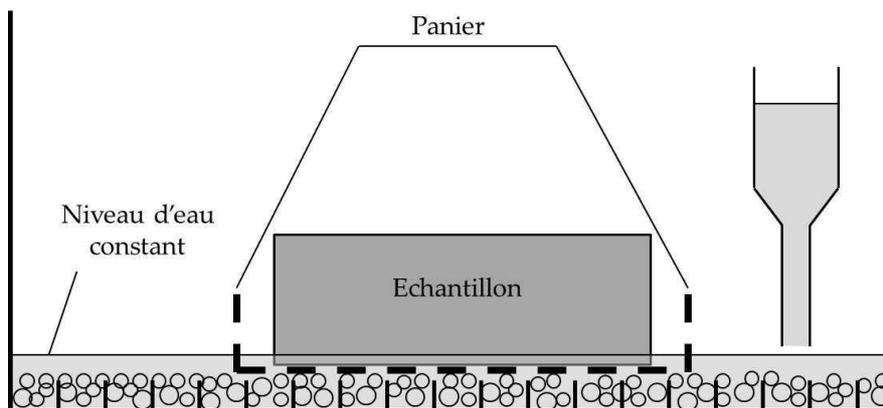


Figure 3-7 : Schéma du principe de mesure du coefficient d'absorption d'eau A

L'échantillon utilisé ici est un BTC formé à partir de la terre prélevée sur site et compactée au plus proche de la densité mesurée au paragraphe 3.2.1.2. Une feuille de papier filtre est placée entre le BTC et les graviers afin que ceux-ci ne restent pas accrochés alors que le BTC est soulevé pour être pesé. Ainsi, une fois l'échantillon positionné dans cette cuve, il repose sur un lit stable qui l'empêche de se désagréger. De plus, sa face inférieure est complètement mise au contact de l'eau. Afin de pouvoir soulever l'échantillon pour le peser et le repositionner, nous avons fabriqué un panier à l'aide de grillage et de fils métalliques. La figure 3-8 illustre cet essai.

La balance utilisée est une Precia Molen IBK30000G d'une portée de 30,1kg et d'une précision de 1g.

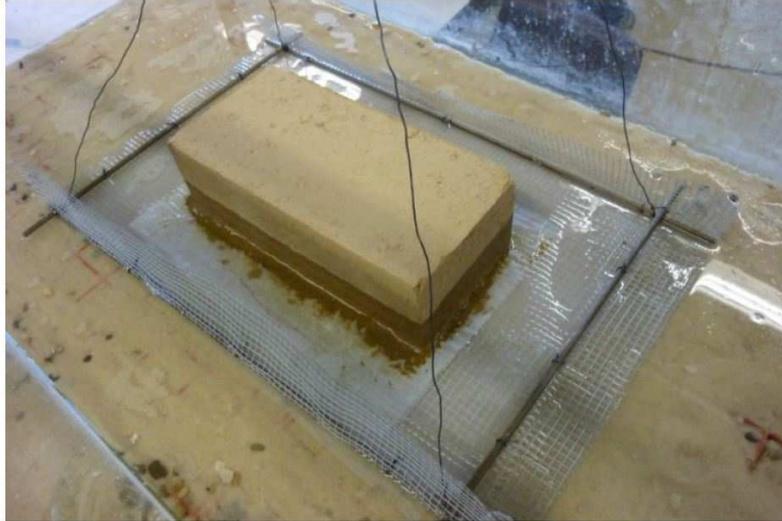


Figure 3-8 : Mesure du coefficient d'absorption d'eau A

Les valeurs obtenues permettent de tracer la quantité d'eau absorbée par m² de surface en fonction de la racine carré du temps (en seconde). Le coefficient directeur de la droite obtenue donne donc le coefficient d'adsorption d'eau A en kg.m⁻².s^{-1/2}.

Les résultats sont reportés sur la figure 3-9 suivante.

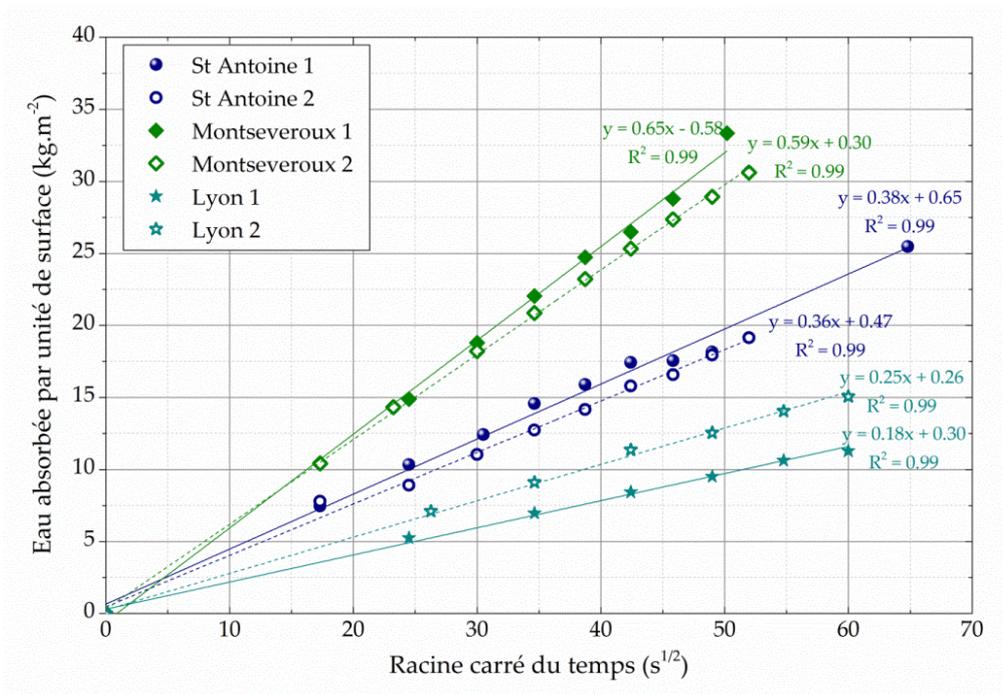


Figure 3-9 : Résultats des mesures du coefficient d'absorption d'eau A

Deux essais ont été réalisés pour chacun des pisés. La valeur moyenne des coefficients directeurs de chacune des deux droites de régressions donne donc un coefficient d'absorption d'eau moyen $A = 0,37 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$ pour la terre de St Antoine l'Abbaye. Les deux autres pisés étudiés, donnent des valeurs de $0,62 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$ ($R^2 = 0,99$) pour celui de Montseveroux et $0,23 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$ ($R^2 = 0,99$) pour celui de Lyon.

On remarquera une bonne répétabilité des mesures pour un même pisé, mais on constatera tout de même une grande variabilité des résultats entre les pisés.

Dans tous les cas, les résultats trouvés pour les trois pisés sont très différents des valeurs que l'on peut trouver dans la littérature sur les matériaux de construction courants, rapportés dans le tableau 3-5. D'après les valeurs recueillies par ces auteurs, le pisé se comporterait plutôt comme une brique cuite pleine (St Antoine et Lyon) ou une brique creuse (Montseveroux) en termes d'absorption d'eau.

Matériau	A
Terre limoneuse	0,062
Terre argileuse	0,027
Béton de ciment	0,03
Brique creuse	0,15
Brique pleine	0,418
Epicéa (sens axial)	0,02

Tableau 3-5 : Valeurs de A dans la littérature (Krus, 1996; Minke, 2000)

3.2.2.2. Sorption/désorption

La mesure des isothermes de sorption/désorption sur les pisés s'est effectuée dans des dessiccateurs contenant des solutions salines saturées permettant de réguler l'humidité relative de l'ambiance suivant la norme NF EN ISO 12571. La correspondance entre les solutions salines saturées et l'humidité relative est donnée dans le tableau 3-6.

Composé chimique	Humidité relative à 20°C [%]
Silica gel	0
Acétate de potassium ($\text{KC}_2\text{H}_3\text{O}_2$)	23,1
Carbonate de potassium (K_2CO_3)	43,2
Bromure de sodium (NaBr)	59,1
Chlorure de sodium (NaCl)	75,5
Chlorure de potassium (KCl)	85,5
Sulfate de potassium (K_2SO_4)	97,1

Tableau 3-6 : Correspondance entre les solutions salines saturées et l'humidité relative fournie

Les échantillons de pisé ont été séchés à l'étuve puis placés dans les dessiccateurs dans une salle à température contrôlée à 20°C. Les échantillons sont ensuite pesés régulièrement jusqu'à stabilisation de leurs masses. La balance utilisée pour ces mesures était une Precia Molen XB220A de portée 220g avec une précision de 0,0001g.

Les résultats obtenus pour les pisés étudiés sont reportés sur la figure 3-10. Le point à 100% d'humidité relative, quasiment inatteignable expérimentalement, a été calculé à partir de la porosité en supposant celle-ci complètement connectée. On considère alors que tous les pores de l'échantillon sont remplis d'eau et qu'il est donc complètement saturé.

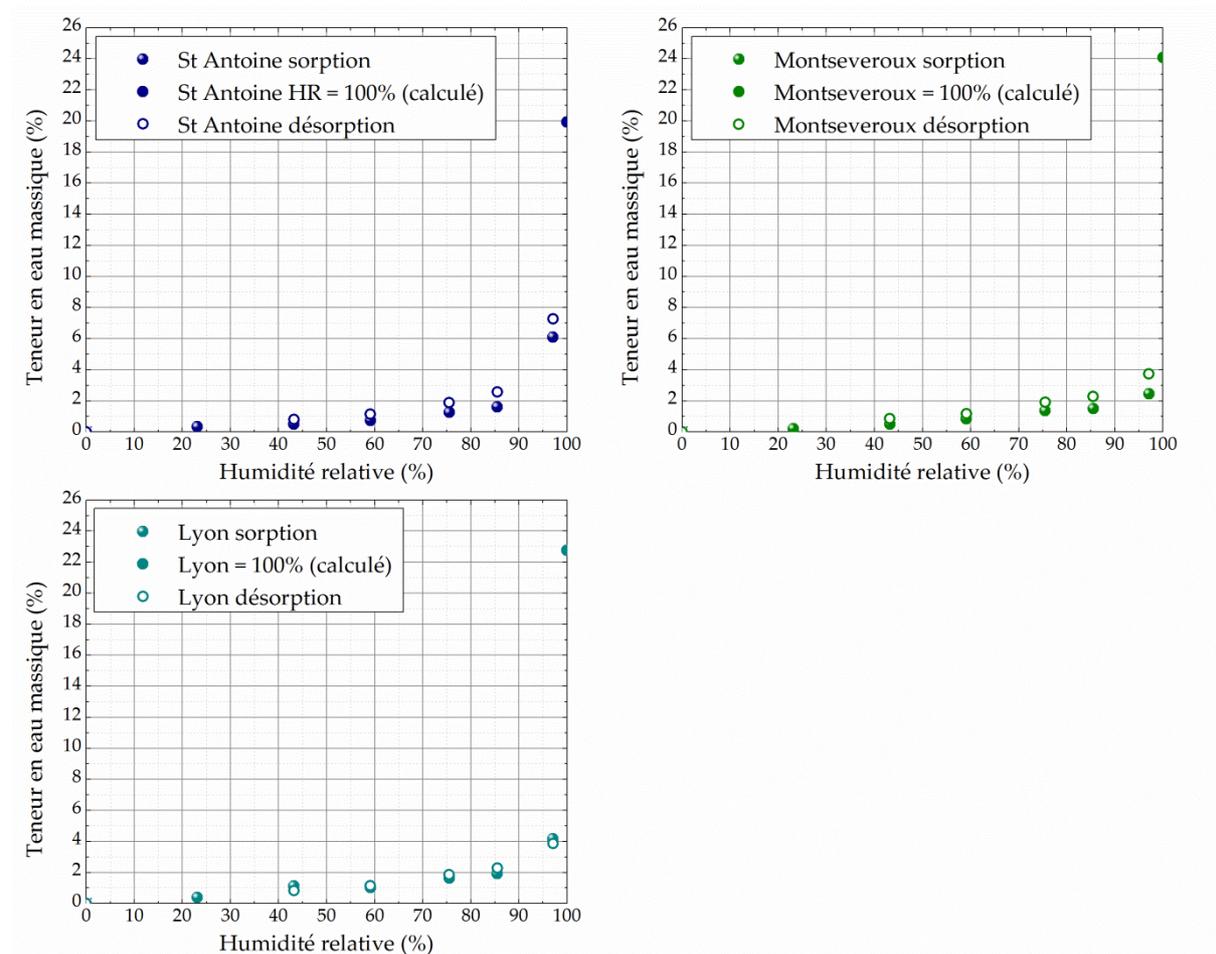


Figure 3-10 : Isothermes de sorption/désorption des trois pisés étudiés (20°C)

On pourra remarquer que l'hystérésis entre la sorption et la désorption est extrêmement faible, comme déjà noté chez d'autres auteurs (Allinson and Hall, 2010).

La fraction inférieure à 63µm de la terre de St Antoine l'Abbaye a été testée à l'Université de Bath par Fionn MacGregor par Sorption Dynamique de Vapeur (Dynamic Vapor Sorption - DVS).

Le principe de la mesure est peu ou prou le même que la mesure par solution saline saturée : un échantillon de terre est placé sur une microbalance dans un dispositif à température contrôlée (25°C ici) et dont l'humidité de l'ambiance est générée par un flux de gaz porteur, avec une teneur en vapeur d'eau contrôlée. Cette méthode a l'avantage d'être extrêmement rapide, étant donné la taille très réduite de l'échantillon (poudres).

Les résultats sont donnés sur la figure 3-11. Comme précédemment, le point à 100% a été extrapolé avec la porosité, en considérant celle-ci totalement connectée.

Une comparaison de ces résultats avec les essais réalisés dans les dessiccateurs n'aurait pas vraiment de sens car les essais n'ont pas été réalisés à la même température. Néanmoins, on peut tout de même remarquer que, malgré l'écart de température de 5°C, les ordres de grandeurs sont parfaitement respectés, et notamment l'inflexion au-delà de 85% d'humidité relative. On observe alors la teneur en eau augmenter rapidement après ce point et la très faible hystérésis entre la sorption et la désorption.

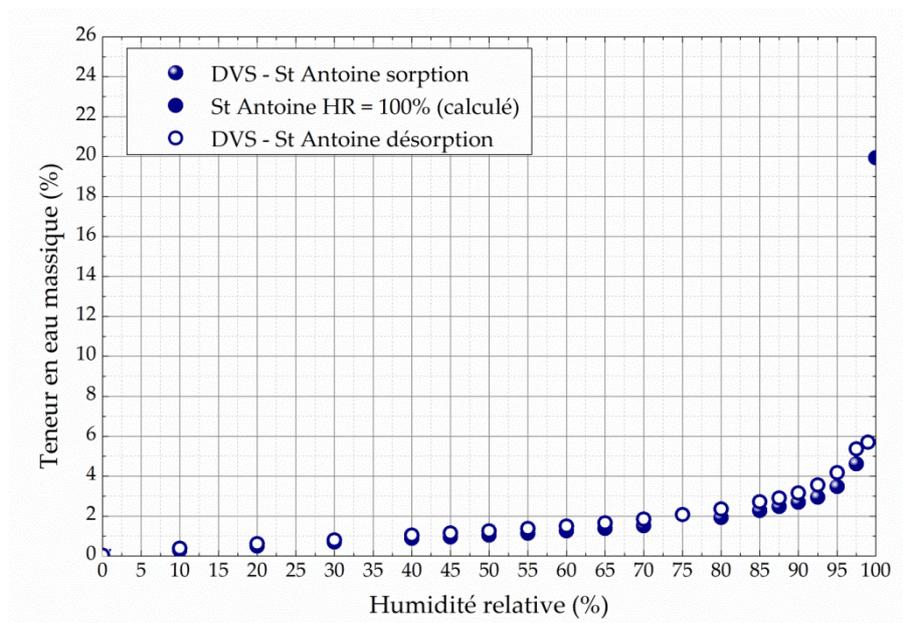


Figure 3-11 : Isothermes de sorption/désorption de la terre de St Antoine l'Abbaye mesurée à la DVS (25°C)

3.2.2.3. Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur

Les valeurs de μ ou de μ_f pour le pisé sont rares dans la littérature. On peut néanmoins citer des valeurs de μ comprises entre 9 et 11 pour le pisé non stabilisé (CSTB, 2011) et 6,4 et 9 pour μ_f sur du pisé stabilisé au ciment (Allinson and Hall, 2011; Liuzzi et al., 2013).

La détermination du facteur de résistance à la vapeur d'eau est réalisée suivant le protocole de la norme NF EN ISO 12572. L'objectif est ici d'obtenir un flux constant de vapeur au travers d'un échantillon dont chacune des faces est exposée à une humidité relative différente, constante et fixe.

Les essais à la coupelle dite sèche permettent d'obtenir μ . Ces essais sont effectués sur des échantillons de pisés reconstitués à partir de la terre en vrac tamisée à 5 mm. Ce tamisage est nécessaire pour réaliser ces essais, la présence de gros granulats les rendant difficile voire impossible (on suppose également que le rôle de ces gros granulats dans la diffusion de vapeur est négligeable). Le pisé est damé manuellement dans un moule de 11 cm de diamètre sur 5 cm d'épaisseur. Leurs surfaces de contact avec les ambiances contrôlées est donc de 0,00985m². Les échantillons sont ensuite placés sur une coupelle contenant du silica gel, permettant de maintenir une humidité relative de 3,6% (valeur vérifiée grâce à l'hygromètre à miroir refroidi). Ils sont scellés hermétiquement sur cette coupelle puis disposés dans un caisson étanche à l'humidité relative fixée par une solution saline saturée et équipée d'un ventilateur chargé d'homogénéiser l'ambiance intérieure en permanence et d'accélérer les processus de transferts. Le tout est placé dans une pièce à température contrôlée (20°C – 60% HR).

L'essai est effectué sur deux échantillons placés dans des ambiances différentes. Les deux solutions salines saturées retenues sont le chlorure de sodium (NaCl) permettant d'obtenir une humidité relative de 75,5% et le carbonate de potassium (K₂CO₃) pour une humidité relative de 43,2%.

L'humidité relative et la température sont contrôlées à l'aide d'un capteur Campbell Scientific CS215 dans le caisson à 43,2% et par un hygromètre à miroir refroidi Edgetech modèle DewTrack II dans le caisson à 75,5%. Les mesures montrent que ces deux humidités sont parfaitement maintenues par les sels durant l'essai.

La figure 3-12 est un schéma du principe de la mesure du coefficient de résistance à la vapeur.

La figure 3-13 quant à elle est une photo de l'installation. Le caisson est une malle de transport étanche de marque Pelicase modifiée dans laquelle nous avons percé trois trous pour le passage de l'hygromètre à miroir refroidi, un autre pour sa sonde de température et un autre pour un presse étoupe offrant un passage de câbles. Les coupelles sont des boîtes métalliques dont l'étanchéité avec l'échantillon est assurée par un gant latex découpé et fixé au ruban adhésif. Les échantillons de pisé sont laissés dans leurs moules pour éviter le passage de la vapeur sur les contours. Le brassage de l'air est assuré par un ventilateur d'unité centrale d'ordinateur alimenté par un générateur externe. Malgré son apparent archaïsme, ce système « fait maison » s'est avéré extrêmement robuste et fiable.

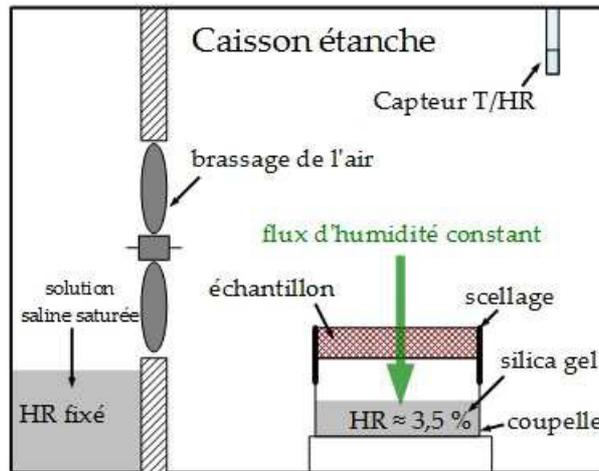


Figure 3-12 : Schéma de principe de la mesure du coefficient de résistance à la vapeur μ

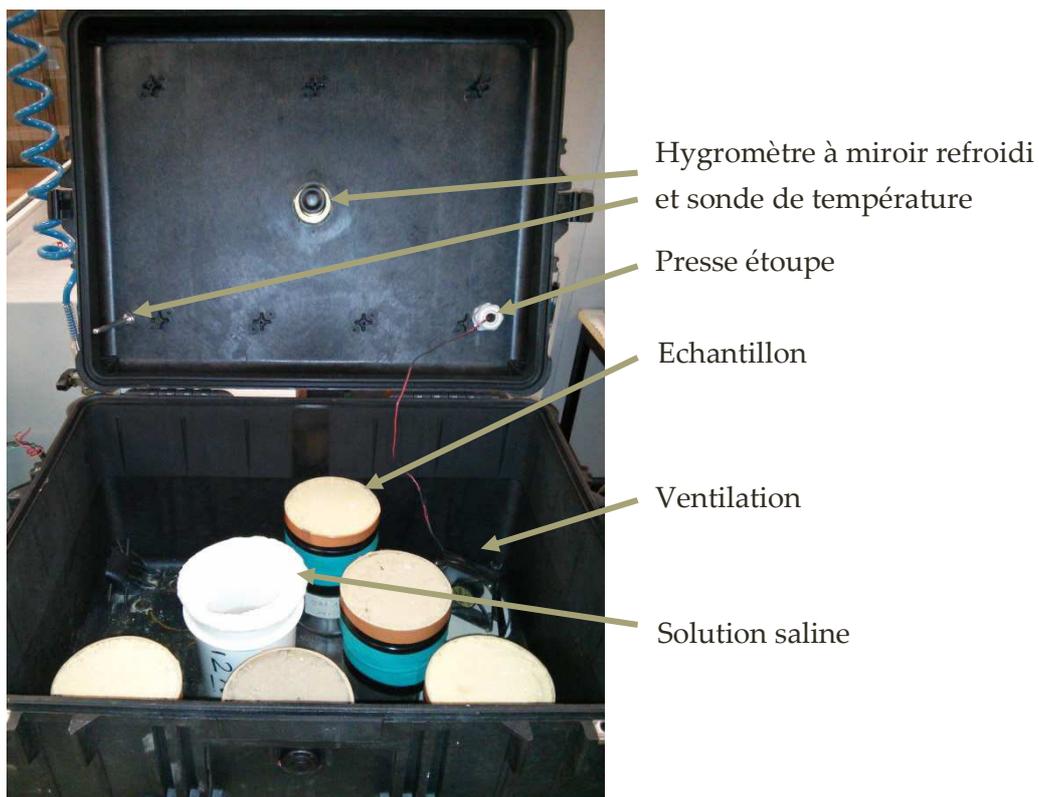


Figure 3-13 : Système de mesure du coefficient de résistance à la vapeur d'eau

Les essais sont donc effectués sur les trois terres, compactées manuellement à la densité à laquelle on les trouve sur site (cf. partie 3.2.1.2). Toutefois, trois échantillons ont été fabriqués avec la terre de St Antoine l'Abbaye : un avec 2,5% (en masse) de chaux NHL5, comme pour sa mise en œuvre sur le chantier, un autre sans chaux, puis un autre encore avec une densité de 1,5 pour tester ce facteur μ à la variation de densité.

Les échantillons sont installés secs dans le dispositif et pesés régulièrement jusqu'à obtention d'un régime permanent de l'absorption de vapeur d'eau au travers du matériau. La norme impose cinq mesures consécutives de la variation de la masse, rapportée à l'intervalle de pesage, constantes à $\pm 5\%$ de sa valeur moyenne.

La balance utilisée est une Precia Molen XB300C ayant une portée de 3,2kg avec une précision de 0,01g.

Une fois le régime permanent atteint, on calcule :

Le taux de variation de la masse :

$$G = \frac{\Delta m}{\Delta t} [kg \cdot s^{-1}] \quad (3.16)$$

où Δm [g] est la variation de masse de l'échantillon sur l'intervalle de temps Δt [s].

La densité de flux de vapeur :

$$J_v = \frac{G}{S} [kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}] \quad (3.17)$$

où S est la surface d'échange de l'échantillon. [m²]

La perméance :

$$W = \frac{G}{S \Delta P_v} [kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}] \quad (3.18)$$

où ΔP_v [Pa] est la différence de pression de vapeur d'eau entre les deux faces de l'éprouvette. Cette pression sur chaque face est calculée avec (BS-5250:1989, 1989) :

$$P_{vs} = \varphi 610,5 e^{\frac{17,269T}{237,3+T}} [Pa] \quad (3.19)$$

où φ est le taux de saturation de la vapeur (i.e. humidité relative) [-] à laquelle est exposée la face de l'éprouvette et T la température [°C].

La perméabilité à la vapeur d'eau :

$$\delta_p = W e [kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}] \quad (3.20)$$

où e est l'épaisseur de l'échantillon [m].

Le facteur de résistance à la vapeur d'eau :

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p} \quad (3.21)$$

où δ_a est la perméabilité à la vapeur de l'air ($\delta_a = 2 \cdot 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)

Les résultats obtenus sont montrés sur les figures et tableaux suivants.

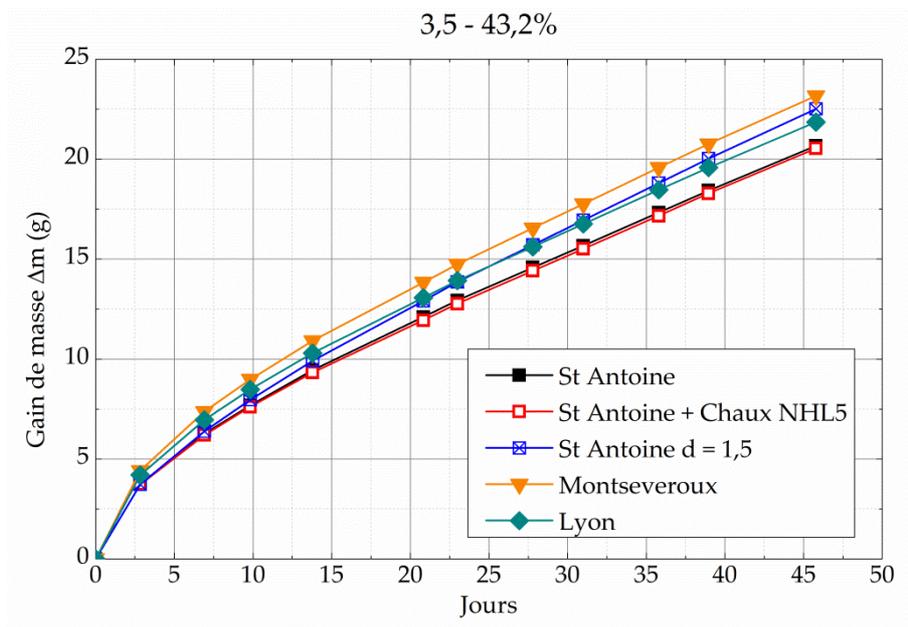


Figure 3-14 : Mesure du gain de masse des pisés étudiés dans le caisson à 43,2% d'humidité relative

3,5 – 43,2%	St Ant.	St Ant. + NHL	St Ant. 1,5	Montsev.	Lyon
$G^{(1)} [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \times 10^{-9}$	3,9	3,9	4,4	4,3	4,0
$J_v [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \times 10^{-7}$	4	4	4,4	4,3	4,1
$W [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}] \times 10^{-10}$	3,8	3,8	4,2	4,1	3,9
$\delta_p [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}] \times 10^{-11}$	1,9	1,9	2,1	2,1	1,9
μ	10,6	10,5	9,5	9,7	10,3

Tableau 3-7 : Calculs du facteur de résistance à la diffusion de vapeur pour les trois terres étudiées à 43,2% d'humidité relative. ⁽¹⁾ La pente est calculée sur les cinq dernières pesées, c'est-à-dire entre le 28^{ème} et le 46^{ème} jour

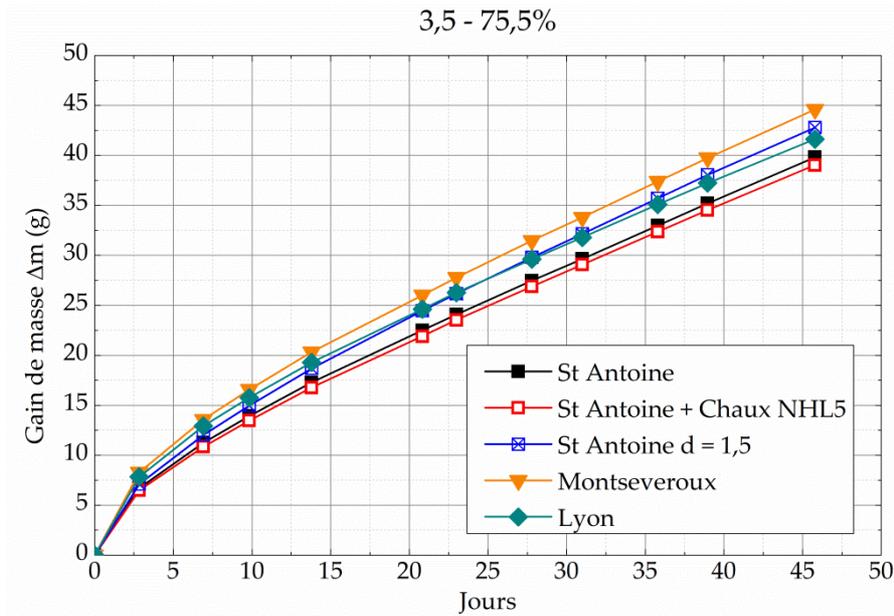


Figure 3-15 : Mesure du gain de masse des pisés étudiés dans le caisson à 75,5% d'humidité relative

3,5 – 75,5%	St Ant.	St Ant. + NHL5	St Ant. 1,5	Montsev.	Lyon
$G^{(1)} [\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}] \times 10^{-9}$	8	7,8	8,4	8,4	7,7
$J_v [\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}] \times 10^{-7}$	8,1	7,9	8,5	8,6	7,8
$W [\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}] \times 10^{-10}$	4,24	4,2	4,5	4,5	4,1
$\delta_p [\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}] \times 10^{-11}$	2,1	2,1	2,3	2,3	2,1
μ	9,4	9,6	9	8,9	9,7

Tableau 3-8 : Calculs du facteur de résistance à la diffusion de vapeur pour les trois terres étudiées à 75,5% d'humidité relative. ⁽¹⁾ La pente est calculée sur les cinq dernières pesées, c'est à dire entre le 28ème et le 46ème jour

Dans les deux cas, 43,2% et 75,5% les valeurs du facteur de résistance à la diffusion de vapeur sont cohérentes et donnent des résultats du même ordre de grandeur, ce qui confirme la bonne répétabilité des résultats et la fiabilité du protocole de mesure.

Dans le cas de la terre de St Antoine l'Abbaye, on peut voir que l'adjonction de chaux NHL5 n'a pas un effet significatif sur le facteur de résistance à la vapeur d'eau (10,6 sans chaux contre 10,5 avec chaux à 43,2%HR et 9 contre 9,6 dans l'essai à 75,5%HR).

En revanche, on peut noter un effet de la densité sur ce facteur. En effet, dans l'essai à 43,2%HR on passe de $\mu = 10,6$ en moyenne à $\mu = 9,5$ en moyenne quand la densité varie de 1,73 à 1,5. De même, à 75,5% on passe de 9,4 à 8,9. Pour une même terre, quand la porosité est plus élevée, la résistance à la diffusion de vapeur est moindre.

D'une manière générale, les valeurs de μ mesurées par cette méthode sont parfaitement en accord avec ce que l'on peut trouver dans la littérature sur le matériau terre dans la construction (Allinson and Hall, 2011, 2010; Collet, 2004; Liuzzi et al., 2013).

Les essais à la coupelle humide, uniquement sur la terre non stabilisée de St Antoine l'Abbaye, ont été réalisés par Fionn MacGregor de l'Université de Bath pour obtenir le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur fictif μ_f .

Ces essais ont été réalisés dans une enceinte climatique ventilée et régulée à 50% d'humidité relative et 20°C tandis qu'une solution saline dans la coupelle maintenait l'humidité relative à 94% sous l'échantillon. Les échantillons sont des disques de terre – reconstitués à la presse par pression statique – de 3 cm d'épaisseur et 10 cm de diamètre.

Les résultats sont présentés dans le tableau 3-9 suivant. Les valeurs obtenues à la coupelle humide sont, comme attendu (cf. paragraphe 3.1.2), plus faibles qu'à la coupelle sèche.

50 – 94%	St Ant.
Echantillon 1	6,9
Echantillon 2	6,0
Echantillon 3	8,3
μ_f	7,1

Tableau 3-9 : Résultats des mesures du coefficient de résistance à la diffusion de vapeur fictif sur le pisé de St Antoine l'Abbaye

3.2.3. PARAMETRES THERMIQUES

3.2.3.1. Conductivité thermique

Dans la littérature, les valeurs du coefficient de conductivité thermique λ en fonction de la densité pour la terre en tant que matériau de construction sont légions et surtout éparées. La figure 3-16 est un recensement de plusieurs valeurs que l'on peut trouver dans diverses publications pour des terres stabilisées (chaux ou ciment) ou non stabilisées et suivant différents modes de mise en œuvre de terre compactée ou damée. Quand cela est indiqué dans la publication originale, le type et la quantité de stabilisant ainsi que la méthode de mesure sont reportés en annexe B.

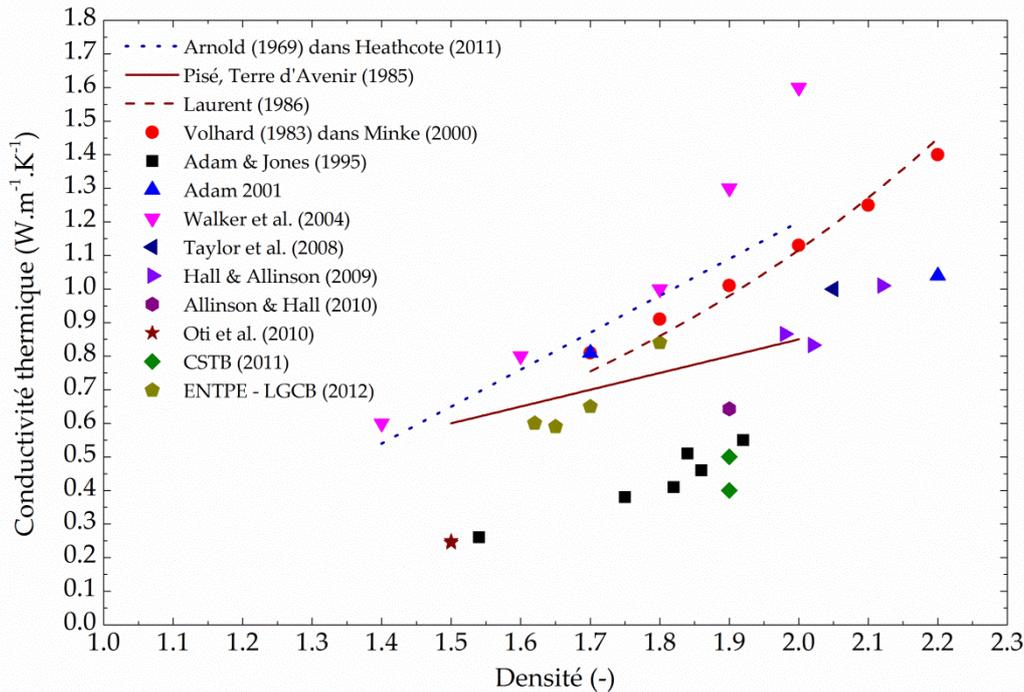


Figure 3-16 : Conductivité thermique en fonction de la densité du matériau terre à l'état sec dans la littérature : (Adam and Jones, 1995; Adam, 2001; Allinson and Hall, 2010; Arnold, 1969; CSTB, 2011; Hall and Allinson, 2009c; Heathcote, 2011; Laurent, 1986; Minke, 2000; Oti et al., 2010; Pisé terre D'avenir (association loi 1901), 1985; Taylor et al., 2008; Volhard, 1983; Walker et al., 2004)

Cette figure met en évidence qu'il est impossible de définir à l'avance une valeur unique de conductivité thermique pour le pisé, même en fonction de sa densité. Une mesure de la conductivité thermique est donc nécessaire à chaque étude.

De plus, comme on l'a observé précédemment, le pisé est un matériau capable d'adsorber et de désorber de l'eau. L'eau étant plus conductrice de la chaleur que les grains constituant le pisé, la conductivité thermique d'un pisé est proportionnelle à sa teneur en eau. C'est pourquoi, les essais ont été réalisés pour différentes teneurs en eau.

Les mesures de conductivités thermiques ont été réalisées par la méthode du fil chaud dans laquelle on place un fil chauffant entre les surfaces de deux échantillons du matériau à caractériser. On applique ensuite un échelon de flux de chaleur constant au fil chauffant et on relève l'évolution de la température.

L'élévation de température est telle que (Carslaw and Jaeger, 1959) :

$$\Delta T = \left(\frac{P}{4\pi\lambda} \right) \ln t + \beta \quad (3.22)$$

où ΔT est la différence de température entre le début et la fin de l'essai [K], P est la puissance injectée dans la sonde [W] et β une constante dépendante de la géométrie du fil et de l'interface fil chaud/échantillon.

Le fil chaud est placé à l'interface de deux échantillons aussi homogènes que possible. Le contact entre la sonde et le matériau doit être le meilleur possible afin d'éviter la présence de lame d'air entre la sonde et l'échantillon. Pour les matériaux hétérogènes et dont la surface est rugueuse, il est possible de mettre de la pâte thermique entre l'échantillon et le fil chaud pour effectuer la mesure. La conductivité thermique de la pâte étant extrêmement élevée (3 W.m⁻¹.K⁻¹ environ), la chaleur du fil se diffusera jusqu'à l'échantillon, et sur une grande surface, sans altérer la mesure. Bien évidemment, la conductivité thermique du matériau doit être suffisamment faible pour que la pâte thermique n'induisse pas de résistance qui fausserait la mesure. De même, les hétérogénéités ne doivent pas être trop importantes pour mesurer la conductivité thermique sur une surface qui soit représentative du matériau. Des tests, effectués sur un échantillon d'un mélange chaux-liège très rugueux (Figure 3-17), ont donnés de très bons résultats de répétabilité (0,25 W.m⁻¹.K⁻¹ avec un écart-type de 0,04).



Figure 3-17 : Un échantillon de mélange chaux-liège très rugueux sur lequel nous avons pu mesurer la conductivité thermique au fil chaud en utilisant de la pâte thermique de conductivité 3 W.m⁻¹.K⁻¹

La détermination de la conductivité thermique se fait par régression linéaire de la courbe $\Delta T = f(\ln t)$. Le logiciel valide ensuite la mesure si la régression linéaire associée admet un R² supérieur à 0,999. Dans ce logiciel, un certain pourcentage de points de mesure peut être ôté, notamment les points en débuts d'essais, afin de trouver une valeur de conductivité thermique convenable. Un grand nombre de points ôtés permet certes d'obtenir un résultat, cependant la validité de ce résultat en pâtera.

Les sondes utilisées ici sont de la marque Neotim associées à une centrale d'alimentation et d'acquisition FP2C de Neotim. La sonde à fil chaud est composée d'une résistance chauffante

et d'un capteur permettant de mesurer l'évolution de la température. Le logiciel associé permet de déterminer directement la courbe d'évolution de la température dans le matériau suite à une sollicitation de la sonde.

Les échantillons utilisés pour cet essai sont des BTC fabriqués avec la terre foisonnée récupérée sur site ; la trop grande rugosité de surface des échantillons de pisé prélevés sur les constructions rendant impossible les essais sur le pisé ancien. L'intérêt des BTC réside justement dans le fait que leur surface est lisse, donc en très bon contact avec le fil chaud.

Le protocole suivi a été le suivant : les deux BTC utilisés pour cet essai ont été fabriqués à partir de la même gâchée de terre, donc à la même teneur en eau connue, sous presse à BTC manuelle. La teneur en eau est vérifiée par pesée des blocs et étuvage d'un prélèvement. Ils sont ensuite emballés sous film plastique afin d'homogénéiser la teneur en eau dans tout leur volume. Après cela, ils sont déballés et une première mesure de λ est effectuée directement après le déballage. Puis, ils sont laissés à l'air libre pour quelques jours afin qu'ils puissent sécher naturellement, et sont ensuite réemballés pour homogénéisation de la teneur en eau. Ils sont pesés et un autre point de mesure est réalisé. L'opération est répétée jusqu'à ce que les blocs soient le plus sec possible. Ils sont finalement placés à l'étuve à 60°C pour les sécher au maximum sans les dégrader, puis de nouveau emballés, afin qu'ils n'adsorbent pas d'humidité, jusqu'à ce qu'ils se trouvent à température ambiante. Ils sont ensuite déballés, et le λ à sec est mesuré directement après le déballage. La balance utilisée est une Precia Molen IBK30000G d'une portée de 30,1kg et d'une précision de 1g.

Les résultats pour les trois pisés sont reportés sur la figure 3-18.

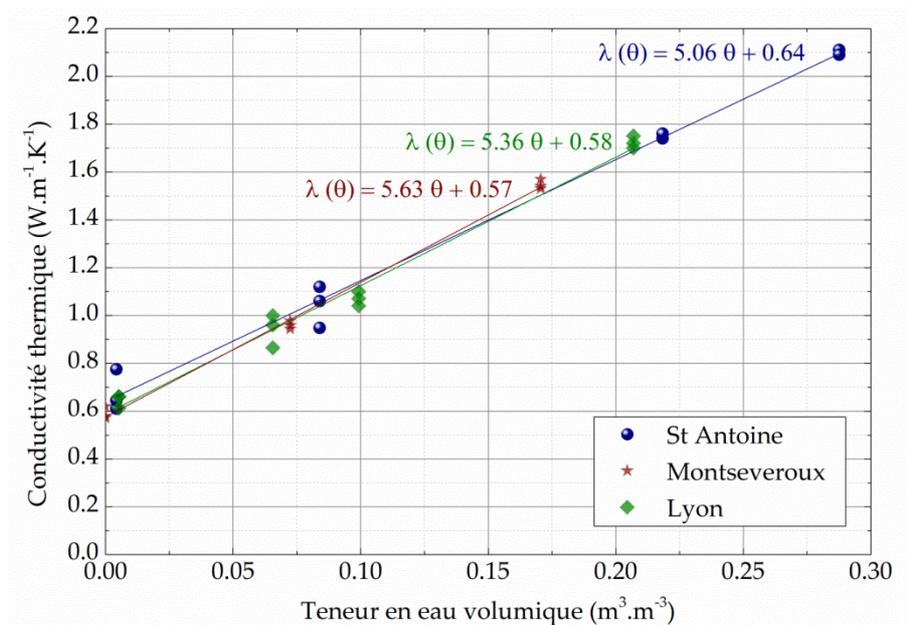


Figure 3-18 : Conductivité thermique des trois pisés étudiés en fonction de la teneur en eau

La conductivité thermique à sec du pisé de St Antoine est de $0,64 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ pour une densité du bloc ayant servi aux tests de 1,71 (pour 1,73 sur site, cf. paragraphe 3.2.1.2). Cette valeur est parfaitement cohérente avec celles que l'on peut trouver dans la littérature comme nous avons pu le voir dans les parties précédentes. De même, les deux autres pisés testés ont donnés des variations semblables avec la teneur en eau, reportées dans le tableau 3-10.

	St Antoine	Montseveroux	Lyon
Densité BTC	1,70	1,61	1,69
$\lambda = f(\theta)$	$5,06\theta + 0,64$	$5,36\theta + 0,58$	$5,63\theta + 0,57$
λ_{sec}	0,64	0,58	0,57

Tableau 3-10 : Conductivités thermiques des trois terres étudiées dans cette thèse

Il apparait que les variations de la conductivité thermique avec la teneur en eau ainsi que la valeur à sec sont remarquablement proches pour les trois pisés étudiés ici. Les autres caractéristiques mesurées n'étant pas du tout similaires, on peut donc en déduire qu'il s'agit ici d'un pur hasard.

En France, une maison habitée en pisé voit sa teneur en eau massique varier de 0,5 à 3% (soit 0,9 à 5,2% en volumique pour St Antoine par exemple). Dans le cas de St Antoine l'Abbaye, on peut voir que la conductivité thermique variera, sur cette plage, entre 0,64 et 0,9 $\text{W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$, soit une variation de près de 30%.

3.2.3.2. Absorption solaire

La modélisation d'un bâtiment ou d'un mur soumis à des conditions atmosphériques réelles nécessite la prise en compte des apports solaires. Ces apports peuvent être quantifiés par la détermination d'un coefficient d'absorption solaire qui traduira l'énergie apportée au mur par le rayonnement solaire.

Donc, quand il reçoit un rayonnement solaire, le pisé, comme tout matériau opaque, absorbe et réfléchit ce rayonnement. La partie réfléchi se traduit par un « facteur de réflexion », notée r , et la partie absorbée par un « facteur d'absorption » noté a .

On a donc :

$$r + a = 1 \quad (3.23)$$

Le facteur d'absorptivité représente donc la fraction du rayonnement solaire qui va être emmagasinée sous forme d'énergie thermique par un mur en pisé. Pour la lumière du soleil, le rayonnement s'étale sur la gamme de longueurs d'ondes 250 nm à 2500 nm.

Si on a un matériau plutôt spéculaire, les coefficients de réflexion et d'absorption sont dépendants de l'angle du rayonnement avec la paroi. En effet, un matériau spéculaire renvoie la lumière avec un angle égal à l'angle d'incidence selon la loi de Descartes. Un matériau lambertien renvoie, lui, la lumière dans toutes les directions de manière homogène et, entre les deux, on trouve la réflexion de type « diffuse » (figure 3-19).

On peut donc relier l'absorptivité d'un matériau à sa couleur : plus un matériau est sombre, plus il absorbe une proportion importante du rayonnement solaire. Pour le pisé, d'une terre à l'autre, la couleur peut varier fortement, il est donc difficile d'estimer sans mesure une valeur qui pourrait convenir pour l'ensemble des pisés. Il est donc indispensable d'effectuer cette mesure sur des échantillons réels.

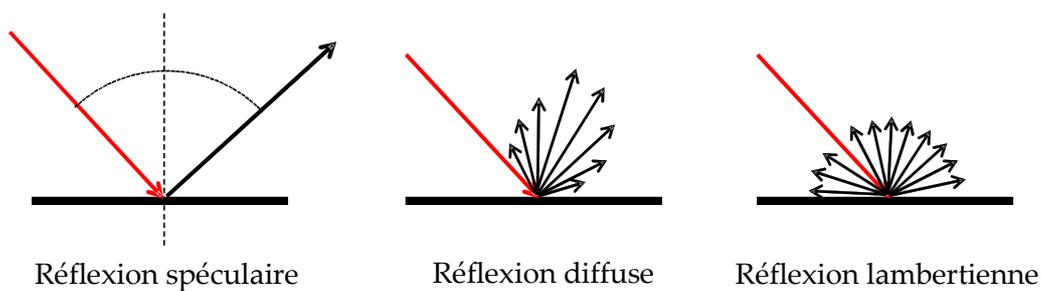


Figure 3-19 : Réflexion de la lumière sur des surfaces opaques

Les mesures d'absorption sur nos trois pisés sont effectuées à l'aide d'un spectromètre de marque Jeti type Specbos 1211 UV. La gamme de mesure s'étend de 250nm à 1000nm et, bien que le spectre solaire s'étende de 250 à 2500nm, l'appareil permet une bonne approximation de la valeur de l'absorption solaire du matériau.

L'expérience se déroule en extérieur pour travailler directement sous lumière solaire afin d'éviter toute perturbation par les lumières artificielles d'une pièce en intérieur. On mesure d'abord la quantité de lumière renvoyée par une surface de référence, une plaque blanche, dont le coefficient de réflexion est connu, pour étalonnage de l'appareil puis on effectue une mesure sur l'échantillon. On détermine alors le coefficient de réflexion par :

$$r = \frac{R_r}{R_i} \quad (3.24)$$

où R_r est le rayonnement réfléchi et R_i le rayonnement incident.

La source lumineuse (spectromètre) étant identique dans le cas de la mesure sur la référence et sur l'échantillon, le rayonnement incident est également identique. On a donc :

$$r = \frac{r_{ref}R_r}{R_{r,ref}} \quad (3.25)$$

Dans notre cas $r_{ref} = 0,98$.

On a alors le facteur d'absorption avec (3.24).

Quatre mesures ont été effectuées sur les terres de St Antoine l'Abbaye et de Montseveroux et trois sur celle de Lyon : une mesure sur un BTC avec une incidence perpendiculaire du rayonnement (figure 3-20), puis une à 45° sur le même BTC. Une troisième sur un échantillon de pisé brut, donc à surface rugueuse, avec incidence à 90° de la source et enfin, une quatrième mesure sur ce même échantillon avec une incidence du rayon de 45° (mesure manquante sur la terre de Lyon). La teneur en eau des échantillons pendant la mesure est inférieure à 3% (en masse).



Figure 3-20 : Dispositif de mesure du coefficient d'absorption lumineuse

L'appareil mesure d'abord la quantité de lumière réfléchi sur toute la gamme 250-1000nm, par pas de 1nm, sur la plaque blanche de référence pour se calibrer en fonction de la luminosité ambiante puis, on le dirige ensuite sur l'échantillon. $R_{r,ref}$ et R_r sont alors respectivement les somme algébrique des 750 mesures sur la référence et sur l'échantillon. Enfin, on applique successivement les équations (3.25) et (3.23).

Les résultats des mesures de la quantité de lumière réfléchi en fonction de la longueur d'onde sont donnés sur les figures suivantes.

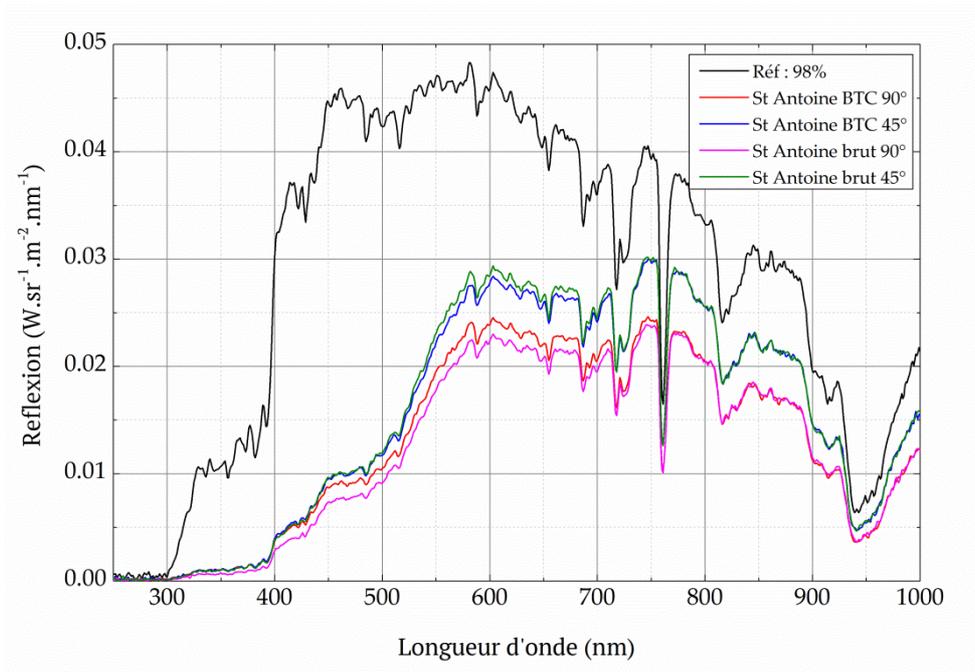


Figure 3-21 : Mesure du coefficient de réflexion sur quatre échantillons de la terre de St Antoine l'Abbaye

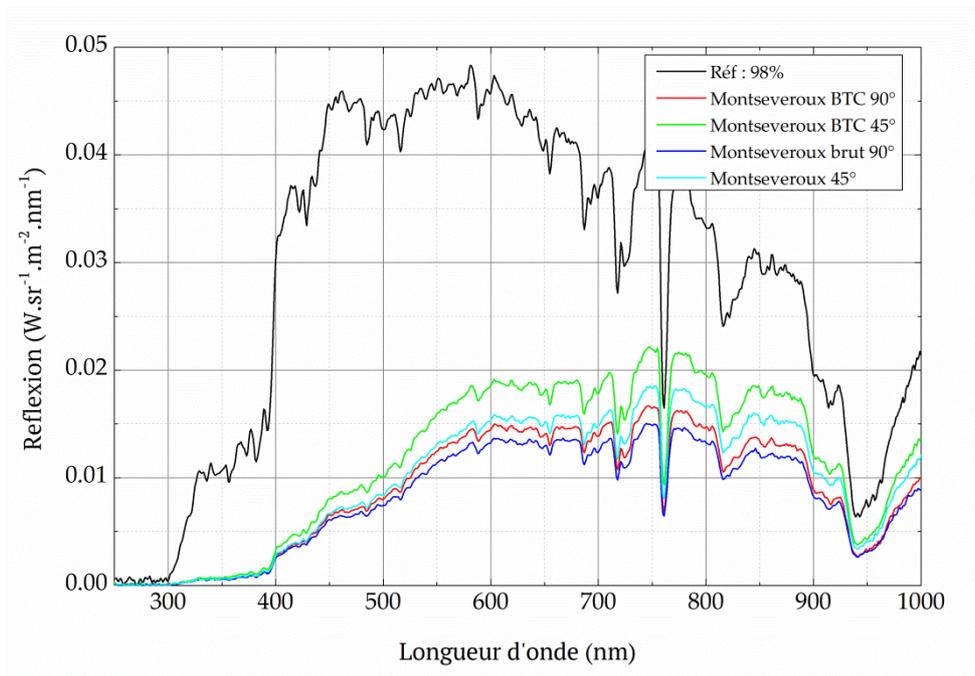


Figure 3-22 : Mesure du coefficient de réflexion sur quatre échantillons de la terre de Montseveroux

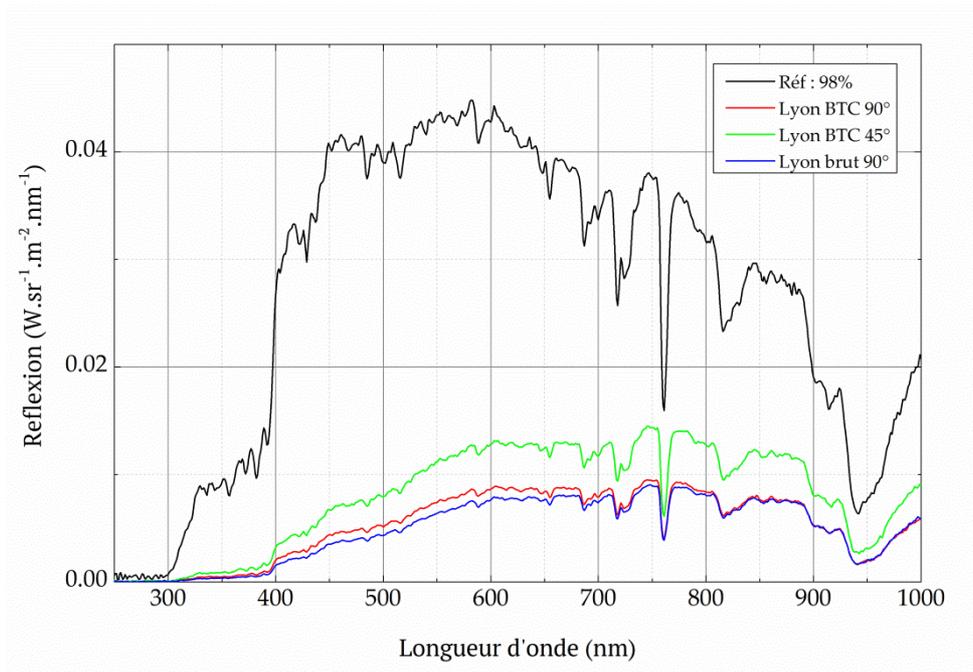


Figure 3-23 : Mesure du coefficient de réflexion sur trois échantillons de la terre de Lyon

Les facteurs d'absorption calculés sont reportés dans les tableaux suivants :

	St Antoine l'Abbaye	Montseveroux	Lyon
BTC 90°	0,56	0,70	0,81
BTC 45°	0,57	0,67	0,77
Echantillon brut 90°	0,52	0,72	0,82
Echantillon brut 45°	0,56	0,73	x
Moyenne	0,55 ± 0,02	0,71 ± 0,0	0,80 ± 0,03

Tableau 3-11 : Absorptivité lumineuse des trois pisés

On peut constater un creux à 760 nm sur les courbes de réflexion. L'essai ayant eu lieu à l'extérieur, en lumière naturelle, ce creux est dû à l'absorption du rayon source par l'eau et l'oxygène contenus dans l'air.

On peut remarquer que les valeurs sont peu dispersées, que ce soit en fonction de l'angle d'incidence ou en fonction de l'état de surface du matériau. Le matériau a donc un comportement plutôt lambertien.

En comparaison des deux autres pisés, le pisé de St Antoine l'Abbaye a un coefficient d'absorption faible. Visuellement, on peut constater qu'il est en effet plus clair (figure 3-3) et absorbera donc moins de chaleur que les deux autres pisés.

Ces valeurs peuvent être comparées à d'autres matériaux de construction (tableau 3-12) extraits de la base de données du logiciel Wufi.

Matériau	Coefficient d'absorption
Bois non traité	0,4
Bois vieilli	0,7
Brique rouge	0,68
Calcaire brillant	0,4
Grès patiné	0,9
Peinture claire	0,3
Tuile rouge	0,67
Stuc blanc	0,2

Tableau 3-12 : Facteur d'absorption lumineuse pour quelques matériaux

Comparativement à d'autres matériaux de construction, on peut constater que les pisés que l'on étudie dans cette thèse ont un coefficient d'absorption du même ordre de grandeur que les matériaux de constructions classiques. Dans de futures études, il pourra être intéressant d'observer l'impact de la teneur en eau sur ce paramètre. En effet, un pisé humide aura tendance à être plus sombre qu'un pisé sec. On peut alors supposer que le coefficient d'absorption solaire sera plus élevé.

3.2.3.3. Capacité calorifique

Pour cette caractéristique thermique, on peut faire le même travail bibliographique qui a été effectué sur la conductivité thermique.

En utilisant la méthode du calorimètre, Laurent a pu estimer que la capacité calorifique moyenne du pisé était de l'ordre de $830 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à 20°C à l'état sec (Laurent, 1986). Cette valeur varie peu de celles données dans la littérature antérieure à son étude (légèrement supérieure). D'après lui, on peut peut-être y voir une influence de l'argile qui reste partiellement hydratée même quand l'échantillon se trouve à l'état sec.

A partir de ses résultats, Laurent obtient une estimation de la capacité calorifique à sec du pisé par la relation :

$$C_{p_{sec}} \approx d_s 0,83 \cdot 10^6 \quad (3.26)$$

où d_s est la densité sèche du matériau.

On peut trouver dans la littérature différentes valeurs de capacité calorifique pour le pisé (à l'état sec) ce qui tend, une fois de plus, à prouver qu'on ne peut attribuer de valeur unique à un paramètre pour un matériau si différent d'un site à un autre. On trouve, par exemple,

pour la terre damée dans la construction, entre 650 et 850 J.kg⁻¹.K⁻¹ chez (Adam and Jones, 1995), 830 J.kg⁻¹.K⁻¹ chez (Laurent, 1986), 850 J.kg⁻¹.K⁻¹ chez (Csicsely, 2002), de 850 à 1100 J.kg⁻¹.K⁻¹ chez (Walker et al., 2004), de 827 à 868 J.kg⁻¹.K⁻¹ chez (Hall and Allinson, 2010, 2009a) pour du pisé stabilisé ou encore 1000 J.kg⁻¹.K⁻¹ chez (Minke, 2000), (Morton et al., 2005) ou (Oti et al., 2010).

La capacité calorifique n'a été mesurée que sur la terre de St Antoine l'Abbaye à l'état sec par calorimétrie différentielle à balayage (en anglais, Differential Scanning Calorimetry ou DSC) de marque Netzch modèle STA 449 F3 Jupiter sur des échantillons extraits du mur test. Cet essai a également été effectué par le LMDC de l'INSA de Toulouse.

Le schéma de principe de la DSC est donné figure 3-24. Le principe de cet appareil est la compensation de puissance. On mesure directement, et de façon continue, la différence de puissance électrique qu'il faut fournir à une référence (le creuset vide de l'appareil par exemple) et à l'échantillon à tester, placé dans un autre creuset quand il se produit une réaction endothermique ou exothermique. On régule alors de façon à réduire et à annuler la différence de température entre l'échantillon et la référence grâce à un programme de chauffe prédéfini. C'est en fait l'intensité du courant, nécessaire à l'équilibre thermique entre les deux têtes de mesure, qui est enregistré en fonction du temps. Le signal enregistré est donc proportionnel à la différence de chaleur fournie à l'échantillon et à la référence. L'appareil mesure la quantité d'énergie fournie ($dW = dq/dt$) pour maintenir une différence de température nulle entre les deux chambres.

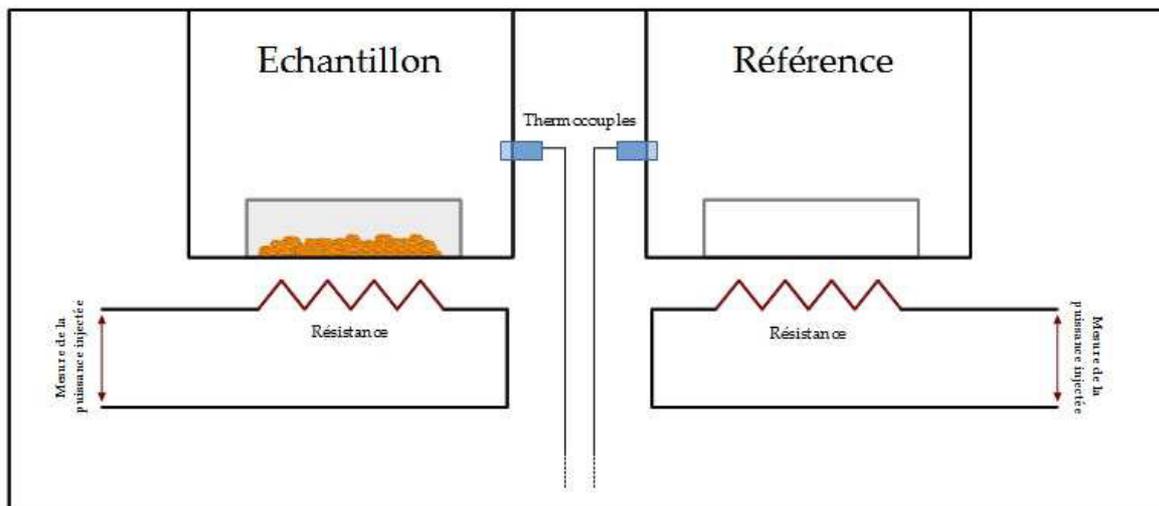


Figure 3-24 : Schéma de principe d'une DSC

On peut alors calculer la capacité calorifique C_p par :

$$C_p = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (3.27)$$

où Q est la chaleur apportée [J], m la masse de l'échantillon [kg] et ΔT la variation de température [K].

La capacité calorifique de la terre de St Antoine l'Abbaye a été mesurée pour deux valeurs de températures sur deux échantillons. Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

T (°C)	C_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	
20	580	670
40	640	700

Tableau 3-13 : Résultats des mesures de la capacité calorifique à la DSC

La valeur moyenne est de 647 J.kg⁻¹.K⁻¹. Cette valeur est un peu plus basse que celle que l'on trouve généralement dans la littérature précédemment citée.

3.3. CONCLUSION SUR LA PARTIE 3

Le pisé est un matériau au sein duquel se produisent une série de transferts qualifiés « d'hygrothermiques ». Les transferts couplés de masse et de chaleur interagissent entre eux pour créer un comportement hygrothermique du pisé qui le rendent propice à la régulation de l'eau et de la température dans une habitation.

Deux modèles de couplage ont été présentés. Le premier, celui de Philip et De Vries est sans doute le plus connu et l'un des plus complets. Le second, celui de Künzle, est implémenté dans le logiciel de modélisation Wufi – très largement utilisé à travers le monde.

Trois terres à pisé de la région Rhône-Alpes ont été caractérisées d'un point de vue physique, hydrique et thermique et l'ensemble de ces essais permettent de calculer les différents coefficients de diffusions pour alimenter les modèles de couplage hygrothermique.

Les différences entre ces trois pisés sont significatives. Malgré leur (relative) proximité géographique chacun est unique et possède ses propres caractéristiques. Il apparaît donc difficile de définir une valeur unique de chacune de ces caractéristiques pour « le pisé » en général car il existe en réalité « des pisés ».

Dans cette partie, l'étude sur le pisé a été effectuée à l'échelle du matériau, sur des échantillons de petites tailles. L'objectif est à présent de passer à l'échelle supérieure et d'étudier le pisé à l'échelle d'un mur puis, d'une habitation réelle.

PARTIE 4 : ESSAIS EN LABORATOIRE A
L'ECHELLE D'UN MUR

Maintenant que l'on a caractérisé le pisé de St Antoine l'Abbaye à l'échelle du matériau, l'étude du comportement hygrothermique va se poursuivre à l'échelle supérieure : celle du mur. Cette étude s'est déroulée en laboratoire, donc dans un environnement où l'on maîtrise plus facilement les paramètres.

Dans cette partie, nous présenterons le mode opératoire que nous avons développé au laboratoire au cours de cette thèse, nous instrumenterons des murs avec les sondes et capteurs que nous avons présentés dans la Partie 2 et nous mettrons en évidence des phénomènes de couplage hygrothermique dans le pisé.

Cette partie de la thèse n'aurait pu se dérouler sans le soutien de la Région Rhône-Alpes qui l'a financée à travers le projet Ter-RA.

4.1. LE PROJET TER-RA

En partenariat avec la Région Rhône-Alpes, l'équipe travaillant sur la terre au LGCB a monté un projet baptisé Ter-RA dont l'objectif est l'étude du comportement hygrothermique de la terre crue sur des murs en pisé (subvention 11024835 01 – ENT012v de la Direction du Climat, Environnement, Santé et Energie).

Dans Ter-RA, pour étudier les bâtiments en terre, nous avons construit quatre murs en pisé qui ont ensuite été placés dans des enceintes isolées. Ce projet a permis d'étudier le comportement hygrothermique du pisé au niveau d'un mur à l'échelle 1 en environnement contrôlé avec pour objectif de passer à un échelon supérieur dans l'étude du pisé.

4.2. CONCEPTION DES CHAMBRES CLIMATIQUES

4.2.1. FABRICATION DES MURS

Quatre murs en pisé ont donc été construits au laboratoire par l'entreprise Nicolas Meunier, spécialiste du bâti en pisé. La terre et la technique utilisées sont les mêmes que celles mises en œuvre pour la construction de l'habitation neuve de St Antoine Principal objet d'étude de cette thèse. La terre est toujours stabilisée avec 2,5% (en masse) de chaux NHL5.

Notre choix s'est donc porté sur la confection de deux murs de dimensions 1x1,5x0,5 m – dont l'épaisseur est proche de celle que l'on retrouve en Rhône-Alpes – et de deux murs 1x1,5x0,3 m – dont l'épaisseur réduite permet d'obtenir des transferts plus rapides au travers du mur tout en restant dans des dimensions courantes, comme on peut en trouver dans les pays anglo-saxons sur du pisé stabilisé. De plus, ces dimensions, suffisamment importantes, permettent de placer des sondes – les réflectomètres CS616 et CS650 qui mesurent 38,5 cm de

longueur – dans les murs sans être soumis aux éventuels effets de bords qui pourraient apparaître lors des tests et perturber les mesures.

Ces murs ont été construits à la dame pneumatique en utilisant la technique du pisé préfabriqué, i.e. le coffrage est posé au sol sur une bâche plastique, calé entre deux U métalliques en partie basse, au travers desquels passent des tirants (figure 4-1 et figure 4-2). Ces U servent, une fois le mur terminé, de points d'attache pour le déplacer.



Figure 4-1 : U et tirants permettant de soulever le mur en pisé après sa fabrication



Figure 4-2 : Coffrage pour la réalisation des maquettes de murs en pisé. On peut voir dans le fond les tirants auxquels sont accrochés des U qui permettent de soulever le mur une fois décoffré

Le damage des murs consiste en deux passages présentés sur la figure 4-3 sur un exemple avec un mur de 50 cm d'épaisseur. La dame est un carré de 18 cm de côté. Le point de départ est en angle et le premier passage se fait dans la largeur du coffrage avec un recouvrement de 13 cm environ entre deux impacts. Arrivé dans le bas du coffrage, la maçon remonte en diagonal pour avoir un recouvrement d'approximativement 2 cm avec l'impact contiguë supérieure. Le schéma global est en fait en « zigzag ». Le second passage démarre également en angle. Le mouvement est lent, dans la longueur du coffrage avec un recouvrement de 3 cm environ entre deux impacts. Une fois le tour du coffrage effectué, le maçon passe plus rapidement au milieu en oscillant légèrement pour arriver finalement à un recouvrement d'à peu près 2 cm avec les impacts des bords du coffrage. Le mur sera donc légèrement moins dense au centre que sur les bords, à l'instar du pisé traditionnel. Sur ces murs, les lits de pisé mesurent 9 cm ± 1.

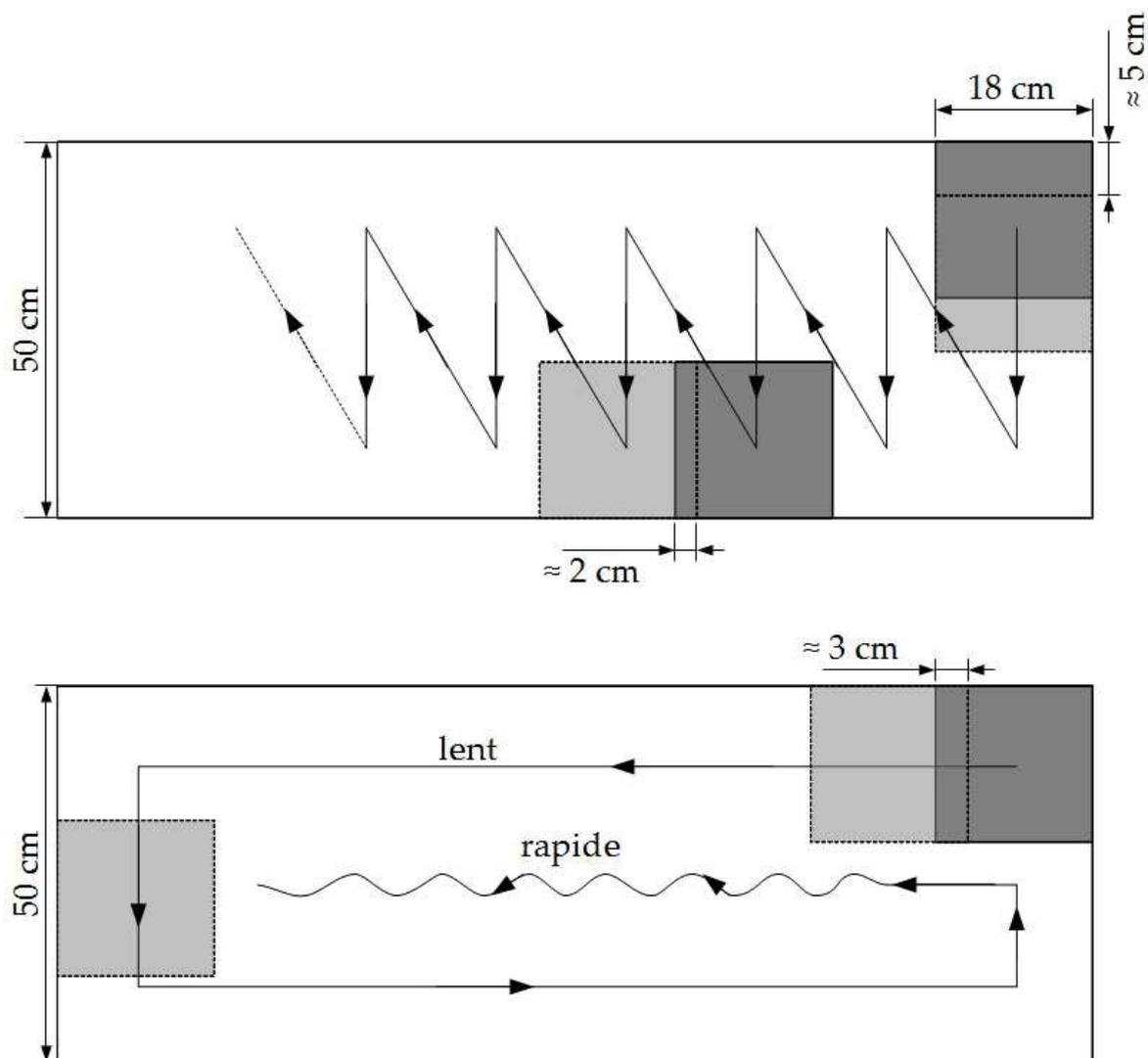


Figure 4-3 : Schémas de damage des murs en pisé. Le premier passage est en "zigzag" (en haut) tandis que le second est en spirale (en bas)

Il y a donc quatre murs nommés A30, A50, B30 et B50. On peut supposer que leur densité sèche est la même que celle du muret « test » soit 1,73 – la mise en œuvre (teneur en eau et énergie de compaction) étant *a priori* la même. Les résultats des prélèvements pour la mesure de la teneur en eau de fabrication de chacun des murets sont reportés dans le tableau 4-1.

Nom	Teneur en eau massique de fabrication (%)	Teneur en eau volumique estimée pour $d = 1,73$ (%)	Nombre de mesures
A30	17,5	30,3	1
A50	$18,9 \pm 0,7$	$32,7 \pm 1,2$	3
B30	$17,5 \pm 0,3$	$30,3 \pm 0,5$	2
B50	$17,2 \pm 0,1$	$29,7 \pm 0,1$	2

Tableau 4-1 : Teneurs en eau de fabrication des murs maquettes avec l'écart-type

Après leur fabrication, les murs ont été protégés par un film plastique étanche afin de ralentir leur séchage et de nous permettre de préparer tout le matériel nécessaire pour l'étude qui va suivre.

4.2.2. INSTRUMENTATION DES MURS

Des sondes de teneurs en eau CS616 et CS650, températures et humidité relative CS215 modifiées – que l'on a présentée dans la Partie 2 – ont été placées dans les murs durant leurs constructions.

La mesure de la teneur en eau étant effectuée entre les tiges des sondes, nous avons fait le choix de placer les réflectomètres de teneur en eau CS616 et CS650 perpendiculairement aux flux de chaleur et d'humidité afin d'obtenir une valeur de la teneur en eau sur une « tranche » de mur (figure 4-4). En effet, si les sondes sont enfoncées perpendiculairement dans le mur après sa fabrication – ce qui implique tout de même un forage d'un mur en pisé avec un foret de 3,2 mm de diamètre et de plus de 30 cm de longueur... – la teneur en eau mesurée serait alors une moyenne sur toute l'épaisseur. Cette dernière méthode est en revanche tout à fait pertinente pour l'étude des remontées capillaires (Grossein, 2009), mais ici ce sont les flux au travers du mur qui nous intéressent.

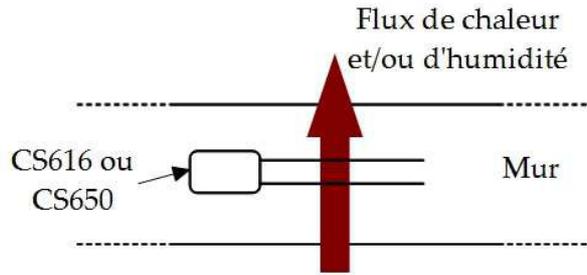


Figure 4-4 : Placement des sondes de teneur en eau perpendiculairement aux flux

Les sondes de teneur en eau ont été posées sur un lit de terre tamisée de un centimètre d'épaisseur (figure 4-5) puis recouvertes par un autre centimètre de terre tamisée afin d'éviter la présence, dans l'entourage immédiat, de galets susceptibles de les endommager au moment du damage.

Enfin, les câbles courent jusqu'à 20 cm du bord du mur, espace permettant le passage de la dame (carré de 18 cm de côté) et un décoffrage propre du mur, puis remontent dans un tube plastique de $\varnothing 40$ mm, permettant de les protéger lors de la compaction et de les sortir jusqu'à la face supérieure du mur (figure 4-5). Ce tube est ensuite rempli de terre pour l'isoler au maximum des entrées d'air extérieur.



Figure 4-5 : Placement de la sonde CS616 (à gauche) et de la sonde CS215 modifiée (à droite) dans un mur de 30 cm d'épaisseur. Elles sont placées puis recouverte de 1 cm d'épaisseur de terre tamisée pour éviter la présence immédiate de gros granulats qui pourraient les endommager pendant le compactage

Les deux murs de 30 cm d'épaisseurs (A30 et B30) sont équipés d'une seule sonde CS616 dans un lit à mi-hauteur soit à $50 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ de hauteur, au cœur du mur, c'est-à-dire à 15 cm de la surface latérale ; et d'une sonde CS215 dans le lit immédiatement supérieur soit à $55 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ également au cœur du mur. On pourra retrouver l'implantation de ces capteurs sur la figure 4-10. Les noms de codes des sondes sont CS616 mid. pour les sondes de teneur en eau, puis CS215 mid. pour les sondes d'humidité relative et température dans le mur.

De leur côté, les murs de 50 cm d'épaisseur possèdent plusieurs sondes dont on pourra retrouver l'implantation sur la figure 4-11.

Le mur A50 est le plus instrumenté d'entre tous. Il possède en tout cinq sondes TDR, quatre CS616 et une CS650, et cinq CS215 modifiées.

La première sonde de teneur en eau est placée en partie basse (CS616 bot.), à $10 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ de hauteur (dans le second lit donc) au centre du mur soit 25 cm du bord latéral. Une CS215 modifiée (CS215 bot.) est placée dans le lit immédiatement au dessus, à $15 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ de hauteur.

A mi-hauteur ensuite ($50 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$), trois sondes de teneur en eau ont été placées sur l'épaisseur : une CS616 à 10 cm du bord gauche, une autre à 25 cm, et une CS650 à 10 cm du bord droit. Les alias de ces sondes sont CS616 left, CS616 mid. et CS650 right. Pour éviter toute perturbation électromagnétique entre elles, les sondes sont placées en quinconce comme on peut le voir sur la figure 4-11. Dans le lit immédiatement supérieur, soit à $55 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$, nous avons placé des CS215 modifiées immédiatement au-dessus des sondes de teneur en eau avec pour alias CS215 left, CS215 mid. et CS215 right). Le fonctionnement de ces capteurs étant différent des réflectomètres, il n'y aura pas de perturbation électromagnétique avec ceux-ci.

Enfin, une dernière CS616 a été placée au centre du mur, à 25 cm de profondeur, en partie haute, à $90 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ de hauteur (d'alias CS616 top), dans l'antépénultième lit, puis une CS215 modifiée (CS215 top), juste au-dessus, dans le pénultième lit à $95 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$.

Le mur B50 est équipé identiquement au mur A50 mais avec uniquement les six sondes à mi-hauteur, c'est-à-dire à $50 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ pour les sondes de teneurs en eau et $55 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ pour les sondes d'humidité relative et température. Les alias des sondes suivent toujours la même logique : CS616 left, CS616 mid. et CS650 right pour la teneur en eau CS215 left, CS215 mid. et CS215 right pour l'humidité relative/température.

Les températures de surfaces des murs sont mesurées grâce à des thermistances 107 collés sur les parois des murs avec de la terre et isolés de l'ambiance extérieure grâce à du Styrodur (figure 4-6). Les données recueillies auront pour alias $T_{\text{surf. left}}$ et $T_{\text{surf. right}}$.



Figure 4-6 : Une thermistance de surface 107 isolée de l'ambiance extérieure et collée sur le mur

Egalement, les humidités relatives et températures dans les ambiances droite et gauche sont mesurées grâce à des CS215 non modifiées (figure 4-7). Les alias des sondes sont CS215_{amb} left et CS215_{amb} right pour les ambiances gauche et droite respectivement.

On précisera évidemment à chaque fois de quel mur il s'agit pour ne pas confondre les alias.



Figure 4-7 : Mesure de la température et de l'humidité relative dans l'ambiance avec une sonde CS215

4.2.3. DOUBLE ENCEINTES CLIMATIQUES

Les murs ont ensuite été placés dans des caissons isolés, conçus au laboratoire, avec du liège d'épaisseur 10 cm pour isolant, et ayant pour objectif de fonctionner comme des doubles enceintes climatiques, i.e. nous permettant de contrôler les conditions d'humidité et de températures de chaque côté des murs.

La conductivité thermique de ce liège est de $0,04 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ d'après le fabricant. Le coefficient de résistance à la vapeur d'eau de ce liège n'étant pas connu (même auprès du fournisseur) – et les valeurs que l'on peut trouver dans la littérature variant de 5 à 40 (Hens, 2007; ISO-10456, 2007) – nous avons enduit l'intérieur des parois des caissons avec de la paraffine afin de s'assurer de leur étanchéité.

Ces caissons sont fabriqués intégralement en Douglas (local) et liège (Portugal). Il consiste en une base ayant la forme d'une palette, déplaçable au chariot élévateur. Les parois droite et gauche sont constituées de portes donnant accès aux ambiances et permettant ainsi de placer du matériel (on retrouvera les dimensions sur la figure 4-10 pour les murs de 50 cm d'épaisseur et la figure 4-11 pour les murs de 30 cm d'épaisseur). Les photos de la figure 4-8 montrent les étapes de la conception des caissons et le placement des murs.



Figure 4-8 : Fabrication du socle des caissons étanches avec isolation au sol (en haut à gauche), un des murs dans un film plastique après sa fabrication (en haut à droite), déplacement d'un mur grâce aux U (en bas à gauche) et placement d'un mur dans un caisson (en bas à droite)

4.2.4. SYSTEME DE REGULATION DE TEMPERATURE ET D'HUMIDITE RELATIVE

L'intérêt des doubles enceintes climatiques est de pouvoir réguler la température et l'humidité relative de part et d'autre du mur à étudier. L'objectif était donc de mettre en place un système simple et peu encombrant permettant de contrôler ces deux paramètres.

Nous avons donc mis au point un système de contrôle de la température et de l'humidité assuré par un groupe compresseur/résistance/humidificateur installé par la société Decifroid. Le cahier des charges imposaient une plage de température de -10°C à +50°C et une régulation de l'humidité relative de 5 à 100%.

Le froid est généré par un compresseur installé à l'extérieur de l'enceinte tandis que le chauffage est assuré par une résistance sur laquelle souffle un ventilateur à l'intérieur du caisson. Ce ventilateur n'est pas dirigé directement sur le mur pour s'affranchir au maximum des phénomènes de convection.

Sur la période de cette thèse, nous n'avons pu équiper qu'un seul côté d'une maquette : le côté gauche du mur A30. Cette seule installation va nous permettre d'éprouver le matériel, de tester sa fiabilité et d'évaluer la pertinence (ou non) d'équiper tous les autres caissons avec ce même système.

Le système de régulation est muni d'un programmateur Elliwell modèle EWHT800LX qui autorise la programmation de 8 consignes température/humidité relative différentes sur 24h par pallier de temps définis par l'utilisateur.

Sur la figure 4-9 on donne une vue d'ensemble de l'installation.



Figure 4-9 : Vue d'ensemble d'un des caissons avec une porte ouverte (à gauche) et la centrale d'acquisition avec le groupe de régulation température/humidité relative (à droite)

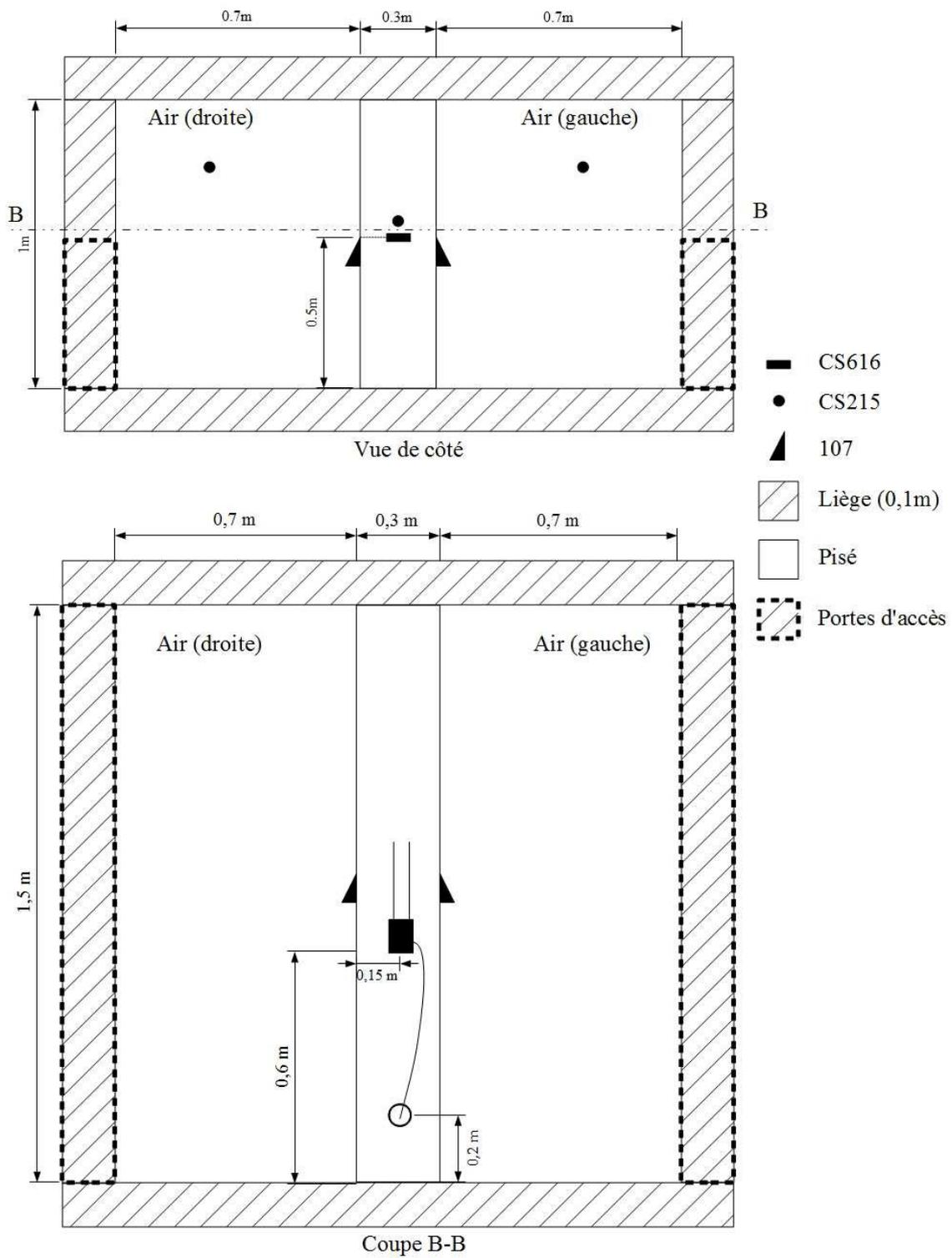


Figure 4-10 : Schéma d'implantation des capteurs des murs A30 et B30 dans leurs caissons

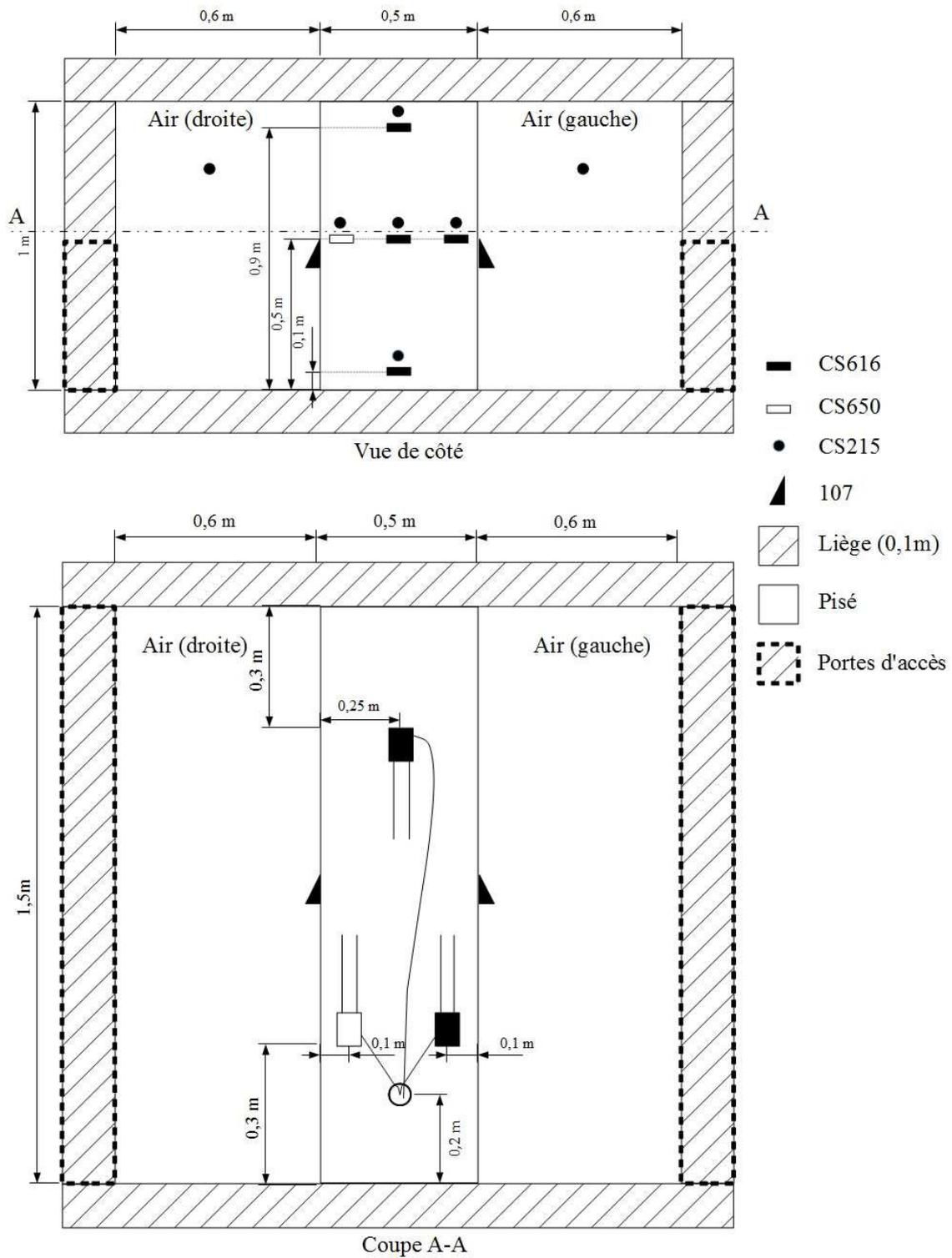


Figure 4-11 : Schéma d'implantation des capteurs du mur A50 dans son caisson. Le mur B50 est équipé des mêmes sondes mais uniquement à mi-hauteur (50 cm)

Pour résumer l'installation, on a donc un total de :

- 8 sondes de teneur en eau CS616
- 2 sondes de teneur en eau CS650
- 10 capteurs de température/humidité relative CS215 modifiés
- 8 capteurs de température/humidité relative CS215 non modifiés
- 8 thermistances 107
- Un système de régulation de l'humidité et de la température installé sur le côté gauche du mur A30

Toutes les sondes et capteurs sont reliés à une centrale d'acquisition CR1000 couplée à un multiplexeur AM16/32 (figure 4-12) installés sur une des enceintes vers laquelle courent l'ensemble du câblage via un passage de câble.

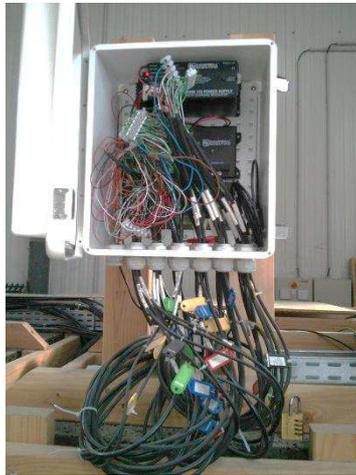


Figure 4-12 : Câblage des sondes sur la CR1000 et le multiplexeur

Le programme de la centrale d'acquisition pour cette étude est donné en annexe C.

Pour la suite, on fera remarquer immédiatement que nous n'avons pas eu accès à l'humidité relative à l'intérieur des murs, les sondes CS215 modifiées renvoyant 100% durant toute la durée de ces essais. En effet, la fabrication de ces murs implique une teneur en eau élevée (18% en masse en moyenne). Cette teneur en eau élevée a provoqué la formation d'une goutte d'eau derrière la membrane en Téflon qui sature la sonde. En revanche, la température renvoyée est correcte, ce qui indique que l'élément sensible fonctionne toujours. Néanmoins, on verra que, sur la fin de la présente thèse, une des CS215 modifiée commence à renvoyer une valeur d'humidité relative, indiquant qu'une évaporation de la goutte d'eau est toujours possible.

De plus, le mur B30 n'a pas encore été utilisé pour un quelconque essai, il n'en sera donc pas question dans la suite.

L'ensemble des sondes et leurs alias sont reportés dans le tableau suivant (tableau 4-2) :

	A30	B30	A50	B50
Partie haute	-	-	CS616{ θ_1 top CS215 { T top RH top	-
Partie centrale	CS616{ θ_1 mid. CS215 { T mid. RH mid.	CS616{ θ_1 mid. CS215 { T mid. RH mid.	CS616{ θ_1 left CS215 { T left RH left CS616{ θ_1 mid. CS215 { T mid. RH mid. CS650{ θ_1 right CS215 { T right RH right	CS616{ θ_1 left CS215 { T left RH left CS616{ θ_1 mid. CS215 { T mid. RH mid. CS650{ θ_1 right CS215 { T right RH right
Partie basse	-	-	CS616{ θ_1 bot. CS215 { T bot. RH bot.	-
Surfaces	107{T _{surf} left 107{T _{surf} right	107{T _{surf} left 107{T _{surf} right	107{T _{surf} left 107{T _{surf} right	107{T _{surf} left 107{T _{surf} right
Ambiances	CS215 { T _{amb} left RH _{amb} left CS215 { T _{amb} right RH _{amb} right	CS215 { T _{amb} left RH _{amb} left CS215 { T _{amb} right RH _{amb} right	CS215 { T _{amb} left RH _{amb} left CS215 { T _{amb} right RH _{amb} right	CS215 { T _{amb} left RH _{amb} left CS215 { T _{amb} right RH _{amb} right

Tableau 4-2 : Résumé des données recueillies par les sondes placées dans les murs avec leurs localisation

4.3. VALIDATION DE LA PROCEDURE EXPERIMENTALE

4.3.1. ETANCHEITE DES CAISSONS ET ETALONNAGE DES SONDES DE TENEUR EN EAU CS616 ET CS650

Les périodes de séchages des murs A50 et B50 vont avoir pour objectif de i) valider la conception des caissons avec des tests d'étanchéités et ii) de valider l'étalonnage des sondes de teneurs en eau CS616 et CS650 sur toute cette période.

Comme évoqué précédemment, les capteurs n'ont pu être connectés à la centrale que plusieurs jours après leur fabrication à savoir, 22 jours pour le mur A50 et 21 jours pour le mur B50 construit le lendemain.

Il faut, dans un premier temps, délimiter une période de séchage. Cette période de séchage, pour les murs de 50 cm d'épaisseur a été définie sur une année ; année durant laquelle nous avons effectué une série de tests sur les murs et les caissons.

Cette année de séchage nous servira donc à valider l'étalonnage des sondes de teneur en eau CS616 et CS650 par comparaison des données des sondes situées à gauche (CS616 left) et à droite (CS650 right) (cf. figure 4-11), car si les conditions hydriques et thermiques sont bien symétriques de part et d'autre du mur, les données renvoyées par les sondes devraient être identiques.

Le séchage du mur A50 et celui du mur B50 se sont déroulés en plusieurs étapes présentées dans les tableaux ci-dessous :

A50	
Jour	Action
0	Construction
22	Branchement des capteurs et mise en place d'une solution de carbonate de potassium (K_2CO_3 , 43%HR) dans les ambiances droite et gauche
31	Ouverture des portes
42	Fermeture des portes pour test d'étanchéité du caisson
49	Ouverture des portes
85	Séchage forcé par ventilation du mur (portes ouvertes) à droite et à gauche
108	Fermeture des portes et test d'étanchéité
122	Ouverture des portes et mise en place des thermistances de surface (sonde 107 droite et gauche pour mesure de T_{surf})
226	Fermeture des portes et pose de K_2CO_3 à gauche uniquement
330	Enlèvement des sels du côté gauche et les portes restent fermées
366	Fin de la période de séchage

Tableau 4-3 : Etapes dans le séchage du mur A50

B50	
Jour	Action
0	Construction
21	Branchement des capteurs et mise en place de sels de carbonate de potassium (K_2CO_3 , 43%HR) dans les ambiances droite et gauche
30	Ouverture des portes
41	Fermeture des portes pour test d'étanchéité du caisson
48	Ouverture des portes
51	Pose d'une solution de K_2CO_3 de chaque côté et portes fermées
55	Ouverture des portes et séchage forcé par ventilation + solution saline de K_2CO_3 toujours à droite et à gauche
76	Retrait des sels K_2CO_3 et ventilation toujours opérationnelle
84	Retrait de la ventilation, fermeture des portes et test d'étanchéité
107	Ouverture des portes
121	Ouverture des portes et mise en place des thermistances de surface (thermistances 107 droite et gauche pour mesure de T_{surf})
225	Fermeture des portes et pose de K_2CO_3 à gauche uniquement
329	Enlèvement des sels du côté gauche et les portes restent fermées
365	Fin de la période de séchage

Tableau 4-4 : Etapes dans le séchage du mur B50

La fréquence d'acquisition est de un point par heure durant les 114 premiers jours, puis de un point toutes les quinze minutes les 97 jours suivants et enfin de un point toutes les cinq minutes jusqu'au 365^{ème} jour.

4.3.1.1. Conditions hydriques et thermiques dans les ambiances

Comme on l'a dit précédemment, si on veut valider l'étalonnage des sondes de teneur en eau, il faut montrer que les conditions ambiantes sont symétriques de chaque côté des murs. Sur la figure 4-13 et la figure 4-14, on a tracé les conditions hydriques et thermiques des ambiances droite et gauche des murs B50 et A50, respectivement, mesurées par les sondes CS215 (non modifiées) installées dans les caissons.

D'un point de vue général, pour le mur B50 (figure 4-13), on peut *a priori* affirmer que, sur cette année de séchage, les conditions hydriques et thermiques sont symétriques de part et d'autre du mur, les différences en humidité relative et température entre la droite et la gauche étant tout à fait minimales et dans les marges d'erreur des sondes (cf. Partie 2). En effet, il apparaît que la solution de carbonate de potassium – censée réguler l'humidité relative à 43% et que l'on a placée du côté gauche du 225^{ème} au 329^{ème} jour, avec le côté droit fermé – n'a eu aucune influence sur les conditions hydriques et thermiques des ambiances. Malgré le fait que l'air de l'ambiance ne soit pas brassé, les 5kg de sels, contenus dans des bacs, ont été totalement saturés en cinq jours, signe d'une quantité d'humidité importante dans l'air. Nous allons tout de même regarder un peu plus avant cette zone dans le paragraphe suivant pour confirmer que les conditions de séchage ont bien été symétriques.

Pour le mur A50, l'affirmation semble plus difficile (figure 4-14). En effet, on note une différence marquée dans l'humidité relative mesurée dans les ambiances droite et gauche et particulièrement sur la période du 226^{ème} au 330^{ème} jour avec la solution saline du côté gauche, censée réguler l'humidité relative de l'ambiance.

Pour vérifier si on peut bien appliquer l'hypothèse de symétrie des conditions hydrique et thermique des ambiances – et par conséquent valider l'étalonnage des sondes de teneur en eau – nous allons nous servir des tests d'étanchéité des caissons qui ont été effectués sur la période de séchage.

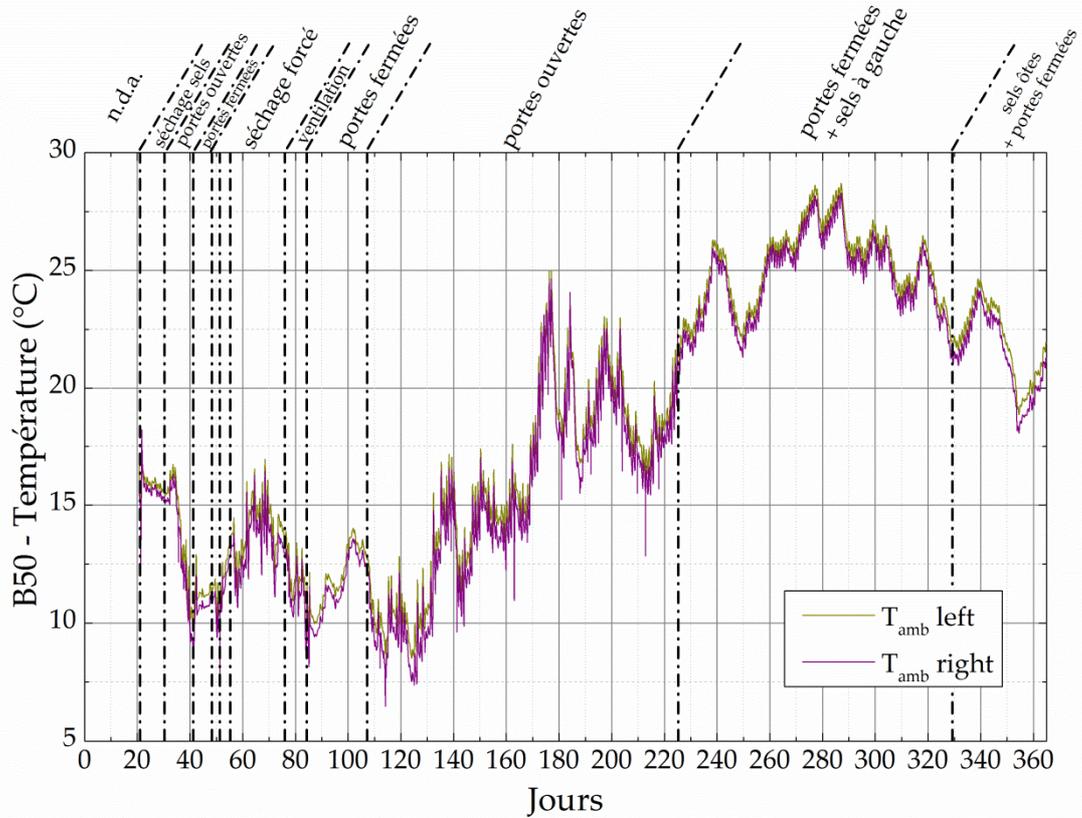
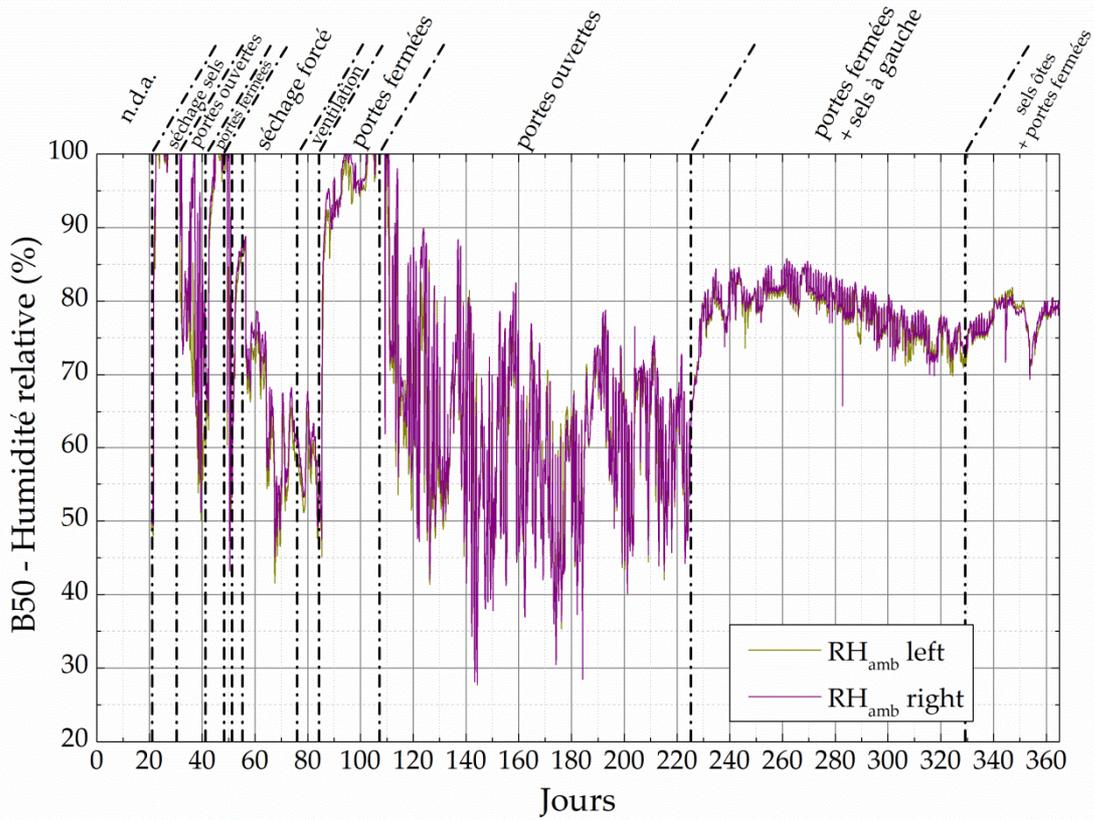


Figure 4-13 : Conditions hydrique et thermique dans les ambiances à droite et à gauche du mur B50 sur l'année du séchage (n.d.a. = no data available)

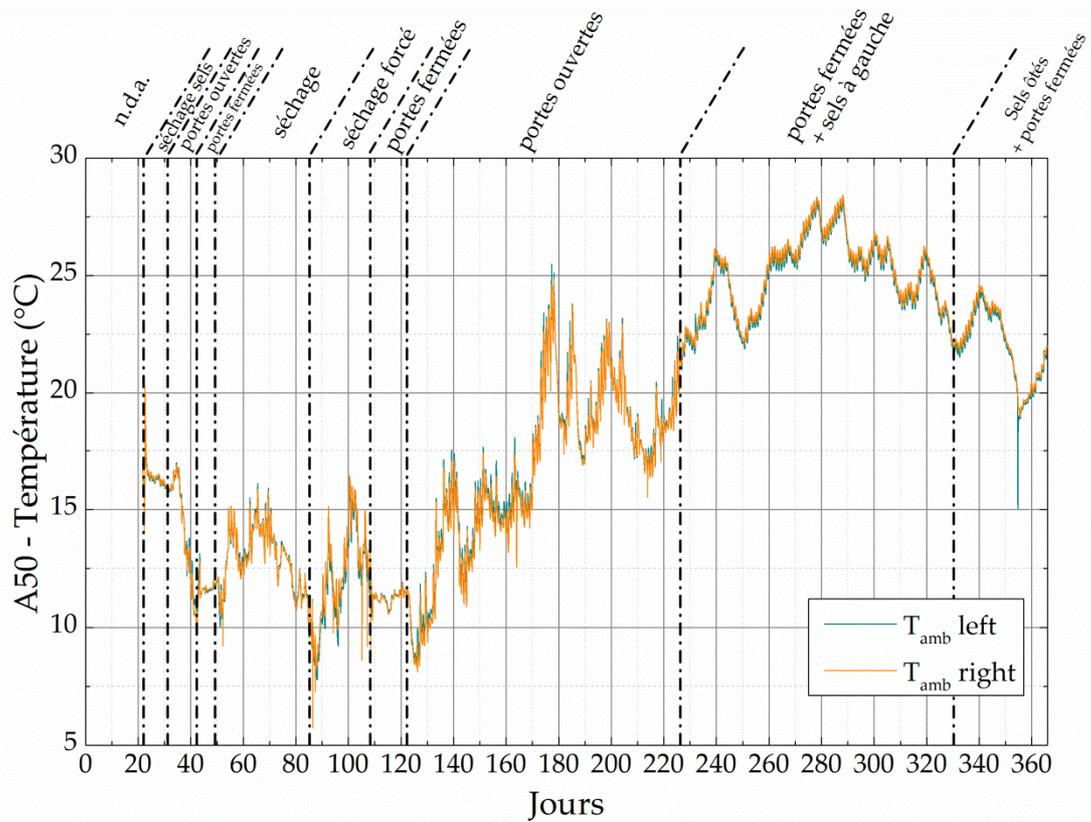
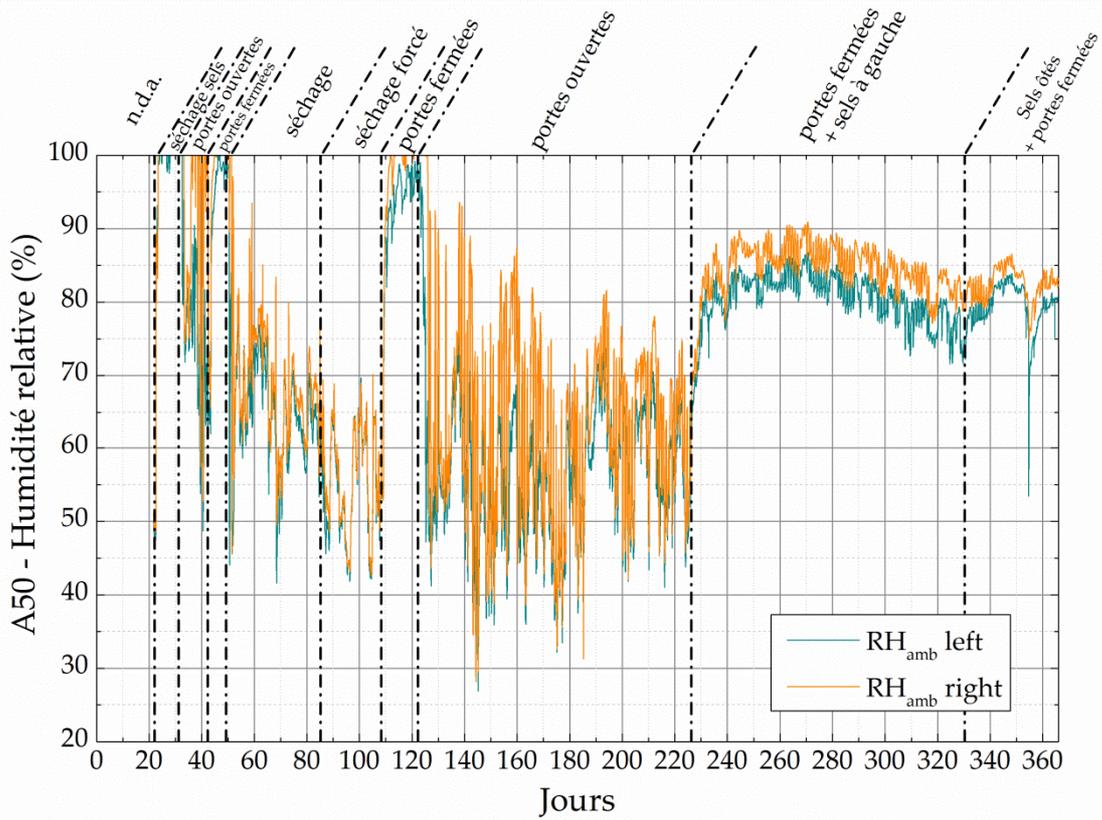


Figure 4-14 : Conditions hydrique et thermique dans les ambiances à droite et à gauche du mur A50 sur l'année du séchage (n.d.a. = no data available). N.B. La baisse brutale au 355^{ème} jour sur la température et l'humidité relative correspond à une ouverture à gauche du caisson au cours d'une visite du laboratoire

4.3.1.2. Etanchéité des caissons

Trois tests d'étanchéités ont été effectués sur les caissons contenant les murs A50 et B50 (cf. tableau 4-3 et tableau 4-4) afin de valider leurs conceptions et leurs designs. Ces tests consistent à fermer les portes des caissons de chaque côté des murs et ont eu lieu du 42^{ème} au 49^{ème} jour, du 108^{ème} au 122^{ème} jour et 226^{ème} au 366^{ème} jour pour le mur A50 et du 41^{ème} au 48^{ème} jour, du 84^{ème} au 107^{ème} jour et du 225^{ème} au 365^{ème} jour pour le mur B50.

4.3.1.2.1. Température et humidité relative du caisson B50

Commençons par examiner le caisson du mur B50 sur les trois périodes, que l'on a tracées sur la figure 4-15. On peut confirmer avec cette figure que ce caisson est étanche à l'air. En effet, les humidités relatives à gauche et droite du mur lors de ces trois tests (colonne de gauche) sont parfaitement corrélées et on note, encore une fois, que la pose de la solution saline à gauche lors du troisième test n'a eu aucun effet sur l'humidité relative de l'ambiance de ce côté qui reste bien supérieure (80%) à ce que devrait fournir la solution saline (43%). Lors des deux premiers tests, les ambiances gauche et droite ont été totalement saturées (100% HR) en raison de la désorption du mur encore fortement humide. Au cours du troisième test, l'humidité relative s'est stabilisée autour de 80% de chaque côté du mur et, par conséquent, dans le mur également (bien qu'on ne puisse pas mesurer cette humidité relative). On reviendra sur ceci lorsque l'on évoquera la teneur en eau sur cette période.

Lors du premier test, la température reste stable autour de 11°C et on note une différence entre le côté droit et le côté gauche mais qui reste dans l'erreur de la sonde (cf. Partie 2). Au cours du deuxième test, on observe également une différence, cependant, elle reste aussi dans la gamme d'erreur de mesure. En revanche, on observe tout de même des variations importantes de température et particulièrement lors du troisième test. En effet, sur toute sa durée, on observe des variations allant jusqu'à 5°C (entre le 290^{ème} et le 355^{ème} jour).

En résumé, si ce caisson est bien étanche à l'air, il ne semble pas totalement isolé thermiquement de l'ambiance extérieure. Néanmoins, même si on observe des variations, celles-ci sont corrélées et on peut alors confirmer la symétrie de part et d'autres de ce mur lors du séchage et celui-ci peut donc être utilisé pour valider l'étalonnage des sondes de teneur en eau CS616 et CS650.

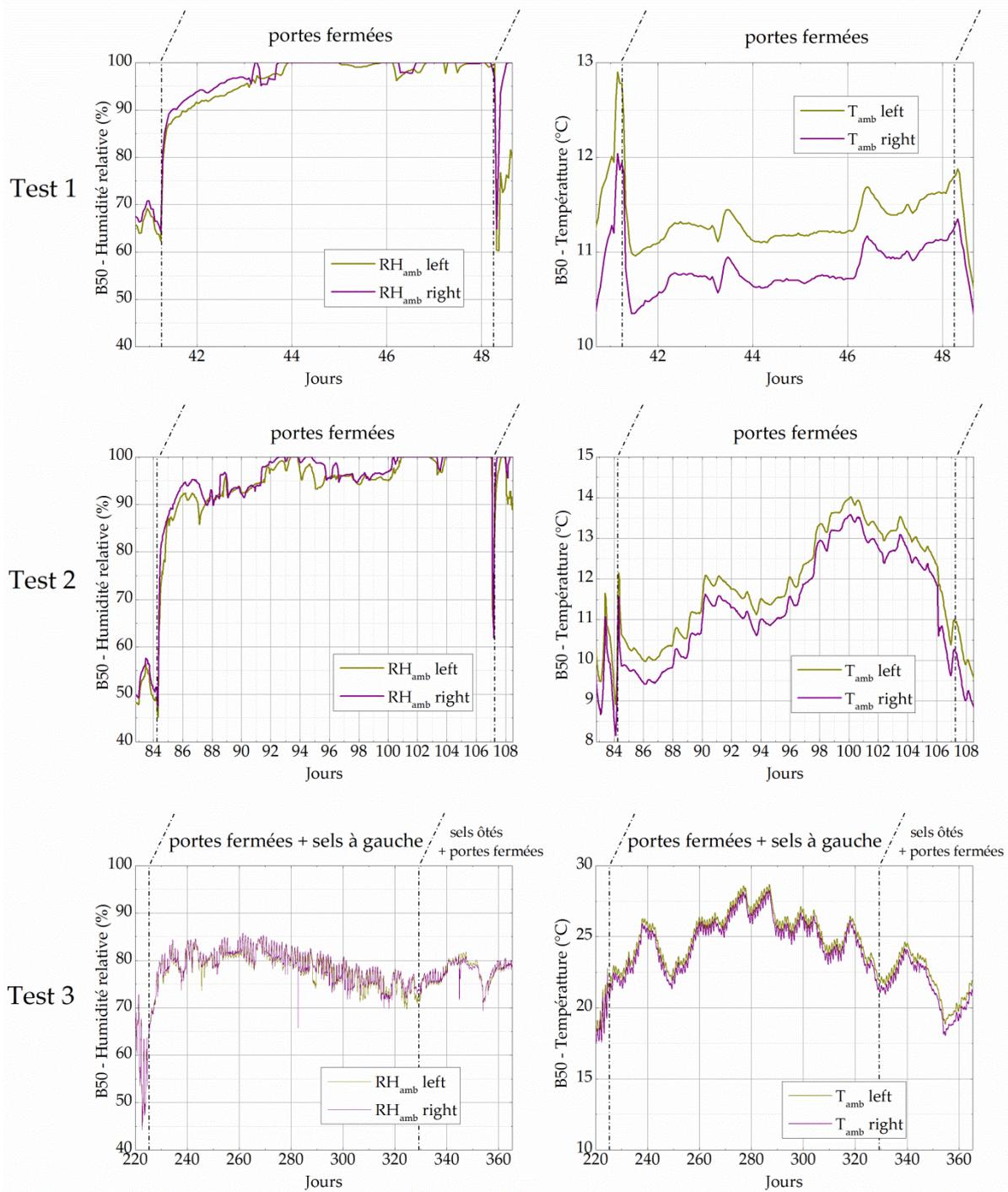


Figure 4-15 : Zooms sur les humidités relatives et les températures mesurées dans les ambiances du caisson à droite et à gauche du mur B50 lors des trois tests d'étanchéité

4.3.1.2.2. *Température et humidité relative du caisson A50*

Regardons maintenant le mur A50. Comme on peut le voir sur les zooms de ces périodes sur la figure 4-16, l'humidité relative (colonne de gauche) mesurée dans les ambiances au cours de ces tests augmente rapidement et fortement jusqu'à saturer l'ambiance lors des deux premiers tests (i.e. HR = 100%), mais uniquement du côté droit. Lors de ces deux premiers tests, l'humidité relative mesurée à gauche du mur A50 est toujours inférieure à celle mesurée à droite de 2 à 3%. A ce niveau, l'erreur de mesure des sondes CS215 (cf. Partie 2) pourrait encore expliquer cet écart. Au cours du troisième test, la pose d'une solution saline de K_2CO_3 (43% HR) du 231^{ème} jour au 330^{ème} du côté gauche, le droit étant simplement fermé, n'a pas d'effet notable sur l'humidité relative de l'ambiance (la quantité de sel est identique sur chacun des murs). Elle reste, comme pour le mur B50, bien supérieure à 43% du côté gauche, à savoir 80% en moyenne à gauche sur la période. De plus, si cette solution saline n'a pas d'influence sur l'humidité relative de l'ambiance, on devrait donc avoir une même valeur du côté droit comme du côté gauche. Or le côté droit est à une humidité relative moyenne de 85% sur cette période tandis que le côté gauche est à 80% en moyenne et, cette différence ne peut plus être imputée à la seule erreur de mesure.

Les écarts d'humidité relative observés lors des trois tests d'étanchéité du caisson du mur A50 peuvent avoir deux origines : la première serait une différence de température entre le côté gauche et le côté droit qui impliquerait une différence de pression de vapeur saturante ($HR = P_v/P_{vs}(T)$) et par conséquent d'humidité relative ; ou bien un problème d'étanchéité à l'air (même minime) du côté gauche du caisson.

Examinons tout d'abord la première hypothèse. Si on regarde les variations de température dans les ambiances gauche et droite au cours de ces trois tests (colonne de droite de la figure 4-16), on peut voir qu'elles sont parfaitement corrélées malgré les variations dues à l'isolation thermique peu performante, comme on l'a vu avec le caisson du mur B50 (jusqu'à 8°C d'écart lors du troisième test). Des écarts de températures ne peuvent donc pas expliquer une différence de pression de vapeur saturante entre les côtés droit et gauche.

Il reste donc la seconde hypothèse : une fuite d'air du côté gauche du caisson du mur A50. L'humidité relative mesurée du côté gauche est toujours inférieure au côté droit lors de ces trois tests d'étanchéité. Lors des deux premiers tests, on pouvait considérer que l'on rentrait dans la gamme d'erreur de mesure des sondes, cependant le troisième laisse peu de place au doute quant à la présence d'une fuite du côté gauche du caisson A50.

Il apparaît donc que, comme le caisson du mur B50, celui-ci ne soit pas suffisamment isolé thermiquement et qu'il y ait, de surcroît, une fuite d'air du côté gauche. Même si cette fuite semble minime (5% HR de différence au cours du troisième test), la question qui se pose à présent est l'impact de cette fuite sur la symétrie que l'on veut obtenir des conditions hydriques et thermiques lors du séchage du mur et, par extension, la validation ou non de l'étalonnage des sondes de teneur en eau utilisant ce mur.

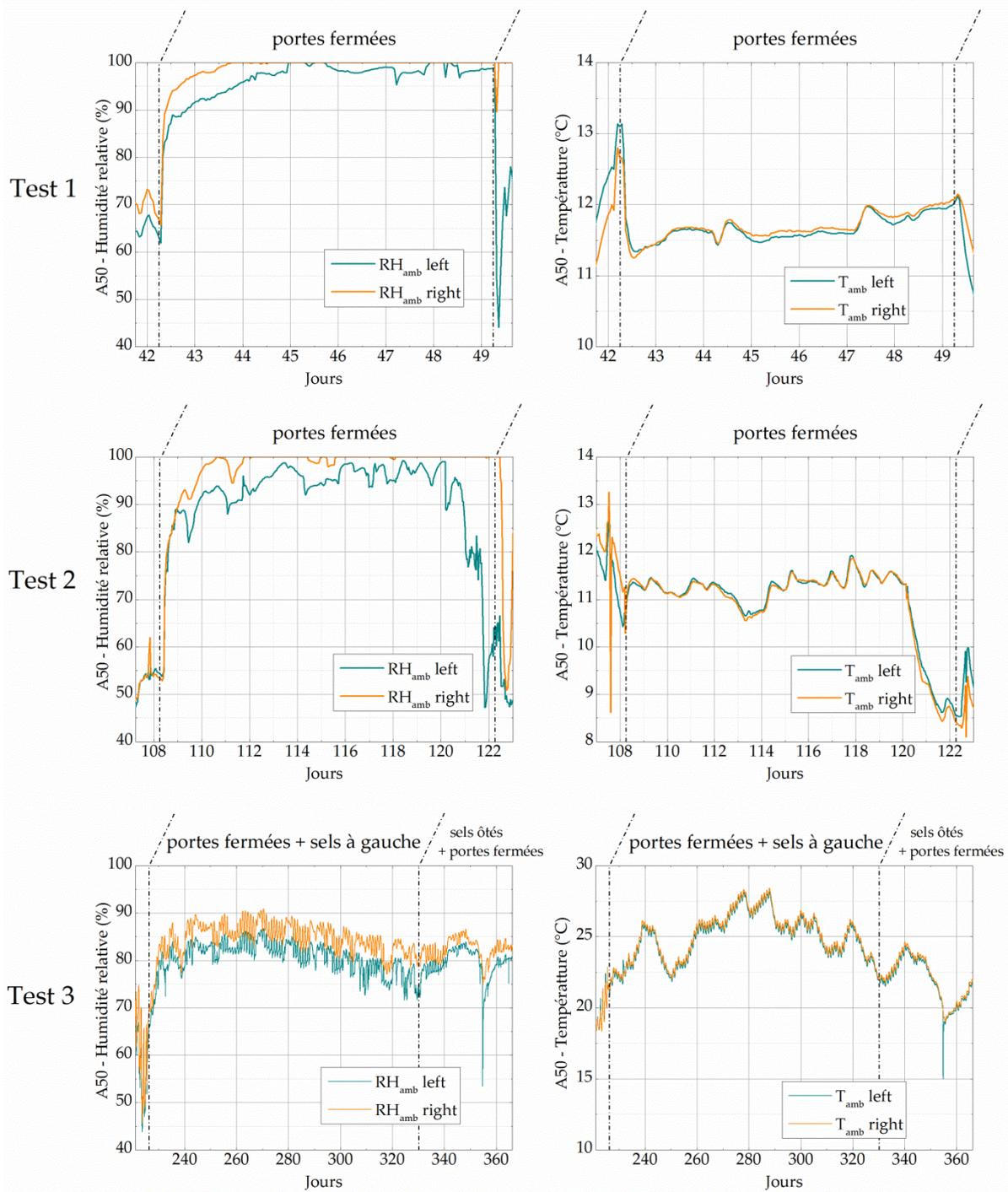


Figure 4-16 : Zooms sur les humidités relatives et les températures mesurées dans les ambiances du caisson à droite et à gauche du mur A50 lors des trois tests d'étanchéité

4.3.1.2.3. Teneurs en eau dans les murs A50 et B50 lors des tests d'étanchéité

Nous allons donc maintenant nous intéresser aux sondes CS616 (à gauche) et CS650 (à droite) dans chacun des murs A50 et B50.

Regardons donc de plus près l'influence de ces trois périodes de fermetures des portes sur la teneur en eau au niveau des réflectomètres CS616 et CS650. On a tracé sur la figure 4-17 les teneurs en eau renvoyées par les sondes CS616 et CS650 situées à droite et à gauche, à 50 cm de hauteur, dans les murs A50 et B50 sur les trois périodes durant lesquelles les portes sont fermées en utilisant les équations d'étalonnage déterminées dans la Partie 2 de cette thèse.

Commençons par le mur B50. On a tracé sur la colonne de gauche de la figure 4-17 les teneurs en eau renvoyées par les sondes CS616 et CS650. On peut voir que ces teneurs en eau de ce mur restent constantes et remarquablement proches lors des tests d'étanchéité :

- Au premier test : $\begin{cases} CS616 \{\theta_l \text{ left} = 26\% \\ CS650 \{\theta_l \text{ right} = 25\% \end{cases}$
- Au second test : $\begin{cases} CS616 \{\theta_l \text{ left} = 11\% \\ CS650 \{\theta_l \text{ right} = 10\% \end{cases}$

En revanche, lors du 3^{ème} test, qui a duré 140 jours, on constate une baisse régulière de la teneur en eau partant de $\theta_l \text{ left} = 5,8\%$ jusqu'à $\theta_l \text{ left} = 4,9\%$ pour la gauche et de $\theta_l \text{ right} = 5\%$ jusqu'à $\theta_l \text{ right} = 3,5\%$ à droite. Cette baisse est due à l'équilibre qui doit s'établir entre l'humidité relative dans le mur et l'humidité relative des ambiances. Même si on ne peut pas mesurer l'humidité relative au sein du mur, on peut se référer à la courbe de sorption/désorption de ce pisé que l'on a établie dans la Partie 3, et on constate que l'humidité relative d'équilibre pour ces teneurs en eau est de l'ordre de 80% et, c'est bien vers cette humidité relative que l'on tend, comme on a pu le mesurer sur cette même période (cf. paragraphe 4.3.1.2.1, figure 4-16). Etant donné le volume du mur, cet équilibre n'a pas pu être atteint au bout de 140 jours.

Tout ceci est parfaitement cohérent et confirme, une fois de plus, que ce caisson est bien étanche. On pourra alors utiliser les données de la CS616 left et de la CS650 de ce mur pour valider l'étalonnage sur le séchage de ce mur.

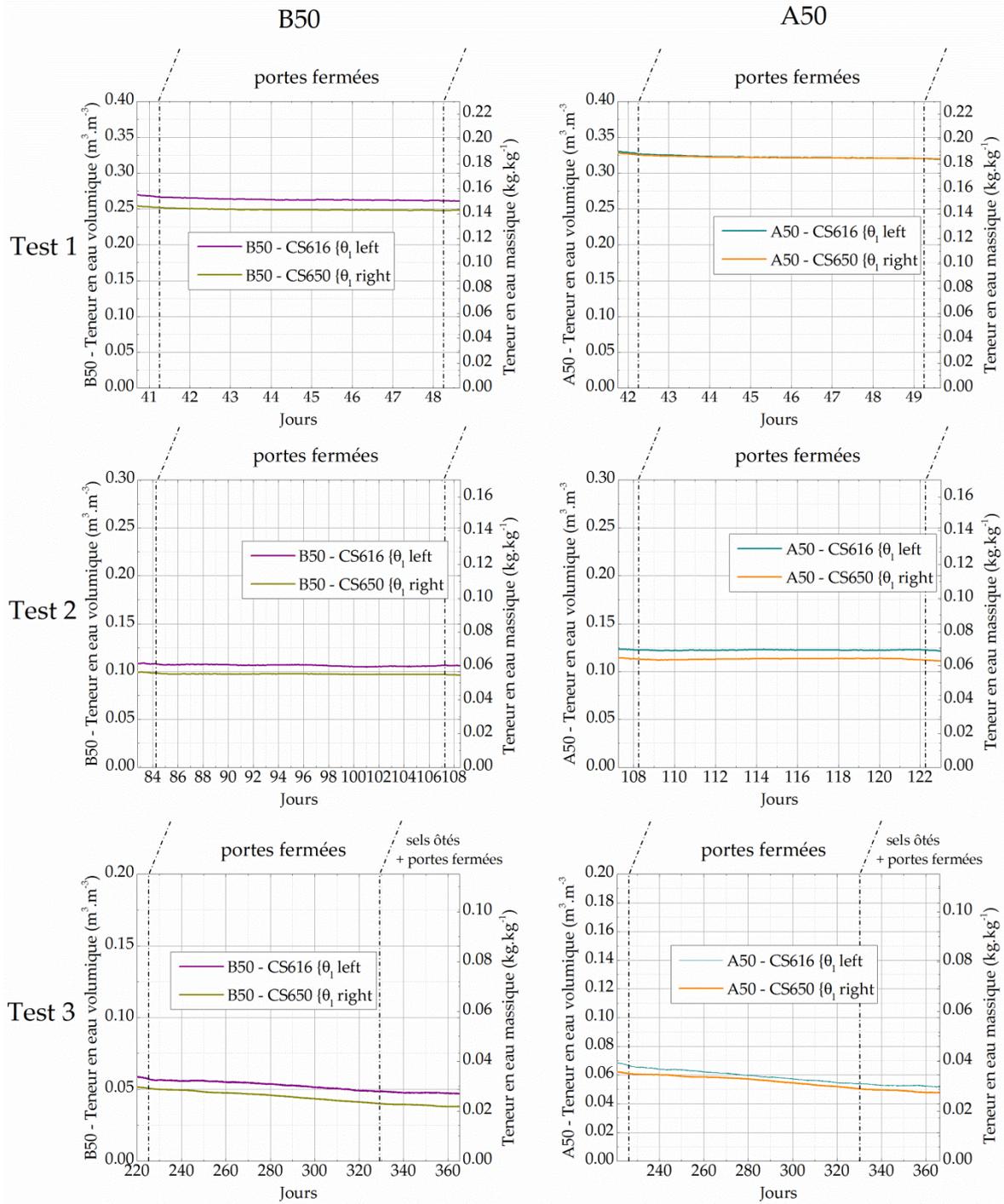


Figure 4-17 : Zooms sur les teneurs en eau dans les murs A50 et B50 lors des trois tests d'étanchéités des caissons. On relève la teneur en eau sur les CS616 et CS650 situées à gauche et à droite dans les murs à 50 cm de hauteur

Regardons à présent le mur A50 pour lequel on a pu remarquer une fuite du côté gauche de son caisson. Sur la colonne de droite de la figure 4-17, on peut voir que pour les tests d'étanchéité 1 et 2 les teneurs en eau relevées dans les murs par les sondes CS616 left et CS650 right restent ici aussi constantes et proches :

- Au premier test : $\begin{cases} CS616 \{\theta_l \text{ left} = 32\% \\ CS650 \{\theta_l \text{ right} = 32\% \end{cases}$
- Au second test : $\begin{cases} CS616 \{\theta_l \text{ left} = 12\% \\ CS650 \{\theta_l \text{ right} = 11\% \end{cases}$

Lors du troisième test, on a la même conclusion que pour le mur B50 : on observe une baisse continue de la teneur en eau jusqu'à ce que l'humidité relative du mur s'équilibre avec l'humidité relative des ambiances autour de 85% pour ces teneurs en eau. Ici aussi, on peut voir que l'équilibre n'est pas encore tout à fait atteint après 140 jours, étant donné le volume du mur.

De plus, on observe que la teneur en eau à gauche, lors des tests 2 et 3, est supérieure à la teneur en eau à droite (+0,9% en moyenne au deuxième test et +0,35% au troisième). Si la fuite avait eu un impact important, on aurait dû faire l'observation inverse (plus élevée à droite qu'à gauche).

On peut donc en conclure que l'écart d'humidité relative que l'on a pu noter dans l'ambiance gauche de ce caisson (en raison d'une fuite) n'a eu aucun impact sur la teneur en eau de ce mur. On peut alors faire l'hypothèse de symétrie des conditions hydriques et thermiques à gauche et à droite lors du séchage de ce mur et comparer les données renvoyées par les sondes CS616 left et CS650 right placées dans ce mur pour valider l'étalonnage.

4.3.1.3. Validation de l'étalonnage des sondes de teneur en eau

Dans les paragraphes précédents, on a confirmé la symétrie des conditions hydriques et thermiques lors du séchage des murs A50 et B50.

Pour valider l'étalonnage des sondes de teneur en eau CS616 et CS650, il faut comparer ce qui peut l'être. Si les conditions hydriques et thermiques lors du séchage sont symétriques, on peut alors comparer les teneurs en eau renvoyées par les sondes situées à gauche (CS616) et à droite (CS650) dans les murs (donc à 10 cm de la surface à environ 50 cm de hauteur).

On a tracé sur les figures suivantes (figure 4-18 pour le mur A50 et figure 4-19 pour le mur B50) la teneur en eau mesurées par ces réflectomètres.

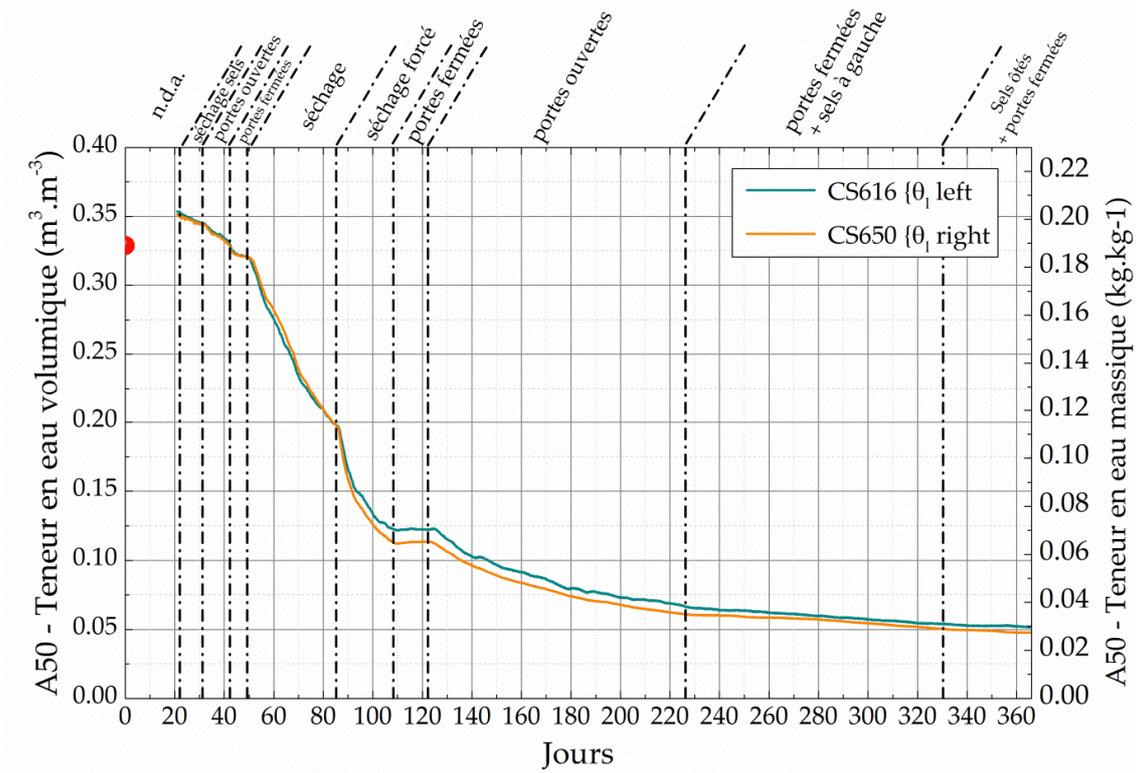


Figure 4-18 : Teneurs en eau renvoyées par les sondes CS616 et CS650 situées à droite et à gauche dans le mur A50. Le point rouge sur l'axe des ordonnées est la teneur en eau de fabrication mesurée par prélèvement d'échantillon lors de la fabrication (cf. Tableau 4-1)

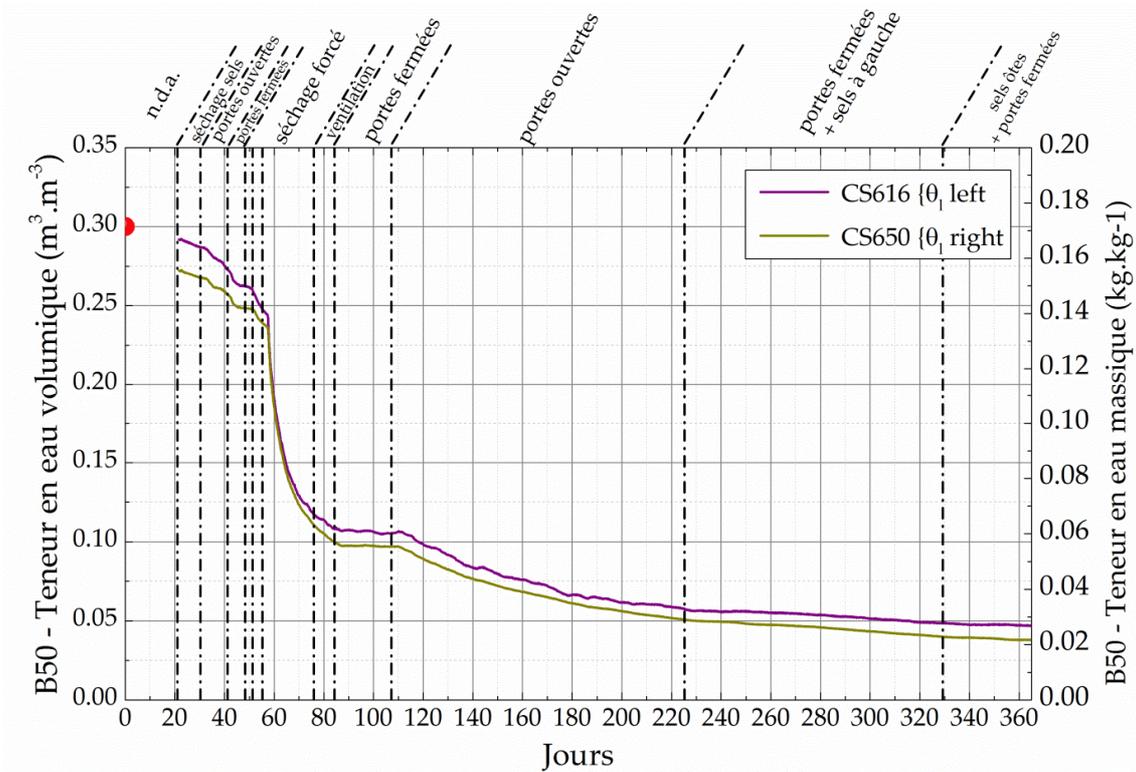


Figure 4-19 : Teneurs en eau renvoyées par les sondes CS616 et CS650 situées à droite et à gauche dans le mur B50. Le point rouge sur l'axe des ordonnées est la teneur en eau de fabrication mesurée par prélèvement d'échantillon lors de la fabrication (cf. Tableau 4-1)

On peut donc comparer les valeurs renvoyées par chacune de ces sondes. Les conditions de séchage sur chacune des faces gauches et droites des murs A50 et B50 étant identiques, les teneurs en eau à gauche et à droite dans le mur devraient être identiques. L'erreur sur cette grandeur entre les deux sondes (donc CS616 à gauche et CS650 à droite) est quantifiée par le calcul suivant :

$$\Delta\theta_l = \frac{|\theta_{CS616} - \theta_{CS650}|}{\theta_{CS616}} \quad (4.1)$$

Pour le mur A50, la figure 4-20 montre un écart maximal de 10% sur la teneur en eau entre les sondes CS616 et CS650 pour une teneur en eau de 7%.

En revanche, un écart plus important est observé entre les sondes CS616 left et CS650 right du mur B50. Tout d'abord, on constate un écart absolu significatif de 2% de teneur en eau en début d'essai. L'écart relatif le plus important se situe néanmoins dans les faibles teneurs en eau, à 5%, avec une erreur de 20%.

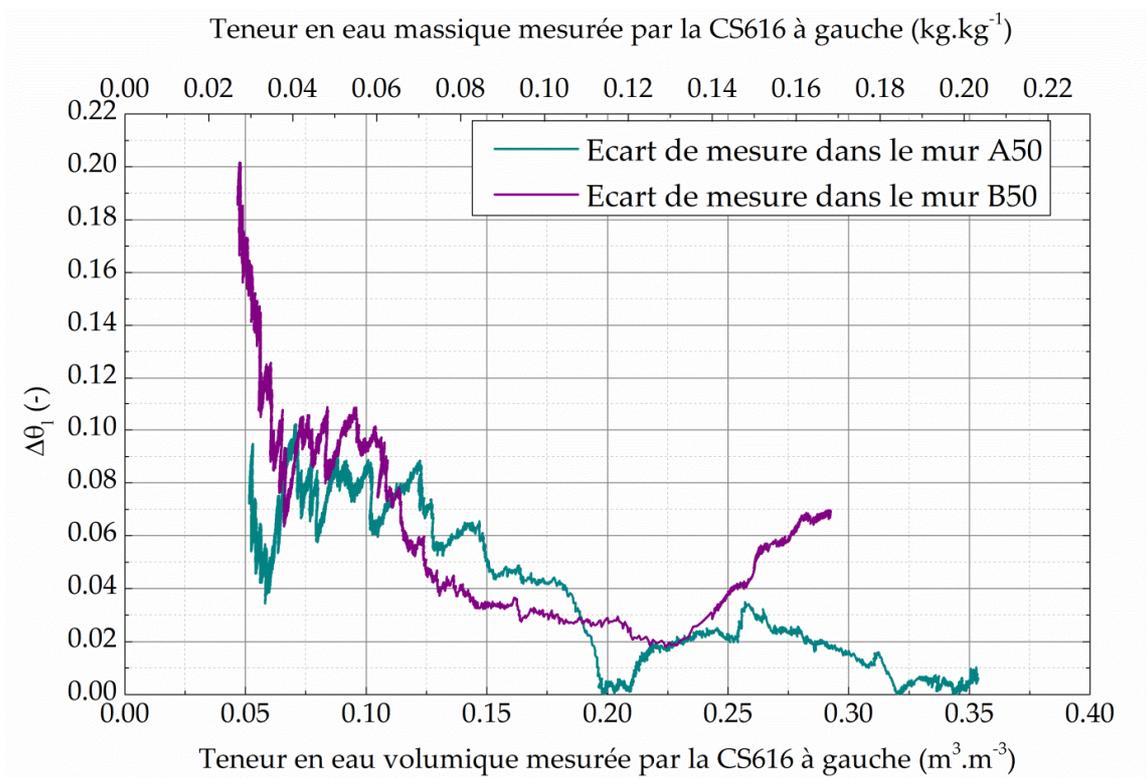


Figure 4-20 : Ecart de mesure $\Delta\theta_l$ de la teneur en eau entre les sondes CS616 et CS650 situées à gauche et à droite dans les murs A50 et B50

Ces écarts plus importants sur le mur B50 que sur le mur A50 pourraient s'expliquer par un emballage du mur défectueux sur le côté droit après sa fabrication. Un séchage du mur s'est

produit par cette face durant les 21 jours stockage ayant pour conséquence de déséquilibrer la teneur en eau de part et d'autre du mur.

Ainsi, les différentes valeurs obtenues par les sondes en cours de test sont cohérentes et tendent à valider la fiabilité des mesures effectuées. L'utilisation de sondes TDR suivant la procédure d'étalonnage présentée dans la Partie 2 semble donc adéquate pour estimer la teneur en eau dans les murs en terre crue d'une habitation avec une équation d'étalonnage du 1^{er} ordre nécessitant moins de coefficients d'étalonnage, donc moins de mesures, que le nombre préconisé par le fabricant.

4.3.2. MISE EN EVIDENCE DE L'EFFET DE LA GRAVITE LORS DU SECHAGE

Le séchage des murs A50 et B50 a également permis de mettre en évidence les effets de la gravité sur l'eau contenue dans un mur en pisé.

Sur la figure 4-21 sont représentées les courbes de teneur en eau relevées par les quatre sondes CS616 (CS616 top, CS616 left, CS616 mid. et CS616 bot.) et la CS650 (CS650 right) du mur A50 et sur la figure 4-22 sont tracées les teneurs en eau relevées par les deux CS616 (CS616 left et CS616 mid.) et la CS650 (CS650 right) placées dans le mur B50. La teneur en eau de fabrication est marquée par un point rouge sur l'axe des ordonnées à gauche.

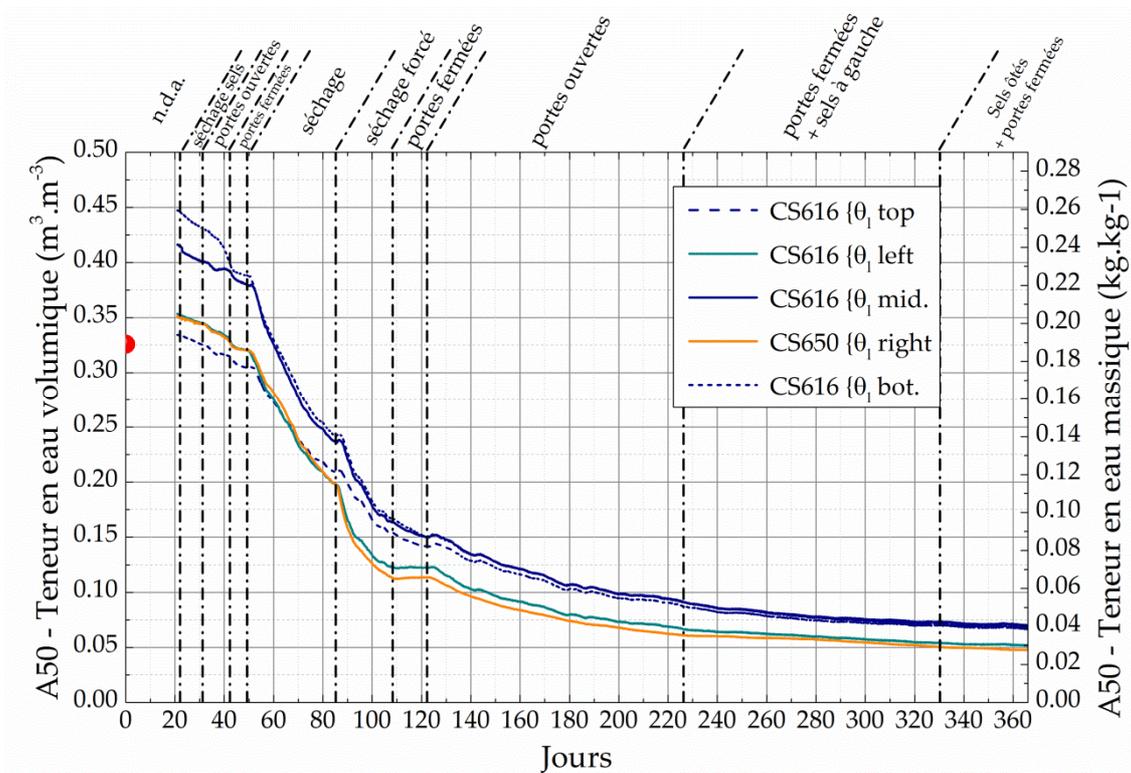


Figure 4-21 : Teneurs en eau lors du séchage du mur A50 mesurées par les sondes CS616 et CS650

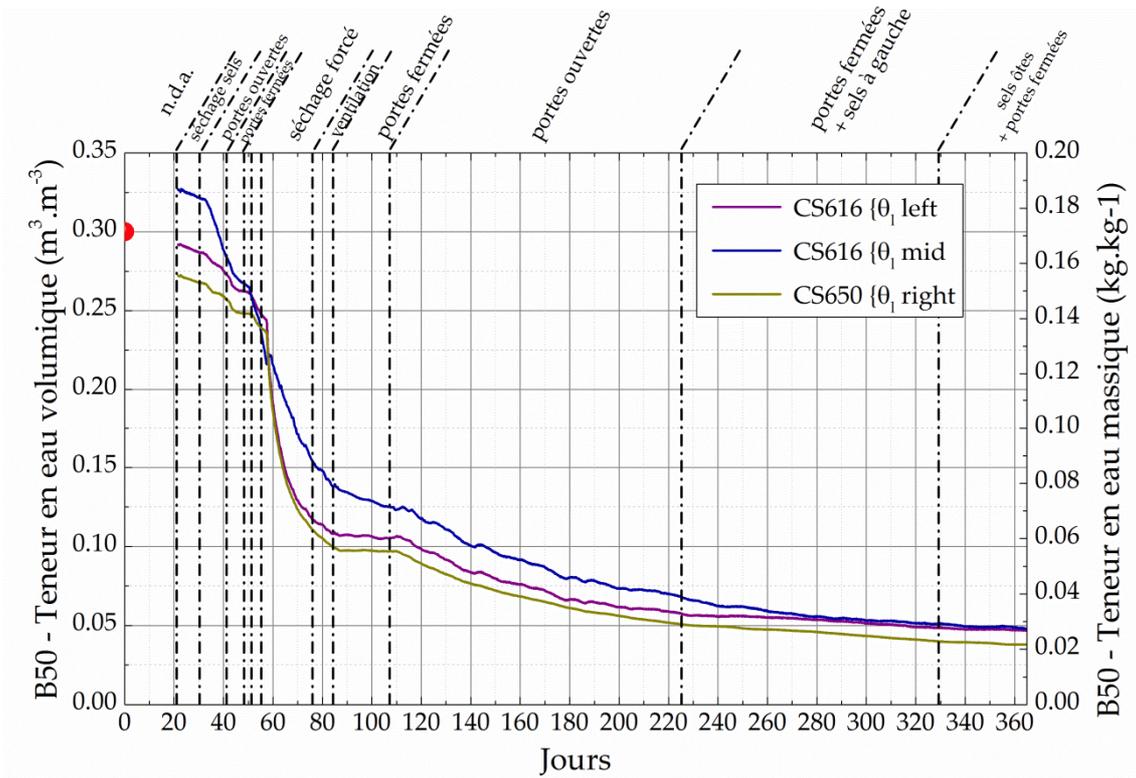


Figure 4-22 : Teneurs en eau lors du séchage du mur B50 mesurées par les sondes CS616 et CS650

Les valeurs initiales mesurées après 21 et 22 jours sont variables en fonction de la position de chaque sonde. Les teneurs en eau volumique renvoyées par les sondes sont :

A50		
Sondes	Teneur en eau volumique (%)	Teneur en eau massique (%)
CS616 top	33,4	19,3
CS616 left	35,4	20,4
CS616 middle	41,6	24,0
CS650 right	35,2	20,3
CS616 bottom	44,7	25,8

Tableau 4-5 : Teneurs en eau mesurées par les sondes 22 jours après la fabrication du mur A50

B50		
Sondes	Teneur en eau volumique (%)	Teneur en eau massique (%)
CS616 left	29,2	16,9
CS616 middle	32,7	18,9
CS650 right	27,2	15,7

Tableau 4-6 : Teneurs en eau mesurées par les sondes 21 jours après la fabrication du mur B50

Dans le tableau 4-5, on peut voir que les teneurs en eau mesurées par les sondes placées au cœur du mur A50 (CS616 top, CS616 mid. et CS616 bot.) sont plus élevées que la teneur en eau de fabrication et, il en va de même pour la sonde CS616 mid. placée au centre du mur B50. Les sondes situées sur les côtés du mur A50 renvoient également une valeur plus élevée que celle de fabrication (35,4% à gauche et 35,2% à droite). En revanche, dans le mur B50, les teneurs en eau à gauche et à droite sont plus faibles que celle de fabrication (respectivement 29,2% et 27,6%).

On peut s'étonner que dans le mur A50, on observe des valeurs de teneurs en eau volumique qui soient supérieures à la porosité estimée de ce pisé (34,5%, cf. Partie 3) dans le centre du mur et en partie basse. Cela signifie que la densité du matériau est plus faible dans ces zones (dans la Partie 3, nous avons mesuré une densité de $1,73 \pm 0,04$). La démolition du mur est prévue, il suffira alors de prélever des échantillons et de mesurer leur densité.

Néanmoins, dans le mur A50, on peut observer que la teneur en eau mesurée par les sondes situées en partie haute (CS616 top), au centre (CS616 mid.) et en partie basse (CS616 bot.) convergent finalement vers une même valeur à partir du 120^{ème} jour pour ensuite rester identiques durant tout le reste du séchage (figure 4-23).

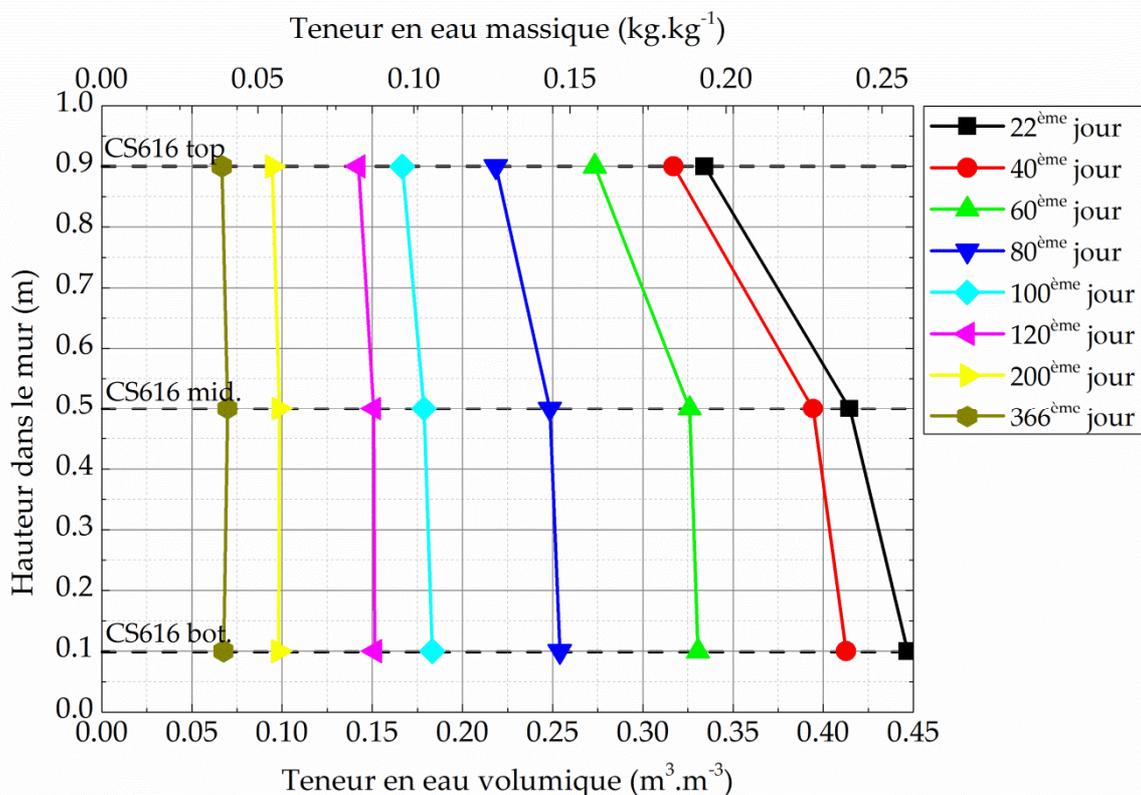


Figure 4-23 : Teneur en eau au centre du mur A50 au cours du temps en fonction de la hauteur (CS616 top, mid. et bot.)

Mais la question qui se pose alors est celle de l'influence de la gravité sur la teneur en eau. En effet, on s'interroge en fait la validité des modèles de couplage qui, pour la grande majorité, négligent les effets gravitaires et pourraient ne pas être adaptés pour la modélisation du séchage d'un mur en pisé ; ce séchage pouvant donc nécessiter une modélisation *ad-hoc* (pour une étude sur le sujet on se référera aux travaux de master de L. Soudani (Soudani, 2013)).

4.3.3. SYSTEME DE REGULATION

Comme présenté au paragraphe 4.2.4, le caisson du mur A30 a été équipé avec un groupe capable de produire de la chaleur ou du froid et, de réguler l'humidité relative dans l'ambiance gauche.

Après plusieurs déboires durant et peu après l'installation (régulateur d'humidité relative gelé en phase d'essai, électrovanne bouchée,...), le temps imparti pour la thèse nous a permis de lancer deux essais sur ce mur. Ceux-ci ont permis d'éprouver le système de régulation car, si celui-ci donne satisfaction, sept autres de ce type seront achetés pour équiper les autres caissons. Les essais que nous avons lancé se sont voulus « simples » afin d'étudier les phénomènes qui se produisent au cœur d'un mur en pisé dans des conditions moins complexes qu'un mur exposé aux conditions climatiques extérieures.

Avant chaque essai, un temps de latence d'au moins huit jours, portes des enceintes closes, est respecté afin de stabiliser les ambiances du caisson.

4.3.3.1. Essai 1 – Cycle de température et humidité relative constante

Le premier essai a consisté en une consigne d'un cycle journalier de température de -5°C à 12°C avec une humidité relative constante à 50%. Le système de régulation autorisant 8 consignes sur 24h, le programme est présenté dans le tableau 4-7. La porte du côté droit restera fermée durant toute la période de l'essai.

Phase	Durée (h)	Température (°C)	Humidité relative (%)
1	6	-5	50
2	3	0	50
3	3	5	50
4	4	12	50
5	2	8	50
6	2	0	50
7	2	-5	50
8	2	-5	50

Tableau 4-7 : Phasage du premier programme de test du système de régulation installé sur le côté gauche du caisson A30

Sur la figure 4-24, on a représenté la température de l'ambiance gauche (T_{amb} left) où l'on a la consigne. La première remarque que l'on peut faire sur la figure 4-24 est que si le système a bien respecté le cycle journalier en termes de phasage, il n'a pas respecté correctement la consigne de température variant de -5°C à 12°C . Les oscillations, dans la partie négative sont dues à la régulation, cependant, la température moyenne de cette régulation est de -6°C et non de -5°C . De même, dans les températures positives, le maximum atteint est de 8°C en moyenne pour une consigne à 12°C . Ce système sera donc limitant et ces écarts à considérer pour les essais futurs.

Passons maintenant à l'humidité relative que l'on a tracé sur la figure 4-25. On peut voir sur le second graphe de la figure 4-24 des variations allant de 50 à 100% d'humidité relative dans l'air pendant l'essai dans l'ambiance gauche alors que la consigne était une humidité constante de 50%. Il apparaît donc que le système de régulation de l'humidité éprouve quelques difficultés (au moins dans ces conditions de fonctionnement) et sera encore plus limitant.

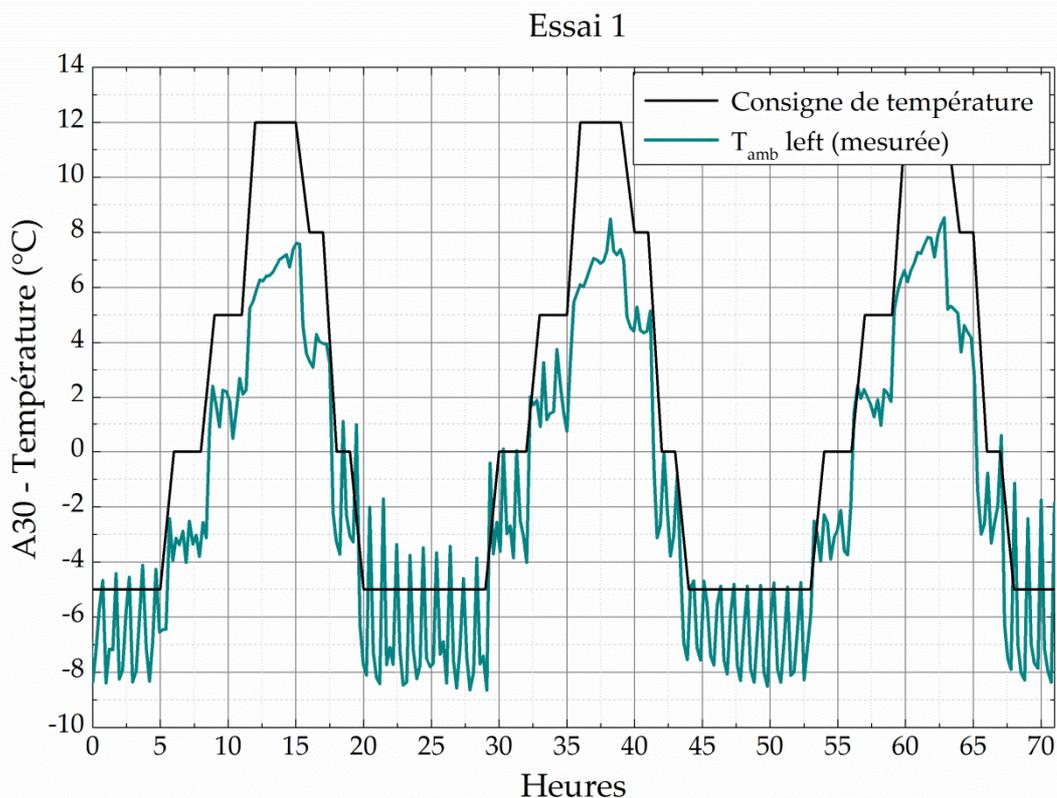


Figure 4-24 : Température de consigne et température mesurée dans l'ambiance gauche du caisson du mur A30 lors de l'essai 1 du système de régulation

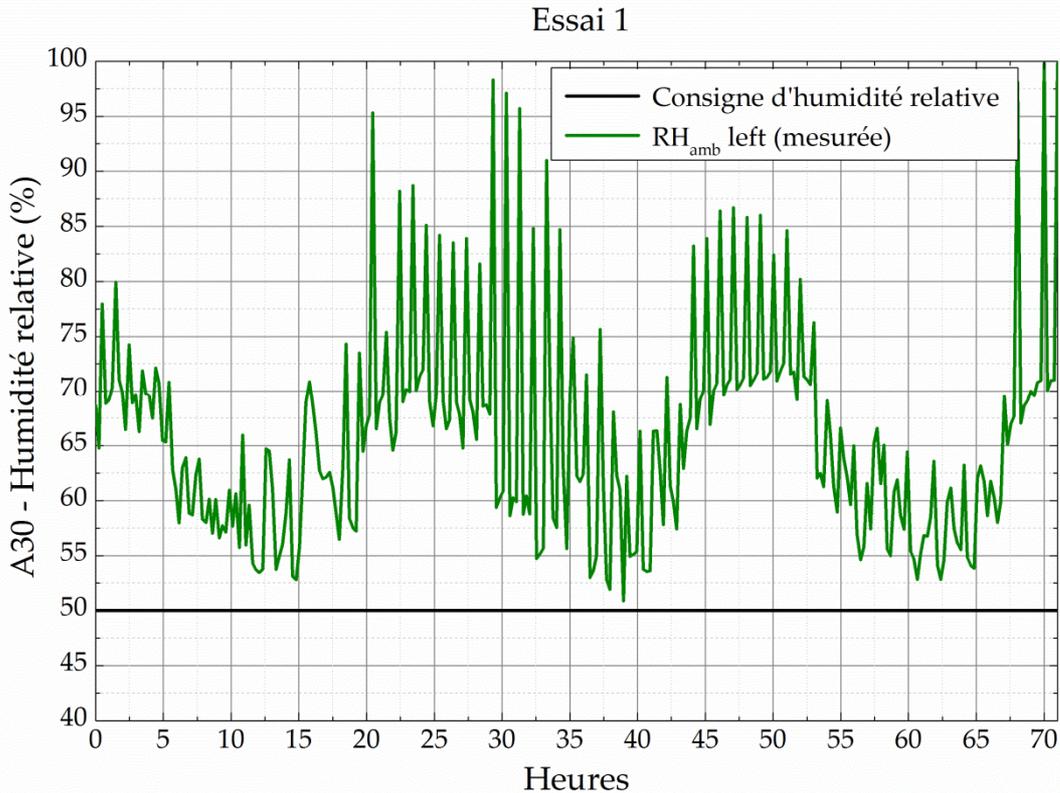


Figure 4-25 : Humidité relative de consigne et humidité relative mesurée dans l'ambiance gauche du caisson du mur A30 lors de l'essai 1 du système de régulation

4.3.3.2. Essai 2 – Température et humidité relative constantes

L'objectif de cet essai était de tester la capacité du système de régulation à conserver une température et une humidité relative constantes.

Trois consignes ont été testées :

- Phase 1 : 50°C – 60%HR sur 5 jours
- Phase 2 : 40°C – 60%HR sur 4 jours
- Phase 3 : 35°C – 60%HR sur 4 jours

Sur la figure 4-26 on a tracé ces trois consignes théoriques de températures ainsi que les valeurs relevées par les sondes de températures. On peut voir que sur la phase 1, le système de régulation n'a pas pu atteindre la consigne demandée de 50°C. La température maximale atteinte est de 46°C avec des oscillations de $\pm 1^\circ\text{C}$. Le système s'est alors mis en défaut et nous avons alors dû baisser la consigne.

Les oscillations de régulation sont de moindre amplitude dans les phases deux et trois : $\pm 0,5^\circ\text{C}$. La régulation semble plus aisée pour le système sur ces plages de température.

De même, sur la figure 4-27, on peut observer également que la consigne en humidité relative n'est pas respectée et qu'elle est proche de 30% dans la phase 1, de 50% dans la phase 2 et de 40% dans la phase 3. Le régulateur peine toujours à fournir la consigne demandée.

Si le système de régulation parvient à conserver correctement une consigne de température, il peine en revanche à établir une humidité relative constante. Ces variations seront donc à prendre en considération lors d'essais sur le comportement hygrothermique des murs en pisé.

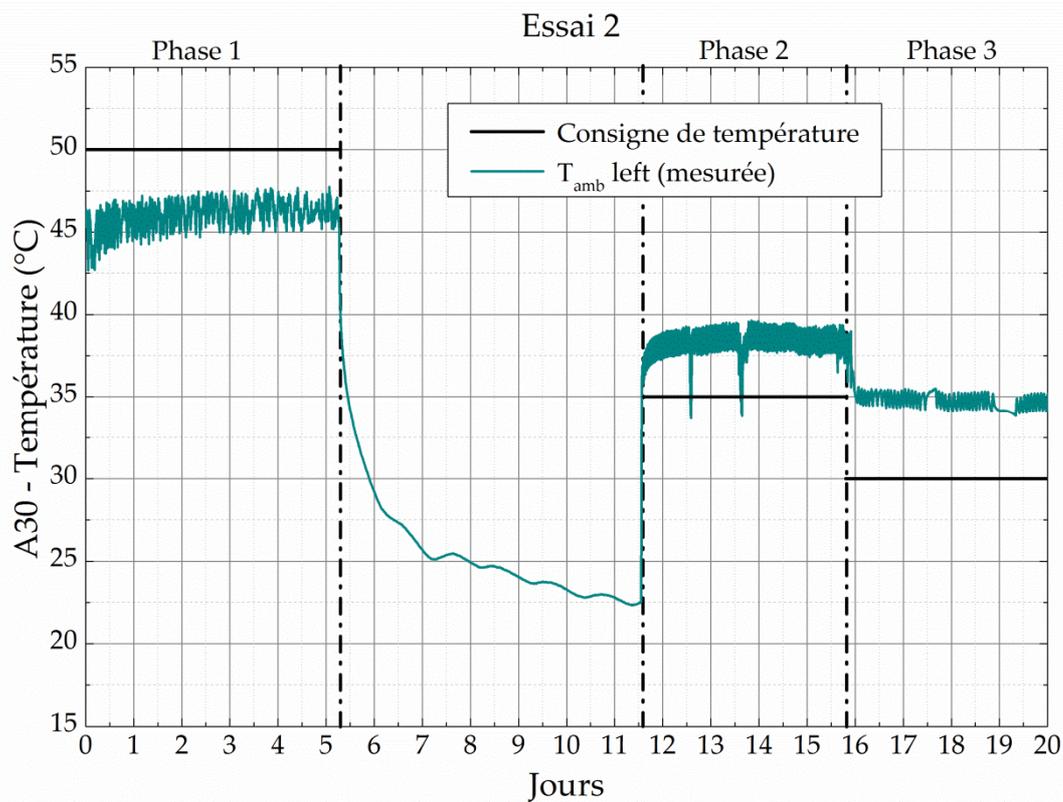


Figure 4-26 : Température de consigne et température mesurée dans l'ambiance gauche du caisson du mur A30 lors de l'essai 2 du système de régulation

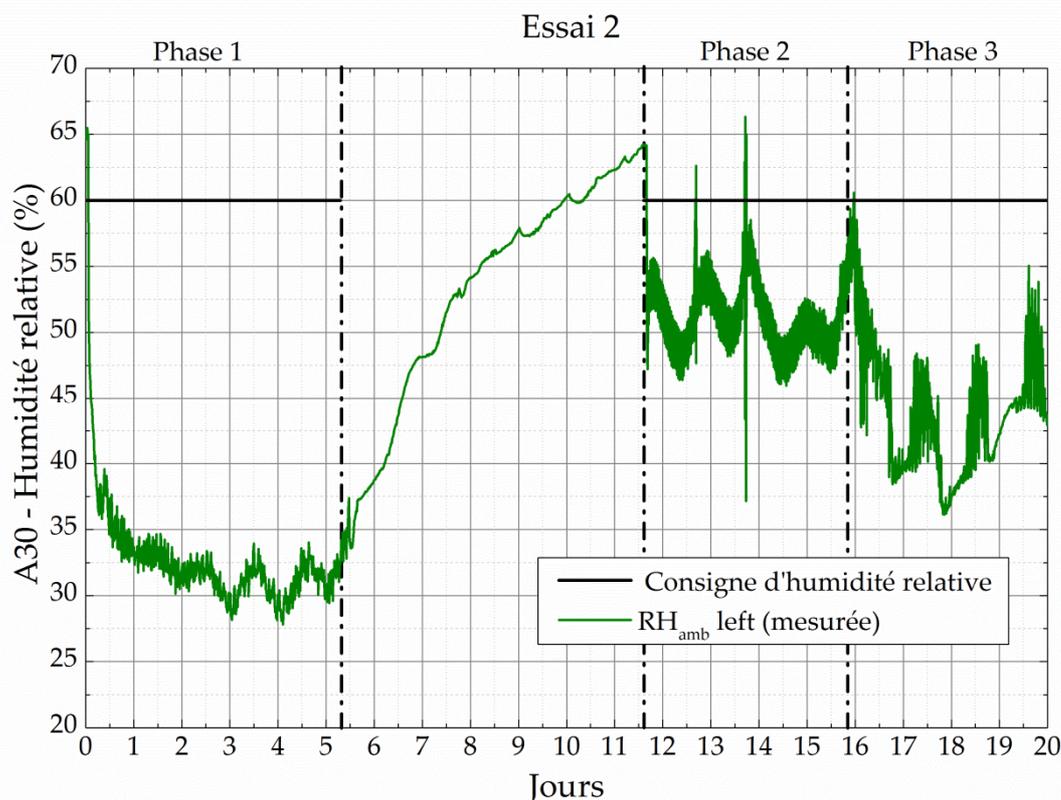


Figure 4-27 : Humidité relative de consigne et humidité relative mesurée dans l'ambiance gauche du caisson du mur A30 lors de l'essai 2 du système de régulation

4.3.4. LA SONDE A30-CS215 MID. ET LA MESURE DE L'HUMIDITE RELATIVE DANS LE PISE

Sur la fin de cette thèse, les essais à température élevée sur le mur A30 ont permis à celui-ci de sécher et d'atteindre une teneur en eau plus basse que dans les autres murs. Au 455^{ème} jour, sa teneur en eau volumique est de 3% (soit 1,7% en teneur en eau massique) tandis qu'elle est encore de 5,7% (3,3% en massique) dans le mur B30, de 5,6% (3,2% en massique) en moyenne dans le mur A50, et de 3,7% (2,1% en massique) en moyenne dans le mur B50.

Ce séchage plus important a donc permis à la sonde CS215 modifiée située au cœur du mur (CS215 mid.) de n'être plus saturée et de donner une valeur à partir du 315^{ème} jour.

Comme expliquée précédemment, les sondes CS215 modifiées installées aux cœurs des murs renvoyaient une valeur de 100% d'humidité relative. Cette saturation est très certainement due à une goutte d'eau proche de l'élément sensible, dans le capuchon de la sonde, derrière la barrière semi-perméable en PTFE, et qui se serait formée au moment de la fabrication des murs en raison de l'importante teneur en eau.

On a représenté sur la figure 4-28 en haut la teneur en eau et l'humidité relative mesurées par, respectivement, la CS616 et la CS215 modifiée dans le mur A30 et, en bas, la température et l'humidité relative mesurées par la CS215 modifiée dans le mur A30.

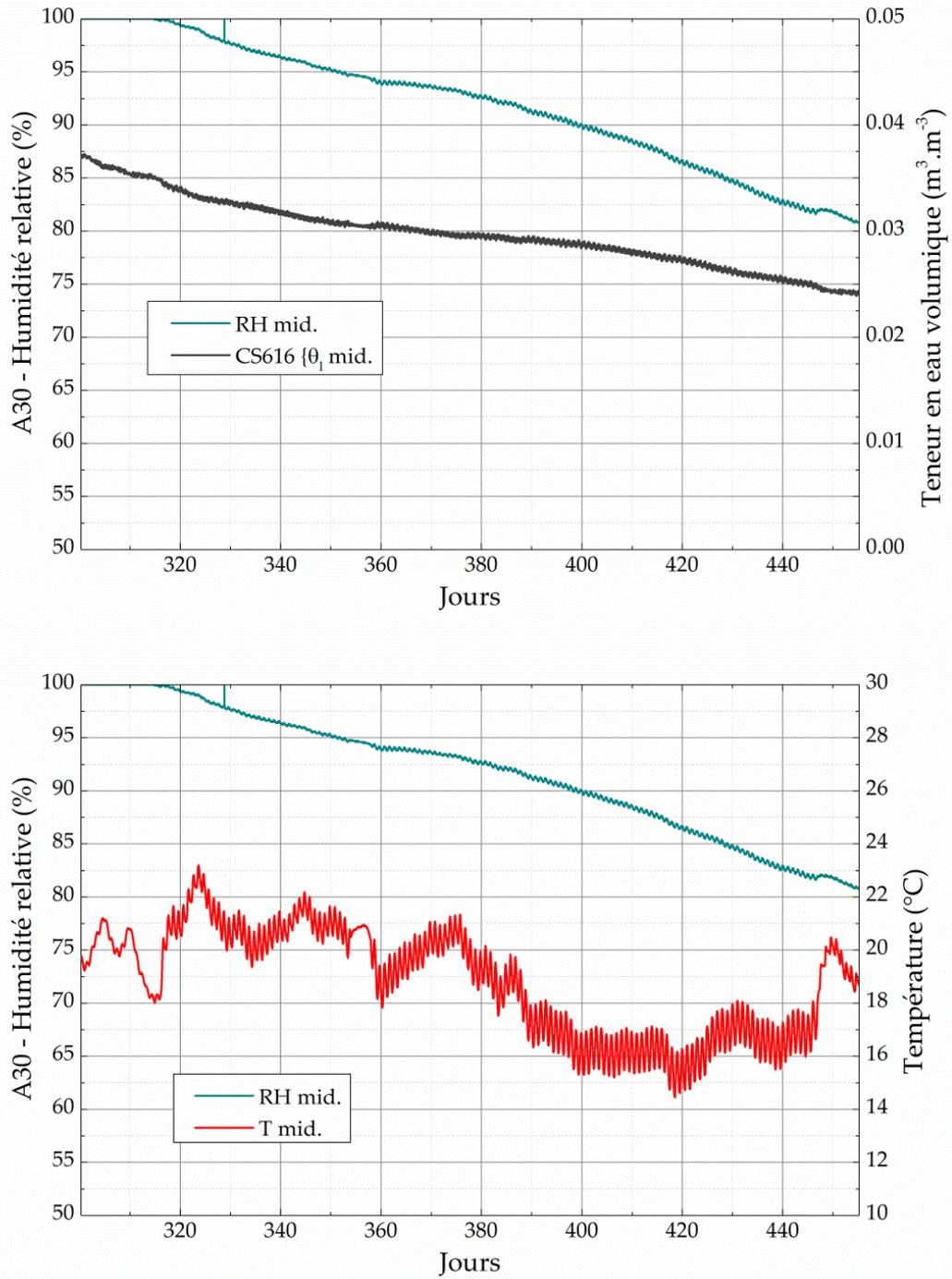


Figure 4-28 : Humidité relative et la teneur en eau (en haut) et humidité relative et température (en bas) dans le mur A30 après que la sonde CS215 modifiée située dans le mur ait désaturée

Cette valeur d'humidité relative est toujours décroissante et devrait, en théorie, s'accorder avec la teneur en eau dans le mur suivant la courbe de rétention. Pour le dernier point relevés au 455^{ème} jour, la teneur en eau volumique est de 2,5% (soit 1,4% en teneur en eau massique), à 20°C, l'humidité relative – suivant l'isotherme de sorption que l'on a établi pour cette terre dans la partie précédente – devrait être de 50%. Or, on mesure pour ce point 80%. La sonde n'est donc toujours pas totalement « désaturée ».

Le fait que la sonde CS215 modifiée renvoie une valeur d'humidité relative, dans ce mur A30, laisse à penser que lorsque les teneurs en eau des autres murs auront davantage diminuées, les CS215 modifiées de ces autres murs renverront également une donnée.

4.4. COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE DU PISE : ÉVAPORATION DANS LE MUR A50

4.4.1. MESURES

Les périodes durant lesquelles les portes du caisson du mur A50 sont ouvertes permettent évidemment à ce mur de sécher. Cette période de séchage permet de mettre en évidence le phénomène d'évaporation de l'eau et surtout l'impact de cette évaporation sur la température du mur. En effet, l'évaporation de l'eau, ce changement de phase, est un phénomène endothermique. On peut alors observer une différence de température entre un mur en pisé qui sèche et la température de l'ambiance.

Pour mettre ceci en évidence, observons la température dans le mur A50 durant son séchage et la température dans les ambiances gauche et droite, puis comparons-les.

Sur la figure 4-29, on a représenté les températures dans le mur A50 relevées par les cinq sondes CS215 modifiées (CS215 top, CS215 left, CS215 mid., CS215 right et CS215 bot.) ainsi que la température dans les ambiances du caisson par des CS215 non modifiées (CS215 amb. left et CS215 amb. right) et zoomons sur les quatre périodes marquées d'un cadre rouge pour nous faire une idée de l'impact de l'évaporation de l'eau sur les températures

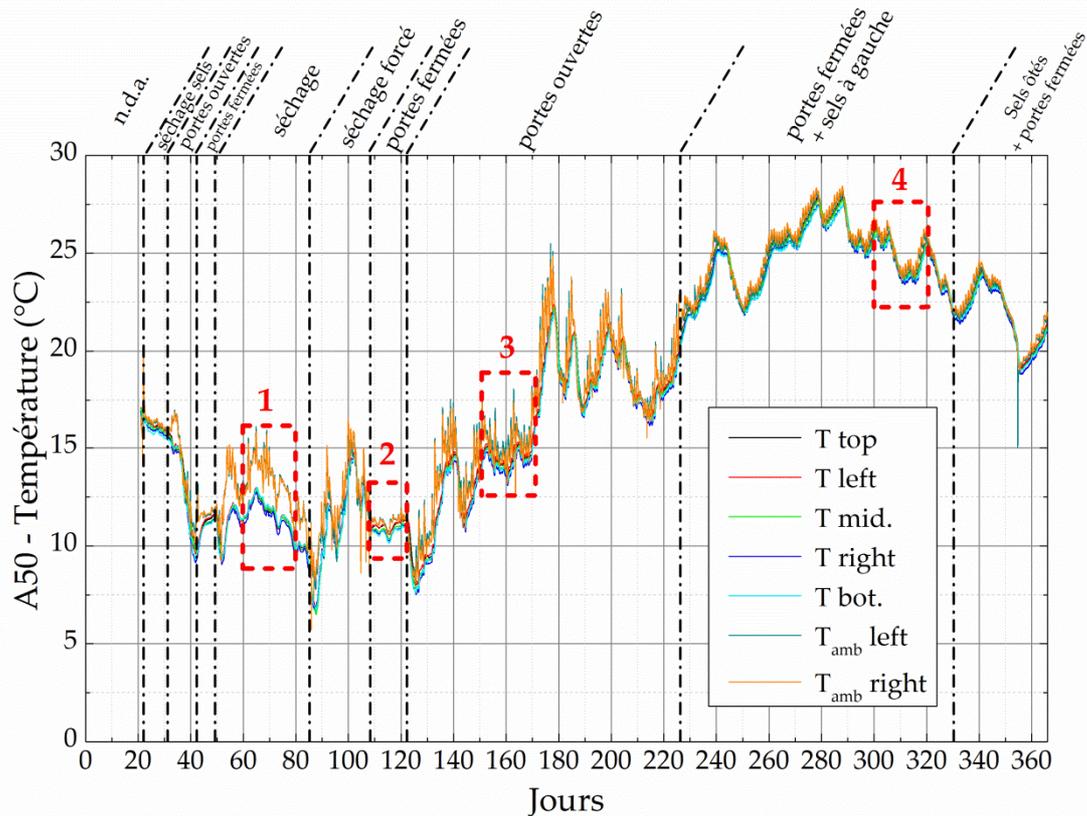


Figure 4-29 : Températures dans le mur A50 et dans l'ambiance de son caisson relevées par les sondes CS215 durant son séchage

Les cadres 1 et 3 (du 60^{ème} au 80^{ème} jour et du 150^{ème} au 170^{ème} jour) sont des périodes de séchage mais on a également sélectionné deux périodes (cadres 2 et 4, du 108^{ème} au 122^{ème} jour et du 300^{ème} au 320^{ème} jour) durant lesquelles les portes sont closes afin de montrer que la différence de température durant ces périodes n'est pas aussi importante que durant le séchage. Les portions des courbes de températures des cadres 1 et 3 (portes ouvertes) sont représentées sur la figure 4-30 tandis que les portions 2 et 4 sont représentées sur la figure 4-31.

Sur le premier graphique, si on ne remarque pas de différence notable entre les températures relevées par les sondes situées dans le mur, on peut noter une différence importante entre celles-ci et celles relevées dans les ambiances gauche et droite de son caisson. Au cours de cette période, la température globale dans le mur est plus basse de 1,75°C en moyenne que dans les ambiances du caisson, signe du changement de phase de l'eau.

De même, sur la troisième période, on observe une différence moyenne de température de 0,9°C entre le mur et les ambiances gauche et droite du caisson. Sur cette même période, les thermistances de surfaces ayant été connectées, on peut voir que les températures des surfaces sont toujours plus faibles que celles des ambiances (0,9°C en moyenne).

En revanche, lorsque les portes sont closes, l'eau contenue dans le mur cesse de s'évaporer et on n'observe plus d'écart significatif entre le mur et les ambiances du caisson : 0,4°C en moyenne sur la deuxième période et 0,3°C sur la quatrième. On est alors dans les erreurs de mesures de ces sondes (cf. Partie 2).

Pour les première et troisième périodes, on peut calculer, en moyenne sur un volume de pisé de un mètre cube, ce que représente cette évaporation en termes d'énergie suivant :

$$\Delta H = mL_v \quad (4.2)$$

où ΔH est la variation d'enthalpie [J], m est la quantité d'eau évaporée [kg] et L_v la chaleur latente de vaporisation de l'eau (= 2260 kJ.kg⁻¹ à 20°C sous pression atmosphérique)

Au début de la première période – au 60^{ème} jour donc – la teneur en eau moyenne du mur est de 29,6% pour finir à 22,4% au 80^{ème} jour. Pour un mètre cube de mur, la masse d'eau évaporée équivalente est de 72 kg. Sous pression atmosphérique, l'énergie consommée correspondante est donc de 163 MJ.

De même, sur la troisième période, où le mur est plus sec, la teneur en eau de départ au 190^{ème} jour est de 0,11 m³.m⁻³ et de 0,1 m³.m⁻³ au 210^{ème} jour. L'équivalent en masse d'eau évaporée pour un mètre cube de pisé est de 10 kg. L'énergie consommée est donc de 23 MJ. Ce phénomène thermodynamique étant réversible, on aurait alors la même quantité d'énergie dégagée au cours de la condensation de l'eau dans les pores.

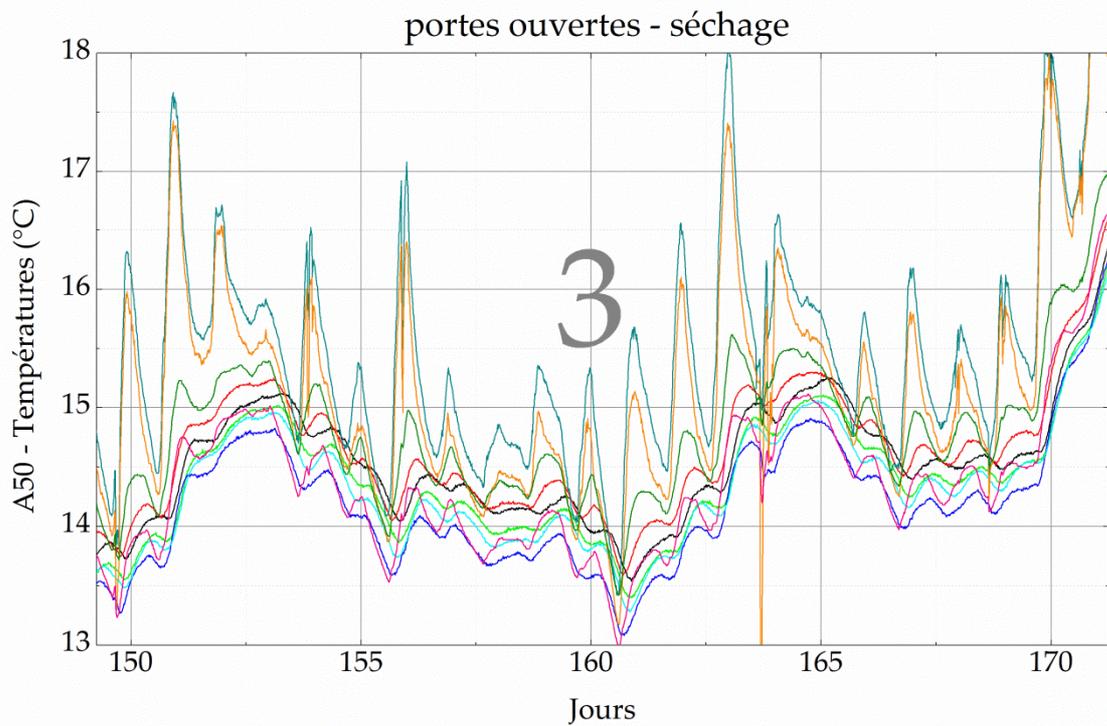
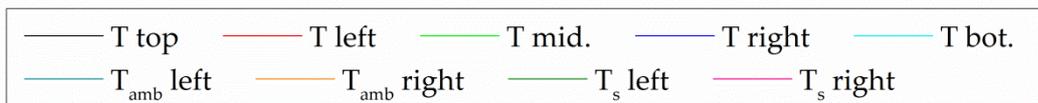
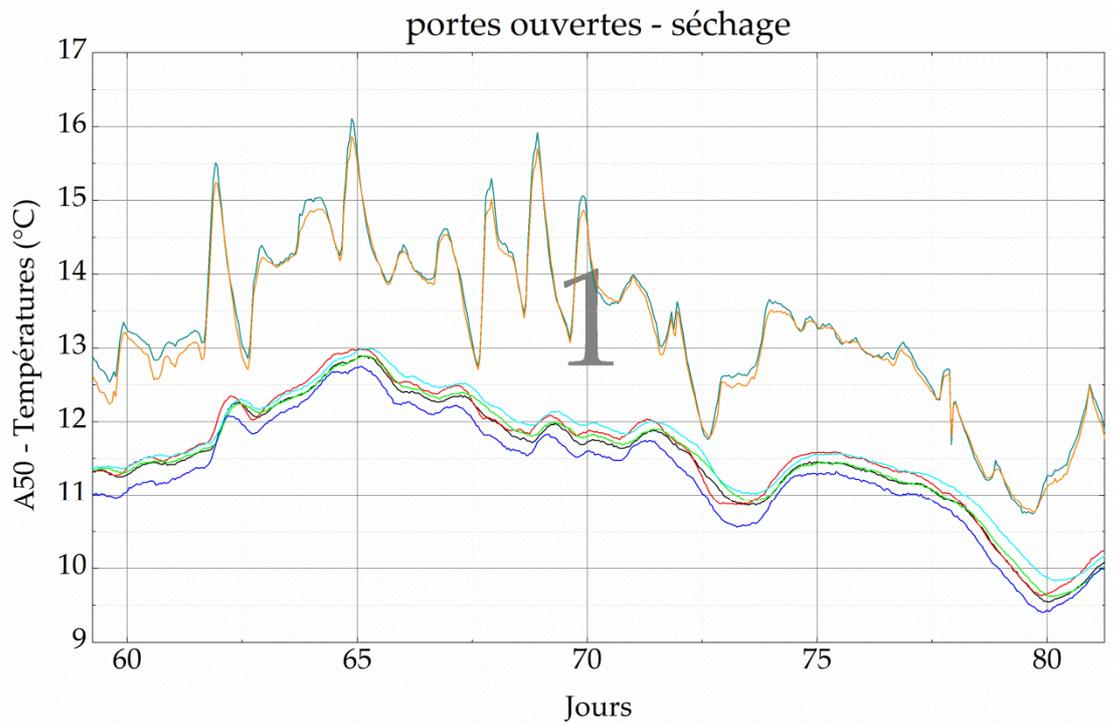


Figure 4-30 : Zooms sur les températures dans le mur A50 et dans les ambiances de son caisson durant les périodes 1 et 3 étudiées. N.B. Sur le graphe 3 de cette figure, le pic vers le bas au 203^{ème} jour correspond à une ouverture du caisson pour une visite

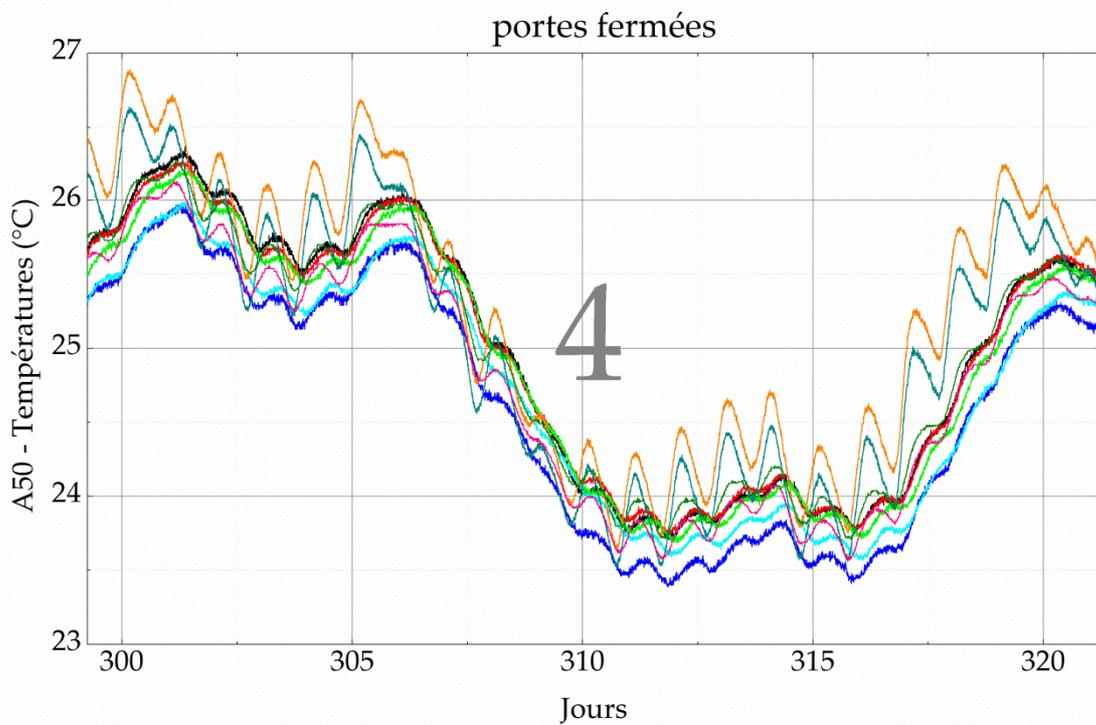
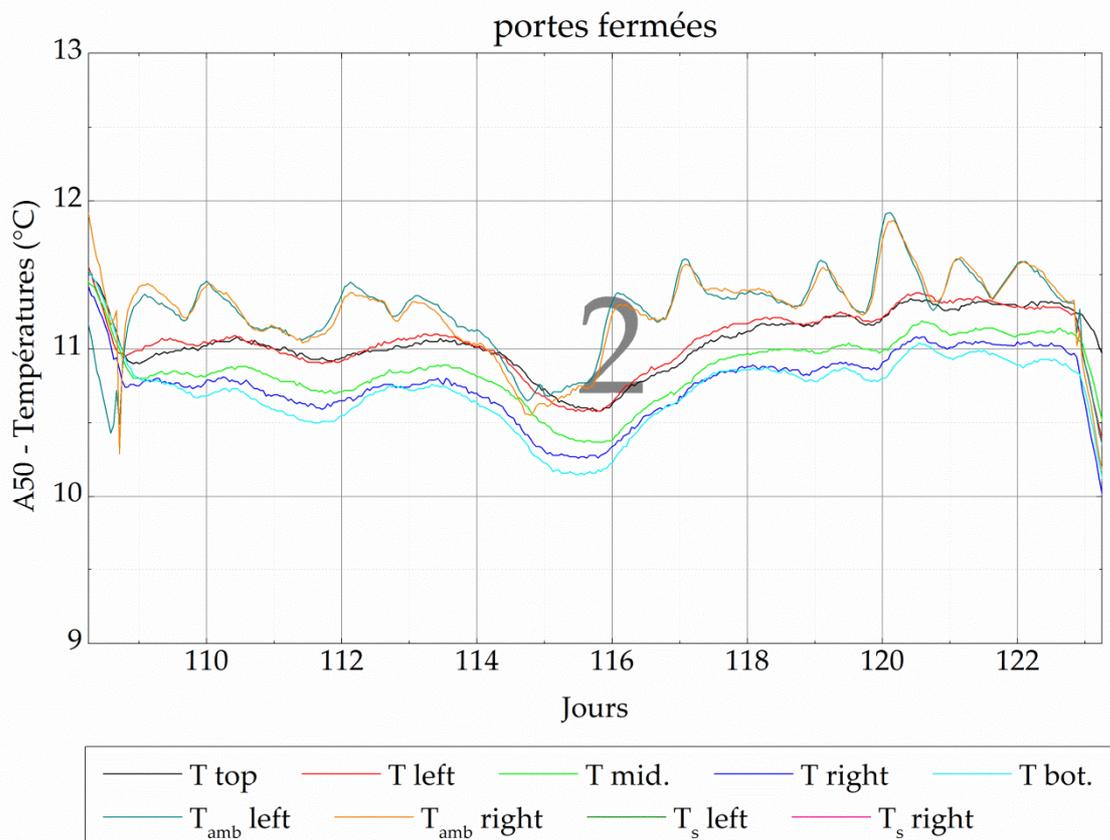


Figure 4-31 : Zooms sur les températures dans le mur A50 et dans les ambiances de son caisson durant les périodes 2 et 4 étudiées

4.4.2. INTRODUCTION A LA MODELISATION

Cette partie est extraite d'un article à paraître (manuscrit accepté) dans la revue *Materials* (Chabriac et al., 2014) dans lequel on montre la précision de la mesure par les sondes de teneur en eau et de température placées dans les murs et l'intérêt de prendre en considération le coefficient de chaleur latente dans la modélisation, i.e. montrer que le changement de phase de l'eau a une influence sur la température d'un mur en pisé.

Comme on l'a vu précédemment, lorsque les variations de teneurs en eau restent faibles, on observe peu de différence entre les températures dans les ambiances droite et gauche du caisson et la température au sein du mur. En revanche, au cours des périodes où la teneur en eau baisse significativement et rapidement (séchage et séchage forcé du 49^{ème} au 108^{ème} jour), on observe une baisse de la température dans le mur (zoom 1 de la figure 4-30).

Une manière aisée d'exprimer cette variation de température est d'utiliser l'équation de la chaleur en une dimension dans les milieux poreux avec changement de phase dans les pores (Coussy, 2004) :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{m} L_v \quad (4.3)$$

où ρC_p est la capacité calorifique moyenne du matériau, λ la conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). En théorie, ces deux termes varient avec la température et la teneur en eau mais étant donné les faibles variations nous supposons ici qu'ils sont constants et égaux à $1500 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$ et $1,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, leurs valeurs estimés pour une teneur en eau massique $\vartheta = 20\%$ (cf. Partie 3).], \dot{m} est le taux d'eau évaporée [$\text{kg.m}^3.\text{s}^{-1}$] et L_v la chaleur latente de vaporisation de l'eau [J.kg^{-1}].

Le dernier terme de l'équation (4.3) est soit positif soit négatif suivant que l'on soit respectivement dans une phase de condensation ou une phase d'évaporation et, engendre donc une augmentation ou une diminution de la température dans le mur.

Dans le cadre de cet article, nous avons donc résolu l'équation (4.3) avec COMSOL Multiphysics® en utilisant le module P.D.E. Les simulations ont été effectuées en une dimension avec une longueur $L = 0,5 \text{ m}$ (dans la direction x), qui représente donc une section du mur testé.

Les conditions limites sont fixées avec les valeurs relevées par les sondes dans les ambiances droite et gauche du caisson du mur. Il vient donc que les échanges thermiques en $x = 0$ et $x = L$ sont calculés via :

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = h(T_{caisson} - T_{surface}) \quad (4.4)$$

où $T_{caisson}$ et $T_{surface}$ sont les températures dans les ambiances du caisson et de surface du mur et h le coefficient de convection que l'on prendra égal à $15 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ dans la phase de séchage simple et égal à $250 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ durant la phase de séchage forcé (Doumenc, 2009).

Les calculs sont effectués avec $L_v = 2260 \text{ kJ.kg}^{-1}$ pour la version du calcul avec chaleur latente et $L_v = 0 \text{ kJ.kg}^{-1}$ pour la version sans. Le coefficient \dot{m} est quant à lui déduit de :

$$\dot{m} = \rho_l \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.5)$$

où ρ_l est la densité du liquide.

Ceci est bien évidemment une première approximation. Rigoureusement, la variation de teneur en eau dans le matériau est également due au transport d'eau et un modèle couplé est alors nécessaire. Mais il s'agit ici d'une première approche et, au premier ordre, on peut supposer que la relation (4.5) peut être utilisée.

La comparaison entre les deux calculs (avec et sans le terme de chaleur latente) sur la température à 25 cm de profondeur dans le mur est donnée sur la figure 4-32.

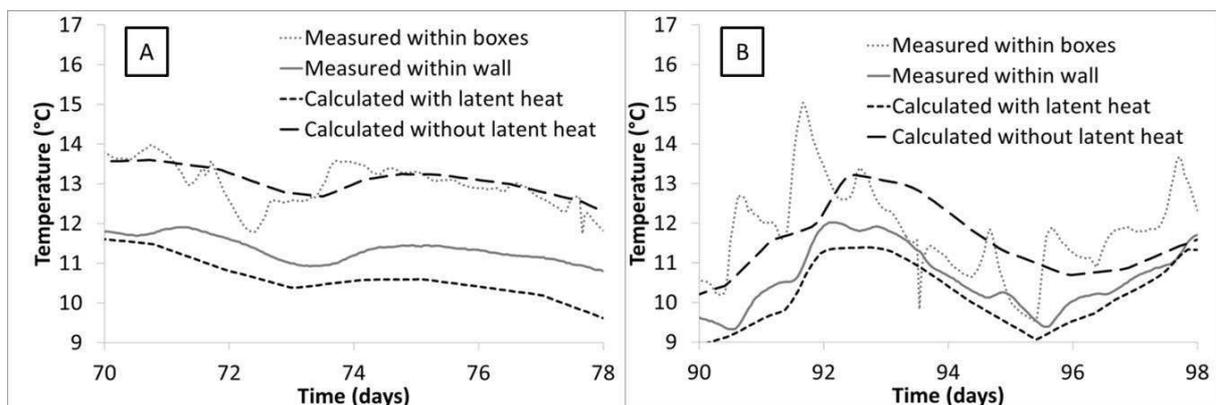


Figure 4-32 : Zooms sur les températures dans le mur et dans les ambiances pendant les phases de séchage (A) et de séchage forcé (B)

La première observation que l'on peut faire sur cette figure est que les deux calculs effectués en tenant compte de la chaleur latente sont proches des valeurs de températures mesurées dans le mur ; ce qui n'est pas le cas de la résolution sans ce terme. Néanmoins, on peut tout de même voir que l'on a tendance à surestimer l'effet de cette chaleur latente ce qui est très probablement dû au fait que, dans l'équation (4.5), on néglige l'effet du transport de vapeur sur les variations de teneur en eau. Ce résultat montre bien la précision des sondes de teneur en eau installées dans les murs. En effet, la baisse de température due au changement de phase de l'eau dans le mur est liée à la quantité d'eau qui s'évapore, et les sondes sont en mesure de mesurer cette différence, même légère.

La seconde observation que l'on peut faire est la baisse importante de l'impact du changement de phase de l'eau sur la température du mur dans le cas du séchage forcé. Dans ce cas, le coefficient d'échange par convection étant élevé ($250 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$), la chaleur absorbée par le changement de phase de l'eau (liquide vers vapeur) est plus que compensée par le flux de chaleur entrant à la surface du mur.

On peut donc en déduire que le changement de phase de l'eau dans le pisé a un impact sur le comportement thermique du pisé et que ce phénomène doit être pris en compte pour une bonne évaluation des performances thermiques d'un bâtiment. Cependant, l'impact de ce changement de phase dépend fortement des conditions aux limites et de l'état du mur (convection interne/externe, isolation,...) et requiert donc l'utilisation d'un modèle hygrothermique couplé pour une évaluation précise.

4.5. CONCLUSION SUR LA PARTIE 4

D'un point de vue instrumentation des murs, on a pu voir que les capteurs présentés et utilisés ici permettent de mesurer le comportement hygrothermique du pisé sur des maquettes en condition de laboratoire. Les CS616 et CS650 fournissent des données fiables sur la teneur en eau d'un mur en pisé et ce résultat tend à montrer la bonne robustesse du protocole d'étalonnage malgré des fonctionnements différents pour les deux sondes.

Il en va de même pour les sondes CS215 placées dans les ambiances. Les sondes CS215 modifiées et placées dans les murs restent saturées sur la mesure de l'humidité relative, malgré leur bon fonctionnement concernant la température. Une goutte d'eau s'est très probablement formée près de l'élément sensible, faussant ainsi la mesure. En revanche, la désaturation de la CS215 modifiée installée dans le mur A30 sur les derniers jours, laissent à penser que les autres sondes renverront une donnée lorsque les murs auront suffisamment séchés.

Ensuite, le groupe de régulation de température et d'humidité relative installé sur le côté gauche du caisson du mur A30 éprouvait quelques difficultés à réguler la température et l'humidité relative. Le choix d'un autre type de machine peut être à prévoir pour l'ensemble des autres murs.

L'effet de la gravité est important en début de séchage et pourrait impliquer une modélisation *ad-hoc*. Néanmoins, lorsque le mur sèche, la teneur en eau entre le haut et le bas des murs a tendance à s'homogénéiser. Ce premier point montre que la teneur en eau dans un mur en terre crue d'une habitation taille réelle peut être extrêmement élevée dans sa partie basse quelques jours après sa construction ou dans le cas de remontées capillaires (situation pathologique).

Le comportement hygrothermique du pisé a pu être mis en évidence par le séchage du mur A50 : on observe une baisse des températures dans le mur au moment du séchage. La simulation en une dimension a permis de relier le changement de phase de l'eau (terme de chaleur latente) aux mesures de teneur en eau dans le mur. Ceci met en évidence l'importance d'utiliser des modèles couplés de masse et de chaleur dans l'évaluation des performances thermiques des bâtiments en pisé.

Les résultats à l'échelle du mur ont finalement été concluants et ont permis de mettre en évidence d'un point de vue expérimental le comportement hygrothermique du pisé. Passons maintenant à l'échelle supérieure et abordons maintenant le bâtiment d'habitation en pisé.

PARTIE 5 : ESSAIS A L'ECHELLE DE
L'HABITATION : ST ANTOINE L'ABBAYE

5.1. INSTRUMENTATION

5.1.1. DANS LE MUR

Les moyens mis à notre disposition nous ont permis d'instrumenter le mur d'angle sud-ouest. Ce mur a été encadré en rouge sur la figure 5-1 que l'on a repris de la Partie 1.

Notre choix s'est porté sur ce mur car son exposition le rend propice à de grandes variations de températures et d'hygrométrie. Les deux parties du mur ont été instrumentées. Pour simplifier les explications, nous parlerons désormais *des* murs sud et ouest, bien qu'il s'agisse, dans l'absolu, du même mur de 4 m de hauteur.

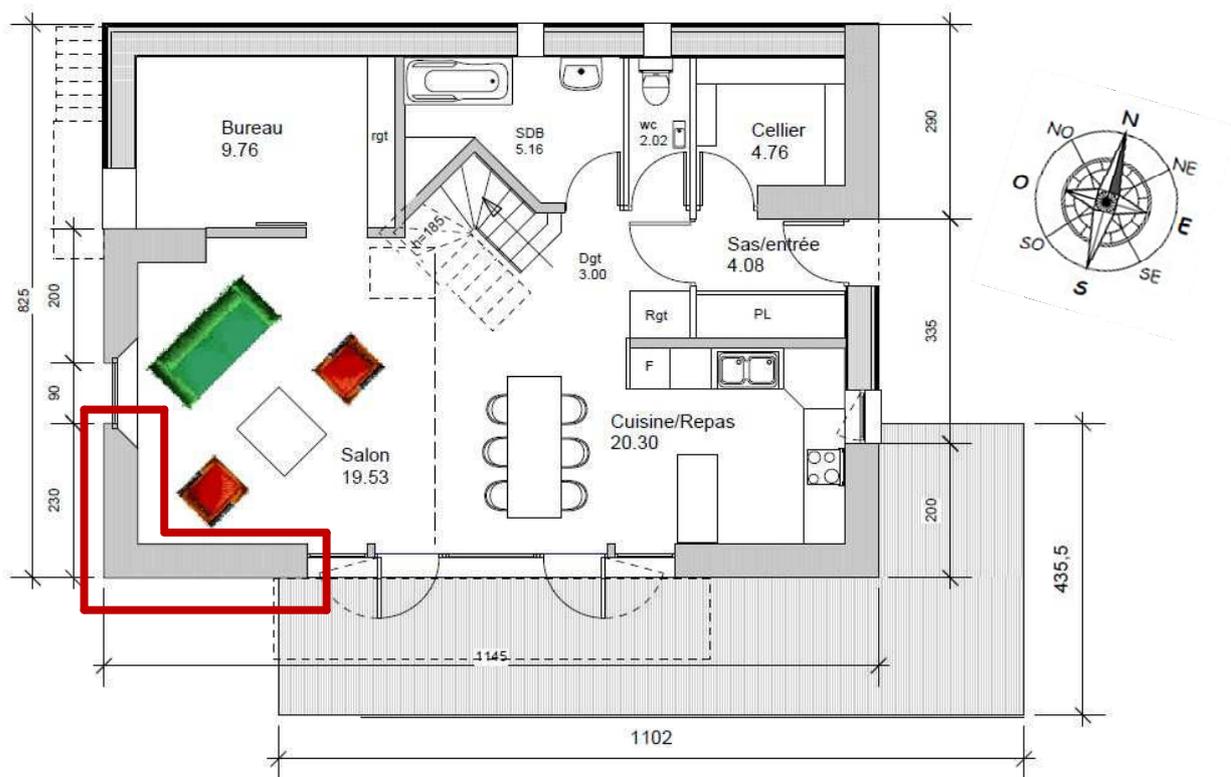


Figure 5-1 : Choix du mur instrumenté (encadré en rouge)

Ces murs sud et ouest, ont été instrumentés avec des sondes de teneurs en eau CS616 et des CS215 modifiées par Cementys (cf. Partie 2) le 19 juillet 2011. Ces capteurs ont été placés à mi-hauteur dans les murs, soit à $2\text{ m} \pm 1\text{ cm}$ de hauteur.

Les sondes de teneur en eau CS616 sont, comme dans les maquettes de murs de la partie précédente, placées perpendiculairement au front d'humidité. Dans chacun des murs, nous avons placé une CS616 à $10\text{ cm} \pm 1\text{ cm}$ de la surface intérieure de la maison, une autre à $25\text{ cm} \pm 1\text{ cm}$ de profondeur, au cœur du mur, puis une à $10\text{ cm} \pm 1\text{ cm}$ de la surface extérieure du mur (figure 5-2 en haut). Ces sondes ont été placées à 40 cm des extrémités du mur pour

s'affranchir des effets de bords. De même, elles ont été positionnées en quinconce pour éviter toutes perturbations électromagnétiques entre elles. Elles ont, de plus, été posées sur un lit de terre tamisée de un centimètre d'épaisseur puis recouvertes par un autre centimètre de terre fine pour les protéger des gros granulats qui pourraient les endommager pendant la phase de damage (figure 5-3).

Installées dans les murs de St Antoine avant la construction des maquettes, les CS215 placées dans le mur sont les Hydracap de Cementys, présentées précédemment, et non celles modifiées par nos soins au laboratoire (cf. Partie 2). Elles ont été également entourées d'un fin lit de terre tamisée (un centimètre en dessous puis un centimètre au-dessus) pour les protéger elles aussi des gros granulats durant le damage (figure 5-3).

L'ensemble des câbles a été ramené jusqu'à l'angle du mur dans lequel, court sur toute la hauteur, depuis le début des travaux, une gaine TPC rouge de 63 mm de diamètre passant par le soubassement pour ressortir à environ 1 m de la partie ouest du mur.

La centrale d'acquisition, Campbell Scientific CR1000 et le multiplexeur AM16/32, sur lesquels sont connectées les six sondes CS616 et six CS215 modifiées présentes dans les murs sont placés à l'extérieur de la maison (à 5 m environ du mur ouest) sur un trépied équipé d'un panneau solaire permettant d'alimenter la batterie de la centrale d'acquisition (figure 5-3 en bas à droite).

La maison a pu être fermée au mois de mai 2012. La livraison prévue pour fin 2012 n'a pu être respectée. A l'été 2013, seul l'étage était occupé.

Le schéma de damage de ces murs est le même que celui des murs installés dans les double-enceintes au laboratoire et présenté dans la partie précédente.

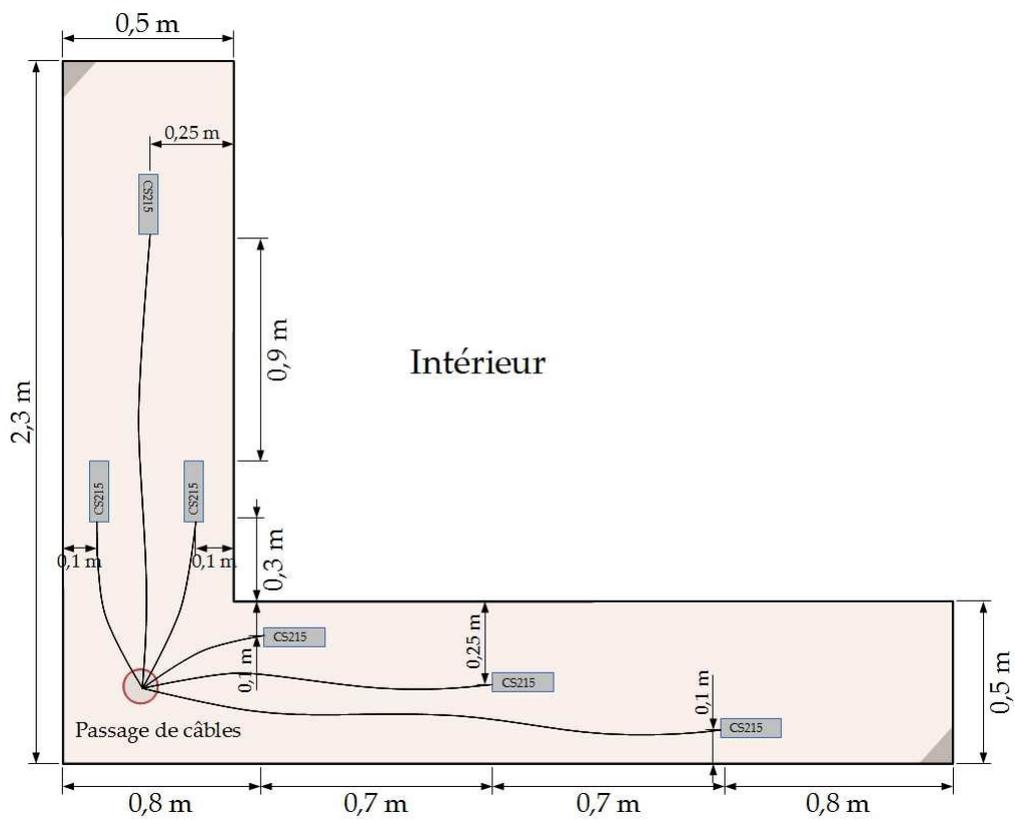
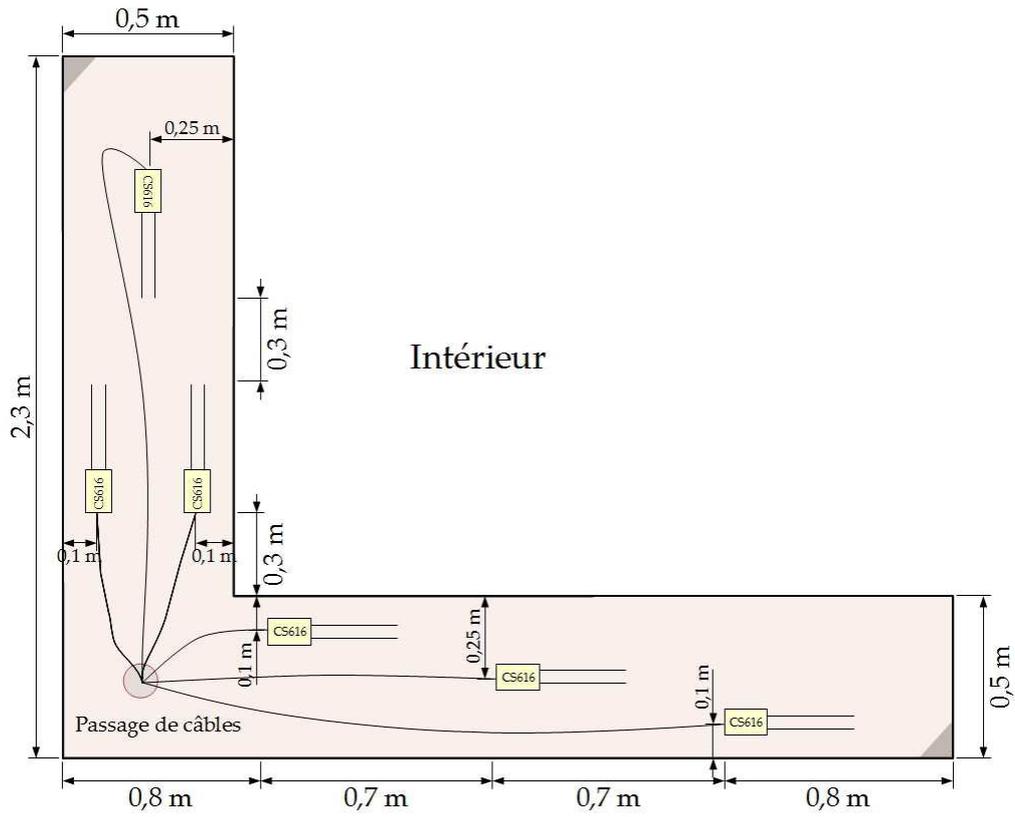


Figure 5-2 : Schéma d'implantation des capteurs CS616 (en haut) et CS215 (en bas) dans le mur sud/ouest de la construction de St Antoine l'Abbaye



Figure 5-3 : Implantation des capteurs pendant la construction du mur sud/ouest. Passage des câbles des CS616 (en haut à gauche), pose des CS616 sur la partie ouest (en haut à droite), damage sur les CS616 (au milieu à gauche), pose des CS616 modifiées (au milieu à droite), damage sur les CS215 (en bas à gauche) et centrale d'acquisition sur son mat avec le panneau photovoltaïque (en bas à droite)

5.1.2. AMBIANCES EXTERIEURE ET INTERIEURE

Afin d'enregistrer les conditions extérieures, une autre CS215, non modifiée cette fois, est protégée dans un abri ventilé, i.e. pour s'affranchir du vent et du rayonnement solaire. Cette sonde fait également office d'indicateur de pluie quand elle renvoie 100% d'humidité relative. Une seconde CS215 non modifiée a été placée à l'intérieur de la maison pour mesurer les conditions intérieures. Le câble de ce capteur passe au travers du mur via un des trous qui a servi à maintenir le coffrage durant la construction. Celle-ci a été connectée le 27 juin 2012, peu après la fermeture (et pas l'occupation) de la maison.

Pour ne pas encombrer l'intérieur de la maison avec un capteur filaire qui ressort sur l'extérieur, nous avons remplacé celui-ci par un capteur de température et humidité relative USB sans fil, et profité de cette occasion pour en positionner d'autres dans toute la maison le 22 juin 2013, peu après que la maison ait commencé à être habitée. Leur répartition est présentée sur le schéma de la figure 1-18 (points rouge).

Quatre capteurs sont placés au rez-de-chaussée tandis que trois autres sont installés à l'étage. Le premier capteur remplace la CS215 dont il est question précédemment ; le deuxième est situé à l'angle sud-est afin de vérifier si l'on a une différence notable de température entre l'est et l'ouest ; le capteur 3 est placé à l'immédiate proximité du poêle de masse (non représenté sur le plan) ; le quatrième est quant à lui placé en face nord ; le cinquième est placé, comme le premier à l'angle sud-ouest de la maison afin de voir si l'on observe une différence de température entre le rez-de-chaussée et l'étage à ce même angle, la sixième est placé en façade sud et le septième et dernier à l'angle nord-ouest.

Les données fournies par ces capteurs pourront être utilisées *a posteriori* pour vérifier la validité des modèles à l'échelle d'un bâtiment dans les logiciels tels que Wufi Plus, par exemple.

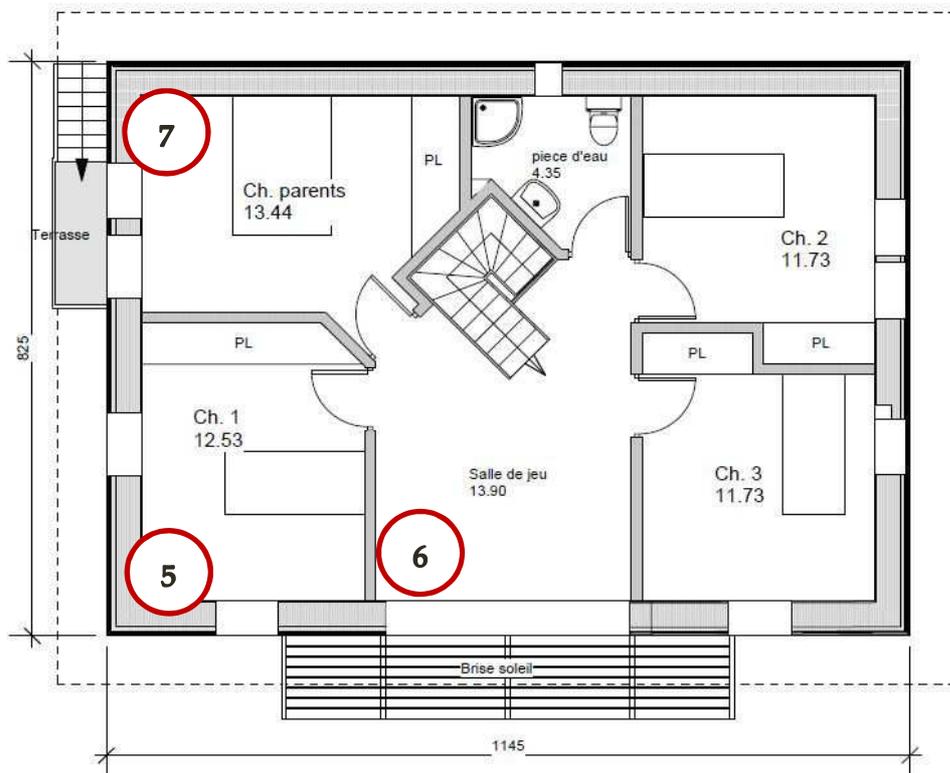
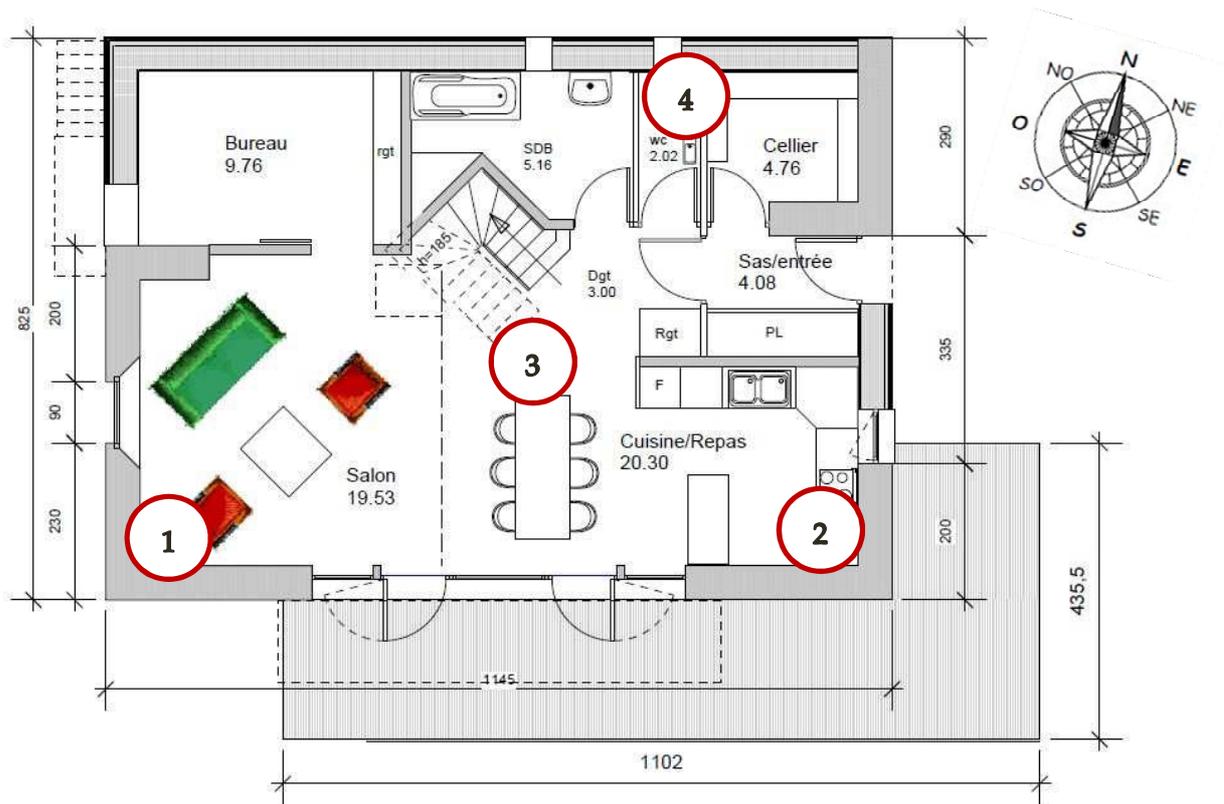


Figure 5-4 : Placement des sondes USB dans la maison sur les plans du rez-de-chaussée (en haut) et de l'étage (en bas) de la maison. Jérôme Boucq Architecte

5.1.3. RESUME DE L'INSTRUMENTATION

La programmation de base consiste en un scan des sondes tous les quarts d'heure. Ces points, relevés toutes les 15 minutes donc, sont ensuite moyennés toutes les heures puis enregistrés. L'intégralité du programme est donnée en Annexe C.

Les capteurs USB sont programmés pour enregistrer un point toutes les demi-heures afin de tenir compte de toutes les variations de températures et d'humidité relative (une porte restée ouverte plusieurs minutes par exemple) qui pourraient survenir dans la maison.

Les sondes Campbell Scientific sont dénommées selon les données qu'elles fournissent (Température : T, Humidité relative : RH et Teneur en eau : θ) et l'indice renvoie quant à lui leur position dans les murs :

- W-Ext : Mur ouest sur l'extérieur
- W-Mid : Mur ouest au centre du mur
- W-Int : Mur ouest sur l'intérieur
- S-Ext : Mur sud sur l'extérieur
- S-Mid : Mur sud au centre du mur
- S-Int : Mur sud sur l'intérieur
- Out : Conditions extérieures
- Ins : Conditions intérieures

Les sondes USB sont nommées sur le même principe auquel on ajoute leur numéro :

- 1-SW-G- : Capteur 1, angle sud-ouest au rez-de-chaussée
- 2-SE-G- : Capteur 2, angle sud-est au rez-de-chaussée
- 3-C-G- : Capteur 3, au centre de la pièce au rez-de-chaussée
- 4-N-G : Capteur 4, en façade nord au rez-de-chaussée
- 5-SW-F : Capteur 5, angle sud-ouest à l'étage
- 6-S-F : Capteur 6, en façade sud à l'étage
- 7-NW-F : Capteur 7, angle nord-ouest à l'étage

L'ensemble des sondes et des alias sont résumés dans le tableau suivant (tableau 5-1) :

	Mur ouest	Mur sud
Dans le mur	$CS616\{\theta_{W-Ext}$ $CS215\left\{\begin{matrix} T_{W-Ext} \\ RH_{W-Ext} \end{matrix}\right.$	$CS616\{\theta_{S-Ext}$ $CS215\left\{\begin{matrix} T_{S-Ext} \\ RH_{S-Ext} \end{matrix}\right.$
	$CS616\{\theta_{W-Mid}$ $CS215\left\{\begin{matrix} T_{W-Mid} \\ RH_{W-Mid} \end{matrix}\right.$	$CS616\{\theta_{S-Mid}$ $CS215\left\{\begin{matrix} T_{S-Mid} \\ RH_{S-Mid} \end{matrix}\right.$
	$CS616\{\theta_{W-Int}$ $CS215\left\{\begin{matrix} T_{W-Int} \\ RH_{W-Int} \end{matrix}\right.$	$CS616\{\theta_{S-Int}$ $CS215\left\{\begin{matrix} T_{S-Int} \\ RH_{S-Int} \end{matrix}\right.$
Extérieur	$CS215\left\{\begin{matrix} T_{Out} \\ RH_{Out} \end{matrix}\right.$	
Intérieur	$CS215\left\{\begin{matrix} T_{Ins} \\ RH_{Ins} \end{matrix}\right.$ puis USB $\left\{\begin{matrix} T_{1-SW-G} \\ RH_{1-SW-G} \end{matrix}\right.$	
	USB $\left\{\begin{matrix} T_{2-SE-G} \\ RH_{2-SE-G} \end{matrix}\right.$	
	USB $\left\{\begin{matrix} T_{3-C-G} \\ RH_{3-C-G} \end{matrix}\right.$	
	USB $\left\{\begin{matrix} T_{4-N-G} \\ RH_{4-N-G} \end{matrix}\right.$	
	USB $\left\{\begin{matrix} T_{5-SW-F} \\ RH_{5-SW-F} \end{matrix}\right.$	
	USB $\left\{\begin{matrix} T_{6-S-F} \\ RH_{6-S-F} \end{matrix}\right.$	
	USB $\left\{\begin{matrix} T_{7-NW-F} \\ RH_{7-NW-F} \end{matrix}\right.$	

Tableau 5-1 : Positionnement des sondes à St Antoine l'Abbaye

La météo exécrable du 19 juillet 2011, jour de la mise en place des sondes dans le mur, ne nous a pas permis d'établir les connections des sondes à la centrale d'acquisition dans la journée. Les sondes ont donc été connectées à la centrale le 27 juillet 2011 à 17h, soit huit jours après leurs mises en place.

De plus, en attendant que le gros œuvre soit terminé et afin de préserver la sonde, la CS215 qui mesure la température et l'humidité relative de l'ambiance intérieur n'a été connectée à la centrale d'acquisition que le 27 juin 2012.

Les données sont relevées régulièrement par branchement direct d'un ordinateur à la centrale d'acquisition. On pourra éventuellement envisager pour la suite une transmission des données via le réseau téléphonique en ajoutant un module GSM à la centrale d'acquisition.

On considèrera ici que la teneur en eau qui n'a pas pu, malheureusement, être relevée le jour de la construction, est la même que pour la construction des maquettes, soit 18% à 20% en masse. On justifie cette approximation par le fait que la terre, l'artisan (expérimenté) ainsi que la mise en œuvre sont identiques dans les deux cas. De même, on prendra une densité de 1,73 pour ce pisé comme on a pu l'établir dans la Partie 3 sur le muret test construit pour cette maison.

5.2.RESULTATS

5.2.1. FONCTIONNEMENT DES SONDÉS

5.2.1.1. Teneur en eau du pisé

Toutes les sondes CS616 fonctionnent et renvoient une valeur du temps de parcours sur leurs tiges que l'on peut ensuite convertir en teneur en eau volumique suivant l'équation d'étalonnage que l'on a établie en Partie 2.

5.2.1.2. Humidité relative et température

Les capteurs CS215 modifiées par Cementys placés au sein des murs ne fournissent pas de données sur l'humidité relative sur toute la période sur laquelle court les données analysées ici.

Comme pour les maquettes étudiées précédemment elle renvoie une valeur de saturation à 100%. La mesure de température est correcte mais une goutte d'eau a du se former près de l'élément sensible fournissant une valeur erronée pour l'humidité relative, les murs n'ayant pas encore séchés suffisamment.

Toutes les sondes (CS215 et USB) situées à l'extérieur et à l'intérieur de la maison fonctionnent correctement et renvoient bien des valeurs de température et humidité relative *a priori* cohérentes.

5.2.2. PREMIERES OBSERVATIONS

5.2.2.1. Effet de la gravité

Comme dans le cas des maquettes de la partie précédente, il apparaît que la teneur en eau, 8 jours après l'édification du mur, est très élevée au niveau des sondes dans chacun des murs sud et ouest.

L'eau contenue dans les pores au-dessus des sondes est, ici aussi, descendue par l'effet de la gravité. Néanmoins, la hauteur d'eau étant nettement plus importante dans le cas de la maison (2 m contre 0,5 m pour les maquettes), la teneur en eau, au début des relevés, est bien supérieure à celle des maquettes. Huit jours après leurs fabrications, on observe une teneur en eau volumique moyenne de 52,5%, sur les deux murs sud et ouest (soit 30,3% en masse). On rappelle que dans le cas du mur A50 par exemple, la teneur en eau volumique de fabrication était de 33%.

Ici aussi, on peut s'interroger sur la validité d'une telle valeur. On se trouve en effet bien au-delà de la porosité estimée à 34,5% (cf. Partie 3) pour ce pisé à partir du muret test. Il s'agit ici de la même problématique que l'on a décelée lors du séchage du mur A50 dans la Partie 4 : une différence de densité entre le haut et le bas du mur.

5.2.2.2. Pression de vapeur saturante

A partir des données sur les humidités relatives relevées par les sondes à l'intérieur et à l'extérieur de la maison, on peut tracer la courbe de différences de pression de vapeur entre ces deux zones (figure 5-5). Sur cette figure, on peut observer les périodes où la maison a été fermée – hiver 2013 – mais aussi, durant les périodes estivales quand la maison a été ventilée ou chauffée.

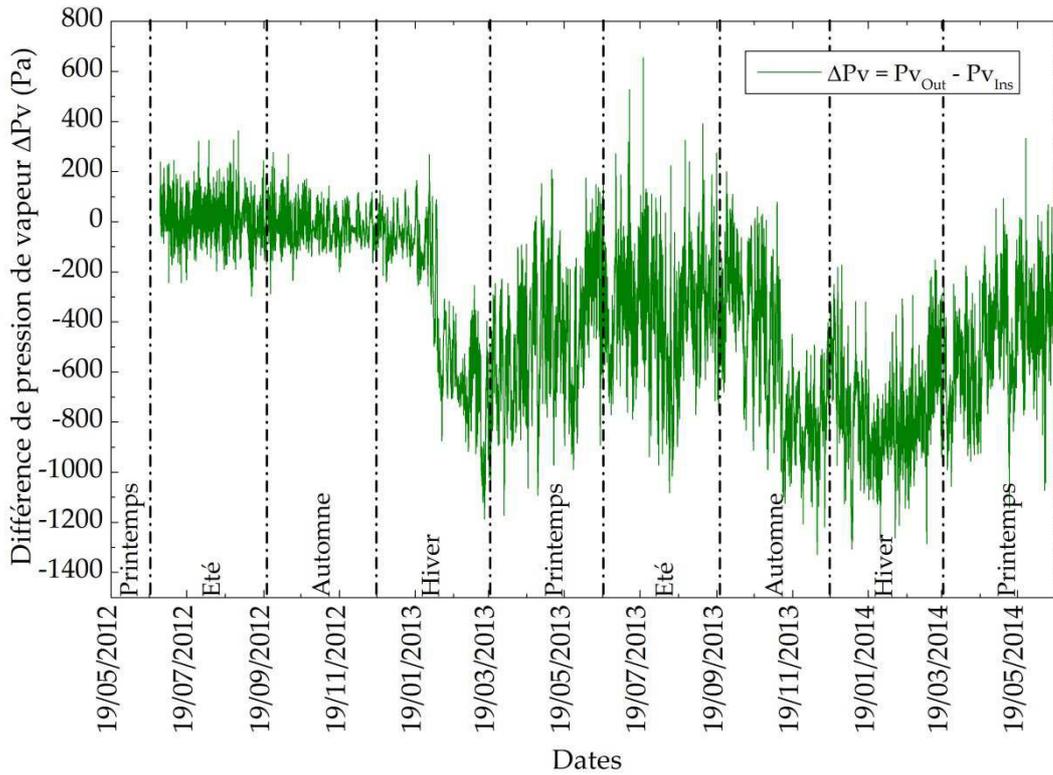


Figure 5-5 : Différence de pression de vapeur entre l'intérieur et l'extérieur de la maison

5.2.2.3. Variations de teneur en eau saisonnières

Du fait que la maison ne soit pas encore occupée, on peut voir sur les graphes de teneurs en eau des murs sud et ouest une alternance saisonnière globale (figure 5-6).

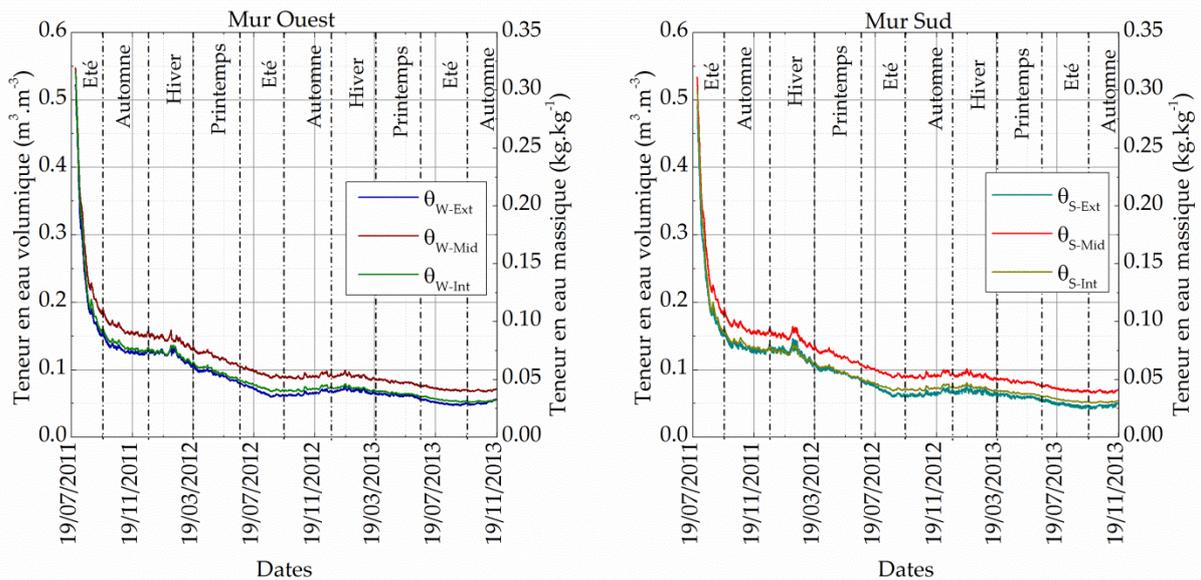


Figure 5-6 : Teneur en eau dans les murs sud et ouest en fonction des saisons

A l'automne et à l'hiver 2011/12, du 19 novembre 2011 au 19 janvier 2012 plus précisément, la teneur en eau dans les deux murs stagne à 15% (en volume) au centre. Sur cette même période, l'humidité de l'air extérieur (figure 5-7) était très élevée, 87,5% en moyenne, signe de pluies fréquentes. Le séchage du mur a donc été stoppé à ce moment-là.

Le début du mois de février 2012 a été particulier, nous en discuterons par la suite.

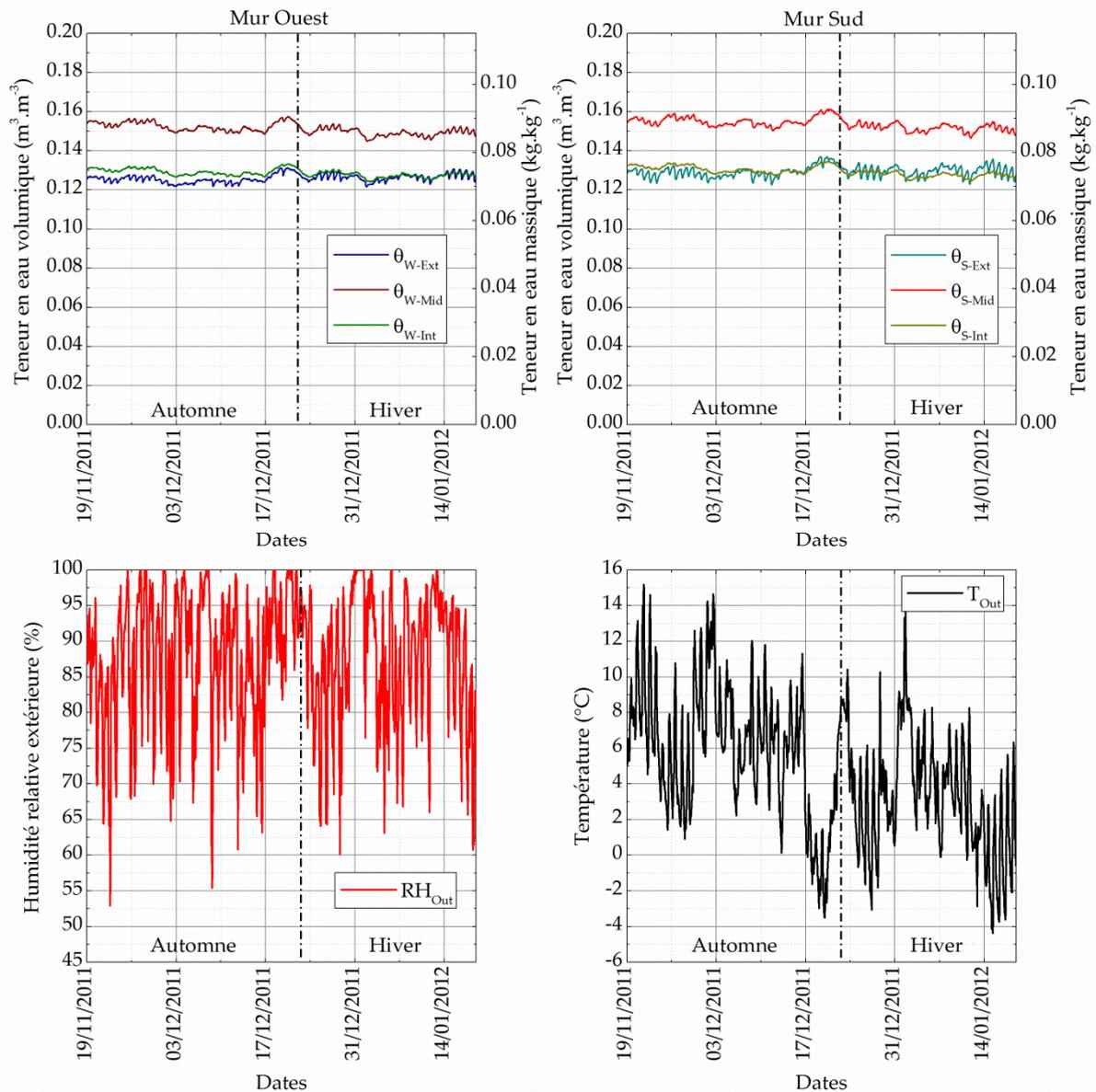


Figure 5-7 : Zooms sur les teneurs en eau dans les murs sud (en haut à gauche) et ouest (en haut à droite) instrumentés au cours de l'automne/hiver 2011/2012 (du 19 décembre au 19 janvier). Humidité relative (en bas à gauche) et température (en bas à droite) extérieure sur cette même période

Sur la fin de cet hiver 2011/12, à partir du 19 février 2012, avec le radoucissement des températures et la baisse de l'humidité relative de l'air, la teneur en eau dans les murs chute à nouveau jusqu'au mois d'août de cette même année où elle passe de 15% (en volumique) au 19 février à 7% au mois d'août (figure 5-8).

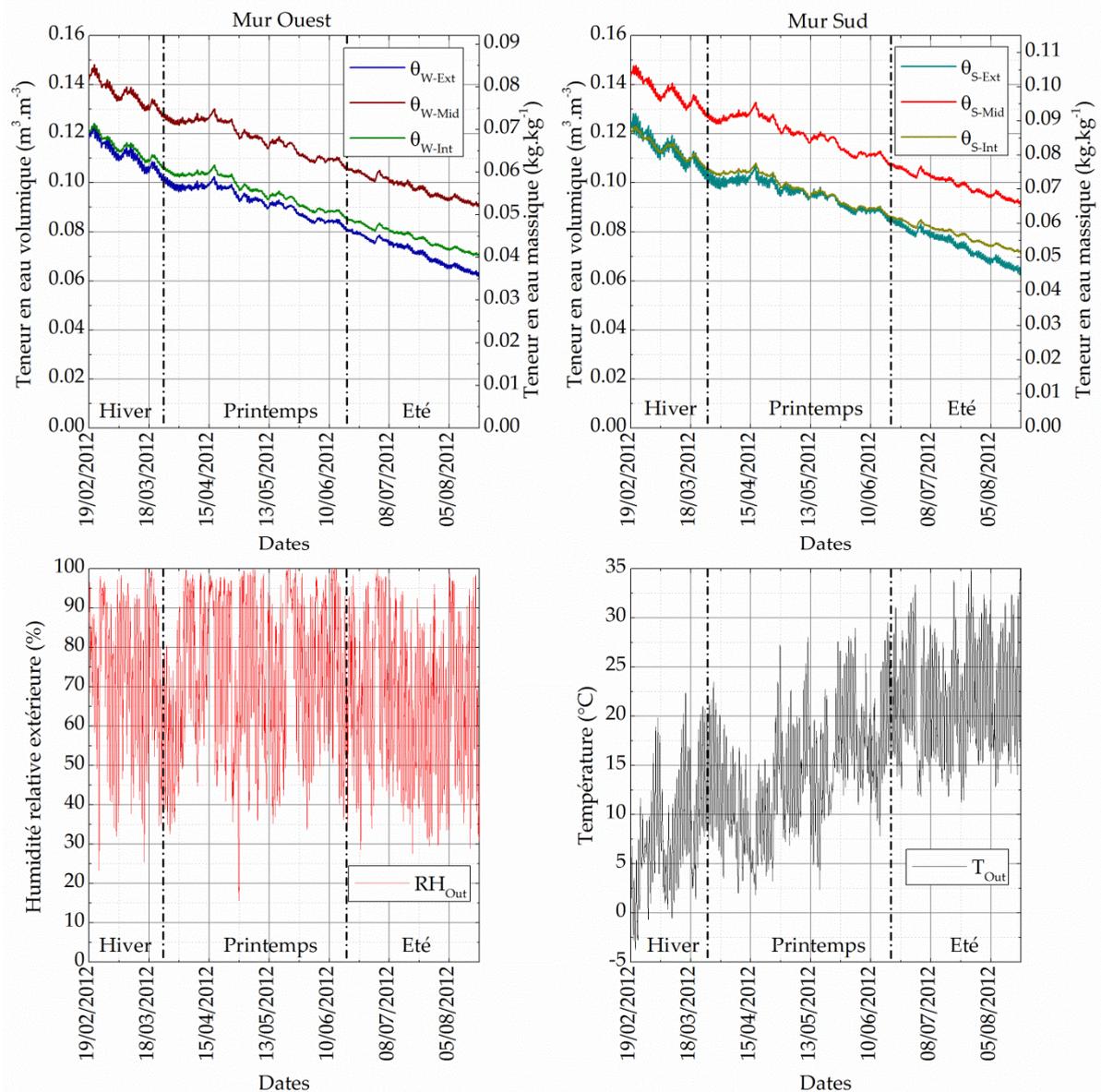


Figure 5-8 : ZOOMS sur les teneurs en eau dans les murs sud (en haut à gauche) et ouest (en haut à droite) instrumentés de l'hiver à l'été 2012 (du 19 février au 19 août). Humidité relative (en bas à gauche) et température (en bas à droite) extérieure sur cette même période

A partir de la fin du mois d'août 2012, on peut voir une remontée de la teneur en eau, passant de 7% en moyenne dans le mur sud et dans le mur ouest (teneur en eau moyenne identique) au 19 août à 8% au 19 décembre de cette même année (figure 5-9). Et, comme au cours de l'hiver précédent, à partir de ce mois de décembre 2012, la teneur en eau va ensuite stagner jusqu'au mois de février 2013, pour ensuite redescendre régulièrement jusqu'au 18 novembre 2013 (derniers relevés) et finalement atteindre 6% en moyenne dans le mur ouest et 5,8% en moyenne dans le mur sud. On voit donc une alternance des saisons sur la teneur en eau dans les murs en fonction des saisons. L'hiver, les murs en pisé, adsorbent plus de vapeur d'eau contenue dans l'environnement qu'au cours de l'été.

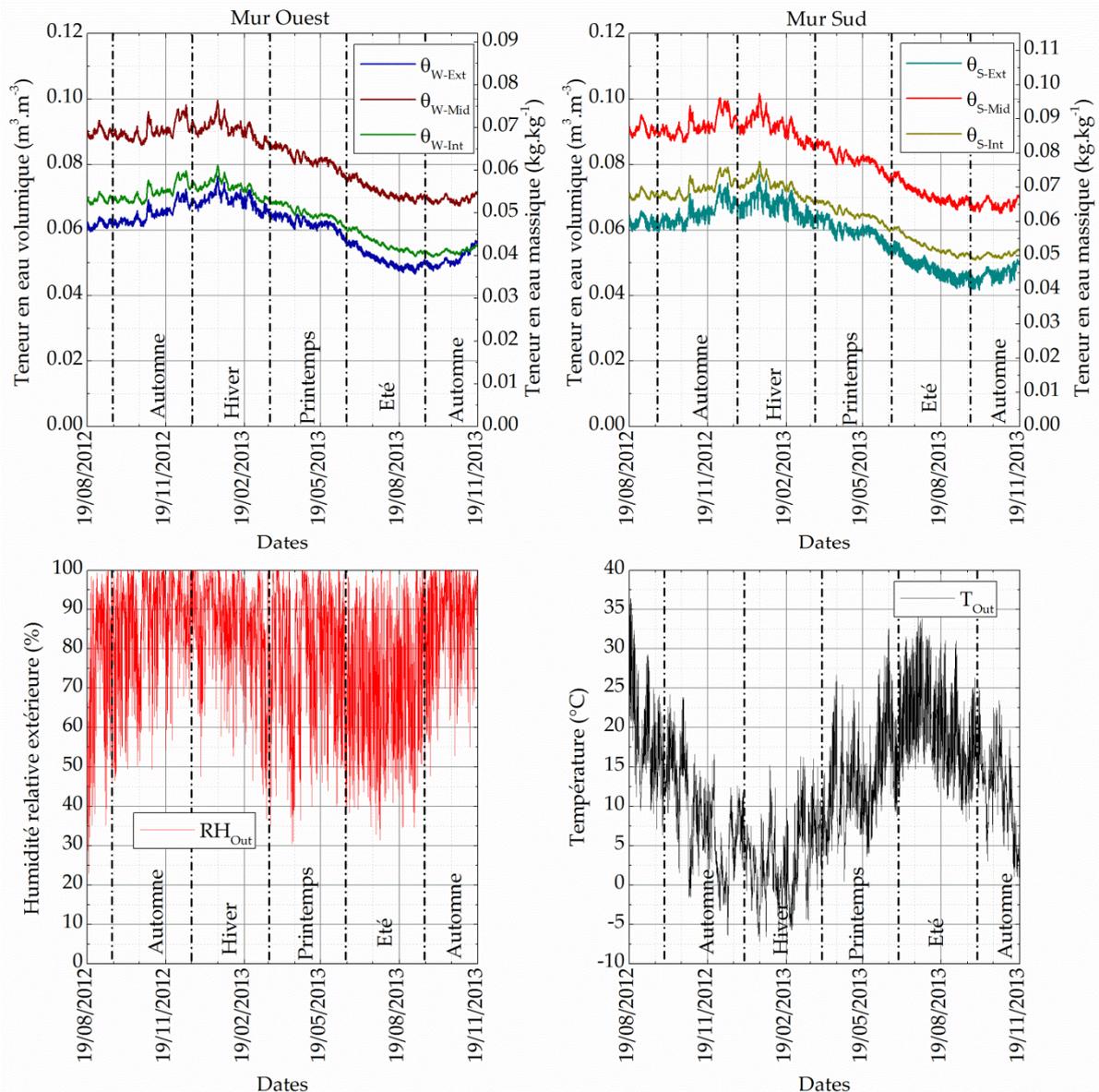


Figure 5-9 : Zooms sur les teneurs en eau dans les murs sud (en haut à gauche) et ouest (en haut à droite) instrumentés au cours du 19 août 2012 au 19 novembre 2013. Humidité relative (en bas à gauche) et température (en bas à droite) extérieure sur cette même période

5.2.2.4. Températures et humidité relatives

Intéressons-nous à présent aux températures à l'intérieur de la maison qui ont été relevées grâce aux capteurs USB posés le 20 juin 2013 et dont les dernières données recueillies datent du 19 novembre de cette même année. Etudions d'abord la période estivale du 20 juin au 21 septembre puis le début de l'automne.

5.2.2.4.1. Période estivale : du 20 juin au 21 septembre 2013

On a tracé, sur la figure 5-10, les relevés des capteurs 1 à 4 du rez-de-chaussée sur la période estivale et, sur la figure 5-11, les capteurs 5 à 7 de l'étage.

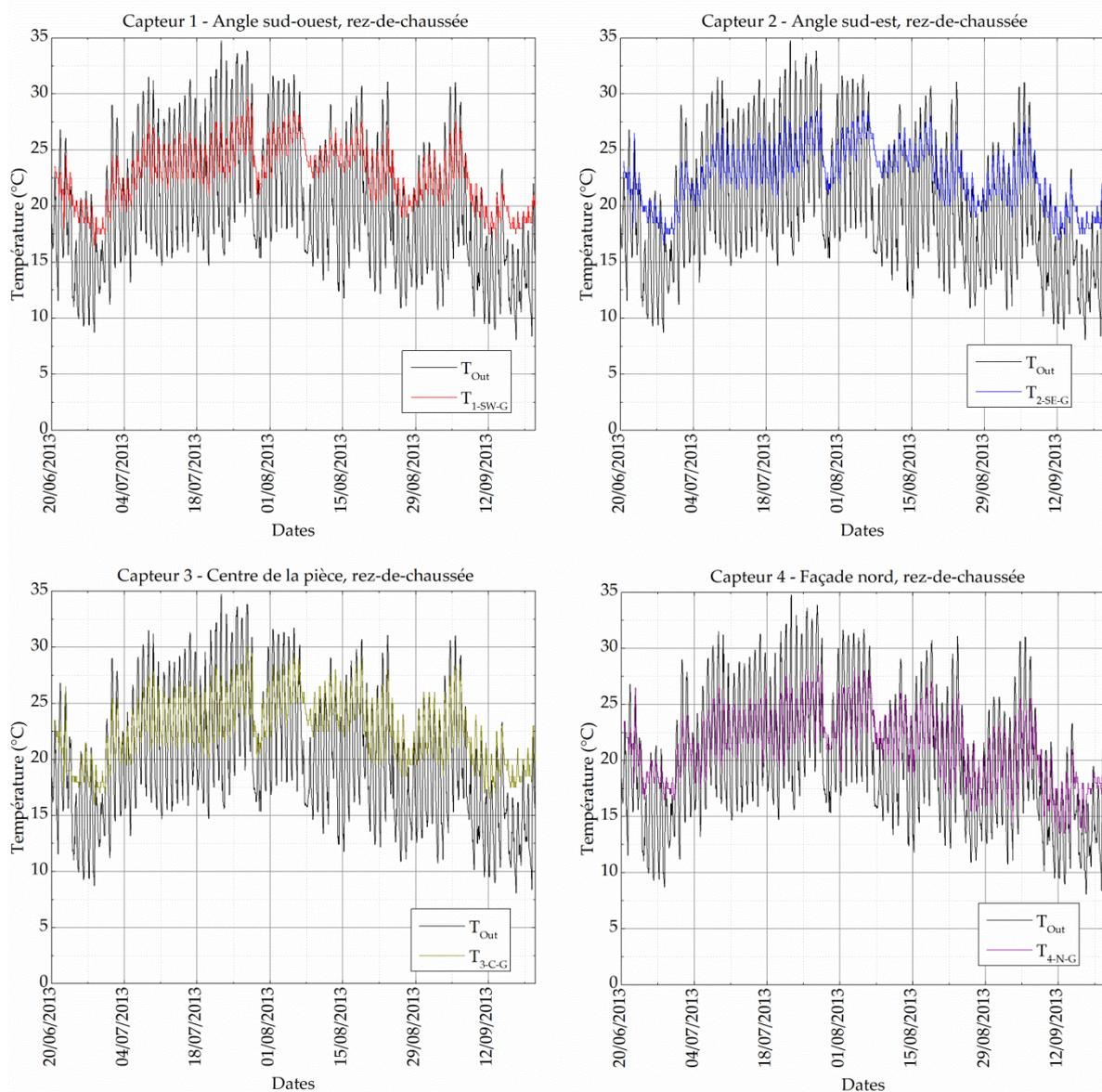


Figure 5-10 : Températures renvoyées par les capteurs USB au rez-de-chaussée comparées à la température extérieures sur la période du 20 juin au 21 septembre 2013

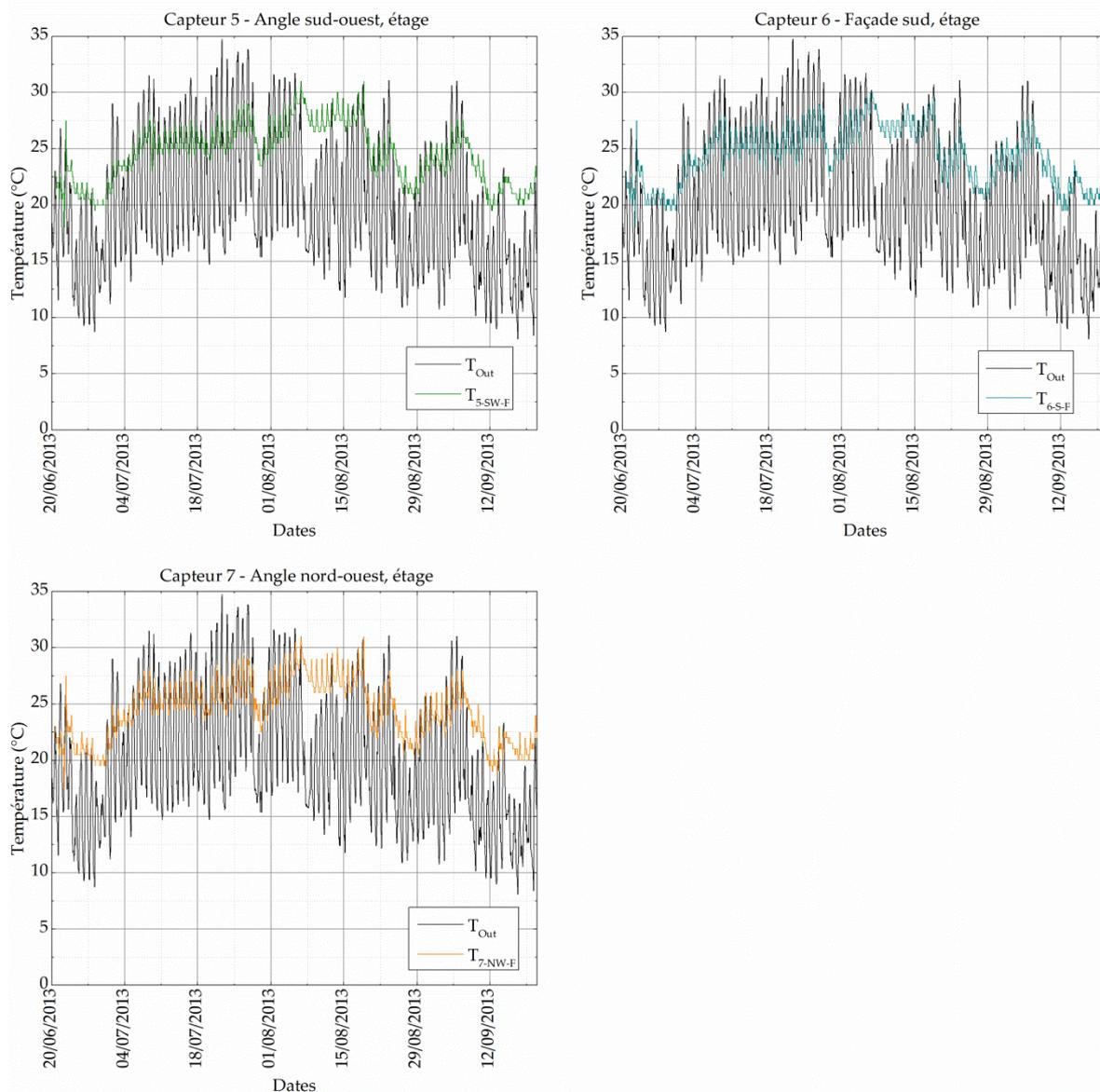


Figure 5-11 : Températures renvoyées par les capteurs USB à l'étage comparées à la température extérieures sur la période du 20 juin au 21 septembre 2013

Durant l'été, les habitants sont partis en vacances au mois de juillet. La maison n'a donc pas pu être aérée et on peut voir que la température moyenne dans la maison est de 25°C avec des pics jusqu'à 31°C sur le capteur 7 (figure 5-11).

On peut noter en revanche une homogénéité des températures au rez-de-chaussée et à l'étage. En effet, les capteurs 1 à 4 au rez-de-chaussée renvoient des valeurs de températures peu dispersées d'un emplacement à l'autre que ce soit en façade sud, ouest, est ou nord. Il en va de même pour les capteurs 5 à 7 à l'étage (tableau 5-2).

Capteur	Température moyenne (°C)	Ecart-type (°C)
1	22,8	2,6
2	22,7	2,7
3	22,6	2,9
4	21,3	3
5	24,5	2,6
6	24,4	2,5
7	24,3	2,5

Tableau 5-2 : Températures moyennes et écart-types sur la période estivale du 20 juin au 21 septembre 2013

On peut également noter que la température à l'étage est toujours supérieure de 2°C en moyenne à la température au rez-de-chaussée. En revanche, les variations de températures journalières sont plus importantes au rez-de-chaussée (jusqu'à $\pm 2^\circ\text{C}$ sur les capteurs 1 à 4 au début du mois de juillet, alors qu'on a des variations de $\pm 1^\circ\text{C}$ sur cette même période sur les trois capteurs à l'étage).

Toujours sur cette période estivale, on peut voir que les variations de températures extérieures sont lissées à l'intérieur de la maison : quand à l'extérieur la température varie de plus de 10°C entre le matin et l'après-midi (le 20 juillet par exemple), la variation de température à l'intérieur ne sera que de 4°C au maximum sur le capteur 1.

Si on s'intéresse à présent à l'humidité relative sur cette période, on pourra noter, comme rapporté dans le tableau 5-3, qu'elle est relativement constante sur tout l'été. L'humidité relative dans la maison reste dans des valeurs de confort parfaitement acceptables avec des variations minimales.

Capteur	Humidité relative moyenne (%)	Ecart-type (%)
1	61,7	6,4
2	61,9	6,3
3	62,4	7,3
4	64,8	6,9
5	55,6	4
6	55,2	4,5
7	55,1	4,3

Tableau 5-3 : Humidités relatives moyennes et écart-types sur la période estivale du 20 juin au 21 septembre 2013

Observons à présent les températures et humidité relatives enregistrées par les sondes USB à l'intérieur de la maison sur la période automnale du 22 septembre au 19 novembre 2013.

5.2.2.4.2. Période automnale : du 22 septembre au 19 novembre 2013

Sur cet automne, on peut noter que les variations de température d'un emplacement à l'autre de la maison – au rez-de-chaussée comme à l'étage – sont également peu dispersées (figure 5-12) et avec des variations moindres que durant l'été (tableau 5-4). On notera tout de même, une température un peu moins élevée en façade nord (18,2°C en moyenne) que dans le reste dans la maison.

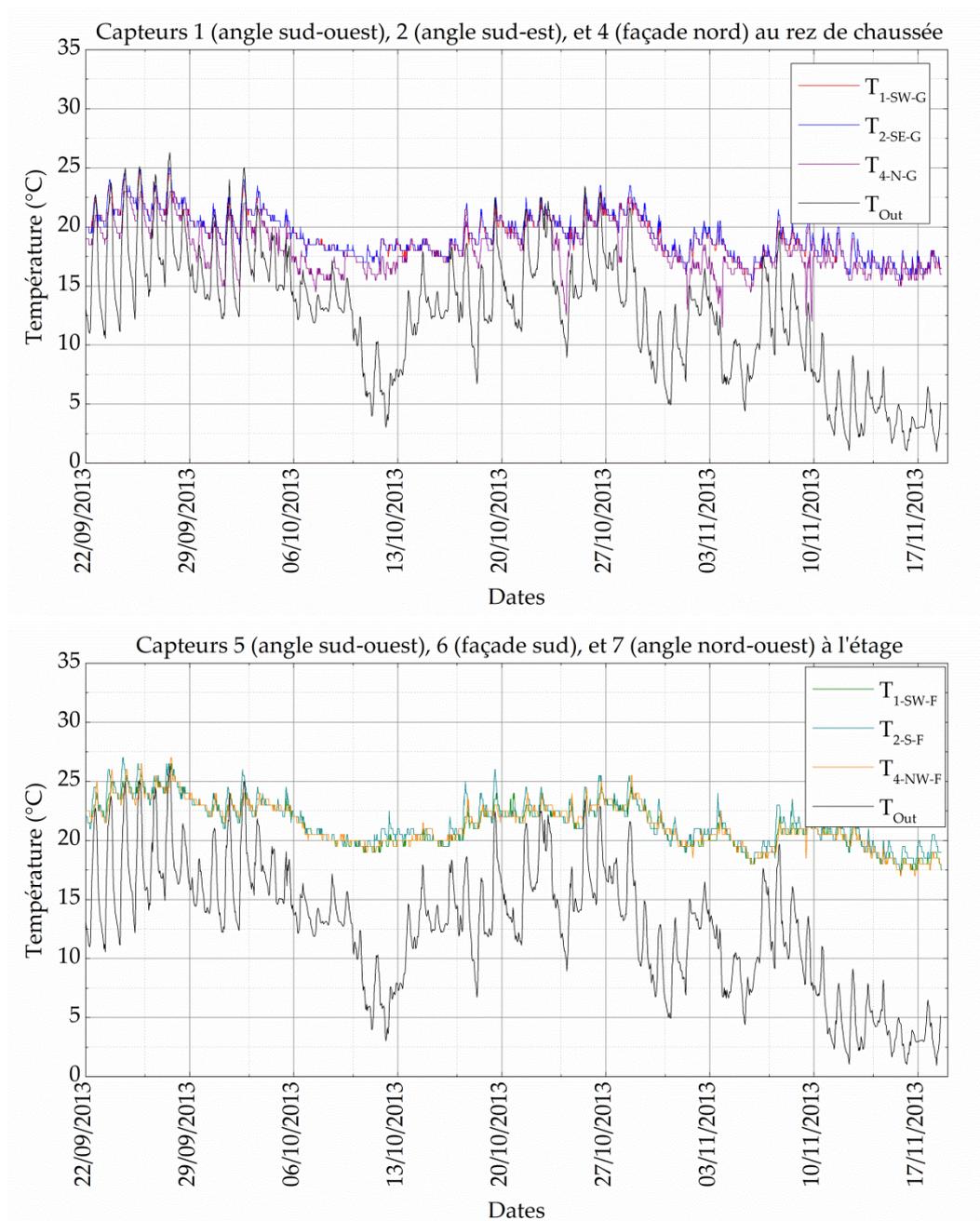


Figure 5-12 : Températures renvoyées par les capteurs USB 1, 2 et 4 au rez-de-chaussée et 5, 6 et 7 à l'étage comparées à la température extérieure sur la période du 22 septembre au 19 novembre 2013

Capteur	Température moyenne (°C)	Ecart-type (°C)
1	19,2	1,9
2	19,4	1,9
3	20,1	1,9
4	18,2	2
5	21,3	1,9
6	21,6	1,9
7	21,3	1,9

Tableau 5-4 : Températures moyennes et écart-types sur la période automnale du 21 septembre au 19 novembre 2013

On peut observer également que les variations de température au centre de la pièce du rez-de-chaussée (capteur 3) sont importantes si on les compare avec la sonde de l'angle sud-ouest par exemple (figure 5-13). Il s'agit en fait du poêle de masse à proximité duquel est installé le capteur. Le propriétaire affirme l'allumer de 18h à 20h depuis début novembre et n'utiliser que ce moyen de chauffage. Il dit conserver une chaleur quasi-constante dans toute la maison ce qui est vérifié par l'ensemble des données des capteurs.

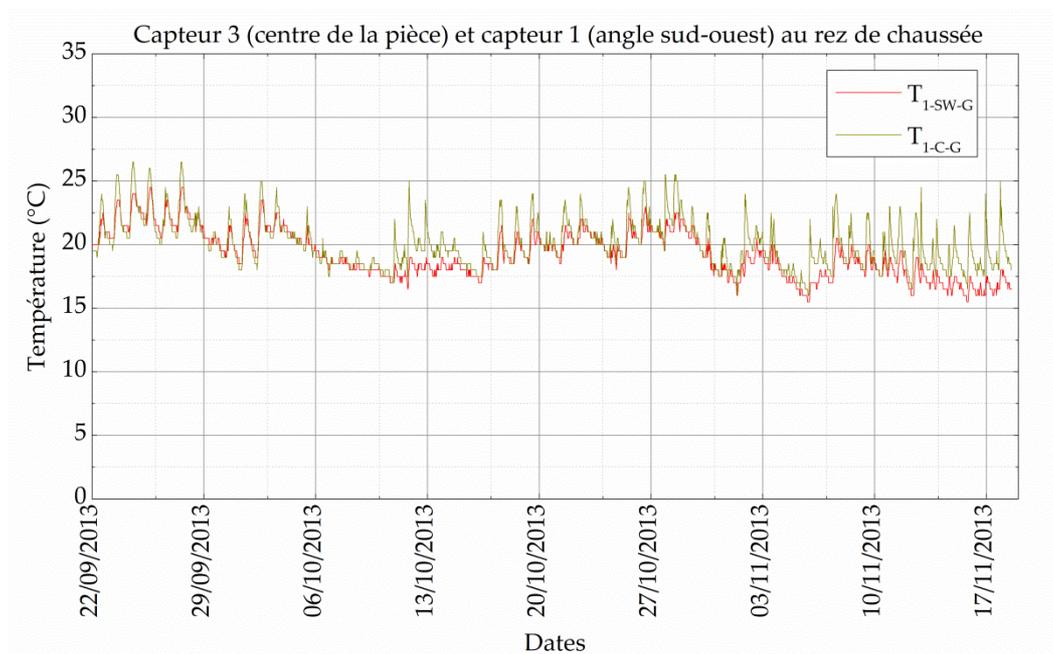


Figure 5-13 : Températures renvoyées par les capteurs USB 1 et 3 au rez-de-chaussée sur la période du 22 septembre au 19 novembre 2013

On peut faire un constat identique à la période précédente sur l'humidité relative à l'intérieur de la maison (tableau 5-5). On peut voir que l'humidité de l'air reste dans des valeurs de confort tout à fait acceptables (72% en moyenne au rez-de-chaussée et 62% à l'étage) avec des variations minimales sur ces 2 mois. L'humidité relative enregistrée sur le capteur 3 est globalement plus basse que les autres car cette sonde est située à proximité du poêle qui a été allumé au cours de cette période.

Capteur	Humidité relative moyenne (%)	Ecart-type (%)
1	71,9	3,9
2	71,8	4,2
3	68,3	5,3
4	74,1	3,9
5	62,8	3,4
6	61,5	3,9
7	63,3	3,8

Tableau 5-5 : Humidités relatives moyennes et écart-types sur la période automnale du 22 septembre au 19 novembre 2013

Penchons-nous maintenant à l'hiver 2012 qui fut une période que l'on peut qualifier « d'étude de cas » pour l'instrumentation et pour le pisé.

5.2.3. LE CAS PARTICULIER DE L'HIVER 2012

5.2.3.1. Températures dans le mur

Cet hiver 2012 fut rigoureux, particulièrement au mois de février 2012 où la température extérieure moyenne était de $-8,7^{\circ}\text{C}$ pendant les 10 jours allant du 3 au 13.

Cette extrême bassesse de température extérieure a, sur la même période, imposée des températures négatives au sein des murs (figure 5-14 et figure 5-15). En effet, la maison n'étant pas encore chauffée, ni même encore fermée, la température du côté intérieure de la maison reste extrêmement basse (la CS215 qui devait mesurer la température n'était pas encore connectée à la centrale). Pour cette période de 10 jours, les températures moyennes et minimales dans les murs sud et ouest au niveau des sondes sont reportées dans le tableau 5-6.

Position	T _{moy} (°C)	T _{min} (°C)
T _{Out}	-8,74	-14,06
T _{W-Ext}	-5,01	-7,89
T _{W-Mid}	-5,15	-6,72
T _{W-Int}	-4,86	-6,14
T _{S-Ext}	-2,83	-7,95
T _{S-Mid}	-2,81	-5,21
T _{S-Int}	-3,57	-5,14

Tableau 5-6 : Températures dans le mur ouest sur la période du 3 au 13 février 2012

L'amplitude des variations de températures sont plus importantes sur la face extérieure du mur sud (jusqu'à 13°C d'amplitude) que sur celle du mur ouest (8°C d'amplitude maximum). On peut expliquer ce fait par l'exposition plus importante de ce mur au vent froid. En revanche, la température moyenne du mur sud est plus élevée que celle du mur ouest, -3°C contre -5°C, de par son exposition au soleil.

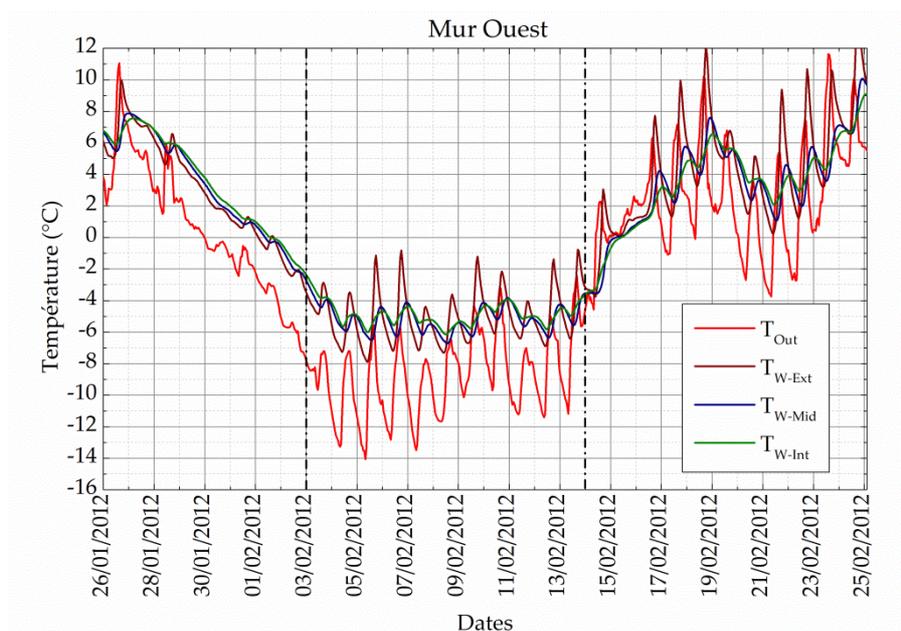


Figure 5-14 : Zoom sur les températures relevées dans le mur ouest et à l'extérieur du 3 au 13 février 2012

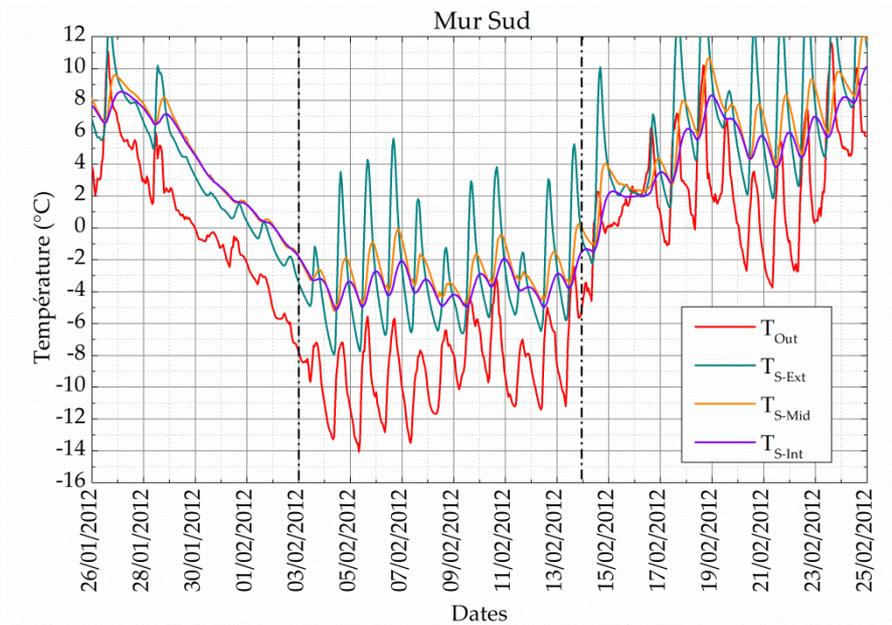


Figure 5-15 : Zoom sur les températures relevées dans le mur sud et à l'extérieur du 3 au 13 février 2012

5.2.3.2. Teneurs en eau durant cet hiver

On peut voir que la teneur en eau dans les murs remonte quand la température passe en deçà de 5°C, i.e. il y aurait condensation de l'eau dans les pores.

La teneur en eau remonte sur les CS616 positionnées dans le mur sud (figure 5-16), passant de 12,5% à 14,5% sur le bord extérieur, de 14,5% à 16% au centre et de 12,25% à 13,5% sur le bord intérieur. On observe ensuite des oscillations journalières en fonction des températures : la teneur en eau diminue quand les températures remontent dans la journée et inversement. Sur la face externe, on peut observer des oscillations de 1,5% d'amplitude (entre 13% et 14,5% environ), au centre de 1% (entre 15,5% et 16,5%) et sur la face interne de 0,5% (entre 13 et 13,5%). La face extérieure étant la plus exposée aux vents et au soleil, ces variations d'amplitudes en fonction de la profondeur dans le mur sont tout à fait logiques. La teneur en eau, au niveau de ces sondes, va ensuite retomber à son niveau du 3 février avec la hausse de températures à partir du 13 février.

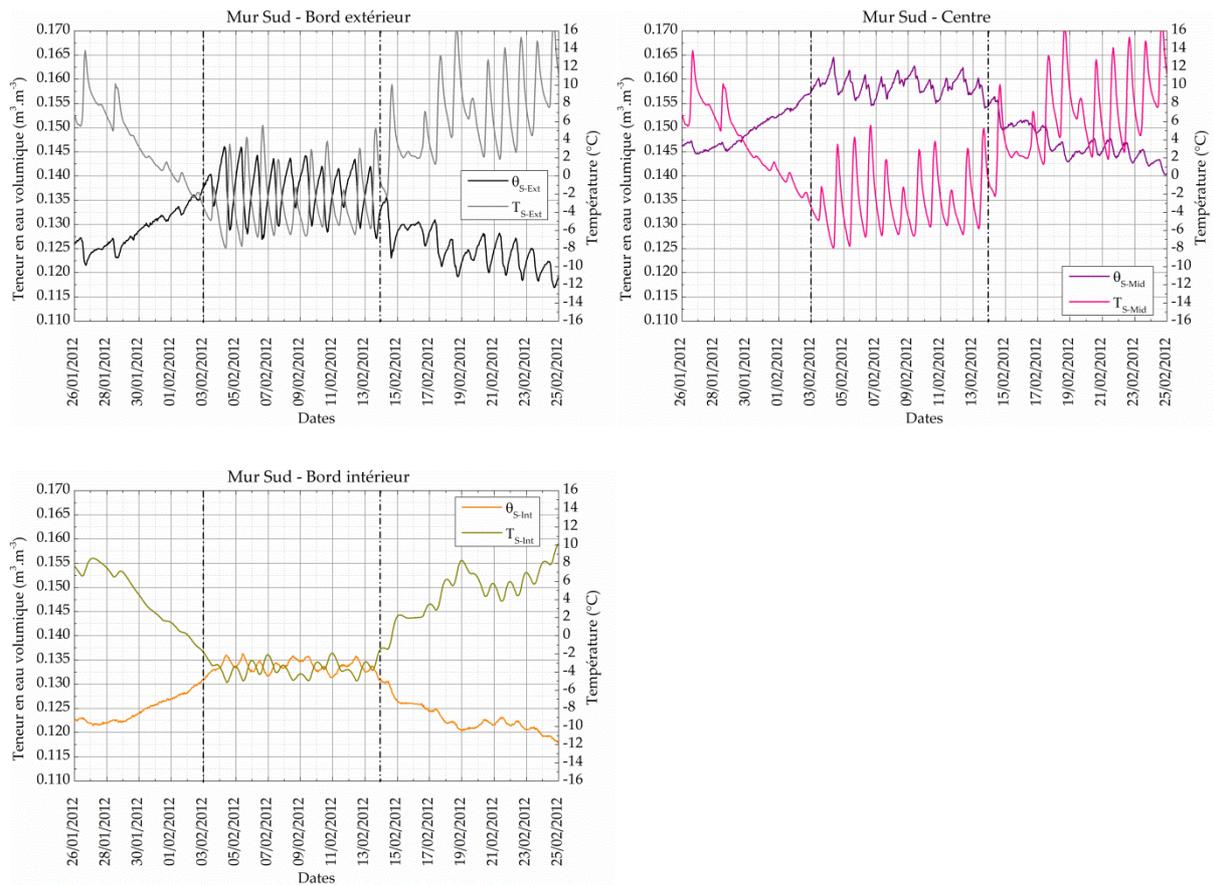


Figure 5-16 : Teneurs en eau mesurées par les CS616 dans le mur sud du 3 au 13 février 2012 (encadrée par les traits mixtes)

Dans le mur ouest (figure 5-17), on a une remontée de la teneur en eau au début de cette période – de 12,25% à 13,5% sur le bord extérieur, de 14,5% à environ 16% au centre et de 12,25% à 13,5% sur l’intérieur. On observe également que la teneur en eau diminue brutalement, passant de 13% à 12,1%, dans la nuit du 4 au 5 février, pour remonter le 6 et diminuer à nouveau brusquement, de 13,5 à 12,5%, le 7 février sur la sonde située sur le bord extérieur ouest. Sur cette même période, les températures sont fortement négatives et varient entre -8 et -2°C au niveau de la sonde. Les variations de teneurs sont ensuite très faibles jusqu’au 13 février, jour où les températures passent de nouveau en positif, alors que l’on pouvait s’attendre à des variations plus importantes, et corrélées avec la température, comme sur le bord extérieur du mur sud.

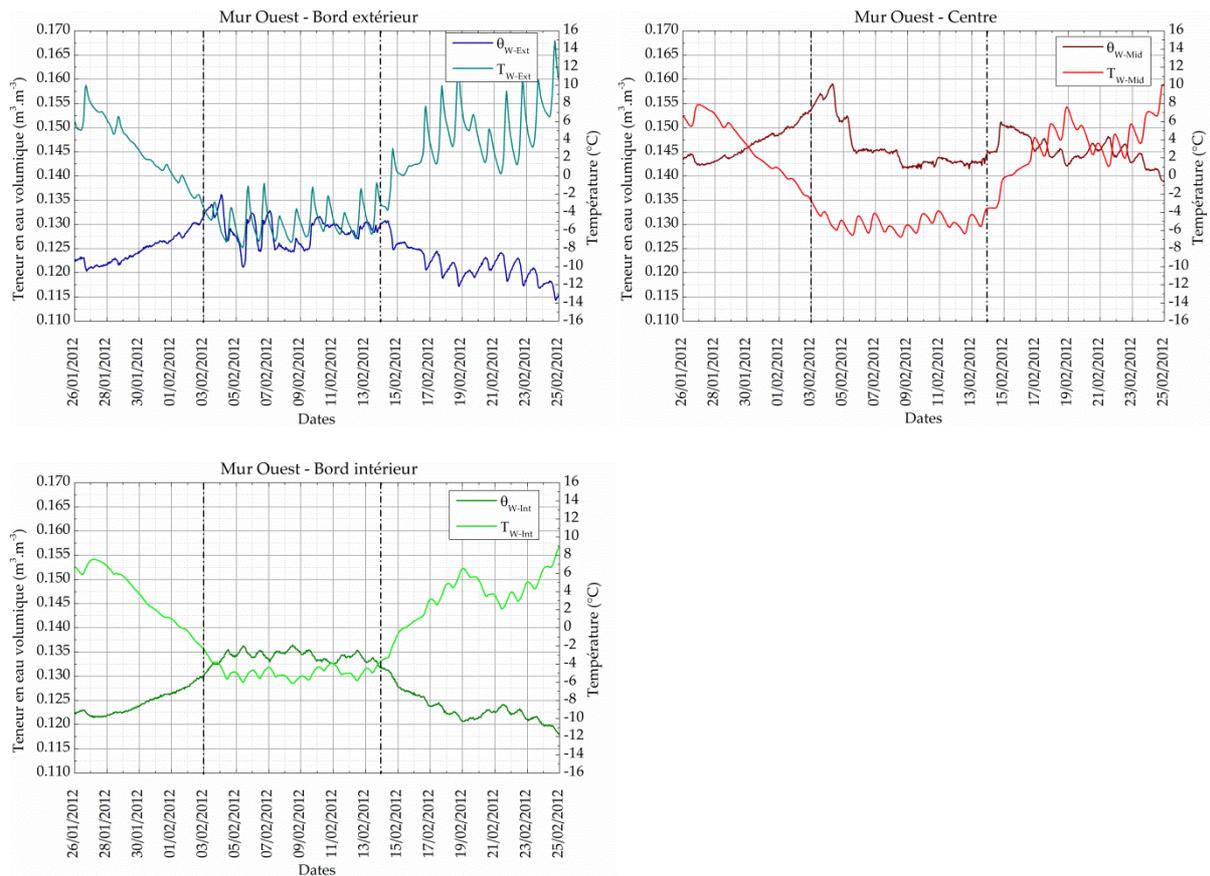


Figure 5-17 : Teneurs en eau mesurées par les CS616 dans le mur ouest du 3 au 13 février 2012 (encadrée par les traits mixtes)

Il semblerait que l'on retrouve un phénomène identique dans la nuit du 4 au 5 février au niveau de la sonde située au centre de ce même mur. La teneur en eau, renvoyée par la sonde, passe subitement de 16% à 14,5%. Elle restera quasi constante jusque dans la nuit du 13 au 14 février pour ensuite reprendre un cycle normal. Sur cette période de 9 jours, la température moyenne est de -6°C au niveau de la sonde.

En revanche ce phénomène n'est pas du tout présent sur tout le côté sud ni même sur le bord intérieur du mur ouest.

Il apparaîtrait alors qu'une partie de l'eau contenue dans le mur ouest ait gelé.

5.2.3.3. Gel de l'eau dans le mur ouest

Afin de vérifier s'il s'agit bien d'un gel de l'eau contenue dans les pores du mur que l'on mesure, il convient de regarder la permittivité diélectrique.

La permittivité diélectrique de la glace est de 3 tandis que celle de l'eau est de 80. Dans l'étalonnage qui a été réalisé sur la sonde CS616, la permittivité diélectrique varie

linéairement avec la teneur en eau. Une chute soudaine de la teneur en eau serait donc à attribuer à une chute de la permittivité diélectrique mesurée dans le mur.

La teneur en eau au centre du mur ouest est quasiment identique à celle au centre du mur sud sur toute la période de mesure. La différence moyenne entre les deux est de 0,08% en teneur en eau volumique. La permittivité diélectrique mesurée à ces emplacements par les CS616 correspondante devrait donc être identique. Or, sur la période du 3 au 13 février, on peut voir que la permittivité diélectrique mesurée par la sonde CS616 au centre du mur ouest est inférieure à celle mesurée au centre du mur sud (figure 5-18). Sur la période du 5 au 10 février, la permittivité diélectrique moyenne au centre du mur ouest est de 8,6 alors qu'elle est de 9,9 sur la même période au centre du mur sud.

Cet écart, significatif, entre les deux permittivités indique donc qu'au moins une partie de l'eau contenue dans le mur ouest a gelé. Sur le gel des matériaux argileux, on pourra lire l'étude de Aubert et al. qui montre que des cycles de gel/dégel sur des blocs de terre comprimée augmentent leur résistance à la compression (Aubert and Gasc-Barbier, 2012).

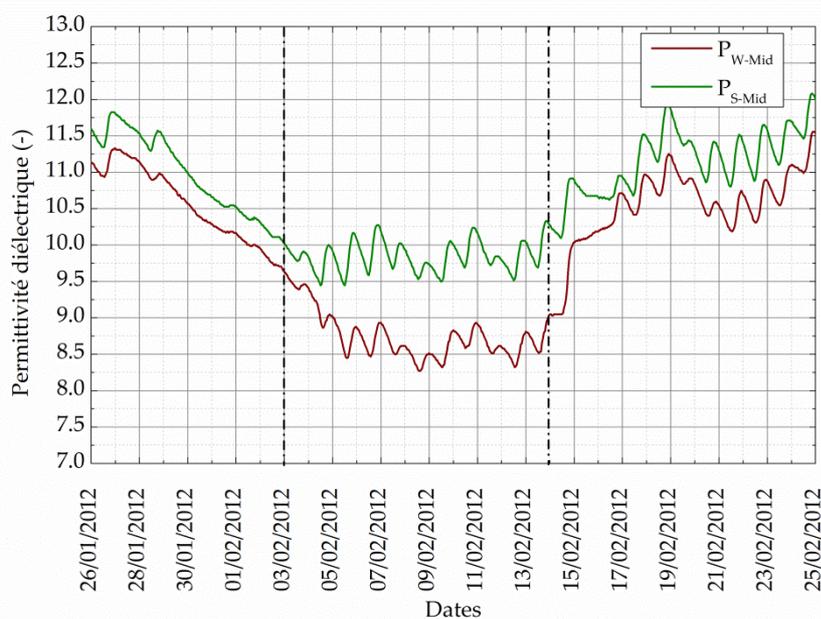


Figure 5-18 : Permittivité diélectrique mesurée aux centres des murs ouest et sud sur la période du 4 au 14 février 2012

5.3. CONCLUSION SUR LA PARTIE 5

La construction en pisé de St Antoine l'Abbaye a été équipée, durant sa construction, de capteurs permettant de contrôler et de quantifier son comportement hygrothermique. Les sondes de teneurs en eau utilisées fonctionnent parfaitement et fournissent une donnée sur l'état hydrique du mur en pisé.

Les CS215 modifiées fournissent également une valeur pour la température au sein du mur. En revanche, la donnée sur l'humidité relative n'est toujours pas accessible – le blocage à 100% indique qu'une goutte d'eau s'est formée près de l'élément sensible. Dans le cas des maquettes, on a pu voir qu'une des sondes finissait par envoyer une donnée quand la teneur en eau du mur passait en deçà de 3,5% (volumique), il n'est donc pas impossible que les sondes installées dans les murs de la maison renvoient un jour une donnée.

Le comportement hygrothermique du pisé de cette maison a également pu être mis en évidence grâce à l'instrumentation. On peut voir le rôle de régulateur de température du pisé ainsi que les phases d'absorption et de désorption en fonction des saisons.

La température et l'humidité relative à l'intérieur de la maison semblent parfaitement régulées et restent dans des gammes de confort pour les occupants.

Au cours de l'hiver 2011/2012, un gel d'une partie de l'eau contenue dans le mur ouest a pu être constaté grâce aux sondes de teneur en eau CS616. Malgré ce gel, aucune fissure n'est visible sur l'extérieur de ce mur, ni aucune autre sorte de détérioration. Néanmoins, une étude sur des cycles de gel/dégel de l'eau contenue dans le pisé pourrait être intéressante. Elle pourrait permettre d'estimer si une trop grande quantité d'eau ne pourrait pas mener à un effondrement en cas de gel/dégel sur un mur soumis à des remontées capillaires importantes (dans un cas pathologique par exemple).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Contexte

Le pisé est un matériau de construction millénaire à faible impact environnementale et ne demandant que peu de transformation ou de transport (énergie grise) pour être mis en œuvre, et cela, plus particulièrement encore dans le cas du pisé non stabilisé. Ce mode constructif a connu un déclin continu depuis l'apparition et l'utilisation massive du béton tout au long du dernier siècle. Mais, que ce soit du pisé fortement stabilisé comme en Australie (jusqu'à 30%) ou non stabilisé (ou très peu) comme en France, il connaît néanmoins un regain d'intérêt toujours croissant sur tous les continents.

En plus de leurs performances écologiques, les murs massifs en pisé sont connus pour leur confort d'habitation et leur capacité à réguler la température et l'intérieur des bâtiments. En France, la réglementation thermique en vigueur (RT2012) impose aujourd'hui au bâti de répondre à des critères drastiques. Or, malgré son confort connu, le pisé ne s'inscrit pas dans ces critères. Il semblerait que, pour le pisé il faille tenir compte d'autres critères qui sont ses caractéristiques hydriques et thermiques (autres que la conductivité). Les mécanismes couplés de transferts de masse et de chaleur qui ont lieu au sein d'un matériau poreux comme le pisé et qui conduisent à cette régulation naturelle sont difficilement mis en évidence.

Ce travail de thèse s'est donc attaché à démontrer la possibilité de mesurer dans des conditions de laboratoire, mais également *in situ*, les transferts hydriques et thermiques se produisant au sein du pisé.

Résultats

Une habitation neuve en pisé a été construite à St Antoine l'Abbaye dans l'Isère en 2011. Cette maison a été étudiée tout au long de cette thèse et la terre la constituant a été utilisée comme matériau de référence. Elle a été caractérisée sous trois angles :

- Géotechnique : granulométrie, sédimentométrie, densité sèche, porosité, VBS et chimie ;
- Hydrique : A-Value, sorption/désorption et coefficient de résistance à la diffusion de vapeur ;
- Thermique : Conductivité, absorption lumineuse et capacité calorifique.

Le pisé de St Antoine l'Abbaye a été comparé suivant ces trois types de caractéristiques à deux autres pisés : un de Lyon, un autre de Montseveroux.

Une chaîne de mesure a été développée utilisant des capteurs de température/humidité relative ainsi que des réflectomètres pour la teneur en eau liquide. Utilisés normalement dans l'air (capteur température/humidité relative) ou pour l'étude des sols (sonde de teneur

en eau), ces capteurs ont été modifiés et étalonnés afin de s'adapter à une application aux murs en pisé sur chantier. Elle a été spécialement conçue pour être mise en œuvre au moment de la fabrication des murs en pisé, durant le damage, et l'étalonnage adapté aux variations de températures, parfois importantes, que l'on peut retrouver dans des conditions d'utilisations réelles. Chaque pisé étant unique, il conviendra évidemment d'étalonner les capteurs en fonction de la terre étudiée.

Cette chaîne de mesure a ensuite été mise en application à l'échelle 1, dans quatre murs en pisé (deux murs 1,5x1x0,5 m et deux autres 1,5x1x0,3 m) durant leurs fabrications. Ces murs sont constitués de la terre utilisée à St Antoine l'Abbaye. Ils ont été installés dans des caissons étanches en bois et isolés au liège – conçus au laboratoire – et pouvant fonctionner comme des double-enceintes climatiques, i.e. en conditions de laboratoire. Les résultats obtenus sur ces maquettes ont permis de :

- Vérifier le bon fonctionnement de la chaîne de mesure ;
- Mesurer avec une excellente précision les variations de teneur en eau et de températures dans le pisé ;
- Mettre en évidence l'effet de la gravité sur l'eau contenue dans les pores du mur ;
- Mettre en évidence l'importance d'utiliser des modèles de comportement hygrothermique couplés dans les études sur le pisé.

Cette chaîne de mesure a ensuite été appliquée à l'échelle supérieure : celle de la maison de St Antoine l'Abbaye. Deux murs de cette construction (sud et ouest) ont été instrumentés avec des capteurs de teneurs en eau et température/humidité relative durant leur construction. Un monitoring autonome d'au moins cinq ans a été mis en place afin de qualifier et quantifier les transferts hydriques et thermiques dans le pisé. Nous avons pu vérifier le bon fonctionnement de l'ensemble des capteurs et de la centrale d'acquisition. La période de séchage de la maison a été enregistrée et nous avons également pu noter des écarts significatifs de teneurs en eau dans les murs suivant les saisons. Nous avons également été en mesure d'enregistrer un gel de l'eau contenu dans les pores des murs grâce aux réflectomètres durant l'hiver 2011-2012. Ce gel ne semble pas avoir provoqué de dégât structurel sur les murs.

D'un point de vue général, comme on a pu le constater dans cette thèse, le squelette poreux du pisé est le lieu de transferts d'eau. On peut donc penser qu'une isolation imperméable pourrait lui être préjudiciable. Cette dernière est souvent mise en cause dans les cas d'effondrement. En effet, en plus de supprimer les effets inertiels et la régulation naturelle en température et en hygrométrie du pisé :

- Une isolation imperméable par l'intérieur risque de refroidir le mur en hiver avec des risques de gel du matériau plus important ;

- Une isolation imperméable par l'intérieur et par l'extérieur, peut empêcher le mur de respirer, c'est-à-dire de capter et/ou de relâcher de la vapeur d'eau. Le phénomène peut être encore plus marqué dans le cas de remontées capillaires. L'absence d'évaporation empêche cette eau d'être évacuée et une teneur en eau trop importante conduit à une fragilisation du mur intérieur. Un effondrement peut alors s'en suivre.

Perspectives

La première perspective de ces travaux sera d'utiliser la chaîne de mesure développée ici afin d'étudier plus avant le comportement hygrothermique du pisé. Les caissons étanches, à équiper de système de régulation de la température et de l'humidité, peuvent être utilisés pour effectuer ces tests. On pourra également utiliser ces capteurs notamment dans le cas de pathologies comme des remontées capillaires sur des murs *in situ*.

On pourra également approfondir la partie modélisation. Sur ce point, une thèse est actuellement en cours au LGCB de l'ENTPE en coopération avec le LOCIE de l'Université de Chambéry. Elle utilise les résultats expérimentaux obtenus au cours de cette thèse pour développer une méthode de calcul des modèles couplés de comportement hygrothermique.

Les données recueillies sur la maison de St Antoine l'Abbaye vont permettre d'étudier le comportement hygrothermique du pisé à l'échelle d'une maison. La maison était à peine habitée au moment de la rédaction de ce mémoire. Les travaux qui suivront devront alors s'attacher à analyser les résultats sur d'autres périodes puis, à terme, à modéliser le comportement de ces murs en pisé en conditions d'occupation de l'habitation.

Comme expliqué précédemment, l'isolation imperméable des murs en pisé est souvent mise en cause dans les cas d'effondrement. Il conviendrait alors d'étudier l'impact d'un isolant sur les transferts de masse et de chaleur au sein du pisé, pourquoi pas grâce aux murs installés dans enceintes conçues au laboratoire.

RÉFÉRENCES

- Adam, E.A., 2001. Compressed Stabilized earth Block Manufacturing in Sudan - UNESCO - Technical Note No. 12, Organization.
- Adam, E.A., Jones, P.J., 1995. Thermophysical properties of stabilised soil building blocks. *Building and Environment* 30, 245–253.
- Allinson, D., Hall, M.R., 2007. Investigating the optimisation of stabilised rammed earth materials for passive air conditioning in buildings, in: *Proceedings of ISES 2007 - Bangalore, India*.
- Allinson, D., Hall, M.R., 2010. Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK. *Energy and Buildings* 42, 845–852.
- Allinson, D., Hall, M.R., 2011. Humidity Buffering using stabilised rammed earth materials. *Proceedings of the ICE - Construction Materials* 1–10.
- Arnold, P.J., 1969. Thermal conductivity of masonry materials. *The Journal of the Institution of Heating and Ventilating Engineers* 37, 101–108.
- Asch, G., Blum, L., Fouletier, J., Marty, J.L., Desgoutte, P., 2010. *Les capteurs en instrumentation industrielle*, 7ème ed. Dunod/l'Usine Nouvelle.
- Aubert, J.E., Gasc-Barbier, M., 2012. Hardening of clayey soil blocks during freezing and thawing cycles. *Applied Clay Science* 65-66, 1–5.
- Azeredo, G.A. de, 2005. Mise au point de procédures d'essais mécaniques sur mortiers de terre®: application à l'étude de leur rhéologie - Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Lyon.
- Barrett, E.P., Joyner, L.G., Halenda, P.P., 1951. The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms. *Journal of the American Chemical Society* 73, 373–380.
- Barthel, J., Hetzenauer, H., Buchner, R., 1992. Dielectric relaxation of aqueous electrolyte solutions. i- solvent relaxation of 1:2, 2:1 and 2:2 electrolyte solutions. *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie physikalische Chemie* 96, 1424–1432.
- Bear, J., 1972. *Dynamics of fluids in porous media*, American Elsevier Publishing Company, New York.
- Bittelli, M., Salvatorelli, F., Pisa, P.R., 2008. Correction of TDR-based soil water content measurements in conductive soils. *Geoderma* 143, 133–142.
- Blackwell, J.H., 1954. A Transient Flow Method for Determination of Thermal Constants of Insulating Materials in Bulk Part 1 - Theory. *Journal of applied physics* 25, 137–144.

- Boutin, C., 1996. Conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé: modélisation par méthode autocohérente. *Materials and Structures* 29, 609–615.
- Brooks, R.H., Corey, A.T., 1964. Hydraulic properties of porous media.
- Brunauer, S., Emmett, P.H., Teller, E., 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society* 60, 309–319.
- BS-5250:1989, 1989. British standard Code of practice for control of condensation in buildings.
- Bui, Q.B., 2008. Stabilité des structures en pisé: durabilité, caractéristiques mécaniques - Thèse de doctorat, Institut National des Sciences appliquées, Lyon.
- Bui, Q.B., Morel, J.C., Hans, S., Meunier, N., 2009. Compression behaviour of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments: the case of rammed earth. *Materials and Structures* 42, 1101–1116.
- Campbell, G.S., Anderson, R.Y., 1998. Evaluation of simple transmission line oscillators for soil moisture measurement. *Computers and Electronics in Agriculture* 20, 31–44.
- Campbell, J.E., 1990. Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz. *Soil Science Society of America Journal* 54, 332–341.
- Campbell Scientific, 2011a. CS215 - Temperature and Relative Humidity measurement probe.
- Campbell Scientific, 2011b. CS616 and CS625 Water Content Reflectometers.
- Campbell Scientific, 2012. CS650 and CS655 Water Content Reflectometers.
- Carslaw, H.S., Jaeger, J.C., 1959. *Conduction of heat in solids*, 2nd ed. Oxford Press.
- Casey, S.P., Hall, M.R., Tsang, S.C.E., Khan, M.A., 2013. Energetic and hygrothermal analysis of a nano-structured material for rapid-response humidity buffering in closed environments. *Building and Environment* 60, 24–36.
- Castel, J.C., 1978. Contributions à la détermination des caractéristiques thermophysiques des matériaux de génie civil - Thèse de docteur-ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées, Rennes.
- Catenaccio, A., Daruich, Y., Magallanes, C., 2003. Temperature dependence of the permittivity of water. *Chemical Physics Letters* 367, 669–671.
- Černý, R., 2009. Time-domain reflectometry method and its application for measuring moisture content in porous materials: A review. *Measurement* 42, 329–336.

- Chabriac, P.A., Fabbri, A., Morel, J.C., Laurent, J.P., Blanc-Gonnet, J., 2014. A procedure to measure the in-situ hygrothermal behavior of earth walls. *Materials* 7, 3002–3020.
- Cointeraux, F., 1790. *Les Cahiers de l'Ecole d'Architecture Rurale*.
- Collet, F., 2004. Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux - Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Rennes.
- Contet, B., 2012. Caractérisation du comportement hygrothermique du pisé - Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Vaulx-en-Velin.
- Cosenza, P., Tabbagh, A., 2004. Electromagnetic determination of clay water content: role of the microporosity. *Applied Clay Science* 26, 21–36.
- Coussy, O., 2004. *Poromechanics*, Wiley. ed.
- Crane, R.A., Vachon, R.J., 1977. A prediction of the bounds on the effective thermal conductivity of granular materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 20, 711–723.
- Csicsely, A., 2002. Clay walls in mirror of thermal technique, in: PLEA International Conference on Passive and Low Energy Architecture 2002: Design with the Environment.
- CSTB, 2009. Transferts d'humidité à travers les parois: évaluer les risques de condensation - Guide technique.
- CSTB, 2011. Analyse des caractéristiques des systèmes constructifs non industrialisés - Rapport final Groupe de travail Terre Crue 2012.
- Daïan, J.F., 1986. Processus de condensation et de transfert d'eau dans un matériau meso et macroporeux®: étude expérimentale du mortier de ciment - Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Daïan, J.F., 2013. Equilibre et transferts en milieux poreux - <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00452876/fr/>.
- De Giovanni, A., Laurent, M., 1986. Une nouvelle technique d'identification de la diffusivité thermique pour la méthode flash. *Revue de Physique Appliquée* 21, 229–237.
- De Vries, D.A., 1958. Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media. *Transactions, American Geophysical Union* 39, 909–916.
- Delacre, E., 2000. Caractérisation thermique de matériaux poreux humides par analyse inverse dans le domaine fréquentiel - Thèse de doctorat, Université d'Artois, Lens.

- Delahousse, S., 2011. L'architecture de terre crue en mouvement en France et au Mali - Mémoire D.U. BATIR - Université de Nantes.
- Doumenc, F., 2009. Eléments de thermodynamique et thermique - Université Pierre et Marie Curie.
- Easton, D., 1996. The rammed earth house, Chelsea Gr. ed.
- Eller, H., Denoth, A., 1996. A capacitive soil moisture sensor 185, 137–146.
- Fabbri, A., Fen-Chong, T., Azouni, A., Thimus, J.F., 2009. Investigation of water to ice phase change in porous media by ultrasonic and dielectric measurements. *Journal of Cold Regions Engineering* 23, 69–90.
- Fabbri, A., Fen-Chong, T., Coussy, O., 2006. Dielectric capacity, liquid water content, and pore structure of thawing–freezing materials. *Cold Regions Science and Technology* 44, 52–66.
- Fen-Chong, T., Fabbri, A., Guilbaud, J.P., Coussy, O., 2004. Determination of liquid water content and dielectric constant in porous media by the capacitive method. *Comptes Rendus Mécanique* 332, 639–645.
- Fredlund, D.G., Xing, A., 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian geotechnical journal* 31, 521–532.
- Gaudu, J.C., Mathieu, J.M., Fumanal, J.C., Bruckler, L., Chanzy, A., Bertuzzi, P., Stengel, P., Guennelon, R., 1993. Mesure de l'humidité des sols par une méthode capacitive: analyse des facteurs influençant la mesure. *Agronomie* 13, 57–73.
- Gelard, D., 2005. Identification et caractérisation de la cohésion interne du matériau terre dans ses condition naturelle de conservation - Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, Grenoble.
- Ghorbani, A., Cosenza, P., Revil, A., Zamora, M., Schmutz, M., Florsch, N., Jougnot, D., 2009. Non-invasive monitoring of water content and textural changes in clay-rocks using spectral induced polarization: A laboratory investigation. *Applied Clay Science* 43, 493–502.
- Gong, Y., Cao, Q., Sun, Z., 2003. The effects of soil bulk density, clay content and temperature on soil water content measurement using time-domain reflectometry. *Hydrological Processes* 3614, 3601–3614.
- Grossein, O., 2009. Modélisation et simulation numérique des transferts couplés de d'eau, de chaleur et de solutés dans le patrimoine architectural en terre, en relation avec sa dégradation - Université Joseph Fourier, Grenoble.
- Guibaud, C., 2005. L'architecture en pisé dans le canton de Boën (Loire). *In Situ* 6.

- Hall, M.R., 2004a. Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency. *Construction and Building Materials* 18, 281–286.
- Hall, M.R., 2004b. Moisture ingress in rammed earth: Part 1 – the effect of soil particle-size distribution on the rate of capillary suction. *Construction and Building Materials* 18, 269–280.
- Hall, M.R., 2007. Assessing the environmental performance of stabilised rammed earth walls using a climatic simulation chamber. *Building and Environment* 42, 139–145.
- Hall, M.R., Allinson, D., 2008. Assessing the moisture-content-dependent parameters of stabilised earth materials using the cyclic-response admittance method. *Energy and Buildings* 40, 2044–2051.
- Hall, M.R., Allinson, D., 2009a. Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. *Building and Environment* 44, 1935–1942.
- Hall, M.R., Allinson, D., 2009b. Influence of cementitious binder content on moisture transport in stabilised earth materials analysed using 1-dimensional sharp wet front theory. *Building and Environment* 44, 688–693.
- Hall, M.R., Allinson, D., 2009c. Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials. *Applied Thermal Engineering* 29, 740–747.
- Hall, M.R., Allinson, D., 2010. Transient numerical and physical modelling of temperature profile evolution in stabilised rammed earth walls. *Applied Thermal Engineering* 30, 433–441.
- Hall, M.R., Djerbib, Y., 2006a. Moisture ingress in rammed earth: Part 2 – The effect of soil particle-size distribution on the absorption of static pressure-driven water. *Construction and Building Materials* 20, 374–383.
- Hall, M.R., Djerbib, Y., 2006b. Moisture ingress in rammed earth: Part 3 – Sorptivity, surface receptiveness and surface inflow velocity. *Construction and Building Materials* 20, 384–395.
- Heathcote, K., 2011. The thermal performance of earth buildings. *Informes de la Construcción* 63, 117–126.
- Hens, H., 2007. Modelling the heat, air, and moisture response of building envelopes: what material properties are needed, how trustful are the predictions? *Journal of American Society for Testing and Materials* 4.
- Hladik, J., 1990. *Métrieologie Des Propriétés Thermophysiques Des Matériaux*, Masson. ed.

- Holm, A., Künzle, H.M., 2000. Non-isothermal moisture transfer in porous building materials. *Materialsweek*, September.
- Huet, J., Castel, J.C., Amoros, D., Laquerbe, M., 1979. Sur la détermination de la diffusivité thermique et de la conductivité thermique des matériaux de construction homogènes en régime transitoire. *Materials and Structures* 12, 467–474.
- INSEE, 2012. Production de déchets par émetteur - http://www.insee.fr/fr/publications-et-services/default.asp?page=dossiers_web/dev_durable/prod_dechets.htm.
- INSEE, 2013. Consommation d'énergie primaire par type d'énergie et par secteur en 2012 - http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg_id=0&ref_id=NATTEF11347.
- ISO-10456, 2007. Matériaux et produits pour le bâtiment - Propriétés hygrothermiques - Valeurs utiles tabulées et procédures pour la détermination des valeurs thermiques déclarées et utiles.
- IUPAC, 1994. Recommendations for the characterization of porous solids. *Pure And Applied Chemistry* 66, 1739–1758.
- Jackson, K.W., Black, W.Z., 1983. A unit cell model for predicting the thermal conductivity of a granular medium containing an adhesive binder. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 26, 87–99.
- Jannot, Y., 2011. *Théorie et pratique de la métrologie thermique*.
- Jannot, Y., Acem, Z., 2007. A quadrupolar complete model of the hot disc. *Measurement Science and Technology* 18, 1229–1234.
- Kaatze, U., 1997. The dielectric properties of water in its different states of interaction. *Journal of Solution Chemistry* 26, 1049–1112.
- Kalboussi, A., 1990. Transfert de chaleur en régime stationnaire et dynamique à travers les milieux poreux humides non saturés - Thèse de doctorat, Université Claude Bernard de Lyon I.
- Kelleners, T.J., Seyfried, M.S., Blonquist, J.M., Bilskie, J., Chandler, D.G., 2005. Improved Interpretation of Water Content Reflectometer Measurements in Soils. *Soil Science Society of America Journal* 69, 1684.
- Kersten, M.S., 1949. Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils - Engineering Experimental Station, University of Minnesota (USA).
- Kirkpatrick, S., 1973. Percolation and conduction. *Reviews of Modern Physics* 45, 574–588.
- Krischer, O., Kröll, K., 1963. *Technique du séchage*, Springer. ed.

- Krus, M., 1996. Moisture Transport and Storage Coefficient of Porous Mineral Building Materials - Theoretical Principles and new test methods.
- Krus, M., Holm, A., 1999. Simple method to approximate the liquid Transport coefficient describing the absorption and drying, in: 5th Symposium 'Building Physics in the Nordic Countries - Göteborg, August 24-26. pp. 241-248.
- Krus, M., Künzel, H.M., Kiessel, K., n.d. Use of advanced measuring and calculative procedure for moisture assessment of building elements - Fraunhofer Institute for Building physics.
- Künzel, H.M., 1995. Simultaneous heat and moisture transport in building components one - and two-dimensional calculation using simple parameters - Report on PhD thesis, Fraunhofer Institute of Building Physics.
- Langmuir, I., 1918. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society* 40, 1361-1403.
- Larbi, S., 1990. Quelques aspects de la physique des transferts en milieu poreux lors d'un processus d'humidification par condensation - Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse.
- Laurent, J.P., 1986. Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaires - Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, Grenoble.
- Lide, D.R., 2001. Handbook of Chemistry and Physics 2001-2002 - CRC Press - 82nd edition.
- Liuzzi, S., Hall, M.R., Stefanizzi, P., Casey, S.P., 2013. Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate. *Building and Environment* 61, 82-92.
- Lohonyai, A.J., Korany, Y., 2013. Comparison of building enclosures designed to the minimum requirements of the 2011 NECB. *Energy & Buildings* 66, 143-153.
- Lotti, G., Mecca, S., 2011. Terra Europea - Earthen Architecture in the European Union, ETS. ed.
- Luikov, A.V., 1966. Heat and mass transfer in capillary-porous bodies, translation of *Teoreticheskie osnovy stroitel'noy teplofiziki*. Pergamon Press 515-519.
- Luikov, A.V., 1975. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 18, 1-14.
- Maison de Pays (association loi 1901), 2010. Le pisé en Pays Voironnais.

- Malicky, M.A., Plagge, R., Roth, C.H., 1996. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. *European Journal of Soil Science* 47, 357–366.
- Maniatidis, V., Walker, P., 2003. A Review of Rammed Earth Construction - Dti Partners in Innovation Project: “Developing Rammed Earth for UK Housing.”
- McGregor, F., Heath, A., Fodde, E., Shea, A., 2014. Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks. *Building and Environment* 75, 11–18.
- Merouani, L., 1987. Phénomène de sorption et de transfert d’humidité dans les bâtiments. Etude expérimentale comparative d'un mortier de ciment et d'un enduit de façade - Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Meunier, N., 2003. Echanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue (Montpellier 2003) - ARCHITERRE.
- Ministère de la culture et de la communication, 2006. Manuel de sensibilisation à la restauration de la maçonnerie.
- Minke, G., 2000. *Earth Construction Handbook - The building material earth in modern architecture.*
- Morel, J.C., Mesbah, A., Oggero, M., Walker, P., 2001. Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction. *Building and Environment* 36, 1119–1126.
- Mortensen, N., 2008. The naturally air conditioned house - Sharing Sustainable Solutions.
- Morton, T., Stevenson, F., Taylor, B., Smith, N.C., 2005. Low cost earth brick construction - Partners in Innovation Research Project final report, Scotland.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12, 513–522.
- Noborio, K., 2001. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry®: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 31, 213–237.
- O’Brien, J.J., Oberbauer, S.F., 2001. An inexpensive, portable meter for measuring soil moisture. *Soil Science Society of America Journal* 65, 1081–1083.
- Obeid, W., 1998. Modélisation du couplage thermo-hygro-mécanique en milieux poreux non saturés - Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- Oti, J.E., Kinuthia, J.M., Bai, J., 2010. Design thermal values for unfired clay bricks. *Materials & Design* 31, 104–112.

- P'Kla, A., 2002. Caractérisation en compression simple des Blocs de Terre Comprimée (BTC)®: application aux maçonneries "BTC-mortier de terre" - Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Lyon.
- Pasztor, Z., Peralta, P.N., Molnar, S., Peszlen, I., 2012. Modeling the hygrothermal performance of selected North American and comparable European wood-frame house walls. *Energy & Buildings* 49, 142–147.
- Paul, W.L., Taylor, P., 2008. A comparison of occupant comfort and satisfaction between a green building and a conventional building. *Building and Environment* 43, 1858–1870.
- Philip, J.R., De Vries, D.A., 1957. Moisture movement under temperature gradients. *Transactions, American Geophysical Union* 38, 222–232.
- Pignal, B., 2005. Terre crue - Techniques de construction et de restauration, Eyrolles. ed.
- Pisé terre D'avenir (association loi 1901), 1985. Comportement thermique de la terre crue.
- Prelovsek, P., Uran, B., 1984. Generalised hot wire method for thermal conductivity measurements. *Journal of Physics E: Scientific Instruments* 17, 674–677.
- Pritchett, I., 2004. The modern face of lime. *Building for a future* 14, 62–63.
- Quénard, D., 1989. Adsorption et transfert d'humidité dans les matériaux hygroscopiques®: approches du type percolation et expérimentation - Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Rondelet, J.B., 1817. *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir* (Tome 1). Paris.
- Soudani, L., 2013. Modélisation hygrothermique de murs en pisé - Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Vaulx-en-Velin.
- Taylor, P., Fuller, R.J., Luther, M.B., 2008. Energy use and thermal comfort in a rammed earth office building. *Energy and Buildings* 40, 793–800.
- Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 16, 574–582.
- Van Damme, H., 2002. L'eau et sa représentation, in: *Mécanique Des Sols Non Saturés*. Hermès, pp. 23–68.
- Van Genuchten, M.T., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 892–898.
- Volhard, F., 1983. *Leichtlehmbau: alter Baustoff - neue Technik*, Karlsruhe. ed.

- Walker, P., Keable, R., Martin, J., Maniatidis, V., 2004. Rammed Earth: Design and construction guidelines - Dti Partners in Innovation Project: "Developing Rammed Earth for UK Housing."
- Woodside, W., Messmer, J.H., 1961. Thermal Conductivity of Porous Media. I. Unconsolidated Sands. *Journal of applied physics* 32, 1688–1706.
- Wyllie, M.R.J., Southwick, P.F., 1954. An Experimental Investigation of the S.P. and Resistivity Phenomena in Dirty Sands. *Journal of Petroleum Technology* 44–57.
- Zakri, T., Laurent, J.P., Vauclin, M., 1998. Theoretical evidence for 'Lichtenecker's mixture formulae' based on the effective medium theory. *Journal of Physics D: Applied Physics* 31, 1589–1594.
- Zerwer, A., Santamarina, J.C., 1994. Double layers in pyrometamorphosed bentonite: index properties and complex permittivity. *Applied Clay Science* 9, 283–291.
- Zumbrunnen, D.A., Viskanta, R., Incropera, F.P., 1986. Heat transfer through porous solids with complex internal geometries. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 29, 275–284.

TABLE DES FIGURES

Figure 1-1 : 1. Grande Mosquée de Djenné (Mali) 2. Alhambra de Grenade (Espagne) 3. Grande muraille de Chine dans la province du Jiayuguan (Chine) 4. Shibam (Yémen) 5. Immeuble de 5 étages à Weilburg (Allemagne) 6. Maison en craie compactée à Amesbury (Wiltshire – Angleterre) – Montage (Contet, 2012).....	22
Figure 1-2 : Présence de la construction en terre crue en Europe (Lotti and Mecca, 2011).....	22
Figure 1-3 : Première page d'un « Cahier de l'Ecole d'Architecture Rurale » de François Cointeraux de 1790.....	24
Figure 1-4 : Château de Chabet dans la Loire (42) (Guibaud, 2005).....	25
Figure 1-5 : Une ancienne usine à Saint Siméon de Bressieux dans l'Isère réhabilitée en logements.....	25
Figure 1-6 : Description d'un putoir d'après les carnets de F. Cointeraux (Cointeraux, 1790)	26
Figure 1-7 : Maison en pisé datant de la fin du 19 ^{ème} siècle avec un soubassement en maçonnerie de pierres.....	27
Figure 1-8 : Technique de banchage du pisé dans le Lyonnais (figure supérieure) et dans le Bugey (figure inférieure) d'après les carnets de F. Cointeraux (Cointeraux, 1790)	27
Figure 1-9 : Technique de jointure à la chaux oblique à gauche (17 ^{ème} siècle) et verticale à droite (19 ^{ème} et 20 ^{ème} siècle) sur une même construction en pisé (Guibaud, 2005).....	28
Figure 1-10 : Un fouloir pneumatique non-modifié (à gauche) ainsi qu'un autre muni d'un morceau de bois carré (à droite). Photo : N. Meunier	29
Figure 1-11 : Un coffrage moderne en métal sur un chantier en France. Photo : N. Meunier .	30
Figure 1-12 : Bâtiment en pisé non-stabilisé en Autriche. Photo : M. Rauch	31
Figure 1-13 : Préfabrication du pisé en usine en Autriche. Photo : M. Rauch.....	32
Figure 1-14 : Transport et mise en œuvre sur chantier d'un pisé préfabriqué. Photo : M. Rauch.....	32
Figure 1-15 : Un bâtiment composé de 160 éléments de pisé préfabriqué. Photo : M. Rauch.	33
Figure 1-16 : Situation géographique de St Antoine l'Abbaye (Google Maps ©).....	35
Figure 1-17 : Implantation des différentes constructions sur le site de la Chabeaudière à St Antoine l'Abbaye	35
Figure 1-18 : Plan du rez-de-chaussée (en haut) et de l'étage (en bas) de la maison étudiée dans cette thèse à St Antoine l'Abbaye. Jérôme Boucq Architecte	36
Figure 1-19 : Partie bois/paille de l'habitation étudiée	37
Figure 1-20 : Poêle à bois sur mesure.....	38
Figure 1-21 : Quelques étapes de l'édification de la maison. En haut à gauche, le chantier avant la construction du mur sud/ouest et en haut à droite, la construction de ce mur. Au milieu à gauche, le mur sud/ouest instrumenté fini. Au milieu à droite, la mise en place des armatures bois et remplissage à la paille. En bas à gauche, la pause du Douglas extérieur. En bas à droite, la perspective d'intégration par l'architecte.....	39
Figure 2-1 : Centrale d'acquisition CR1000 et multiplexeur AM16/32B	43
Figure 2-2 : CS215 et son élément sensible SHT75.....	45
Figure 2-3 : Précision de la sonde CS215 sur la mesure de la température.....	46

Figure 2-4 : Capteur HR capacitif (Source : (Asch et al., 2010))	46
Figure 2-5 : Précision de la sonde CS215 sur la mesure de l'humidité relative	47
Figure 2-6 : CS215 modifiée par Cementys.....	47
Figure 2-7 : Sonde CS215 modifiée au laboratoire pendant sa mise en place dans un mur en pisé.....	48
Figure 2-8 : Terminal pour l'adressage des sondes CS215. Dans cet exemple, on a affecté l'adresse 8 à une sonde connectée sur le port 7 dont l'adresse précédente était 4.....	49
Figure 2-9 : Hygromètre à miroir refroidi Edgetech Dewtrack II (Source : Edgetech).....	50
Figure 2-10 : Schéma de principe d'un hygromètre à miroir refroidi (Source : Asch et al., 2010)	50
Figure 2-11 : Sonde de température et d'humidité relative USB	51
Figure 2-12 : Précision du capteur EL-USB 2 en température.....	52
Figure 2-13 : Précision du capteur EL-USB 2 en humidité relative	52
Figure 2-14 : Capteur de température 107.....	53
Figure 2-15 : Equations d'étalonnage pour des sondes de teneurs en eau	55
Figure 2-16 : Permittivité diélectrique de l'eau pure en fonction de la température (Catenaccio et al., 2003)	56
Figure 2-17 : Principe de fonctionnement d'une sonde TDR.....	57
Figure 2-18 : La sonde CS616	60
Figure 2-19 : Teneur en eau volumique calculée par défaut par la sonde CS650 en fonction de la température (-10-40°C) et de la permittivité diélectrique.....	62
Figure 2-20 : Permittivité diélectrique apparente en fonction du temps de parcours de l'onde mesuré par la sonde et de la correction en température par défaut (a) et les trois équations d'étalonnages proposées par Campbell Scientific en fonction du temps de parcours de l'onde mesuré par la sonde et de la correction en température (b), (c) et (d)	64
Figure 2-21 : Etalonnage des sondes CS616 et CS650. Le bloc de gauche est nu tandis que le bloc de droite est emballé dans un film plastique	66
Figure 2-22 : Teneurs en eau volumique obtenue par pesée dans les blocs comparées à l'étalonnage par défaut et au modèle bilinéaire.....	68
Figure 2-23 : Etalonnages de la sonde CS650 (à gauche) et de la CS616 (à droite) à partir du modèle bilinéaire sur la plage de température -10 à 40°C et une permittivité diélectrique de 0 à 50	69
Figure 3-1 : Le couplage hygrothermique dans le pisé	73
Figure 3-2 : Extraction de la terre de St Antoine l'Abbaye pour la préparation des échantillons à tester	74
Figure 3-3 : Les trois pisés étudiés au cours de cette thèse.....	75
Figure 3-4 : Granulométrie des trois pisés étudiés	81
Figure 3-5 : Détermination de la densité d'un échantillon de pisé par pesée hydrostatique. Le plus gros échantillon testé (7kg) enduit de paraffine (à gauche) et le dispositif de pesée (à droite) avec un panier plongé dans l'eau	83

Figure 3-6 : Résultat d'une VBS où l'on voit l'auréole bleu clair autour d'une goutte sur un papier filtre	85
Figure 3-7 : Schéma du principe de mesure du coefficient d'absorption d'eau A.....	87
Figure 3-8 : Mesure du coefficient d'absorption d'eau A.....	88
Figure 3-9 : Résultats des mesures du coefficient d'absorption d'eau A	88
Figure 3-10 : Isothermes de sorption/désorption des trois pisés étudiés (20°C)	90
Figure 3-11 : Isothermes de sorption/désorption de la terre de St Antoine l'Abbaye mesurée à la DVS (25°C).....	91
Figure 3-12 : Schéma de principe de la mesure du coefficient de résistance à la vapeur μ	93
Figure 3-13 : Système de mesure du coefficient de résistance à la vapeur d'eau	93
Figure 3-14 : Mesure du gain de masse des pisés étudiés dans le caisson à 43,2% d'humidité relative.....	95
Figure 3-15 : Mesure du gain de masse des pisés étudiés dans le caisson à 75,5% d'humidité relative.....	96
Figure 3-16 : Conductivité thermique en fonction de la densité du matériau terre à l'état sec dans la littérature : (Adam and Jones, 1995; Adam, 2001; Allinson and Hall, 2010; Arnold, 1969; CSTB, 2011; Hall and Allinson, 2009c; Heathcote, 2011; Laurent, 1986; Minke, 2000; Oti et al., 2010; Pisé terre D'avenir (association loi 1901), 1985; Taylor et al., 2008; Volhard, 1983; Walker et al., 2004)	98
Figure 3-17 : Un échantillon de mélange chaux-liège très rugueux sur lequel nous avons pu mesurer la conductivité thermique au fil chaux en utilisant de la pâte thermique de conductivité $3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	99
Figure 3-18 : Conductivité thermique des trois pisés étudiés en fonction de la teneur en eau	100
Figure 3-19 : Réflexion de la lumière sur des surfaces opaques	102
Figure 3-20 : Dispositif de mesure du coefficient d'absorption lumineuse.....	103
Figure 3-21 : Mesure du coefficient de réflexion sur quatre échantillons de la terre de St Antoine l'Abbaye	104
Figure 3-22 : Mesure du coefficient de réflexion sur quatre échantillons de la terre de Montseveroux	104
Figure 3-23 : Mesure du coefficient de réflexion sur trois échantillons de la terre de Lyon..	105
Figure 3-24 : Schéma de principe d'une DSC.....	107
Figure 4-1 : U et tirants permettant de soulever le mur en pisé après sa fabrication	112
Figure 4-2 : Coffrage pour la réalisation des maquettes de murs en pisé. On peut voir dans le fond les tirants auxquels sont accrochés des U qui permettent de soulever le mur une fois décoffré	112
Figure 4-3 : Schémas de damage des murs en pisé. Le premier passage est en "zigzag" (en haut) tandis que le second est en spiral (en bas).....	113
Figure 4-4 : Placement des sondes de teneur en eau perpendiculairement aux flux.....	115

Figure 4-5 : Placement de la sonde CS616 (à gauche) et de la sonde CS215 modifiée (à droite) dans un mur de 30 cm d'épaisseur. Elles sont placées puis recouverte de 1 cm d'épaisseur de terre tamisée pour éviter la présence immédiate de gros granulats qui pourraient les endommager pendant le compactage.....	115
Figure 4-6 : Une thermistance de surface 107 isolée de l'ambiance extérieure et collée sur le mur	117
Figure 4-7 : Mesure de la température et de l'humidité relative dans l'ambiance avec une sonde CS215	117
Figure 4-8 : Fabrication du socle des caissons étanches avec isolation au sol (en haut à gauche), un des murs dans un film plastique après sa fabrication (en haut à droite), déplacement d'un mur grâce aux U (en bas à gauche) et placement d'un mur dans un caisson (en bas à droite).....	118
Figure 4-9 : Vue d'ensemble d'un des caissons avec une porte ouverte (à gauche) et la centrale d'acquisition avec le groupe de régulation température/humidité relative (à droite)	119
Figure 4-10 : Schéma d'implantation des capteurs des murs A30 et B30 dans leurs caissons	120
Figure 4-11 : Schéma d'implantation des capteurs du mur A50 dans son caisson. Le mur B50 est équipé des mêmes sondes mais uniquement à mi-hauteur (50 cm).....	121
Figure 4-12 : Câblage des sondes sur la CR1000 et le multiplexeur	122
Figure 4-13 : Conditions hydrique et thermique dans les ambiances à droite et à gauche du mur B50 sur l'année du séchage (n.d.a. = no data available).....	127
Figure 4-14 : Conditions hydrique et thermique dans les ambiances à droite et à gauche du mur A50 sur l'année du séchage (n.d.a. = no data available). N.B. La baisse brutale au 355 ^{ème} jour sur la température et l'humidité relative correspond à une ouverture à gauche du caisson au cours d'une visite du laboratoire	128
Figure 4-15 : Zooms sur les humidités relatives et les températures mesurées dans les ambiances du caisson à droite et à gauche du mur B50 lors des trois tests d'étanchéité	130
Figure 4-16 : Zooms sur les humidités relatives et les températures mesurées dans les ambiances du caisson à droite et à gauche du mur A50 lors des trois tests d'étanchéité	132
Figure 4-17 : Zooms sur les teneurs en eau dans les murs A50 et B50 lors des trois tests d'étanchéités des caissons. On relève la teneur en eau sur les CS616 et CS650 situées à gauche et à droite dans les murs à 50 cm de hauteur	134
Figure 4-18 : Teneurs en eau renvoyées par les sondes CS616 et CS650 situées à droite et à gauche dans le mur A50. Le point rouge sur l'axe des ordonnées est la teneur en eau de fabrication mesurée par prélèvement d'échantillon lors de la fabrication (cf. Tableau 4-1)..	136
Figure 4-19 : Teneurs en eau renvoyées par les sondes CS616 et CS650 situées à droite et à gauche dans le mur B50. Le point rouge sur l'axe des ordonnées est la teneur en eau de fabrication mesurée par prélèvement d'échantillon lors de la fabrication (cf. Tableau 4-1)..	136
Figure 4-20 : Ecart de mesure $\Delta\theta_i$ de la teneur en eau entre les sondes CS616 et CS650 situées à gauche et à droite dans les murs A50 et B50	137

Figure 4-21 : Teneurs en eau lors du séchage du mur A50 mesurées par les sondes CS616 et CS650.....	138
Figure 4-22 : Teneurs en eau lors du séchage du mur B50 mesurées par les sondes CS616 et CS650.....	139
Figure 4-23 : Teneur en eau au centre du mur A50 au cours du temps en fonction de la hauteur (CS616 top, mid. et bot.).....	140
Figure 4-24 : Température de consigne et température mesurée dans l'ambiance gauche du caisson du mur A30 lors de l'essai 1 du système de régulation	142
Figure 4-25 : Humidité relative de consigne et humidité relative mesurée dans l'ambiance gauche du caisson du mur A30 lors de l'essai 1 du système de régulation.....	143
Figure 4-26 : Température de consigne et température mesurée dans l'ambiance gauche du caisson du mur A30 lors de l'essai 2 du système de régulation	144
Figure 4-27 : Humidité relative de consigne et humidité relative mesurée dans l'ambiance gauche du caisson du mur A30 lors de l'essai 2 du système de régulation.....	145
Figure 4-28 : Humidité relative et la teneur en eau (en haut) et humidité relative et température (en bas) dans le mur A30 après que la sonde CS215 modifiée située dans le mur ait désaturée	146
Figure 4-29 : Températures dans le mur A50 et dans l'ambiance de son caisson relevées par les sondes CS215 durant son séchage.....	148
Figure 4-30 : Zooms sur les températures dans le mur A50 et dans les ambiances de son caisson durant les périodes 1 et 3 étudiées. N.B. Sur le graphe 3 de cette figure, le pic vers le bas au 203 ^{ème} jour correspond à une ouverture du caisson pour une visite.....	150
Figure 4-31 : Zooms sur les températures dans le mur A50 et dans les ambiances de son caisson durant les périodes 2 et 4 étudiées	151
Figure 4-32 : Zooms sur les températures dans le mur et dans les ambiances pendant les phases de séchage (A) et de séchage forcé (B).....	153
Figure 5-1 : Choix du mur instrumenté (encadré en rouge).....	159
Figure 5-2 : Schéma d'implantation des capteurs CS616 (en haut) et CS215 (en bas) dans le mur sud/ouest de la construction de St Antoine l'Abbaye.....	161
Figure 5-3 : Implantation des capteurs pendant la construction du mur sud/ouest. Passage des câbles des CS616 (en haut à gauche), pose des CS616 sur la partie ouest (en haut à droite), damage sur les CS616 (au milieu à gauche), pose des CS616 modifiées (au milieu à droite), damage sur les CS215 (en bas à gauche) et centrale d'acquisition sur son mat avec le panneau photovoltaïque (en bas à droite).....	162
Figure 5-4 : Placement des sondes USB dans la maison sur les plans du rez-de-chaussée (en haut) et de l'étage (en bas) de la maison. Jérôme Boucq Architecte.....	164
Figure 5-5 : Différence de pression de vapeur entre l'intérieur et l'extérieur de la maison...	169
Figure 5-6 : Teneur en eau dans les murs sud et ouest en fonction des saisons.....	169
Figure 5-7 : Zooms sur les teneurs en eau dans les murs sud (en haut à gauche) et ouest (en haut à droite) instrumentés au cours de l'automne/hiver 2011/2012 (du 19 décembre au 19	

janvier). Humidité relative (en bas à gauche) et température (en bas à droite) extérieure sur cette même période	170
Figure 5-8 : Zooms sur les teneurs en eau dans les murs sud (en haut à gauche) et ouest (en haut à droite) instrumentés de l’hiver à l’été 2012 (du 19 février au 19 août). Humidité relative (en bas à gauche) et température (en bas à droite) extérieure sur cette même période	171
Figure 5-9 : Zooms sur les teneurs en eau dans les murs sud (en haut à gauche) et ouest (en haut à droite) instrumentés au cours du 19 août 2012 au 19 novembre 2013. Humidité relative (en bas à gauche) et température (en bas à droite) extérieure sur cette même période	172
Figure 5-10 : Températures renvoyées par les capteurs USB au rez-de-chaussée comparées à la température extérieures sur la période du 20 juin au 21 septembre 2013.....	173
Figure 5-11 : Températures renvoyées par les capteurs USB à l’étage comparées à la température extérieures sur la période du 20 juin au 21 septembre 2013.....	174
Figure 5-12 : Températures renvoyées par les capteurs USB 1, 2 et 4 au rez-de-chaussée et 5, 6 et 7 à l’étage comparées à la température extérieures sur la période du 22 septembre au 19 novembre 2013.....	176
Figure 5-13 : Températures renvoyées par les capteurs USB 1 et 3 au rez-de-chaussée sur la période du 22 septembre au 19 novembre 2013.....	177
Figure 5-14 : Zoom sur les températures relevées dans le mur ouest et à l’extérieur du 3 au 13 février 2012	179
Figure 5-15 : Zoom sur les températures relevées dans le mur sud et à l’extérieur du 3 au 13 février 2012.....	180
Figure 5-16 : Teneurs en eau mesurées par les CS616 dans le mur sud du 3 au 13 février 2012 (encadrée par les traits mixtes).....	181
Figure 5-17 : Teneurs en eau mesurées par les CS616 dans le mur ouest du 3 au 13 février 2012 (encadrée par les traits mixtes).....	182
Figure 5-18 : Permittivité diélectrique mesurée aux centres des murs ouest et sud sur la période du 4 au 14 février 2012	183
Figure A-1 : Représentation schématique d’un milieu poreux et de ses trois phases	219
Figure A-2 : Volume Élémentaire Représentatif (VER) (Bear, 1972)	221
Figure A-3 : Exemple de ponts argileux dans un mélange quartz/kaolinite. La figure de gauche est un mélange à 10% en masse de kaolinite tandis que celle de droite est un mélange à 15%. D’après (Gelard, 2005).....	222
Figure A-4 : La cohésion des feuillets d’argile entre eux et sur un grain de quartz. D’après (Gelard, 2005).....	222
Figure A-5 : Interface liquide-gaz dans un pore	223
Figure A-6 : Isotherme de sorption/désorption avec l’état des pores et la taille critique de pore suivant l’équation de Kelvin (Hall and Allinson, 2009a).....	226
Figure A-7 : Teneur en eau en fonction de la pression capillaire et domaines de mouillage et drainage correspondants (Hall and Allinson, 2009a).....	227

Figure A-8 : Coefficient de diffusion en fonction du diamètre des pores avec $D_0 = 21,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et $l_m = 0,1 \mu\text{m}$	231
Figure A-9 : Transferts de masse et de chaleur en milieu poreux, d'après (Hall and Allinson, 2009a).....	233
Figure A-10 : Modèles de transferts série et parallèle	236
Figure A-11 : Modèles de transferts de Woodside et Messmer	236

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Exemples d'équations reliant la permittivité diélectrique d'un milieu à sa teneur en eau	55
Tableau 2-2 : Variation de la permittivité diélectrique $\epsilon r'$ avec la température T à trois teneurs en eau θl pour la CS650.....	67
Tableau 2-3 : Variation de la permittivité apparente $\epsilon a'$ avec la température T à trois teneurs en eau θl pour la CS616.....	67
Tableau 3-1 : Mesure de la densité du pisé de St Antoine l'Abbaye par pesée hydrostatique	83
Tableau 3-2 : Mesure de la densité du pisé de Montseveroux par pesée hydrostatique.....	83
Tableau 3-3 : Mesure de la densité du pisé de Lyon par pesée hydrostatique	83
Tableau 3-4 : Résultats des analyses chimiques de la terre de St Antoine l'Abbaye sur de la terre foisonnée et sur la terre stabilisée à 2,5% de chaux NHL5.....	86
Tableau 3-5 : Valeurs de A dans la littérature (Krus, 1996; Minke, 2000).....	89
Tableau 3-6 : Correspondance entre les solutions salines saturées et l'humidité relative fournie	89
Tableau 3-7 : Calculs du facteur de résistance à la diffusion de vapeur pour les trois terres étudiées à 43,2% d'humidité relative. ⁽¹⁾ La pente est calculée sur les cinq dernières pesées, c'est-à-dire entre le 28 ^{ème} et le 46 ^{ème} jour	95
Tableau 3-8 : Calculs du facteur de résistance à la diffusion de vapeur pour les trois terres étudiées à 75,5% d'humidité relative. ⁽¹⁾ La pente est calculée sur les cinq dernières pesées, c'est à dire entre le 28 ^{ème} et le 46 ^{ème} jour	96
Tableau 3-9 : Résultats des mesures du coefficient de résistance à la diffusion de vapeur fictif sur le pisé de St Antoine l'Abbaye	97
Tableau 3-10 : Conductivités thermiques des trois terres étudiées dans cette thèse	101
Tableau 3-11 : Absorptivité lumineuse des trois pisés	105
Tableau 3-12 : Facteur d'absorption lumineuse pour quelques matériaux	106
Tableau 3-13 : Résultats des mesures de la capacité calorifique à la DSC.....	108
Tableau 4-1 : Teneurs en eau de fabrication des murs maquettes avec l'écart-type	114
Tableau 4-2 : Résumé des données recueillies par les sondes placées dans les murs avec leurs localisation.....	123
Tableau 4-3 : Etapes dans le séchage du mur A50	124
Tableau 4-4 : Etapes dans le séchage du mur B50.....	125
Tableau 4-5 : Teneurs en eau mesurées par les sondes 22 jours après la fabrication du mur A50.....	139
Tableau 4-6 : Teneurs en eau mesurées par les sondes 21 jours après la fabrication du mur B50	139
Tableau 4-7 : Phasage du premier programme de test du système de régulation installé sur le côté gauche du caisson A30	141
Tableau 5-1 : Positionnement des sondes à St Antoine l'Abbaye	166
Tableau 5-2 : Températures moyennes et écart-types sur la période estivale du 20 juin au 21 septembre 2013	175

Tableau 5-3 : Humidités relatives moyennes et écart-types sur la période estivale du 20 juin au 21 septembre 2013	175
Tableau 5-4 : Températures moyennes et écart-types sur la période automnale du 21 septembre au 19 novembre 2013	177
Tableau 5-5 : Humidités relatives moyennes et écart-types sur la période automnale du 22 septembre au 19 novembre 2013	178
Tableau 5-6 : Températures dans le mur ouest sur la période du 3 au 13 février 2012	179
Tableau B-1 : Valeurs de conductivité thermique du pisé pour Volhard.....	244
Tableau B-2 : Mesures de conductivité thermique effectuées par Adam & Jones.....	245
Tableau B-3 : Conductivités thermique recensées par Walker et al.	245
Tableau B-4 : Conductivité thermique relevée par Taylor et al. sur une construction en Australie.....	245
Tableau B-5 : Mesures de conductivité thermique effectuées par Hall et Allinson	246
Tableau B-6 : Relevés de conductivité thermique effectués par Allinson et Hall.....	246
Tableau B-7 : Relevés de conductivité thermique effectués par Oti et al.	246
Tableau B-8 : Mesures de conductivité thermiques effectuées par le CSTB.....	247

ANNEXE A : LE PISE COMME MILIEU POREUX

Dans cette annexe on s'attache à expliquer la physique des transferts de masse et de chaleur dans un milieu poreux qui permettent d'arriver aux équations de couplage dont il est question dans la partie 3 de cette thèse. La partie sur les transferts en poreux est principalement basée sur l'ouvrage de J.F. Daïan du LTHE de Grenoble et disponible gratuitement en ligne sur HAL (Daïan, 2013). La suivante, sur les modèles d'estimation des paramètres thermiques équivalents, est basée sur les travaux de thèse de J.P. Laurent et F.Collet (Collet, 2004; Laurent, 1986).

A.1. DESCRIPTION PHYSIQUE

A.1.1. LE MILIEU POREUX : PHASE SOLIDE

A.1.1.1. Définition

Un milieu poreux est composé d'une phase solide, la matrice, et d'une phase fluide, l'espace poreux (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les hypothèses posées dans le cadre de cette thèse sont que la matrice solide est homogène, isotrope, indéformable et chimiquement inerte. La phase fluide peut être subdivisée en deux phases distinctes : l'eau liquide et une phase gazeuse composée de vapeur d'eau et d'air sec. On supposera ici que les fluides n'interagissent pas avec la matrice solide.

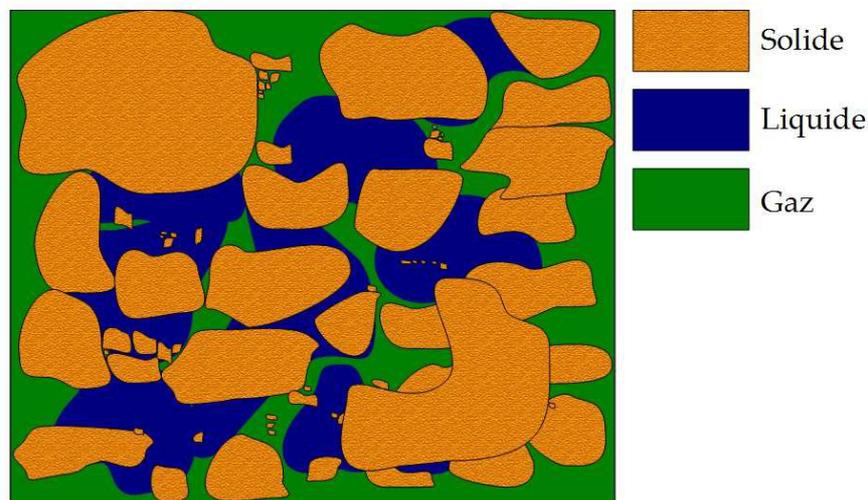


Figure A-1 : Représentation schématique d'un milieu poreux et de ses trois phases

A.1.1.2. Caractéristiques

Il existe trois grands types de pores :

- Les pores ouverts formant la porosité dite ouverte. Ce sont des pores interconnectés qui forment un espace continu permettant un transport des fluides
- Les « bras morts » ou aveugles qui ne sont connectés que par un coté
- Les pores isolés (ou fermés) qui sont inaccessibles

Les pores d'un réseau poreux peuvent être classés en trois catégories suivant leurs tailles d'après l'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC, 1994) :

- Les macropores ayant un diamètre supérieur à 50 nm
- Les mésopores avec un diamètre compris entre 2 et 50 nm
- Les micropores ayant un diamètre inférieur à 2 nm

La porosité est définie par le rapport entre le volume des vides et le volume total de l'échantillon étudié :

$$porosité = \frac{V_{total\ des\ pores}}{V_{total}} = 1 - \frac{V_{phase\ solide}}{V_{total}} \quad (A.1)$$

A.1.1.3. Volume élémentaire représentatif (VER)

L'échelle d'observation d'un milieu conditionne l'applicabilité des lois physiques et de ses propriétés. On définit alors un Volume Élémentaire Représentatif (VER), noté $d\Omega$, qui est le volume pour lequel les caractéristiques macroscopiques des milieux continus équivalent sont les moyennes de celles du matériau hétérogène réel (figure a-2). Si on note l_h la longueur caractéristique des hétérogénéités du milieu réel, $l_{d\Omega}$ la taille caractéristique de $d\Omega$ et l_Ω la taille de l'objet d'étude, la condition imposée est alors (Bear, 1972) :

$$l_h \ll l_{d\Omega} \ll l_\Omega \quad (A.2)$$

Dans le cas de cette étude, la longueur caractéristique des hétérogénéités est de l'ordre du centimètre (i.e. les plus gros grains), tandis que la taille de la structure est de l'ordre du mètre (taille du mur), ce qui nous permet de définir un volume élémentaire représentatif $d\Omega$ de taille décimétrique.

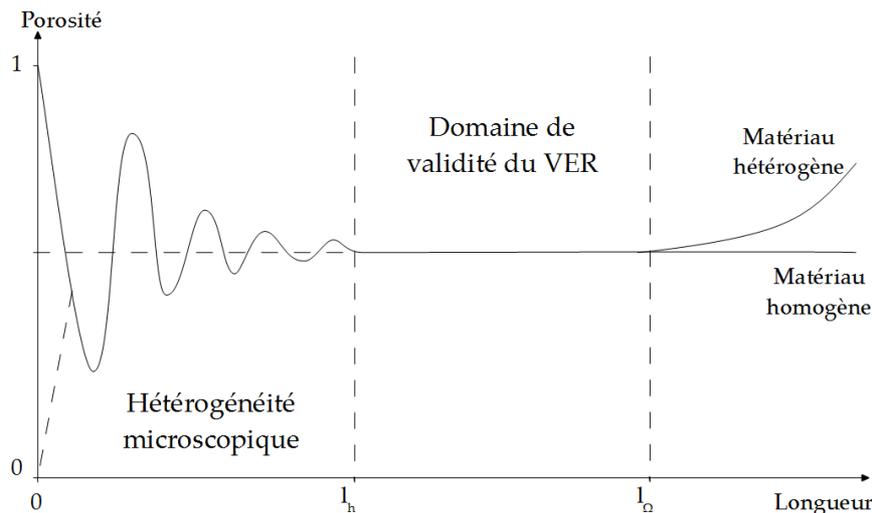


Figure A-2 : Volume Élémentaire Représentatif (VER) (Bear, 1972)

A.1.1.4. La cohésion du matériau terre

Il convient maintenant de s'intéresser aux mécanismes qui font la cohésion de ce matériau et qui lui confère toute sa solidité et sa durabilité.

Le matériau terre peut être considéré comme un mélange de quatre phases : grains de quartz ou équivalents, feuillets d'argiles, eau et air. On trouvera un descriptif de toutes les forces d'attraction, de répulsion et de friction possibles entre les particules d'un milieu poreux dans (Van Damme, 2002). Aux échelles des grains micrométriques et supérieures, les forces qui dominent sont les forces de frictions coulombienne et capillaire. La cohésion d'un milieu granulaire non-saturé peut être expliquée par ces deux phénomènes. De plus, les feuillets, qui composent l'argile sont liés entre eux par des liaisons hydrogènes, des forces de Van der Waals ou des forces électrostatiques.

Les mécanismes de la cohésion interne du matériau terre ont été étudiés par D. Gélard dans sa thèse (Gelard, 2005). Son étude a porté sur un « milieu modèle » constitué de sable d'Hostun et de kaolinite mélangés en proportions connues. Il a mis en évidence la présence de ponts argileux entre les grains de quartz. La figure a-3 présente des images au Microscope Electronique à Balayage (MEB) de ces ponts argileux entre grains de quartz pour des mélanges de 10 et 15% massique de kaolinite.

La distance très faible reliant les feuillets d'argile non-parallèles, de l'ordre du nanomètre, a permis à Gélard de conclure que les forces de Van der Waals ont un rôle négligeable face aux forces capillaires (figure a-4). Ce mécanisme de cohésion est fortement dépendant de la teneur en eau présente dans le milieu, i.e. une absence autant qu'une grande quantité d'eau inhibe les forces capillaires entre les feuillets d'argile.

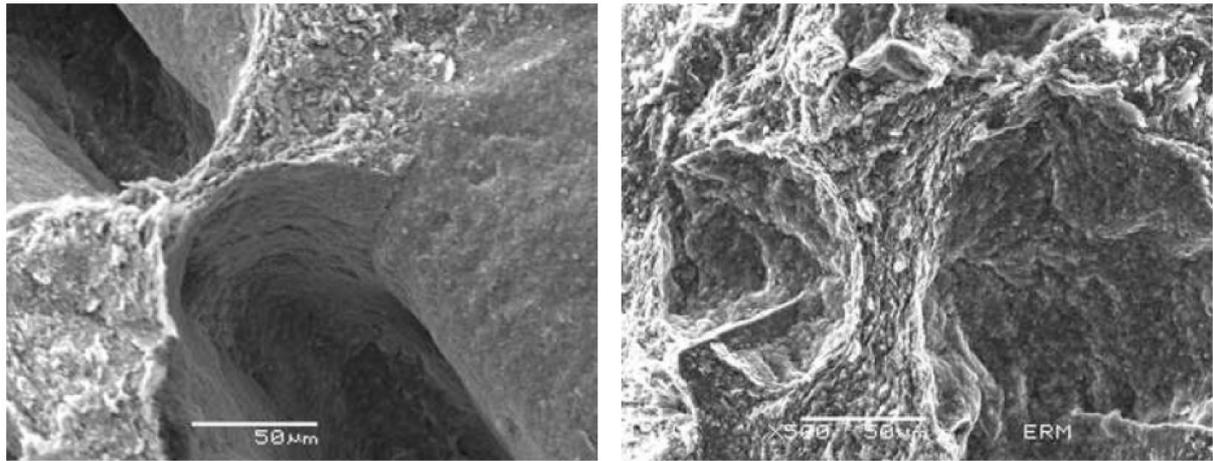


Figure A-3 : Exemple de ponts argileux dans un mélange quartz/kaolinite. La figure de gauche est un mélange à 10% en masse de kaolinite tandis que celle de droite est un mélange à 15%. D'après (Gelard, 2005)

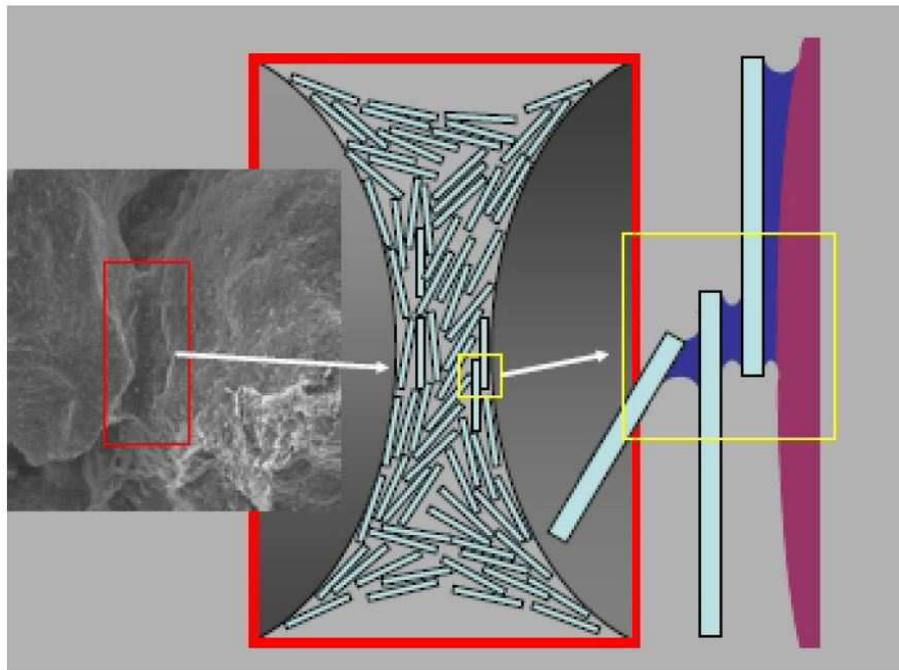


Figure A-4 : La cohésion des feuillets d'argile entre eux et sur un grain de quartz. D'après (Gelard, 2005)

A.1.2. LE MILIEU POREUX : PHASES FLUIDES

A.1.2.1. Pression capillaire

Suivant les hypothèses énoncées précédemment une occupation biphasique de l'espace poreux implique une séparation totale des phases fluide et gazeuse, c'est-à-dire sans dissolution du gaz dans le liquide. Dans le cas d'une saturation partielle du milieu poreux, les parois de la phase solide sont dites mouillées par le fluide, c'est-à-dire par l'eau dans le cas du pisé. Les interfaces liquide-gaz forment un angle aigu α avec les interfaces liquide/solide appelé angle de mouillage.

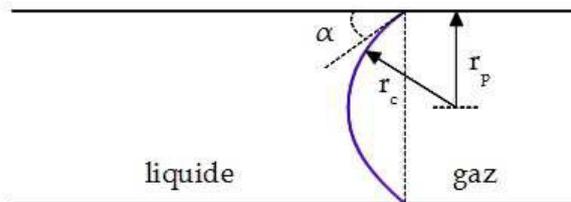


Figure A-5 : Interface liquide-gaz dans un pore

L'effet de capillarité résulte de la tension interfaciale et des forces de pression agissant de part et d'autre de cette interface. Dans le cas de pores cylindriques et d'interfaces sphériques, où la pression de gaz est supérieure à celle du liquide, la pression capillaire est décrite par la loi de Laplace :

$$P_c = -\Psi = P_g - P_l = \frac{2\gamma}{r_c} \quad (\text{A.3})$$

où P_c est la pression capillaire [Pa], P_g la pression du gaz [Pa], P_l la pression du liquide [Pa], γ la tension interfaciale [N.m^{-1}], α est l'angle de contact et r_c le rayon de courbure de l'interface [m]. L'opposé de la pression capillaire est appelé potentiel capillaire ou suction Ψ [Pa].

A.1.2.2. Loi de Kelvin

En présence d'une interface fortement courbée, la pression partielle de vapeur à l'équilibre est inférieure à la pression de vapeur saturante (fonction de la température).

On peut définir le taux de saturation de la vapeur, ou humidité relative pour la vapeur d'eau, comme le rapport entre la pression de vapeur actuelle et la pression de vapeur saturante, ou encore comme le rapport entre les concentrations massiques actuelle et saturante.

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{v_{sat}}} = \frac{\rho_v}{\rho_{v_{sat}}} \quad (\text{A.4})$$

où P_v et $P_{v_{sat}}$ sont respectivement les pressions de vapeur et de vapeur saturante [Pa] et ρ_v et $\rho_{v_{sat}}$ les masses volumiques de vapeur et de vapeur saturante [kg.m^{-3}].

Si on exprime l'égalité entre les potentiels chimiques des phases liquide et gazeuse, on obtient une relation entre la pression capillaire et le taux de saturation de la vapeur, la loi de Kelvin :

$$P_c = -\Psi = P_g - P_l = -\frac{\rho_l \mathcal{R} T}{M} \ln\left(\frac{P_v}{P_{v_{sat}}}\right) = -\frac{\rho_l \mathcal{R} T}{M} \ln\varphi \quad (\text{A.5})$$

où ρ_l est la masse volumique du liquide [kg.m^{-3}], \mathcal{R} la constante des gaz parfaits ($8,3144621 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$), T la température thermodynamique [K], M la masse molaire [g.mol^{-1}] et φ l'humidité relative [-].

A.1.2.3. Sorption/désorption

Les matériaux poreux à porosité ouverte ont la propriété de fixer l'humidité de l'air environnant. Cette fixation des molécules d'eau sur les parois de l'espace poreux est appelé sorption. Le phénomène inverse est la désorption. La sorption est due à une augmentation de l'humidité relative φ de l'air ambiant (et inversement pour la désorption).

L'adsorption de vapeur d'eau dans un matériau poreux se déroule en plusieurs phases distinctes :

- Elle commence par l'adsorption monomoléculaire durant laquelle les molécules d'eau recouvrent en une seule couche la surface du pore. Ces molécules sont maintenues par l'interaction des forces de Van Der Waals.
- L'adsorption polymoléculaire se produit si l'humidité ambiante continue d'augmenter. Il y a alors superposition des couches de groupes métastables de molécules de vapeur d'eau.
- La phase suivante se traduit par une jonction des couches superposées sur les parois du pore et apparait alors un pont liquide : un ménisque. Il y a alors apparition d'une phase liquide. Ces ménisques sont en équilibre avec l'humidité relative ambiante comme prédit par la loi de Kelvin qui peut être utilisée pour calculer la taille critique théorique des pores dans lesquels l'eau se condense en fonction de l'humidité relative ambiante. Cette loi ne s'applique uniquement qu'aux pores d'une taille suffisante permettant l'apparition de gouttelettes et les pores les plus fins se remplissent en premiers (Quénard, 1989). Ce phénomène de condensation capillaire apparait généralement pour $\varphi > 0,5$ bien que, dans certains modèle, le flux de phase liquide induit par le potentiel capillaire ne soit pas considéré avant $\varphi > 0,8$ (Künzel, 1995). Au

point hypothétique $\varphi = 1$, apparaît alors une transition du domaine hygroscopique au domaine capillaire et est défini par la teneur en eau résiduelle θ_r .

Les phénomènes de sorption/désorption sont représentés, à l'équilibre, sur des courbes dites d'isothermes de sorption, la température influençant ces effets. La figure a-6 est une isotherme de sorption/désorption pour un matériau hygroscopique classique. Cette courbe permet donc de relier la teneur en eau d'un matériau à l'humidité relative ambiante. L'hystérésis peut être expliquée par deux phénomènes :

- L'effet dit « bouteille d'encre » : le remplissage d'un pore dont la forme évoque celle d'une bouteille d'encre, sous une pression croissante ne se fait que lorsque la pression atteint la valeur nécessaire pour remplir le col. A l'inverse, lors de la vidange de ce pore, lorsque la pression atteint la même valeur, le col d'accès se vidange dans que le corps ne se vide, laissant une certaine quantité d'eau dans le pore
- Une modification de l'angle de mouillage entre l'imbibition et le drainage : cet angle de mouillage est plus faible lors de la vidange d'un pore que lors du remplissage.

Il existe actuellement plusieurs modèles permettant de caractériser les isothermes de sorption/désorption. On peut citer parmi les plus usités celui de Langmuir à 2 paramètres ($\varphi < 10-20\%$) pour la partie monomoléculaire de l'adsorption (Langmuir, 1918), le modèle BET à 3 paramètres ($\varphi < 40\%$ et pas de condensation capillaire) pour la partie polymoléculaire (Brunauer et al., 1938), le modèle GAB à 3 paramètres en polymoléculaire également et, en théorie, sans condensation capillaire (cité par Merouani, 1987) – néanmoins, il semblerait que ce modèle soit très correct dans beaucoup de cas sur la quasi-totalité du domaine (Merouani, 1987) – et enfin, le modèle BJH à partir de la condensation capillaire (Barrett et al., 1951). Ce dernier modèle est basé sur l'hypothèse de pores cylindriques régulièrement connectés, sans effet « bouteille d'encre », et de raccordements tangentiels entre les couches adsorbées et le capillaire. Grâce à ce modèle, il est possible de déterminer la distribution des pores et la surface spécifique d'un matériau à partir de la courbe de désorption. Par extension, Daian (Daian, 1986) en propose une utilisation inverse pour retrouver les isothermes de sorption à partir de la structure poreuse.

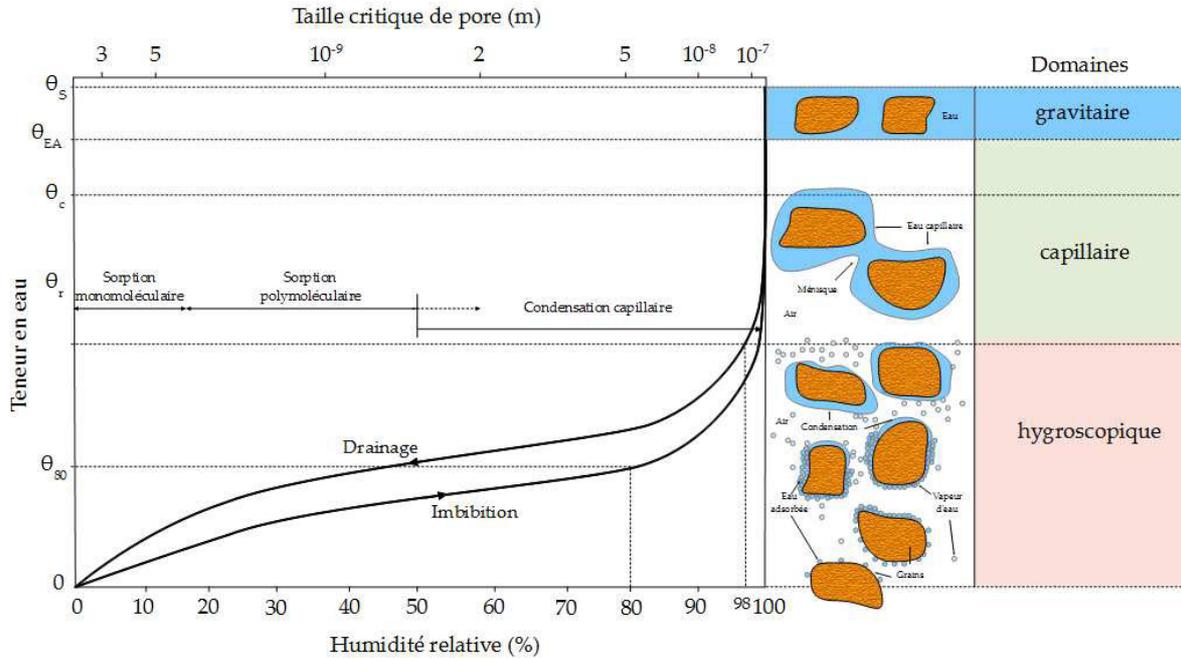


Figure A-6 : Isotherme de sorption/désorption avec l'état des pores et la taille critique de pore suivant l'équation de Kelvin (Hall and Allinson, 2009a)

A.1.2.4. Teneur en eau

La relation entre pression capillaire P_c et teneur en eau liquide θ_l pour un matériau donné n'est pas univoque car les contraintes géométriques imposées à l'interface liquide/air ne donnent pas lieu à une solution unique.

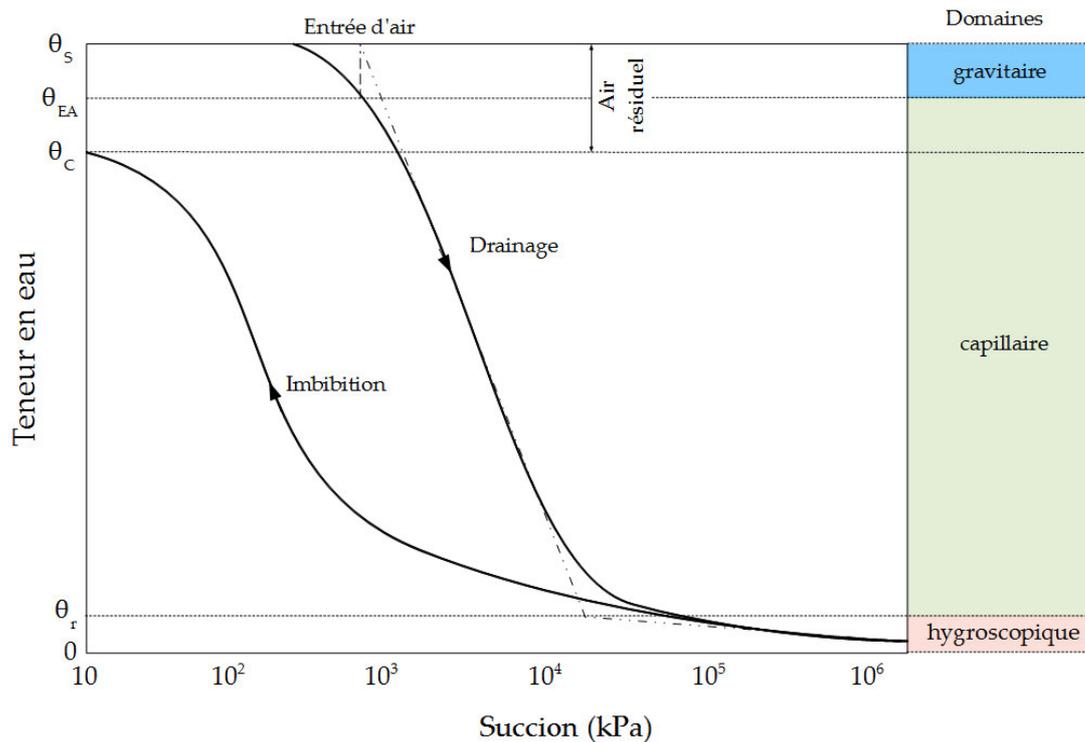
L'évolution de la teneur en eau liquide en fonction de la pression capillaire dépend de plusieurs facteurs comme son évolution, l'histoire du matériau (imbibition et séchage passés), la présence ou non d'une atmosphère gazeuse susceptible d'être prise au piège dans les pores ou encore la façon dont le liquide s'implante dans le milieu poreux avec ou non des changements de phases liquide/vapeur.

On peut définir quatre grands domaines de saturation d'un milieu poreux, représentés sur la figure a-6 en fonction de l'humidité relative et sur la figure a-7 en fonction de la succion :

- Le domaine hygroscopique (de $\theta_l = 0$ à θ_r) dans lequel on observe les phénomènes d'adsorption des molécules de vapeur d'eau dans lequel on observera un début de condensation capillaire comme on l'a vu dans la partie précédente
- Au-delà, on se trouve dans le domaine capillaire dans lequel il y a apparition d'un ménisque d'eau entre les grains de la matrice solide. Le maximum de ce domaine est appelé saturation capillaire θ_c et, à ce stade, il reste encore des bulles d'air dans le réseau poreux. Il est encore possible de saturer le matériau au-delà de θ_c – en

imposant un gradient de pression par exemple – mais on se trouve toujours dans un domaine où les forces capillaires sont dominantes. A ce stade, il peut encore rester de l'air dans les pores. Ce domaine est maximisé par une teneur en eau θ_{EA} à partir de laquelle l'air commencera à rentrer dans le matériau lors du drainage.

- Au-delà de domaine, se trouve le domaine gravitaire. Le matériau se trouve alors à « super-saturation », il n'y a plus d'air dans les pores et les forces dominantes sont les effets dus à la gravité. Le maximum est alors appelé θ_s .



A.2. LES TRANSFERTS HYDRIQUES

A.2.1. LA CONSERVATION DE LA MASSE

L'équation de conservation de la masse exprime le bilan de trois termes dans un élément de volume :

- Le différentiel des flux de masses sortant des frontières (divergence sur le vecteur densité de flux)
- L'accumulation de masse
- Eventuellement un terme source

On peut écrire deux équations de conservations pour chacune des phases fluides (liquide et sa vapeur). Elles comportent toutes deux un terme source – le taux de condensation ou d'évaporation du fluide dans l'élément de volume – qui sera naturellement le même dans chacune mais avec un signe opposé.

Dans le cas des transferts en conditions isotherme, on peut écrire que la conservation de la masse pour les phases fluides (liquide et vapeur) sans terme source et en considérant l'eau incompressible est :

$$\rho_l \frac{\partial \theta_l}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} [\rho_v (\eta - \theta_l)] = -\text{div}(\vec{J}_l + \vec{J}_v) \quad (\text{A.6})$$

où θ_l est la teneur en eau volumique liquide [-], η la porosité [-] et \vec{J}_l et \vec{J}_v les vecteurs de densité de flux de masse respectivement du liquide et de la vapeur [$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$].

Le second membre du premier terme de l'équation (A.6), qui représente l'accumulation de la vapeur, est négligé dans l'immense majorité des cas. En revanche, dans le second membre, le flux de matière en phase gazeuse n'est pas nécessairement négligeable.

A.2.2. LOI DE DARCY

Dans un matériau poreux, les fluides (donc gaz ou liquide) soumis aux gradients de pression sont en mouvement. Ceux-ci sont régis par les lois de transports et d'écoulements d'un fluide visqueux avec les conditions d'adhérence aux parois et des changements de phases (gaz-liquide, liquide-gaz).

Ces lois de transports sont soumises à un coefficient rendant compte de la nature du matériau (morphologie et taille des pores), appelé perméabilité intrinsèque. De même, la nature du fluide joue un rôle dans les écoulements et apparait sous la forme d'un coefficient de viscosité. La vitesse d'écoulement (densité de débit volumique) est moyennée sur l'ensemble du volume considéré (nulle dans la partie solide). Cette vitesse est appelée vitesse de Darcy.

Quand deux phases sont en présences dans un matériau poreux, on peut considérer que la loi de Darcy s'applique au gaz (air + vapeur) comme au liquide, où le facteur de perméabilité relative (fonction de la saturation en liquide) exprime la partie de l'espace occupée par chacune des deux phases, soit :

$$\vec{V}_l = -\frac{k\kappa_l}{\xi_l} (\vec{\nabla}P_l - \rho_l \vec{g}) \quad (\text{A.7})$$

$$\vec{V}_g = -\frac{k\kappa_g}{\xi_g} (\vec{\nabla}P_g - \rho_g \vec{g}) \quad (\text{A.8})$$

où \vec{V}_l et \vec{V}_g sont les vitesses de Darcy [m.s⁻¹], k est la perméabilité intrinsèque [m²], les coefficients ξ_l et ξ_g les viscosités dynamiques du liquide et du gaz [Pa.s] et \vec{g} l'accélération de la pesanteur [m.s⁻²]. Les coefficients κ_l et κ_g , sans dimensions, sont les perméabilités relatives à l'eau et à l'air qui sont fonctions du degré de saturation en eau dont plusieurs auteurs ont proposés différents modèles (Brooks and Corey, 1964; Fredlund and Xing, 1994; Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980).

Néanmoins, si l'on compare les ordres grandeurs des termes des équations ci-dessus, on peut voir que le gradient de pression de la phase gazeuse est très petit par rapport au gradient de la phase liquide. On peut donc considérer que le gaz est en écoulement quasi-isobare sous la pression de l'atmosphère ambiante. On en déduit alors que la pression du liquide peut s'identifier, à une constante près, la viscosité cinématique de l'eau ν_l [m².s⁻¹], au potentiel capillaire, que l'on peut alors substituer à la pression du liquide dans l'équation de Darcy.

A.2.3. LOI DE FICK ET EFFET KNUDSEN

Comme dit précédemment, en physique des sols et dans le cadre d'une diffusion binaire, on peut considérer que la pression totale P_g est constante (De Vries, 1958) dans la mesure où l'on se limite aux conditions atmosphériques courantes (i.e. gradient de pression totale négligeable et vapeur très diluée dans l'air). Si la vapeur d'eau est considérée comme un gaz parfait, la densité de flux de vapeur selon la loi de Fick en poreux s'écrit alors :

$$\vec{J}_v = -D_v \frac{M_v}{\mathcal{R}T} \vec{\nabla} P_v = -D_v \vec{\nabla} \rho_v \quad (\text{A.9})$$

où \vec{J}_v est la densité de flux de vapeur [kg.m⁻².s⁻¹] et D_v un coefficient de diffusion de vapeur [m².s⁻¹] définit par :

$$D_v = \frac{D_0}{1 + K_n} \quad K_n = \frac{l_m}{d_p} \quad (\text{A.10})$$

où D_0 est le coefficient de diffusion de la vapeur dans l'air libre, K_n est le nombre de Knudsen, l_m [m] est le libre parcours moyen d'une molécule dans le milieu poreux (dépendant de la pression et de la température) et d_p le diamètre des pores [m]. Dans les conditions atmosphériques normales, on aura $D_0 \approx 2,5.10^{-5}$ m².s⁻¹ et $l_m \approx 0.1-0.2$ μm (Collet, 2004; Daïan, 2013).

Le libre parcours moyen est la distance moyenne parcourue par une molécule entre deux chocs inter-moléculaires. Il est décrit par :

$$l_m = \frac{1}{\pi\sqrt{2}nr_s} = \frac{\mathcal{K}T}{\pi\sqrt{2}P_T r_s} \text{ avec } \mathcal{K} = \frac{\mathcal{R}}{N} \quad (\text{A.11})$$

où n est le nombre de molécules, r_s le rayon de la sphère de protection de la molécule ($\approx 0,3$ nm), \mathcal{K} la constante de Boltzmann ($1,3806488 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), P_T la pression totale [Pa], \mathcal{R} la constante des gaz parfaits ($8,3144621 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) et N le nombre d'Avogadro ($6,02214129 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$).

Si on considère une grande dilution de la vapeur d'eau dans l'air (hypothèse correcte dans le cadre de ces travaux), le coefficient de diffusion D_0 peut s'exprimer par :

$$D_0 = \frac{l_m}{3} \sqrt{\frac{8\mathcal{R}T}{\pi M}} \quad (\text{A.12})$$

On peut alors distinguer trois types de diffusion :

- $K_n \gg 1$ ou $d_p \ll l_m$: Transport par effusion (ou « diffusion de Knudsen »)

Les chocs molécule/parois sont prédominants sur les chocs intermoléculaires donc la densité de flux de vapeur se définit par :

$$\vec{J}_v = -\frac{D_0}{K_n} \vec{\nabla} \rho_v = -\frac{D_0}{l_m} d_p \vec{\nabla} \rho_v \quad (\text{A.13})$$

- $K_n \ll 1$ ou $d_p \gg l_m$: Transport par diffusion

Les chocs molécules/parois deviennent négligeables en comparaison des chocs intermoléculaires. La densité de flux vapeur est alors l'application de la loi de Fick dans l'air :

$$\vec{J}_v = -D_0 \vec{\nabla} \rho_v \quad (\text{A.14})$$

- $K_n \approx 1$ ou $d_p \approx l_m$: Transport par diffusion mixte

Le transport n'étant prédominé par aucun des deux phénomènes évoqués précédemment, on utilise alors l'équation de Fick générale décrite précédemment :

$$\vec{J}_v = -D_v \frac{M_v}{\mathcal{R}T} \vec{\nabla} P_v = -D_v \vec{\nabla} \rho_v \quad (\text{A.15})$$

Les limites de ces modes de diffusion dépendent de la taille des pores ainsi que de la pression et de la température (figure a-8).

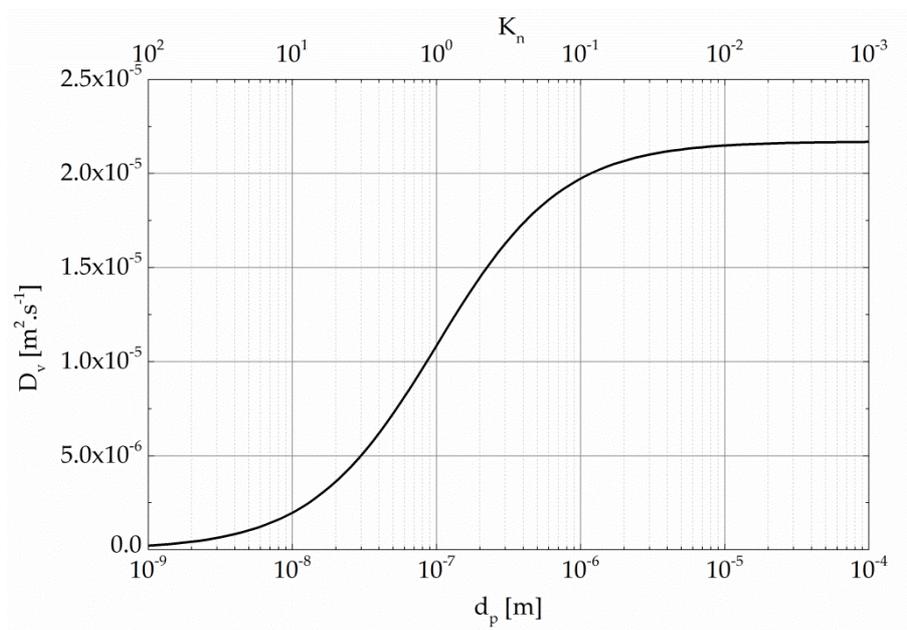


Figure A-8 : Coefficient de diffusion en fonction du diamètre des pores avec $D_0 = 21,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et $l_m = 0,1 \mu\text{m}$

A.3. LES TRANSFERTS THERMIQUES

Les transferts de liquide présentés précédemment supposaient des conditions isothermes. Pour aborder les mouvements de fluides en conditions non-isotherme, il faut introduire les transferts thermiques en milieu poreux qui ont lieu à travers différents mécanismes.

A.3.1. TRANSFERTS DE CHALEUR PAR CONDUCTION

Le transfert de chaleur par conduction suppose une distribution homogène de l'énergie cinétique moyenne du milieu poreux. La vibration des atomes (ou des molécules) et les porteurs de charges (électrons et trous) transmettent l'énergie de proche en proche au niveau microscopique.

La densité de flux de chaleur à travers un milieu est exprimée par la loi de Fourier ou équation de la chaleur :

$$\vec{q} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (\text{A.16})$$

où \vec{q} est la densité de flux de chaleur [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], λ est la conductivité thermique [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] et T la température [K].

En toute rigueur, la conductivité thermique est une caractéristique qui dépend elle aussi de la température. En régime transitoire et sans terme source l'équation de la chaleur s'écrit alors :

$$\rho_s C \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div}(-\lambda \text{grad } T) \quad (\text{A.17})$$

où ρ est la masse volumique [kg.m^{-3}] et C est la chaleur spécifique [$\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$].

A.3.2. TRANSFERTS DE CHALEUR PAR CONVECTION

La convection apparaît lorsqu'il y a mouvement de matière dans un milieu (solide ou fluide). Si l'on ne s'intéresse qu'à la quantité de chaleur échangée entre une paroi et un fluide, on introduit alors un coefficient d'échange tel que la densité de flux de chaleur est dépendante est fonction du gradient de température :

$$q = h_c(T_p - T_\infty) \quad (\text{A.18})$$

où h_c est le coefficient d'échange convectif [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$], T_p est la température de la paroi [K] et T_∞ la température du fluide loin de la paroi [K].

A.3.3. TRANSFERTS DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT

Ce type de transfert est un échange par rayonnement électromagnétique entre deux surfaces. On définit alors l'émittance, la puissance rayonnée par unité de surface, par :

$$\bar{M} = EST^4 \quad (\text{A.19})$$

où \bar{M} est l'émittance [W.m^{-2}], E l'émissivité [-] (= 1 pour un corps noir), S la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$) et T la température du corps [K].

A.3.4. TRANSFERTS DE CHALEUR PAR CHANGEMENT D'ETAT

La chaleur se transmet de façon isotherme lors du changement d'état d'un corps pur. Le flux échangé avec l'environnement est proportionnel à la quantité de matière qui change de phase, soit :

$$\Phi = Q_m L_v \quad (\text{A.20})$$

où Φ est le flux échangé avec l'environnement [W], Q_m est le débit massique [kg.s^{-1}] et L_v la chaleur latente de changement d'état [J.kg^{-1}].

L'ensemble des transferts hydriques et thermiques peut être résumé sur le schéma suivant :

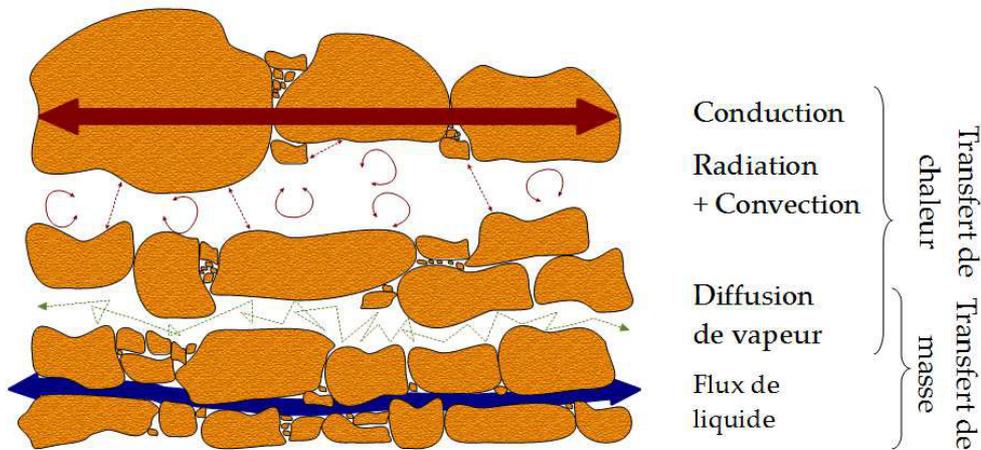


Figure A-9 : Transferts de masse et de chaleur en milieu poreux, d'après (Hall and Allinson, 2009a)

A.3.5. MODELES D'ESTIMATION DES PARAMETRES THERMIQUES

EQUIVALENTS

A.3.5.1. Capacité calorifique

L'enthalpie étant une grandeur extensive, il est possible d'évaluer la capacité calorifique d'un milieu poreux proportionnellement à celles de ses phases (Luikov, 1975) :

$$C_p^* = \sum_i x_i C_{p_i} \quad (\text{A.21})$$

où x_i est la proportion volumique du constituant i [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$] et C_{p_i} sa capacité calorifique correspondante [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$]. C'est notamment ce que font Allinson et Hall dans leurs travaux sur le pisé stabilisé (Allinson and Hall, 2010).

L'air et l'eau liquide sont les phases fluides généralement rencontrées. Leurs capacités calorifiques à 20°C sont $1,2 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ sous pression atmosphérique pour l'air et de $4,18 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ pour l'eau. Si on néglige la capacité calorifique de l'air devant celle de l'eau ainsi que la « chaleur de mouillage », on a alors :

$$C_p^* = C_{p_0} + \theta_l C_{p_{eau}} \quad (\text{A.22})$$

où C_p^* est la capacité calorifique équivalente [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$], C_{p_0} la capacité calorifique du matériau sec [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$], θ_l la teneur en eau volumique [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$] et $C_{p_{eau}}$ la capacité calorifique de l'eau ($4,18 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$).

A.3.5.2. Conductivité thermique

La conductivité thermique est la principale grandeur permettant de caractériser les transferts thermiques dans un bâtiment. Néanmoins, son évaluation n'est pas évidente pour un milieu poreux. En effet, elle dépend non seulement des caractéristiques physiques des constituants élémentaires et de leurs proportions relatives mais également de la géométrie et de l'empilement des granulats. De nombreux modèles ont été proposés avec comme point de départ différents types de physique. On citera notamment les méthodes par résolutions rigoureuses de la loi de Fourier qui implique néanmoins une forte simplification de la géométrie du milieu poreux, les méthodes par analogie électrique, mais qui implique également de grandes simplifications géométriques, les modèles empiriques (ou semi-empiriques) issus d'un grand nombre de données expérimentales ou encore les modèles par homogénéisation.

A.3.5.2.1. Le modèle de De Vries

La conduction thermique dans les milieux poreux et l'évaluation de leurs conductivités effectives ont été étudiées par une approche de type macroscopisation bien avant que cette technique n'ait atteint la rigueur qu'on lui connaît aujourd'hui. Cette approche est due notamment à De Vries (De Vries, 1958) qui a adapté la Théorie du Milieu Effectif (T.M.E.) aux transferts thermiques en milieu poreux. Cette approche avait été entamée précédemment par Eucken et Maxwell sur la conductivité électrique des milieux diphasiques.

La T.M.E. schématise le milieu poreux par des sphéroïdes de solide et de vapeur dispersés dans une phase fluide continue (eau) pour laquelle on résout rigoureusement l'équation de la chaleur. On détermine d'abord un constituant principal (indice 0) qui contient les autres, puis chacun des constituants est caractérisé par sa conductivité, sa teneur volumique et un facteur de correction dépendant de la forme des constituants (dépendant d'un facteur de forme). La conductivité thermique équivalente est alors donnée par :

$$\lambda^* = \frac{x_0 \lambda_0 + \sum_i x_i k_i \lambda_i}{x_0 + \sum_i x_i k_i} \quad (\text{A.23})$$

où λ^* est la conductivité thermique effective [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$], x_i est la teneur volumique du constituant i [$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$], k_i un facteur correctif du constituant i et λ_i la conductivité thermique du constituant i [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$].

Les k_i sont estimés par la relation :

$$k_i = \frac{1}{3} \left[1 + \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_0} - 1 \right) \gamma_i \right]^{-1} + \frac{2}{3} \left[1 + \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_0} - 1 \right) \frac{1 - \gamma_i}{2} \right]^{-1} \quad (\text{A.24})$$

où γ_i est un facteur de forme relatif au constituant i . Ces facteurs de formes ont été déterminés par De Vries à partir de données expérimentales et dépendent, pour les phases fluides, de leurs teneurs volumiques.

L'application de ce modèle est limitée, en premier lieu, par la validité du principe de superposition qui suppose que les inclusions sont suffisamment dispersées pour ne pas interférer entre elles (i.e. une forte simplification de la géométrie). Cette limite a été mise en évidence par Laurent dans sa thèse (Laurent, 1986). Il démontre en effet que la conductivité thermique est sous-estimée pour les faibles teneurs en eau en raison de la non-prise en compte des contiguïtés solide/solide. En second lieu, il est difficile de déterminer quel est le constituant principal qui contiendra les autres. De Vries admet que c'est, selon l'état de saturation, le liquide ou le gaz.

A.3.5.2.2. *Le modèle de Kirkpatrick*

Dans la théorie de la percolation, Kirkpatrick (Kirkpatrick, 1973) propose une autre forme de la TME, qui permet de s'affranchir de la seconde limite citée précédemment, en représentant le milieu sous la forme d'un réseau discret et non d'un domaine spatial. Le réseau est alors composé de conducteurs caractérisés par des conductivités différentes, un facteur de forme et une certaine proportion. Ainsi, il n'y a pas de composants à privilégier. La conductivité effective est alors la solution de l'équation :

$$\sum_i \frac{\lambda^* - \lambda_i f_i}{\left(\frac{z}{2} - 1\right) \lambda^* + \lambda_i f_i} x_i = 0 \quad (\text{A.25})$$

où λ^* est la conductivité thermique effective [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$], λ_i la conductivité thermique du constituant i [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$], f_i un facteur de forme du constituant i , z le nombre de conducteurs connectés à chaque nœud du réseau (par exemple 6 pour un réseau cubique) et x_i est la proportion du constituants i [$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$].

A.3.5.2.3. *Les modèles par analogie électrique*

Dans ce type de modèle, on considère le milieu poreux comme une juxtaposition de couches avec alternance des phases en présence. On a alors un système résistif équivalent sur lequel on peut appliquer une adaptation thermique de la loi d'Ohm. Les deux modèles les plus simples sont le modèle série et le modèle parallèle (figure a-10)

Les conductivités équivalentes sont alors :

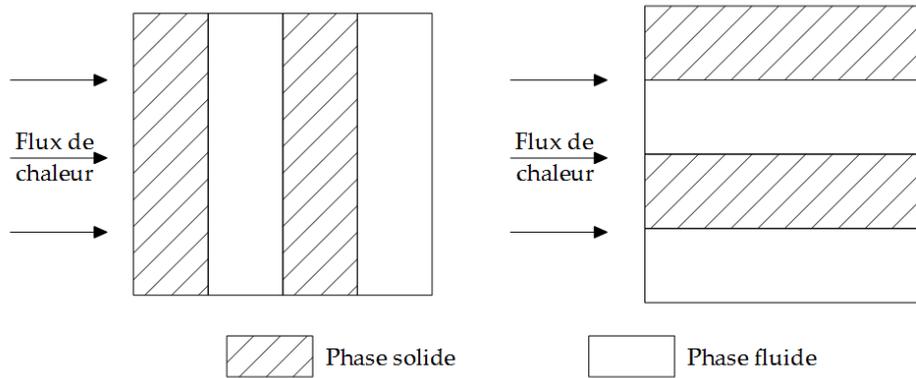


Figure A-10 : Modèles de transferts série et parallèle

Pour le modèle série :

$$\lambda^* = \frac{\lambda_s \lambda_f}{\eta \lambda_s + (1 - \eta) \lambda_f} \quad (\text{A.26})$$

Pour le modèle parallèle :

$$\lambda^* = (1 - \eta) \lambda_s + \eta \lambda_f \quad (\text{A.27})$$

où λ_s et λ_f sont, respectivement, les conductivités thermiques du solide et du fluide [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] et η la porosité [-].

Les modèles série et parallèle fournissent, au mieux, respectivement une valeur minimale et une valeur maximale absolue de λ^* .

Ces deux modèles peuvent être améliorés en travaillant sur des structures mixtes série/parallèle, comme par exemple le modèle de Woodside (Woodside and Messmer, 1961 cité dans Laurent, 1986) et représenté figure a-11.

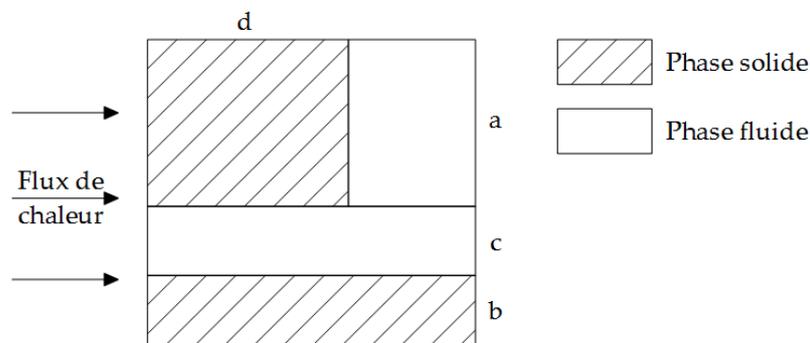


Figure A-11 : Modèles de transferts de Woodside et Messmer

Le modèle de Woodside implique donc :

$$\lambda^* = \frac{\lambda_s \lambda_f}{\lambda_s(1-d) + d\lambda_f} + b\lambda_s + c\lambda_f \quad (\text{A.28})$$

Dans le même esprit, on peut également citer les travaux de Wyllie et Southwick (Wyllie and Southwick, 1954) ou encore ceux de Krischer et Kröll (Krischer and Kröll, 1963) tous deux cités dans (Kalboussi, 1990).

Un degré supplémentaire de réalisme peut être atteint en considérant un modèle à structure périodique simple comme par exemple un réseau d'agrégats cubiques régulièrement espacés. Ces modèles ont ensuite été généralisés pour prendre en considération une répartition aléatoire de grains de formes quelconques (Crane and Vachon, 1977) ou pour tenir compte de la taille et de la répartition des pores (Zumbrunnen et al., 1986). D'autres modèles encore intègrent la contiguïté entre phase (Jackson and Black, 1983 cité dans Laurent, 1986).

A.3.5.2.4. *Le modèle par homogénéisation auto-cohérente*

Cette méthode est issue de la volonté de caractériser des milieux hétérogènes pour des applications mécaniques. Cette technique a ensuite été adaptée pour leur caractérisation thermique par Boutin ou la conductivité thermique du béton cellulaire est évaluée en fonction de sa densité sèche et de sa teneur en eau (Boutin, 1996).

L'objectif de cette méthode est d'estimer la conductivité thermique globale d'un matériau hétérogène à partir de la concentration des constituants et de leur conductivité thermique propre. L'idée essentielle est d'assimiler l'interaction de chaque hétérogénéité avec toutes les autres à l'interaction de cette hétérogénéité avec une matrice homogène (dont les propriétés sont à déterminer). Le principe de la détermination est fondé sur une condition énergétique qui exprime que l'énergie thermique contenue dans le matériau hétérogène est égale à celle qu'il y aurait dans la matrice homogène équivalente soumise aux mêmes conditions limites.

Le milieu hétérogène est assimilé à un assemblage d'inclusions composites sphériques de tailles variables. Dans le cas d'un milieu diphasique sec, on considère donc des bulles d'air sphériques entourées d'une membrane solide. Dans le cas d'un milieu triphasique (solide + air + eau), la méthode consistant à rajouter une couche d'eau intercalée entre l'air et la membrane solide ne donne pas de résultats convaincants (Boutin, 1996). L'approche alors retenue par Boutin est de procéder par « double-homogénéisation » en considérant des bulles d'air entourées d'une membrane de milieu poreux saturé.

A.3.5.2.5. Les modèles empiriques ou semi-empiriques

Ces modèles fournissent uniquement un moyen, plus ou moins fidèle, de représentation des données expérimentales. L'un des modèles les plus connus, en physique des sols, est probablement celui de Kersten (Kersten, 1949), cité dans (Laurent, 1986) et (Delacre, 2000), qui relie la conductivité thermique d'un sol à sa densité sèche dans un premier temps puis à sa teneur en eau massique dans un second temps par des formules du type :

$$\lambda_{sec} = A. 10^{Bd} ; \lambda_{humide} = C \ln \vartheta_l + D \quad (A.29)$$

où d est la densité sèche [-], ϑ_l la teneur en eau massique [kg.kg⁻¹] et A , B , C et D sont des constantes ajustées en fonction du type de matériau. Partant de ces deux relations, Kersten propose :

- Pour les sols argileux :

$$\lambda^* = 0,1442(0,9 \ln \vartheta_l - 0,2). 10^{0,6243d} \quad (A.30)$$

- Pour les sols sableux :

$$\lambda^* = 0,1442(0,7 \ln \vartheta_l - 0,2). 10^{0,6243d} \quad (A.31)$$

Un autre modèle de ce type consiste à effectuer une moyenne géométrique pondérée :

- Système à 2 composants :

$$\lambda^* = \lambda_s^{(1-\eta)} \lambda_f^\eta \quad (A.32)$$

- Système à n composants :

$$\lambda^* = \prod_i \lambda_i^{x_i} \quad (A.33)$$

où λ_s la conductivité thermique de la phase solide [W.m⁻¹.K⁻¹], λ_f la conductivité thermique de la phase fluide [W.m⁻¹.K⁻¹], η la porosité [-], λ_i la conductivité thermique du constituant i [W.m⁻¹.K⁻¹] et x_i est la proportion volumique du constituant i [m³.m⁻³].

A.3.5.3. Méthodes de mesure des paramètres thermiques

La mesure des paramètres thermiques d'un milieu poreux peut passer par deux grands types de méthodes :

- En régime permanent
- En régime transitoire

Ces mesures, effectuées sur des V.E.R. du matériau conduisent toutes à des grandeurs apparentes.

A.3.5.3.1. Régime permanent

D'une manière générale, cette technique consiste à imposer un flux de chaleur unidirectionnel q constant à travers l'échantillon et à mesurer les températures T_1 et T_2 en deux points x_1 et x_2 le long de la ligne de flux.

La conductivité thermique peut alors s'évaluer aisément par la loi de Fourier :

$$\lambda^* = q \frac{x_2 - x_1}{T_2 - T_1} \quad (\text{A.34})$$

Cette technique est utilisée pour mesurer la résistante thermique des bâtiments :

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{q} \quad (\text{A.35})$$

Il existe plusieurs méthodes de mesures en régime permanent comme la plaque chaude gardée, la plaque chaude bi-gardée, boîte chaude, méthode des boîtes, méthode des boîtes symétriques pour lesquels on peut citer les travaux de (Castel, 1978; Hladik, 1990; Huet et al., 1979; Kalboussi, 1990) ou encore le fil chaud avec, par exemple, (Prelovsek and Uran, 1984).

La mesure est aisée quand le matériau est à l'état sec. Si l'étude porte sur un matériau humide, la mesure devient plus ardue car il faut éviter la migration de l'eau lors de l'essai.

A.3.5.3.2. Régime transitoire

Il existe également, comme pour les mesures en régime permanent, de nombreuses techniques de caractérisation des caractéristiques thermiques en régime transitoire. On peut notamment citer la technique de la sonde à choc thermique (mono-, bi- ou tri-tige) avec les travaux de Blackwell (Blackwell, 1954) ou encore de Laurent (Laurent, 1986), l'anneau chauffant (Jannot and Acem, 2007), les plaques échangeuses, la méthode flash (De Giovanni and Laurent, 1986) ou encore la méthode des boîtes adaptée au régime transitoire (Kalboussi, 1990). La description complète (théorie et pratique) de toute ces méthodes peut être trouvée dans (Jannot, 2011).

Le principe de toutes ces méthodes de mesure repose, d'une manière générale, sur une perturbation de température plus ou moins localisée dans le temps et dans l'espace du système. Toutes ces méthodes ont leurs avantages et leurs inconvénients. La qualité de la mesure dépend, bien évidemment, du choix de la méthode employée pour le matériau. Les caractéristiques thermiques sont ensuite calculées à partir d'un (ou plusieurs) thermogrammes.

ANNEXE B : CONDUCTIVITE
THERMIQUE ET DENSITE DU PISE

On trouve dans la littérature plusieurs dizaines de valeurs de conductivités thermique λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] pour le pisé. Ces valeurs sont généralement reliées à une densité sèche (ou à une masse volumique [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]) bien que pour le pisé la conductivité thermique ne dépende pas uniquement de la densité mais également de la teneur en eau et de la température.

Dans cette annexe, on donne donc une liste (non exhaustive) des différentes valeurs de λ que l'on peut trouver dans la littérature pour des pisés stabilisés et non stabilisés en fonction de la densité sèche ou de la masse volumique. Un maximum de renseignements sera fourni quand les auteurs auront précisés la provenance des terres, la méthode de mesure et la forme des échantillons utilisés.

L'objectif est ici de montrer qu'il est *a priori* impossible de définir une valeur unique de conductivité thermique pour le pisé en général car il existe en réalité *des* pisés quand bien même cette valeur dépendrait d'un autre paramètre comme la densité sèche ou la masse volumique. La mesure de la conductivité thermique s'avère donc nécessaire pour chacun des pisés que l'on souhaite étudier.

B.1. ARNOLD (1969) DANS HEATHCOTE (2011)

Heathcote fait une régression linéaire des données de Arnold qui a effectué ses mesures sur des briques de 300x300x50 mm à la plaque chaude gardée ((Arnold, 1969) dans (Heathcote, 2011)).

$$\lambda = 0,0011\rho - 1 \quad (\text{B.1})$$

Avec $1400 \leq \rho \leq 2000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

B.2. PISE, TERRE D'AVENIR (1985)

Il n'y a pas d'indications concernant la provenance et de la forme des échantillons ni de la méthode de mesure utilisée. Les données viennent du Centre de Recherche de Louvain (Pisé terre D'avenir (association loi 1901), 1985).

$$\lambda = \frac{\rho}{2000} - 0,15 \quad (\text{B.2})$$

Avec $1500 \leq \rho \leq 2000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

B.3. LAURENT (1986)

L'étude Laurent a portée sur une grande quantité d'échantillons de terre foisonnée (75 échantillons de 6 terres provenant de France et d'Afrique). Les échantillons sont des cubes de

terre non stabilisée de 10 cm de côté obtenus par compression statique à la presse hydraulique (20 MPa). La mesure a été effectuée avec une sonde à choc thermique qu'il a développée (Laurent, 1986).

$$\lambda = 0,0823 \cdot 10^{0,5662 \frac{\rho}{1000}} \quad (\text{B.3})$$

Avec $1700 \leq \rho \leq 2200 \text{ kg.m}^{-3}$

B.4. VOLHARD (1983) DANS MINKE (2000)

Minke reprend les données de Volhard qui a travaillé sur du loam compacté. Il n'y a aucune indication sur la forme des échantillons, un stabilisant éventuel ou la méthode de mesure ((Volhard, 1983) dans (Minke, 2000)).

ρ [kg.m ⁻³]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
1700	0,81
1800	0,91
1900	1,01
2000	1,13
2100	1.25
2200	1,4

Tableau B-1 : Valeurs de conductivité thermique du pisé pour Volhard

B.5. ADAM & JONES (1995) ET ADAM (2001)

Ces auteurs ont étudiés des blocs de terre comprimée de différentes origines au Soudan qu'ils ont comparés à un échantillon de terre du Royaume-Uni du Building Research Establishment (BRE). Ces blocs ont été stabilisés à la chaux (6%) ou au ciment Portland (5%) et les mesures effectuées à la plaque chaude gardée (Adam and Jones, 1995; Adam, 2001).

Origine	Type d'échantillon	Stabilisant (%)	ρ [kg.m ⁻³]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Fetehab	Bloc plein	Chaux – 6	1750	0,38
Fetehab	Bloc plein	Ciment – 5	1820	0,41
Fetehab	Bloc creux	Chaux – 6	1130	0,25
Deroshab	Bloc plein	Chaux – 6	1860	0,46
Deroshab	Bloc plein	Ciment – 5	1920	0,55
Deroshab	Bloc creux	Chaux – 6	1300	0,32
El Hizam	Bloc plein	Chaux – 6	1540	0,26
Soudan (?)	Bloc plein	Oui - ?	1700	0,81
Soudan (?)	Bloc plein	Oui - ?	2200	1,04
BRE	Bloc plein	Ciment – 5	1840	0,51

Tableau B-2 : Mesures de conductivité thermique effectuées par Adam & Jones

B.6. WALKER ET AL. (2004)

Walker a recensé plusieurs valeurs de conductivité thermique sur des constructions existantes. Les mesures ont été effectuées sur des cylindres et des prismes mais il n'y a pas d'indication sur leurs dimensions ni sur la méthode utilisée (Walker et al., 2004).

ρ [kg.m ⁻³]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
1400	0,6
1600	0,8
1800	1
1900	1,3
2000	1,6

Tableau B-3 : Conductivités thermique recensées par Walker et al.

B.7. TAYLOR ET AL. (2008)

Il s'agit d'une étude sur une construction en pisé en Australie mais il n'y a aucune indication sur un éventuel stabilisant, sur la méthode de mesure ni sur la forme des échantillons (Taylor et al., 2008).

ρ [kg.m ⁻³]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
2050	1

Tableau B-4 : Conductivité thermique relevée par Taylor et al. sur une construction en Australie

B.8. HALL & ALLINSON 2009

Les échantillons proviennent de terre à pisé utilisée dans la construction et prélevée dans les îles britanniques (quarry pit in the Nene Valley). Les échantillons sont de formes cylindriques, fabriqués au Proctor et stabilisés au ciment Portland à hauteur de 6%. Les mesures sont effectuées avec un fluxmètre P.A. Hilton B480 (Hall and Allinson, 2009c).

Stabilisant (%)	ρ [kg.m ⁻³]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Ciment – 6	2120	1,01
Ciment – 6	2020	0,833
Ciment – 6	1980	0,866

Tableau B-5 : Mesures de conductivité thermique effectuées par Hall et Allinson

B.9. ALLINSON ET HALL (2010)

Les données proviennent d'une étude portant sur une construction en pisé stabilisé (ciment Portland à hauteur de 7% en masse sèche + Rheomix 790 à 1,5%) au Royaume-Uni. La conductivité thermique a été mesurée sur un bloc de 300x300x53 mm reconstitué en laboratoire en utilisant une machine Proctor (596 kJ.m⁻³). Les mesures sont effectuées avec un fluxmètre P.A. Hilton B480 (Allinson and Hall, 2010).

Stabilisant (%)	ρ [kg.m ⁻³]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Ciment – 7 + Rheomix 790 – 1,5	1900	0,643

Tableau B-6 : Relevés de conductivité thermique effectués par Allinson et Hall

B.10. OTI ET AL. (2010)

Leur étude a porté sur des blocs fabriqués industriellement à la presse (120 bar) par Lower Oxford Clay/Hanson Brick Company Ltd., Stewartby, Bedfordshire. Ces blocs ont été stabilisés à la chaux et au ciment Portland mais il n'y a aucune sur la quantité. La conductivité thermique a été mesurée grâce à un Laser-comp FOX 200 associé au logiciel WinTherm32 (Oti et al., 2010).

Stabilisant (%)	ρ [kg.m ⁻³]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Chaux – ?	1500	0,244 à 0,2736
Ciment – ?	1500	0,2494 à 0,2822

Tableau B-7 : Relevés de conductivité thermique effectués par Oti et al.

B.11. CSTB (2011)

Les échantillons, parallélépipédiques, proviennent de constructions existantes en France. Il n'y a aucune indication sur une éventuelle stabilisation. La conductivité thermique a été mesurée à la plaque chaude gardée (CSTB, 2011).

ρ [kg.m ⁻³]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
1900	0,4 à 0,5

Tableau B-8 : Mesures de conductivité thermiques effectuées par le CSTB

ANNEXE C : PROGRAMMATION DE LA CENTRALE D'ACQUISITION

Dans cette annexe se trouve le programme de la centrale d'acquisition CR1000 pour l'étude des maquettes de mur en laboratoire et de la maison de St Antoine l'Abbaye que l'on a présenté dans les parties 4 et 5 de cette thèse.

Le premier est écrit en utilisant le logiciel CRBasic Editor de Campbell Scientific. Dans cette étude, la programmation doit se faire « manuellement » car le mode « symbolique » de Short Cut n'est pas en mesure de prendre autant de capteurs en considération, comme déjà expliqué dans la Partie 2.

Le second, pour l'habitation de St Antoine l'Abbaye, bien qu'ayant pu être programmé en utilisant Short Cut, a également été programmé via CRBasic Editor pour plus de souplesse.

Dans les deux cas, le calcul de la teneur en eau suivant l'équation d'étalonnage déterminée dans la Partie 2 se fait en post-traitement.

C.1. PROGRAMMATION DES MAQUETTES

'CR1000

'Déclaration des variables et des unités

Dim LCount

Public BattV

Public PTemp_C

Units BattV=Volts

Units PTemp_C=Deg C

'Déclaration de toutes les CS616 branchées sur le multiplexeur

Public PA_uS(8)

'Mur A50 : Variable, Alias et Unités des CS215, 107 et CS650

Public TRHData_1(2)

Public TRHData_2(2)

Public TRHData_3(2)

Public TRHData_4(2)

Public TRHData_5(2)

Public TRHData_6(2)

Public TRHData_7(2)

Public A50_Ts_l

Public A50_Ts_r

Public CS65X_1(6)

Alias $PA_uS(1)=A50_us_u$
 Alias $PA_uS(2)=A50_us_l$
 Alias $PA_uS(3)=A50_us_m$
 Alias $CS65X_1(1)=A50_VWC_r$
 Alias $CS65X_1(2)=A50_EC_r$
 Alias $CS65X_1(3)=A50_T6_r$
 Alias $CS65X_1(4)=A50_P_r$
 Alias $CS65X_1(5)=A50_PA_r$
 Alias $CS65X_1(6)=A50_VR_r$
 Alias $PA_uS(4)=A50_us_d$
 Alias $TRHData_1(1)=A50_T_u$
 Alias $TRHData_1(2)=A50_RH_u$
 Alias $TRHData_2(1)=A50_T_l$
 Alias $TRHData_2(2)=A50_RH_l$
 Alias $TRHData_3(1)=A50_T_m$
 Alias $TRHData_3(2)=A50_RH_m$
 Alias $TRHData_4(1)=A50_T_r$
 Alias $TRHData_4(2)=A50_RH_r$
 Alias $TRHData_5(1)=A50_T_d$
 Alias $TRHData_5(2)=A50_RH_d$
 Alias $TRHData_6(1)=A50_Ta_l$
 Alias $TRHData_6(2)=A50_RHa_l$
 Alias $TRHData_7(1)=A50_Ta_r$
 Alias $TRHData_7(2)=A50_RHa_r$

Units $A50_us_u=uSec$
 Units $A50_us_l=uSec$
 Units $A50_us_m=uSec$
 Units $A50_VWC_r=m^3/m^3$
 Units $A50_EC_r=dS/m$
 Units $A50_T6_r=Deg\ C$
 Units $A50_P_r=unitless$
 Units $A50_PA_r=nSec$
 Units $A50_VR_r=unitless$
 Units $A50_us_d=uSec$
 Units $A50_Ts_l=Deg\ C$
 Units $A50_Ts_r=Deg\ C$
 Units $A50_T_u=Deg\ C$
 Units $A50_RH_u=%$
 Units $A50_T_l=Deg\ C$

Units A50_RH_l=%
Units A50_T_m=Deg C
Units A50_RH_m=%
Units A50_T_r=Deg C
Units A50_RH_r=%
Units A50_T_d=Deg C
Units A50_RH_d=%
Units A50_Ta_l=Deg C
Units A50_RHa_l=%
Units A50_Ta_r=Deg C
Units A50_RHa_r=%

'Mur A30 : Variable, Alias et Unités des CS215, 107 et CS650

Public TRHData_8(2)
Public TRHData_9(2)
Public TRHData_10(2)
Public A30_Ts_l
Public A30_Ts_r

Alias PA_uS(5)=A30_us_m
Alias TRHData_8(1)=A30_T_m
Alias TRHData_8(2)=A30_RH_m
Alias TRHData_9(1)=A30_Ta_l
Alias TRHData_9(2)=A30_RHa_l
Alias TRHData_10(1)=A30_Ta_r
Alias TRHData_10(2)=A30_RHa_r

Units A30_us_m=uSec
Units A30_Ts_l=Deg C
Units A30_Ts_r=Deg C
Units A30_T_m=Deg C
Units A30_RH_m=%
Units A30_Ta_l=Deg C
Units A30_RHa_l=%
Units A30_Ta_r=Deg C
Units A30_RHa_r=%

'Mur B50 : Variable, Alias et Unités des CS215, 107 et CS650

Public TRHData_11(2)
Public TRHData_12(2)

Public *TRHData_13*(2)
Public *TRHData_14*(2)
Public *TRHData_15*(2)
Public *B50_Ts_l*
Public *B50_Ts_r*
Public *CS65X_2*(6)

Alias *PA_uS*(6)=*B50_us_l*
Alias *PA_uS*(7)=*B50_us_m*
Alias *CS65X_2*(1)=*B50_VWC_r*
Alias *CS65X_2*(2)=*B50_EC_r*
Alias *CS65X_2*(3)=*B50_T6_r*
Alias *CS65X_2*(4)=*B50_P_r*
Alias *CS65X_2*(5)=*B50_PA_r*
Alias *CS65X_2*(6)=*B50_VR_r*
Alias *TRHData_11*(1)=*B50_T_l*
Alias *TRHData_11*(2)=*B50_RH_l*
Alias *TRHData_12*(1)=*B50_T_m*
Alias *TRHData_12*(2)=*B50_RH_m*
Alias *TRHData_13*(1)=*B50_T_r*
Alias *TRHData_13*(2)=*B50_RH_r*
Alias *TRHData_14*(1)=*B50_Ta_l*
Alias *TRHData_14*(2)=*B50_RHa_l*
Alias *TRHData_15*(1)=*B50_Ta_r*
Alias *TRHData_15*(2)=*B50_RHa_r*

Units *B50_us_l*=uSec
Units *B50_us_m*=uSec
Units *B50_VWC_r*=m³/m³
Units *B50_EC_r*=dS/m
Units *B50_T6_r*=Deg C
Units *B50_P_r*=unitless
Units *B50_PA_r*=nSec
Units *B50_VR_r*=unitless
Units *B50_Ts_l*=Deg C
Units *B50_Ts_r*=Deg C
Units *B50_T_l*=Deg C
Units *B50_RH_l*=%
Units *B50_T_m*=Deg C
Units *B50_RH_m*=%

Units B50_T_r=Deg C
Units B50_RH_r=%
Units B50_Ta_l=Deg C
Units B50_RHa_l=%
Units B50_Ta_r=Deg C
Units B50_RHa_r=%

'Mur B30 : Variable, Alias et Unités des CS215, 107 et CS650

Public TRHData_16(2)
Public TRHData_17(2)
Public TRHData_18(2)
Public B30_Ts_l
Public B30_Ts_r

Alias PA_uS(8)=B30_us_m
Alias TRHData_16(1)=B30_T_m
Alias TRHData_16(2)=B30_RH_m
Alias TRHData_17(1)=B30_Ta_l
Alias TRHData_17(2)=B30_RHa_l
Alias TRHData_18(1)=B30_Ta_r
Alias TRHData_18(2)=B30_RHa_r

Units B30_us_m=uSec
Units B30_Ts_l=Deg C
Units B30_Ts_r=Deg C
Units B30_T_m=Deg C
Units B30_RH_m=%
Units B30_Ta_l=Deg C
Units B30_RHa_l=%
Units B30_Ta_r=Deg C
Units B30_RHa_r=%

'Définitions des tables dans lesquelles on enregistre les données toutes les 15min

'Mur A50

```
DataTable(A50,True,-1)
  DataInterval(0,15,Min,10)
  Sample(1,A50_RH_u,FP2)
  Average(1,A50_T_u,FP2,False)
  FieldNames("A50_T_u")
  Average(1,A50_us_u,FP2,False)
  FieldNames("A50_us_u")
  Sample(1,A50_RH_l,FP2)
  Average(1,A50_T_l,FP2,False)
  FieldNames("A50_T_l")
  Average(1,A50_us_l,FP2,False)
  FieldNames("A50_us_l")
  Sample(1,A50_RH_m,FP2)
  Average(1,A50_T_m,FP2,False)
  FieldNames("A50_T_m")
  Average(1,A50_us_m,FP2,False)
  FieldNames("A50_us_m")
  Sample(1,A50_RH_r,FP2)
  Average(1,A50_T_r,FP2,False)
  FieldNames("A50_T_r")
  Average(1,A50_VWC_r,FP2,False)
  Average(1,A50_EC_r,FP2,False)
  Average(1,A50_T6_r,FP2,False)
  Average(1,A50_P_r,FP2,False)
  Average(1,A50_PA_r,FP2,False)
  Average(1,A50_VR_r,FP2,False)
  Sample(1,A50_RH_d,FP2)
  Average(1,A50_T_d,FP2,False)
  FieldNames("A50_T_d")
  Average(1,A50_us_d,FP2,False)
  FieldNames("A50_us_d")
  Sample(1,A50_Ts_l,FP2)
  FieldNames("A50_Ts_l")
  Sample(1,A50_Ts_r,FP2)
  FieldNames("A50_Ts_r")
  Sample(1,A50_RHa_l,FP2)
  Sample(1,A50_Ta_l,FP2)
  FieldNames("A50_Ta_l")
```

```
Sample(1,A50_RHa_r,FP2)
Sample(1,A50_Ta_r,FP2)
FieldNames("A50_Ta_r")
EndTable
```

'Mur A30

```
DataTable(A30,True,-1)
  DataInterval(0,15,Min,10)
  Sample(1,A30_RH_m,FP2)
  Average(1,A30_T_m,FP2,False)
  FieldNames("A30_T_m")
  Average(1,A30_us_m,FP2,False)
  FieldNames("A30_us_m")
  Sample(1,A30_Ts_l,FP2)
  FieldNames("A30_Ts_l")
  Sample(1,A30_Ts_r,FP2)
  FieldNames("A30_Ts_r")
  Sample(1,A30_RHa_l,FP2)
  Sample(1,A30_Ta_l,FP2)
  FieldNames("A30_Ta_l")
  Sample(1,A30_RHa_r,FP2)
  Sample(1,A30_Ta_r,FP2)
  FieldNames("A30_Ta_r")
EndTable
```

'Mur B50

```
DataTable(B50,True,-1)
  DataInterval(0,15,Min,10)
  Sample(1,B50_RH_l,FP2)
  Average(1,B50_T_l,FP2,False)
  FieldNames("B50_T_l")
  Average(1,B50_us_l,FP2,False)
  FieldNames("B50_us_l")
  Sample(1,B50_RH_m,FP2)
  Average(1,B50_T_m,FP2,False)
  FieldNames("B50_T_m")
  Average(1,B50_us_m,FP2,False)
  FieldNames("B50_us_m")
  Sample(1,B50_RH_r,FP2)
  Average(1,B50_T_r,FP2,False)
```

```

FieldNames("B50_T_r")
Average(1,B50_VWC_r,FP2,False)
Average(1,B50_EC_r,FP2,False)
Average(1,B50_T6_r,FP2,False)
Average(1,B50_P_r,FP2,False)
Average(1,B50_PA_r,FP2,False)
Average(1,B50_VR_r,FP2,False)
Sample(1,B50_Ts_l,FP2)
FieldNames("B50_Ts_l")
Sample(1,B50_Ts_r,FP2)
FieldNames("B50_Ts_r")
Sample(1,B50_RHa_l,FP2)
Sample(1,B50-Ta_l,FP2)
FieldNames("B50-Ta_l")
Sample(1,B50_RHa_r,FP2)
Sample(1,B50-Ta_r,FP2)
FieldNames("B50-Ta_r")

```

EndTable

'Mur B30

```

DataTable(B30,True,-1)
  DataInterval(0,15,Min,10)
  Sample(1,B30_RH_m,FP2)
  Average(1,B30_T_m,FP2,False)
  FieldNames("B30_T_m")
  Average(1,B30_us_m,FP2,False)
  FieldNames("B30_us_m")
  Sample(1,B30_Ts_l,FP2)
  FieldNames("B30_Ts_l")
  Sample(1,B30_Ts_r,FP2)
  FieldNames("B30_Ts_r")
  Sample(1,B30_RHa_l,FP2)
  Sample(1,B30-Ta_l,FP2)
  FieldNames("B30-Ta_l")
  Sample(1,B30_RHa_r,FP2)
  Sample(1,B30-Ta_r,FP2)
  FieldNames("B30-Ta_r")

```

EndTable

'Programme principal avec un scan des ports de la centrale toutes les 5 minutes

BeginProg

Scan(5,min,1,0)

Battery(BattV)

PanelTemp(PTemp_C,_50Hz)

'Alimentation ON du multiplexeurAM16/32

PortSet(3,1)

Delay(0,150,mSec)

LCount=1

'Sous-programme pour la lecture des ports des CS616 l'AM16/32 par groupe de 3

SubScan(0,uSec,2)

'Lecture des 3 premiers ports de l'AM16/32

PulsePort(1,10000)

'Lecture du temps de parcours CS616 PA_uS() sur l'AM16/32

CS616(PA_uS(LCount),3,1,2,3,1,0)

LCount=LCount+3

'Rebouclage jusqu'à la lecture de tous les ports des CS616 sur l'AM16/32

NextSubScan

PulsePort(1,10000)

'Alimentation OFF du multiplexeur AM16/32

PortSet(3,0)

'Lecture des CS215 et CS650 suivant le protocole SDI12 et des thermistances de surface 107 pour chacun des murs

'Mur A50

Delay(0,150,mSec)

'A50_T_u et A50_RH_u à l'adresse « 0 » sur le port C5

SDI12Recorder(TRHData_1(),5,"0","M!",1,0)

'A50_T_l et A50_RH_l à l'adresse « 1 » sur le port C5

SDI12Recorder(TRHData_2(),5,"1","M!",1,0)

'A50_T_m et A50_RH_m à l'adresse « 2 » sur le port C5

SDI12Recorder(TRHData_3(),5,"2","M!",1,0)

'A50_T_r et A50_RH_r à l'adresse « 3 » sur le port C5

SDI12Recorder(TRHData_4(),5,"3","M!",1,0)

'A50_T_d et A50_RH_d à l'adresse « 4 » sur le port C5

SDI12Recorder(TRHData_5(),5,"4","M!",1,0)

'A50_Ta_l et A50_RHa_l à l'adresse « 5 » sur le port C5

SDI12Recorder(TRHData_6(),5,"5","M!",1,0)

'A50_Ta_r et A50_RHa_r à l'adresse « 6 » sur le port C5

SDI12Recorder(TRHData_7(),5,"6","M!",1,0)

'A50_Ts_l
 Therm107(A50_Ts_l,1,4,1,0,_50Hz,1,0)
'A50_Ts_r
 Therm107(A50_Ts_r,1,5,1,0,_50Hz,1,0)
'A50_VWC_r ; A50_EC_r ; A50_T_r à l'adresse « 8 » sur le port C7
 SDI12Recorder(CS65X_1(),7,"8","M3!",1,0)

'Mur A30
'A30_T_m et A30_RH_m à l'adresse « 7 » sur le port C5
 SDI12Recorder(TRHData_8(),5,"7","M!",1,0)
'A30_Ta_l et A30_RHa_l à l'adresse « 8 » sur le port C5
 SDI12Recorder(TRHData_9(),5,"8","M!",1,0)
'A30_Ta_r et A30_RHa_r à l'adresse « 9 » sur le port C5
 SDI12Recorder(TRHData_10(),5,"9","M!",1,0)
'A30_Ts_l
 Therm107(A30_Ts_l,1,6,1,0,_50Hz,1,0)
'A30_Ts_r
 Therm107(A30_Ts_r,1,7,1,0,_50Hz,1,0)

'Mur B50
'B50_T_l et B50_RH_l à l'adresse « 0 » sur le port C7
 SDI12Recorder(TRHData_11(),7,"0","M!",1,0)
'B50_T_m et B50_RH_m à l'adresse « 1 » sur le port C7
 SDI12Recorder(TRHData_12(),7,"1","M!",1,0)
'B50_T_ret B50_RH_r à l'adresse « 2 » sur le port C7
 SDI12Recorder(TRHData_13(),7,"2","M!",1,0)
'B50_Ta_l et B50_RHa_l à l'adresse « 3 » sur le port C7
 SDI12Recorder(TRHData_14(),7,"3","M!",1,0)
'B50_Ta_r et B50_RHa_l à l'adresse « 4 » sur le port C7
 SDI12Recorder(TRHData_15(),7,"4","M!",1,0)
'B50_Ts_l
 Therm107(B50_Ts_l,1,8,2,0,_50Hz,1,0)
'B50_Ts_r
 Therm107(B50_Ts_r,1,9,2,0,_50Hz,1,0)
'B50_VWC_r ; B50_EC_r ; B50_T_r à l'adresse « 9 » sur le port C7
 SDI12Recorder(CS65X_2(),7,"9","M3!",1,0)

'Mur B30
'B30_T_m et B30_RH_m à l'adresse « 5 » sur le port C7
 SDI12Recorder(TRHData_16(),7,"5","M!",1,0)

'B30_Ta_l et B30_RHa_l à l'adresse « 6 » sur le port C7

SDI12Recorder(TRHData_17(),7,"6","M!",1,0)

'B30_Ta_r et B30_RHa_r à l'adresse « 7 » sur le port C7

SDI12Recorder(TRHData_18(),7,"7","M!",1,0)

'B30_Ts_l

Therm107(B30_Ts_l,1,10,2,0,_50Hz,1,0)

'B30_Ts_r

Therm107(B30_Ts_r,1,11,2,0,_50Hz,1,0)

'Appel des tables et enregistrement des données suivant la fréquence définit

CallTable(A50)

CallTable(A30)

CallTable(B50)

CallTable(B30)

NextScan

EndProg

C.2. ST ANTOINE L'ABBAYE

'CR1000

'Déclaration des variables et des unités

Dim LCount

Public BattV

Units BattV=Volts

'Déclaration de toutes les CS616 branchées sur le multiplexeur

Public uS(6)

'Variable, Alias et Unités des CS215

'Mur ouest

Public TRHData(2)

Public TRHData_2(2)

Public TRHData_3(2)

Alias TRHData(1)=T_W_Ext

Alias TRHData(2)=RH_W_Ext

Alias TRHData_2(1)=T_W_Mid

Alias TRHData_2(2)=RH_W_Mid

Alias TRHData_3(1)=T_W_Int

Alias TRHData_3(2)=RH_W_Int

Alias uS(1)=uS_W_Ext

Alias uS(2)=uS_W_Mid

Alias uS(6)=uS_W_Int

Units T_W_Ext=Deg C

Units RH_W_Ext=%

Units T_W_Mid=Deg C

Units RH_W_Mid=%

Units T_W_Int=Deg C

Units RH_W_Int=%

Units uS_W_Ext=uSec

Units uS_W_Mid=uSec

Units uS_W_Int=uSec

'Mur sud

Public TRHData_4(2)

Public TRHData_5(2)

Public TRHData_6(2)

Alias TRHData_4(1)=T_S_Ext

Alias TRHData_4(2)=RH_S_Ext

Alias TRHData_5(1)=T_S_Mid

Alias TRHData_5(2)=RH_S_Mid

Alias TRHData_6(1)=T_S_Int

Alias TRHData_6(2)=RH_S_Int

Alias uS(3)=uS_S_Int

Alias uS(4)=uS_S_Ext

Alias uS(5)=uS_S_Mid

Units T_S_Ext=Deg C

Units RH_S_Ext=%

Units T_S_Mid=Deg C

Units RH_S_Mid=%

Units T_S_Int=Deg C

Units RH_S_Int=%

Units uS_S_Ext=uSec

Units uS_S_Mid=uSec

Units uS_S_Int=uSec

'Intérieur maison

Public TRHData_7(2)

Alias TRHData_8(1)=T_Ins

Alias TRHData_8(2)=RH_Ins

Units T_Ins=Deg C

Units RH_Ins=%

'Extérieur maison

Public TRHData_8(2)

Alias TRHData_7(1)=T_Out

Alias TRHData_7(2)=RH_Out

Units T_Out=Deg C

Units RH_Out=%

'Définitions de la table dans laquelle on enregistre les données toutes les heures

DataTable(Table1,True,-1)

 DataInterval(0,1,Hr,10)

 Average(1,T_W_Ext,FP2,False)

 Sample(1,RH_W_Ext,FP2)

 Average(1,uS_W_Ext,FP2,False)

 Average(1,T_W_Mid,FP2,False)

 Sample(1,RH_W_Mid,FP2)

 Average(1,uS_W_Mid,FP2,False)

 Average(1,T_W_Int,FP2,False)

 Sample(1,RH_W_Int,FP2)

 Average(1,uS_W_Int,FP2,False)

 Average(1,T_S_Ext,FP2,False)

 Sample(1,RH_S_Ext,FP2)

 Average(1,uS_S_Ext,FP2,False)

 Average(1,T_S_Mid,FP2,False)

 Sample(1,RH_S_Mid,FP2)

 Average(1,uS_S_Mid,FP2,False)

 Average(1,T_S_Int,FP2,False)

 Sample(1,RH_S_Int,FP2)

 Average(1,uS_S_Int,FP2,False)

 Average(1,T_Out,FP2,False)

 Sample(1,RH_Out,FP2)

 Average(1,T_Ins,FP2,False)

 Sample(1,RH_Ins,FP2)

EndTable

'Programme principal avec un scan des ports de la centrale toutes les 15 minutes

BeginProg

Scan(15,Min,1,0)

Battery(BattV)

'Alimentation ON du multiplexeurAM16/32

PortSet(3,1)

Delay(0,150,mSec)

LCount=1

'Sous-programme pour la lecture des ports des CS616 l'AM16/32 par groupe de 3

SubScan(0,uSec,2)

'Lecture des 3 premiers ports de l'AM16/32

PulsePort(1,10000)

'Lecture du temps de parcours CS616 PA_uS() sur l'AM16/32

CS616(uS(LCount),3,1,2,3,1,0)

LCount=LCount+3

'Rebouclage jusqu'à la lecture de tous les ports des CS616 sur l'AM16/32

NextSubScan

PortSet(3,0)

'Alimentation OFF du multiplexeur AM16/32

Delay(0,150,mSec)

'Lecture des CS215 suivant le protocole SDI12

'Mur ouest

'T_W_Ext et RH_W_Ext à l'adresse « 0 » sur le port C7

SDI12Recorder(TRHData(),7,"0","M!",1,0)

'T_W_Mid et RH_W_Mid à l'adresse « 1 » sur le port C7

SDI12Recorder(TRHData_2(),7,"1","M!",1,0)

'T_W_Int et RH_W_Int à l'adresse « 2 » sur le port C7

SDI12Recorder(TRHData_3(),7,"2","M!",1,0)

'Mur sud

'T_S_Ext et RH_S_Ext à l'adresse « 3 » sur le port C7

SDI12Recorder(TRHData_4(),7,"3","M!",1,0)

'T_S_Mid et RH_S_Mid à l'adresse « 4 » sur le port C7

SDI12Recorder(TRHData_5(),7,"4","M!",1,0)

'T_S_Int et RH_S_Int à l'adresse « 5 » sur le port C7

SDI12Recorder(TRHData_6(),7,"5","M!",1,0)

'Extérieur

'T_Out et RH_Out à l'adresse « 6 » sur le port C7

SDI12Recorder(TRHData_7(),7,"6","M!",1,0)

'Intérieur

'T_Ins et RH_Ins à l'adresse « 7 » sur le port C7

SDI12Recorder(TRHData_8(),7,"7","M!",1,0)

'Appel de la table et enregistrement des données suivant la fréquence définit

CallTable(Table1)

NextScan

EndProg

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'ECOLE NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'ETAT

NOM : CHABRIAC

DATE de SOUTENANCE : 28 juillet 2014

Prénoms : Pierre-Antoine

TITRE : Mesure du comportement hygrothermique du pisé

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2014-ENTP-0007

Ecole doctorale : MEGA (Mécanique, Energétique, Génie civil, Acoustique)

Spécialité : Génie Civil

Cote B.I.U. - /

et bis

CLASSE :

RESUME :

Les murs massifs en pisé sont connus pour leur confort d'habitation et leur capacité à réguler la température et l'humidité à l'intérieur des bâtiments. L'évolution des réglementations – notamment thermiques (RT 2012) – implique aujourd'hui d'avoir des bâtiments répondant à des critères drastiques. Or, le bâti en pisé semble, *a priori*, ne pas s'inscrire dans les références définies par ces règlements. Il semblerait donc qu'il faille prendre en compte d'autres critères que la simple résistance thermique pour caractériser le comportement d'un bâtiment en pisé. Les mécanismes couplés de transferts de masse et de chaleur qui ont lieu au sein d'un matériau poreux comme le pisé et qui conduisent à cette régulation naturelle sont bien connus empiriquement. Cependant, leurs mises en évidence scientifiques sont, quant à elles, plus difficiles.

L'objectif de la thèse a été de développer une chaîne de mesure des transferts hydriques et thermiques dans les bâtiments en pisé afin de les observer et de les quantifier. Une habitation neuve en pisé a été étudiée en particulier durant ces trois ans. La thèse s'est alors déroulée en quatre phases :

1 - Développement d'une chaîne de mesure (capteurs de teneur en eau liquide, d'humidité relative, de température, de flux de chaleur). Chacun de ces capteurs a été modifié, adapté et étalonné pour résister au damage et fonctionner dans un matériau dense et contenant de l'argile ;

2 - Caractérisation géotechnique, thermique et hydrique du matériau : granulométrie, densité, transferts de liquide et de vapeur, sorption, conductivité thermique, chaleur spécifique ;

3 - Essais à l'échelle du mur en laboratoire dans un caisson étanche fonctionnant en double enceintes climatiques conçues au laboratoire. Quatre murs en pisé ont été équipés des capteurs développés en phase 1 ;

4 - Essais à l'échelle de l'habitation : la maison référence a été équipée des mêmes capteurs durant sa construction et un monitoring des transferts a été établi pour au moins 5 ans.

Les objectifs principaux étaient d'instrumenter des murs en pisé durant leur fabrication en prenant en compte l'énergie de compaction, d'avoir un étalonnage des capteurs tenant compte des variations importantes de températures *in situ* et, d'enregistrer sur une longue période (au moins 5 ans) les conditions hydriques et thermiques dans les murs, ainsi qu'à l'intérieur et à l'extérieur de l'habitation. Les résultats obtenus mettent en évidence les phénomènes de transferts thermiques et hydriques se produisant dans le pisé. Les résultats expérimentaux permettent d'envisager la mise au point de modélisations adaptées à la terre compactée.

MOTS-CLES : Comportement hygrothermique, Humidité relative, Pisé, TDR, Teneur en eau

Laboratoire (s) de recherche : Laboratoire Génie Civil et Bâtiment (LGCB), Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS) UMR 5513

Directeur de thèse : Jean-Claude Morel, DR ENTPE

Président de jury : Henry Wong, DR ENTPE

Composition du jury :

Monika Woloszyn, rapporteur, Pr Université de Savoie

Jean-Emmanuel Aubert, rapporteur, MCF Université de Toulouse

Jean-Paul Laurent, Examinateur, IR Université de Grenoble

Antonin Fabbri, Examinateur, CR ENTPE

Fabrice Toussaint, Lafarge

Ivan Serclerat, Lafarge