

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

ÉTUDE DES MATÉRIAUX D'ISOLATION COMPATIBLES
AVEC LA PIERRE DE TUFFEAU : APPLICATION À LA
RÉHABILITATION DU BÂTI ANCIEN ET/OU HISTORIQUE

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Génie Civil

Présentée

et soutenue publiquement par

Inès OTHMEN

Le 19 Mai 2015, devant le jury ci-dessous

Président	M Christophe LANOS	Professeur des universités, Université de Rennes 1
Rapporteurs	M Rafik BELARBI	Professeur des université, Université de La Rochelle
	M Didier DEFER	Professeur des université, Université d'Artois
Examineurs	M Antoine CAUCHETEUX	Chargé de recherche, CEREMA Angers
	M Moussa GOMINA	Chargé de recherche, HDR, Université de Caen
	M Nordine LEKLOU	Maître de conférences, Université de Nantes
	M Pierre MOUNANGA	Professeur des universités, Université de Nantes
	M Philippe POUILLAIN	Maître de conférences, Université de Nantes

Directeur de thèse: M. Pierre MOUNANGA

Encadrant : M. Philippe Poullain Co encadrant : M. Nordine Leklou

Institut de recherche en génie Civil et Mécanique GeM UMR CNRS 61 83

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES TABLEAUX.....	xix
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
I. ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
I.1. Le secteur du bâtiment face aux enjeux environnementaux.....	6
I.1.1. Contexte environnemental et énergétique.....	6
I.1.2. Enjeux de la réhabilitation thermique dans l'existant.....	7
I.2. Eco-conception et éco matériau.....	8
I.2.1. Principe de l'éco conception.....	8
I.2.2. Eco matériaux.....	9
I.3. Mécanismes de dégradation.....	10
I.3.1. Rôle de l'eau.....	10
I.3.1.1. Action directe.....	10
I.3.1.2. Action indirecte.....	12
I.3.2. Biodétérioration.....	12
I.3.2.1. Effet de la croissance des microorganismes sur les pierres.....	13
I.3.2.2. Effet de la pigmentation des microorganismes sur les pierres :.....	14
I.3.2.3. Effet des exo-polysaccharides (EPS).....	14
I.3.2.4. Effets des sécrétions d'acides par les microorganismes.....	14
I.4. Le tuffeau.....	15
I.4.1. Composition minéralogique.....	16
I.4.2. Principales propriétés.....	17
I.4.2.1. Propriétés physiques.....	17
I.4.2.2. Propriétés de transfert hydrique.....	19
I.4.2.3. Propriétés mécaniques.....	23
I.5. Construire en chanvre.....	24
I.5.1. Chanvre.....	24
I.5.2. Chènevotte.....	25
I.5.2.1. Couleur.....	25

I.5.2.2.	Composition massique et volumique	26
I.5.2.3.	Sensibilité à l'eau.....	26
I.5.2.4.	Conductivité thermique.....	27
1.5.2.1.	Compressibilité	28
I.5.3.	Liants.....	29
I.5.4.	Béton de chanvre.....	31
I.5.4.1.	Propriétés physiques	33
I.5.4.2.	Propriétés de transfert hydrique.....	33
I.5.4.3.	Propriétés thermiques	38
I.5.4.4.	Propriétés mécaniques	41
I.6.	Modèles de transferts couplés de masse et de chaleur	43
I.6.1.	Paramètres qui influencent les transferts couplés.....	43
I.6.1.1.	Importance de mesure des propriétés selon l'état hydrique.....	43
I.6.1.2.	Importance de la prise en compte du phénomène d'hystérésis.....	44
I.6.2.	Modèles de référence	47
I.6.2.1.	Modèle de Luikov (1964)	48
I.6.2.2.	Modèle de Philip et De Vries (1957)	48
I.6.3.	Modèle de Kunzel.....	50
I.7.	Conclusion.....	51
II.	PROTOCOLE EXPERIMENTAL.....	52
II.1.	Caractérisation minéralogique des matériaux.....	53
II.1.1.	Microscopie électronique à balayage	53
II.1.2.	Diffraction aux rayons X.....	53
II.2.	Volume Elémentaire représentatif (VER).....	54
II.3.	Détermination des porosités.....	55
II.3.1.	Porosité accessible à l'eau.....	55
II.3.2.	Porosité par intrusion au mercure.....	57
II.3.3.	Effet Bouteille d'encre.....	59
II.4.	Détermination des coefficients de transfert hydrique	59
II.4.1.	Imbibition par capillarité	59
II.4.2.	Isothermes de sorption.....	61
II.4.3.	Perméabilité à la vapeur d'eau	64
II.5.	Détermination des propriétés thermiques.....	66

II.5.1. Méthode de mesure.....	66
II.5.2. Méthode de calcul.....	68
II.5.3. Calcul du flux	71
II.6. Conclusion.....	72
III. CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DES MATÉRIAUX ÉTUDIÉS.....	74
III.1. Le tuffeau.....	75
III.1.1. Morphologie et composition	75
III.1.2. Taille des éprouvettes	76
III.1.3. Propriétés physiques	77
III.1.4. Propriétés de transfert hydrique.....	78
III.1.5. Propriétés thermiques.....	83
III.2. Béton de chanvre.....	84
III.2.1. Les constituants	84
III.2.2. Formulation testée.....	86
III.2.3. Protocoles expérimentaux de fabrication des éprouvettes et de leurs conditionnements	87
III.2.4. Propriétés physiques	89
III.2.5. Propriétés de transfert hydrique.....	92
III.2.6. Propriétés thermiques.....	101
III.3. Conclusion.....	105
IV. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES TECHNIQUES D'ISOLATION À BASE DE CHANVRE	107
IV.1. Dispositif expérimental développé.....	108
IV.1.1. Description de la cellule biclimatique	108
IV.1.2. Système d'acquisition des données	111
IV.1.3. Essais préliminaires	111
IV.2. Description des parois testées.....	114
IV.2.1. Mode opératoire de fabrication des parois	114
IV.2.2. Nature des sollicitations testées.....	117
IV.3. Méthode de traitement de données expérimentales.....	118
IV.3.1. Diminution du bruit de mesure.....	118
IV.3.2. Propriétés à déterminer en régime statique et cyclique.....	120
IV.4. Application à une paroi monocouche.....	128
IV.4.1. Cas de sollicitations statiques.....	128

IV.4.2. Cas de sollicitations cycliques	133
IV.5. Application à une paroi multicouche	143
IV.5.1. Cas de sollicitations statiques.....	143
IV.5.2. Cas de sollicitations cycliques	146
IV.6. Conclusion.....	154
V. ÉTUDE NUMÉRIQUE DES TECHNIQUES D'ISOLATION À BASE DE CHANVRE	157
V.1. Présentation du modèle	158
V.1.1. Equations.....	158
V.1.2. Données d'entrée.....	163
V.1.2.1. Propriétés physiques	163
V.1.2.2. Propriétés de transfert hydrique.....	163
V.1.2.3. Propriétés thermiques	164
V.1.3. Conditions aux limites	165
V.1.3.1. Coefficients de transfert.....	165
V.1.3.2. Données météorologiques	166
V.2. Etude de sensibilité.....	167
V.2.1. Parois testées.....	168
V.2.2. Outils d'analyse statistique	168
V.2.3. Cas d'une paroi simple en tuffeau.....	169
V.2.3.1. Profils des champs de sortie	171
V.2.3.2. Présentation de l'indice de sensibilité	173
V.2.3.3. Paramètres influents.....	176
V.2.4. Cas d'une paroi simple en béton de chanvre.....	177
V.2.4.1. Profils des champs de sortie	177
V.2.4.2. Présentation de l'indice de sensibilité	179
V.2.4.3. Paramètres influents.....	183
V.2.5. Comparaison paroi simple en tuffeau et en béton de chanvre.....	183
V.2.6. Cas d'une paroi multicouche.....	184
V.2.6.1. Profils des champs de réponse	185
V.2.6.2. Présentation de l'indice de sensibilité	186
V.3. Comparaison aux résultats expérimentaux.....	190
V.3.1. Données de la simulation.....	190
V.3.1.1. Conditions aux limites	190

V.3.1.2. Coefficients d'échange convectif.....	190
V.3.1.3. Propriétés des matériaux	191
V.3.2. Profils de température et d'humidité relative	192
V.3.2.1. 1 ^{ers} résultats : $h_{se}=6,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	192
V.3.2.2. Résultats avec ajustement de $h_{se}=17 \text{ W/m}^2\text{K}$	194
V.3.3. Calcul des propriétés thermo physiques dynamiques.....	196
V.4. Etudes des techniques d'isolation soumises à des conditions réelles	197
V.4.1. Configuration des parois multicouches.....	197
V.4.2. Conditions de simulations.....	199
V.4.3. Profils temporels obtenus : T, φ et P_v	200
V.4.4. Facteurs d'amortissement et déphasages thermiques.....	202
V.5. Conclusion.....	204
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	206
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	209
ANNEXES	213

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été réalisée à l'institut de recherche en génie civil et mécanique (GeM UMR CNRS 6183), en particulier au sein de l'équipe Interactions Eau-Géomatériaux (IEG) grâce à une allocation de recherche de l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) et de l'université de Nantes.

J'exprime ma reconnaissance et mon profond respect à M. Abdelhafidh Khelidj pour m'avoir accueillie dans son équipe et avoir fait preuve d'une très grande générosité à mon égard.

Je remercie M. Pierre Mounanga, sans qui je n'aurais sans doute pas fait de thèse, de m'avoir fait confiance et de m'avoir fait découvrir la recherche. Je remercie particulièrement mes encadrants MM. Philippe Poullain et Nordine Leklou pour leur accompagnement au quotidien, pour leurs conseils avisés l'un pour la partie numérique et l'autre pour la partie expérimentale, pour leur disponibilité ainsi que pour la liberté et l'autonomie qu'ils m'ont accordées dans la gestion de mes travaux de recherche et surtout pour leur relecture, leurs nombreuses remarques et corrections.

Je remercie très sincèrement M. Antoine Caucheteux du CEREMA d'Angers pour nos discussions enrichissantes et j'espère que de nouvelles opportunités se présenteront pour continuer à collaborer ensemble.

Je tiens également à exprimer ma gratitude aux membres du jury : MM Didier Defer de l'université d'Artois et Rafik Belarbi de l'université de la Rochelle qui ont accepté de rapporter mon travail et dont le contenu de leurs rapports respectifs m'a énormément encouragé à donner le meilleur de moi-même pour la soutenance pendant une période de fin de thèse qui n'était pas facile. Mes remerciements vont également à Mme Samira Kherrouf, mon ingénieure référente ADEME, pour sa gentillesse et sa bienveillance pendant la réunion de renouvellement de contrat, à M. Moussa Gomina de l'université de Caen pour l'échange intéressant et les critiques constructives et de même à M.Christophe Lanos de l'université de Rennes1 qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider mon jury de thèse.

Cette thèse n'aurait pas été possible sans le soutien du personnel technique et administratif parmi lesquels je remercie Mmes Maryse Radin et Damaris Rossetti et tout particulièrement M Roger Coué avec qui j'ai le plus collaboré. Il a toujours cru en moi et m'a toujours aidé à mettre en place des dispositifs originaux et fonctionnels à partir d'idées initialement « farfelues ». La recette magique était un beau sourire, la bonne humeur et la persévérance.

Je souhaite exprimer mes remerciements à M Frédéric Jacquemin, le responsable de l'équipe EMM de m'avoir toujours aidée à trouver des créneaux souvent très longs pour utiliser certains dispositifs

expérimentaux et à Mme. Armelle Nouviaire du laboratoire Lasie pour la réalisation des essais d'isothermes de sorption avec la technique du Berlsorp.

Beaucoup de personnes ont œuvré pour le bon déroulement de ces années et ont fait de cette expérience, une expérience personnelle très riche et très belle. Merci pour toutes les personnes que j'ai croisées au département génie civil construction durable de l'IUT de Saint Nazaire et pour les docteurs et les futurs docteurs de mon équipe et de l'équipe E3M (appellation à jour). Certaines personnes m'ont particulièrement touchée par leur richesse humaine et leur vive sympathie. Mes pensées vont donc à Stéphanie Bonnet, Pascal Casari, Bernard Haurat et à mes collègues préférés Gêrôme Seguettes et Arnaud Pertuê.

Le laboratoire m'a fait aussi dêcouvrir des filles adorables qui sont devenues des amies trêes proches et que j'aime beaucoup : Loloê, Cécile, Marie-Josê, Maelle, Sabrina et Lêa.

Enfin, je suis extrêmement reconnaissante à toute ma famille, au sens le plus large qu'elle prend, à mes parents qui m'ont toujours inconditionnellement soutenue dans mon parcours universitaire, comme dans la vie, à mes frêres (Anis, Olivier et Azir), à mes petites sœurs (Ghada et Imène) et à mes tantes préférêes (Zahia et Fatma).

Je finirai en remerciant mon compagnon de vie qui me soutient au quotidien et ce n'est absolument pas rien.

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 : Consommations d'énergie en France en 2012 par secteur d'activité et émissions des gaz à effet de serre-----	6
Figure I. 2 : Répartition du parc résidentiel selon l'ancienneté (étude publiée en 2011 par l'INSEE) -----	7
Figure I. 3 : Distribution des pertes de chaleur dans une maison non isolée -----	8
Figure I. 4 : Principe de l'écoc conception et de l'analyse du cycle de vie-----	9
Figure I. 5 : Divers apports d'eau pour une paroi extérieure-----	11
Figure I. 6 : Mouvement d'eau provoquant un enrichissement en sels solubles du parement extérieur en pierre -----	11
Figure I. 7 : Développement de mousses et de lichens à la base d'un mur en tuffeau (château de Chambord) et des champignons sur des éprouvettes en béton de chanvre-----	14
Figure I. 8 : Carte du val de Loire, village de Montsoreau (49), hotel (44) et façade en tuffeau en pierre de taille-----	15
Figure I. 9 : Composition minéralogique du tuffeau donnée par Beck [7] -----	16
Figure I. 10 : Images acquises d'une zone de cœur du tuffeau blanc par (a) microscope électronique à balayage et (b) par microscopie optique [7]-----	17
Figure I. 11 : Seuil de porosité choisis [19] -----	18
Figure I. 12 : Représentation schématique des états hydriques d'un milieu poreux -----	19
Figure I. 13 : Isothermes de sorption obtenus par Chéné (à gauche) et par Beck (à droite) pour le tuffeau [7,16] -----	22
Figure I. 14: Surfaces cultivées de chanvre en hectare et domaines d'application de ses différents constitués-----	24
Figure I. 15: Chênevotte défibrée (a) et chènevotte fibrée (b) -----	25
Figure I. 16 : Quantité d'eau absorbée par la chènevotte (CP et CF) [24]-----	26
Figure I. 17 : Isothermes de sorption de la chènevotte à 20°C [25] -----	27
Figure I. 18 : Modèle bicomposite utilisé et valeurs numériques et expérimentales obtenues [2]-----	28

Figure I. 19 : Résultats typiques des essais de compression simple et cyclique sur des éprouvettes en chènevotte sèche [2]-----	28
Figure I. 20: Cycle de la chaux aérienne et hydraulique -----	29
Figure I. 21 : Interêts environnemental (énergie grise)-----	31
Figure I. 22 : Différentes applications du béton de chanvre -----	32
Figure I. 23 : Absorption capillaire des bétons de chanvre [33] -----	34
Figure I. 24 : Les isothermes d'adsorption et de désorption expérimentale et analytique du béton de chanvre [32]-----	36
Figure I. 25 : Variation de la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de l'humidité relative (a) [28] et de la teneur en eau (b) [37] -----	37
Figure I. 26 : Classification des matériaux suivant la capacité hydrique tampon [38] -----	38
Figure I. 27 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique-----	39
Figure I. 28 : Variation de la conductivité thermique des bétons de chanvre en fonction de la teneur en eau -----	40
Figure I. 29 : Variation de la chaleur massique en fonction de l'humidité relative [4]-----	41
Figure I. 30 : Résultats typiques des essais de compression simple sur des éprouvettes en béton de chnavre [30]-----	42
Figure I. 31 : Evolutions des humidités relatives et des températures à la surface intérieure de la paroi [41] -----	44
Figure I. 32 : Représentaion schématique de l'isotherme de sorption suivant le modèle mathématique de Huong [37]-----	45
Figure I. 33 : Comparaison entre les résultats du modèle avec et sans hystérésis à 12.5 mm (a, b) et à 25 mm (c, d). en termes d' humidité relative et de température [44] -----	46
Figure I. 34 : (a) Séquence d'humidité relative et de température imposée et (b) distributions d'humidité relative et de température par application de l'hystérésis et (c) par optimisation de la réponse numérique sur le modèle d'hystérésis [37] -----	47
Figure II. 1 : Microscope électronique à balayage ZEISS EVO® 40 -----	53
Figure II. 2 : Goniomètre Seifert XRD Calypso-----	54
Figure II. 3: Mesure de la porosité totale a) par pesées hydrostatiques [7] et b) par analyse visuelle [4]----	55

Figure II. 4 : Procédure (a) et dispositif de saturation et pesée hydrostatique (b) pour la détermination de la porosité accessible à l'eau -----	57
Figure II. 5: Descriptif d'un essai de porosité au mercure (appareil, pénétromètres et échantillons de béton de chanvre)-----	58
Figure II. 6 : Représentation schématique des courbes a) monomodale et b) bimodale obtenues par la méthode d'intrusion au mercure-----	58
Figure II. 7: Effet bouteille d'encre [59]-----	59
Figure II. 8 : Essai de remontée capillaire, schéma de principe (à gauche) et photos des échantillons de bdc - NHL en cours d'essai (à droite)-----	60
Figure II. 9 : Courbe de capillarité caractéristique a) d'un réseau homogène b) d'un réseau hétérogène. A et A' coefficients de prise de masse, B coefficient d'ascension de la frange capillaire, N_c porosité capillaire et N_{48} porosité libre [8]-----	61
Figure II. 10 : Belsorp aqua 3 : photo (à gauche) et principe de fonctionnement (à droite) -----	62
Figure II. 11: Photo d'une enceinte climatique utilisée pour la détermination de la courbe d'adsorption à 97% et 20°C -----	63
Figure II. 12: Dispositif d'essai utilisé pour déterminer la perméabilité à la vapeur d'eau : photo (à gauche) et schéma de principe (à droite)-----	65
Figure II. 13 : Dispositif expérimental utilisé pour la mesure des propriétés thermiques -----	68
Figure II. 14 : Principe de la méthode inverse [66]-----	71
Figure III. 1 : Lieu d'extraction du tuffeau étudié-----	75
Figure III. 2 : Images acquises d'une zone de cœur du tuffeau blanc par microscope électronique à balayage, (a) mica et (b) constituants majeurs de la pierre -----	76
Figure III. 3: Diffractogramme du tuffeau-----	76
Figure III. 4: Distribution de tailles des pores pour le tuffeau-----	77
Figure III. 5 : Courbe de prise de masse par remontée capillaire pour la pierre de tuffeau -----	78
Figure III. 6: Isotherme d'adsorption pour le tuffeau, comparaison des résultats obtenus par les deux techniques expérimentales utilisées et leur modélisation par le modèle de GAB -----	79
Figure III. 7 : Comparaison des isothermes d'adsorption obtenues par la technique des solutions salines saturées -----	80

Figure III. 8 : Variations moyennes des masses des coupelles pendant la période d'essai en fonction du gradient d'humidité relative imposé pour les éprouvettes de tuffeau-----	81
Figure III. 9 : Perméabilités à la vapeur d'eau , facteurs de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau et leurs écarts types pour les gradients d'humidité relative moyens de 62, 72,5 et 88, 5 % relatifs à la pierre de tuffeau. -----	82
Figure III. 10 : Résultats de la modélisation de la perméabilité à la vapeur d'eau-----	82
Figure III. 11 : Variation de la conductivité thermique et de la chaleur massique pour le tuffeau en fonction de la teneur en eau -----	83
Figure III. 12 : Aspect visuel des chaux utilisées pour la confection des bétons moulés-----	84
Figure III. 13 : Photo de la chènevotte utilisée a) en vrac, b) photo au MEB-----	86
Figure III. 14 : Photos des bétons de chanvre étudiés -----	87
Figure III. 15 : Aspect du béton de chanvre formulé à base de la PF 70-----	88
Figure III. 16: Eprouvettes utilisées pour les essais de caractérisation-----	89
Figure III. 17 : Vérification de l'homogénéité des éprouvettes en bétons moulés-----	90
Figure III. 18 : Distribution de tailles des pores pour les bétons de chanvre -----	92
Figure III. 19 : Courbes de capillarité pour les échantillons de bétons de chanvre : NHL et PF à gauche et préfabriqué à droite, courbe de prise de masse en lignes continues et d'ascension de frange capillaire en lignes interrompues.-----	93
Figure III. 20 : Photo d'un échantillon de bdc – préfabriqué testé -----	94
Figure III. 21 : Courbes de sorption obtenues par la technique du Belsorp aqua-3 pour les bétons de chanvre étudiés-----	95
Figure III. 22: Isothermes d'adsorption obtenues expérimentalement par la méthode gravimétrique (solutions salines saturées) et par la méthode volumétrique (Belsorp –aqua 3) et modélisation des résultats par le modèle de GAB-----	96
Figure III. 23 : Comparaison des résultats de la méthode des solutions salines saturées obtenus par des pesées régulières (marqueurs) aux résultats obtenus par prédiction de l'évolution exponentielle de la masse (lignes continues)-----	98
Figure III. 24: Comparaison des courbes d'adsorption à 20 °C obtenues par la technique des solutions salines saturées par suivi gravimétrique (marqueurs pleins) et par prédiction de l'évolution de la teneur en eau (marqueurs vides) -----	99
Figure III. 25 : Variations moyennes des masses des coupelles pendant la période d'essai en fonction du gradient d'humidité relative imposé pour les éprouvettes des bétons de chanvre -----	100

Figure III. 26 : Variation de la conductivité thermique et de la chaleur volumique en fonction de la teneur en eau massique pour les éprouvettes en béton de chanvre-----	102
Figure III. 27 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau massique pour les éprouvettes en béton de chanvre -----	103
Figure III. 28 : Diffusivités et effusivités thermiques des bétons de chanvre étudiées à des différentes ambiances d'humidité relatives-----	105
Figure IV. 1: Cellule biclimatique a) plans Auto CAD b) vue in-situ-----	109
Figure IV. 2 : Photo du principe de génération de température et d'humidité relative -----	110
Figure IV. 3: Détail d'étanchéité au niveau de l'emplacement de la paroi a) schéma de principe et b) photo in situ-----	110
Figure IV. 4 : Emplacement des sondes hygrothermiques dans la paroi et dans les ambiances-----	111
Figure IV. 5 : Comparaison des résultats obtenus pour la surface intérieure par la sonde Rotronic (sonde d'ambiance) et le thermocouple (sonde de contact) - cas d'une paroi simple en tuffeau --	112
Figure IV. 6 : Schéma de principe de calcul des coefficients d'échange surfacique-----	113
Figure IV. 7 : Températures enregistrées dans le cas d'étude d'une paroi en polystyrène extrudé-----	114
Figure IV. 8 : Parois simples en tuffeau et en bétons de chanvre testées en cellule biclimatique-----	115
Figure IV. 9 : Parois multicouches tuffeau/béton de chanvre-----	117
Figure IV. 10 : Conditions aux limites statique (à gauche) et cyclique (à droite) enregistrées dans le cas d'une paroi simple en bdc - préfa-----	118
Figure IV. 11 : Représentation des résultats a) températures et b) humidités relatives obtenus après lissage –cas d'une paroi simple en bdc-PF-----	120
Figure IV. 12 : Présentation schématique du déphasage temporel et du facteur d'amortissement [82] ---	122
Figure IV. 13 : Deux signaux qui pourraient s'apparenter à une impulsion de RADAR, au milieu le signal émis, et en haut le signal récupéré, l'inter corrélation entre le signal émis et le signal reçu n'est non-nul que lorsque le signal reçu ressemble au signal émis. Le maximum d'inter corrélation, par exemple identifié ici comme maximum de l'enveloppe de l'inter corrélation (valeur absolue) indique le retard (ou temps de vol) entre impulsion émise et reçue [87]-	125
Figure IV. 14 : Présentation des différentes étapes de calcul a) du facteur d'amortissement thermique et b) du déphasage temporel thermique avec la méthode d'inter corrélation-----	126
Figure IV. 15 : Sensibilité a)des facteurs d'amortissement et b) des déphasages thermiques et hydriques au nombre de période choisi ($T=24h$) -----	127

Figure IV. 16 : Evolution des champs de température et d'humidité relative dans une paroi simple en tuffeau soumise à des sollicitations réelles statiques et extraction des Profils de température aux surfaces et au centre de la paroi.-----	128
Figure IV. 17 : Evolution des champs de température et d'humidité relative dans les parois simples en bétons de chanvre soumises à des sollicitations réelles statique-----	131
Figure IV. 18 : Evolution des champs de pression de vapeur dans les parois simples en tuffeau et en bétons de chanvre soumises à des sollicitations réelles statique-----	132
Figure IV. 19 : Evolution des temps de stabilisation thermique pour les parois simples-----	133
Figure IV. 20 : Evolution des champs de température et d'humidité relative dans les parois simples en tuffeau et en bétons de chanvre soumises à des sollicitations cycliques en températures extérieures-----	135
Figure IV. 21 : Evolution des champs de pression de vapeur dans les parois simples en tuffeau et en bétons de chanvre soumises à des sollicitations réelles cycliques en températures extérieures -----	136
Figure IV. 22 : Facteurs d'amortissement thermiques (a) et hydriques (b) journaliers déterminés par la méthode d'Asan et al. pour des parois simples sollicitées en régime cyclique en températures extérieures-----	137
Figure IV. 23 : Facteurs d'amortissement thermique des parois simples sollicitées en régime cyclique en température extérieure pour les premières harmoniques de la décomposition -----	139
Figure IV. 24 : Déphasages temporels thermiques des parois simples sollicitées en régime cyclique en température extérieure pour les premières harmoniques de la décomposition -----	141
Figure IV. 25 : Comparaison des facteurs d'amortissement thermique (à gauche) et hydrique (à droite) obtenus pour les parois simples étudiées-----	141
Figure IV. 26 : Comparaison des facteurs d'amortissement thermique (à gauche) et hydrique (à droite) obtenus pour les parois simples étudiées-----	142
Figure IV. 27 : Evolution des champs de température et d'humidité relative dans les parois multicouches soumises à des sollicitations statiques -----	144
Figure IV. 28 : Evolution des champs de pression de vapeur dans les parois multicouches soumises à des sollicitations statiques -----	145
Figure IV. 29 : Evolution des temps de stabilisation thermique pour les parois multicouches -----	146
Figure IV. 30 : Evolution des champs de température et d'humidité relative dans les parois multicouches soumises à des sollicitations cycliques en températures extérieures -----	147

Figure IV. 31 : Evolution des champs de pression de vapeur dans les parois multicouches soumises à des sollicitations cycliques en températures extérieures -----	148
Figure IV. 32 : Facteurs d'amortissement thermiques (a) et hydriques (b) déterminés par la méthode d'Asan et al. pour différents jours et pour des parois multicouches sollicitées en régime cyclique en température extérieure -----	150
Figure IV. 33 : Facteurs d'amortissement thermique pour les 10 premières harmoniques retenues pour les parois multicouches sollicitées en régime cyclique en température extérieure -----	151
Figure IV. 34 : Déphasages thermiques pour les 10 premières harmoniques retenues pour les parois multicouches sollicitées en régime cyclique en température extérieure -----	153
Figure IV. 35 : Comparaison des facteurs d'amortissement thermiques (à gauche) et hydriques (à droite) obtenus pour les parois multicouches étudiées -----	154
Figure IV. 36 : Comparaison des déphasages thermiques (à gauche) et hydriques (à droite) obtenus pour les parois multicouches étudiées -----	154
Figure V. 1 : Organigramme du modèle de WUFI [54] -----	158
Figure V. 2 : Bilan radiatif explicite à la surface extérieure de la paroi [93]-----	167
Figure V. 3 : Schéma de la paroi testée pour l'analyse de sensibilité-----	168
Figure V. 4 : Représentation du diagramme de Tuckey -----	169
Figure V. 5 : Présentation de l'évolution du champ de teneur en eau pour une paroi de tuffeau de 80mm -----	171
Figure V. 6 : Evolutions temporelles des profils de ϕ , T et w pour a) l'isotherme de sorption et b) coefficient -----	172
Figure V. 7 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le profil de température pendant la phase transitoire a) effet de h_i et b) effet de tous les paramètres de simulation -----	173
Figure V. 8 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le profil de teneur en eau pendant la phase transitoire a) effet de l'isotherme d'adsorption et b) effet de tous les paramètres de simulation -----	174
Figure V. 9 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le profil d'humidité relative pendant la phase transitoire a) effet de l'isotherme d'adsorption et b) effet de tous les paramètres de simulation -----	175
Figure V. 10 : Présentation de l'évolution du champ de teneur en eau pour une paroi de tuffeau de 80mm -----	177

Figure V. 11 : Evolutions temporelles des humidités et de la température pour une paroi simple en béton de chanvre a) isotherme d'adsorption et b) coefficient h_i -----	178
Figure V. 12 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le profil de teneur en eau pendant la phase transitoire a) effet de l'isotherme d'adsorption et b) effet de tous les paramètres de simulation -----	180
Figure V. 13 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le profil d'humidité relative pendant la phase transitoire a) effet de l'isotherme d'adsorption ; b) effet de tous les paramètres de simulation -----	181
Figure V. 14 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le profil de température pendant la phase transitoire a) effet de h_i et b) effet de tous les paramètres de simulation-----	182
Figure V. 15 : Variations des pentes des isothermes d'adsorption aux surfaces des parois simples étudiées a) surfaces intérieures et b) surfaces extérieures -----	184
Figure V. 16 : Variations temporelles des champs de T, Hr, w et Pv (lignes continues) (a) et température de rosée et pression de vapeur saturante (lignes discontinues) (b)-----	186
Figure V. 17 : Sensibilité du champ de teneur en eau à la conductivité thermique sèche -----	187
Figure V. 18 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le champ de teneur en eau a) isothermes d'adsorption et b) conductivités thermiques -----	188
Figure V. 19 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le champ de température a) isothermes d'adsorption et b) conductivités thermiques -----	189
Figure V. 20 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le champ de température pour des conductivités thermiques prises constantes -----	190
Figure V. 21 : Détermination de la teneur en eau libre w_f pour les parois en tuffeau et en bdc-NHL-----	191
Figure V. 22 : Comparaison des évolutions temporelle des champs de température entre les résultats expérimentaux (lignes continues) et les résultats obtenues par simulations (lignes interrompues)-----	193
Figure V. 23 : Comparaison des évolutions temporelles des champs de l'humidité relative entre les résultats expérimentaux (lignes continues) et les résultats obtenus par simulations (lignes interrompues)-----	194
Figure V. 24 : Comparaison des évolutions temporelle des champs de température entre les résultats expérimentaux (lignes continues) et les résultats obtenues par simulations (lignes interrompues)-----	195

Figure V. 25 : Comparaison des évolutions temporelles des champs de l'humidité relative entre les résultats expérimentaux (lignes continues) et les résultats obtenus par simulations (lignes interrompues)-----	196
Figure V. 26 : Comparaison entre les propriétés dynamiques expérimentales et numériques obtenues par application de la méthode d'inter corrélation -----	197
Figure V. 27 : Constituants des parois multicouches [101]-----	198
Figure V. 28 : Conditions extérieures-----	200
Figure V. 29 : Variation temporelle des champs de T, Hr et Pv pour les différentes configurations III retenues-----	201
Figure V. 30 : Profils temporels des surfaces intérieures des parois entre 500 et 600h-----	202
Figure V. 31 : Profils temporels de la teneur en eau aux surfaces intérieures des parois entre 500h et 600 h -----	202
Figure V. 32 : Facteurs d'amortissement thermiques et hydriques et déphasages thermiques des configurations testées-----	203

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1 : Paramètres influençant la biodiversité d'une pierre [5] -----	13
Tableau I. 2 : Masses volumiques et porosités du tuffeau -----	18
Tableau I. 3 : Coefficients visuels et massiques d'imbibition de quelques roches sédimentaires-----	21
Tableau I. 4 : Diamètres capillaires équivalents-----	21
Tableau I. 5 : La classification ISRM des roches basées sur la résistance à la compression uniaxiale-----	23
Tableau I. 6 : Composition volumique d' 1m ³ de chènevotte pure -----	26
Tableau I. 7 : Chaux utilisées pour la confection des bétons de chanvre-----	30
Tableau I. 8 : Quantités pour fabriquer un 1 m ³ de béton de chanvre [23]-----	32
Tableau I. 9: Facteurs de résistance à la diffusion de vapeur du béton de chanvre (HR de 0-50%)-----	36
Tableau I. 10 : Mesures du CEBTP du coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau sur différentes formulations de béton de chanvre -----	37
Tableau I. 11 : Conductivités thermiques du béton de chanvre sec -----	39
Tableau I. 12 : Chaleurs massiques du béton de chanvre sec -----	40
Tableau I. 13 : Caractéristiques mécaniques du béton de chanvre pour dosages en liants pour une application Mur -----	42
Tableau II. 1 : Solutions salines utilisées pour la détermination de l'isotherme d'adsorption par suivi gravimétrique -----	62
Tableau II. 2 : Pressions de vapeur utilisées pour la détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux étudiés -----	65
Tableau II. 3 : Grandeurs thermo physiques du papier résistif TELEDELTO [65]-----	67
Tableau III. 1 : Résultats des porosités et de la teneur en eau maximale pour le tuffeau-----	77
Tableau III. 2 : Coefficients de Washburn calculés pour le tuffeau-----	79
Tableau III. 3: Paramètres du modèle de GAB pour le tuffeau -----	80
Tableau III. 4 : Paramètres de GAB de l'isotherme d'adsorption retenue pour la pierre de tuffeau-----	81

Tableau III. 5 : Composition des chaux utilisées pour les bétons de chanvre moulés -----	85
Tableau III. 6 : Composition chimique et principales propriétés des chaux utilisées pour les bétons de chanvre moulés -----	85
Tableau III. 7 : Application utilisée et quantités nécessaires pour 1m ³ de béton de chanvre moulé et préfabriqué-----	86
Tableau III. 8 : Masses volumiques apparentes mesurées à 400 j des bétons de chanvre étudiés conservés à 20°C et 50% d'humidité relative-----	90
Tableau III. 9 : Résultats de la porosité totale et de la teneur en eau maximale pour les bétons de chanvre moulés et préfabriqué-----	91
Tableau III. 10 : Résultats des porosités des bétons de chanvre par intrusion au mercure -----	91
Tableau III. 11 : Données moyennes des coefficients caractéristiques de l'absorption par capillarité-----	93
Tableau III. 12 : Paramètres du modèle de GAB pour les bétons de chanvre – méthode volumétrique --	97
Tableau III. 13 : Paramètres du modèle de GAB pour les bétons de chanvre – méthode gravimétrique--	97
Tableau III. 14 : Paramètres du modèle de GAB pour les bétons de chanvre – méthode gravimétrique avec prédiction des masses $m_{\infty, \varphi}$ -----	99
Tableau III. 15 : Perméabilités et facteurs de résistances moyennes à la vapeur d'eau à 62 % d'humidité relative pour les bétons de chanvre étudiés et les écarts types correspondants -----	100
Tableau III. 16 : Comparaison des conductivités thermiques mesurées et prédites pour une ambiance de 50% d'humidité relatives -----	104
Tableau III. 17 : Comparaison des conductivités thermiques mesurées et prédites pour une ambiance de 85% d'humidité relatives -----	104
Tableau III. 18: Comparaison des chaleurs volumiques [MJ/m ³ .K] mesurées pour des différentes ambiances d'humidité relatives-----	104
Tableau IV. 1 : Propriétés du polystyrène extrudé utilisé-----	113
Tableau IV. 2 : Coefficients d'échange convectif calculés -----	114
Tableau IV. 3 : Épaisseurs des parois simples testées -----	114
Tableau IV. 4 : Poids des voisins de x [79] -----	119
Tableau IV. 5 : Gradient de température moyen aux bornes de la paroi en béton de chanvre-----	129
Tableau IV. 6 : Facteurs d'amortissement thermiques déterminés par la norme NF EN ISO 13786 pour des parois simples sollicitées en températures extérieures cycliques-----	137

Tableau IV. 7 : Facteurs d'amortissement thermiques et hydriques déterminés par la méthode d'intercorrélacion pour des parois simples sollicitées en températures extérieures cycliques -----	138
Tableau IV. 8 : Facteurs d'amortissement thermiques des parois simples sollicitées en températures extérieures cycliques pour la fondamentale ($T=24h$) -----	139
Tableau IV. 9 : Déphasages temporels thermiques déterminés par la norme NF EN ISO 13786 et appliqués sur des parois simples sollicitées en températures extérieures cycliques -----	139
Tableau IV. 10 : Déphasages temporels thermiques et hydriques déterminés par la méthode d'Asan et al. pour des parois simples sollicitées en températures extérieures cycliques-----	140
Tableau IV. 11 : Déphasages temporels thermiques et hydriques déterminés par la méthode d'inter corrélacion pour des parois simples sollicitées en températures extérieures cycliques ---	140
Tableau IV. 12 : Déphasages temporels thermiques et hydriques déterminés pour la fondamentale ($T=24h$) pour les parois simples sollicitées en températures extérieures cycliques-----	141
Tableau IV. 13 : Facteurs d'amortissement thermiques déterminés suivant la norme NF EN ISO 13786 pour les parois multicouches sollicitées en température extérieure cyclique-----	149
Tableau IV. 14 : Facteurs d'amortissement moyens thermiques et hydriques des parois multicouches sollicitées en température extérieure cyclique -----	150
Tableau IV. 15 : Facteurs d'amortissement thermiques pour la fondamentale ($T=24h$) des parois multicouches sollicitées en température extérieure cyclique -----	151
Tableau IV. 16 : Déphasages temporels thermiques calculés suivant la norme NF EN ISO 13786 pour des parois multicouches sollicitées en température extérieure cyclique-----	151
Tableau IV. 17 : Déphasages temporels moyens thermiques et hydriques des parois multicouches sollicitées en température extérieure cyclique -----	152
Tableau IV. 18 : Déphasages temporels moyens thermiques et hydriques déterminés par la méthode d'inter corrélacion appliquée sur les parois multicouches sollicitées en température extérieure cyclique-----	152
Tableau IV. 19 : Déphasages temporels moyens thermiques et hydriques déterminés pour la fondamentale ($T=24h$) des parois multicouches sollicitées en température extérieure cyclique -----	153
Tableau V. 1 : Variations des paramètres pour l'analyse de sensibilité -----	167
Tableau V. 2 : Les propriétés de la pierre de tuffeau utilisée pour l'analyse de sensibilité-----	170
Tableau V. 3 : Influence des paramètres sur le champ de température -----	176

Tableau V. 4 : Influence des paramètres sur le champ de teneur en eau-----	176
Tableau V. 5 : Les propriétés du béton de chanvre utilisées pour l'analyse de sensibilité [4]-----	177
Tableau V. 6 : Influence des paramètres sur le champ de température -----	183
Tableau V. 7 : Influence des paramètres sur le champ de teneur en eau-----	183
Tableau V. 8 . Variations des humidités relatives et des teneurs en eau aux surfaces des parois simples étudiées -----	184
Tableau V. 9 : Schéma de l'étude de sensibilité pour un paramètre X – cas d'une paroi tuffeau/béton de chanvre -----	186
Tableau V. 10 : Les propriétés de la paroi en tuffeau et en bdc -NHL -----	191
Tableau V. 11 : Propriétés thermophysiques des matériaux étudiés-----	199
Tableau V. 12 : Résistance de conduction des parois testées -----	199

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La demande d'énergie augmente dans le monde entier en raison de la croissance démographique et l'amélioration du niveau de vie. En France, Le secteur du bâtiment est un secteur énergivore responsable de 43% de la consommation totale d'énergie finale. Cette énergie entraîne annuellement l'émission de 120 millions de tonnes de CO₂ représentant 25 % des émissions totales.

Le secteur du bâtiment doit œuvrer à une conversion de ses pratiques constructives pour améliorer la performance énergétique des bâtiments neufs et existants mais également pour proposer des matériaux innovants qui répondent aux nouvelles exigences des utilisateurs et des législations en termes d'impact environnemental et sanitaire et de confort [1]

La réalisation du confort thermique dans les bâtiments représente le principal poste de consommation (chauffage et dans une moindre mesure climatisation). En particulier le parc résidentiel comporte près de 2/3 de bâtiments construits avant 1975 et sont donc thermiquement peu efficaces et par conséquent consommateurs d'énergie. L'isolation thermique de ces bâtiments anciens représente un enjeu stratégique dans la réduction des consommations du secteur du bâtiment.

Dans ce contexte, les professionnels s'interrogent sur l'isolation des bâtiments en tuffeau de la vallée de la Loire. Ceux-ci présentent un intérêt architectural qu'il convient de préserver et des techniques d'isolation par l'intérieur doivent être privilégiées. Or, le tuffeau est une pierre calcaire très poreuse (43%) sujette à des transferts d'humidité importants et une technique d'isolation mal choisie peut entraîner des désordres hydriques préjudiciables à la pérennité de la paroi.

Cette thèse financée par l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) et l'Université de Nantes a principalement pour objectif d'étudier la performance hygrothermique des parois en tuffeau isolées avec du béton de chanvre.

Le béton de chanvre est un nouveau matériau (depuis le début des années 90) qui est obtenu par un mélange de la chènevotte, d'un liant (principalement de la chaux) et d'eau. Le choix du béton de chanvre est effectué grâce à son potentiel environnemental et hygrothermique. En effet, l'analyse du cycle de vie des bétons de chanvre montre que leur impact sur l'effet de serre est faible et que la production agricole du chanvre demande peu d'intrants fossiles et s'insère bien dans les systèmes de production agricole¹. Le choix du chanvre tient également à ses qualités thermiques et hydriques qui contribuent au confort des usagers, comme ça été souligné par de nombreuses études [2–4].

¹ <http://agriculture.gouv.fr/etude-des-caracteristiques>

Ce mémoire s'organise en cinq parties.

La première partie est consacrée à l'analyse bibliographique du contexte environnemental et énergétique actuel. L'amélioration des performances énergétiques du bâti ancien en pierre de tuffeau réside principalement dans le choix des matériaux d'isolation. L'enjeu est donc de rénover ces édifices d'intérêt architectural de manière à protéger leur spécificité culturelle d'une part et de respecter les objectifs du développement durable d'autre part. Le béton à base de chanvre semble présenter des propriétés hygrothermiques compatibles avec le tuffeau, qu'il s'agit de vérifier. Les techniques d'isolation thermiques par l'intérieur sont privilégiées basées sur l'application du béton de chanvre par voie sèche et par voie humide.

Dans la deuxième partie, nous présentons les méthodes expérimentales utilisées pour caractériser les matériaux étudiés. Il s'agit du tuffeau et de trois (3) bétons de chanvre dont un (1) est préfabriqué et commercialisé par *Chanvribat* et deux (2) sont moulés en laboratoire en utilisant deux chaux différentes la *Saint Astier NHL 3,5* et la *Tradical PF70*. Une attention particulière est portée sur la mesure des isothermes de sorption, car cette propriété intrinsèque est un paramètre clé qui conditionne la réponse hygrothermique des parois qu'elles soient simples ou multicouches.

Les résultats expérimentaux relatifs à la caractérisation des matériaux du point de vue physique, hydrique et thermique sont rassemblés dans la troisième partie. Nous avons mesuré *via* des essais normalisés les propriétés de transfert hydrique telles que les isothermes de sorption, la perméabilité à la vapeur d'eau et le coefficient de prise de masse par imbibition. La conductivité et la capacité calorifique de nos matériaux sont mesurées selon l'état hydrique et elles sont obtenues à partir de la technique du film chaud développée au sein de l'institut de recherche en génie civil et mécanique (GeM UMR CNRS 6183).

La quatrième partie est dédiée à la description de la cellule bi climatique développée pour la thèse afin d'étudier l'évolution spatio-temporelle de la température et l'humidité relative dans les parois simples et dans les parois en tuffeau isolées avec du béton de chanvre. Cette cellule est composée de deux compartiments permettant d'imposer des conditions réelles statiques et cycliques de part et d'autre de la paroi testée. Lorsque le régime est statique, les temps de stabilisation de chaque paroi sont calculés. Lorsqu'il s'agit d'un régime cyclique en température extérieure (un gradient de 10°C), les facteurs d'amortissement et les déphasages temporels thermiques et hydriques sont calculés suivant quatre méthodes, la norme *NF EN ISO 13786*, la méthode d'*Asan et al* [5], la méthode d'inter corrélation et la méthode de décomposition en série de *Fourier*. Une analyse croisée de ces résultats est réalisée afin de mettre en évidence les correspondances existant entre les phénomènes de transfert pris en compte dans les méthodes et les propriétés dynamiques de la paroi.

L'accent est mis dans la cinquième partie sur le modèle de *Künzel*, implémenté dans le logiciel de simulation bidimensionnel des transferts couplés en milieux poreux, *WUFI*.

Nous présentons en détails les hypothèses de calcul et de résolution des équations de conservation de masse et d'énergie. Nous nous intéressons également à l'analyse de sensibilité des champs de sortie du modèle (température, humidité relative et teneur en eau) à l'incertitude des données d'entrée. Ces dernières sont parfois difficiles à mesurer ou au moins leurs valeurs sont entachées d'incertitude.

Ensuite, les parois simples en tuffeau en béton de chanvre et les parois tuffeau/béton de chanvre sont étudiées de point de vue numérique et les résultats sont comparés aux résultats expérimentaux. L'étude numérique des techniques d'isolation du bâti ancien en tuffeau s'étend à l'étude des configurations proposées par le parc national *Loire Anjou Touraine* dans le cadre du projet « *Un bâti en tuffeau pour aujourd'hui et demain* » en conditions météorologiques hivernales enregistrées pour la ville d'Angers.

I. ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans ce chapitre, nous proposons de faire un état de l'art concernant tout d'abord les enjeux du développement durable en Génie Civil. Le contexte environnemental de cette étude sera présenté ainsi que la problématique des impacts environnementaux liés à la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment. Enfin, nous définirons la notion d'éco matériaux, matériaux de construction émergents qui répondent aux nouvelles attentes des utilisateurs.

Dans un deuxième temps, nous présenterons les résultats des travaux antérieurs réalisés sur le tuffeau et les bétons de chanvre. Le point sera fait sur les potentiels de développement, les méthodes de production et les propriétés de ce nouveau matériau.

Enfin, la troisième partie sera constituée d'un état de l'art sur les modèles couplés de transferts de masse et de chaleur. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous rappellerons les idées clés des paragraphes précédents et présenterons l'organisation de nos travaux qui en découle.

I.1. Le secteur du bâtiment face aux enjeux environnementaux

I.1.1. Contexte environnemental et énergétique

Depuis quelques dizaines d'années, les pouvoirs publics, les acteurs économiques et la société civile prennent conscience des conséquences défavorables des activités humaines sur l'environnement et de la nécessité de réduire, de manière urgente, ces impacts. Ce qui explique aujourd'hui les incitations et les obligations à l'échelle internationale pour intégrer aux projets une démarche de développement durable dans les domaines de l'industrie, de l'énergie, des transports et de la construction. La maîtrise de la consommation d'énergie est par conséquent un enjeu majeur de la transition énergétique.

En France, le secteur de la construction est responsable de 43% des consommations d'énergie, bien plus que les transports (32%) ou l'industrie (23%). De plus, la consommation énergétique du secteur résidentiel - tertiaire est responsable de 17 % des émissions nationales de gaz à effet de serre (GES) suivant des études réalisées par l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME).

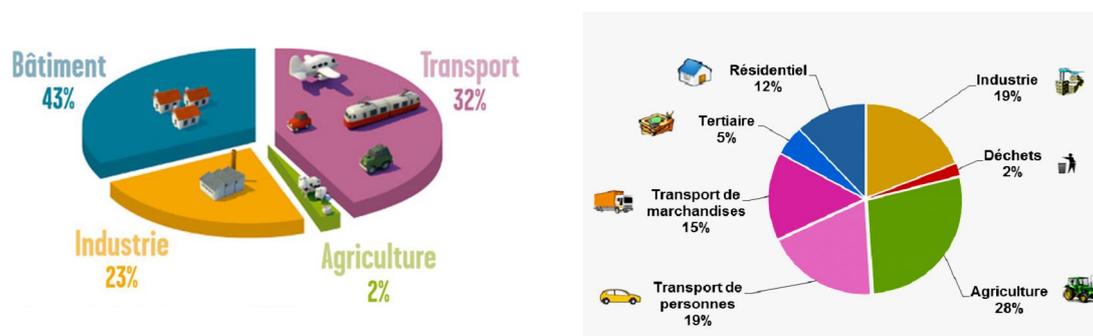


Figure I.1 : Consommations d'énergie en France en 2012 par secteur d'activité² et émissions des gaz à effet de serre³

Face à ce défi majeur, l'état français a présenté ses engagements et contributions dans la lutte contre le réchauffement climatique en signant le *protocole de Kyoto*, entré en application depuis le mois de février 2005 et en établissant le *Plan Climat* en 2004 (chapitre dédié au *Bâtiment et éco-habitat*). La France s'engage à diviser par 4 les émissions de GES d'ici 2050.

D'autres dispositifs réglementaires sont également mis en œuvre comme les réglementations thermiques, la loi de simplification et le Grenelle de l'environnement. Ce dernier lancé en 2007 consacre 3 comités au secteur du bâtiment et propose de réduire la consommation des logements neufs à moins de 50 kWh/m².an, afin d'arriver, en 2020, à tous les logements neufs passifs voire à énergie positive.

Récemment, le ministère en charge de l'écologie et de l'énergie a remis le 24 avril 2013 à la commission européenne son plan national d'action⁴ et l'objectif fixé est une réduction de 20 % de la consommation d'énergie d'ici 2020.

² <http://www.enerstetik.fr/enjeux>

³ <http://www.aredpc.com>

⁴ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-France-remet-son-plan-d-action>

Pour le secteur du bâtiment, le plan d'investissement prévoit la rénovation de 500 000 logements par an d'ici 2017. Cet effort sur l'existant est une vision récente. Elle est affirmée par le Grenelle de l'environnement et s'est concrétisée par des objectifs forts dans la loi n° 2009-967 du 3 août 2009.

Pourquoi s'intéresser désormais au parc immobilier existant et quels sont les objectifs des politiques énergétiques de rénovation ?

I.1.2. Enjeux de la réhabilitation thermique dans l'existant

Les bâtiments existants constituent l'essentiel du parc résidentiel et tertiaire (Figure I. 2). En effet, la majeure partie du parc immobilier à l'horizon 2050 est aujourd'hui déjà construite, vu le faible flux de construction neuve (1 à 2%) et la durée de vie des bâtiments.

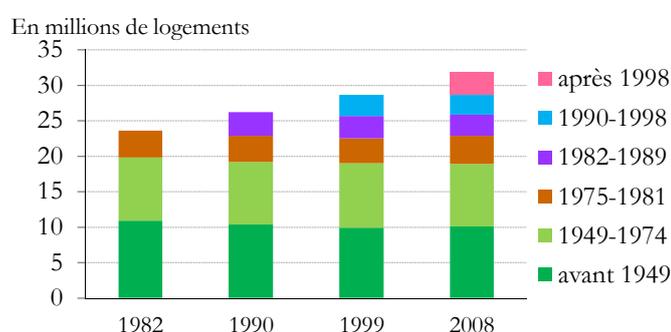


Figure I. 2 : Répartition du parc résidentiel selon l'ancienneté (étude publiée en 2011 par l'INSEE⁵)

Les secteurs résidentiel et tertiaire sont au cœur des mesures phares du plan d'action. L'effort de réduction des consommations énergétiques des bâtiments doit se porter sur la rénovation du parc existant afin de réduire de 38% la consommation d'énergie d'ici 2020.

Pour cela l'état attribue des aides ou primes financées par le fonds de garantie pour la rénovation des bâtiments existants afin de faciliter l'accompagnement des ménages dans leurs démarches d'audit et leurs projets de travaux. Il s'appuie également sur les dispositifs fiscaux : crédits d'impôts développement durable (CIDD), éco-prêt à taux zéro (Eco-PTZ), éco-prêt logement social (Eco-PLS) qui devraient générer au total des économies de l'ordre de 2,1 à 2,3 Mtep (millions de tonnes équivalent pétrole).

Au sein des bâtiments, le chauffage constitue la principale dépense énergétique. Il représente 65% de l'énergie finale consommée dans les résidences principales. Le besoin en chauffage dépend de plusieurs paramètres parmi lesquels nous citons la situation géographique, l'architecture (maison individuelle ou immeuble), l'âge et les performances de l'enveloppe (présence d'isolation, vitrage performant, etc).

Afin de répondre à cette problématique complexe trois leviers d'actions complémentaires sont nécessaires ⁶ :

⁵ Institut national de la statistique et des études économiques

⁶ http://www.schneider-electric.fr/sites/france/fr/solutions/energy_efficiency/efficacite-energetique

- **Les mesures d'efficacité énergétique passives** : elles concernent le bâti, c'est-à-dire l'enveloppe du bâtiment. Elles évitent les déperditions en renforçant la performance technique du bâtiment (isolation, parois vitrées...)
- **Les solutions d'efficacité énergétique actives** : elles agissent sur l'exploitation et l'optimisation des flux énergétiques via l'utilisation d'appareils performants et de systèmes intelligents de mesure, de contrôle et de régulation
- **La sensibilisation des utilisateurs à leur empreinte environnementale** : l'information et la formation de chacun d'entre nous aux gestes éco-responsables est indispensable

En conclusion, le patrimoine ancien est énergivore et nécessite des interventions permettant de réduire ses dépenses en énergie et d'assurer sa pérennité. Une étape est donc primordiale et elle consiste à isoler les murs (Figure I. 3) de ces bâtis par des matériaux qui respectent le comportement thermo hydrique du support d'origine et qui s'inscrivent dans la démarche de qualité environnementale.



Figure I. 3 : Distribution des pertes de chaleur dans une maison non isolée⁷

I.2. Eco-conception et éco matériau

I.2.1. Principe de l'éco conception

Le secteur du bâtiment se trouve aujourd'hui face à une nécessité de rénover ses pratiques et méthodes de conception afin de prendre en compte les facteurs environnementaux devenus cruciaux. L'éco conception est par conséquent l'approche à adopter car elle intègre la logique du cycle de vie du produit (Figure I. 4). En effet, elle permet d'évaluer un produit en tenant en compte d'un critère environnemental prépondérant vis-à-vis des critères de la conception classique (exigences, qualité, prix, technique).

L'éco conception repose sur :

- **Des critères économiques** : la somme des coûts d'investissement, de fonctionnement et de maintenance ainsi que son traitement en fin de vie : c'est l'analyse en coût global.

⁷ <http://www.agglo-carene.fr>

- **Des critères environnementaux** : la consommation de matières premières renouvelables ou non, locales ou acheminées sur de plus ou moins longues distances, l'énergie grise des matériaux, l'émission de polluants et/ou de gaz à effet de serre, etc.
- **Des critères liés aux confort** : hygrothermique, acoustique et visuel
- **Des critères sanitaires** : durant les phases de construction et d'exploitation, la conception du produit doit garantir un environnement sain et sans danger pour ses usagers

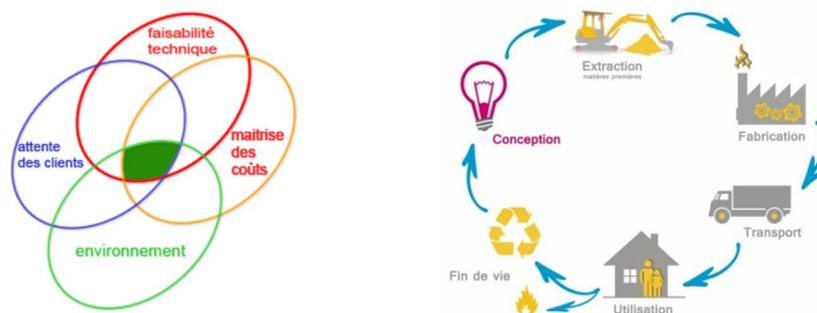


Figure I. 4 : Principe de l'écoc conception et de l'analyse du cycle de vie

Eco-construire ou éco-rénover équivaut aujourd'hui à atteindre une haute performance sur plusieurs cibles touchant à l'environnement, au confort et la santé des occupants d'un bâtiment.

I.2.2. Eco matériaux

L'éco matériau doit répondre aux critères de l'éco-conception [1,6], c'est-à-dire :

- Limiter les impacts environnementaux durant tout son cycle de vie
- Procurer des conditions de confort aux occupants du bâtiment pendant son exploitation
- Ne pas présenter de danger pour la santé tant pendant la phase de mise en œuvre que d'utilisation du bâtiment

La France a pris conscience de l'intérêt de ces matériaux appelés également *matériaux écologiques* ou *matériaux biosourcés* et parfois aussi qualifiés de *matériau sain* et vise depuis quelques années à valoriser l'emploi de ces matériaux. Le label *bâtiment biosourcé* est créé à cet effet par décret n°2012-518 du 19 avril 2012, pour les bâtiments comportant un taux minimal de matériaux biosourcés. Un arrêté ministériel du 23 décembre 2012 a ensuite précisé les conditions d'attribution et les exigences de ce label qui comporte 3 niveaux correspondant au taux de matériau biosourcé, évalué en kg/m² de surface de plancher. Les exigences diffèrent donc selon qu'il s'agisse de maisons individuelles, de locaux industriels et autres (habitats collectifs, bureaux, commerces, lieux d'enseignement, etc.) et sont les suivants :

- **Niveau 1** : les taux sont compris entre 9 et 42 kg/m² de matériaux biosourcés (avec au moins 2 produits biosourcés remplissant des fonctions différentes)

- **Niveau 2** : les taux sont compris entre 12 et 63 kg/m²
- **Niveau 3** : les taux sont compris entre 18 à 84 kg/m² (avec, comme pour le niveau 2, au moins deux produits appartenant à deux familles différentes)

Les éco matériaux auront comme composants principaux bruts ou transformés des produits d'origine naturelle issus du sol (argile) de la sylviculture (bois, liège), de l'agriculture et de l'élevage (chanvre, lin, paille, laine, etc.). Mais d'autres produits, issus du recyclage, sont maintenant utilisés en construction écologique. Le plus connu d'entre eux est la ouate de cellulose (journaux et papier).

I.3. Mécanismes de dégradation

Le vieillissement des matériaux est un phénomène naturel et inéluctable. L'augmentation de la pollution atmosphérique, favorisée par l'activité humaine, accentue l'ampleur des altérations rencontrées [7]. Mais il y a aussi des pathologies rencontrées à cause d'une solution d'isolation inadéquate. Un manque de précaution dans l'utilisation de matériaux d'isolation qui peuvent se révéler par la suite néfastes et incompatibles avec les matériaux originels. Ces altérations quelle que soit leur origine prennent des formes variées et classées en 5 grandes catégories (dans lesquelles sont classées plus de 70 altérations différentes) [8] :

- Fissures et déformation (fracture, clivage...)
- Détachement (boursoufflement, éclatement, délitage, désagrégation, fragmentation, pelage, desquamation)
- Fissures induites par des pertes de matière (alvéolisation, érosion, dégât mécanique, micro karst, partie manquante, perforation)
- Altération chromatique et dépôt (croûte, efflorescence, encroûtement, aspect luisant, graffiti, patine, encrassement)
- Colonisation biologique (algue, lichen, mousse, moisissure)

I.3.1. Rôle de l'eau

L'eau est le vecteur principal de ces altérations et elle agit de manière directe ou indirecte lorsqu'elle sert à transporter un autre composé actif, provenant du voisinage ou de la pollution (Figure I. 5 et Figure I. 6).

I.3.1.1. Action directe

L'action chimique de l'eau se fait toujours par l'intermédiaire d'une interface de contact. Il faut donc qu'un accès à la surface de l'objet cible lui soit autorisé. Il existe deux familles de surfaces : l'une extérieure et l'autre infiniment plus grande due à la porosité ; ces deux types de surfaces ne sont pas comparables.

En effet, l'eau qui accède à la surface extérieure est une eau courante (ruissellement) ou de l'eau battante (pluie). Elle ne séjourne pas et ne se fixe pas sur cette surface. On parle généralement d'eau libre qui permet le transport de matière (solide ou dissoute) vers un lieu différent.



- ① Ruissellement sur la face verticale
- ② L'eau traverse la couche végétale riche en humus et les sols adjacents
- ③ Action ascendante amorcée par l'eau à travers la pierre et les joints
- ④ L'eau descend par gravité
- ⑤ Zone d'humidité constante renouvelée
- ⑥ Transfert de vapeur d'eau à travers la paroi

Figure I. 5 : Divers apports d'eau pour une paroi extérieure

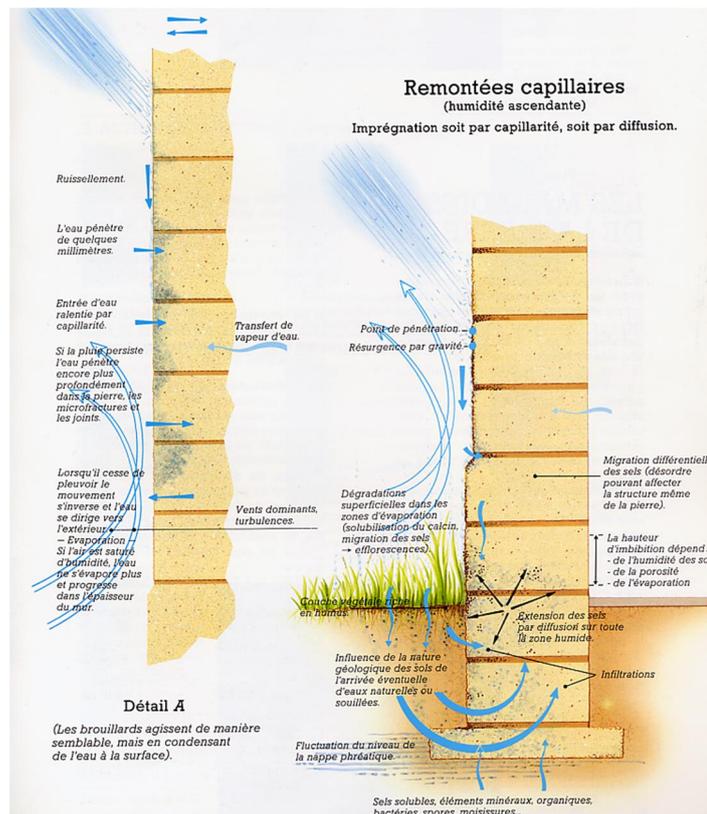


Figure I. 6 : Mouvement d'eau provoquant un enrichissement en sels solubles du parement extérieur en pierre

Mais l'eau peut s'insérer à l'intérieur du matériau par effet de tension superficielle puis par capillarité depuis l'émergence des canaux de la porosité et des fissures. On obtient alors la seconde variété d'eau qui est liée ou associée.

Dans ce cas, l'eau pénètre très lentement dans la matrice et possède non seulement une importante force de pénétration mais aussi un temps de résidence, donc un temps d'action, suffisamment long pour permettre la dissolution des sels et des minéraux. L'eau devient alors une solution ionique très active qui provoque des réactions chimiques associées. Cette eau va permettre aux microorganismes de s'hydrater, mais elle va également permettre un apport en minéraux nécessaires à leurs développements. Les microorganismes phototrophes (les algues et les cyanobactéries) peuvent en effet agir par rétention d'eau, prédisposant ainsi la surface à la colonisation par des organismes potentiellement plus détériorateurs, comme les champignons, les mousses, et les plantes supérieures [9].

I.3.1.2. Action indirecte

Ce n'est pas l'eau qui agit d'abord, ce sont les fluides, gaz ou solides qu'elle transporte. Ces additifs sont souvent dus à la pollution. La pluie et l'eau des remontées capillaires sont chargées de différents composés chimiques apportés par la pollution et présents dans l'atmosphère, le sol ou le sous-sol. Essentiellement il s'agit de gaz (CO_2 , NO_x), des acides et composés ammoniacés (HCl , FCl , NH_3), des fumées porteuses de composés carbonés (suies, flammèches), des phosphates et nitrates, des engrais de jardinage, des sels d'entretien hivernal des rues et des routes, etc.

I.3.2. Biodétérioration

Les processus de détérioration par des agents physiques et chimiques sont bien connus alors que l'étude de la bio détérioration n'est que très récente bien qu'il a été estimé que 20 à 30% de la détérioration de la pierre est le résultat d'une activité biologique [10] et elle influence les propriétés de transferts hydriques des matériaux d'isolation [11].

La croissance de biofilm est influencée d'une part par ses propriétés physico-chimiques intrinsèques et d'autre part, par l'environnement dans lequel elle se situe. Il est ainsi nécessaire de connaître non seulement les microorganismes présents, donc la biodiversité, mais aussi les facteurs influençant cette colonisation, afin de bien comprendre les différents processus impliqués dans la dégradation. Le Tableau I. 1 récapitule les différents paramètres influençant la biodiversité.

Les microorganismes sont capables de détériorer esthétiquement, physiquement et chimiquement les pierres et les matériaux d'isolation. Ces trois processus vont causer des dommages par 4 actions :

- Croissance des microorganismes
- Pigmentation
- Présence des exo-polysaccharides
- Sécrétion d'acides

Tableau I. 1 : Paramètres influençant la biodiversité d'une pierre [5]

Paramètres généraux	Paramètres spécifiques favorisant la bio réceptivité
Propriétés physiques	Rugosité de la surface ; degré d'hygrométrie élevé ; porosité élevée.
Composition chimique	Teneur en carbonates > 3% p/v ; présence de composés organiques fossilisés ; teneur en feldspath ; argile ou minéraux ferrugineux > 5% p/v.
Localisation, exposition	Températures modérées ; forte humidité ; salinité élevée
Pollution atmosphérique	Oxyde d'azote et de soufre ; composés organiques

I.3.2.1. Effet de la croissance des microorganismes sur les pierres

La croissance des microorganismes peut détériorer la pierre. Ce processus de nature physique est dû à la pénétration des filaments (ou des hyphes⁸) et par les gonflements et contractions de biofilm (ou des lichens⁹) pendant les cycles séchage/humidité.

D'une part, les hyphes fongiques sont capables de pénétrer profondément induisant une détérioration mécanique. *Berdoulay* [10] a pu observer à l'œil nu et au bout de 6 mois une différence de colonisation entre les deux faces des pierres calcaires d'Angoulême. La face verso (la face la moins exposée aux variations environnementales) abrite une communauté hétérogène d'eucaryotes¹⁰ et de procaryotes¹¹, avec une dominance des algues vertes filamenteuses. Ces microorganismes sont facilement dissociables de la pierre et semblent avoir tendance à pénétrer dans la pierre pour se protéger des conditions environnementales drastiques. La face recto est colonisée principalement par des eucaryotes et procaryotes unicellulaires qui semblent bien ancrés sur la pierre. Cette différence de colonisation se comprend, puisque les deux faces des pierres n'offrent pas la même exposition vis-à-vis des embruns et des radiations solaires. La pénétration permet simultanément le transport de l'eau et des nutriments dans la pierre, ce qui facilite la colonisation interne de la pierre par les bactéries. Plus tard, la croissance des cellules force la séparation des grains minéraux, induisant ainsi la détérioration biochimique.

D'autre part, l'expansion et la contraction du thalle dans le cas des lichens est une conséquence de l'humidification et du séchage de ses substances gélatineuses.

⁸ Long filament ramifié que l'on trouve principalement chez les champignons mais également chez certaines bactéries comme les actinomycètes et les streptomycètes

⁹ Une association symbiotique entre une algue ou cyanobactérie (photobionte) et un champignon ou une bactérie hétérotrophe (mycobionte), qui forme un thalle stable. Le photobionte est chargé de fournir le carbone, alors que le mycobionte fournit l'eau et les sels minéraux nécessaires au développement du lichen

¹⁰ Etre dont les cellules sont toutes composées de trois éléments fondamentaux : la membrane, le cytoplasme et le noyau, ce dernier contenant le programme génétique de la cellule

¹¹ Etre vivant dont les cellules ne comportent pas de noyau

C'est un des mécanismes décrit par *Adamo et Violante* comme le plus important dans la bio détérioration physique de la pierre [13].

I.3.2.2. Effet de la pigmentation des microorganismes sur les pierres :

Le développement d'un biofilm microbien est fréquemment associé à une coloration biogénique (Figure I. 7). En général, la synthèse des pigments est un mécanisme de protection des microorganismes vis-à-vis de l'environnement extrême dans lequel ils évoluent. Les pigments constituent un effet bouclier réel contre les effets néfastes des radiations UV et ils forment par conséquent une action de bio détérioration esthétique.



Figure I. 7 : Développement de mousses et de lichens à la base d'un mur en tuffeau (château de Chambord) et des champignons sur des éprouvettes en béton de chanvre

I.3.2.3. Effet des exo-polysaccharides (EPS)

L'attachement à la surface est la première étape pour la formation du biofilm et l'adhésion des cellules aux substrats est due aux EPS. Les EPS sont des bio-polymères d'origine microbienne qui sont fortement hydratés (retiennent l'eau) et forment une matrice, qui conserve l'ensemble des cellules du biofilm [14]. Les EPS ont alors une action directe et indirecte dans le processus de bio détérioration à cause des cycles répétés d'humidité/séchage qui induisent l'expansion et la contraction du biofilm. Ce processus conduit à une fragilisation de la matrice [12] et à dégrader ses propriétés intrinsèques et ses propriétés de transferts hydriques, notamment la perméabilité à la diffusion de vapeur d'eau [11].

I.3.2.4. Effets des sécrétions d'acides par les microorganismes

Les attaques acides sont les principaux processus de détérioration chimique par les microorganismes. Ces derniers ont besoin des minéraux (calcium, aluminium, silice, fer et potassium) pour leur métabolisme en excréant des acides organiques (acide citrique, acide gluconique, acide oxalique) et inorganiques (oxyde de soufre). La sécrétion d'acides organiques induit donc une lixiviation des liants avec fragilisation de la structure cristalline. Un autre mécanisme indirect de lixiviation est la respiration des bactéries et des champignons.

En effet elle augmente la concentration en CO₂ local, résultant en la formation de H₂CO₃ qui fait baisser le pH de la zone de contact.

I.4. Le tuffeau

Le tuffeau est omniprésent dans l'habitat et le patrimoine bâti emblématique.

Le bâti ancien en tuffeau fait l'identité architecturale du val de Loire. Cette région est inscrite sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO depuis le 30 novembre 2000. Elle est un remarquable paysage culturel s'étirant le long d'un fleuve, qui témoigne de l'interaction entre l'homme et son environnement naturel depuis plus de deux millénaires (Figure I. 8). Le tuffeau, est une roche calcaire d'âge géologique Turonien moyen (crétacé supérieur, -90 millions d'années). C'est est une roche très claire, tendre, principale pierre mise en œuvre dans les châteaux de la Loire et la plupart des maisons anciennes de la région. La blancheur et la relative ductilité de cette pierre ont permis la construction de façades aux sculptures élégantes. Par exemple, les châteaux de Chambord, de Chenonceau, de Blois, de Saumur et d'Amboise sont construits en tuffeau de même que les cathédrales de Tours et de Nantes.

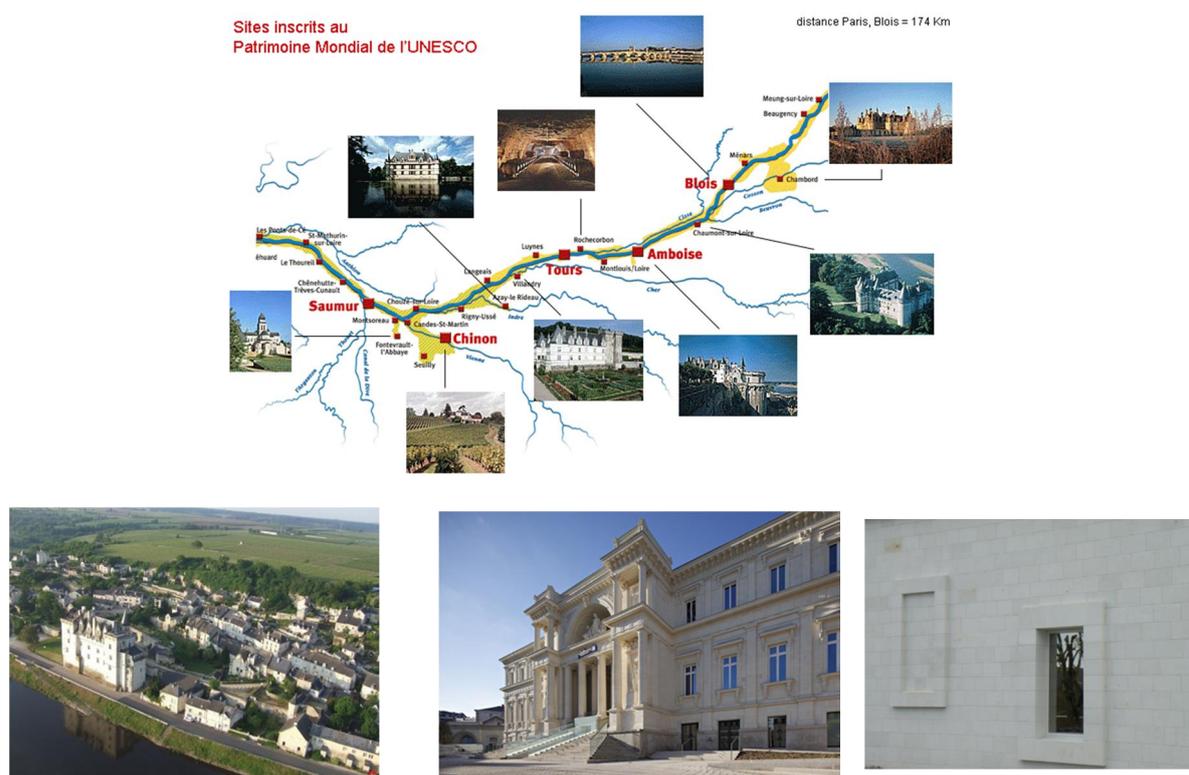


Figure I. 8 : Carte du val de Loire, village de Montsoreau (49), hotel (44) et façade en tuffeau en pierre de taille

À ce jour, les références bibliographiques traitant du tuffeau ne sont pas nombreuses. Nous citons ainsi l'ensemble des travaux publiés dans le cadre des projets de recherche universitaire. Dessandier a étudié en 1995 les propriétés de transfert des fluides dans des échantillons en tuffeau prélevés sur monuments et dans les carrières en exploitation [15].

Chéné en 1999 a reconstitué en laboratoire les transferts hydriques résultant de cycles répétitifs d'imbibition-séchage susceptibles de provoquer des altérations de ces échantillons [16]. Quant à Beck, il s'est intéressé à la substitution de la pierre de tuffeau par la pierre de Sébastopol qui présente des propriétés proches comme l'aspect visuel, la résistance mécanique et la porosité totale. Sa thèse soutenue en 2006 avait pour objectifs la caractérisation de la pierre (minéralogie, propriétés de transferts et comportement hydromécanique) et l'étude de la compatibilité des deux pierres par essais de vieillissement (cycles imbibition-séchage) [7]. Tri Van a récemment reproduit les essais de vieillissement mais en utilisant des solutions de chlorure de sodium et d'acide sulfurique afin de simuler le degré d'altération du tuffeau en fonction du degré de saturation en sel, de l'humidité et de la température [17].

Ces différentes études ont traité la question de la durabilité du bâti ancien en tuffeau et ont aidé à la compréhension des origines des pathologies fréquemment observées. Dans ce qui suit, les propriétés soulignées sont extraites de leurs travaux, en particulier le travail de Beck puisque le tuffeau utilisé dans ce rapport vient de la même carrière, carrière Lucet à Saint-Cyr-en-Bourg, dans le Maine-et-Loire.

I.4.1. Composition minéralogique

Le tuffeau contient une proportion de calcite de l'ordre de 50% et une forte proportion de silice partagée principalement entre le quartz, l'opale cristobalite-tridymite (opale CT) et les minéraux argileux. Il se classe par conséquent dans les roches silico-calcaires [7,18]. Les essais à la spectrométrie infrarouge montrent que la proportion moyenne de l'opale CT est de l'ordre de 30% alors que le quartz et les minéraux argileux sont en proportion de 10% chacun.

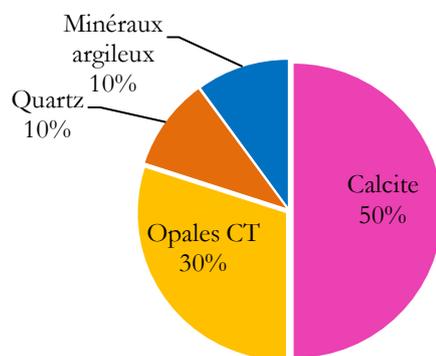


Figure I. 9 : Composition minéralogique du tuffeau donnée par Beck [7]

Les observations sur sections polies par des images de microscopie électronique et par microscopie optique, données dans la Figure I. 10, montrent que le tuffeau contient des grains de différentes tailles et de divers états de surface. Les grains de quartz (de diamètre d'environ 100 μm) sont anguleux alors que la calcite sparitique (\varnothing d'environ 100 μm) est arrondie.

Ces grains sont cimentés par la calcite micritique ($\varnothing < 1 \mu\text{m}$) et par les sphérules d'opale CT de surface en crêtes imbriquées (\varnothing d'environ de $20 \mu\text{m}$) [15].

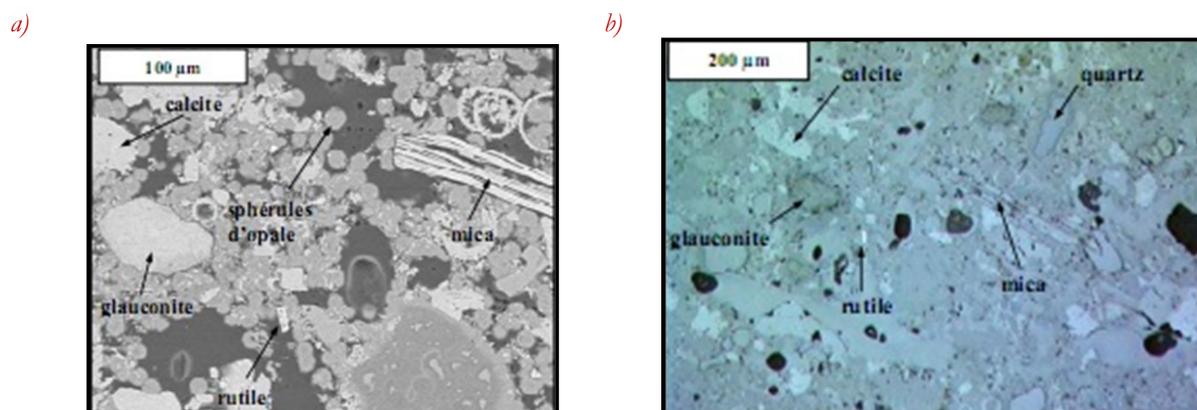


Figure I. 10 : Images acquises d'une zone de cœur du tuffeau blanc par (a) microscope électronique à balayage et (b) par microscopie optique [7]

L'observation en microscopie optique est complémentaire de l'observation en microscopie électronique car certains minéraux ne peuvent être distingués en microscopie électronique comme la calcite et la glauconite qui par contre apparaît verdâtre en microscopie optique. Ainsi des petits grains de rutile ou des paillettes de mica sont observés de manière éparse dans la pierre [7].

En effet, des essais supplémentaires de cartographie élémentaire et d'analyse d'image sont réalisés. Les signaux de silicium (Si) et de calcium (Ca) montrent bien que les grains sont principalement du quartz, des sphérules d'opale, de la calcite sparitique et micritique et des débris coquillés. Les signaux de l'aluminium (Al) et du fer (Fe) confirment la présence des grains de glauconite et que les paillettes de mica sont de type biotite. Les grains de rutiles qui sont présents sous formes des traces dans les feuillets de la biotite ont été détectés par le signal de titane (Ti). En outre, l'Al étant présent avec de nombreux petits grains ne contenant pas de Fe témoigne de la présence des smectites [7].

I.4.2. Principales propriétés

I.4.2.1. Propriétés physiques

a. Définition de seuil de classe de porosité

Il est nécessaire de se donner une convention pour classer les différents domaines poreux. Celle-ci est inspirée de celle proposée par *Cardell* qui définit les intervalles de porosité selon les forces influençant le mouvement des fluides à travers le milieu poreux [19] :

- L'infra porosité quand la taille du pore est inférieure à $0,01 \mu\text{m}$ où les mouvements du fluide sont causés par les forces d'adsorption

- La porosité capillaire entre 0,01 et 2500 μm les mouvements de l'eau sont dus aux forces capillaires
- La supra porosité quand la taille du pore est supérieure à 2500 μm où la mobilité du fluide est gouvernée par les forces gravitationnelles

C'est dans l'intervalle de porosité capillaire que se situent les distributions porales de la plupart des pierres sédimentaires, sur la Figure I. 11 on distingue plusieurs subdivisions pour définir les domaines micro et macroporeux pratiques pour cette étude.

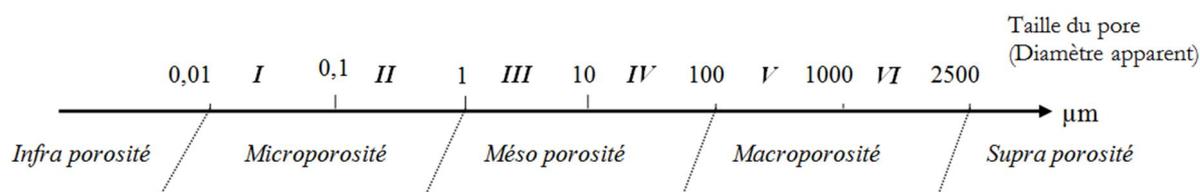


Figure I. 11 : Seuils de porosité choisis [19]

b. Masses volumiques et porosités

Le tuffeau possède un spectre de porosité très étalé avec une importante mésoporosité essentiellement de type III. Les macropores ainsi que les mésopores de type IV sont assez présents. La microporosité, générée par l'état de surface de la structure en crêtes imbriquées des sphérules d'opale CT en plus des pores inter-grains de micrites. L'infraporosité est loin d'être négligée (environ 10% du volume poreux total) et elle est due à la présence des phases fines comme les minéraux argileux.

Le tuffeau est alors de forte porosité totale variant de 35% à 50% et de surface spécifique, importante. Le Tableau I. 2 résume les principales valeurs de masses volumiques apparentes (ρ_a) et du squelette solide (ρ_s), porosités à l'eau (n) et au mercure (n_{Hg}) et surface spécifique (S_{BET}) obtenues dans des différents travaux de recherche sur le tuffeau blanc.

Tableau I. 2 : Masses volumiques et porosités du tuffeau

	ρ_a (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	n (%)	n_{Hg} (%)	S_{BET} (m ² /g)
Dessandier, 1995	1,41	2,52	44,1	38,8	19
Chéné, 1999	1,33	2,18	-	49,9	-
Beck, 2006	1,31	2,29	48,7	42,8	23,4

I.4.2.2. Propriétés de transfert hydrique

a. Différents domaines hydriques

La Figure I. 12 illustre de manière schématique le remplissage d'une structure poreuse, qui est valable pour tout type de matériau poreux et qui correspond bien à l'analyse classique de la courbe de rétention d'eau couramment exploitée en mécanique des sols non-saturés :

- **Le domaine hygroscopique (1)** : L'eau se trouve sous forme adsorbée autour des grains. La phase liquide est discontinue ; la phase gazeuse est continue. Les échanges d'eau se font par changement de phase et par diffusion gazeuse
- **Le domaine pendulaire (2)** : Ce domaine est encore mal défini. L'eau forme des ponts liquides entre les grains (eau capillaire). Le transfert se fait toujours principalement sous forme vapeur mais il est court-circuité par des zones d'eau liquide dans les étranglements. Ce processus de transfert est décrit comme un transfert de vapeur assisté par liquide car les zones d'eau liquide réduisent le parcours de diffusion de la vapeur
- **Le domaine funiculaire (3)** : la phase liquide est continue et la phase gazeuse se trouve sous forme de bulles occluses. Le transfert hydrique se fait alors essentiellement sous forme liquide par écoulement dans les pores capillaires. Le schéma (4) est un cas particulier de ce domaine, il représente l'état saturé dans lequel la phase gazeuse a entièrement disparu

Dans le domaine hygroscopique, l'eau est retenue par le sol sous l'action de forces physico-chimiques alors que ce sont les forces capillaires qui sont prépondérantes dans les domaines pendulaire et funiculaire.

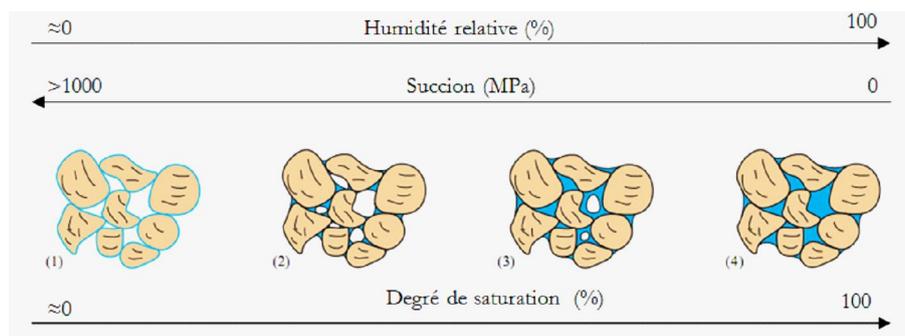


Figure I. 12 : Représentation schématique des états hydriques d'un milieu poreux

b. Imbibition par capillarité

La relation succion/teneur en eau est intimement liée à la structure poreuse, et pour une pierre donnée, elle constitue une caractéristique intrinsèque importante.

Or les propriétés d'imbibition par capillarité sont directement liées à la taille et à la forme des pores, ainsi qu'à la connectivité du réseau poreux.

Le modèle théorique se base sur la remontée de l'eau par capillarité dans un tube cylindrique vertical de rayon r_c de faible hauteur, ce qui permet de négliger l'effet de la gravité. Le gradient de pression provoquant l'écoulement est régi par la loi de *Laplace* :

$$\Delta p = p_{\text{atm}} - p_{\text{cap}} = \frac{2\sigma \cos\theta}{r_c} \quad I. 1$$

Où σ est la tension superficielle du fluide ($\sigma = 0,072 \text{ N/m}$) et θ l'angle de contact capillaire solide fluide ($\theta \approx 0^\circ$ pour l'eau).

Le débit du fluide en régime permanent et laminaire dans un tube cylindrique et est donné par la loi de *Hagen-Poiseuille* :

$$Q = \frac{\pi r_c^4}{8\eta L} \Delta p \quad I. 2$$

Où Q est le débit volumique de l'eau (m^3/s), L la hauteur capillaire (m) et η la viscosité dynamique de l'eau (Pa.s).

Par ailleurs, le débit peut être formulé comme :

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{V_c}{t} \quad I. 3$$

En combinant les équations I. 1, I. 2 et I. 3 on obtient l'équation de *Washburn* :

$$V_c = \frac{r_c^4}{4\eta} \frac{\Delta p}{L} t \quad I. 4$$

L'équation de *Washburn* relie la vitesse de déplacement du ménisque aux autres propriétés du système. Son intégration permet de calculer deux paramètres intéressants :

- L'ascension du front capillaire h en fonction de la racine carrée du temps

$$h = \frac{r_c^2}{2\eta} \sqrt{\Delta p} = \frac{r_c^2}{2\eta} \sqrt{2\sigma \cos\theta} \quad I. 5$$

- La masse du liquide Δm imbibant le tube capillaire de section S

$$\Delta m = \rho V_c = \rho \frac{r_c^4}{4\eta} \frac{\Delta p}{L} t = \frac{\rho r_c^4}{4\eta} \frac{2\sigma \cos\theta}{L} \sqrt{t} = \frac{\rho r_c^4}{2\eta} \sqrt{\sigma \cos\theta} \sqrt{t} \quad I. 6$$

Les coefficients d'imbibition massique A ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\text{ mn}^{-1/2}$) et visuel B ($\text{cm}\cdot\text{mn}^{-1/2}$) correspondent respectivement aux pentes des courbes de prise de masse et de migration de la frange capillaire. Ces deux coefficients sont relativement élevés dans le cas du tuffeau. Ils témoignent d'une cinétique d'imbibition rapide de la roche. Le Tableau I. 3 présente à titre indicatif les valeurs des coefficients visuels et massiques d'imbibition de quelques roches sédimentaires.

Tableau I. 3 : Coefficients visuels et massiques d'imbibition de quelques roches sédimentaires

Appellation	Etage géologique	n (%)	Diamètre seuil (μm)	A ($\text{g}/\text{cm}^2\text{ mn}^{1/2}$)	B ($\text{cm}/\text{mn}^{1/2}$)
Calcaire de Savonnière ¹	Portlandien Inf	36-38	7 et 0,1	$\approx 0,05$	0,35
Calcaire de Sireuil ¹	Cénomanién	34-36	11 et 0,3	$\approx 0,33$	1,50
Grès à Meules ²	Buntsandstein Sup	17-19	5	0,02-0,03	1,16
Sébastopol ³	Lutétien Moyen	42	20	0,69	2,49
Tuffeau de Saumur ³	Turonien Moyen	48	5	0,39	1,04
Tuffeau Blanc ^{4*}	Turonien Moyen	44	-	0,29	0,86

¹ Boussiqué [20] ; ² Thomachot ; ³ Beck [7] ; ⁴ Dessandier [15] ; *Résultats obtenus sur 35 blocs de tuffeau différents

Nous remarquons bien que ce n'est pas la porosité totale qui est le facteur le plus important dans le phénomène d'imbibition, mais bien la taille moyenne des pores. En règle générale, les pierres possédant un petit diamètre seuil de pore ont souvent des coefficients visuels d'imbibition très faibles. Néanmoins, la taille moyenne des pores n'est pas une donnée suffisante pour comprendre les propriétés capillaires d'une pierre. En effet, les pierres de Sireuil et de Savonnière possèdent une porosité totale quasiment identique, des seuils des pores proches mais des coefficients d'imbibition très différents.

En utilisant les valeurs moyennes des coefficients visuels d'imbibition des pierres de tuffeau étudiées, les diamètres capillaires équivalents peuvent être calculés en utilisant l'équation I. 5 et sont présentés dans le Tableau I. 4. Les diamètres capillaires équivalents déduits du modèle de *Washburn* sont nettement (de plusieurs ordres de grandeurs) inférieurs aux diamètres existant réellement dans le tuffeau et n'ont donc aucune réalité physique.

Tableau I. 4 : Diamètres capillaires équivalents

Auteur	Diamètre seuil (μm)	Diamètre équivalent (μm)
Dessandier, 1995	-	0,07
Beck, 2006	5	0,1

Ce résultat s'explique par le fait que la loi de *Washburn* ne prend pas en compte certains paramètres comme par exemple, l'irrégularité de la taille des pores ou bien la variation de l'angle de contact en fonction de l'inclinaison des surfaces des minéraux [18].

De plus, les pores sont supposés cylindriques et parcourus par un fluide newtonien en écoulement laminaire et en régime établi. Cette dernière hypothèse est loin d'être réaliste dans la configuration d'imbibition.

Néanmoins, malgré ses hypothèses et approximations discutables, l'expression de *Washburn*, au regard de sa simplicité, reste la référence actuelle (norme *AFNOR B10-613 ou EN 1925 :199*) pour la description des courbes d'imbibition.

De ce fait les échantillons de tuffeau, présentant un domaine macroporeux dominant avec environ 50% de la porosité totale, auront donc une cinétique d'imbibition capillaire rapide.

c. Isotherme de sorption

L'isotherme de sorption (ou la courbe de rétention dans certains travaux de recherches) permet de connaître la capacité de la pierre à capter ou à retenir l'eau selon la succion ψ imposée par le milieu extérieur. La succion, représentant la pression négative de l'eau par rapport à l'air, peut être reliée à l'humidité relative φ de l'atmosphère quand il y a équilibre de l'eau liquide avec sa vapeur en condition isotherme. Cette relation est décrite par la loi de *Kelvin* :

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{vs}} = \exp\left(-\frac{p_c}{\rho_w R T}\right) \quad I. 7$$

Avec :

- p_v [Pa] La pression partielle de la vapeur d'eau
- p_{vs} [Pa] La pression de vapeur d'eau saturante
- R [J/kg.K] La constante des gaz parfaits
- M_w [mol] La masse molaire de l'eau
- ρ_w [kg/m³] La masse volumique de l'eau

Le tuffeau a la particularité de capter facilement l'humidité de l'air et peut ainsi contenir une quantité d'eau assez grande quand il se trouve dans un milieu à forte humidité. La Figure I. 13 présente les courbes de sorption à 20°C obtenues par la méthode des solutions salines saturées.

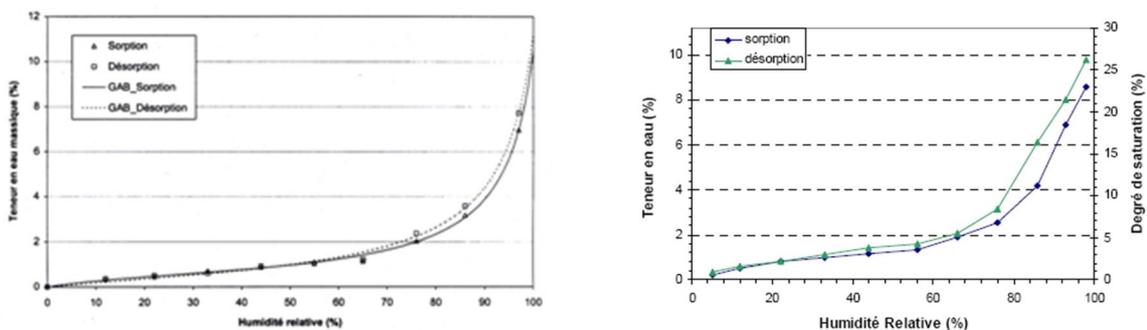


Figure I. 13 : Isothermes de sorption obtenus par Chéné (à gauche) et par Beck (à droite) pour le tuffeau [7,16]

L'hystérésis (écart entre la courbe d'adsorption et la courbe de désorption) des isothermes est assez faible. Le tuffeau blanc est considéré par ailleurs comme un matériau à faible caractère hygroscopique puisque leur teneur en eau critique (obtenue pour une humidité relative de 100%) se situe en moyenne vers 10%.

I.4.2.3. Propriétés mécaniques

a. Résistance à la compression

Des essais à la compression uniaxiale sont réalisés dans le cadre des travaux de Beck et Dessandier. À partir de mesures effectuées, la résistance à la compression uniaxiale à l'état sec dans les deux sens (parallèle et perpendiculaire au lit de la pierre) est de 10 MPa en moyenne. Le tuffeau est alors une roche tendre suivant la classification ISRM¹² des roches (Tableau I. 5).

Tableau I. 5 : La classification ISRM des roches basées sur la résistance à la compression uniaxiale

R _c (MPa)	Roche
<1	Extrêmement tendre sol
1-5	Très tendre
5-25	Tendre
25-50	Moyennement résistante
50-100	Résistante
100-250	Très résistante
>250	Extrêmement résistante

Dessandier a utilisé les coefficients de corrélation pour argumenter l'existence ou pas d'une relation linéaire (sous forme d'une droite) entre deux grandeurs considérées. Il a montré que la présence des minéraux argileux n'explique que très faiblement cette perte de résistance (coefficient de corrélation de 0,14). Toutefois, la résistance à la compression est en relation inverse avec le domaine des macropores (coefficient de corrélation de -0,59), les proportions en quartz (coefficient de corrélation de -0,6) et les minéraux argileux (coefficient de corrélation de -0,48). En ce qui concerne les proportions de calcite et d'opales CT, les tendances des liants à cette propriété sont normales comme ces éléments forment le ciment du tuffeau [15].

Ces essais de résistance à la compression sont suivis en fonction de la teneur en eau. Il s'agit désormais d'un comportement hydromécanique. Les résultats ont montré qu'entre l'état sec et l'état saturé, la perte de résistance est particulièrement élevée avec une valeur moyenne de 37% et un maximum proche de 60%.

¹² International society for rock mechanics

Conformément à la théorie, la présence de l'eau modifie les liens inter granulaires et diminue l'énergie sur les surfaces de contact entre les grains constitutifs. La chute de résistance mécanique entre les deux états extrêmes (sec et saturé) s'accompagne d'une chute du module de Young. En effet, pour un degré de saturation de 20% la résistance mécanique n'évolue plus et reste à sa plus faible valeur [7].

b. Résistance à la traction

Comme pour la compression, la présence d'eau joue donc un rôle important dans la résistance du matériau car entre l'état sec et l'état saturé, la perte de résistance de traction est de 68% et elle passe en moyenne de 1,4 MPa à 0,44 MPa.

La rupture des éprouvettes se produit avec une cassure nette et franche et la valeur seuil de degré de saturation au niveau du comportement en traction est d'environ 5% à 10% qui est la même que celle estimée en compression, ce qui témoigne de la pertinence des résultats [7].

I.5. Construire en chanvre

I.5.1. Chanvre

Le chanvre (*Canabis Sativa. L*) est une plante annuelle dont la production mondiale est estimée à environ 120000 tonnes par an. En Europe, la France est le premier producteur de chanvre avec 65000 tonnes de paille pour une surface cultivée de 10000 hectares [21].

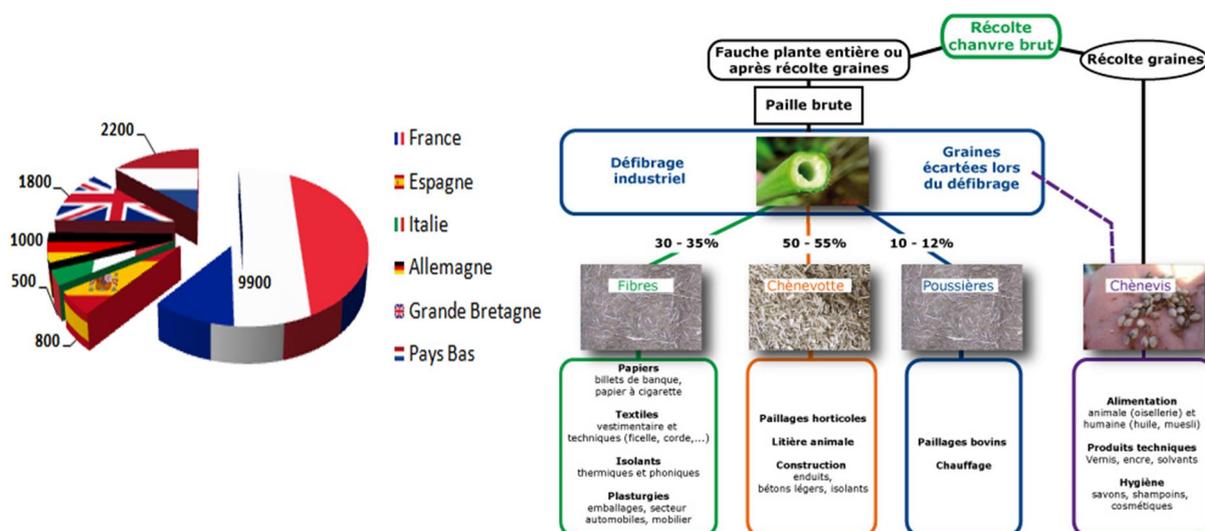


Figure I. 14: Surfaces cultivées de chanvre en hectare et domaines d'application de ses différents constitués

Les principaux constituants de cette plante sont les fibres, la chènevotte et la graine (Figure I. 14). Les fibres constituent le squelette de la plante. Lorsque la tige est arrivée à maturité et séchée, les fibres représentent environ 35 % du poids et elles sont habituellement utilisées en papeterie, pour la réalisation de textile ou pour le renforcement de polymères [22].

La chènevotte est la partie centrale et moelleuse de la tige de chanvre. Elle correspond à la partie ayant véhiculé la sève pendant la période de croissance du chanvre, elle est donc très hydrophile. Elle est obtenue par défibrage mécanique et représente environ 45% du poids de la paille. La chènevotte est un sous-produit industriel utilisable comme litière pour animaux, étant donné ses propriétés absorbantes, ou comme granulats végétaux pour la confection de matériaux de construction.

La graine du chanvre ou chènevis est de forme ovoïde et mesure entre 3 et 5 millimètres. Elle est utilisée en alimentation humaine, cosmétique, oisellerie, etc.

Le chanvre est donc considéré comme un matériau propre en raison de ses atouts environnementaux : amélioration du sol, faible dépense énergétique pour sa production (liée au bon rendement des cultures avec peu d'utilisation d'intrants), bilan CO₂ favorable, peu ou pas de problème de gestion de fin de vie.

I.5.2. Chènevotte

I.5.2.1. Couleur

Le terme *chènevotte* désigne l'ensemble des particules de la tige du chanvre. On distingue entre deux types de granulats : la chènevotte fibrée et la chènevotte défibrée (ou pure). Cette dernière est obtenue par défibrage total de la tige du chanvre c'est-à-dire à partir d'un processus de séparation totale des fibres situées en périphérie et de la partie boisée centrale. Le premier type est constitué des particules boisées de différentes tailles. Le deuxième type de granulats est un mélange de bois et de fibres végétales puisqu'il n'y a qu'un défibrage partiel de la tige du chanvre qui est simplement broyée.

Les fibres végétales peuvent se trouver soit isolées, soit collées avec les particules boisées. Dans les deux cas, les règles professionnelles prescrivent qu'elles doivent avoir une coloration allant de beige très clair à vert pâle [23]. L'apparence de ces deux types de granulats est illustrée sur la Figure I. 15.

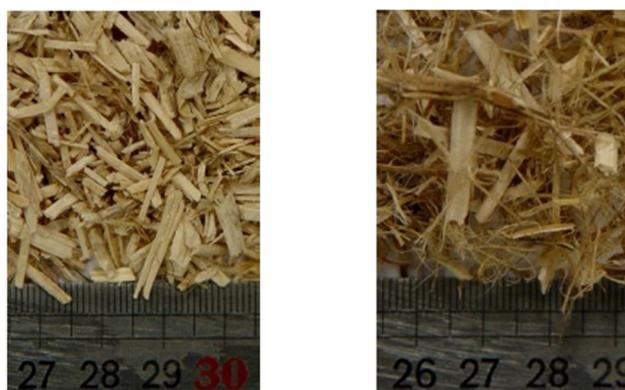


Figure I. 15: Chènevotte défibrée (a) et chènevotte fibrée (b)

I.5.2.2. Composition massique et volumique

Le Tableau I. 6 indique la composition volumique de la chènevotte pure. Sa masse volumique en vrac se situe entre 100 et 130 kg/m³, ce qui signifie que l'arrangement est peu dense. *Cerezo* [2] et *Nguyen* [24] ont expliqué cette faible densité par la part prépondérante occupée par l'air. En effet, dans la chènevotte, l'air est partagé entre air intra-particule et inter-particules.

Tableau I. 6 : Composition volumique d'1 m³ de chènevotte pure

Auteur	Volume [m ³]		
	Air inter-particules	Bois	Air intra-particule
<i>Cerezo</i> , 2005	0,594	0,088	0,318
<i>Nguyen</i> , 2010	0,599	0,070	0,331

Ces résultats expliquent donc deux caractéristiques essentielles des particules de chanvre :

- Pouvoir absorbant élevé
- Compressibilité du granulat
- Conductivité thermique faible

I.5.2.3. Sensibilité à l'eau

La cinétique de reprise d'eau par les particules de chènevotte a été définie à partir de la variation du taux d'absorption d'eau $A(t)$, qui s'exprime comme le rapport entre le gain massique de l'échantillon à l'instant t et sa masse initiale sèche, en fonction du temps :

$$A(t) = \frac{m(t) - m_0}{m_0} \times 100$$

I. 8

Quelle que soit la nature de la chènevotte fibrée (CF) ou pure (CP), ces granulats sont quasiment saturés au bout de quelques minutes et peuvent absorber jusqu'à 4 fois leur masse totale (Figure I. 16).

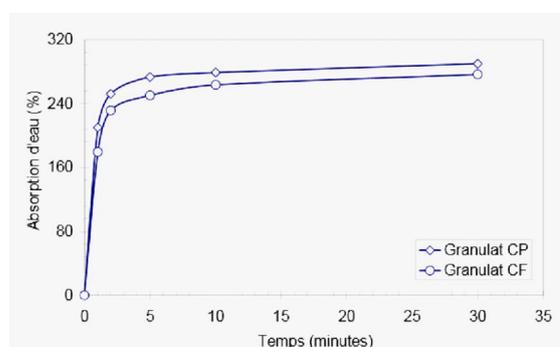


Figure I. 16 : Quantité d'eau absorbée par la chènevotte (CP et CF) [24]

On constate toutefois que la chènevotte fibrée absorbe moins d'eau que la chènevotte pure malgré une masse volumique en vrac deux fois plus faible (elle est plutôt de l'ordre de 55 kg/m^3). La légèreté ne paraît pas être le seul paramètre régissant l'absorption d'eau dans ce granulat d'origine végétale. Nguyen explique ces observations par la présence de fibres végétales qui sont beaucoup moins poreuses [24].

Cette sensibilité à l'eau liquide des particules végétales amène à se poser la question de leur comportement vis-à-vis de la vapeur d'eau présente dans l'air en quantité variable selon l'hygrométrie du milieu extérieur. Garnier a déterminé les isothermes de sorption à 20°C . En se basant sur ces courbes expérimentales, on constate des valeurs de teneur en eau massique non négligeables ($> 10\%$) pour des ambiances de HR supérieur à 50% (Figure I. 17). La capacité d'absorption en eau (liquide ou vapeur) joue donc un rôle très important pour la formulation et la mise en œuvre du béton de chanvre. Cette propriété hydrophile des granulats devrait conditionner l'utilisation de liants hydrauliques.

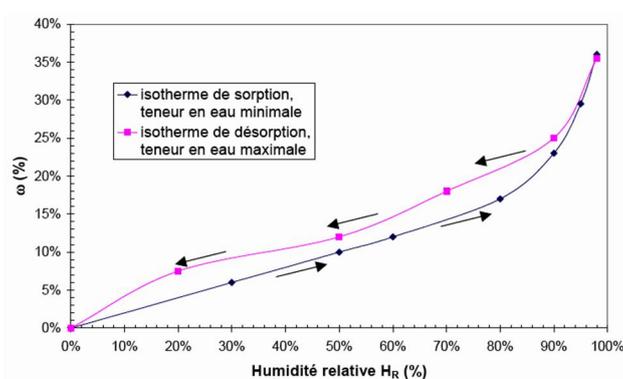


Figure I. 17 : Isothermes de sorption de la chènevotte à 20°C [25]

I.5.2.4. Conductivité thermique

La conductivité thermique du chanvre en vrac sec est mesurée par le *CSTB*¹³, l'*ENTPE*¹⁴. Elle dépend de la masse volumique et donc varie entre $0,048 \text{ W/m. K}$ et $0,058 \text{ W/m. K}$ pour 110 kg/m^3 et 155 kg/m^3 respectivement.

Cerezo a ensuite modélisé cette relation par l'application de l'approche auto cohérente à l'aide du modèle bi composite et comparé aux valeurs mesurées (Figure I. 18).

¹³ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

¹⁴ Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat

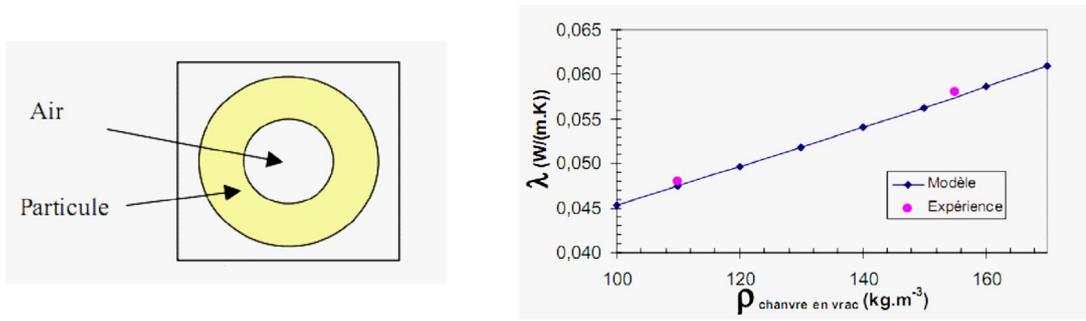


Figure I. 18 : Modèle bicomposite utilisé et valeurs numériques et expérimentales obtenues [2]

Cerezo a donc déduit la masse volumique et la conductivité thermique d'une particule de chènevotte seule tel que $\lambda_{\text{chènevotte seule}} = 0,102 \text{ W/m. K}$ et $\rho_{\text{chènevotte seule}} = 320 \text{ kg/m}^3$.

Elle a également exprimé la conductivité du chanvre en vrac en fonction de la conductivité de la particule de chènevotte, sa masse volumique et la masse volumique de la chènevotte en vrac.

$$\lambda_c = 0,102 \left(0,102 \frac{1 \cdot \rho_c}{1,342 \cdot \rho} \right) \quad I. 9$$

Où λ_c et ρ_c sont respectivement la conductivité thermique et la masse volumique de la chènevotte en vrac.

1.5.2.1. Compressibilité

Cerezo et Arnaud *et al* ont testé des éprouvettes cylindriques de diamètre 160 mm et de hauteur 320 mm en compression simple et cyclique. Les courbes résultantes montrent que la chènevotte en vrac possède une forte cohésion inter granulaires à sec et elle est fortement compressible ; les cylindres peuvent en effet maintenir les niveaux de déformation supérieure à 70% avant que l'éprouvette s'effondre [2,26].

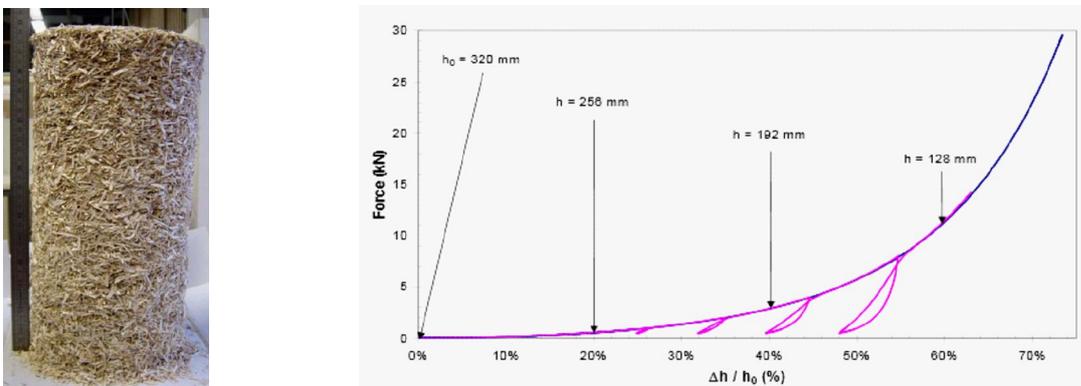


Figure I. 19 : Résultats typiques des essais de compression simple et cyclique sur des éprouvettes en chènevotte sèche [2]

I.5.3. Liants

Pour confectionner du béton de chanvre, plusieurs liants sont utilisés dans les différents travaux de recherches. Mais il s'agit principalement de l'utilisation de la chaux dont le processus de fabrication est décrit sur la Figure I. 20.

La cuisson du calcaire permet d'obtenir deux formes de chaux : aérienne et hydraulique. La chaux aérienne $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est obtenue par calcination du calcaire pure entre 800 et 1200°C et effectue sa prise en milieu humide par carbonatation de la chaux vive CaO avec le gaz carbonique CO_2 de l'air.

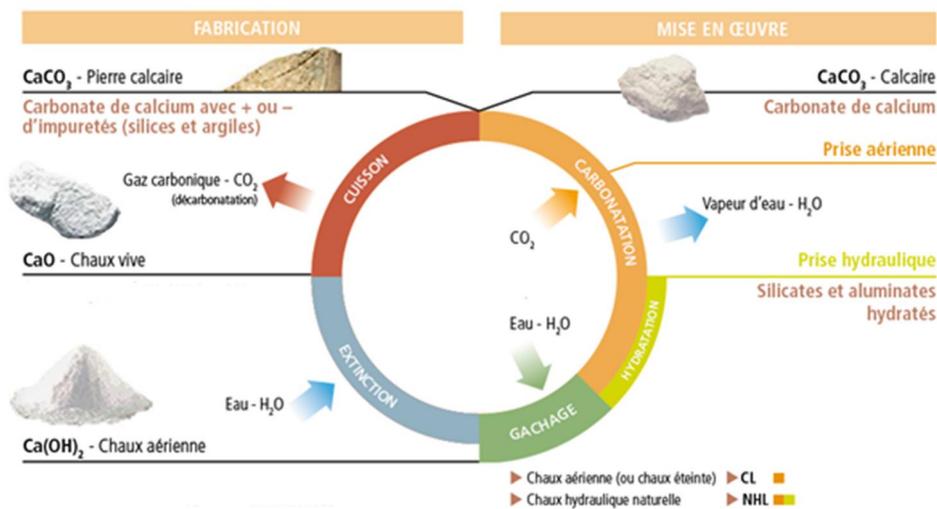


Figure I. 20: Cycle de la chaux aérienne et hydraulique ¹⁵

Selon l'humidité du milieu, la vapeur d'eau se lie avec le CO_2 atmosphérique pour former l'acide carbonique ; la chaux fixe le CO_2 contenu dans cet acide et se transforme en calcaire CaCO_3 . (I. 10).

Le cycle de la chaux est un processus continu qui permet de transformer la pierre calcaire en liant hydraulique ou aérien, puis de le réutiliser dans des ouvrages de construction.

I. 10

La chaux hydraulique est obtenue par calcination (température maximale de 1000°C) d'un calcaire contenant 10 à 20% d'argile riche en éléments chimiques principalement la silice et d'autres minéraux comme Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , etc. Cette chaux présente un phénomène de prise double, dans un premier temps, le durcissement se fait à l'eau et dans un second temps elle durcit à l'air (I. 11 et I. 12).

La prise double de la chaux hydraulique est due à la formation de silicates et aluminates hydratés lors de l'extinction, puis à la carbonatation de la chaux vive résiduelle.

I. 11

La prise à l'air de la chaux hydraulique est due à la carbonatation de la chaux vive résiduelle.

I. 12

¹⁵ <http://www.parexlanko.com>

Or les chaux aérienne et/ou hydraulique contiennent parfois des additions ou substituées par des éléments souvent d'activité pouzzolanique. Nous avons donc choisi de les récapituler dans le Tableau I. 7 afin d'avoir un aperçu de l'éventail des choix adoptés.

Tableau I. 7 : Chaux utilisées pour la confection les bétons de chanvre

Auteur	Référence	Chaux utilisée	Commentaires
<i>L. Arnaud et al</i>	[26]	NHL 2, NHL 3,5 et NHL 3,5-Z	Chaux hydraulique naturelle (NHL) avec des degrés d'hydraulicité de 2 ou 3,5. La lettre Z pour mentionner que la chaux contient jusqu'à 20% de ciment
<i>V. Cerezo</i>	[2]	PF 70 Tradichanvre	Chaux commerciale contenant 10% de pouzzolanes Chaux commerciale contenant 35% de sable (et 65% PF 80)
<i>J. Chamoin</i>	[27]	PF 70 Microsem 7	Chaux commerciale contenant 10% de pouzzolanes Liant de sulfate de calcium
<i>F. Collet</i>	[28]	PF 70	Chaux commerciale contenant 10% de pouzzolanes
<i>P.De Bruijn et al</i>	[29]	Chaux formulée	75% CL90 (chaux aérienne de 90% CaO), 15% NHL 5 à 10% de cendre volante
<i>Dinh.T.M</i>	[30]	Liant formulé	Mélange de NHL 3,5 ou chaux éteinte avec du métakaolin (de 50 à 70%) avec ajout des adjuvants (Sika Viscocrete 20 HEVP, sulfate de potassium, glycerol carbonate)
<i>A.Evrard</i>	[4]	PF 70 Tradichanvre Alpha 63 et Eclat	Chaux commerciale contenant 10% de pouzzolanes Chaux commerciale contenant 35% de sable (et 65% PF 80) Les deux chaux sont à 100% CL 90-S mais proviennent de deux fabricants différents
<i>T.T Nguyen</i>	[24]	PF 70 NHL 2 et NHL 3,5-Z CEM I 52,5 N	Chaux commerciale contenant 10% de pouzzolanes Chaux hydraulique naturelle (NHL) avec des degrés d'hydraulicité de 2 ou 3,5. La lettre Z pour mentionner que la chaux contient jusqu'à 20% de ciment Ciment portland (contient au moins 95% de clinker)
<i>D. Samri</i>	[31]	PF 70	Chaux commerciale contenant 10% de pouzzolanes
<i>A.D Tran Le</i>	[32]	Amidon	Il se compose d'une teneur en eau de 13% de 0,25% de cendres, de 0,3% de protéines et le reste des glucides (carbohydrates)
<i>R.Walker et al</i>	[33]	Liants formulés	Ces liants sont essentiellement à base de Cl 90, de 20 à 30% de pouzzolanes : métakaolin ou laitier et de méthyle de cellulose (adjuvant rétenteur d'eau)

Nous remarquons que la chaux aérienne PF 70 est en tête de ces choix surtout qu'elle est la chaux de référence pour les producteurs et fournisseurs de chanvre.

Nguyen [24] a donc mesuré la conductivité thermique d'une pâte de chaux à base de PF70 et d'une masse volumique sèche d'environ 1200 kg/m³.

Il a obtenu une $\lambda = 0,373$ W/m.K alors que *Cerezo* [2] a trouvé une valeur de λ comprise entre 0,65 et 0,84 W/m.K pour un mortier confectionné avec la PF70. Quant au comportement mécanique d'un mortier de PF 70, il est comparable à celui du béton classique mais avec une plus faible résistance et aussi un plus faible module d'élasticité, respectivement 10 MPa et 4 GPa pour un rapport Eau/Liant égale à 0,5 [24].

Amziane et Laurent [34] se sont eux intéressés à la mesure de la conductivité thermique des mortiers confectionnés avec une chaux hydraulique et ils trouvent qu'elle varie entre 0,3 et 1,0 W/m.K. Ils ont également noté une résistance à la compression des pâtes de NHL très faible et elle dépend du degré d'hydraulicité de la chaux (NF EN 459-1). Elle est comprise entre 2 et 15MPa à 28 j. Les mêmes constats sont notés pour les mortiers de NHL à 7 j, cependant leurs propriétés s'améliorent au cours du temps.

I.5.4. Béton de chanvre

Le potentiel de développement du béton de chanvre est certes lié à ses propriétés environnementales, économiques mais aussi techniques (Figure I. 21).

Tout d'abord, le béton à base de chanvre a un impact environnemental faible par rapport aux matériaux de construction traditionnels car il induit en effet une faible consommation d'énergie grise (une faible consommation sur l'ensemble de son cycle de vie) et présente un indicateur effet de serre à 100 ans négatif d'une valeur de -35.5 kg CO₂ eq.

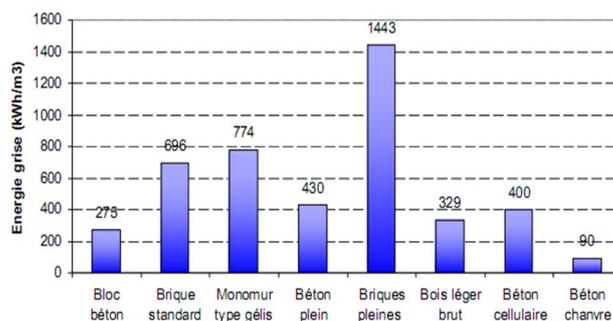


Figure I. 21 : Interêts environnemental (énergie grise)

Ensuite, certaines propriétés spécifiques du béton de chanvre permettent de répondre à des problématiques actuelles du secteur du bâtiment comme son comportement mécanique ductile et ses propriétés hygrothermiques, qui en font un matériau adapté pour une utilisation en rénovation.

L'amélioration énergétique du bâti existant constitue en effet aujourd'hui une cible prioritaire qui conditionne la réduction des impacts environnementaux du domaine de la construction dans son ensemble.

Pourtant, les solutions conventionnelles destinées à la construction neuve ne sont pas toujours adaptées à la rénovation du fait, notamment, de leur étanchéité à l'air et à la vapeur d'eau, ce qui n'est pas le cas du béton de chanvre.

Or ce matériau présente une variabilité de structure en fonction de la formulation employée. Il y a essentiellement 3 applications du béton de chanvre : *Toit*, *Mur* et *Enduit* qui diffèrent par leur dosage en liant (Figure I. 22).

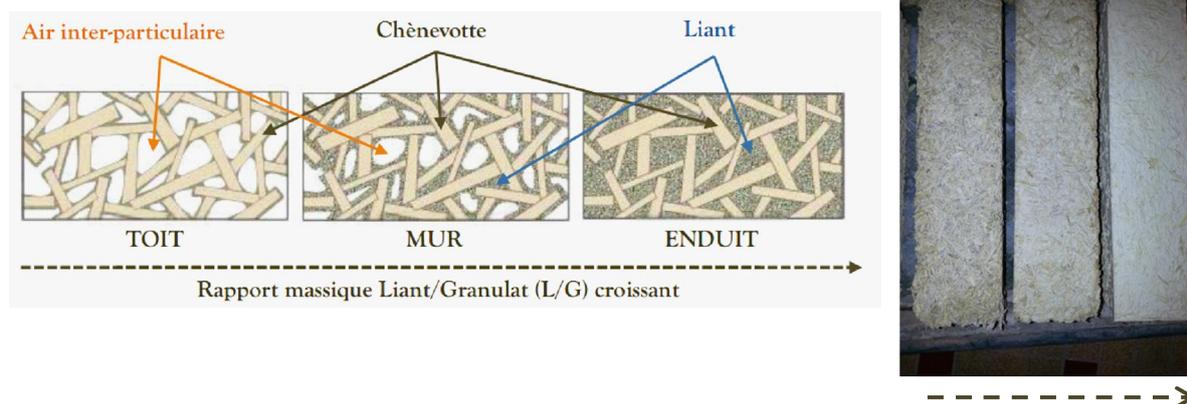


Figure I. 22 : Différentes applications du béton de chanvre

Les différentes applications ont une masse volumique initiale inférieure à 1000 kg/m³ et des masses volumiques sèches entre 250 kg/m³ à 650 kg/m³. Lorsque le dosage en liant est faible les propriétés du mélange *Toit* sont proches de celles du chanvre en vrac. Il est très isolant mais peu résistant ($\rho = 250 \text{ kg/m}^3$). Le mélange *Enduit* est quant à lui caractérisé par une forte teneur en liant. La chènevotte est donc noyée dans une matrice continue et donc le comportement du mélange se rapproche de celui du liant pur. Entre ces deux dosages extrêmes, le mélange *Mur* est un compromis entre la résistance mécanique et l'isolation thermique. Il a une masse volumique moyenne d'environ 400 kg/m³.

Tableau I. 8 : Quantités pour fabriquer un 1 m³ de béton de chanvre [23]

	Chanvre [kg]	Liant [kg]	Eau [kg]	ρ [kg/m ³]
Toit	100	100	200	de 200 à 250
Mur	100	220	350	de 350 à 450
Enduit	100	500	400	de 600 à 660

A présent, nous présentons les différents procédés de fabrication des bétons de chanvre. Il existe donc 3 types de béton de chanvre : coulé, projeté et préfabriqué.

- **Béton de chanvre coulé sur place (ou moulé ou banché)** : c'est l'application la plus répandue du béton de chanvre et celle visée par les Règles Professionnelles d'exécution des ouvrages en béton de chanvre. Elle consiste à mélanger dans une bétonnière ou un malaxeur les différents constituants : chènevotte, liant et eau. Le mélange est alors mis en place manuellement à l'état frais dans un coffrage ou entre deux banches.

Les applications se limitent à des fonctions de remplissage et d'isolation et ne remplissent pas de fonction structurale dans les ouvrages [1]
- **Béton de chanvre projeté** : La technique de projection consiste au pré-mélange à sec des constituants (chènevotte et liant) puis à la pulvérisation au niveau de la lance de projection d'une quantité d'eau réduite [27]. Ainsi, le temps n'est pas laissé à la chènevotte d'absorber l'eau de gâchage, et la quantité d'eau introduite peut être proche de celle nécessaire à l'hydratation du liant. Ce procédé permettrait aussi de réduire le temps de séchage du béton de chanvre de plusieurs mois à une dizaine de jours
- **Béton de chanvre préfabriqué** : cette technique présente l'avantage d'une mise en œuvre plus rapide et un meilleur contrôle de la qualité du produit (température, hygrométrie, force de compaction) [24]. Les dimensions courantes des blocs du béton de chanvre sont de (30×60 cm²), l'épaisseur pouvant varier entre 10, 15, 20 ou 30 cm

I.5.4.1. Propriétés physiques

L'application mur est l'application qui nous intéresse en particulier parce qu'elle permettra d'isoler les parois latérales d'une construction en tuffeau. La masse volumique calculée dans les travaux de recherche est souvent donnée pour un matériau conservé à une température de 23°C et une humidité relative de 50% et est comprise entre 380 kg/m³ et 440 kg/m³ [2,26,35]. Mais elle peut aller jusqu'à 700 kg/m³ en fonction du liant et le procédés de fabrication utilisés [1,30,33]. Quant à la porosité totale du matériau elle varie entre 67 et 76%. Il est important de noter que le béton de chanvre offre une porosité ouverte très proche de sa porosité totale, ce qui pourrait expliquer en partie ses propriétés mécaniques et thermiques.

I.5.4.2. Propriétés de transfert hydrique

a. Imbibition par capillarité

Les résultats des essais d'imbibition par capillarité pour les échantillons de béton de chanvre montrent que le coefficient d'absorption massique varie entre 1,8 et 9,6 kg/m².h^{0.5}. En effet *Evrard* [4], *De Bruijn et al.* [36] et *Walker et al.* [33] ont trouvé 4,42 kg/m².h^{0.5}, 9 kg/m².h^{0.5} et 2,65 kg/m².h^{0.5} respectivement.

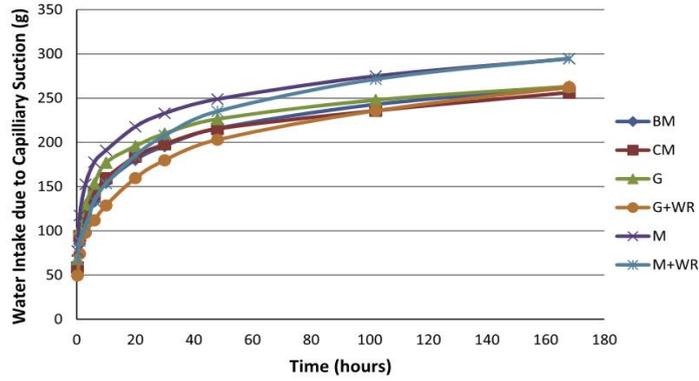


Figure I. 23 : Absorption capillaire des bétons de chanvre [33]

BM (builder's mix), CM (commercial mix), G (contient 30% de laitiers de haut fourneaux), G + WR (avec 0,5 % Méthyle de cellulose), M (contient 20% de métakaolin), M + WR (avec 0,5 % Méthyle de cellulose)

b. Isotherme de sorption

Les isothermes d'adsorption et de désorption sont mesurées à partir de la technique des solutions salines saturées, donc dans la plage des humidités relatives allant jusqu'à 97% (obtenue par une solution de K_2SO_4). Collet et al [28] propose d'appliquer le modèle de GAB (Eq I. 13) pour reproduire les isothermes d'adsorption.

$$\frac{w}{w_m} = \frac{w_m \cdot k \cdot C \cdot \varphi}{1 - w_m \cdot k \cdot C \cdot \varphi}$$

$$w = w_m \cdot \frac{k \cdot C \cdot \varphi}{1 - w_m \cdot k \cdot C \cdot \varphi}; \Delta w = w - w_m$$

$$w = w_m \cdot \frac{k \cdot C \cdot \varphi}{1 - w_m \cdot k \cdot C \cdot \varphi}; \Delta w = w_i - w_m$$

I. 13

Avec

w	[kg/kg]	Teneur en eau à l'équilibre
w_m	[kg/kg]	Teneur en eau correspondant à la saturation de chaque site primaire d'absorption par une molécule d'eau (couche mono-moléculaire)
k	[-]	Facteur de correction des propriétés des molécules des multicouches
C	[-]	Constante de Guggenheim reliant la monocouche à la chaleur de sorption
φ	[-]	Activité de l'eau, humidité relative
R	[J/mol. K]	Constante des gaz parfaits (=8,314 kJ/mol. K)
T	[K]	Température absolue
H_M	[J/mol]	Chaleur totale de sorption de la première couche sur les sites primaires
H_n	[J/mol]	Chaleur totale de sorption des multicouches, qui diffère de la chaleur de condensation de l'eau pure
H_l	[kJ/mol]	Chaleur latente de condensation de l'eau (43 kJ/mol à 25 °C).

Tran Le [32] a repris un modèle analytique d'adsorption/désorption proposé par Merakeb et proposé qu'il peut être appliqué sur toute la plage d'humidité jusqu'à 100%.

Ce modèle est basé sur l'étude de la thermodynamique de l'équilibre de phase de l'eau libre avec sa vapeur saturante ce qui donne une relation simplifiée entre l'humidité relative et la teneur en eau. En effet, l'équilibre monovalent de l'eau liquide avec sa vapeur est exprimé par la relation suivante :

$$\Delta H_s = H_s - H_v + \Delta H_v; \Delta H_s = H_s - H_v \frac{p}{p_s} \quad I. 14$$

Où H_s et H_v sont l'enthalpie de référence et l'enthalpie molaire respectivement

Les molécules d'eau liée occupent toujours l'état d'énergie le plus bas tandis que l'état d'énergie de l'eau libre est le plus haut. Lorsque l'adsorption se fait, l'eau libre passe d'un état haut d'énergie à un état plus bas caractérisé par la chaleur dégagée ΔH_s . Une relation qui permet de relier la teneur en eau et ΔH_s tel que :

$$\Delta H_s = H_s - H_v \frac{p}{p_s} \quad I. 15$$

A partir des équations I. 14 et I. 15, une relation simplifiée qui relie la teneur en eau à l'humidité relative est déduite :

$$\frac{w}{w_s} = \frac{p}{p_s} \exp \left(\frac{\Delta H_s}{RT} \right) \quad I. 16$$

Avec

- w_s Teneur en eau maximale pour une température fixée
- φ Humidité relative
- a Paramètre thermodynamique
- b Constante de calibration

Tran Le a appliqué ce modèle pour les isothermes de sorption trouvées dans la bibliographie or comme l'humidité relative maximale est de 97%, il n'a pas pu vérifier la validité du modèle mais il a obtenu tout de même deux paramètres thermodynamiques puisqu'ils diffèrent entre l'adsorption et la désorption (voir Figure I. 24).

Les courbes de désorption et d'adsorption du béton de chanvre montrent l'existence d'une hystérésis qui influence le comportement hygrothermique du matériau.

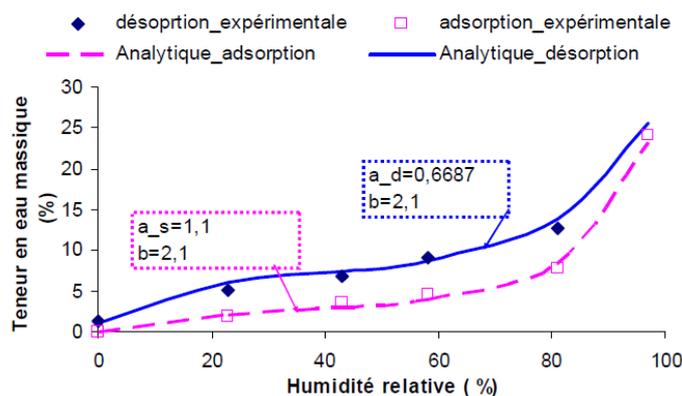


Figure I. 24 : Les isothermes d'adsorption et de désorption expérimentale et analytique du béton de chanvre [32]

c. Perméabilité à la vapeur

La perméabilité à la vapeur δ permet d'évaluer la capacité d'un matériau à transmettre la vapeur d'eau et elle exprime la quantité de vapeur transmise à travers une surface par unité de temps, de différence pression et d'épaisseur (le détail de calcul de la perméabilité à la vapeur d'eau est donné dans le § II.3.3). A partir de la perméabilité à la vapeur d'eau, on peut calculer le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau qui exprime le rapport entre la diffusion de la vapeur d'eau dans l'air à une pression atmosphérique et à 20°C et celle à travers un matériau considéré. Le facteur de résistance à la diffusion est adimensionnel et s'exprime comme suit :

$$\mu = \frac{\delta_{air}}{\delta} \tag{I. 17}$$

Pour des bétons de chanvre appartenant à l'application *Mur*, les valeurs de résistances à la diffusion de la vapeur d'eau sont résumées dans le Tableau I. 9.

Tableau I. 9: Facteurs de résistance à la diffusion de vapeur du béton de chanvre (HR de 0-50%)

Auteur	μ
<i>Evard</i> , 2006	7,68
<i>Collet</i> , 2013	11,8
<i>Chamoïn</i> , 2013	7,8
<i>Ait Ouméziane</i> , 2013	3,91

La résistance à la diffusion de vapeur varie selon la masse volumique, la porosité et surtout en fonction de la formulation.

En effet, la nature du liant utilisé influence de façon considérable le comportement du matériau. Le CEBTP¹⁶ a mesuré des facteurs de résistance à la diffusion sur une même formulation mais en faisant varier le liant et donc souligne une relation entre le liant et la diffusion de la vapeur dans le matériau. Elle est à notre avis particulièrement liée à des modifications de la structure porale (tortuosité, taux de porosité ouverte).

Tableau I. 10 : Mesures du CEBTP du coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau sur différentes formulations de béton de chanvre

Béton de chanvre	Liant			
	NHL2 (LAFARGE)	NHL3, 5 (St ASTIER)	NHL 5-Z (St ASTIER)	Tradical 70 (STRASERVIL)
ρ_s [kg/m ³]	476	563	540	495
μ	2.6	3.6	7.5	12.9

Nous nous intéressons à présent à la variation de la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de l'humidité relative environnante ou de la teneur en eau du matériau.

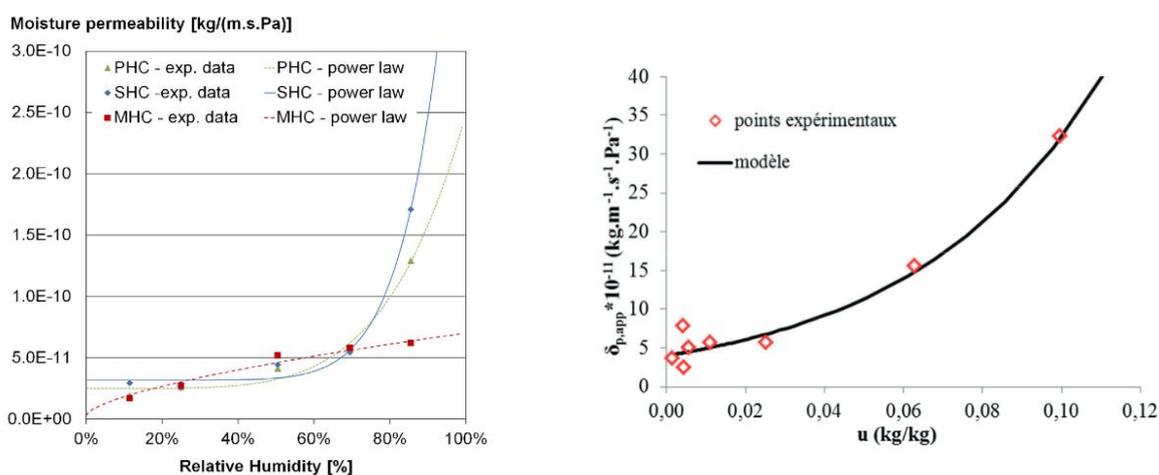


Figure I. 25 : Variation de la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de l'humidité relative (a) [28] et de la teneur en eau (b) [37]

Récemment, les chercheurs ont établi des relations permettant de représenter l'évolution de la perméabilité à la vapeur : de type puissance en fonction de l'humidité relative (φ) et de type exponentielle en fonction de la teneur en eau (v). Collet *et al.* notent un changement d'ordre de grandeur entre 15% et 88% où δ passe de $1,7 \cdot 10^{-11}$ kg/Pa.m.s à $1,3 \cdot 10^{-10}$ kg/Pa.m.s. Cette évolution est même de type exponentiel pour 2/3 des matériaux testés dans la plage des humidités relatives élevées [28]. Ait Ouméziane s'est intéressé à l'évolution de δ en fonction de la teneur en eau du matériau et elle suit une relation de type $\delta = 4,0161 \cdot 10^{2,22} \cdot u^{2,22,222} \cdot u$ [37].

d. Capacité tampon hydrique

La capacité de régulation de l'humidité des matériaux poreux comme le béton de chanvre est un moyen efficace pour améliorer le confort sans consommation d'énergie. La capacité tampon hydrique (en anglais Moisture Buffering Value) renseigne sur la quantité d'eau adsorbée ou émise suite à une variation de l'humidité relative extérieure pendant un temps donné. Ce concept est initié dans le projet *Nordtest* qui a établi une classification permettant d'évaluer la qualité de régulation hydrique d'un matériau à partir de la valeur de sa capacité hydrique tampon (Equation I. 18 et Figure I. 26).

$$I. 18 \quad \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta \varphi}$$

I. 18

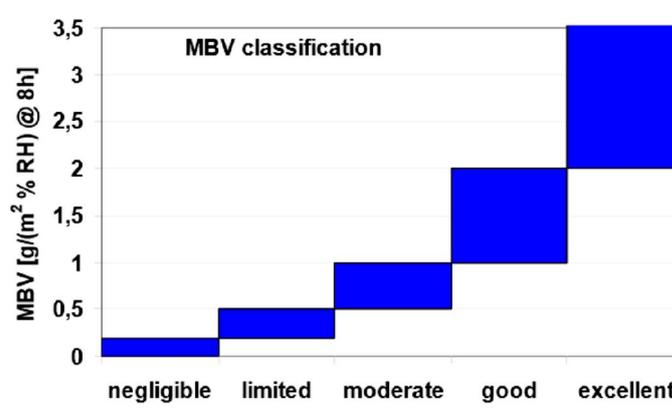


Figure I. 26 : Classification des matériaux suivant la capacité hydrique tampon [38]

La valeur de la capacité tampon hydrique est donc calculée en fonction de Δm [kg] la prise ou perte de masse d'eau pendant une période d'exposition de 8h à φ haute et de 16 h à φ basse à travers une A [m²] la surface exposée.

Le béton de chanvre a une capacité hydrique moyenne de $2,08 \pm 0,1$ g/m²%RH ce qui lui permet d'être classé comme un excellent régulateur d'humidité relative [28,39].

I.5.4.3. Propriétés thermiques

a. Conductivité thermique

La mesure de la conductivité thermique (λ) du béton de chanvre à l'état sec a été effectuée par *Collet, Cerezo, Evrard, Ait Ouméziane* et *Walker et al* [2–4,33,37].

Cerezo [2] a proposé une relation empirique de tendance linéaire afin de prédire la conductivité thermique tel que :

$$\lambda = 0,0198 + 0,0002 \cdot \rho$$

I. 19

D'une part, les résultats obtenus sont globalement cohérents entre eux même si l'écart type est parfois important, en particulier pour les masses volumiques élevées (Tableau I. 11). Nous avons également comparé les valeurs prédites par la relation I. 19 (marqueurs) aux valeurs mesurées (écart type).

Tableau I. 11 : Conductivités thermiques du béton de chanvre sec

Auteur	ρ_s [kg/m ³]	λ [W/m.K]
Cerezo, 2005	400 - 700	0,09 - 0,16
Errard, 2008	460 - 500	0,109 - 0,121
Ait Ouméziane, 2013	200 - 700	0,1 - 0,3
Walker et al, 2014	508 - 569	0,117 - 0,129

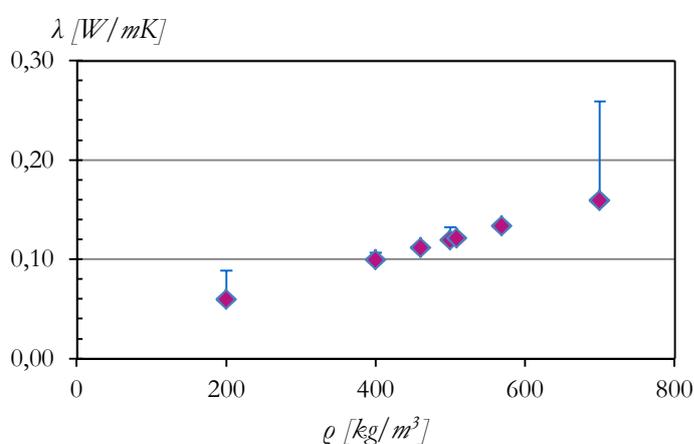


Figure I. 27 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique

Il est à noter que la conductivité thermique augmente avec la teneur en eau qui affaiblira le pouvoir isolant du béton de chanvre par rapport au coefficient théorique mesuré en laboratoire.

Comme pour la masse volumique, une relation linéaire corrèle la conductivité thermique à la teneur en eau et elle est proposée par Collet [3] qui l'a établie à partir de deux types de béton de chanvre dont les masses volumiques sont de 408 kg/m³ et 438 kg/m³ :

$$\lambda = 0,1057 + 0,0029.w$$

I. 20

Or cette loi n'est malheureusement pas vérifiée lorsque nous avons essayé de l'appliquer à des données fournies par Collet et Pretot [35] (Figure I. 28) . En effet, la conductivité thermique mesurée à l'état sec est plutôt de l'ordre de 0,12 W/m.K (pour $\rho = 400$ kg/m³) et la sensibilité de cette grandeur à la teneur en eau est plus forte que prévue (65 fois plus élevée pour la même masse volumique).

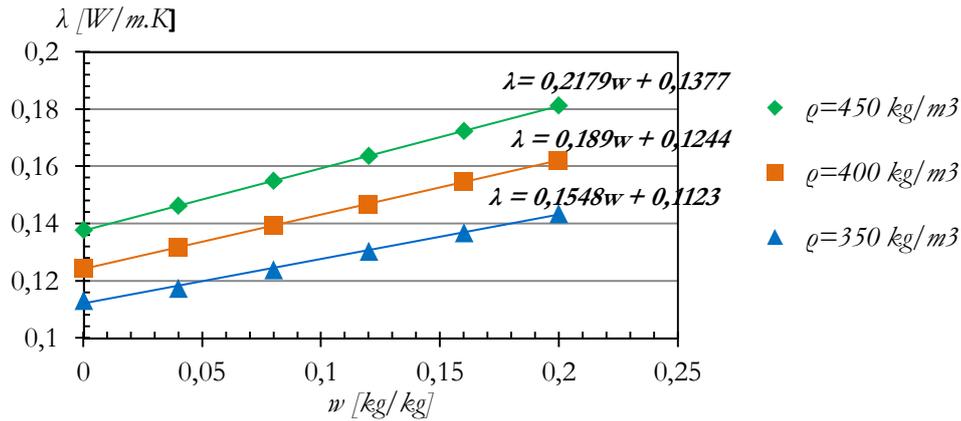


Figure I. 28 : Variation de la conductivité thermique des bétons de chanvre en fonction de la teneur en eau

b. Chaleur massique

Les différents auteurs se sont intéressés également à la détermination de la chaleur massique du béton de chanvre. Les différentes valeurs obtenues sont résumées dans le Tableau I. 12 et elles sont cohérentes excepté pour *Evrard* [4].

Tableau I. 12 : Chaleurs massiques du béton de chanvre sec

Auteur	ρ_s [kg/m ³]	C_p [J/kg. K]
<i>Cerezo</i> , 2005	408	1000
<i>Evrard</i> , 2008	440	1530
<i>Samri</i> , 2008	480	1150
<i>Walker et al</i> , 2014	508	1240

Dans les différents travaux, la chaleur spécifique n'a pas été mesurée directement mais calculée à partir des mesures de conductivité et de diffusivité thermique. Or dans le cas de la thèse d'*Evrard* [4], il sèche ses échantillons à 100°C, ce qui est une température trop élevée pour le béton de chanvre.

Pour le bois, la température de séchage maximale est de l'ordre de 80°C et on recommande même plutôt 40°C afin de ne pas modifier le matériau (réaction de la cellulose et des lignines à la température). Par conséquent, la technique de séchage utilisée (100 °C) a peut-être endommagé le matériau ce qui explique une valeur qui s'écarte de la moyenne.

Toutefois, *Evrard* [4] a suivi l'évolution de la chaleur massique en fonction de l'humidité relative environnante où il souligne une augmentation de 50 % entre les deux états extrêmes : état sec et état saturé (Figure I. 29). Cette évolution est une fonction de la masse volumique et la chaleur massique du matériau sec et de sa teneur en eau. Elle s'écrit comme suit :

$$\rho_w = \frac{\rho_s \rho_w + \rho_w \rho_w}{\rho}$$

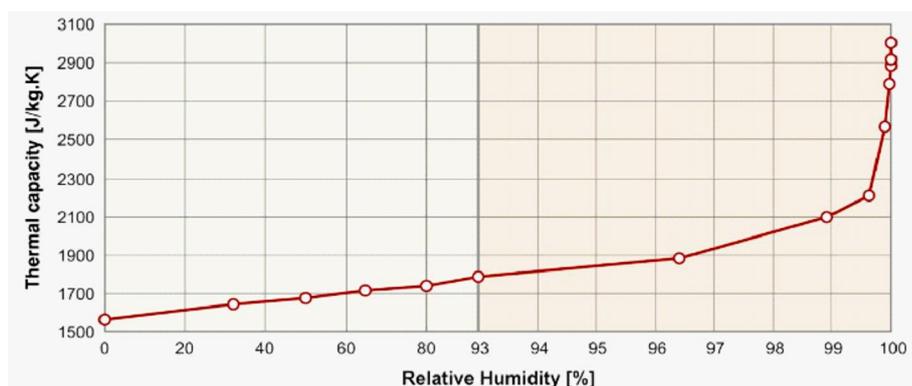


Figure I. 29 : Variation de la chaleur massique en fonction de l'humidité relative [4]

I.5.4.4. Propriétés mécaniques

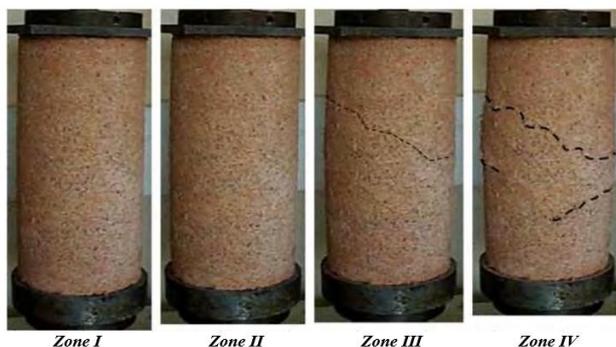
Les propriétés mécaniques du béton de chanvre telles que la résistance à la compression, le module de Young, la déformation ou le coefficient de Poisson ont été largement étudiées. Une courbe contrainte/déformation propre au béton de chanvre est donnée par plusieurs chercheurs. Elle est constituée de 4 phases distinctes (Figure I. 30) :

- **Phase I** : elle correspond au domaine élastique du comportement du matériau, autrement dit la variation de la contrainte en fonction de la déformation est linéaire. Pendant cette phase, c'est principalement le liant qui est sollicité
- **Phase II** : elle correspond au domaine élasto-plastique puisque l'endommagement se développe aussi bien dans la matrice du liant mais aussi à l'interface entre les particules de la chènevotte et la matrice
- **Phase III** : elle est caractérisée par l'augmentation de la contrainte et de la déformation de façon quasi linéaire. Dans cette phase, les particules de la chènevotte reprennent la plus grande partie des contraintes (caractère compressible de la chènevotte) et elle se termine lorsque la matrice du liant est totalement fragilisée. *Nguyen* estime que cette phase se termine lorsque la déformation atteint au moins 40 % [24]
- **Phase IV** : c'est la phase de rupture nette

Les propriétés mécaniques du béton de chanvre dépendent de plusieurs paramètres comme le dosage en liant et sa nature (chaux hydraulique, chaux aérienne, ciment, présence des pouzzolanes et des adjuvants, etc.). Mais elles dépendent aussi de la taille des particules de chènevotte, de leur prétraitement et de leur répartition (longitudinale ou verticale).

D'autres paramètres influencent le comportement mécanique du béton de chanvre. Nous citons à titre d'exemple les conditions de stockage en hygrométrie et température, la date de démoulage ou encore la mise en place (compactage initial ou pas et sa valeur).

Les études sont nombreuses et les conclusions soulignent souvent une résistance à la compression qui dépasse rarement les 3MPa. En plus, le recours à l'utilisation du ciment n'est pas forcément la meilleure solution pour améliorer cette propriété structurale puisque *Bruijn* a montré que les bétons de chanvre confectionnés avec du ciment sont plus fragiles vu que la chènevotte absorbe toute l'eau qui est nécessaire à l'hydratation du ciment [36].



Zone I : Le matériau se comporte de manière homogène

Zone II : développement de l'endommagement de la matrice du liant et/ou de l'interface entre les particules de la chènevotte et la matrice

Zone III : Répartition des contraintes dans les particules de la chènevotte et début de leur compaction : la matrice du liant est fragilisée

Zone IV : Rupture de l'éprouvette

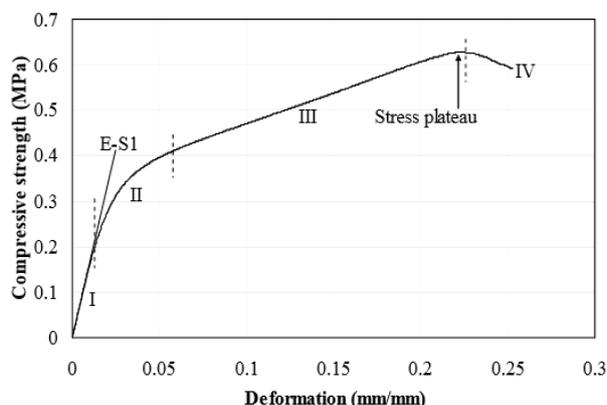


Figure I. 30 : Résultats typiques des essais de compression simple sur des éprouvettes en béton de chanvre [30]

Le Tableau I. 13 résume les propriétés mécaniques du béton de chanvre confectionnées avec des liants différents mais en dosage permettant l'obtention de l'application mur (masse volumique moyenne de 440 kg/m³).

Tableau I. 13 : Caractéristiques mécaniques du béton de chanvre pour dosages en liants pour une application Mur

Auteur	Liant (%)	ρ_s (kg.m ⁻³)	σ_c (MPa)	E (MPa)	ε_{max}
<i>Nguyen</i> , 2010	35,4 – 49,7	-	1,92- 3,6	39 - 147	
<i>Arnaud et al</i> , 2012	24,6 – 47,7	390 - 660	0,19 – 1,18	7- 160	0,03 – 0,13
<i>Dinh</i> , 2014	44,6 – 47,6	448 - 641	0,65 -1,99	14 - 116	0,05- 0,26

I.6. Modèles de transferts couplés de masse et de chaleur

Beaucoup de modèles qui décrivent les transferts hygrothermiques dans les matériaux sont développés en utilisant une multitude de variables et de paramètres. L'évolution de ces modèles s'est opérée principalement par rapport au choix des moteurs de transfert.

Parmi ces modèles nous citons à titre d'exemple les modèles de *Kerestecioglu et Gu* (1989), *Burch et Thomas* (1991), *Duforestel* (1992), *Cunningham* (1998), etc.

Kerestecioglu et Gu ont utilisé la théorie d'évaporation-condensation dans l'état pendulaire (§ I.4.2.2). Ils ne considèrent que la diffusion de la phase vapeur dans le matériau tandis que le transfert de la phase liquide est négligé. L'application de cette théorie est donc limitée à une faible teneur en humidité. *Burch et Thomas* ont développé un modèle numérique, *MOIST*, pour estimer le transfert de chaleur et de masse à travers les murs composites dans des conditions non isotherme. *Duforestel* a formulé ses équations moyennant la pression partielle de vapeur. La diffusion de vapeur est due à deux phénomènes uniquement, la diffusion moléculaire¹⁷ et la diffusion de *Knüdsen*¹⁸. *Cunningham* a développé un modèle mathématique pour des matériaux hygroscopiques dans des structures planes qui utilise une analogie électrique avec des résistances à l'écoulement de vapeur et une fonction d'approximation exponentielle de coefficients de transport de masse constants.

Les différents modèles cités ci-dessus sont souvent jugés simplifiés et ne reproduisent pas la réalité des phénomènes [32]. Mais il existe dans la littérature d'autres modèles plus performants et qui sont valables dans les deux régions hygroscopique et saturée comme le modèle de *Künzler* (1995) et les modèles de *Mendes et al* (2002 et 2005). Ces deux derniers modèles utilisent la teneur en eau. Elle est facile à déterminer et à vérifier expérimentalement et elle a une signification physique directe. Un autre point favorable est que les effets d'hystérésis peuvent être moins évidents sur les coefficients de transports associés aux gradients d'humidité relative puisqu'ils sont associés à des gradients de pression capillaire.

De cette façon, le fait de négliger l'hystérésis implique de susceptibles petites erreurs lorsque la teneur en eau est la force motrice [40].

I.6.1. Paramètres qui influencent les transferts couplés

I.6.1.1. Importance de mesure des propriétés selon l'état hydrique

Nous avons montré dans les paragraphes précédents que les propriétés thermiques et mécaniques dépendent de l'état hydrique du matériau. Il est donc nécessaire de prendre en compte cette relation qui est souvent décrite par des lois linéaires (voire dans certains cas exponentielles) dans les équations de

¹⁷ Le transport de matière résulte de la collision entre molécules. Il n'y a pas d'interaction avec la matrice solide.

¹⁸ Lorsque le diamètre du capillaire est inférieur au libre parcours moyen, il n'y a plus de collision entre particules mais des collisions particules/paroi

transferts. Ceci est d'autant plus important que les matériaux sont de fortes porosités, comme c'est le cas du tuffeau et des bétons de chanvre.

Intégrer les variations des propriétés du matériau en fonction de sa teneur en eau n'offre pas seulement une reproduction plus réaliste des phénomènes naturellement produits dans les parois mais il s'est avéré que cela permet de simuler les interactions paroi/ambiance. *Trabelsi et al* [41] ont effectué des simulations avec et sans prise en compte des transferts d'humidité dans les matériaux et à l'interface matériaux-ambiance (Figure I. 31).

Ils ont montré que le transfert hydrique et le phénomène de sorption/désorption à travers les parois du bâtiment ont des effets majeurs sur l'humidité relative des ambiances habitables. Dans le cas où ces phénomènes sont pris en compte, l'humidité relative de l'ambiance reste inférieure à 75% durant la période d'arrêt du système de climatisation alors dans le cas contraire, la valeur maximale de l'humidité relative dépasse 80%. Néanmoins, la température de l'air ambiant est sensiblement la même dans les deux cas, cela signifie que le transfert d'humidité dans le bâtiment a une influence significative sur la charge de climatisation latente et n'affecte pas énormément la charge de climatisation sensible.

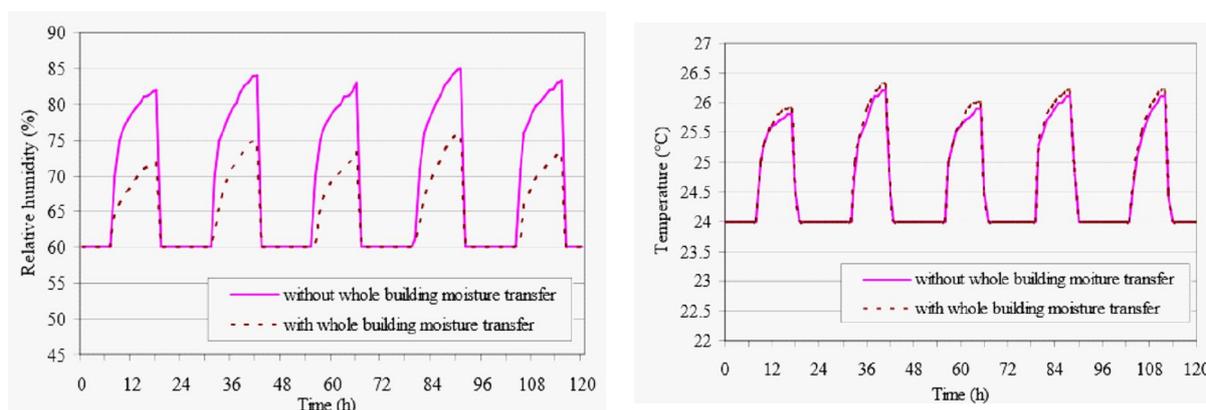


Figure I. 31 : Evolutions des humidités relatives et des températures à la surface intérieure de la paroi [41]

I.6.1.2. Importance de la prise en compte du phénomène d'hystérésis

Les isothermes d'adsorption et de désorption principales ne décrivent pas l'évolution réelle de la teneur en eau en usage courant. Ces courbes principales peuvent être considérées comme des limites physiques à l'évolution de la teneur en eau (Figure I. 32). La teneur en eau à une humidité relative donnée située entre les courbes principales dépend de l'histoire thermo hydrique vécue par le matériau et est décrite par des courbes intermédiaires [37,42].

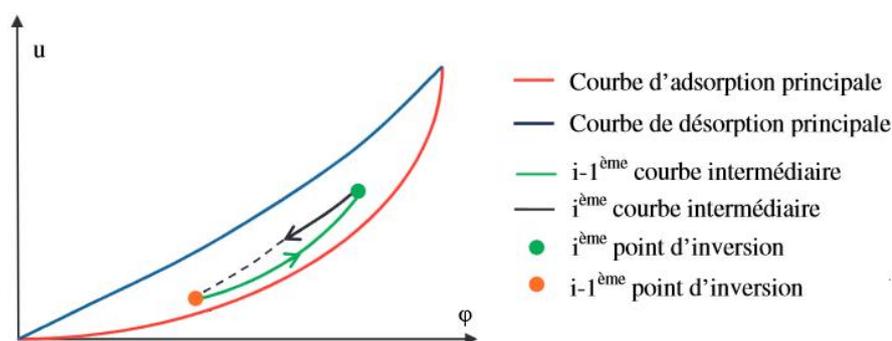


Figure I. 32 : Représentation schématique de l'isotherme de sorption suivant le modèle mathématique de Huong [37]

Plusieurs études se sont intéressées à l'influence de l'hystérésis sur le comportement hygrothermique des parois comme celles de *Crausse et al.* [42], *Kwiatkowski et al.* [43], *Van Bellegem et al.* [44] et *Ait Ouméziane* [37] en particulier lorsqu'elle est soumise à des sollicitations cycliques. En effet, *Crausse et al.* [42] ont montré que les écarts entre les distributions d'humidité sont faibles dans le cas de conditions aux limites stationnaires. Néanmoins, dans le cas de conditions aux limites instationnaires (régime sinusoïdal sur la face extérieure seulement) les écarts s'accroissent lorsque le nombre des cycles subi par le matériau croît et ceci en raison de la modification sur les cycles secondaires des courbes de pression capillaire, des différents états d'équilibre hydriques locaux.

De plus, la mise en œuvre d'un modèle d'hystérésis permet de mieux prédire la quantité d'eau restituée au cours de la phase de désorption. Le modèle d'hystérésis utilise une isotherme de désorption pendant la phase de désorption qui a des valeurs plus élevées pour la teneur en humidité de l'isotherme d'adsorption à la même humidité relative [44]. *Van bellegem et al* ont testé une paroi composée d'une lame d'air de 20,5 cm et de 3 panneaux de plâtres dont l'épaisseur totale est de 37,5 cm. Les distributions en températures et en humidités relatives dans les panneaux de plâtres sont données dans la Figure I. 33.

Ils ont donc mis l'accent sur l'importance de la prise en compte de l'hystérésis (modèle de *Mualem*) et ont essayé de prendre aussi en compte une incertitude de mesure de $\pm 5\%$ sur l'isotherme d'adsorption et trouvent que la combinaison d'une isotherme d'adsorption inférieure (w^-) avec l'hystérésis permet de mieux représenter les résultats expérimentaux (écart type de $\pm 2\%$ en humidité relative et $\pm 0,1^\circ\text{C}$ en température). Les fluctuations des températures simulées et mesurées pourraient être expliquées par le positionnement inexact des thermocouples [44] à savoir que les thermocouples et les capteurs d'humidité relative sont placés dans la même position.

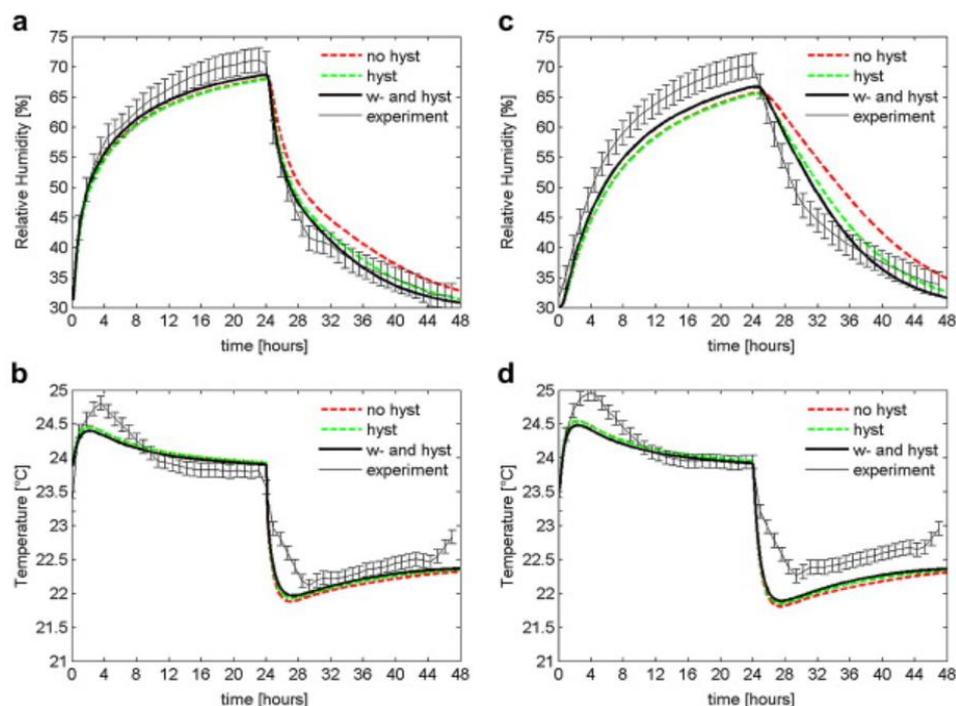


Figure I. 33 : Comparaison entre les résultats du modèle avec et sans hystérésis à 12.5 mm (a, b) et à 25 mm (c, d). en termes d'humidité relative et de température [44]

Enfin, *Ait Ouméziane* [37] a étudié le phénomène d'hystérésis et l'a appliqué aux transferts hygrothermiques dans une paroi en béton de chanvre préfabriqué de 30 cm d'épaisseur sous des conditions isothermes et non-isothermes. Il a déduit dans un premier temps que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la teneur en eau à une humidité relative donnée et par conséquent réduit l'hystérésis.

Il a également déduit que la prise en compte du phénomène d'hystérésis au sein du béton de chanvre est indispensable pour reproduire son comportement hydrique réel en conditions isothermes. En effet, il a comparé les distributions d'humidité relative et de température mesurées au laboratoire à celles d'une part obtenues par un modèle de transferts couplés avec et sans hystérésis (Figure I. 34.b) et d'autres part avec optimisation de la réponse numérique pour le cas d'hystérésis (Figure I. 34.c). Autrement, il a traduit l'histoire hydrique vécue par la paroi de sorte à chercher la solution optimale qui rapproche réponses expérimentales et numériques [37].

Le phénomène d'hystérésis dans le premier cas n'a clairement aucun effet. Après l'optimisation de calcul, les résultats sont améliorés en particulier en termes d'humidité relative et après le pic du 10^{ème} jour. *Ait Ouméziane* explique ces observations par une meilleure évaluation du stockage d'humidité dans la paroi qui est induite par une meilleure reproduction des gradients de pression de vapeur.

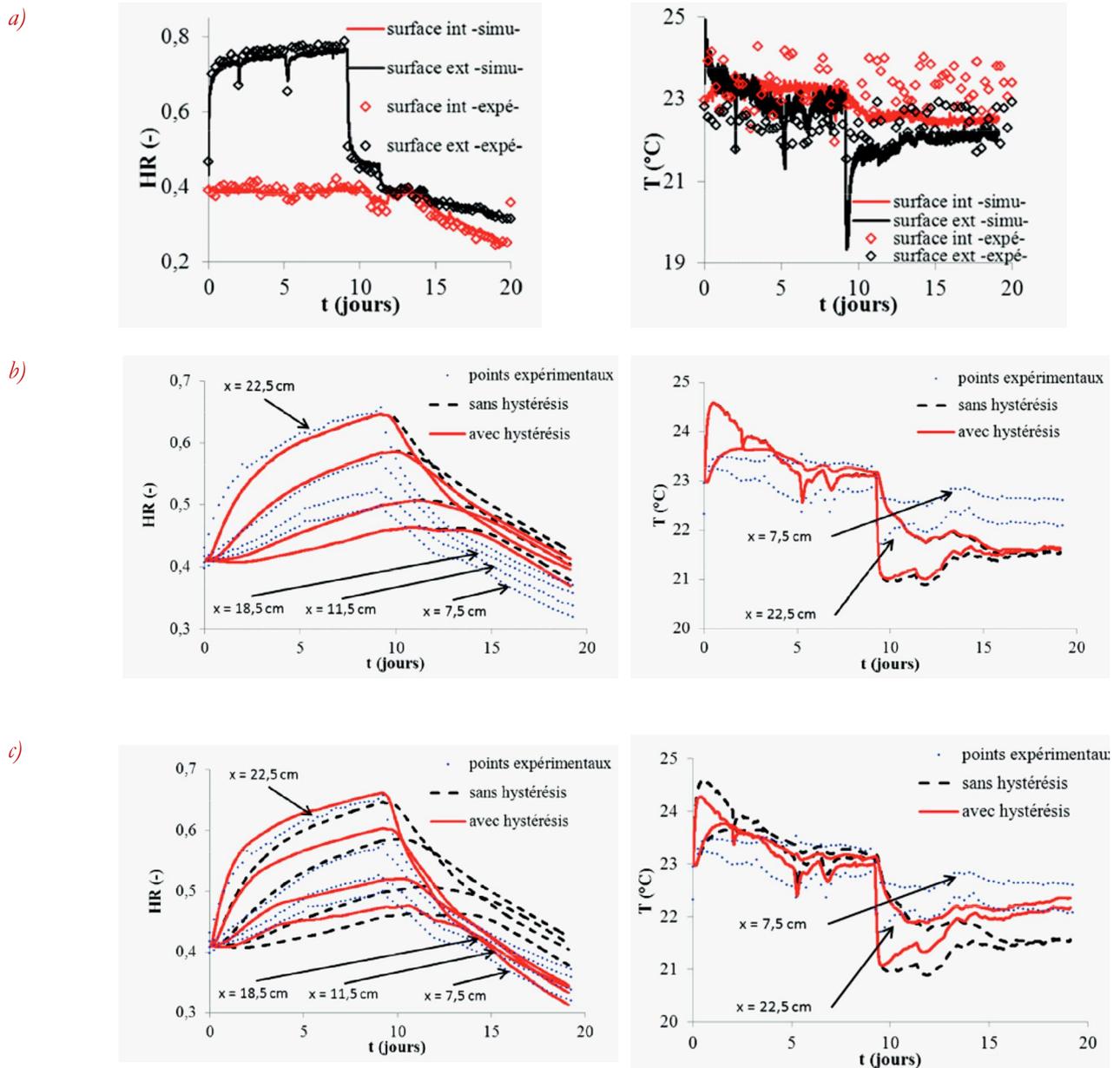


Figure I. 34 : (a) Séquence d'humidité relative et de température imposée et (b) distributions d'humidité relative et de température par application de l'hystérésis et (c) par optimisation de la réponse numérique sur le modèle d'hystérésis [37]

I.6.2. Modèles de référence

Les modèles de *Luikov* [45] et de *Philip et De Vries* [46] sont les principaux modèles de référence. Ils ont choisi pour moteur la température et la teneur en eau massique car cette dernière peut être facilement mesurée et ils ont introduit le couplage de l'humidité avec la température sur les deux phases vapeur et liquide (état solide (glace) n'est pas prise en compte). Ils sont basés sur les principes de conservation de masse et d'énergie.

I.6.2.1. Modèle de Luikov (1964)

Luikov [45] est l'un des premiers à proposer un mécanisme de transfert thermo-hydrique dans les matériaux poreux. Ce modèle a inspiré plusieurs chercheurs comme Ababri et al [47] ou Qin et al [48]. D'après Luikov, la diffusion de l'eau sous forme vapeur ou liquide dépend des gradients de teneur en eau massique, de la température et de la pression totale. Il propose toutefois de séparer le flux liquide et le flux de vapeur car le premier est induit par un gradient de concentration, et le second par un gradient thermique. Il obtient ainsi :

$$\begin{aligned}
 \rho_s \frac{\partial w}{\partial t} + \rho_s \frac{\partial \epsilon}{\partial t} &= \text{div} (j_l + j_v) \\
 \rho_s \frac{\partial w}{\partial t} + \rho_s \frac{\partial \epsilon}{\partial t} &= \text{div} (D_l \text{grad} w + D_v \text{grad} \epsilon + D_{Tl} \text{grad} T + D_{Tv} \text{grad} T)
 \end{aligned}
 \tag{I. 22}$$

Avec

j_l et j_v	[kg/m ² .s]	Flux massique de l'eau liquide et de vapeur d'eau
D_l et D_v	[m ² /s]	Coefficients de diffusion isotherme de l'eau liquide et de vapeur d'eau
D_{Tl} et D_{Tv}	[m ² /s]	Coefficients de diffusion non isotherme de l'eau liquide et de vapeur d'eau
ρ_s	[kg/m ³]	Masse volumique du matériau sec
w	[kg/kg]	Teneur en eau massique
T	K	Température

Or ce système d'équation ne donne pas accès au taux de changement de phase ϵ . Luikov a donc fait intervenir un paramètre supplémentaire, le taux adimensionnel de changement de phase ϵ qu'il définit par :

$$\epsilon = \frac{w - w_s}{w - w_v}
 \tag{I. 23}$$

ϵ varie au cours du temps et en fonction de l'état hydrique du matériau. En effet, lorsque la phase est essentiellement liquide ϵ est à une valeur proche de zéro. Lorsque l'état de l'eau dans le matériau est plutôt sous forme de vapeur, ϵ tend vers l'unité.

La difficulté majeure de ce modèle réside dans la détermination de $\epsilon(w)$. C'est une fonction qui doit être mesurée expérimentalement sinon le calcul du bilan énergétique devient arbitraire.

I.6.2.2. Modèle de Philip et De Vries (1957)

Philip & De Vries [46] ont décrit le flux diffusif comme étant fonction de la teneur en eau volumique et de la température. Ils ont obtenu ce couplage après avoir exprimé la masse volumique de la phase vapeur en fonction de l'humidité relative moyennant l'équation de Kelvin. A partir de la loi de Darcy,

ils ont exprimé le flux en phase liquide en fonction des gradients de teneur en eau volumique et de la température et en prenant en compte aussi l'effet de la gravité.

$$\begin{aligned} \bar{q}_z &= -D_{\theta} \text{grad} \theta - D_{T\theta} \text{grad} T \\ \bar{q}_T &= -D_{T\theta} \text{grad} \theta - D_{TT} \text{grad} T - \rho_l \theta \end{aligned} \quad I. 24$$

Avec

D_{θ} et $D_{r\theta}$	[m ² /s]	Coefficient de diffusion isotherme de l'eau liquide et de la vapeur d'eau
D_{TT} et D_{rT}	[m ² /s.K]	Coefficient de diffusion non-isotherme de l'eau liquide et de la vapeur d'eau
K_z	[m/s]	Conductivité hydraulique du matériau suivant la direction de z (vertical) tel que $K_z = \frac{K_{zz}}{\rho}$
ρ_l	[kg/m ³]	Masse volumique de l'eau
θ	[m ³ /m ³]	Teneur en eau volumique

Comme *Luikov, Philip et De Vries* ont négligé les transferts convectif et radiatif. Les flux de chaleur considérés sont uniquement dus par conduction et par changement de phase. Le système des équations de conservation de masse et d'énergie s'écrivent ainsi comme suit :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \text{div}(\bar{q}_z) + \rho_l \theta \\ \rho_l \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \text{div}(\bar{q}_z) + \rho_l \theta \end{aligned} \quad I. 25$$

Avec

L_v	[J/kg]	Chaleur latente de vaporisation
D_{θ}	[m ² /s]	Coefficient de diffusion d'humidité non isotherme
D_T	[m ² /s.K]	Coefficient de diffusion d'humidité isotherme
$\rho_s C_w$	[J/kg. K]	Chaleur spécifique d'un matériau tenant compte de la teneur en eau du matériau
λ	[W/m. K]	Conductivité thermique du matériau

Dans le cas général où la phase fluide est constituée d'un liquide et d'un gaz, la conductivité thermique du milieu varie aussi en fonction de la teneur en liquide.

De Vries [49] a proposé une expression de la conductivité thermique effective tel que :

$$k_{eff} = \frac{k_l \theta + k_g (1 - \theta) + \rho_l L_v \theta (1 - \theta)}{k_g + \rho_l L_v \theta (1 - \theta) + k_l \theta} \quad I. 26$$

Avec

- $\lambda_{l,n,s}$ Respectivement la conductivité thermique de la phase liquide, de la phase gazeuse et dans le solide
- g_a et g_s Fonctions données sous forme de graphes ou tables
- n Porosité du milieu poreux

I.6.3. Modèle de Künzlel

Le modèle présenté ci-après est un modèle de transferts couplés de masse et de chaleur développé par *H.M Künzlel* (1995) [50]. Il appartient à *Fraunhofer Institut Bauphysik* (IBP) et est commercialisé sous le nom de *WUFI* (*W*ärme *u*nd *F*euchte *I*nstationär). C'est un outil qui a déjà fait ses preuves dans la prévision et le suivi de mouvements d'humidité dans l'enveloppe d'un bâtiment [31]. Il est utilisé dans de nombreux travaux de recherches comme les travaux d'*Evrrard* [4,51], d' *Ait Ouméziane* [37] et d'*Amziane et Arnaud* [34] et récemment *Ryu et al.* [11] et *Barclay et al.* [52].

Ces études se sont toutes tournées vers *WUFI* pour simuler le comportement hygrothermique des matériaux de fortes porosités : brique alvéolée, papiers muraux et surtout des bétons de chanvre. Si pour certains, il s'agit de comparer les résultats expérimentaux aux résultats des simulations pour d'autres il s'agit de prédire le risque de développement de moisissure dans ces matériaux surtout lorsqu'ils sont exposés à des ambiances de fortes humidités. En général, des résultats très concluants sont soulignés dans l'ensemble des travaux ainsi une meilleure concordance entre *WUFI* et les mesures du laboratoire est noté par rapport à des logiciels commercialisés comme *Energy plus HAMT* [52].

Les équations aux dérivées partielles du modèle de *Künzlel* sont [50,53,54] :

$$\begin{aligned}
 \rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \frac{\partial W}{\partial t} &= \text{div}(\lambda \text{grad} T) + \text{div}(g \text{grad} p) - \rho W \text{div}(\text{grad} T) \\
 \rho \frac{\partial W}{\partial t} &= \text{div}(D \text{grad} p) - \rho W \text{div}(\text{grad} p)
 \end{aligned}
 \tag{I. 27}$$

Avec

- ρ [J/m³ K] Capacité thermique volumique
- $\rho W / \rho$ [-] Dérivée de l'isotherme d'adsorption
- λ [W/m K] Conductivité thermique
- ρW [J/kg] Chaleur latente de vaporisation
- D [kg/Pa.m.s] Perméabilité du matériau à la diffusion de la vapeur d'eau
- p_{sat} [Pa] Pression de vapeur saturante
- ρ [kg/ms] Coefficient de conduction liquide

Les deux équations contiennent des termes de stockage et des termes de transport. Le stockage de l'humidité est décrit par la dérivée de l'isotherme d'adsorption.

Cette fonction dépend peu de la température. Le transport en phase liquide est commandé par le gradient d'humidité relative φ . Le coefficient de transport D_φ augmente fortement avec la teneur en eau tandis que l'influence de la température est limitée à son effet sur la viscosité de l'eau.

La diffusion de vapeur est gouvernée par la pression partielle de vapeur P_v qui dépend de l'humidité relative et de la pression de vapeur saturante. Le coefficient de diffusion δ_p dépend légèrement de la température et de la teneur en eau alors que la pression de vapeur saturante augmente d'une manière exponentielle avec la température.

L'enthalpie du squelette solide du matériau et celle de l'humidité contenue dans le matériau constituent le terme de stockage de l'équation d'équilibre de la chaleur. Le flux de chaleur est composé du transfert thermique par conduction qui est fonction de la teneur en eau et du transfert par changement de phase résultant du processus d'évaporation-condensation de l'humidité.

Les effets mutuels de la température et de la teneur en eau sur les différents coefficients conduisent à un couplage fort entre les deux équations.

Une présentation plus complète des équations de conservations et de transfert sera donnée dans le chapitre V où une étude numérique des techniques d'isolation à base de béton de chanvre sera réalisée à l'aide de *WUFI*, le logiciel de calcul des transferts couplés basé sur le modèle de *Künzel*.

I.7. Conclusion

En guise de conclusion, le béton de chanvre présente un fort potentiel de développement en raison de son faible impact environnemental et de propriétés prometteuses en termes de régulation thermique et hydrique des ambiances.

Néanmoins, les travaux menés jusqu'à présent concernent pour la plupart des applications comme un matériau porteur où son compactage à l'état frais semble constituer une solution technologique à l'amélioration des propriétés mécaniques des bétons de chanvre. D'autres études se sont intéressées à ses propriétés d'isolation mais il est toujours étudié dans une configuration de paroi simple.

En matière d'isolation thermique dans le secteur du bâtiment, l'enjeu est de rénover l'existant de manière à garantir sa pérennité et à protéger son identité culturelle d'une part et respecter les objectifs du Grenelle de l'environnement dans le cadre du développement durable d'autre part. Par ailleurs, les propriétés intéressantes de transfert hydrique et thermique du béton à base de chanvre soulignées dans ce chapitre, lui confèrent un potentiel d'application comme matériau d'isolation pour les bâtis anciens en pierre de tuffeau.

Chapitre

II. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Ce chapitre précise les caractéristiques techniques des méthodes d'analyses employées pour caractériser les matériaux étudiés Tuffeau, chaux et bétons de chanvre moulés et préfabriqué. Ces techniques sont souvent recommandées par la normalisation européenne (EN) et/ou internationale (ISO) tel est le cas du banc de porosité accessible à l'eau, de la méthode de la coupelle ou de la technique des solutions salines saturées. Mais d'autres techniques sont recommandées par la communauté scientifique dont les résultats sont souvent jugés fiables comme la diffraction par rayons X, le microscope électronique à balayage et le Belsorp. Enfin les caractéristiques thermiques des matériaux sont déterminées à partir d'une technique développée au sein du laboratoire et qui est basée sur le principe du film chaud plan et dont les propriétés sont obtenues par résolution de la méthode inverse de l'équation de conduction pure.

II.1. Caractérisation minéralogique des matériaux

II.1.1. Microscopie électronique à balayage

Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) permettent d'identifier les phases constitutives des matériaux étudiés. Le microscope électronique à balayage utilisé au sein de notre laboratoire est un *ZEISS EVO@40* (voir Figure II. 1), équipé de détecteurs SEI (Secondary Electron Images) et BSE (Back-Scattered Electron). Il peut fonctionner en vide poussé (HV) et en vide partiel (LV). Il est également associé à un analyseur EDX de marque *BRUKER* (accélération 20 keV).



Figure II. 1 : Microscope électronique à balayage ZEISS EVO@40

II.1.2. Diffraction aux rayons X

L'analyse de phase a été effectuée avec un diffractomètre deux cercles Seifert XRD Calypso (voir Figure II. 2). Il permet deux mouvements de rotation différents : une rotation de 2θ de 20° à 164° , une rotation en Ω , et une rotation en ϕ de 0° à 360° . Il est équipé d'une caméra permettant un positionnement aisé des échantillons, d'un collimateur circulaire (diamètre variant de 0,5 à 3 mm et réglable horizontalement et verticalement) pour limiter la divergence du faisceau de rayons X et choisir les dimensions de la surface irradiée, d'un filtre positionné devant le détecteur (de vanadium pour une anticathode de chrome et de nickel dans le cas d'une anticathode de cuivre) et enfin d'un détecteur ponctuel proportionnel.

Les mesures ont été effectuées en variant 2θ entre 40° et 163° avec un pas de $0,1^\circ$ et un temps d'acquisition de 5s. La longueur d'onde K_α du chrome est $2,28910 \text{ \AA}$. La puissance du générateur a été choisie à 30 kV/35 mA. Un collimateur primaire de diamètre de 0,5 mm a été utilisé.

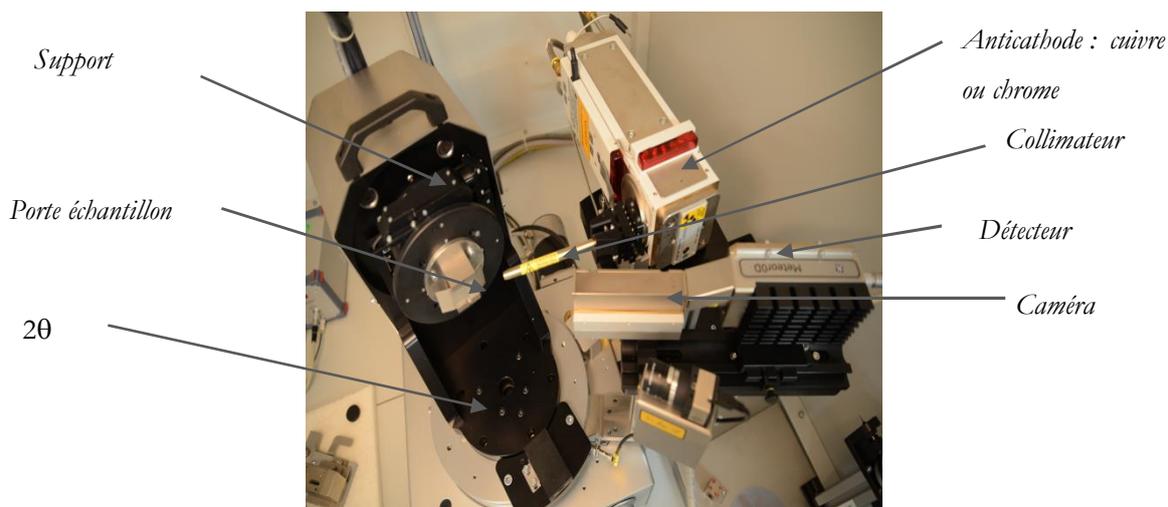


Figure II. 2 : Goniomètre Seifert XRD Calypso

II.2. Volume Élémentaire représentatif (VER)

La taille des éprouvettes doit respecter une notion fondamentale qui est celle du volume élémentaire représentatif (VER) et qui doit respecter les conditions données par *Whitaker* [7] :

- R_0 , rayon du VER, est très petit devant la taille du milieu étudié.
- $l_f \ll R_0 \ll L$ où L est la dimension caractéristique de l'ensemble du matériau et l_f est la taille caractéristique de la porosité.

En effet, le VER doit être suffisamment petit pour prendre en compte la structure microscopique du matériau et suffisamment grand pour pouvoir en décrire le comportement global.

Les effets d'échelles pour le tuffeau ont été observés dans les travaux Beck [7]. Il a mesuré la porosité totale accessible à l'eau afin de connaître la taille minimale des échantillons de pierre. En effet, la porosité totale macroscopique a été déterminée en utilisant un cube de 7 cm d'arête. Ce cube a ensuite servi pour confectionner différents échantillons cubiques d'arêtes égales à 5 ; 3 ; 2 ; 1,5 ; 1 ; 0,8 et 0,5 cm. A l'issue de cette étude, aucun effet d'échelle concernant la porosité totale n'est détectée (Figure II. 3), même pour un volume d'échantillon de 0,125 cm³.

Le choix des tailles des éprouvettes des bétons de chanvre est également élaboré après une recherche primordiale concernant le VER. Les résultats de *Collet* et *Evrard* [3,4] montrent que la dimension du VER du béton de chanvre est de l'ordre de 100 cm³. Collet a donc mesuré la masse volumique apparente sur des échantillons cubiques de plus en plus petits (20, 10, 5 et 2,5 cm d'arête). Six échantillons sont testés pour les échantillons mères (les cubes de volume = 8 dm³) et six échantillons pour les autres échantillons.

Les critères retenus par *Collet* [3] pour que le volume soit considéré représentatif sont les suivants:

- La variation de la masse volumique apparente moyenne des échantillons testés ne doit pas excéder 5 % par rapport à celle mesurée pour l'échantillon mère.
- Le coefficient de variation (ou l'écart relatif maximal) dans la même série ne doit pas dépasser 10 %.

Quant à *Evrard* [4], il a effectué des analyses visuelles de la porosité (Figure II. 3) et il a estimé la dimension d'un VER à un cube d'arête de 4,7 cm ce qui est en conformité avec les résultats de *Collet* qui a préconisé une arête de 5 cm.

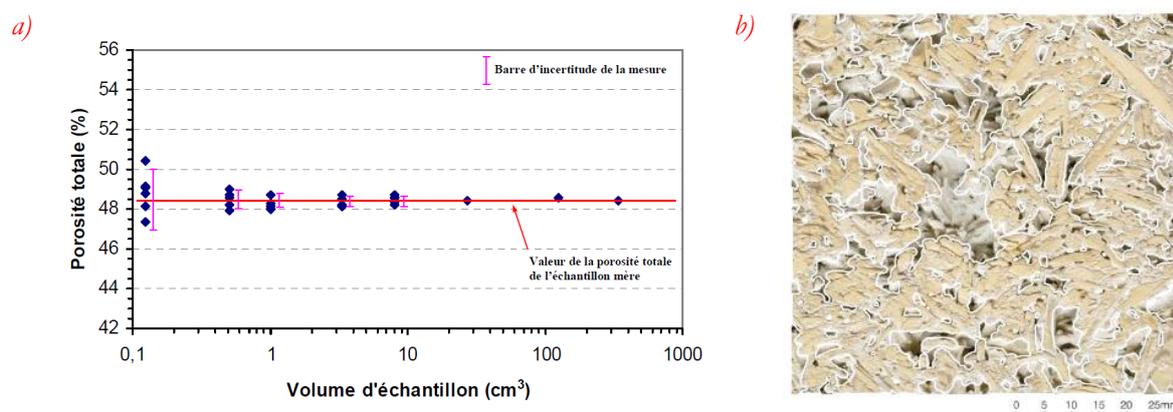


Figure II. 3: Mesure de la porosité totale a) par pesées hydrostatiques [7] et b) par analyse visuelle [4]

II.3. Détermination des porosités

Il existe un lien étroit entre la structure porale, l'état hydrique du matériau et les transferts hydrothermiques. Il est donc indispensable de caractériser les matériaux étudiés, sur le plan structural, notamment de déterminer la porosité et la distribution porale.

II.3.1. Porosité accessible à l'eau

La porosité totale (n) d'un matériau poreux est définie comme le rapport du volume des vides (somme du volume d'eau et du volume d'air) sur le volume total de l'échantillon. Cette grandeur est définie en II. 1 et elle est exprimée en pourcentage.

$$n = \frac{V_v}{V_t} \times 100 = \frac{V_t - V_s}{V_t} \times 100 \quad \text{II. 1}$$

Les pierres sédimentaires telles que le tuffeau ne possédant pas ou peu de porosité occluse, la porosité accessible à l'eau sous vide correspond donc à la porosité totale du matériau [7].

La porosité totale peut être alors mesurée par la méthode de la pesée hydrostatique qui est fondée sur le principe de la poussée d'Archimède sur un échantillon poreux saturé sous vide et immergé dans l'eau.

La procédure appliquée, décrite dans la Figure II. 4, suit la norme AFPC-AFREM- modifiée [56]. Le principe consiste à sécher les échantillons jusqu'à masse constante (M_j).

L'échantillon est ensuite placé dans un dessiccateur étanche sur une grille en céramique perforée afin d'optimiser la surface de contact. Une fois le dessiccateur fermé, le vide est réalisé à l'aide d'une pompe à vide jusqu'à ce que l'on atteigne une pression constante de 50 mbar. Ensuite, le vide est maintenu pendant au moins 4h. L'étape suivante de saturation doit suivre la procédure détaillée sur la Figure II. 4-a :

- Immersion dans l'eau déminéralisée à mi-hauteur durant 48h
- Immersion complète dans l'eau déminéralisée durant 24h supplémentaires

A l'issue de la saturation, les éprouvettes saturées sont pesées, tout en restant immergées dans l'eau pour obtenir la masse en immersion M_{hyd} . Elles sont ensuite essuyées avec un chiffon humide puis pesées dans l'air pour obtenir M_{sat} . La densité de l'eau étant égale à 1, la porosité totale est calculée suivant II. 2:

$$P_t = \frac{M_{sat} - M_j}{M_{sat} - M_{hyd}} \times 100 \quad \text{Avec} \quad \rho_{air} = \frac{M_{sat} - M_j}{V} \quad \rho_{eau} = \frac{M_{hyd} - M_j}{V} \quad \text{II. 2}$$

Néanmoins, le béton à base de chanvre est un matériau avec une porosité ouverte très proche de la porosité totale [28]. L'essai de détermination de la porosité à l'eau suivant la procédure AFPC-AFREM modifiée décrite dans le paragraphe précédent est inadaptée pour le béton de chanvre. En effet, dès que le matériau est retiré de l'eau déminéralisée pour effectuer la pesée dans l'air, l'eau contenue dans les pores de gros diamètre quitte le matériau par gravité.

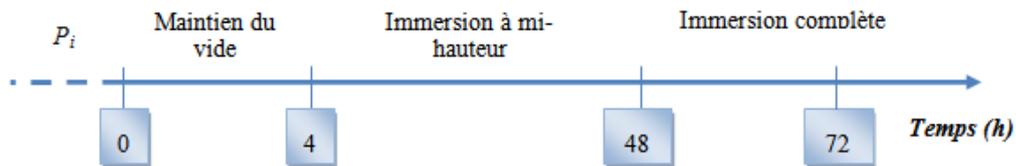
Les forces capillaires sont trop faibles pour retenir l'eau dans ces pores. Il est ainsi nécessaire d'utiliser un moule en PVC ayant la même section que l'échantillon pour préserver toute la quantité d'eau absorbée dans l'échantillon. Ce dispositif est également mis sous vide jusqu'à une pression de 50 mbar pour permettre une pénétration de l'eau plus efficace et le reste de la procédure est inchangé.

On peut déduire en outre de la valeur de la porosité totale, la teneur en eau maximale (w_{max}) qui correspond à la quantité d'eau maximale que l'échantillon peut retenir dans ses pores inter granulaires dans le cas du tuffeau et inter et intra granulaires dans le cas du béton de chanvre. Cette teneur en eau maximale est calculée suivant l'équation II. 3.

$$P_i = \frac{V_{\text{air}} - V_{\text{eau}}}{V_{\text{air}}} \times 100$$

II. 3

a)



b)



Figure II. 4 : Procédure (a) et dispositif de saturation et pesée hydrostatique (b) pour la détermination de la porosité accessible à l'eau

II.3.2. Porosité par intrusion au mercure

La méthode d'intrusion au mercure constitue l'un des principaux outils d'investigation des matériaux poreux car elle permet une investigation du réseau poreux dans une plage étendue [57]. Le principe de la porosimétrie par intrusion au mercure consiste à mesurer le volume de mercure injecté dans l'échantillon poreux pour chaque palier de pression appliqué.

En raison de sa tension superficielle élevée, le mercure se comporte comme un liquide non-mouillant lorsqu'il est en contact avec la plupart des matières solides. Par conséquent, il ne pénètre dans les pores que sous une pression appliquée [58]. La pression (P) nécessaire pour s'introduire dans la matière poreuse est une fonction de l'angle de contact (θ) de mercure, de sa tension superficielle (σ) et du rayon de pore (r). Cette relation est déterminée grâce à la loi de Laplace (Eq II. 4)

$$P = \frac{2\sigma \cos\theta}{r}$$

II. 4

Où σ est la tension superficielle (0.485 N.m^{-1}) et θ est l'angle de contact entre le mercure et le pore (130°).

L'essai consiste ainsi à sécher à 45°C des échantillons de volume de 2,3 cm³ pour le tuffeau et de volume de 9,4 cm³ pour le béton de chanvre.

Nous avons utilisé un porosimètre *Micrometrics Auto pore IV 9500* avec une pression maximale de 228 MPa pour une plage de pore de 6 à 0.005μm (voir Figure II. 5).

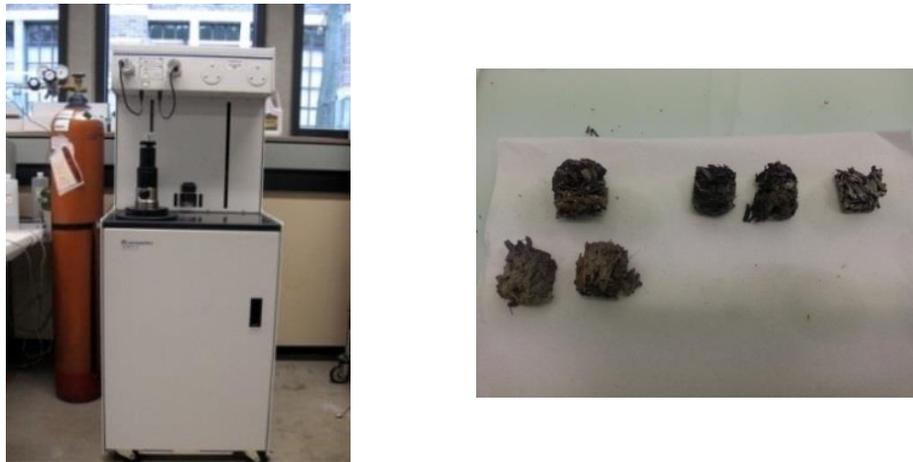


Figure II. 5: Descriptif d'un essai de porosité au mercure (appareil et échantillons de béton de chanvre)

Le principal résultat de cette méthode est la distribution des pores et cela à partir d'une courbe caractéristique de l'essai $dV/d\log D=f(r)$. Elle traduit le volume de mercure injecté pour chaque rayon capillaire d'accès et donc à partir de laquelle nous déterminons la nature de la porosité (micro, méso ou macro porosité) et le mode de distribution des pores : mono, bi ou poly modale.

La Figure II. 6 illustre deux exemples possibles où dans la première courbe il y a la dominance des micropores (distribution monomodale) et dans la deuxième la distribution est polymodale avec coexistence des différentes tailles de pores principalement la microporosité et la méso porosité.

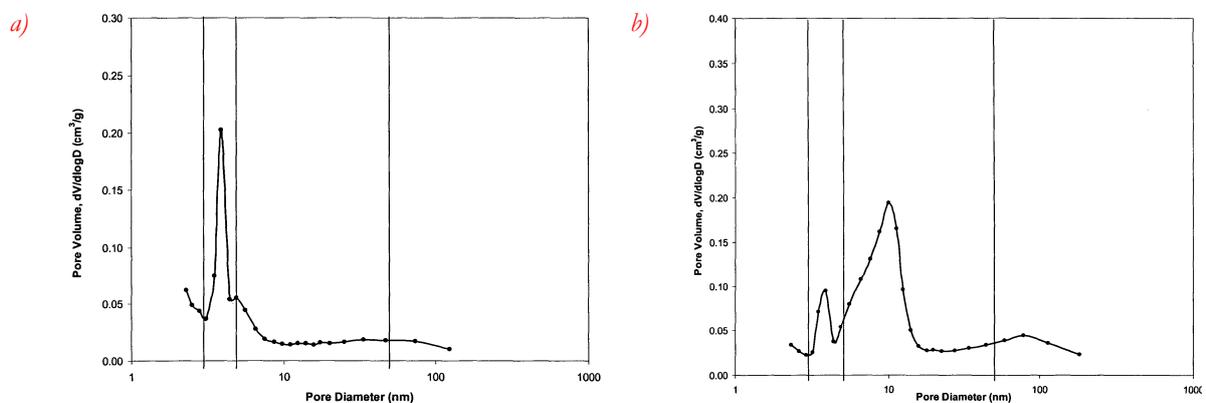


Figure II. 6 : Représentation schématique des courbes a) monomodale et b) bimodale obtenues par la méthode d'intrusion au mercure

II.3.3. Effet Bouteille d'encre

Il existe une différence entre la porosité obtenue par intrusion à l'eau et par intrusion au mercure. Cette dernière est souvent sous-estimée puisque la technique utilisée ne couvre qu'une plage de diamètres de pores restreinte par rapport à celle par intrusion à l'eau. En outre, il y a l'effet « *bouteille d'encre* » qui a principalement pour résultat de surestimer les petits pores au détriment des plus grands [7,20,59].

Lorsque plusieurs capillaires de rayons différents se succèdent (Figure II. 7), la première pression P_1 correspond à une taille de pore de rayon R_1 (Figure II. 7- a). Le fluide pénètre par la suite jusqu'au prochain capillaire de rayon R_2 inférieur à R_1 (Figure II. 7 - b) et se trouve bloqué : c'est l'effet « *bouteille d'encre* ». En augmentant progressivement la pression jusqu'à P_2 , le fluide envahit non-seulement la partie 2, mais aussi toutes celles qui suivent, jusqu'à la rencontre d'un capillaire de rayon inférieur à R_2 (Figure II. 7 - c).

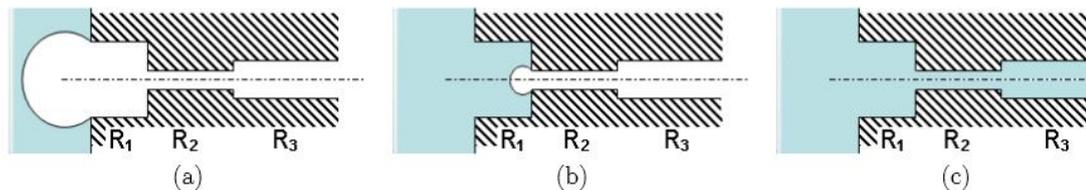


Figure II. 7: Effet bouteille d'encre [59]

II.4. Détermination des coefficients de transfert hydrique

II.4.1. Imbibition par capillarité

Les propriétés d'imbibition par capillarité d'un matériau poreux sont directement liées à la taille et à la forme des pores, ainsi qu'à la connectivité du réseau poreux. Les essais d'imbibition d'eau par capillarité renseignent sur les cinétiques de succion en régime bi-phasique eau/air.

Le principe de ces essais est donc de suivre la masse d'eau absorbée par le matériau au cours du temps afin de déterminer selon la loi de *Washburn* (II. 5) le coefficient de cinétique de prise de masse en eau A [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$] et le coefficient d'ascension de la frange capillaire B [$\text{m}/\text{s}^{0,5}$] (II. 6 et II. 7).

$$h = \frac{A}{B} \sqrt{t} \quad ; \text{Influence de la gravité étant négligeable} \quad \text{II. 5}$$

$$h = \frac{A}{B} \sqrt{t} \quad \text{avec} \quad A = \frac{2 \gamma \cos \theta}{\sqrt{\rho g}} \quad \text{II. 6}$$

$$h = \frac{A}{B} \sqrt{t} \quad \text{avec} \quad B = \frac{2 \gamma \cos \theta}{\rho g} \quad \text{II. 7}$$

Où b [m] est la distance parcourue par le ménisque, r_c [m] est le rayon du capillaire, η [10^{-3} kg/m.s] est la viscosité dynamique de l'eau, σ [0.0723 N.m $^{-1}$] est la tension superficielle eau/vapeur, ρ est la masse volumique de l'eau et t [s] est le temps d'imbibition

La procédure de mesure des coefficients de *Wasburn* suit la norme *NF B10-502* (1973), la préconisation *Unesco-RILEM n°II-6* (1978) et la norme européenne *EN 1925* (1999). Cette procédure est décrite dans la Figure II. 8.

Les essais sont effectués sur des éprouvettes cylindriques de 11 cm de diamètre. La hauteur des échantillons est de 5 cm pour le tuffeau et de 22 cm pour les bétons de chanvre moulés. Néanmoins les échantillons de béton de chanvre préfabriqué sont prismatiques et leur hauteur varie entre 14 et 18 cm. Les surfaces latérales de l'ensemble des échantillons testés sont rendues imperméables et leur base est immergée sur 5 mm. Le bac d'essai est ensuite couvert afin de limiter l'évaporation et conserver une humidité relative de 100 % autour des échantillons. La seule précaution à prendre consiste, avant chaque pesée et à l'aide d'un chiffon légèrement humide, à éliminer la pellicule d'eau retenue sur la face inférieure de l'échantillon.

Le suivi de masse des éprouvettes en tuffeau a été réalisé à [15 min; 30 min ; 1h ; 2h ; 4h ; 8h ; 12h ; 24h et 48h] or pour les bétons à base de chanvre nous avons ajouté des temps de mesure intermédiaires à 5 et 10 min et nous avons également prolongé la durée totale de l'essai pour qu'elle soit finalement de 22 jours avec des pesées quotidiennes.

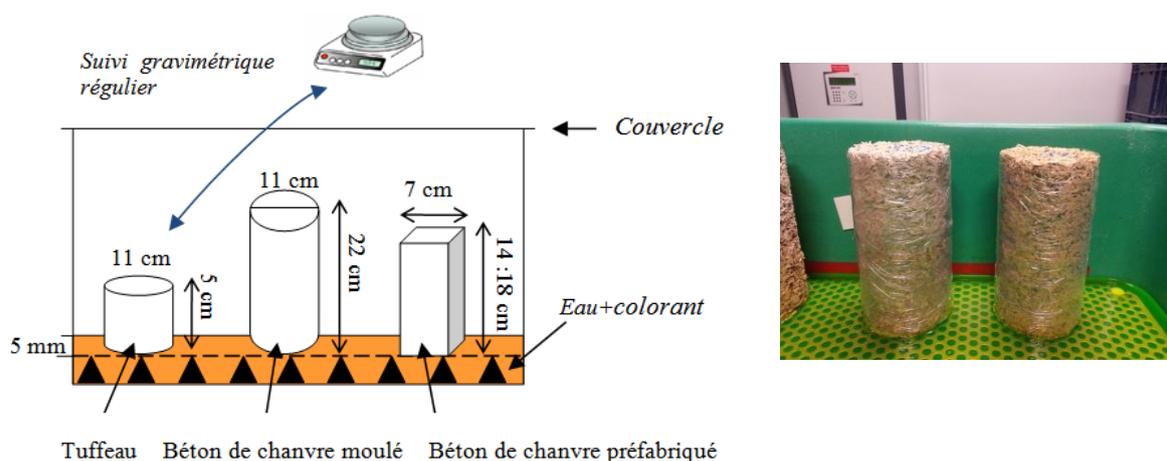
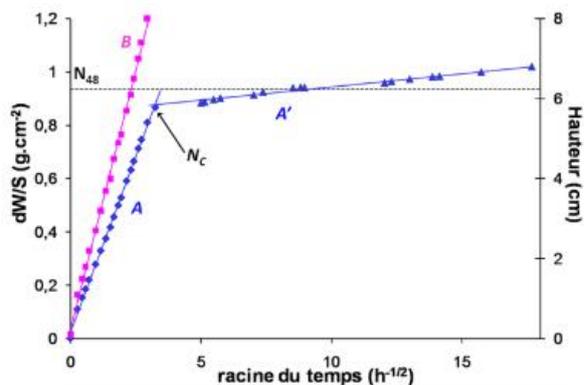


Figure II. 8 : Essai de remontée capillaire, schéma de principe (à gauche) et photos des échantillons de bdc - NHL en cours d'essai (à droite)

La forme des courbes de capillarité renseigne sur l'homogénéité des réseaux [60]. En effet, pour un réseau uni-modal, (voir Figure II. 9.a), les valeurs maximales prises en compte dans la détermination graphique des coefficients A et B sont atteintes de manière synchrone.

Ce cas reflète l'existence d'une famille de pore prédominante et bien connectée. Un autre cas peut être décrit (voir Figure II. 9.b) et qui s'exprime par des ruptures de pentes qui traduisent soit l'existence de deux ou plusieurs réseaux de pores distincts intervenant conjointement (avec des vitesses différentes), soit des hétérogénéités stratigraphiques marquées (en particulier pour les roches sédimentaires)

a)



b)

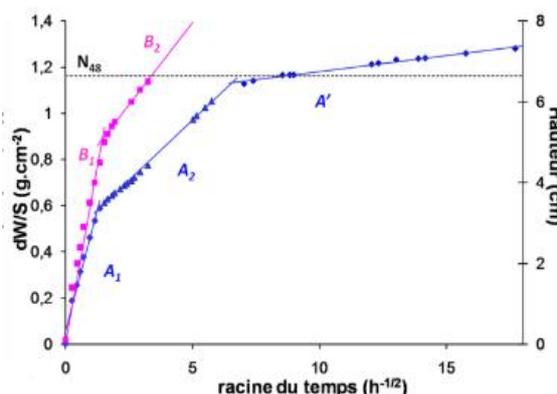


Figure II. 9 : Courbe de capillarité caractéristique a) d'un réseau homogène b) d'un réseau hétérogène. A et A' coefficients de prise de masse, B coefficient d'ascension de la frange capillaire, N_c porosité capillaire et N_{48} porosité libre [8]

II.4.2. Isothermes de sorption

La relation activité de l'eau (ou humidité relative)/teneur en eau est intimement liée à la structure poreuse, et pour un matériau donné, elle constitue une caractéristique intrinsèque importante [7]. Cette relation a été étudiée par deux méthodes différentes, la première est volumétrique par le biais de *Belsorp aqua 3* et la seconde est plutôt gravimétrique en utilisant les solutions salines saturées.

a. Méthode volumétrique

Le *Belsorp aqua 3*, décrit dans la Figure II. 10, est une technique de mesure qui s'appuie sur la théorie volumétrique. C'est un dispositif de mesure automatique de variation de volume de la vapeur d'adsorption/désorption. Cette technique consiste à mesurer avec précision l'adsorption et la désorption. Elle comprend :

- un prétraitement de l'échantillon
- la mesure du volume mort
- la mesure de sorption

Le prétraitement se décompose en 2 étapes : la première consiste à sécher l'échantillon mis en place dans sa cellule à 40 °C pendant 24 h alors que la deuxième étape permet de conditionner tout le système, capteurs et échantillon, à 20 °C.

Cette température est la température de l'essai et elle est maintenue pendant 1h après l'équilibre thermique. Ensuite, la mesure du volume mort se fait par injection de l'Hélium à pression atmosphérique. En effet, ce volume est invariable durant l'essai. Enfin, la quantité adsorbée est calculée à partir de la variation de pression de gaz dans le système de mesure, par l'intermédiaire d'une vanne.



Figure II. 10 : Belsorp aqua 3 : photo (à gauche) et principe de fonctionnement (à droite)

b. Méthode gravimétrique

Le principe de la méthode, présenté dans la Figure II. 11, consiste à utiliser des enceintes où règne une humidité contrôlée par une solution saline saturée. En effet, une solution sursaturée en sel au sein d'un système fermé influence l'humidité relative du volume d'air considéré ce qui justifie son utilisation pour fixer l'humidité relative de l'air lors d'essai. Dans cette étude, l'isotherme d'adsorption est obtenue par mesure gravimétrique à l'aide d'une balance dont la résolution est de 10^{-3} g. La quantité d'eau adsorbée sur un échantillon représentatif de 100 cm^3 , est mesurée pour différentes d'humidités relatives fixées par des solutions salines saturées au nombre de 6 (33, 55, 65, 76, 86 et 97%). Les sels utilisés sont récapitulés dans le Tableau II. 1.

Tableau II. 1 : Solutions salines utilisées pour la détermination de l'isotherme d'adsorption par suivi gravimétrique

Solution saline	Humidité relative à 20°C [%]
MgCl ₂	33
Mg (NO ₃) ₂ 6H ₂ O	55
NH ₄ NO ₃	65
Na Cl	76
KCl	86
K ₂ SO ₄	97

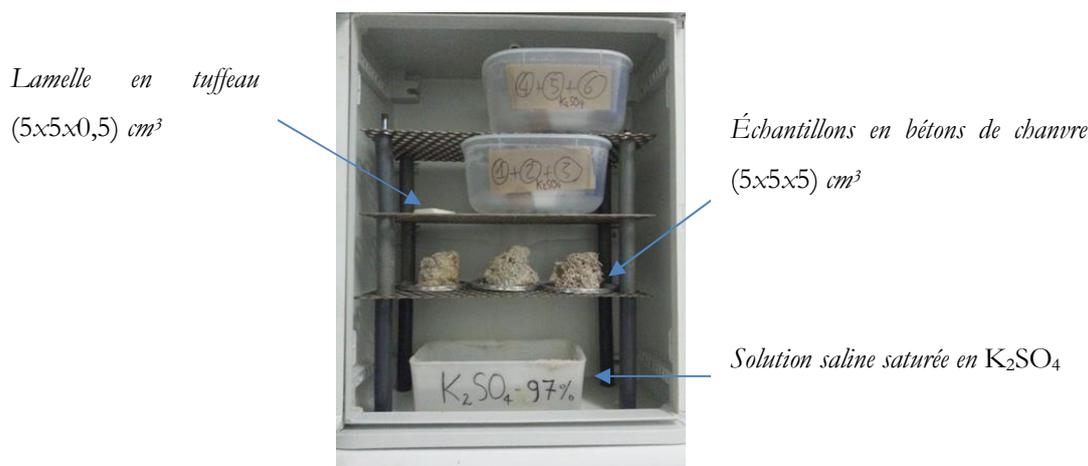


Figure II. 11: Photo d'une enceinte climatique utilisée pour la détermination de la courbe d'adsorption à 97% et 20°C

A chaque pesée une teneur en eau est calculée suivant l'équation II. 8 :

$$w = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \quad \text{II. 8}$$

Où w est la teneur en eau (g d'eau/g matériau sec) m_1 et m_2 sont respectivement la masse à l'instant de mesure et la masse initiale du matériau sec.

Modélisation des courbes d'adsorption

Les courbes d'adsorption à 20 °C sont modélisées avec le modèle de *Guggenheim–Anderson–De Boer* (GAB). Ce modèle est largement utilisé dans les laboratoires de recherche et il permet de couvrir une plage d'humidité de 0,5 % jusqu'à 95 % [61,62]. Il s'écrit comme suit (II. 9) :

$$\frac{w}{w_m} = \frac{C \cdot \varphi \cdot K}{1 - \varphi} \cdot \frac{\varphi}{1 - \varphi + C \cdot \varphi} \quad \text{II. 9}$$

Où w est la teneur en eau (g d'eau/g matériau sec), φ est l'humidité relative (-), w_m est la teneur en eau mono-moléculaire décrite dans la théorie de BET (g d'eau/g matériau sec), C est la constante de Guggenheim liée à la chaleur de sorption et K est une constante liée aux propriétés des molécules multicouches.

Les paramètres du modèle sont calculés en utilisant la méthode d'optimisation Newton multivariable de subroutine *Solver* du programme *Microsoft Excel* et dont l'objectif est de minimiser la somme des carrés des résidus des données expérimentales et des données obtenues par modélisation.

c. Correction des isothermes d'adsorption

Le critère de fin des essais par suivi gravimétrique est la stabilisation de la masse. Cela est vérifié, suivant les recommandations du *Grandubé* [63], lorsque la différence de masse entre deux pesées successives à intervalle de temps régulier, est inférieur à 0,05 %. *Collet et al.* et *Tran Le* [28,32] ont revalorisé cette quantité à 0,1 %. Néanmoins ce critère n'est encore pas satisfait pour nos matériaux à base de chanvre même après 400 jours d'essai.

En effet, le développement de moisissures à la surface des échantillons conservés dans une ambiance à 97 % modifie le bilan de masse d'eau retenu. Afin de limiter la durée d'essai et ainsi d'éviter de fausser ses résultats du fait d'un développement trop important de moisissures, *Collet et al* [28] ont proposé de baser le traitement sur des mesures obtenues durant la phase transitoire. Pour cela, on suppose que la cinétique de prise de masse peut être décrite par une loi exponentielle telle que celle décrite dans la relation II. 10. La masse à l'équilibre $m_{\infty,p}$ peut donc être prédite grâce à une minimisation de l'écart entre les données mesurées durant la phase transitoire et les prédictions du modèle. Les paramètres de minimisation sont les paramètres a , b et c :

$$m_{i,p}(t) = m_{\infty,p} + (m_i - m_{\infty,p}) e^{-\frac{t}{a}} \quad (II. 10)$$

Avec $m_{\infty,p}$ est la masse de l'échantillon à l'équilibre pour une humidité relative donnée, m_i est la masse initiale, $\Delta m(t)$ est le gain de masse au cours de l'exposition du matériau et a , b et c sont les paramètres du modèle.

Pour un matériau poreux, l'évolution de la quantité d'eau retenue suit une évolution exponentielle croissante. Il est donc intéressant de prédire la quantité d'eau finale pour chaque humidité relative à partir des données expérimentales mesurées pendant un temps plus court tout en évitant la contrainte du développement des moisissures [28].

II.4.3. Perméabilité à la vapeur d'eau

La diffusion de la vapeur d'eau, en condition isotherme, a été observée par la méthode de la coupelle. Cette technique permet d'évaluer la perméabilité du matériau à la vapeur d'eau et déterminer le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau.

Pour faciliter l'analyse des résultats, le caractère unidimensionnel du phénomène physique est privilégié d'une part par le choix d'éprouvettes cylindriques et axisymétriques et d'autre part par des gradients de pression de vapeur imposés dans le sens de l'axe [33,64].

L'essai de la coupelle, illustré dans la Figure II. 12, est donc réalisé pour l'ensemble des matériaux étudié (tuffeau et bétons de chanvre) suivant la norme *NF EN 12086*. Il consiste tout d'abord à conditionner les échantillons à 23°C et à 50 % d'hygrométrie jusqu'à la stabilisation de leurs masses.

Les faces latérales des éprouvettes de tuffeau sont étanchéifiées avec de la paraffine et les parois latérales des éprouvettes en bétons de chanvre ont été enduites de silicone. Ces éprouvettes sont ensuite montées sur des coupelles en PVC et placées dans une enceinte climatique réglée à une température de 23 °C et à une humidité relative de 80%. Les coupelles contiennent du carbonate de potassium (K_2CO_3), du nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) ou du sulfate de potassium (K_2SO_4), suivant le gradient de pression de vapeur souhaité (Tableau II. 2).

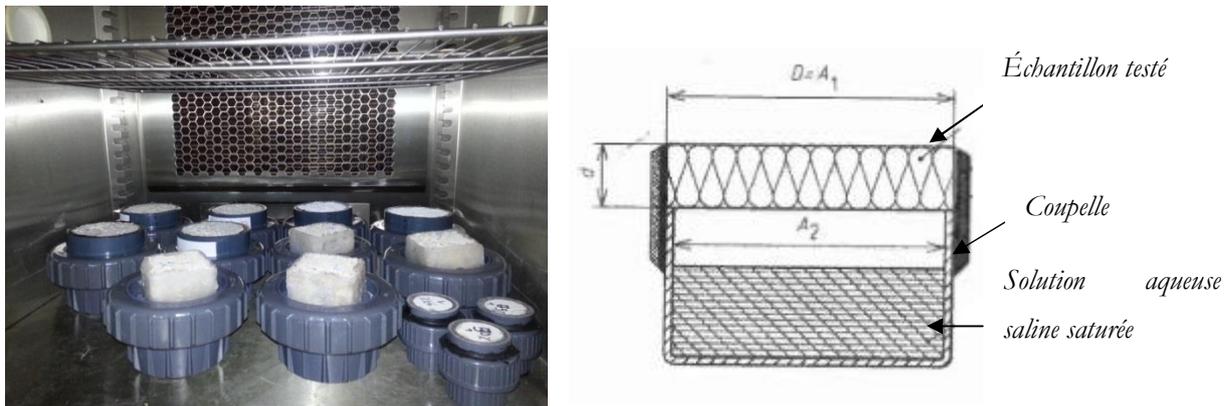


Figure II. 12: Dispositif d'essai utilisé pour déterminer la perméabilité à la vapeur d'eau : photo (à gauche) et schéma de principe (à droite)

Tableau II. 2 : Pressions de vapeur utilisées pour la détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux étudiés

	NH_4NO_3	K_2CO_3	K_2SO_4	Enceinte climatique
φ [%]	65	47	97	80
P_v [Pa]	1844	1336	2828	2270

Les masses des coupelles sont mesurées à intervalle de temps réguliers pendant une durée comprise entre 150 et 250 jours suivant la nature de l'éprouvette (tuffeau ou béton de chanvre) et le gradient de pression de vapeur imposé. Le suivi gravimétrique de la coupelle permet de déterminer la variation de masse $G_{1,2}$ [g/h] au cours du temps. Cette variation est calculée suivant la relation II. 11 pour chaque éprouvette.

$$G_{1,2} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad \text{II. 11}$$

Où m_1 et m_2 [g] sont les masses de la coupelle correspondantes à des temps de mesures successifs t_1 et t_2 [h].

La moyenne de $G_{1,2}$ est ensuite représentée par nature d'échantillon en fonction du gradient d'humidité relative imposé.

Le suivi gravimétrique est arrêté lorsque cinq mesures successives de $G_{1,2}$ se trouvent entre $\pm 5\%$ de G tel que G est la moyenne des 5 dernières valeurs de $G_{1,2}$ pour chaque éprouvette d'essai. Cette condition traduit l'établissement du régime permanent après une première phase transitoire. La perméabilité à la vapeur d'eau est ensuite calculée telle que :

$$\delta = \frac{G \cdot d}{A \cdot \Delta P_r} \quad \text{II. 12}$$

Avec δ [kg/m.s .Pa] est la perméabilité du matériau à la vapeur d'eau, G [kg/s] la moyenne de $G_{1,2}$ lorsque le régime permanent est atteint, A [m²] est la moyenne de l'aire des surfaces exposées (A_1 et A_2), d [m] est l'épaisseur de l'éprouvette d'essai et ΔP_r [Pa] est le gradient de pression de vapeur d'eau.

Pour les matériaux poreux, une correction de cette valeur de perméabilité à la vapeur d'eau est nécessaire. Par conséquent, en tenant compte de la résistance des couches aux limites Z_{int} ; et Z_{ext} et la couche d'air dans la coupelle Z_{air} , l'expression de la perméabilité à la vapeur d'eau devient :

$$\delta = \frac{d}{\frac{A \cdot \Delta P_r}{G} - Z_{int} + Z_{ext} + Z_{air}} \quad \text{II. 13}$$

Tel que

$$Z_{air} = \frac{\mu}{\delta_a} \quad \text{II. 14}$$

Le facteur de résistance à la vapeur d'eau μ a été calculé à partir de la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air dans les conditions atmosphériques, soit $\delta_a = 2.10^{-10}$ kg/m. s. Pa.

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_{air}} \quad \text{II. 15}$$

II.5. Détermination des propriétés thermiques

II.5.1. Méthode de mesure

La méthode utilisée pour mesurer la conductivité thermique et la capacité spécifique des matériaux étudiés est basée sur le principe de mesure par film chaud plan. Elle consiste à placer un élément chauffant, plan et mince, de capacité calorifique négligeable, libérant une densité de flux thermique constante sur une face de l'échantillon de matériau étudié[65–67].

L'élément clé du dispositif est le film chaud dont les caractéristiques vont conditionner à la fois la précision et la rapidité des mesures. Nous avons donc utilisé le papier recouvert par un revêtement

graphité semi-conducteur, le papier *TELEDELTO*S, comme film chaud. En effet, Il présente le double avantage d'être homogène (l'ensemble de la surface étant recouvert d'une couche de carbone uniforme) même pour de très petites dimensions et de permettre un découpage aisé aux dimensions requises par un montage [68]. Les propriétés de ce papier sont données dans le Tableau II. 3.

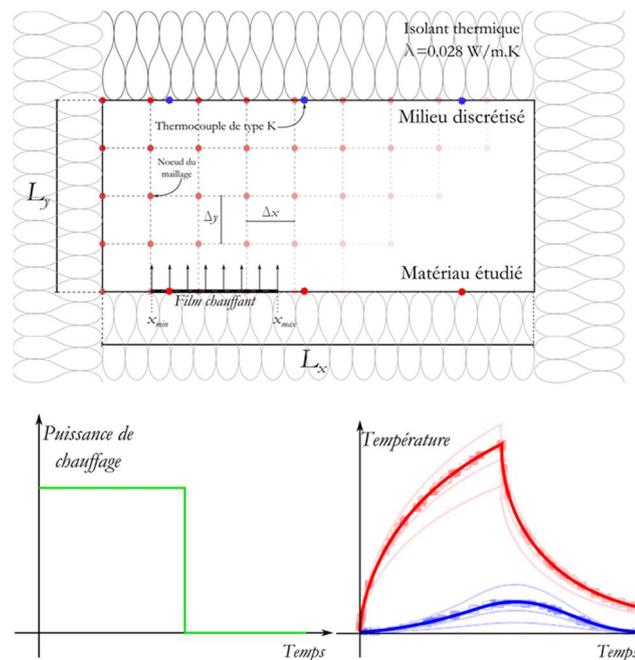
Tableau II. 3 : Grandeurs thermo physiques du papier résistif *TELEDELTO*S [68]

λ [W/m. K]	0,99
ρC [MJ/K.m ³]	2,21
a [m ² /s]	4,53 10 ⁻⁷
E [W s ^{1/2} /m ² K]	1479

Le dispositif expérimental, représenté sur la Figure II. 13 est constitué d'une éprouvette 4x4x16 cm³ de tuffeau ou de 7x7x7 cm³ en béton de chanvre entre des plaques de polyuréthane.

L'isolation thermique est ainsi assurée sur chacune des faces de l'éprouvette. Sur l'une des faces est collé un film chauffant matérialisé par un rectangle de papier résistif *TELEDELTO*S dont les bornes sont recouvertes de bandes de laque d'argent. Il permet d'assurer un chauffage homogène sur toute la surface de l'éprouvette. Son inertie thermique très faible permet d'imposer très rapidement un flux de chaleur constant.

La puissance de chauffage fournie par le film chauffant est de l'ordre de 200 W/m² sous une tension d'une centaine de volts.



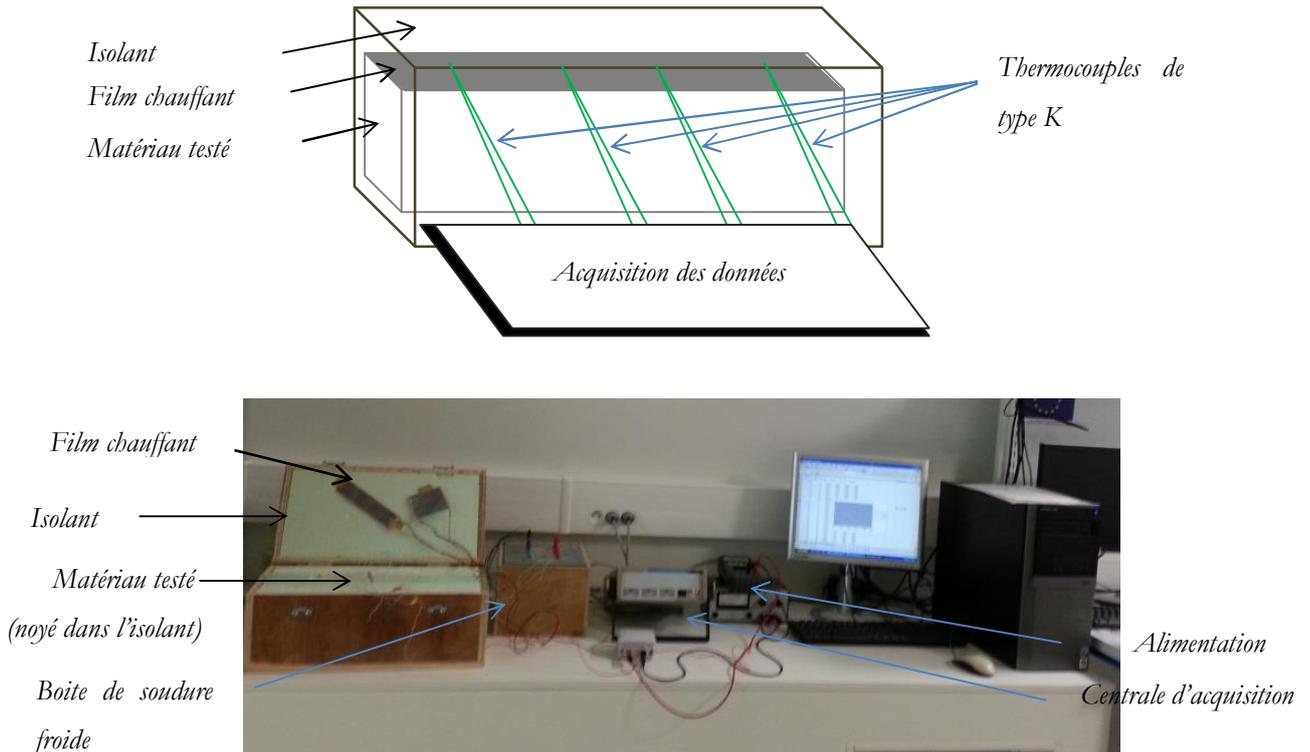


Figure II. 13 :Principe et photo du dispositif expérimental utilisé pour la mesure des propriétés thermiques

II.5.2. Méthode de calcul

a. Equation de la chaleur

Dans le cas de matériaux non déformables, l'équation de la chaleur peut être obtenue en effectuant un bilan de chaleur simple sur un volume infinitésimal.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

II. 16

Avec

ρC_p	[J/m ³ K]	Capacité calorifique volumique
λ	[W/m K]	Conductivité thermique
t	[s]	Temps
T	[K]	Température

Dans le cas de matériaux poreux humides, λ est en réalité la conductivité apparente qui tient compte, non seulement des transferts de chaleur par conduction, mais également du transport de chaleur par les mécanismes internes d'évaporation-condensation.

L'évolution temporelle de la température dans un matériau résulte donc de la compétition entre ses propriétés de stockage et de transfert de la chaleur. Plus la capacité calorifique volumique du matériau est

élevée, moindre est l'élévation en température. Plus la conductivité thermique est importante, plus les gradients de température dans la structure sont faibles [65].

b. Discrétisation de l'équation de la chaleur

Le principe de la méthode de traitement est de remonter, via une analyse inverse des profils de température expérimentaux, aux fonctions décrivant les variations spatiales des propriétés thermophysiques du matériau. La nature du problème ne permettant pas d'établir une solution analytique, un programme de calcul des champs de température est mis en place par *Poullain et al* [65]. L'équation de la chaleur, adjointe aux conditions aux limites et aux propriétés du matériau permettent de calculer le champ de température. La résolution numérique a nécessité la discrétisation de l'équation de la chaleur à l'aide de la méthode des différences finies et d'une méthode ADI (Alternating Direction Implicit). Les conditions aux limites en flux de chaleur ont été traitées à l'aide de la méthode des nœuds fictifs. Un système d'équations sous la forme de deux jeux de deux matrices tri diagonales est obtenu, que l'on peut utiliser pour calculer le champ de température en chaque point du matériau.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial T}{\partial x} \end{aligned} \quad \text{II. 17}$$

Avec

- A_x et B_x Matrices tridiagonales ; schéma explicite en x et implicite en x
- A_x et B_x Matrices tridiagonales ; schéma explicite en x et implicite en x
- C_x et C_x Vecteurs exprimant les conditions aux limites en flux de chaleur
- T^n Vecteur des températures à l'instant n

La formulation des équations permet de tenir compte de la non-linéarité du problème, liée aux variations spatiales des propriétés thermophysiques.

Ces variations sont décrites par l'intermédiaire de fonctions dont on peut facilement faire varier la forme sans avoir à reformuler les équations de discrétisation. Tout type de variations peut donc être simulé à l'aide du programme.

c. Principe de l'analyse inverse

Des valeurs initiales sont données aux paramètres des fonctions décrivant les variations spatiales de λ et ρC_p . Les profils de température sont calculés numériquement en différents points de l'éprouvette en des coordonnées correspondant à celles des thermocouples du dispositif expérimental. Ces profils de température sont ensuite comparés aux profils de température expérimentaux et une fonction test est construite. La forme de la fonction test dépend des écarts de température observés. Elle représente ici l'écart quadratique entre les données expérimentales et numériques.

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial C_p}{\partial \lambda_i} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial C_p}{\partial \lambda_i} \right)^2 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial C_p}{\partial \lambda_i} \right)^2 \quad \text{II. 18}$$

Avec

- λ_i vecteur des paramètres de description de $\lambda(x)$
- $(\rho C_p)_i$ vecteur des paramètres de description de $\rho C_p(x)$
- $T_{n,t}^{exp}$ température expérimentale au point n à l'instant t
- $T_{n,t}^{calc}$ température calculée numériquement au point n à l'instant t .

De faibles variations sont ensuite imposées aux valeurs initiales des paramètres et la fonction test est réévaluée, après re-calcul des profils de température. Cette opération permet de connaître la forme locale de la fonction test en fonction des paramètres et de déterminer la direction dans laquelle les paramètres optimaux doivent être cherchés. Par itérations successives, on parvient à des valeurs de paramètres pour lesquels la fonction test prend une valeur minimale. Le calcul est arrêté lorsque l'écart entre deux valeurs successives de la fonction test devient inférieur à 10^{-6} . L'organigramme du programme de traitement par analyse inverse est donné sur la Figure II. 14.

La difficulté de cette méthode repose sur le fait que la fonction test peut présenter plusieurs minima. La qualité ou la validité de la solution dépendent donc des valeurs initiales données aux paramètres des fonctions de $\lambda(x)$ et $\rho C_p(x)$.

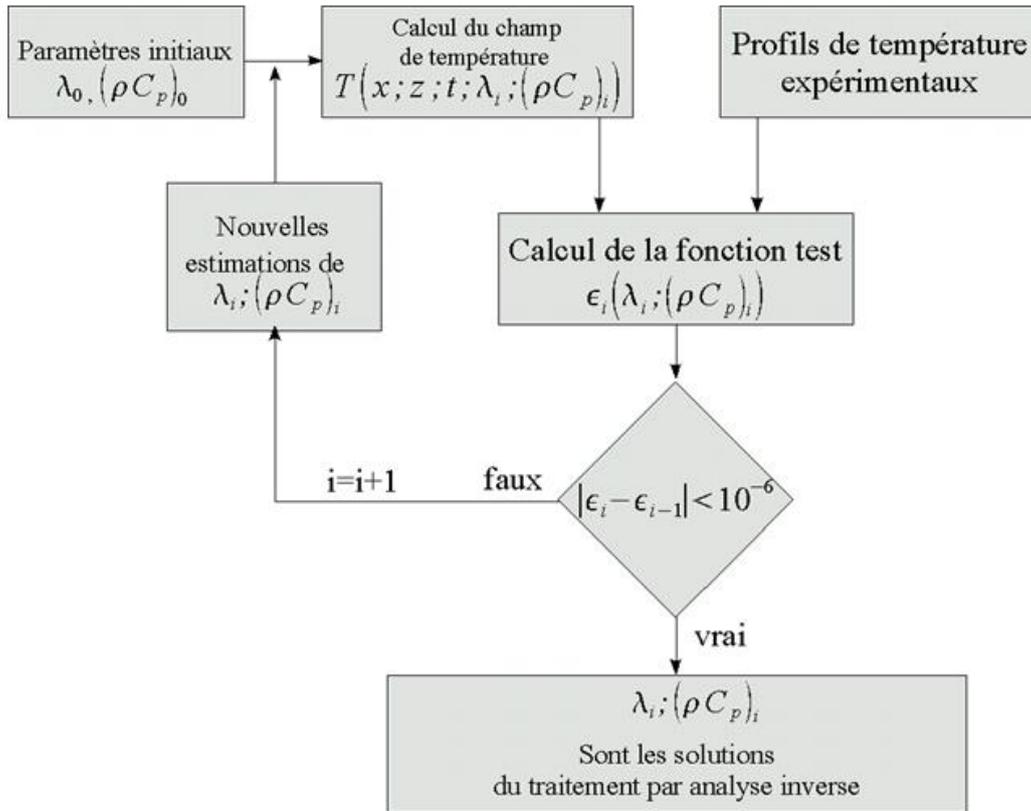


Figure II. 14 : Principe de la méthode inverse [65]

II.5.3. Calcul du flux

La méthode du film chauffant développé au sein du laboratoire consiste à mesurer les températures d'un matériau isolé par du polystyrène. Or le béton de chanvre est un matériau poreux qui possèdent des propriétés relativement comparables à celle du polystyrène. Ceci nous a amené à poser la question sur la quantité du flux réel qui est récupéré par l'échantillon testée.

En effet, *Derbal et al* [69] ont souligné l'importance du calcul des températures à l'interface entre le matériau testé, qu'il soit du polystyrène expansé (EPS), un enduit ou un béton et le matériau qui l'entoure, qui est du PVC dans leur étude. Ils ont également montré que dans la configuration où les matériaux sont tous du PVS, leur méthode est satisfaisante avec un écart relatif de 0,3 %.

A l'instar de *Derbal et al*, nous avons donc calculé la quantité de flux réel récupéré par l'échantillon testé afin de résoudre, avec plus de précision, l'équation de transfert de chaleur par conduction sachant que le seul matériau utilisé pour confiner nos échantillon est du polystyrène extrudé (XPS) dont les propriétés sont données par le fabricant.

II.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes techniques utilisées pour la mesure des propriétés physiques, hydriques et thermiques du tuffeau et des bétons de chanvre. Nous avons particulièrement mis l'accent sur les méthodes de détermination de l'isotherme d'adsorption. Cette dernière est une propriété clé et elle conditionne la réponse hygrothermique de la paroi (chapitre V). Nous avons également détaillé la méthode de mesure et de calcul des propriétés thermiques par un dispositif expérimental développé au sein du laboratoire par *Mounanga et al.* et amélioré par *Poullain et al.*

Après cette phase descriptive des dispositifs expérimentaux, nous allons analyser les résultats obtenus.

III. CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE

DES MATÉRIAUX ÉTUDIÉS

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de mesure des propriétés des matériaux étudiés : le tuffeau, le béton de chanvre préfabriqué et les bétons de chanvre moulés. Nous avons utilisé deux chaux différentes, la NHL 3,5 et la PF 70 pour confectionner en laboratoire des éprouvettes en béton de chanvre.

Les valeurs des propriétés sont déterminées via des essais normalisés ou des techniques d'essais développés au laboratoire. Le principe de ces essais a été présenté au chapitre II.

Le chapitre aborde dans un premier temps les propriétés du tuffeau puis les caractéristiques des bétons de chanvre étudiés. Pour chaque matériau étudié, nous présentons les propriétés physiques comme la porosité ou la masse volumique, la capacité de stockage hydrique (courbes de sorption), les propriétés de transfert hydriques (perméabilité à la vapeur d'eau, prise de masse par capillarité) et les propriétés thermophysiques (conductivité thermique et chaleur massique).

III.1. Le tuffeau

Le tuffeau blanc étudié ici a été extrait de la carrière souterraine de *Lucet* (Figure III. 1). Il s'agit de tuffeau de *Saint Cyr* (Tuffeau de Touraine). La figure ci-dessous permet de situer géographiquement le site d'extraction du tuffeau. Elle présente également l'aspect visuel de ce matériau en sortie de carrière.



Figure III. 1 : Lieu d'extraction du tuffeau étudié

III.1.1. Morphologie et composition

Les images prises au microscope électronique à balayage (*MEB*), présentées dans la Figure III. 2 ont permis de préciser la morphologie des différents éléments constitutifs du tuffeau. En effet, le tuffeau contient des grains de différentes tailles, les plus gros étant les grains de quartz, calcite sparitique, de glauconite et des paillettes de mica. Ces grains sont liés par une matrice de calcite micritique et des sphérules d'opale CT.

Ces observations sont confirmées par une analyse des phases cristallines par diffraction de rayons X. Les résultats des mesures *DRX* sur un massif en tuffeau sont présentés sur la Figure III. 3. On distingue les pics caractéristiques de la calcite (CaCO_3 , noté C), du quartz (SiO_2 , noté Q) et de l'opale cristobalite tridymite (noté O). Nous avons également trouvé des traces des minéraux argileux comme la muscovite et la biotite.

En effet, le tuffeau contient une proportion de calcite de l'ordre de 50% et une forte proportion de silice partagée principalement entre le quartz et l'opale [1].

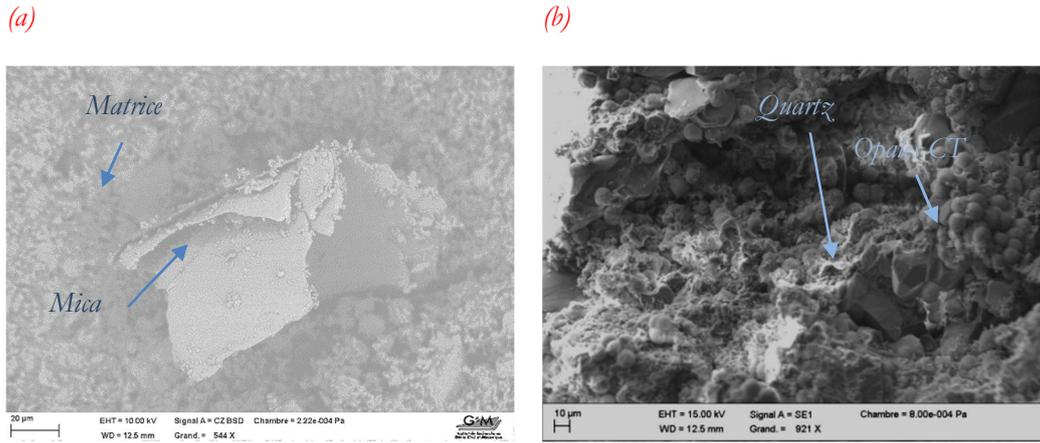


Figure III. 2 : Images acquises d'une zone de cœur du tuffeau blanc par microscope électronique à balayage, (a) mica et (b) constituants majeurs de la pierre

Le tuffeau se classe par conséquent dans les roches silico-calcaires. La proportion moyenne de l'opale cristobalite-tridymite est de l'ordre de 30% alors que le quartz et les minéraux argileux sont en proportion de 10% chacun [7].

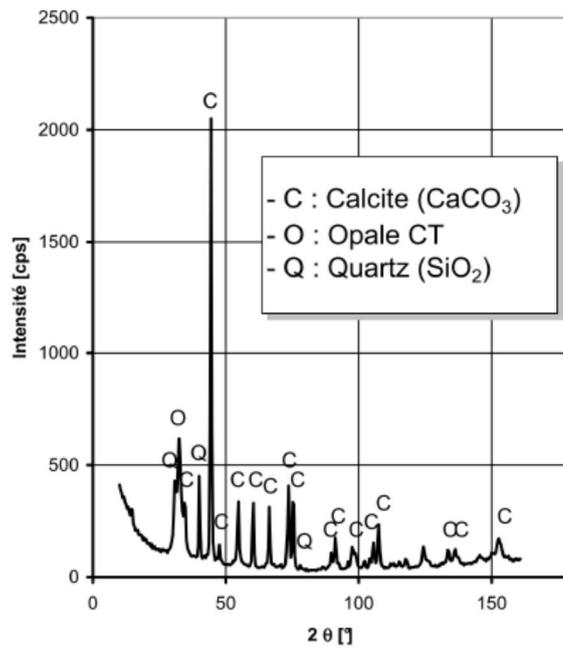


Figure III. 3: Diffractogramme du tuffeau

III.1.2. Taille des éprouvettes

Les travaux de Beck [7] ont montré par le biais de la mesure de la porosité totale que le V_{ER} (Volume Élémentaire Représentatif) pour le tuffeau est de 0,125 cm³ (§ II.2).

III.1.3. Propriétés physiques

Le tuffeau est une pierre silico-calcaire dont la masse volumique apparente est de 1397 kg/m^3 et la masse volumique de la fraction solide est de 2679 kg/m^3 .

La porosité totale (n) d'une dizaine d'échantillons de volume moyen de 125 cm^3 a été déterminée par pesée hydrostatique. Le tuffeau blanc est ainsi une pierre poreuse possédant une porosité totale de 43% et une teneur en eau à la saturation (w_{max}) de 32%. Ces mesures déterminées par la méthode de la pesée hydrostatique sont complétées par la porosimétrie au mercure. Cette dernière technique permet d'obtenir la porosité accessible au mercure (n_{Hg}) et la distribution des tailles de pores du tuffeau. Le Tableau III. 1 récapitule les valeurs de porosité et de teneur en eau obtenues.

Tableau III. 1 : Résultats des porosités et de la teneur en eau maximale pour le tuffeau

n [%]	43
n_{Hg} [%]	33
w_{max} [%]	32

Il existe une différence entre la porosité obtenue par intrusion à l'eau et par intrusion au mercure. Cette dernière est souvent sous-estimée puisque la technique utilisée ne couvre qu'une plage de diamètres de pores restreinte par rapport à celle par intrusion à l'eau. L'avantage principal de l'utilisation de la technique de porosimétrie au mercure est la détermination de la distribution des tailles de pores dans le matériau. La Figure III. 4 montre que le tuffeau possède un spectre de porosité étalé de 2 nm à 6 μm avec une importante mésoporosité de type III (pores de diamètre compris entre 1 et 10 μm). Ces résultats sont concordants avec ceux trouvés par Beck [7]. En effet, cette mésoporosité de type III résulte de l'arrangement des sphérules d'opale CT. La microporosité, quant à elle, est dominée par les pores inter grains de micrite et ceux générés par l'état de surface de la structure en crêtes imbriquées des sphérules d'opale CT.

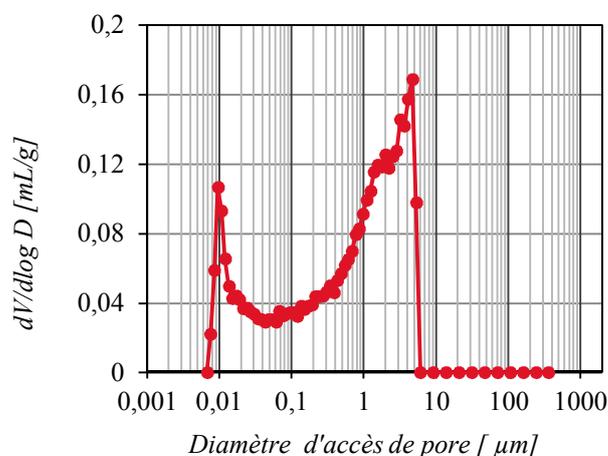


Figure III. 4: Distribution de tailles des pores pour le tuffeau

Néanmoins, l'absence de mésopores de type IV et de macropores pourrait être expliquée par l'effet bouteille d'encre [7]. L'infraporosité (diamètre de pore <1 nm) générée par des phases fines comme les minéraux argileux n'a pas non plus été détectée par la porosimétrie au mercure et donc même au point de plus haute pression le mercure ne pénètre pas totalement dans tout l'espace poral du tuffeau.

III.1.4. Propriétés de transfert hydrique

III.1.4.1. Imbibition par capillarité

Six échantillons de 11 cm de diamètre et de 5 cm de hauteur ont été immergés à 5 mm de leur base. Le suivi de l'évolution de leur masse est réalisé à [15 min ; 30 min ; 1h ; 2h ; 4h ; 8h ; 12h ; 24h et 48h] et la prise de masse est calculée à chaque pesée comme suit (III. 1) :

$$\frac{\Delta m}{S} = \frac{m_t - m_0}{S}$$

III. 1

Avec m_0 et m_t (g) les masses aux instants t_0 et t (s) respectivement et S (cm²) la section immergée de l'éprouvette.

La Figure III. 5 représente la prise de masse moyenne ($\Delta m/S$) au cours du temps de l'essai. Il s'agit d'une courbe caractéristique d'un réseau homogène. L'intersection des deux droites A et A' permet de déterminer la porosité capillaire N_c qui représente en moyenne au moins 97% de la porosité libre N_{48} . Ce résultat confirme les observations de Beck [70] qui a supposé que le phénomène de continuité de prise de masse est dû à des propriétés de texture et des connexions de pores. En effet, la cinétique d'absorption par capillarité dépend d'une part de la nature du liquide utilisé et d'autre part de la microstructure du matériau poreux [71].

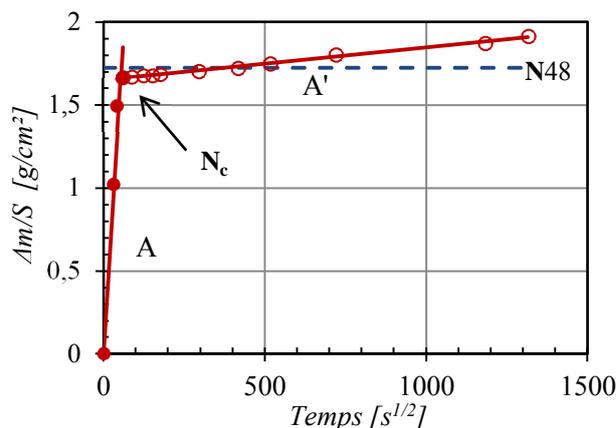


Figure III. 5 : Courbe de prise de masse par remontée capillaire pour la pierre de tuffeau

Nous avons également observé que la frange capillaire atteint le sommet de l'éprouvette au bout de 30 minutes ce qui témoigne d'une cinétique d'imbibition rapide.

Les moyennes des coefficients de *Washburn* (A et B), calculés suivant les équations II.6 et II.7 respectivement, sont du même ordre de grandeur que celles trouvées par *Dessandier* et *Beck* [15,70]. Cette cinétique est favorisée par une macroporosité importante et une faible microporosité [15].

Les deux coefficients de *Washburn* : le coefficient d'absorption capillaire et le coefficient d'ascension de la frange capillaire sont donnés dans le Tableau III. 2.

Tableau III. 2 : Coefficients de *Washburn* calculés pour le tuffeau

A [g/cm ² .s ^{0,5}]	0,031
B [cm/s ^{0,5}]	0,12

III.1.4.2. Isothermes d'adsorption

a. Courbes expérimentales

Afin de déterminer les isothermes d'adsorption mesurées par la technique des solutions salines, un suivi gravimétrique discontinu a été effectué pendant 402 jours. La teneur en eau est ensuite calculée suivant l'équation II.8.

Les résultats du *Belsorp aqua-3* sont donnés en volume d'eau adsorbé mais aussi en quantité de molécules d'eau adsorbée pour chaque palier d'humidité relative générée. Ainsi, la teneur en eau est déduite.

Ces courbes d'adsorption à 20 °C obtenues soit par la méthode volumétrique soit gravimétrique sont modélisées avec le modèle de *GAB* (Eq II.9). Les points expérimentaux de l'isotherme d'adsorption à 20°C et les courbes calculées par l'équation de *GAB* sont présentés dans la Figure III. 6.

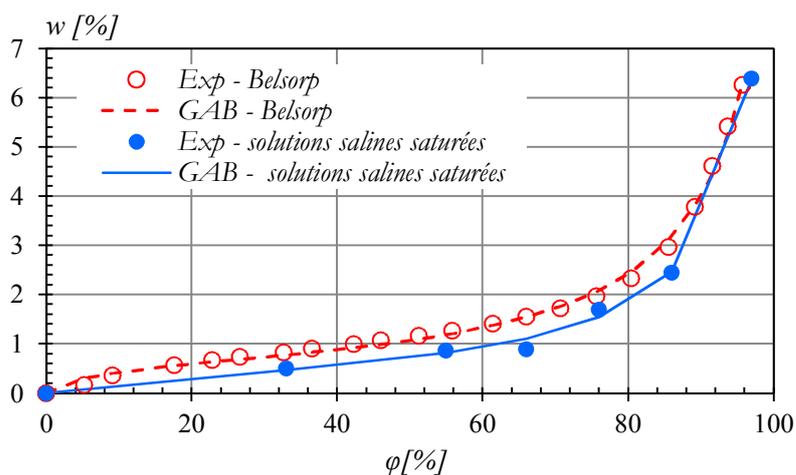


Figure III. 6: Isotherme d'adsorption pour le tuffeau, comparaison des résultats obtenus par les deux techniques expérimentales utilisées et leur modélisation par le modèle de *GAB*

Pour le tuffeau, les courbes obtenues par la méthode gravimétrique et volumétrique sont quasi-superposées. En effet, le tuffeau est un matériau homogène dont un volume de 1 cm³ pourrait être représentatif [7]. Par conséquent le volume de 13 cm³ utilisé pour le *Belsorp* a reproduit la capacité de rétention d'eau déterminée par la méthode classique des solutions salines et cela pendant une durée d'essai beaucoup plus courte.

En outre, le modèle de *GAB* est bien adapté à la représentation de l'isotherme d'adsorption pour le tuffeau. Nous supposons dans ce travail que ce modèle est valable en dehors de la plage d'humidité relative explorée ici, ce qui permettra d'obtenir par extrapolation les teneurs en eau du tuffeau, notamment pour l'humidité relative de 97% ainsi que des valeurs intermédiaires. Les paramètres du modèle sont résumés dans le Tableau III. 3.

Tableau III. 3: Paramètres du modèle de *GAB* pour le tuffeau

	w_m [g/g]	K	C
Solutions salines saturées	0,004	0,960	5,919
<i>Belsorp</i>	0,006	0,946	17,445

b. Correction de l'isotherme d'adsorption obtenue par la technique des solutions salines saturées

Le principe de corriger les isothermes d'adsorption obtenues par la technique des solutions salines saturées est utilisé pour remédier à l'influence du développement des moisissures à la surface des échantillons à base de chanvre. Toutefois, le tuffeau est un matériau silico-calcaire et aucun développement de moisissures n'a été observé sur toute la durée de l'essai.

Afin de maintenir le même traitement des résultats, nous confrontons les résultats expérimentaux aux résultats issus du calcul de la masse à l'équilibre $m_{\infty,sp}$. La Figure III. 7 montre qu'il n'y a pas de nette différence entre les deux résultats (Ecart type maximal de 0,07%). Cette bonne corrélation entre les résultats montre que le tuffeau n'a pas permis le développement des moisissures pendant son temps d'exposition aux différentes humidités, même pour les très fortes humidités (97 %).

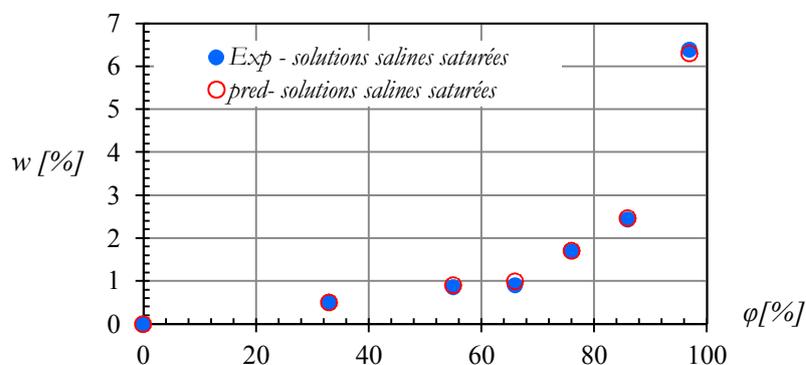


Figure III. 7 : Comparaison des isothermes d'adsorption obtenues par la technique des solutions salines saturées

L'isotherme d'adsorption obtenue par la prédiction de la valeur de la masse finale sera retenue pour l'étude numérique. Cette isotherme est également modélisée et les paramètres du modèle de *GAB* sont donnés dans le Tableau III. 4.

Tableau III. 4 : Paramètres de *GAB* de l'isotherme d'adsorption retenue pour la pierre de tuffeau

w_m [g/g]	K	C
0,005	0,957	6,712

III.1.4.3. Perméabilité à la vapeur d'eau

Nous avons réalisés le test à la coupelle pour 3 gradients de pression de vapeur (ou humidité relative) et à chaque fois 2 échantillons ont été testés.

Après avoir calculé la moyenne de variation de la masse de la coupelle au cours du temps $G_{1,2}$ suivant l'équation II.11, elle est représentée dans la Figure III. 8 en fonction des temps pour différents gradients d'humidité relative (ou de pression de vapeur).

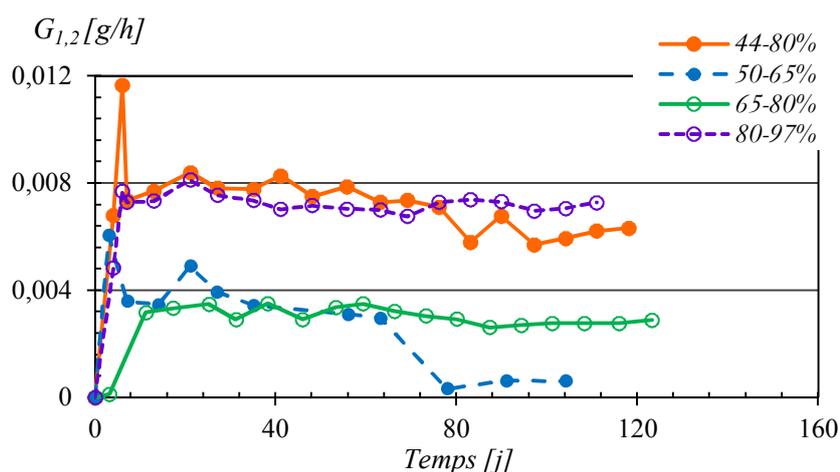


Figure III. 8 : Variations moyennes des masses des coupelles pendant la période d'essai en fonction du gradient d'humidité relative imposé pour les éprouvettes de tuffeau

Il y a ainsi un premier régime transitoire suivi d'un régime permanent. Ce dernier est établi lorsque les cinq dernières mesures successives de $G_{1,2}$ se trouvent entre $\pm 5\%$ de G avec G la moyenne des 5 dernières valeurs de $G_{1,2}$ pour chaque éprouvette d'essai.

Nous calculons par la suite la perméabilité δ et le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur μ pour chaque gradient de pression de vapeur moyen suivant les équations II.12 et II.13. Ces paramètres caractéristiques de la diffusion de la vapeur dans le tuffeau sont présentés dans la Figure III. 9

Nous notons une tendance logique de ces paramètres en fonction de l'humidité relative. En effet, conformément à la théorie de *DeVries* [49] :

- Le transfert d'humidité se fait uniquement par voie vapeur pour les faibles teneurs en eau
- Lorsque la teneur en eau augmente, la section de passage du flux de vapeur diminue et la vapeur se diffuse par des mécanismes de condensation-évaporation aux interfaces liquide-vapeur.

Il est également intéressant de souligner que les valeurs de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau sont du même ordre de grandeur que celles récemment publiées par le ministère de la région wallonne¹⁹ pour les pierres tendres de masses volumiques proches de celle du tuffeau.

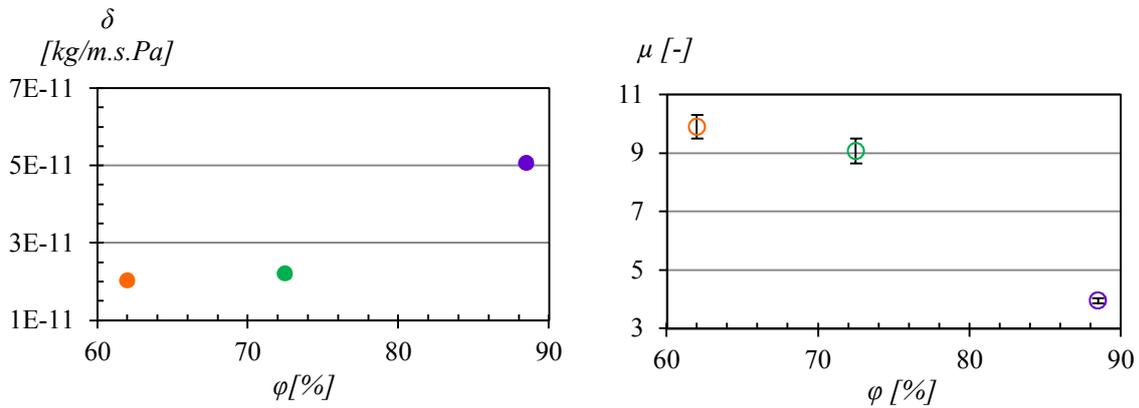


Figure III. 9 : Perméabilités à la vapeur d'eau , facteurs de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau et leurs écarts types pour les gradients d'humidité relative moyens de 62, 72,5 et 88, 5 % relatifs à la pierre de tuffeau.

Ces perméabilités sont modélisées suivant Galbraith et al qui ont trouvé une relation de puissance entre la perméabilité à la vapeur d'eau et l'humidité relative [72]. Cette loi s'écrit comme suit :

$$\delta = A + B\phi^c$$

III. 2

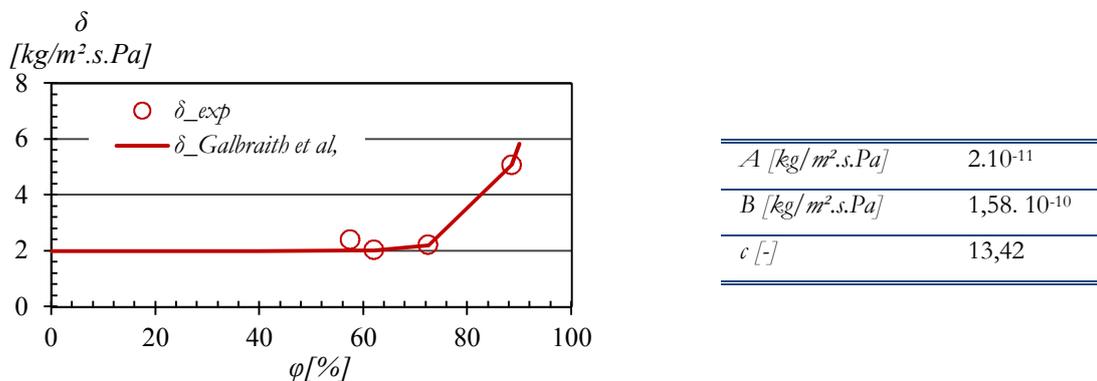


Figure III. 10 : Résultats de la modélisation de la perméabilité à la vapeur d'eau

¹⁹ Isolation thermique des logements neufs en région wallonne Caractéristiques hygrothermiques des matériaux: Edition 88.002

III.1.5. Propriétés thermiques

La conductivité thermique et la chaleur massique du tuffeau sont mesurées à l'aide de la technique du film chaud développée au sein de l'institut de recherche en génie civil et mécanique, en particulier par *Poullain et al* (§ II.5).

Ces propriétés thermiques dépendent de la teneur en eau. En effet, l'eau peut réduire d'une façon considérable le pouvoir isolant des matériaux. En effet, la conductivité thermique de l'air emplissant les pores est de 0,026 W/m.K, et le remplissage partiel ou total des pores par de l'eau de conductivité thermique égale à 0.6 W/m.K entraîne obligatoirement une augmentation de la conductivité thermique apparente du matériau. Le matériau étant souvent un milieu triphasique, plus la quantité d'eau est stockée dans ses pores, plus ses propriétés thermiques sont élevées.

Nous avons donc conditionné des éprouvettes de 4x4x16 cm³ à 4 teneurs en eau différentes : les 2 états limites sec et saturé et deux teneurs en eau intermédiaires de 5 et 25%.

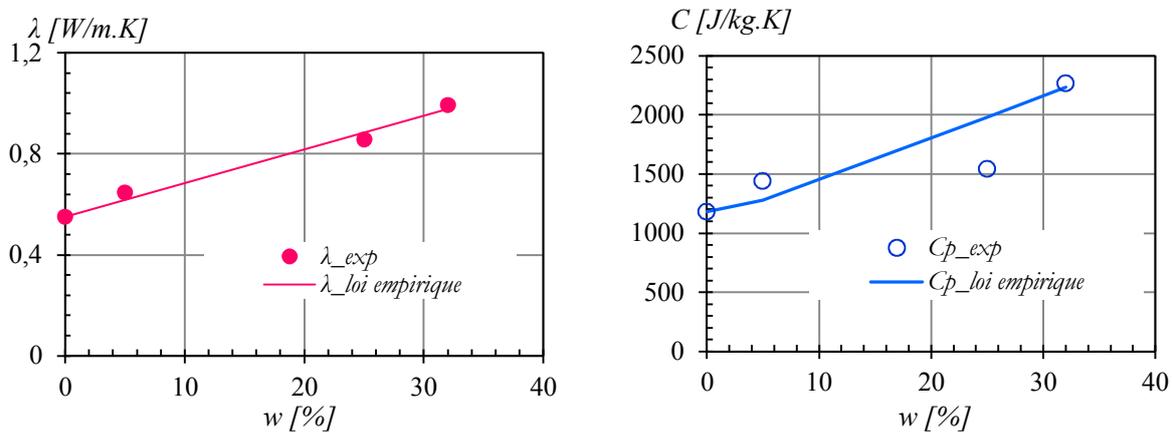


Figure III. 11 : Variation de la conductivité thermique et de la chaleur massique pour le tuffeau en fonction de la teneur en eau

La conductivité thermique pour le tuffeau sec est de 0,55 W/m. K et elle évolue de façon linéaire en fonction de la teneur en eau. Cette relation est donnée par la relation III. 3 (coefficient de corrélation $R^2= 0,99$).

$$\lambda = 0,55 + 0,0133 w \quad \text{III. 3}$$

La capacité calorifique (ρC_p) varie entre 1,65 MJ/m³.K pour l'état sec à 4,15 MJ/m³.K pour l'état saturé. Cette évolution est souvent exprimée par la relation III. 4.

Les résultats expérimentaux obtenus sont relativement cohérents avec la théorie à savoir que les écarts sont dus à l'estimation de la masse volumique en fonction de la teneur en eau en plus des incertitudes de la mesure des paramètres (ρ , C_p et w).

$$\rho C_p (w) = \rho_0 C_p + w \rho_w C_w; C_w = 4187 \text{ kJ/kg.K à } 20^\circ\text{C} \quad \text{III. 4}$$

A partir de la conductivité thermique et de la capacité calorifique du tuffeau, nous pouvons calculer deux autres paramètres qui sont la diffusivité thermique a (m^2/s) et l'effusivité thermique E ($J/K m^2 s^{0,5}$). Le premier décrit la vitesse avec laquelle la chaleur se propage par conduction dans un matériau alors que le second décrit sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement (III. 5).

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad E = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p}$$

III. 5

La diffusivité thermique et l'effusivité thermique du tuffeau sec sont respectivement de $3,3 \cdot 10^{-7} m^2/s$ et de $953 J/K m^2 s^{0,5}$.

III.2. Béton de chanvre

Le béton de chanvre est un mélange de chènevotte, de chaux et d'eau. Les différents travaux sur l'étude des propriétés mécaniques, hydriques et thermiques du béton de chanvre [4-7] montrent que ses caractéristiques dépendent :

- De la nature et du dosage en liant
- Des caractéristiques du granulat chanvre : la taille, la courbe granulométrique et la capacité d'absorption d'eau
- Du procédé de fabrication : moulage, projection ou préfabrication
- Des conditions ambiantes : température et humidité relative

Dans ce qui suit, nous détaillons les propriétés des matériaux primaires utilisés et les conditions expérimentales de confection des bétons à base de chanvre et leurs conditions de stockage.

III.2.1. Les constituants

III.2.1.1. La chaux

Nous avons utilisé deux chaux différentes pour la confection des bétons par moulage. Ce sont la *Radical PF 70* et la *Saint Astier NHL 3,5* (Figure III. 12).



Figure III. 12 : Aspect visuel des chaux utilisées pour la confection des bétons moulés

Les compositions de ces deux chaux sont données dans le Tableau III. 5. La *PF 70 (Tradical)* est donc une chaux aérienne avec une activité pouzzolanique alors que la *NHL 3,5 (Saint Astier)* est une chaux hydraulique.

Tableau III. 5 : Composition des chaux utilisées pour les bétons de chanvre moulés

	Chaux aérienne (%)	Liant hydraulique (%)	Liant pouzzolanique (%)
<i>Tradical PF 70</i>	75	15	10
<i>Saint Astier NHL 3.5</i>	25	75	-

La composition chimique de ces deux chaux est étudiée par *Magdalena* pour la NHL 3,5 [75] et par *Nguyen* [76] pour la PF70. Leurs principales propriétés sont également données suivant leur fabricant respectif et elles sont résumées dans le Tableau III. 6.

Tableau III. 6 : Composition chimique et principales propriétés des chaux utilisées pour les bétons de chanvre moulés

	<i>Saint Astier NHL 3,5</i>	<i>Tradical PF 70</i>
SiO ₂	12,5	10,51
Al ₂ O ₃	1,36	3,66
CaO	63,3	78,63
MgO	1,51	1,02
Fe ₂ O ₃	0,45	1,58
Na ₂ O ₃	0,12	0,25
K ₂ O	0,75	0,42
SO ₃	0,9	1,6
Densité	0,65	0,62
Surface spécifique [cm ² /g]	9	10
Résistance à la compression [MPa]	3,5 – 8	>4, 3
Résistance à la flexion [MPa]	2	>1,4

III.2.1.2. Chènevotte

Afin de limiter l'effet de la granulométrie des particules de chanvre, nous avons utilisé un seul type de chènevotte. La chènevotte utilisée est commercialisée par *Chanvribat* (voir Figure III. 13). Elle est de couleur beige claire avec une masse volumique apparente d'environ 110 kg/m³. Une analyse granulométrique par tamisage a été effectuée sur 3 échantillons de 500 g de chènevotte et a montré que la granulométrie de cette dernière est comprise entre 0,08 mm et 1,25 cm avec un taux de poussières (refus <0,08 mm) de 0,1%.

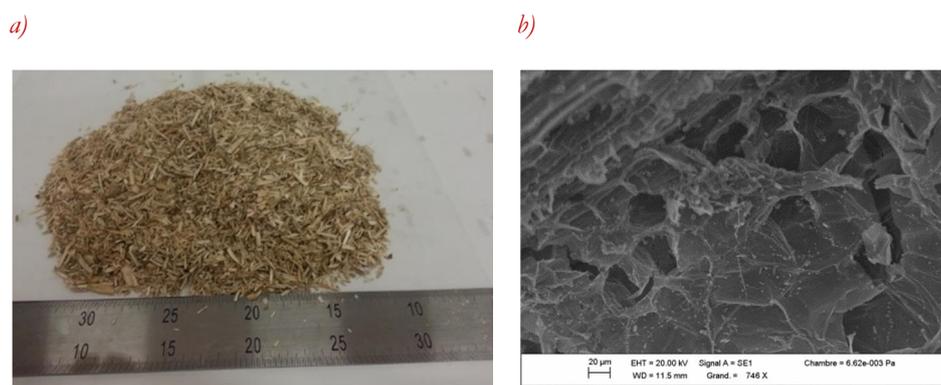


Figure III. 13 : Photo de la chènevotte utilisée a) en vrac, b) photo au MEB

III.2.1.3. Eau

L'eau utilisée pour la confection des bétons est une eau potable de température de 20°C.

III.2.2. Formulation testée

Le béton à base de chanvre présente une variabilité de structure en fonction de la formulation utilisée (voir § I.5.4). Dans cette étude, l'application retenue est une application mur. Elle est élaborée à partir des règles professionnelles d'exécution des ouvrages en béton de chanvre [77] et correspond à une composition avec des matériaux utilisés sur chantiers et décrits dans la section précédente. Les dosages massiques en chaux, chènevotte et eau sont récapitulés dans le Tableau III. 7.

Tableau III. 7 : Application utilisée et quantités nécessaires pour 1m³ de béton de chanvre moulé et préfabriqué

Mur	Chènevotte (kg)	Chaux (kg)	Eau (kg)	$\frac{C}{C+Ch}$	$\frac{C}{C+Ch+E}$
Bdc - NHL	100	220	350	1,59	2,2
Bdc - PF	100	220	350	1,59	2,2
Bdc - préfa				1,2	1,53

Une troisième application *mur* utilisée correspond à un procédé de préfabrication et il s'agit d'utiliser des briques de chanvre préfabriquées *Chanvribloc*. Suivant le fabricant²⁰ la chaux utilisée pour la confection de ces blocs est hydraulique et le dosage chaux/chanvre est de 1,53 avec un rapport E/L est de 1,2.

L'aspect des différents bétons est donné dans la Figure III. 14. Ils sont tous les trois de porosité ouverte remarquable (de l'ordre de quelques centimètres). Le béton de chanvre préfabriqué est confectionné avec de la chènevotte de granulométrie plus grande que celle des bétons de chanvre moulés. Toutefois, le bdc- préfa et le bdc -PF ont une couleur assez similaire (couleur grise) alors que le bdc-NHL est de couleur beige claire

²⁰ <http://www.chanvribloc.com>

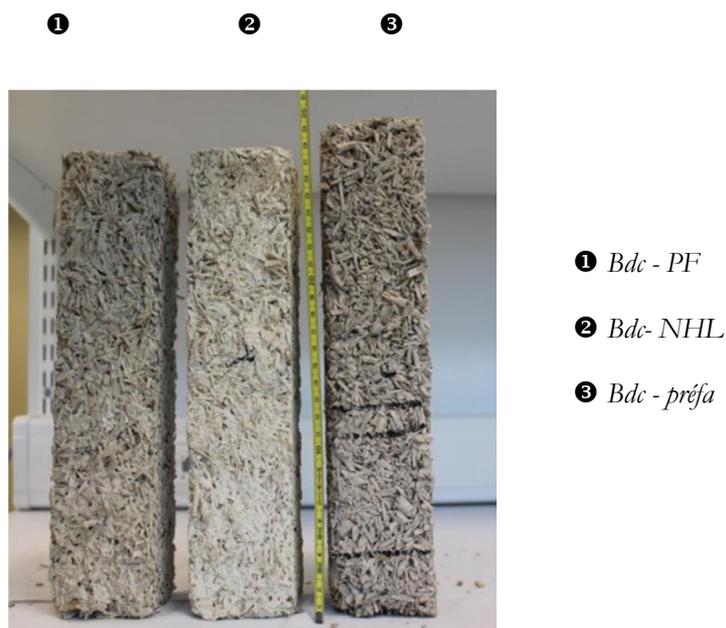


Figure III. 14 : Photos des bétons de chanvre étudiés

III.2.3. Protocoles expérimentaux de fabrication des éprouvettes et de leurs conditionnements

III.2.3.1. Procédure de malaxage

En s'appuyant sur les travaux de *Cerezo, Evrard et Chamoin* [2,27,74], le caractère capillaire et déformable de la chènevotte rend le malaxage des mélanges plus compliqué que pour des bétons classiques. Il est alors nécessaire de faire des essais préliminaires pour déterminer le procédé de malaxage le plus adéquat pour les formulations et les matériaux sélectionnés et le matériel disponible. Le principal critère est d'obtenir un mélange homogène (sans formation de grumeaux) et maniable. Le mélange obtenu est illustré dans la Figure III. 15

Le malaxage a été donc réalisé dans un malaxeur à axe vertical de capacité de 200 litres et dont la puissance est de 3,7 kW et il s'est déroulé en 3 phases :

- 1^{ere} phase : Mélange des 2/3 des volumes d'eau et de la chaux pendant 2 minutes.
- 2^{eme} phase : Ajout des 2/3 du volume de chènevotte au mélange précédent et malaxage pendant 5 minutes supplémentaires.
- 3^{eme} phase : Ajout du reste de l'eau et de la chènevotte et malaxage pendant 2 minutes supplémentaires.



Figure III. 15 : Aspect du béton de chanvre formulé à base de la PF 70

III.2.3.2. Taille des éprouvettes de béton de chanvre

Le choix des tailles des éprouvettes a été élaboré après une recherche préliminaire concernant le VER pour un béton de chanvre. Plusieurs études [3,4] ont montré que la dimension du VER du béton de chanvre est de l'ordre de 100 cm^3 soit un cube d'arête de 5 cm suivant Collet [3] et de 4,7 cm suivant Evrard [4] (voir § II.2).

Par conséquent, les deux bétons de chanvre confectionnés avec la NHL 3,5 et la PF 70 sont alors moulés en éprouvettes de volume supérieur ou égal au VER et en formes différentes en fonction de l'essai de caractérisation à réaliser (Figure III. 16). On distingue ainsi :

- Les éprouvettes cylindriques de diamètre 11 cm et de hauteur 22 cm utilisées pour le suivi de masse (vérification de l'homogénéité de la gâchée) et pour l'essai de remontée capillaire (détermination des coefficients représentatifs de la cinétique d'imbibition).
- Les éprouvettes cylindriques de diamètre 11 cm et de hauteur 5 cm. Ces éprouvettes ont été fabriquées afin d'éviter de tronçonner les éprouvettes précédentes. En effet, les éprouvettes de béton de chanvre sont friables et il est difficile de les tronçonner pour obtenir des éprouvettes de forme donnée. Ces éprouvettes ont servi à la mesure des paramètres relatifs au transfert de la vapeur d'eau.
- Les éprouvettes prismatiques de taille $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$. Ces éprouvettes ont servi à la détermination des propriétés thermo physiques.
- Les éprouvettes cubiques d'une arête de 7 cm ont servi à la détermination de propriétés physiques comme la teneur en eau maximale et la porosité accessible à l'eau.



Figure III. 16: Eprouvettes utilisées pour les essais de caractérisation des bétons de chanvre

Quant au béton de chanvre préfabriqué, les épreuves sont prismatiques puisque dans ces blocs un carottage en épreuves cylindriques est très difficile à réaliser. Nous avons choisi de découper des épreuves de 7 cm d'arête et de 28 cm de longueur pour les essais de remontée capillaire, les essais de caractérisation thermique et les essais de caractérisation physique. Les épreuves de 7 cm d'arête et de 5 cm de hauteur ont été utilisées pour les essais de perméabilité à la vapeur d'eau.

III.2.3.3. Conditions de conservation

Les épreuves de béton de chanvre avec les liants NHL 3,5 et PF 70 ont été démoulées après 7 jours et conservées ainsi que celles de béton de chanvre préfabriqué dans une salle régulée en température et humidité à 20°C et 50% respectivement. Ces conditions reproduisent le mieux les conditions d'exécution pour une isolation par l'intérieur. *Arnaud et al.* [26] ont étudié différentes conditions de cure (30%, 50%, 75% et 98%) et leurs travaux ont montré qu'une hygrométrie de 50% offre une meilleure résistance à la compression.

III.2.4. Propriétés physiques

Il existe un lien étroit entre la structure porale, l'état hydrique du matériau et les transferts hygrothermiques. Il est donc indispensable de caractériser les matériaux étudiés, sur le plan structural, notamment de déterminer la densité, la porosité et la distribution porale.

Après avoir moulé les bétons de chanvre bdc – NHL et bdc – PF, il est indispensable de suivre l'évolution de la masse des épreuves au cours du temps afin de vérifier leur homogénéité et calculer la masse volumique apparente des matériaux fabriqués.

Pour ce faire, un suivi gravimétrique régulier des éprouvettes cylindriques (diamètre de 11cm et hauteur de 22 cm) est effectué dans les conditions de maturation qui sont de 20°C et de 50%.

Ce suivi concerne une vingtaine d'éprouvettes par matériau (24 pour *bdc - NHL* et 27 pour *bdc - PF*) et les résultats de masse volumique apparente sont donnés dans la Figure III. 17.

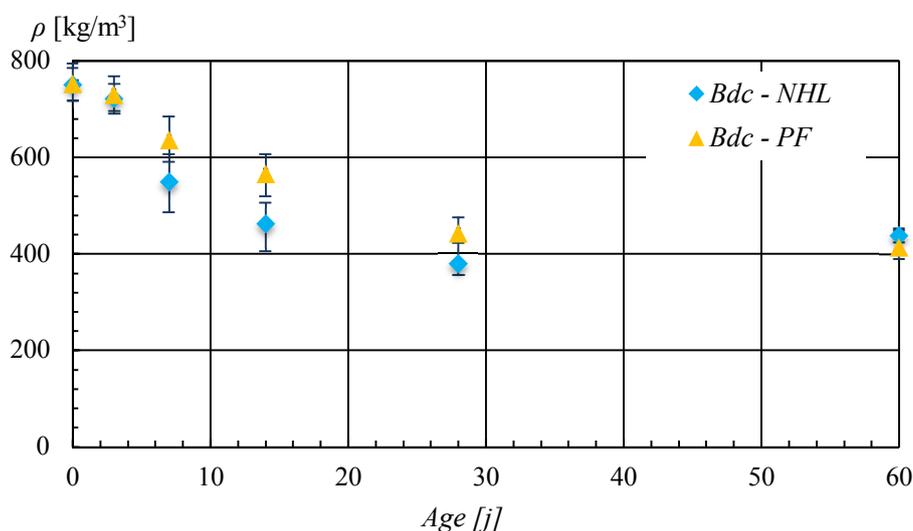


Figure III. 17 : Vérification de l'homogénéité des éprouvettes en bétons moulés

Nous remarquons que les éprouvettes pour un mélange donné sont bien homogènes (écart type faible). Les masses volumiques des deux bétons de chanvre moulés testés décroissent au cours du temps pour se stabiliser autour de 420 kg/m³ à partir de 60 jours de maturation. Cette masse volumique moyenne a été remesurée après 400 jours pour les différents bétons de chanvre étudiés et elle est donnée dans le Tableau III. 8.

Tableau III. 8 : Masses volumiques apparentes mesurées à 400 j des bétons de chanvre étudiés conservés à 20°C et 50% d'humidité relative

<i>Bdc - NHL</i>	<i>Bdc - PF</i>	<i>Bdc - préfa</i>
$454 \pm 0,32$ [kg/m³]	$442 \pm 6,89$ [kg/m³]	$455 \pm 15,71$ [kg/m³]

Les valeurs obtenues se situent entre 440 et 455 kg/m³ ; Ce sont les valeurs caractéristiques de l'application *mur* [77].

La porosité accessible à l'eau (n) a été mesurée par la méthode de la pesée hydrostatique. Or la porosité totale du béton de chanvre est très proche de la porosité ouverte [28]. Il était donc nécessaire de mettre les échantillons dans un moule de même volume afin d'éviter le phénomène de « passoire » lorsque nous essayons de mesurer la masse saturée à l'air (M_{sat}).

Cette technique n'est peut-être pas la plus rigoureuse pour mesurer la porosité du béton de chanvre cependant la porosité n'est pas un paramètre clé dans l'étude des transferts hygrothermiques suivant l'analyse de sensibilité réalisée (voir § V.2.1.3).

Les essais de porosité à l'eau sont réalisés sur 3 échantillons par formulation de béton de chanvre. Les différents échantillons sont de formes cubiques et les résultats de n et w_{max} sont présentés dans le Tableau III. 9.

Tableau III. 9 : Résultats de la porosité totale et de la teneur en eau maximale pour les bétons de chanvre moulés et préfabriqué

	Bdc - NHL	Bdc - PF	Bdc - préfa
n [%]	68	64	62
w_{max} [%]	150,7	179,1	163,8

Les bétons de chanvre ont alors une porosité moyenne de 65 %. Cette valeur est inférieure à celle trouvée dans la littérature où elle voisine 75% en moyenne. La mesure par pesée hydrostatique est certes n'est pas très adaptée à ce matériau macroporeux et de porosité ouverte. Une analyse par image nous semble plus appropriée aux bétons de chanvre car elle permet de conserver l'échantillon, contrairement à l'analyse par pycnométrie, souvent utilisée, où l'échantillon est réduit en poudre et donc détruit.

Le *bdc - NHL* a une porosité plus grande que celle du *bdc - PF* cependant on remarque une teneur en eau plus grande pour le *bdc - PF*. Cette tendance est logique puisque les deux bétons à base de chanvre ont le même rapport E/L (eau/liant) et ne diffèrent que par la nature de la chaux utilisée.

En effet, la PF 70 contient des pouzzolanes qui réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à température ordinaire et en présence d'eau pour former des hydrates. Ces hydrates qui vont combler davantage les pores d'où la porosité est plus faible.

En outre, le béton de chanvre préfabriqué a un rapport E/L plus faible que celui des bétons moulés ce qui explique une porosité plus faible. Or, la valeur de w_{max} est peut être due à la présence de particules fines pouzzoloniques, ce qui entre autre explique la similitude visuelle des éprouvettes de *bdc - préfa* et *bdc PF*.

Ces mesures de porosité déterminées par la méthode de la pesée hydrostatique sont complétées par la porosité par intrusion au mercure. Les valeurs de la porosité obtenues sont données dans le Tableau III. 10 et les distributions des tailles des pores sont présentées à la Figure III. 18.

Tableau III. 10 : Résultats des porosités des bétons de chanvre par intrusion au mercure

	Bdc - NHL	Bdc - PF	Bdc - préfa
n_{Hg} [%]	$59,2 \pm 2,3$	$61 \pm 1,5$	$67,3 \pm 4,1$

Les porosités par intrusion au mercure sont inférieures à celles trouvées par intrusion à l'eau. Une différence qui est due à l'effet de bouteille d'encre et à la limite de l'appareil qui ne peut pas pénétrer dans les pores des hydrates, *a priori* formées par réaction d'hydratation des pouzzolanes.

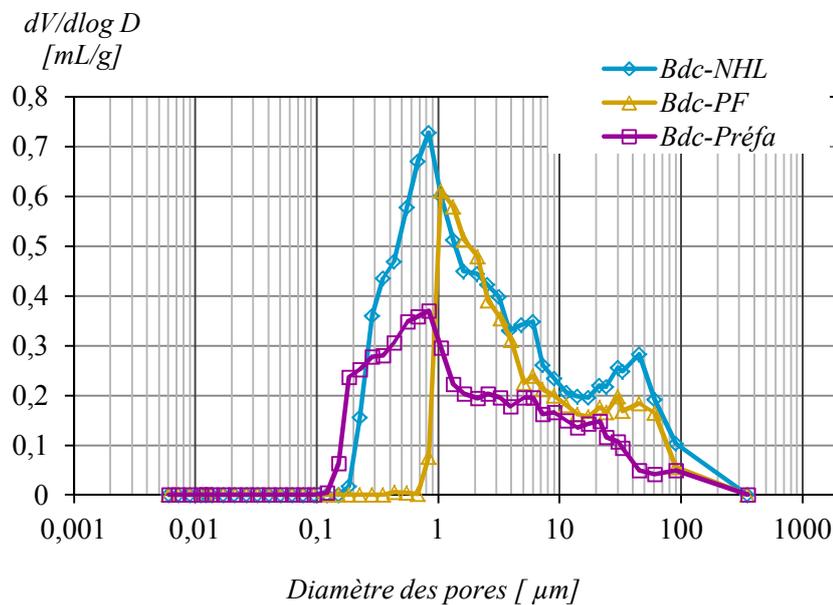


Figure III. 18 : Distribution de tailles des pores pour les bétons de chanvre

La Figure III. 18 montre que les bétons de chanvre possèdent un mode principal qui se situe autour de 1 μm . Pour les bétons moulés avec la NHL et la PF, leur distribution porale est bimodale avec une porosité méso porale. Cette distribution est de type III et IV (entre 1 et 100 μm) suivant la classification de porosité retenue pour cette étude.

III.2.5. Propriétés de transfert hydrique

III.2.5.1. Imbibition par capillarité

Les pas de temps préconisés par la norme ne sont pas suffisants pour les bétons à base de chanvre. Ces derniers sont des matériaux très poreux et à porosité multi-échelle comme il a été montré par les courbes de distribution porale (Figure III. 18) ou par observations au MEB [28,78].

De ce fait, nous avons ajouté des temps de mesure intermédiaires et nous avons également prolongé la durée totale de l'essai pour qu'elle soit finalement de 22 jours.

Comme pour le tuffeau, les bétons de chanvre montrent des courbes caractéristiques d'un réseau homogène. La Figure III. 19 illustre une prise de masse régulière pour l'ensemble des éprouvettes testées (3 éprouvettes / composition) avec un coefficient A, calculé sur les premières 24 h, qui varie entre $0,3 \cdot 10^{-2} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$ pour le *bdc - préfabriqué* et $1 \cdot 10^{-2} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$ pour le *bdc - PF*.

Cette différence est due à la nature de la chaux utilisée et au dosage E/L. En effet, les deux bétons moulés sont à volume poreux très proche mais ils diffèrent par la nature de la chaux utilisée. Le *bdc - PF*,

contrairement au *bdc - NHL*, est fabriqué à base d'une chaux aérienne pouzzolanique ce qui explique une cinétique d'absorption plus faible pendant la première phase d'absorption. Il a une matrice plus dense et donc il y a moins de macropores qui se remplissent d'eau pendant cette phase.

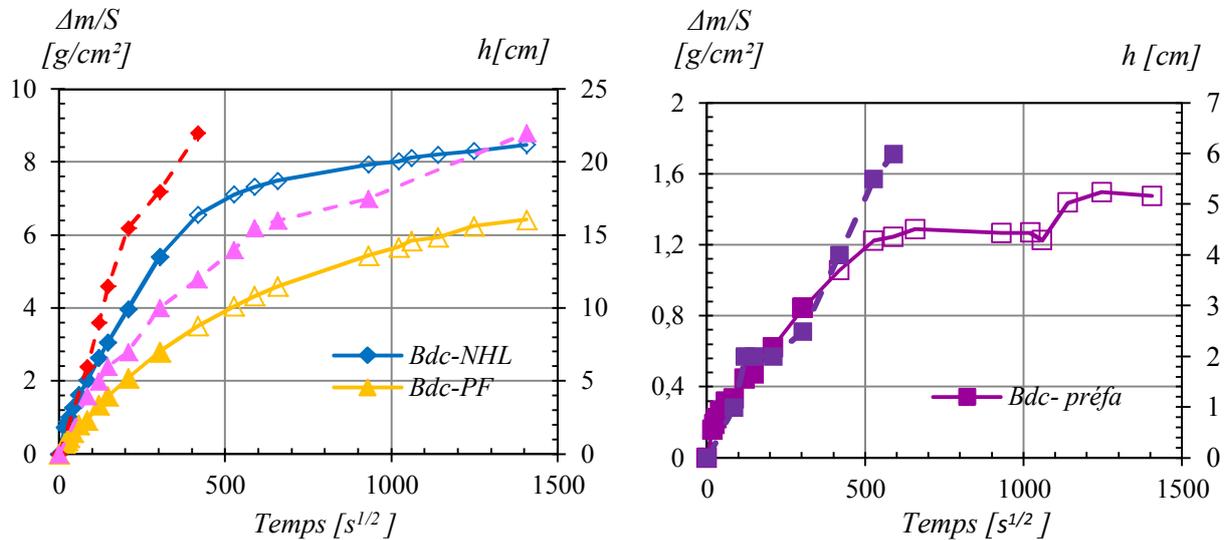


Figure III. 19 : Courbes de capillarité pour les échantillons de bétons de chanvre : NHL et PF à gauche et préfabriqué à droite, courbe de prise de masse en lignes continues et d'ascension de frange capillaire en lignes interrompues.

Néanmoins, pendant la seconde phase, le coefficient A' , relatif au *bdc - PF*, est 2 fois plus grand que celui obtenu pour le *bdc - NHL* (Tableau III. 11). Cette phase est en effet conditionnée par la microporosité du matériau et les pouzzolanes en présence d'eau réagissent avec la chaux $(CaOH)_2$ et forment des hydrates.

Ces constats sont confirmés par la cinétique de remontée de la frange capillaire qui est plus rapide pour le *bdc - NHL* puisqu'il y a moins d'interactions entre le milieu poral et le fluide.

Tableau III. 11 : Données moyennes des coefficients caractéristiques de l'absorption par capillarité

	<i>Bdc - NHL</i>	<i>Bdc - PF</i>	<i>Bdc - préfa</i>
A [$g/cm^2 \cdot s^{0,5}$]	0,02	0,01	0,003
A' [$g/cm^2 \cdot s^{0,5}$]	0,001	0,002	-
B [$cm/s^{0,5}$]	0,08	0,04	0,01

Quant aux résultats obtenus pour le *bdc - préfa*, la faible valeur du coefficient de prise de masse A peut vraisemblablement être liée au dosage eau/liant (E/L). En effet E/L est de 1,6 pour les bétons moulés et de 1,2 pour les bétons préfabriqués. Par conséquent, le gain en masse par absorption capillaire est plus faible pour le béton de chanvre préfabriqué.

Cette conclusion est retenue par *Ferhani et al.* et *Walker et al.* [15,16] qui ont également observé une proportionnalité positive entre le rapport E/L et le coefficient A .

Cependant, la prise de masse pendant la seconde phase est très faible pendant environ 3 jours et elle est après relancée. La courbe est donc affectée par une rupture de pente qui correspond à un freinage de la remontée de la frange capillaire. La durée de 22 jours s'est avérée ainsi insuffisante pour le béton de chanvre préfabriqué pour lequel l'eau a mis environ 3 mois pour atteindre la surface opposée. Pour expliquer cette cinétique observée sur les 3 échantillons testés, nous avons découpé les échantillons pour observer la migration de l'eau au sein de l'éprouvette. La Figure III. 20 illustre la présence d'une zone dense probablement due au compactage. Il s'agit d'une rupture de la capillarité engendrée par un compactage excessif [78].

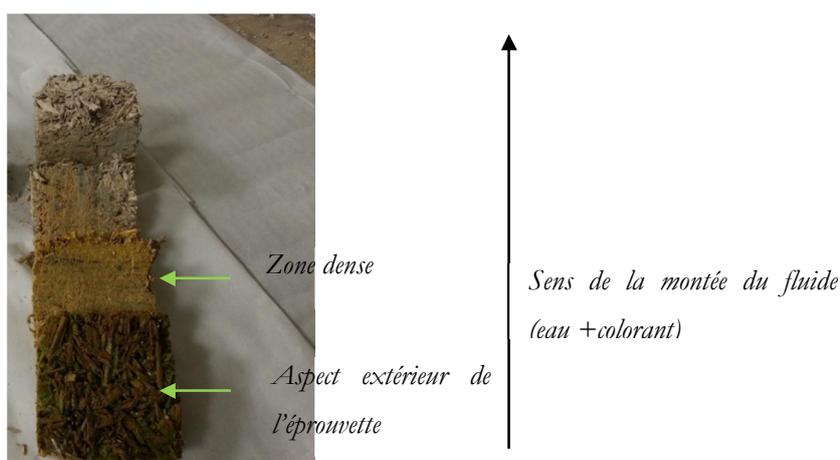


Figure III. 20 : Photo d'un échantillon de bdc – préfabriqué testé

Différents chercheurs à l'instar de *Errard, De Bryjin et al* et *Walker et al* se sont intéressés à la mesure du coefficient de prise de masse A et leurs valeurs moyennes varient entre $0,4 \cdot 10^{-2}$ et $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$ [4,33,36]. Il est difficile d'établir une tendance pour l'évolution de ce coefficient car les différents bétons de chanvre étudiés diffèrent par leur dosage, par le liant utilisé ou encore par le procédé de fabrication.

Il est toutefois intéressant de souligner que les coefficients de *Washburn* sont du même ordre de grandeur pour le tuffeau et les bétons de chanvre moulés, en particulier le *bdc – NHL*. Cette similitude vis-à-vis de l'absorption d'eau par capillarité est essentielle pour le choix des matériaux d'isolation car le comportement hydrique est un élément clé pour préserver la pérennité du bâti ancien.

III.2.5.2. Isothermes de sorption

a. Courbes expérimentales

Les mesures faites à l'aide de l'analyseur *Belsorp* ont permis d'établir les courbes d'adsorption et de désorption pour les différents bétons de chanvre étudiés.

Ces mesures sont réalisées pendant un temps 100 fois plus court par rapport à la méthode gravimétrique, ce qui permet de connaître d'une façon plus rapide la capacité de rétention des matériaux. Or, la limite de cette technique est principalement la taille de l'échantillon puisque le récipient est trop petit pour accueillir des volumes représentatifs des bétons de chanvre.

L'échantillon est en effet découpé à 13 cm³ en moyenne (en géométrie irrégulière) ce qui modifie la surface de l'échantillon et la structure porale et ce qui serait traduit par une densité de stockage accrue puisque la microporosité et l'infra porosité seront mises en avant. Alors, aussi intéressants que soient les résultats, la principale lacune réside dans la forme des échantillons et leur taille, qui diffèrent de celle de l'application finale du matériau.

Ces courbes sont données dans la Figure III. 21 et bien qu'elles montrent la présence d'une hystérésis, ce phénomène n'est pas pris en compte dans les hypothèses du modèle de transfert hygrothermique utilisé (modèle de *Künzler* implémenté dans *WUFI*).

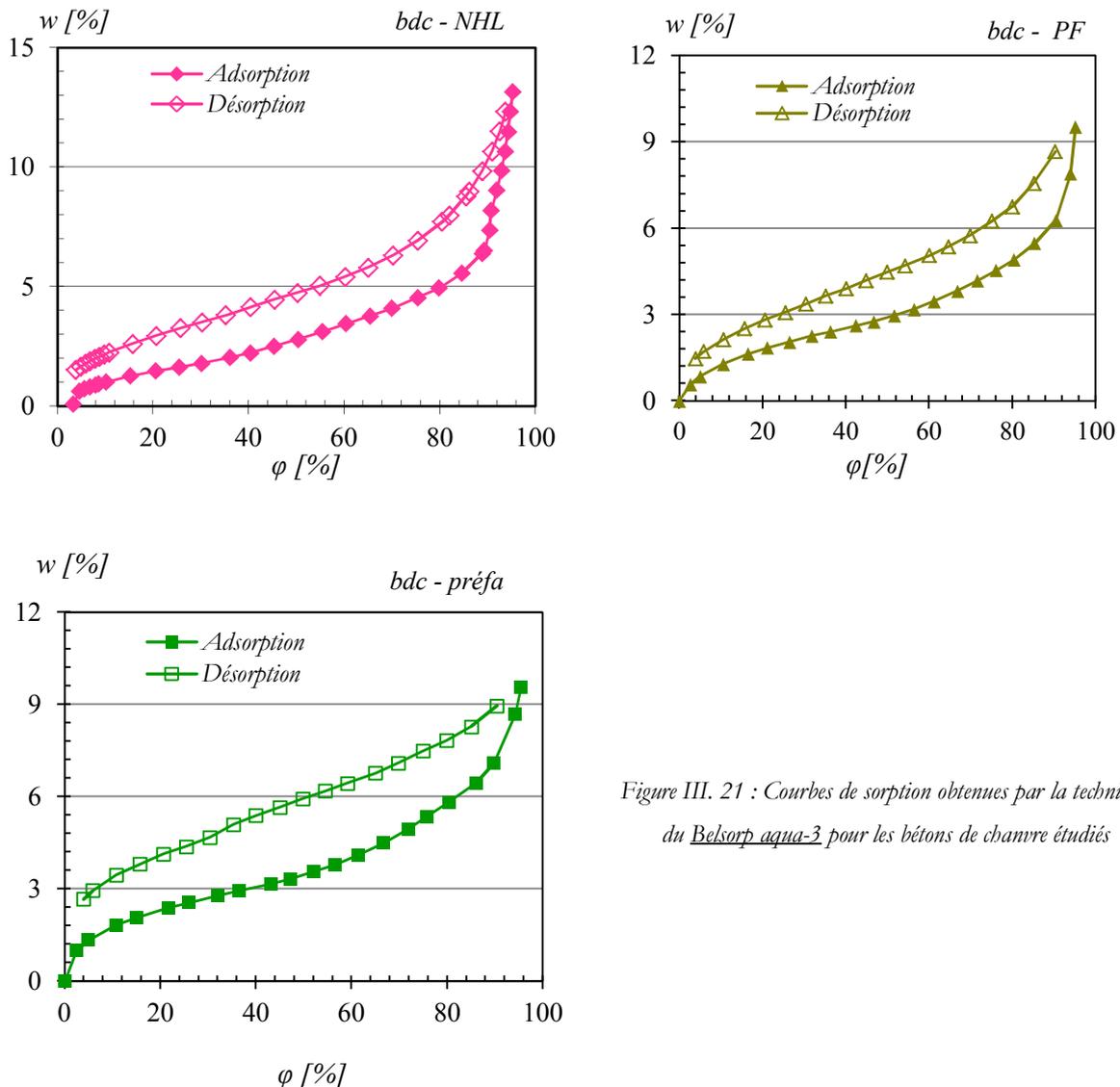


Figure III. 21 : Courbes de sorption obtenues par la technique du *Belsorp aqua-3* pour les bétons de chanvre étudiés

Dans ce qui suit nous nous limitons à l'étude des isothermes d'adsorption. Nous remarquons par ailleurs que les courbes obtenues par la méthode des solutions salines sont généralement inférieures aux courbes obtenues par la technique du *Belsorp* à l'exception du *bdc - PF* (Figure III. 22).

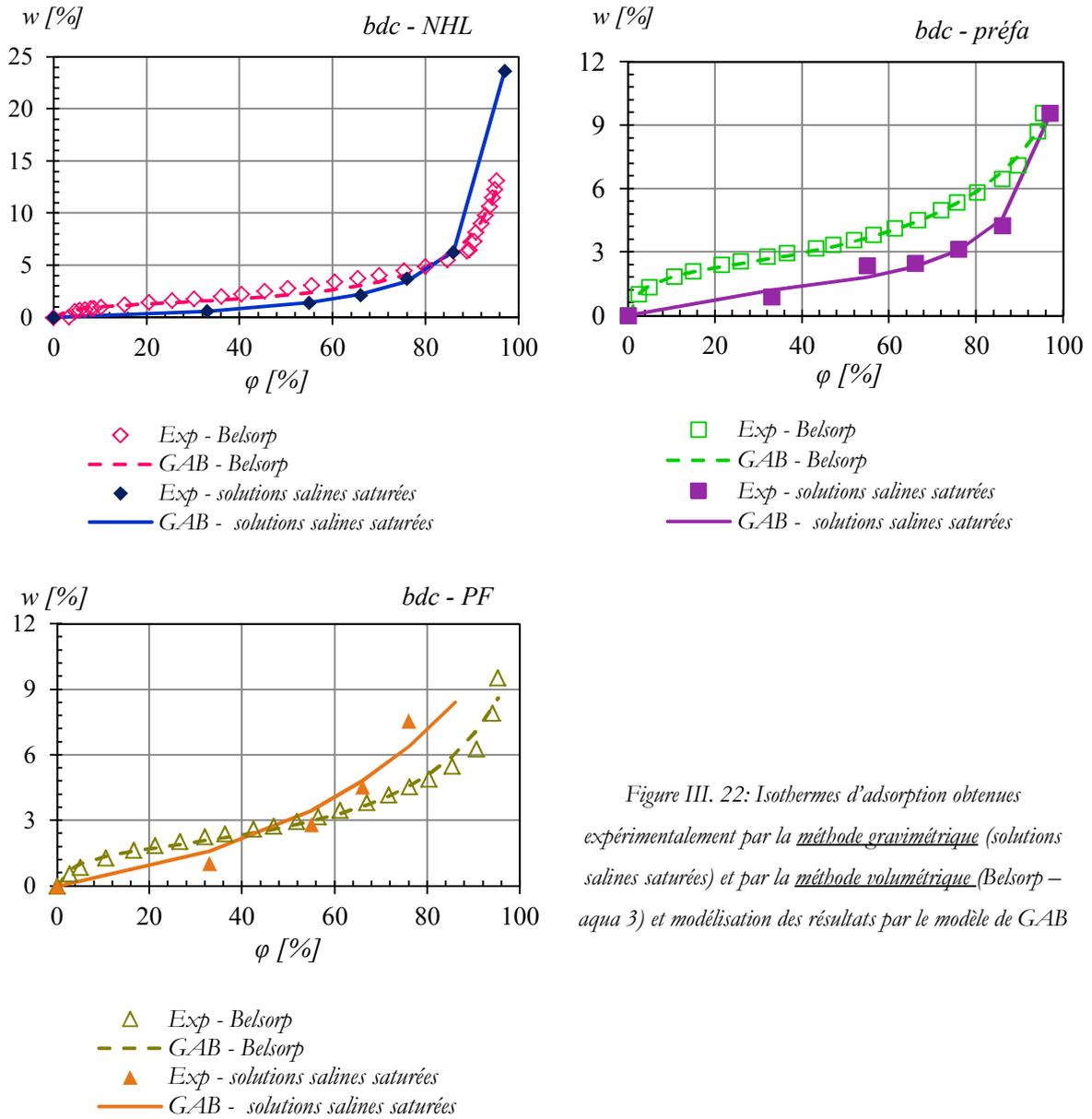


Figure III. 22: Isothermes d'adsorption obtenues expérimentalement par la méthode gravimétrique (solutions salines saturées) et par la méthode volumétrique (*Belsorp - aqua 3*) et modélisation des résultats par le modèle de GAB

De manière générale, nous observons que les matériaux étudiés présentent à 20°C des courbes d'adsorption de type II. C'est le type appelé sigmoïde (courbe en S). C'est le type le plus fréquent et qui correspond à des matériaux macroporeux. Selon *Brunauer, Emmet et Teller* (BET), la première partie de la courbe correspond à une adsorption mono-moléculaire, ensuite il se forme une couche multimoléculaire d'épaisseur indéfinie adsorbant relativement peu d'eau aux faibles activités de l'eau et des quantités plus importantes pour les activités de l'eau élevée [79].

Les paramètres du modèle de *GAB* sont récapitulés dans le Tableau III. 12 et le Tableau III. 13 en fonction de la méthode expérimentale utilisée.

Tableau III. 12 : Paramètres du modèle de *GAB* pour les bétons de chanvre – méthode volumétrique

	w_m [kg/kg]	K	C
<i>Bdc</i> – NHL	0,012	0,951	36,628
<i>Bdc</i> – PF	0,016	0,852	32,177
<i>Bdc</i> - préfa	0,021	0,808	45,638

Tableau III. 13 : Paramètres du modèle de *GAB* pour les bétons de chanvre – méthode gravimétrique

	w_m [kg/kg]	K	C
<i>Bdc</i> – NHL	0,011	0,984	1,222
<i>Bdc</i> – PF	0,955	0,490	0,074
<i>Bdc</i> - préfa	0,009	0,932	23,377

La technique des solutions salines est utilisée pour des échantillons de taille représentative. Or, compte tenu de la durée de l'essai qui avoisine les 14 mois, nous avons observé un développement de moisissures à la surface des échantillons conservés dans les enceintes à 97 %. Ce constat nous conduit à suggérer la correction des isothermes d'adsorption obtenues.

b. Correction des isothermes d'adsorption obtenues par la technique des solutions salines saturées

Le critère de fin des essais par suivi gravimétrique est la stabilisation de la masse. Néanmoins les échantillons de bétons à base de chanvre ne sont encore pas à l'équilibre avec l'ambiance même après 400 jours d'essai. A cette échéance, le développement de moisissures à la surface des échantillons conservés dans les ambiances à fortes humidité modifie le bilan de masse d'eau retenu.

Afin de limiter la durée de l'essai et ainsi éviter le développement de moisissure qui fausse le suivi de masse, nous proposons de suivre le protocole décrit par *Collet et al* [28] et qui est décrit dans le chapitre II (voir § II.4.2.d).

Dans un premier temps, nous avons comparé les résultats expérimentaux (présentés avec des marqueurs) aux résultats prédits (présentés avec des lignes continues). Comme il est le cas pour le *bdc* – PF illustré sur la Figure III. 23, il y a un écart entre les valeurs trouvées par suivi gravimétrique et celles prédites pour les fortes humidités relatives (76, 86 et 97 %). Cet écart est d'autant plus important que l'hygrométrie est plus élevée. Ces mêmes observations sont données également pour le *bdc*- NHL. Quant au *bdc* – préfa, pas de développement de moisissures n'est observé ni détecté par comparaison des valeurs relevées et prédites.

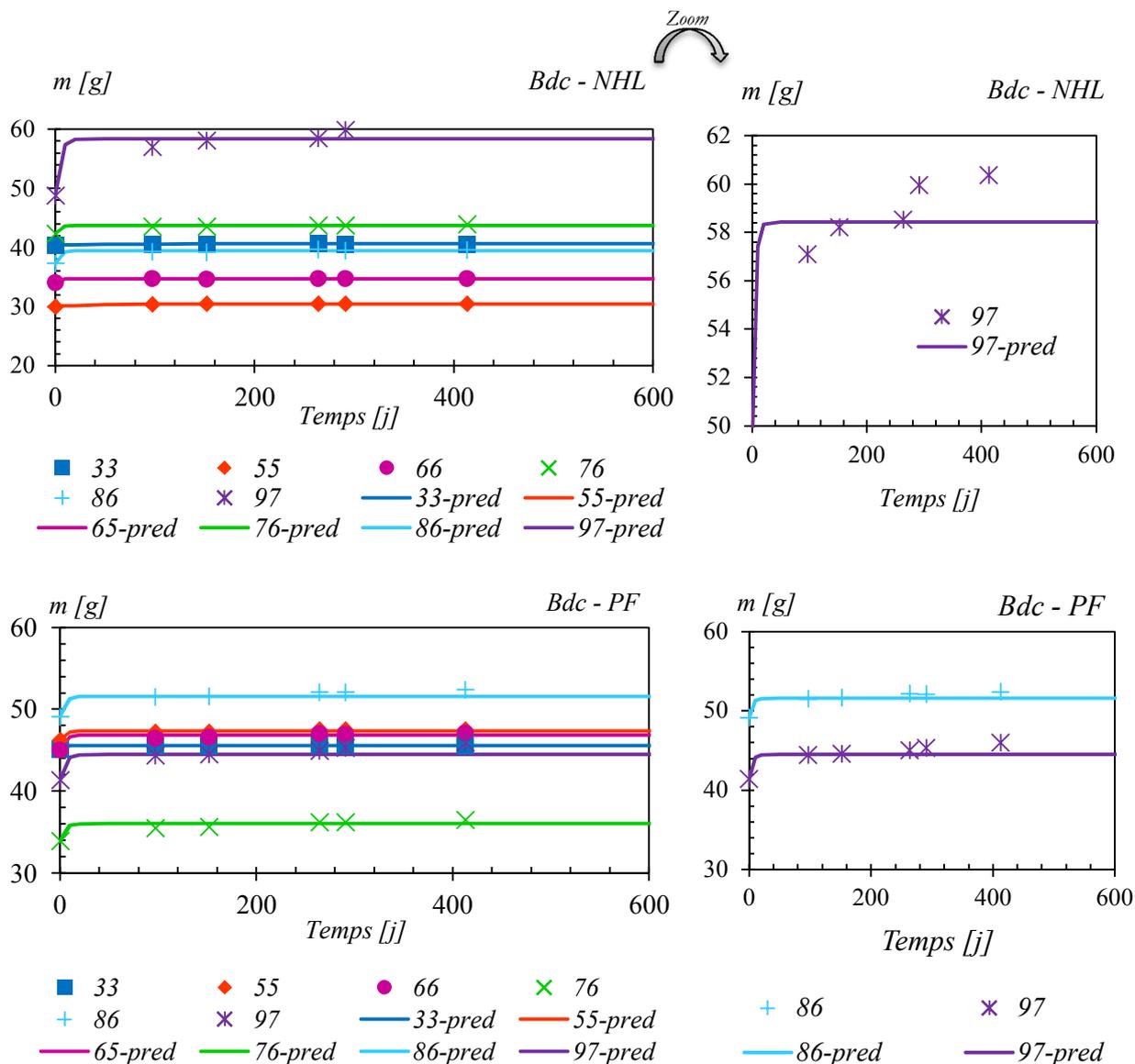


Figure III. 23 : Comparaison des résultats de la méthode des solutions salines saturées obtenus par des pesées régulières (marqueurs) aux résultats obtenus par prédiction de l'évolution exponentielle de la masse (lignes continues)

Dans un second temps, nous présentons les courbes d'adsorption à partir des premières données obtenues par la technique des solutions salines saturées et nous les comparons par la suite à celles obtenues expérimentalement par la même technique (Figure III. 24).

Les isothermes d'adsorption obtenues à partir de la prédiction des valeurs de la masse à l'équilibre pour chaque humidité relative $m_{\infty, \varphi}$ conservent la même allure mais décrivent généralement une capacité de rétention d'eau plus faible que celles obtenues par des pesées régulières des échantillons. Ces variations sont dues à l'existence de moisissures qui ont besoin d'eau pour leur développement et leur croissance (voir § I.3.1 et I.3.2)

Enfin nous calculons les paramètres du modèle de *GAB* pour les courbes obtenues après prédictions de la masse à l'équilibre $m_{\infty,\varphi}$. Ces paramètres sont donnés dans le Tableau III. 14.

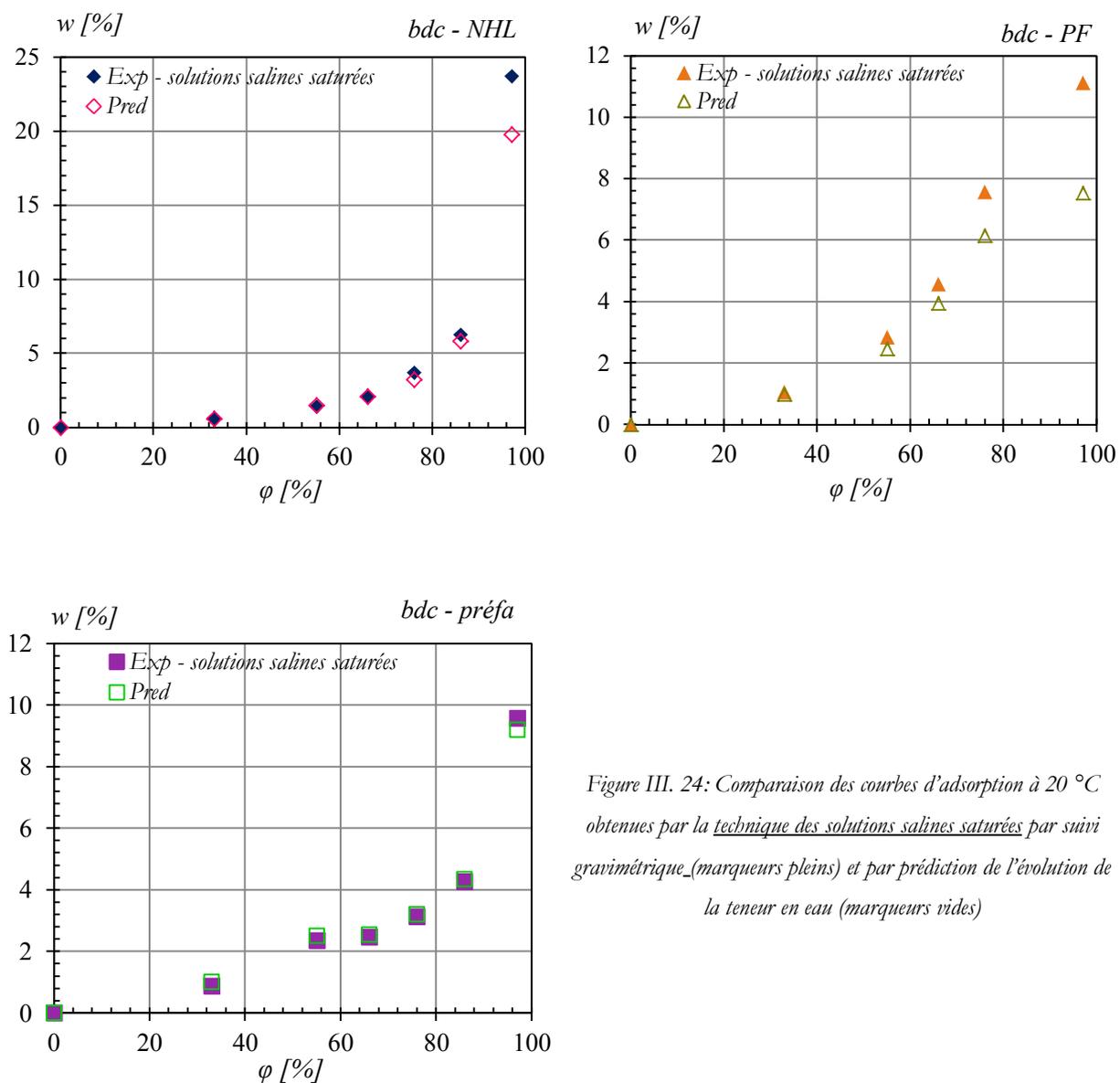


Figure III. 24: Comparaison des courbes d'adsorption à 20 °C obtenues par la technique des solutions salines saturées par suivi gravimétrique (marqueurs pleins) et par prédiction de l'évolution de la teneur en eau (marqueurs vides)

Tableau III. 14 : Paramètres du modèle de *GAB* pour les bétons de chamvre – méthode gravimétrique avec prédiction des masses $m_{\infty,\varphi}$

	w_m [kg/kg]	K	C
Bdc – NHL	0,01	0,978	1,405
Bdc – PF	1,228	0,357	0,083
Bdc - préfa	0,01	0,922	43,955

III.2.5.3. Perméabilité à la vapeur d'eau

La moyenne de $G_{1,2}$ (Eq II.11) est ensuite représentée pour chaque matériau en fonction du gradient d'humidité relative imposé dans la Figure III. 25.

Pour les bétons de chanvre, on distingue le régime transitoire et le régime permanent pour les coupelles contenant les solutions de K_2CO_3 saturées. Cependant pour les coupelles soumises à un gradient d'humidité relative de 88,5 %, nous avons noté des perturbations en continu. Ces perturbations persistent même en prolongeant la durée d'essai (jusqu'à deux fois le temps préconisé). L'essai n'est alors pas allé à son terme à cause du développement des moisissures. L'apparition des moisissures à la surface d'un matériau hydrophile comme le béton à base de chanvre en particulier dans les ambiances de forte humidité est observée par les différents auteurs comme *Ait Ouméziane* et *Collet et al.*[28,37].

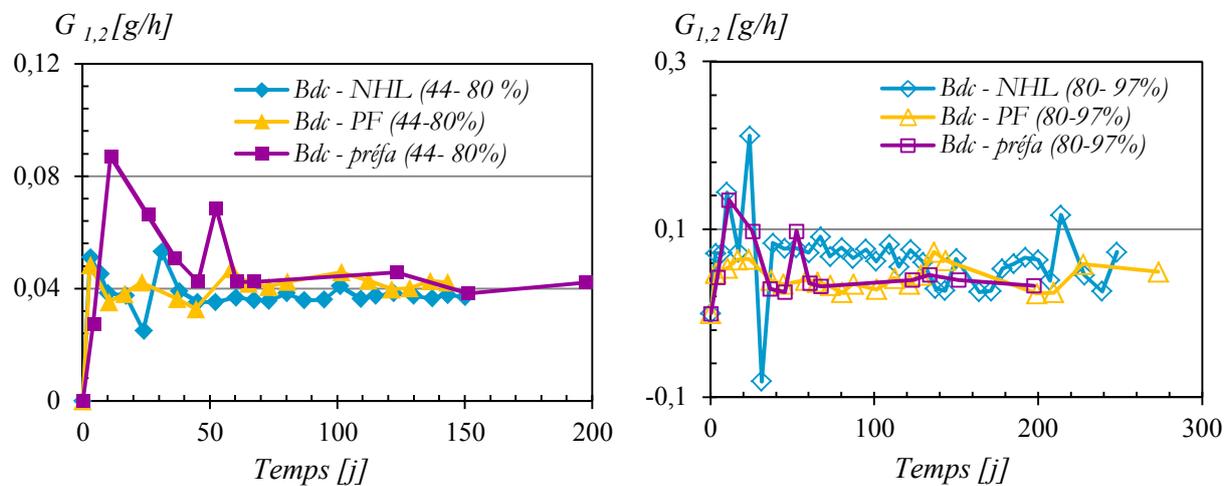


Figure III. 25 : Variations moyennes des masses des coupelles pendant la période d'essai en fonction du gradient d'humidité relative imposé pour les éprouvettes des bétons de chanvre

Concernant les bétons de chanvre, les perméabilités à la vapeur d'eau et les facteurs de résistances à la diffusion de la vapeur d'eau sont déterminées pour un gradient moyen d'humidité relative de 62 % (Tableau III. 15). Le béton préfabriqué est plus perméable à la vapeur d'eau par rapport aux bétons moulés. Ces perméabilités sont relativement élevées ce qui donne le caractère perspirant à ce matériau d'origine végétale.

Tableau III. 15 : Perméabilités et facteurs de résistances moyennes à la vapeur d'eau à 62 % d'humidité relative pour les bétons de chanvre étudiés et les écarts types correspondants

	δ [10^{-11} kg/m. s. Pa]	μ [-]
Bdc - NHL	$5,97 \pm 0,08$	$3,35 \pm 0,05$
Bdc - PF	$7,34 \pm 0,24$	$2,73 \pm 0,09$
Bdc - préfa	$15,3 \pm 1,13$	$1,31 \pm 0,1$

III.2.6. Propriétés thermiques

De la même manière que pour le tuffeau, les échantillons de béton de chanvre initialement saturés à l'eau sont mis à sécher jusqu'à obtention de la teneur en eau souhaitée. Ensuite, ils sont conditionnés avec un film transparent pendant une durée moyenne de 14 jours afin de permettre à l'eau présente dans l'échantillon de se répartir d'une façon homogène dans le réseau poral.

Nous avons ensuite mesuré la conductivité thermique et la chaleur volumique par la technique du film chaud décrite dans le chapitre II (§ II.5).

Les valeurs de ces propriétés sont calculées pour chaque thermocouple (au total 3 par échantillon), les valeurs moyennes et leurs écart-type sont données dans la Figure III. 26.

Nous avons noté que les valeurs obtenues sont entachées d'incertitudes, pour certains échantillons de même ordre de grandeur que la mesure. Par exemple, pour des valeurs moyennes de conductivité thermique comprises entre 0,09 et 0,5 W/m.K, les écarts type sont compris entre 0,02 et 0,21 W/m.K. pour la chaleur volumique, les valeurs moyennes varient entre 0,55 et 2,22 MJ/K.m³ pour des écarts type qui varient entre 0,01 et 0,57 MJ/K.m³ (les valeurs sont calculées comme étant les valeurs maximales et minimales de toutes les valeurs obtenues sans correspondance entre la valeur moyenne et l'écart type).

Cette dispersion est principalement due à l'hétérogénéité du béton de chanvre. La moyenne des 3 thermocouples semble ne pas être suffisante car les profils de température restent ponctuels. Il faudrait plutôt acquérir des moyennes spatiales à chaque instant.

L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau est donnée dans la Figure III. 27. Les conductivités thermiques pour les matériaux secs sont du même ordre de grandeur que les valeurs trouvées dans la littérature, elles sont de 0,13 W/m. K pour le *bdc-NHL*, 0,11 W/m. K pour le *bdc-PF* et de 0,1 W/m. K pour le *bdc-préfa*. Ces faibles valeurs de conductivité thermique permettent d'envisager l'utilisation du béton de chanvre comme matériau d'isolation thermique.

Or elle évolue en fonction de la teneur en eau, susceptible de dégrader les performances isolantes du matériau surtout que ce dernier possède une porosité inter-chênevotte mais aussi intra chênevotte. La teneur en eau maximale pouvant atteindre 180% en cas d'immersion ou de la remontée capillaire, la conductivité thermique sera proche de celle de l'eau en état liquide.

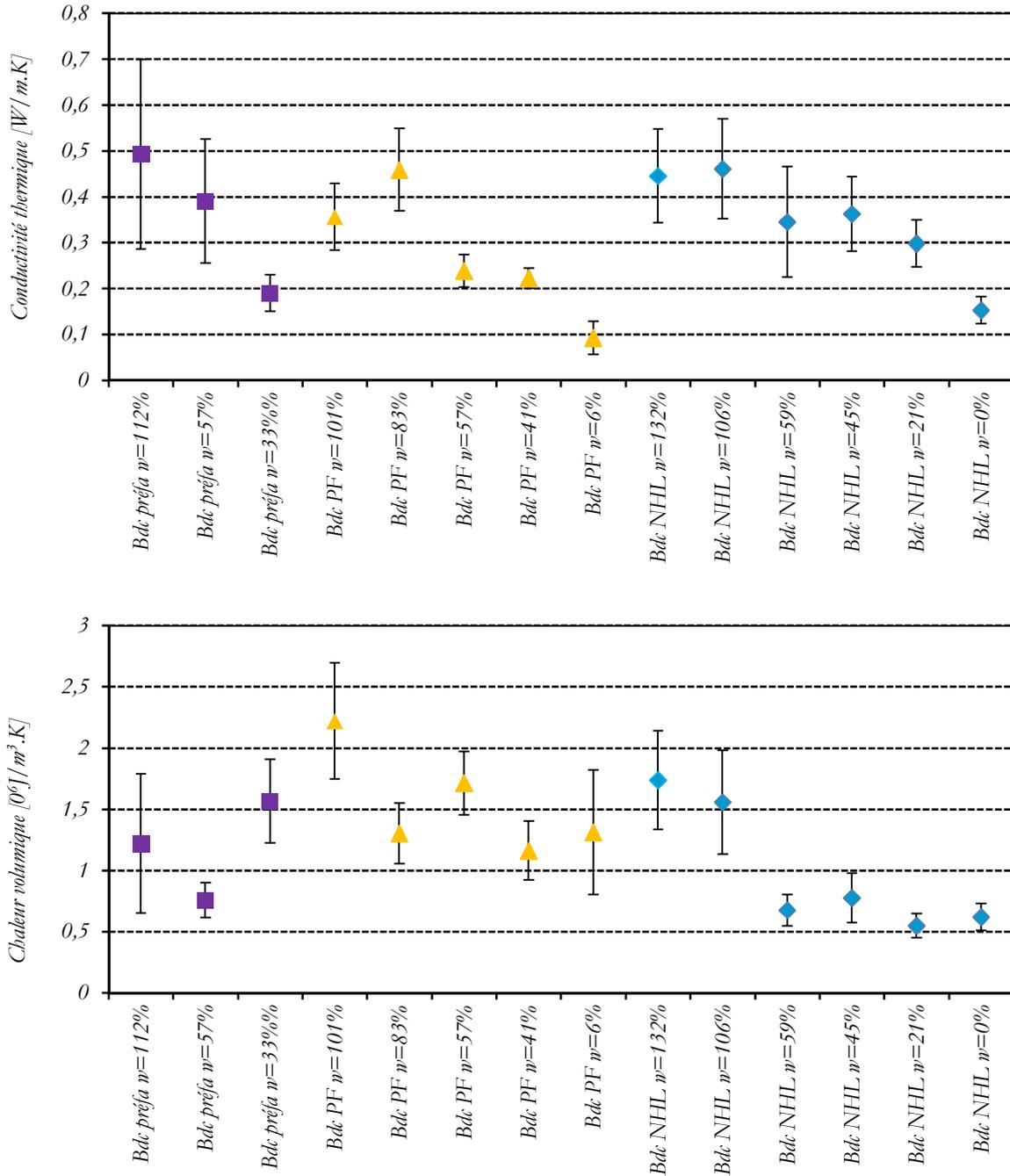


Figure III. 26 : Variation de la conductivité thermique et de la chaleur volumique en fonction de la teneur en eau massique pour les éprouvettes en béton de chanvre

La tendance linéaire de l'augmentation de la conductivité thermique suivant l'état hydrique de l'échantillon en béton de chanvre est obtenue par régression linéaire des valeurs mesurées et elle est décrite par les relations III. 6 , III. 7 et III. 8 pour *bdc-NHL*, *bdc-PF* et *bdc-préfa* respectivement.

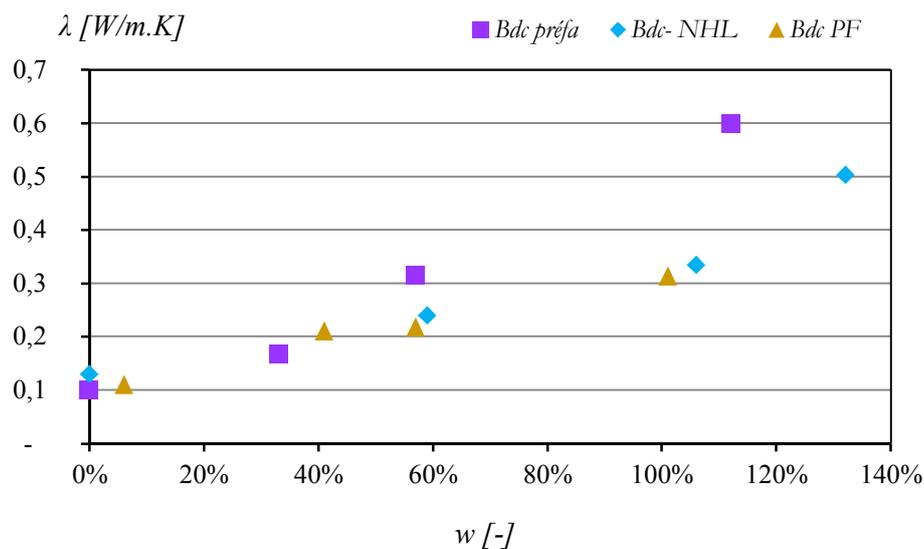


Figure III. 27 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau massique pour les éprouvettes en béton de chanvre

$$\lambda = 0,13 + 0,2405w, R^2=0,91 \quad \text{III. 6}$$

$$\lambda = 0,11 + 0,2086w ; R^2=0,97 \quad \text{III. 7}$$

$$\lambda = 0,1 + 0,4165w ; R^2=0,95 \quad \text{III. 8}$$

L'état sec est toutefois un état irréaliste car les matériaux du génie civil, en service, seront exposés à des ambiances avec un taux d'hygrométrie. Les mécanismes de transfert sont alors des transferts de vapeur d'eau.

Nous nous sommes intéressés à l'étude des propriétés thermiques pour des ambiances de 50% et 90 %, plage d'humidité à laquelle les bétons à base de chanvre seront soumis puisqu'ils sont destinés à être appliqués du côté intérieur de la paroi (isolation thermique par l'intérieur).

Nous avons donc mesuré la conductivité thermique pour les 3 éprouvettes en béton de chanvre conservées pendant quelques mois dans les ambiances à $23 \pm 2^\circ\text{C}$ et à $50 \pm 10\%$ et $85 \pm 5\%$.

Par le biais des modèles de *GAB* pour chaque formulation, nous présentons ces valeurs en fonction de la teneur en eau et nous vérifions ainsi si les tendances linéaires sont valables. L'ensemble des données est présenté dans le Tableau III. 16 et le Tableau III. 17.

Nous soulignons une augmentation de conductivité thermique qui peut atteindre 40% entre les ambiances de 50 et 85 %. Or la loi de régression linéaire n'a pas pris en compte ces variations.

En effet, la principale difficulté est d'adapter un modèle obtenu pour des variations de teneur en eau par saturation à des valeurs obtenues pour transfert de vapeur d'eau. Les modes de transfert d'eau sont différents. Dans le premier cas, les pores sont partiellement saturés, or lorsque ces éprouvettes sont exposées à une ambiance avec un taux d'hygrométrie donné, la diffusion de la vapeur d'eau est dominante.

Ces observations soulignent l'importance de prise en compte de la diffusion de la vapeur d'eau dans les calculs thermiques, en particulier dans le cas des matériaux hydrophiles avec une porosité de type macro porale où les phénomènes d'adsorption sont accentués par un risque de développement de moisissures.

Tableau III. 16 : Comparaison des conductivités thermiques mesurées et prédites pour une ambiance de 50% d'humidité relative

	w [%]	$\lambda_{\text{mesurée}}$ [W/m.K]	régression lin [W/m.K]
<i>Bdc - NHL</i>	1,17	-	0,13
<i>Bdc - PF</i>	2,64	0,14	0,12
<i>Bdc - préfa</i>	1,76	0,11	0,11

Tableau III. 17 : Comparaison des conductivités thermiques mesurées et prédites pour une ambiance de 85% d'humidité relative

	w [%]	$\lambda_{\text{mesurée}}$ [W/m.K]	$\lambda_{\text{régression lin}}$ [W/m.K]
<i>Bdc - NHL</i>	5,43	0,22	0,14
<i>Bdc - PF</i>	6,14	0,19	0,12
<i>Bdc - préfa</i>	4,46	0,18	0,12

Nous avons également mesuré la chaleur volumique des trois bétons de chanvre étudiés en équilibre dans une ambiance de 0%, 50% et 85%. Ces valeurs sont données dans le Tableau III. 18.

Tableau III. 18: Comparaison des chaleurs volumiques [MJ/m³.K] mesurées pour des différentes ambiances d'humidité relatives

	0%	50%	85%
<i>Bdc - NHL</i>	0,55	-	3,68
<i>Bdc - PF</i>	1,06	3,6	4,26
<i>Bdc - préfa</i>	1,19	3,01	3,47

A partir des valeurs de conductivités thermiques et de chaleurs volumiques données dans les tableaux III.16, III.17 et III.18, nous avons déduit les valeurs des diffusivités des effusivités thermiques.

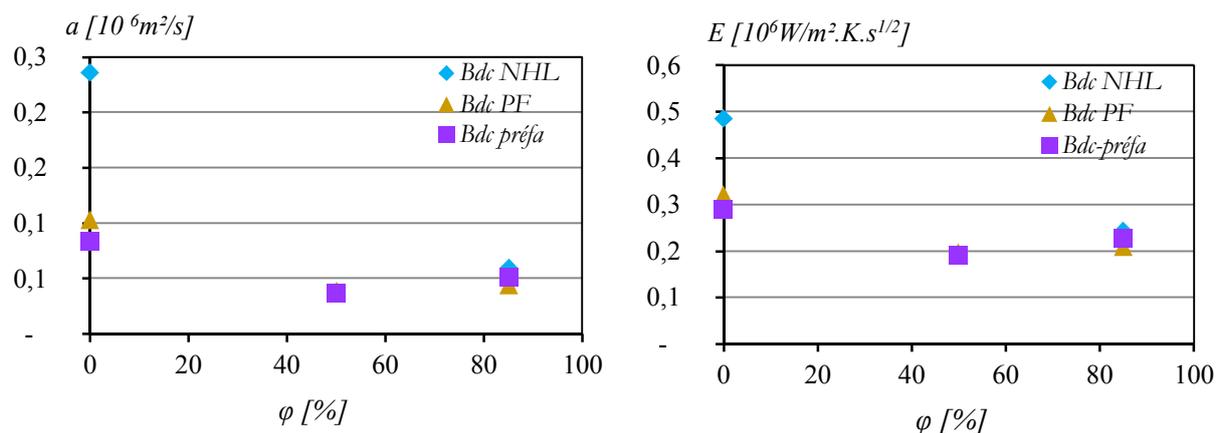


Figure III. 28 : Diffusivités et effusivités thermiques des bétons de chanvre étudiés à des différentes ambiances d'humidité relatives

III.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mesurés *via* des essais normalisés les masses volumiques et porosités des différents matériaux ainsi que les paramètres de transferts hydriques tels que le coefficient d'absorption par capillarité et la perméabilité à la vapeur d'eau à différentes humidités relatives moyennes.

Nous avons également mesuré l'isotherme d'adsorption par la méthode gravimétrique, appelée la méthode des solutions salines saturées. Les résultats de cette dernière sont comparés à une méthode émergente qui est celle du *Belsorp* où le principe de la mesure est un suivi volumétrique des quantités de vapeur d'eau pendant les phases d'adsorption et de désorption en conditions isothermes (adsorption et désorption).

Ensuite nous avons réalisé des mesures du comportement hydro-thermique afin de souligner l'évolution de la conductivité thermique et de la chaleur massique en fonction de la teneur en eau du matériau.

L'évaluation de l'ensemble des propriétés physiques, thermiques et de transferts hydriques permettra d'élaborer une base de données regroupant les propriétés nécessaires à l'évaluation de la technique d'isolation et à la modélisation numérique des transferts couplés chaleur/humidité dans les parois.

Les chapitres suivants sont dédiés à l'étude des techniques d'isolation intégrant le béton de chanvre.

IV. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES TECHNIQUES D'ISOLATION À BASE DE CHANVRE

L'isolation des bâtiments en pierre de tuffeau nécessite la mise en œuvre de matériaux respectueux du comportement hydrique de la paroi. Une technique d'isolation mal choisie peut entraîner des désordres hydriques préjudiciables à la pérennité de la paroi. Le but de l'étude est de déterminer si le béton à base de chanvre en isolation par l'intérieur est capable de satisfaire cette condition. Dans ce but, deux applications de béton de chanvre ont été sélectionnées.

L'étude expérimentale des méthodes d'isolation du tuffeau par le béton de chanvre est effectuée dans une cellule biclimatique développée spécialement pour ce projet. Cette dernière permet de soumettre les parois simple couche ou multicouche à des gradients de température et d'humidité relative afin de tester leur comportement sous sollicitations statiques ou cycliques.

Dans un premier temps, nous présenterons le dispositif expérimental et les choix de conception réalisés pour l'étude. Ensuite, nous aborderons les différentes méthodes (norme, littérature, inter corrélation, décomposition en série de Fourier) permettant de déterminer les caractéristiques thermiques et hydriques dynamiques des différentes parois : facteur d'amortissement et déphasage temporel. Ces méthodes sont enfin appliquées à différents complexes de paroi et leurs résultats sont comparés et discutés

IV.1. Dispositif expérimental développé

L'étude expérimentale des transferts de chaleur et d'humidité à travers la paroi est indispensable pour évaluer la performance de la technique d'isolation. Pour cela, une cellule biclimatique a été conçue et mise en place pour la thèse. La cellule se compose de deux compartiments séparés par la paroi testée. Un premier compartiment, appelé « *ambiance intérieure* », conditionne une ambiance de 23°C et de 47% d'humidité relative. Dans le second compartiment, dit « *ambiance extérieure* », la température est maintenue à 5°C et l'humidité relative à 87%.

Les deux ambiances sont choisies pour reproduire d'une part des conditions de confort à l'intérieur du bâtiment et d'autre part une ambiance hivernale calculée à partir des valeurs moyennes de la saison pour la ville d'Angers et données dans *Calso*²¹.

IV.1.1. Description de la cellule biclimatique

La cellule biclimatique, décrite dans la Figure IV. 1, est fabriquée en contreplaqué bakélinisé. Chaque compartiment mesure 30 cm de largeur, 60 cm de hauteur et 50 cm de profondeur. L'ensemble est ensuite recouvert avec 6 cm du polystyrène extrudé

Des échangeurs de chaleur dans chaque caisson sont alimentés par une circulation d'eau qui permet de réguler la température souhaitée. L'échange de chaleur entre les ambiances à l'intérieur des caissons et la circulation d'eau est assuré par un échangeur de chaleur *Aspen 4105*. Cet échangeur est fixé au plafond de chaque caisson et équipé d'un ventilateur afin d'assurer la circulation de l'air intérieur dans l'échangeur ainsi qu'une uniformisation par brassage de la température et de l'humidité relative de l'air dans les caissons.

L'échangeur du caisson « *ambiance intérieure* » est lié à un bain thermostaté *Huber* qui permet la régulation de température de l'ambiance à 20°C avec une précision de $\pm 0,05^\circ\text{C}$. L'échangeur du caisson « *ambiance extérieure* » est connecté à un cryothermostat thermo *Scientific Haake Arctic* dont la plage de température est comprise entre -10°C et 100°C . Les deux bains sont placés en dessous des compartiments des ambiances. La circulation de l'eau dans les circuits est réalisée par une mini pompe *Terluran* submersible assurant un débit de 5 L/min.

L'hygrométrie dans les ambiances est imposée par les solutions salines saturées. Les sels utilisés sont le carbonate de potassium (K_2CO_3) pour l'ambiance intérieure et le chlorure de potassium (KCl) pour l'ambiance extérieure. Chaque caisson contient alors un récipient de solution aqueuse saturée, dont la surface couvre la quasi-totalité du fond du caisson. La Figure IV. 2 illustre davantage le système permettant d'imposer la température et l'humidité relative dans un caisson.

²¹ http://ines.solaire.free.fr/dataclim_1.php



Figure IV. 1: Cellule biclimatique a) plans Auto CAD b) vue in-situ



Figure IV. 2 : Photo du principe de génération de température et d'humidité relative

La Figure IV. 3 illustre l'emplacement du dispositif d'accueil de la paroi. Celui-ci est fabriqué avec du chevron sapin traité et de classe 2 et comprend un joint *Compriband* TRS sur le pourtour. Ce joint assure l'étanchéité à l'air, à la vapeur d'eau et à l'eau à la jonction entre le bâti et le modèle réduit de paroi.

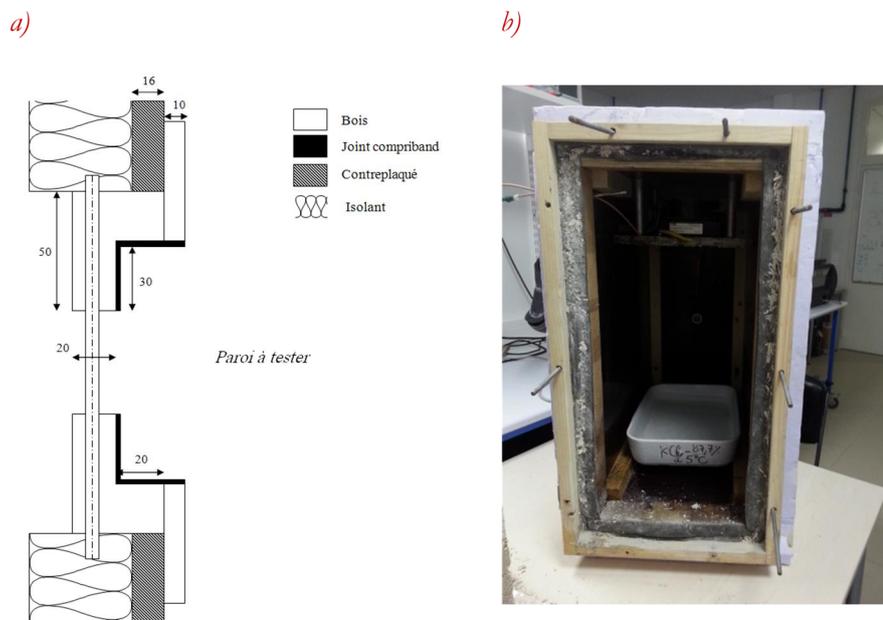


Figure IV. 3: Détail d'étanchéité au niveau de l'emplacement de la paroi a) schéma de principe et b) photo in situ

IV.1.2. Système d'acquisition des données

Afin de suivre les variations de température et d'humidité relative dans les parois testées, nous avons utilisé des capteurs hygrométriques commercialisés de *Rotronic* qui délivrent un signal en tension de 0 à 1 V. Elle correspond à une acquisition de température de -30°C à 70°C et une humidité relative de 0% à 100%. Les incertitudes de mesure suivant le fabricant sont de $0,3^{\circ}\text{C}$ pour la température et de 1% pour l'humidité relative.

Les sondes sont placées en différentes positions dans les caissons et dans la paroi testée (Figure IV. 4). Deux sondes sont placées dans les deux ambiances pour vérifier les conditions aux limites imposées. D'autres sondes sont placées à la surface et au centre de la paroi testée. Une sonde supplémentaire est placée à l'interface des matériaux lorsque la paroi testée est bicouche.

L'acquisition se fait sous une alimentation de 24 V et piloté par le logiciel de *National Instrument LabVIEW*.

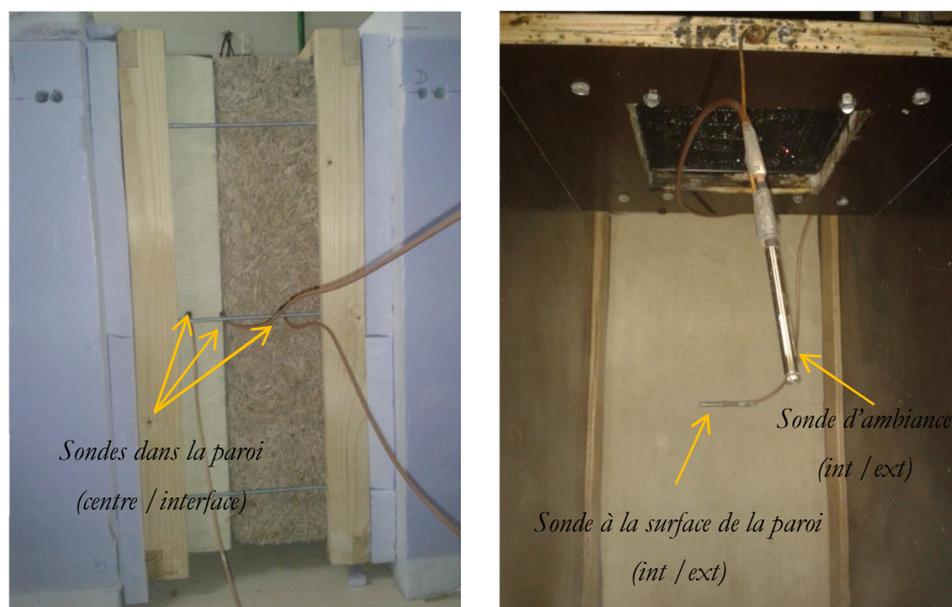


Figure IV. 4 : Emplacement des sondes hygrométriques dans la paroi et dans les ambiances

IV.1.3. Essais préliminaires

IV.1.3.1. Vérification des capteurs

Les sondes utilisées sont des capteurs d'ambiance. Par conséquent, leur utilisation au niveau des surfaces intérieure et extérieure de la paroi testée nécessite la comparaison de leurs valeurs avec des valeurs de capteurs surfaciques. Nous avons ainsi équipé les surfaces des parois testées de thermocouples de type K. Les résultats obtenus montrent une bonne représentativité des températures enregistrées par un thermocouple et celles par une sonde d'ambiance. Un exemple est donné dans la Figure IV. 5 et qui illustre le résultat obtenu pour la température de surface intérieure pour une paroi simple en tuffeau.

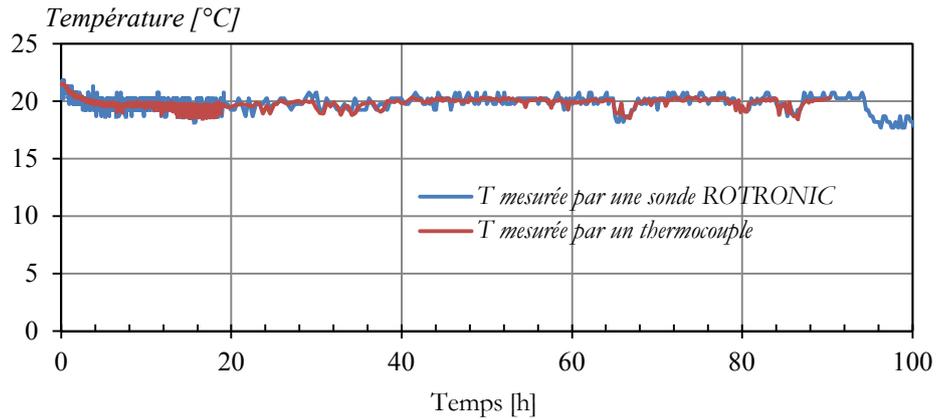


Figure IV. 5 : Comparaison des résultats obtenus pour la surface intérieure par la sonde Rotronic (sonde d'ambiance) et le thermocouple (sonde de contact) - cas d'une paroi simple en tuffeau

IV.1.3.2. Détermination des coefficients d'échange convectif

La connaissance des conditions aux limites est d'importance extrême pour résoudre les équations de transfert de chaleur et d'humidité. Comme nous imposons les températures et les humidités relatives aux limites, il est nécessaire de déterminer les coefficients d'échange à la surface de la paroi. Ces coefficients sont des coefficients globaux qui rendent compte des échanges de chaleur par convection et rayonnement entre la surface de la paroi et le milieu ambiant. La détermination des coefficients d'échange peut être réalisée en imposant des conditions ambiantes statiques de part et d'autre d'une paroi de résistance thermique connue (Figure IV. 6).

Le transfert de chaleur dans la paroi se fait par conduction pure, entre deux températures de surfaces en paroi connues car mesurées à l'aide de capteur de contact. Le transfert de chaleur entre la surface de la paroi et le milieu ambiant, dont la température est mesurée, se fait par convection et rayonnement et est caractérisé par un coefficient d'échange surfacique h .

Le flux thermique surfacique (ou densité de flux thermique) total s'exprime comme suit (IV. 1) :

$$\varphi = \frac{\Delta T}{R_t} = \frac{1}{R_t} \Delta T \quad \text{IV. 1}$$

Avec

φ	[W/m ²]	Densité du flux de chaleur
ΔT	[°C]	Gradient de température
R_t	[m ² /K.W]	Résistance thermique totale

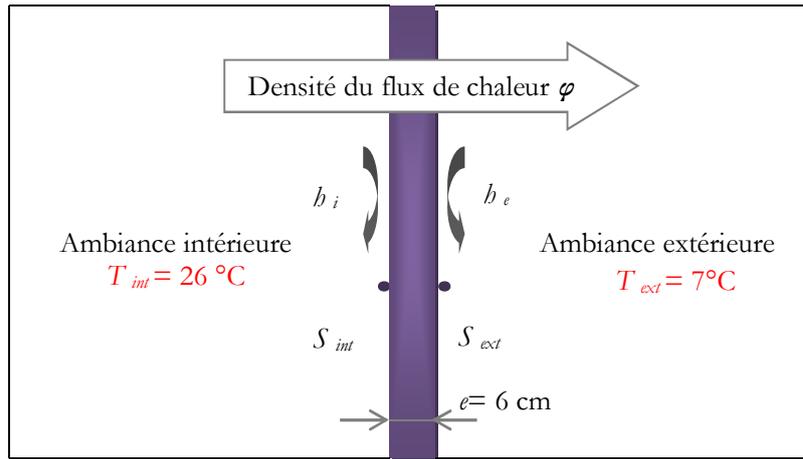


Figure IV. 6 : Schéma de principe de calcul des coefficients d'échange surfacique

En effet, une condition de type *Newton* est appliquée à l'interface entre le matériau et l'air. On impose alors un coefficient de transfert de chaleur par convection entre le matériau et l'air ambiant (Eq IV. 2). Or en régime permanent et dans l'hypothèse de paroi plane sans dissipation interne de chaleur, la densité de flux est constante à travers la paroi et égale à la densité de flux de chaleur échangée en paroi d'où (Eq IV. 3).

$$\varphi = \frac{Q_{ext} - Q_{int}}{S_{ext}} = \frac{Q_{ext} - Q_{int}}{S_{int}} = \frac{Q_{ext} - Q_{int}}{S_{ext}} \quad IV. 2$$

La densité du flux est déduite à partir du phénomène du conductif pure (IV. 3) :

$$\varphi = \frac{Q_{ext} - Q_{int}}{S_{ext}} \quad \text{et} \quad Q_{ext} = \frac{Q}{S} \quad IV. 3$$

Pour déterminer la densité de flux et par la suite les coefficients d'échange convectif, nous avons mis en place une paroi en polystyrène extrudée de 6 cm d'épaisseur. Les propriétés de cette paroi sont récapitulées dans le Tableau IV. 1.

Tableau IV. 1 : Propriétés du polystyrène extrudé utilisé

Masse volumique	32,09 kg/m ³
Conductivité thermique	0.034 W/m. K
Capacité thermique	1500 J/kg. K

Cette paroi de référence est soumise à des conditions ambiantes statiques à l'intérieur et à l'extérieur. Les évolutions temporelles des températures ont été enregistrées en différentes positions et sont présentées sur la Figure IV. 7. Nous avons noté des températures moyennes de l'ordre de 26,4°C pour l'ambiance intérieure et de 7,4 °C pour l'ambiance extérieure.

Les températures surfaciques intérieure et extérieure sont de 25,9 °C et de 8,9 °C respectivement. Le gradient de température est donc de 17°C, ce qui correspond à une densité de flux moyenne de 9,73 W/m² (la résistance thermique de conduction de la paroi est égale à 1,76 m².K/W).

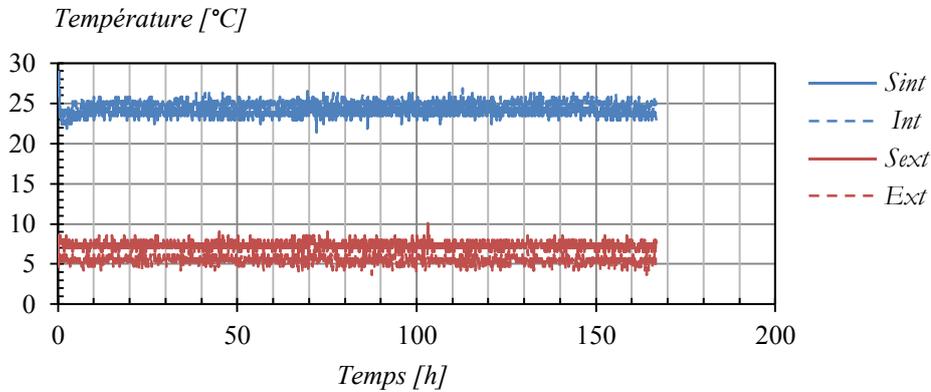


Figure IV. 7 : Températures enregistrées dans le cas d'étude d'une paroi en polystyrène extrudé

Les coefficients d'échange par convection intérieur et extérieur sont alors calculés et récapitulés dans le Tableau IV. 2. Ces coefficients sont retenus pour tous les calculs ultérieurs réalisés pour cette étude.

Tableau IV. 2 : Coefficients d'échange convectif calculés

R_{si} [m ² .K/W]	0,05 ± 0.01
R_{se} [m ² .K/W]	0,15 ± 0.003

IV.2. Description des parois testées

IV.2.1. Mode opératoire de fabrication des parois

IV.2.1.1. Parois simples

Nous avons testé des parois simples en tuffeau et en béton de chanvre. Les parois simples en béton de chanvre sont en béton de chanvre préfabriqué et en bétons de chanvre moulés. Les différentes parois possèdent une surface d'échange de 30 x 60 cm² avec une épaisseur variable suivant la nature du matériau testé. Les épaisseurs de ces parois sont données dans le Tableau IV. 3.

Tableau IV. 3 : Épaisseurs des parois simples testées

Tuffeau	8 cm
Bdc - préfa	15 cm
Bdc - NHL	11,4 cm
Bdc - PF	11,4 cm

a. Paroi en tuffeau

La définition de l'épaisseur de la paroi en tuffeau, qui constitue le support d'origine pour mettre en œuvre le chanvre en application sèche et humide, est fondamentale. Pour cela différentes épaisseurs (2, 4, 8 et 16 cm) ont été testées par simulation numérique (logiciel *WUFI*). Une paroi de 8 cm permet de reproduire clairement les évolutions de température et d'humidité et de distinguer la phase transitoire et la phase permanente pendant des temps d'expérimentation raisonnables (aux alentours de 110 h).

L'épaisseur de 8 cm a été donc établie suite à un calcul de temps de stabilisation thermique et hydrique à partir de la moyenne spatiale des champs de température et d'humidité. Ces temps de stabilisations sont alors plus représentatifs de l'évolution globale du matériau, car basés sur l'évolution de la paroi sur la totalité de son épaisseur [80].

b. Parois en béton de chanvre moulé

Les parois simples en béton moulé sont testées à l'âge de 70 jours pour le *bdc - PF* et de 75 jours pour le *bdc - NHL*. En outre, toutes les parois, présentées dans la Figure IV. 8, contiennent des réservations pour recevoir les sondes hygrométriques en trois positions distinctes : à la surface intérieure, au centre de la paroi et à la surface extérieure. Ces réservations sont faites dans le sens perpendiculaire au sens de flux de chaleur et d'humidité, afin de limiter la perturbation des transferts. Ce positionnement permet en effet de placer les capteurs de température le long de lignes isothermes et de lignes d'égalité hygrométrie.

Fixation de la sonde à la surface



Emplacement de la sonde au milieu de la paroi

Figure IV. 8 : Parois simples en tuffeau et en bétons de chanvre testées en cellule biclimatique

IV.2.1.2. Parois multicouches

Nous avons également testé des parois multicouches tuffeau/béton de chanvre. Le support de base est une paroi en tuffeau de 8 cm à laquelle nous ajoutons une seconde paroi en béton de chanvre. Cette application de béton à base de chanvre est réalisée soit par voie sèche pour le béton de chanvre préfabriqué et par voie humide pour les bétons moulés.

En effet, pour le complexe *tuffeau/bdc - préfa*, il est suffisant de fixer une brique de béton de chanvre de 15 cm contre la paroi en tuffeau et en serrant les bords inférieur et supérieur. Une fixation

Or, les essais sont réalisés sans changement des matériaux et par conséquent, la mise à l'échelle de la paroi est uniquement géométrique.

L'épaisseur de la paroi en tuffeau dans le modèle réduite étant de 8 cm, on en déduit une épaisseur de 7 cm pour le *bdc-préfa* et la paroi en béton moulé (*bdc-NHL* et *bdc-PF*) de 5,45 cm.

La difficulté de couper aux dimensions correctes les briques de béton de chanvre préfabriquée du fait de leur taille importante, nous avons donc préservé l'épaisseur initiale de 15 cm de la brique en chanvre.

Pour les multicouches, illustrés à la Figure IV. 9, les sondes hygrothermiques sont placées aux surfaces intérieure et extérieure, au centre de chaque paroi mais aussi à l'interface tuffeau/béton de chanvre.



Tuffeau/bdc préfa

Tuffeau/bdc NHL

Figure IV. 9 : Parois multicouches tuffeau/béton de chanvre

IV.2.2. Nature des sollicitations testées

Les différentes parois testées qu'elles soient simples ou multicouches sont conservées, pendant 3 mois en moyenne, dans une chambre à $20 \pm 3^\circ\text{C}$ et $50 \pm 10\%$ d'humidité relative. Ces parois ont été par la suite testées suivant deux régimes: régime statique et régime cyclique.

Le régime statique se traduit par l'exposition de la paroi à un gradient de température et d'humidité relative constants. La température intérieure est fixée à 23°C alors que la température extérieure moyenne est de $6,5^\circ\text{C}$. Le gradient d'humidité relative est conditionné par les deux solutions salines de K_2CO_3 et KCl et dont l'activité dépend légèrement de la température.

Le régime cyclique est obtenu en faisant varier la température extérieure entre $6,5^\circ\text{C}$ et $16,5^\circ\text{C}$, en imposant des échelons de température avec une période de 24h. Le gradient d'humidité relative dépend du changement de température en particulier dans l'ambiance extérieure.

Un exemple de ces deux régimes est présenté sur la Figure IV. 10 dans le cas d'une paroi simple en tuffeau. L'enregistrement des conditions ambiantes grâce aux sondes permet de connaître le régime auquel la paroi est réellement exposée.

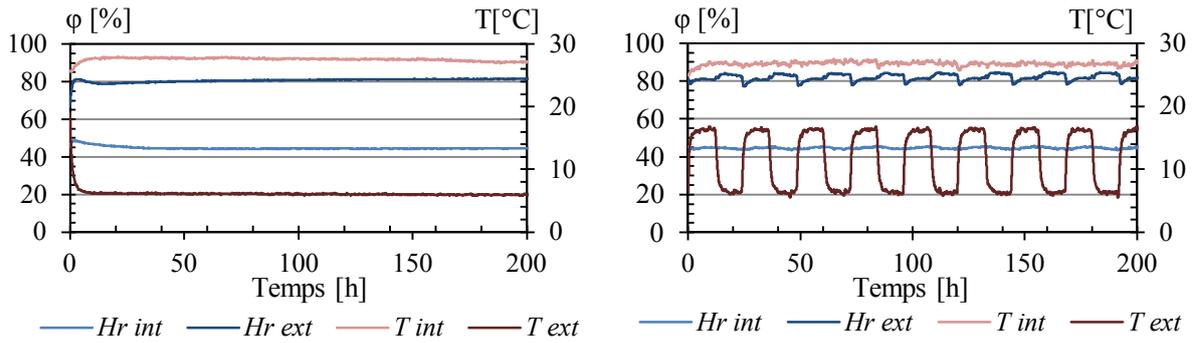


Figure IV. 10 : Conditions aux limites statique (à gauche) et cyclique (à droite) enregistrées dans le cas d'une paroi simple en bdc - préfa

IV.3. Méthode de traitement de données expérimentales

IV.3.1. Diminution du bruit de mesure

L'acquisition des signaux de température et d'humidité relative en différentes positions est faite toutes les minutes. Du fait de l'incertitude de mesure de chaque sonde, les profils temporels de l'évolution de température et d'humidité relative sont bruités. Il est donc nécessaire de réduire cette erreur de mesure afin de faciliter les traitements ultérieurs.

Pour cela, un lissage des données expérimentales faisant intervenir le développement des fonctions en séries de Taylor est développé sous *Matlab*. On rappelle dans la relation IV. 5 le développement de Taylor d'une fonction f à l'ordre n .

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x-x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x-x_0)^2 + \frac{f'''(x_0)}{3!}(x-x_0)^3 + \dots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x-x_0)^n \quad IV. 5$$

Cette expression peut être écrite pour tout point situé à proximité du point x et est générale. Pour déterminer la valeur de la fonction f en fonction de ses valeurs aux points $x+dx$ et $x-dx$, il suffit d'additionner les deux expressions de f au voisinage de x .

$$f(x+dx) + f(x-dx) = \frac{f(x) + f'(x)dx + \frac{f''(x)}{2}(dx)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(x)}{n!}(dx)^n + f(x) - f'(x)dx + \frac{f''(x)}{2}(dx)^2 - \dots + \frac{f^{(n)}(x)}{n!}(dx)^n}{2} \quad IV. 6$$

En effet :

$$f(x+dx) = f(x) + f'(x)dx + \frac{f''(x)}{2}(dx)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(x)}{n!}(dx)^n$$

$$f(x-dx) = f(x) - f'(x)dx + \frac{f''(x)}{2}(dx)^2 - \dots + \frac{f^{(n)}(x)}{n!}(dx)^n$$

La valeur de x n'est autre que la moyenne de la fonction à l'emplacement de ses plus proches voisins et elle n'est valable que pour l'ordre 1. Mais pour établir une expression valable pour un ordre

supérieur, Poullain a établi le poids des voisins de x à prendre en fonction du nombre de points utilisé pour l'estimation de la fonction (voir Tableau IV. 4) [81]. Pour une meilleure estimation de la fonction et de sa forme, il est préférable d'utiliser un grand nombre de points au voisinage de x [81]. L'application de la méthode en un seul passage permet de réduire le bruit de mesure. Cependant, la réduction substantielle du bruit de mesure nécessite un lissage multiple, ce qui nécessite de recourir à une méthode de relaxation (facteur de relaxation α), afin d'améliorer la convergence du lissage.

Tableau IV. 4 : Poids des voisins de x [81]

	$f(x-4dx)$	$f(x-3dx)$	$f(x-2dx)$	$f(x-dx)$	$f(x)$	$f(x+dx)$	$f(x+2dx)$	$f(x+3dx)$	$f(x+4dx)$
1 point					1				
2 points				1/2	0	1/2			
4 points			-1/6	4/6	0	4/6	-1/6		
6 points		1/20	-6/20	15/20	0	15/20	-6/20	1/20	
8 points	-1/70	8/70	-25/70	56/70	0	56/70	-25/70	8/70	-1/70

Les auteurs *Jedrzejewski* et *Ruiz* jugent que les facteurs de sous relaxation sont des paramètres importants qui affectent la convergence d'un schéma numérique [82,83]. Ces facteurs sont utilisés pour contrôler (voir limiter) l'influence de la précédente itération sur la nouvelle itération [83]. Le principe de la relaxation est décrit par l'équation IV. 7.

$$f^{(N+1)} = \alpha f^{(N)} + (1 - \alpha) f^{(N-1)} \tag{IV. 7}$$

Où $f^{(N)}$ est la $N^{\text{ème}}$ estimation de la fonction f après N applications de la méthode de lissage et α est le facteur de sous relaxation.

Nous avons utilisé un facteur de sous relaxation de 0,5 qui permet d'obtenir une erreur ϵ la plus faible. Cette erreur est calculée comme suit (Eq IV. 8):

$$\epsilon = \alpha (f^{(N+1)} - f^{(N)}) \tag{IV. 8}$$

Où $f^{(N+1)}$ est la fonction obtenue après lissage de la fonction $f^{(N)}$.

Les acquisitions des températures et des humidités relatives en différentes positions de la paroi testées et pour les différentes configurations sont donc lissées avec la méthode du développement en série de *Taylor*, un nombre de passage de 200 et un facteur de relaxation de 0,5 (Figure IV. 11).

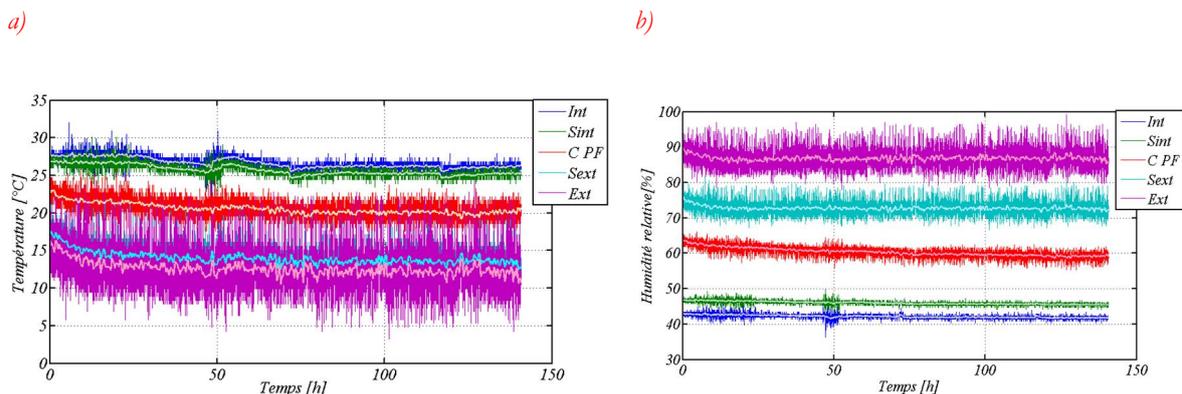


Figure IV. 11 : Représentation des résultats a) températures et b) humidités relatives obtenus après lissage –cas d'une paroi simple en bdc-PF

IV.3.2. Propriétés à déterminer en régime statique et cyclique

IV.3.2.1. Flux de chaleur et de masse

Lorsque les parois simples et multicouches sont soumises à un gradient de température et d'humidité relative. Le transfert se produit pour atteindre l'équilibre thermique/massique. Cette évolution est donc suivie au cours du temps et en différentes positions de la paroi qui sont aux surfaces intérieure et extérieure, au centre de chaque couche constituant la paroi et à l'interface des deux couches lorsqu'il s'agit d'une paroi multicouche.

IV.3.2.2. Flux de pression de vapeur

La mise en œuvre d'une technique d'isolation par l'intérieur, modifie les transferts d'humidité au sein de l'enveloppe du bâtiment, il est donc nécessaire de connaître les évolutions des pressions de vapeur d'eau dans la paroi. Ils permettent de mieux comprendre le transfert de masse car les pressions de vapeur résultent à la fois des variations de température et d'humidité relative (IV. 9) et permettent donc de détecter un risque de condensation dans la paroi.

$$p_{v,paroi}$$

IV. 9

Généralement, le risque de condensation est évalué à partir d'une comparaison des variations de pression de vapeur à la pression de vapeur saturante. Or ce critère n'est pas suffisant car ce risque peut être évalué au préalable par la connaissance du sens du flux (qui doit être de l'intérieur vers l'extérieur) En effet, les pathologies dues à la condensation sont la dégradation des propriétés thermiques des matériaux d'isolation constituant la paroi, ici le béton de chanvre, la mise en danger de la pérennité du support d'origine dans le cas où le complexe n'est pas perspirant (laissant évacuer la vapeur d'eau) et l'apparition des moisissures qui impactent la qualité de l'air intérieur et donc la santé des occupants.

IV.3.2.3. Définition du temps de stabilisation

Les temps caractéristiques d'évolution des parois sont des paramètres indispensables à l'élaboration d'un plan expérimental [80]. En effet, après définition des épaisseurs des parois par étude numérique sous *WUFI*, ces parois sont mises en place dans la cellule bi climatique développée et elles sont sollicitées en température et humidité relative **constantes**.

L'établissement du régime statique dans la paroi dépend du temps de stabilisation τ_s . On suppose qu'en chaque point de la paroi, l'évolution de la température peut être décrite par une relation du type IV. 10

$$T(t) = T_{\infty} + (T_i - T_{\infty}) e^{-\frac{t}{\tau_s}} \quad \text{IV. 10}$$

Où $T(t)$ [°C] est la valeur de température à l'instant t [s], T_{∞} est la valeur à la stabilisation et T_i est la température initiale et τ [s] est le temps caractéristique d'évolution de la température en ce point de la paroi.

τ_{ST} est déterminé pour chaque position à partir d'une minimisation de l'écart entre la courbe exponentielle théorique et la courbe expérimentale. Cette minimisation est effectuée sur 3 paramètres T_i , T_{∞} et τ_{ST} . La minimisation est réalisée à l'aide de la fonction prédéfinie dans *Matlab fminsearch*.

Les temps de stabilisation des champs de température et de teneur en eau sont ensuite déterminés sur les moyennes spatiales (sur la totalité de la paroi). *Othmen et al.* montrent que les temps de stabilisation τ_{ST} déterminés à partir des champs moyens sont plus représentatifs de l'évolution globale du matériau [80].

IV.3.2.4. Définition des caractéristiques dynamiques

Il est important de définir les paramètres caractérisant l'inertie thermique d'une paroi (généralement paroi multicouche), car l'inertie thermique joue un rôle important dans le comportement thermique d'un bâtiment [5,84–88]. Par exemple, lorsque la température extérieure est fluctuante tout au long de la journée, les matériaux composants du complexe mural peuvent atténuer les fluctuations de la température et les décaler dans le temps. Cette caractéristique thermique dynamique de la paroi est décrite par deux paramètres qui sont le facteur d'amortissement et le déphasage. Ces deux paramètres sont illustrés dans la Figure IV. 12 dans le cas d'une sollicitation extérieure de type sinusoïdale. Un pic de la température extérieure T_e^{max} (et T_e^{min}) atteint l'intérieur avec une T_i^{max} après un temps de déphasage $(t_{T_i^{max}} - t_{T_e^{max}})$.

La norme en vigueur *NF EN ISO 13786* ne prend pas le comportement hydrique en compte mais dans la suite nous définissons le facteur d'amortissement et le déphasage temporel thermiques mais aussi hydriques.

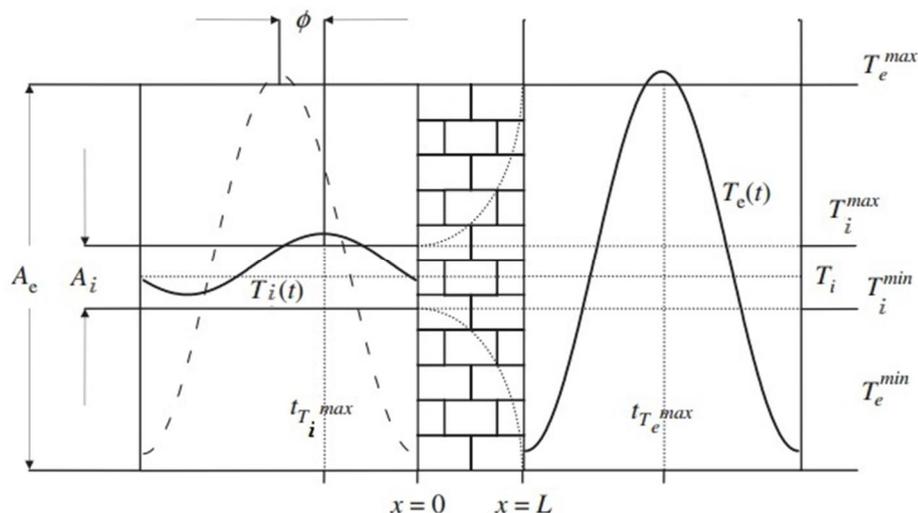


Figure IV. 12 : Présentation schématique du déphasage temporel et du facteur d'amortissement [84]

a. Facteurs d'amortissement

Le facteur d'amortissement f est défini comme le rapport entre la diminution de l'amplitude de la température pendant le processus transitoire d'une onde sinusoïdale traversant un élément solide. Le facteur d'amortissement est un paramètre important pour déterminer la capacité de stockage de chaleur du/des matériau(x) de la paroi lorsqu'elle est étudiée dans des conditions de limites dynamiques.

Il dépend des propriétés thermo physiques des matériaux constituant les différentes couches de la paroi, de l'épaisseur des couches, de l'agencement des couches les unes par rapport aux autres, mais également de la période des fluctuations de température. Le comportement des parois vis-à-vis des fluctuations horaires, quotidiennes ou saisonnières est différent. Ainsi, le facteur d'amortissement d'une fluctuation horaire est-il plus élevé que le facteur d'amortissement d'une fluctuation quotidienne.

b. Déphasages

Le déphasage thermique (appellation couramment utilisée en thermique du bâtiment) ou le décalage temporel (appellation utilisée dans la norme *NF EN ISO 13786*) est la durée séparant l'amplitude maximale d'une cause et l'amplitude maximale de son effet. Le déphasage thermique traduit donc la capacité du/des matériau(x) composant l'enveloppe de l'habitation à *ralentir* les transferts de chaleur, notamment du rayonnement solaire estival. Cette propriété est utile pour la notion du confort en été car elle indique combien de temps après le pic de chaleur extérieure, la face intérieure de la paroi atteint sa température maximale.

Comme pour le facteur d'amortissement, le déphasage est calculé suivant la norme en vigueur ; il est donc un déphasage temporel thermique. Toutefois, il est également calculé suivant les formules trouvées dans la littérature, par la méthode d'inter corrélation ou la méthode de décomposition en série de *Fourier*. Pour ces dernières méthodes, nous avons défini des nouvelles expressions mathématiques pour décrire des déphasages temporels hydriques.

c. Méthodes de calcul

- Norme NF EN ISO 13786

Dans la norme NF EN ISO 13786 (juillet 2008), la matrice de transfert de la couche de matériau est appelée Z et elle est notée (Eq IV. 11)

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad IV. 11$$

Z représente le comportement de la couche de matériau dont les propriétés sont homogènes et qui est sollicitée thermiquement par un signal sinusoïdal.

Pour une lame d'air la matrice de transfert dépend de la résistance thermique de la lame d'air incluant convection, conduction et rayonnement. Elle s'écrit comme suit (IV. 12) :

$$Z_{air} = \begin{bmatrix} 1 & -R_{air} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad IV. 12$$

Pour une paroi multicouche, la matrice de transfert globale Z_{global} est déterminée à partir de la matrice de transfert de chaque composant et des matrices de transfert de l'air sur les surfaces intérieure Z_{si} et extérieure Z_{se} . Cette matrice est ainsi exprimée dans la relation IV. 13 .

$$Z_{global} = Z_{se} Z_{c1} Z_{air1} \dots Z_{airn} Z_{ci} \quad IV. 13$$

Nous pouvons donc déterminer le facteur d'amortissement thermique f qui est le rapport du facteur de transmission périodique Y_{12} et le facteur de transmission global U_{global} (Eq IV. 14).

$$f = \frac{|Y_{12}|}{U_{global}} \quad IV. 14$$

Où $Y_{12} = -\frac{Z_{12}}{Z_{11}}$ et $\frac{1}{U_{global}} = Z_{11} + \sum_{i=1}^n \frac{Z_{1i}}{Z_{11}} + Z_{22}$; n est le nombre des composants de la paroi

On peut également déterminer le déphasage temporel ΔT suivant la relation IV. 15.

$$\Delta T = \frac{T}{2\pi} \arg Z_{11} \quad IV. 15$$

Où T est la période des sollicitations sinusoïdales et Z_{11} est l'amplitude des variations de température sur la face 2 résultant d'une amplitude de 1 K sur la face1.

- Méthode d'Asan et al. (1998)

Le facteur d'amortissement thermique f_T et le déphasage temporel thermique Φ_T ont été étudiés dans les travaux de recherche de *Asan et al* et repris récemment par *Mavromatidis* et *Ozel* [87,88].

Le facteur d'amortissement est défini comme suit (Eq IV. 16) :

$$\alpha_T = \frac{A_i}{A_e} = \frac{T_i^{max} - T_i^{min}}{T_e^{max} - T_e^{min}} \quad IV. 16$$

Où A_i et A_e sont les amplitudes de l'onde de température intérieure et extérieure respectivement et qui sont calculées à partir des températures surfaciques maximales et minimales du côté intérieur T_i^{max} et T_i^{min} et extérieur T_e^{max} et T_e^{min} calculées sur une période de 24h (voir détails dans la Figure IV. 12)

Quant au déphasage thermique (voir Figure IV. 12), il est calculé suivant la relation IV. 17 :

$$\Phi_T = t(T_i^{max}) - t(T_e^{max}) \quad IV. 17$$

Nous avons défini de la même façon un facteur d'amortissement hydrique f_w déterminé à partir du champ de pression de vapeur. Ce nouveau paramètre est donc calculé suivant la relation IV. 18:

$$\alpha_w = \frac{P_i^{max} - P_i^{min}}{P_e^{max} - P_e^{min}} \quad IV. 18$$

De la même façon le déphasage hydrique Φ_w est déterminé à partir du champ de pression de vapeur (Eq IV. 19) :

$$\Phi_w = t(P_i^{max}) - t(P_e^{max}) \quad IV. 19$$

Où $t(X_i^{max})$ et $t(X_e^{max})$, représentent les instants pour lesquelles les surfaces intérieure et extérieure de la paroi atteignent les valeurs maximales pour le champ X (T ou P_v) sur une période de 24h

- Méthode d'inter corrélation

Le concept que nous proposons de mettre en œuvre est l'inter corrélation de signaux. Ce concept vise à extraire le taux de ressemblance entre deux signaux unidimensionnel (signaux temporels des températures surfaciques).

La définition mathématique de ce concept, est que l'inter corrélation entre deux signaux unidimensionnels est donné par la relation IV. 20 pour les fonctions réelles et continues et la relation IV. 21 pour les fonctions réelles discrètes (cette méthode est illustrée sur la Figure IV. 13).

$$f(t) * g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) g(t-\tau) d\tau$$

IV. 20

$$f(t) * g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) g(t-\tau) d\tau$$

IV. 21

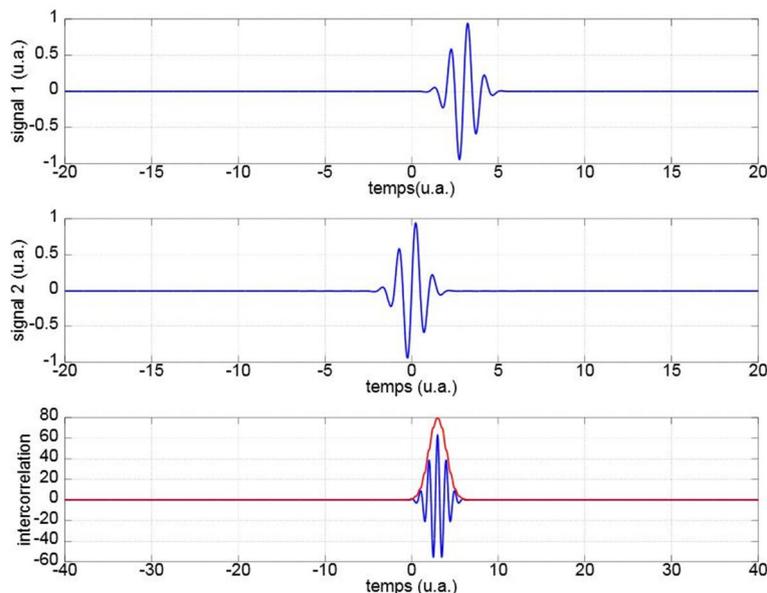


Figure IV. 13 : Deux signaux qui pourraient s'apparenter à une impulsion de RADAR, au milieu le signal émis, et en haut le signal récupéré, l'inter corrélation entre le signal émis et le signal reçu n'est non-nul que lorsque le signal reçu ressemble au signal émis.

Le maximum d'inter corrélation, par exemple identifié ici comme maximum de l'enveloppe de l'inter corrélation (valeur absolue) indique le retard (ou temps de vol) entre impulsion émise et reçue [89]

D'abord, les bornes supérieures et inférieures sont détectées visuellement (au curseur), cette étape permet par conséquent de calculer le facteur d'amortissement qui est le rapport des amplitudes. Cette technique est donc comparable à la méthode d'Asan *et al.*

Les signaux surfaciques (en température ou en pression de vapeur) sont ensuite adimensionnés (amplitude comprise entre 0 et 1) afin de permettre une meilleure détermination de la fonction d'inter corrélation. L'utilisation de la méthode d'inter corrélation permet de détecter le pic recherché et donc la période des sollicitations cycliques. Cette position permet d'identifier la position du pic d'inter corrélation par rapport au centre de l'intervalle temporel dans lequel la fonction est définie et d'en déduire le déphasage temporel.

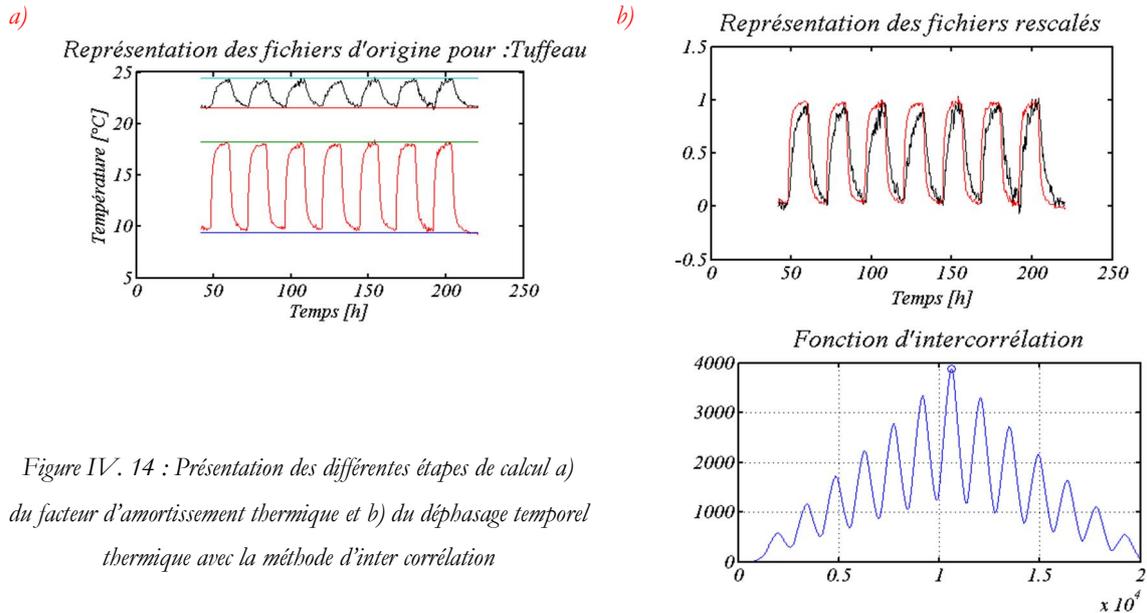


Figure IV. 14 : Présentation des différentes étapes de calcul a) du facteur d'amortissement thermique et b) du déphasage temporel thermique avec la méthode d'inter corrélation

Méthode de la décomposition du signal en série de Fourier

Une fonction périodique $f(t)$ de période T peut se décomposer en une somme de fonctions sinusoïdales de la forme (décomposition en séries de Fourier) (Eq IV. 22)

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right] \quad IV. 22$$

Les coefficients a_n, b_n sont indépendants du temps et sont donnés par les intégrales regroupées dans la relation IV. 23 :

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \end{aligned} \quad IV. 23$$

On remarque qu' a_0 est la valeur moyenne de la fonction $f(t)$: a_0 est donc nul puisque la fonction étudiée $f(t)$ est sinusoïdale. L'harmonique $H_n(t)$ pour la pulsation ω_n s'écrit donc :

$$H_n(t) = \frac{a_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \cos\left(\frac{2\pi n t}{T} - \varphi_n\right) + \frac{b_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \sin\left(\frac{2\pi n t}{T} - \varphi_n\right) \quad IV. 24$$

Posons

$$\cos \varphi_n = \frac{a_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \quad \sin \varphi_n = \frac{b_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \quad \text{IV. 25}$$

Après le remplacement de IV. 25 dans IV. 24, l'harmonique $H_n(t)$ s'écrit :

$$H_n(t) = a_n \cos(\omega t + \varphi_n) + b_n \sin(\omega t + \varphi_n) \quad \text{IV. 26}$$

La décomposition en série de *Fourier* des signaux mesurés de part et d'autre de la paroi permet de déterminer les amplitudes et les déphasages des différentes harmoniques constituant le signal, notamment l'harmonique correspondant à une période de 24h (appelée *la fondamentale*). Ensuite, le rapport des amplitudes pour une harmonique donnée permet d'obtenir le facteur d'amortissement. La différence des déphasages des harmoniques permet quant à elle de déterminer le déphasage temporel.

Comme la méthode est basée sur la notion de périodicité, il est nécessaire d'évaluer l'influence de nombre de périodes sur les valeurs finales des facteurs d'amortissement et des déphasages temporels thermiques et hydriques. Pour cela, nous avons fait varier le nombre de période de 1 à 5 (5 est le nombre de périodes maximal commun des différentes parois). Cette étude paramétrique est appliquée à la paroi simple en tuffeau.

Nous remarquons, pour les réponses dynamiques thermiques et hydriques, une récurrence de résultats quel que soit le nombre de périodes sélectionné. Les facteurs d'amortissement thermique pour la fondamentale ($T=24h$) sont compris entre 0,257 et 0,262 (soit un écart type $\sigma = 0,002$) alors que les facteurs d'amortissement hydrique varie entre 0,141 et 0,157 (soit $\sigma = 0,007$). Le déphasage thermique est en moyenne de $2 \pm 0,04h$ et le déphasage hydrique est de $2,4 \pm 0,2h$.

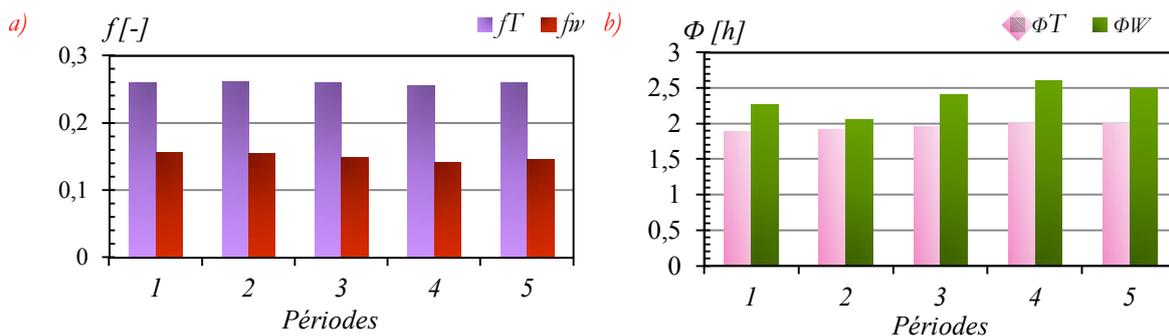


Figure IV. 15 : Sensibilité a) des facteurs d'amortissement et b) des déphasages thermiques et hydriques au nombre de périodes choisis ($T=24h$)

Nous avons toutefois choisi de réaliser les calculs sur 5 périodes afin de faire intervenir les réponses hygrothermiques des parois sur un temps d'expérimentation plus long (120h) et obtenir donc des valeurs moyennes plus précises.

IV.4. Application à une paroi monocouche

Les parois monocouches testées sont en tuffeau et en bétons de chanvre : *bdc – NHL*, *bdc – PF* et *bdc – préfa*. Ces parois sont initialement conservées dans une salle à température et humidité relative contrôlées à 20 °C et à 50%. L'épaisseur de la paroi en tuffeau est de 8 cm alors que les parois en bétons de chanvre ont une épaisseur qui varie entre 11 et 15 cm. L'épaisseur des *bdc – NHL* et *bdc - PF* est choisi suivant l'épaisseur du *bdc – préfa* dont nous disposons et qui est de 15 cm. Or leur épaisseur finale (11,4 cm) est inférieure à l'épaisseur souhaitée à cause du retrait et des contraintes de mise en place dans les coffrages pendant le processus de moulage.

Après maturation (le cas des bétons moulés seulement), les parois sont montées dans la cellule bi climatique et elles subissent des sollicitations statiques dans un premier temps et cycliques dans un second temps. Le suivi des flux de chaleur et de vapeur traversant la paroi est réalisé en permanence avec un pas de 60 s. Cette acquisition est faite par les sondes hygrométriques décrites dans le § IV.1.3.1 et elles sont placées au niveau des surfaces et au centre.

IV.4.1. Cas de sollicitations statiques

IV.4.1.1. Flux de chaleur et de masse

Nous avons enregistré les températures et les humidités relatives dans la paroi et dans les ambiances intérieures et extérieures. La Figure IV. 16 et la Figure IV. 17 illustrent les variations des champs de température et d'humidité relative aux limites et dans les parois simples en tuffeau et en béton de chanvre.

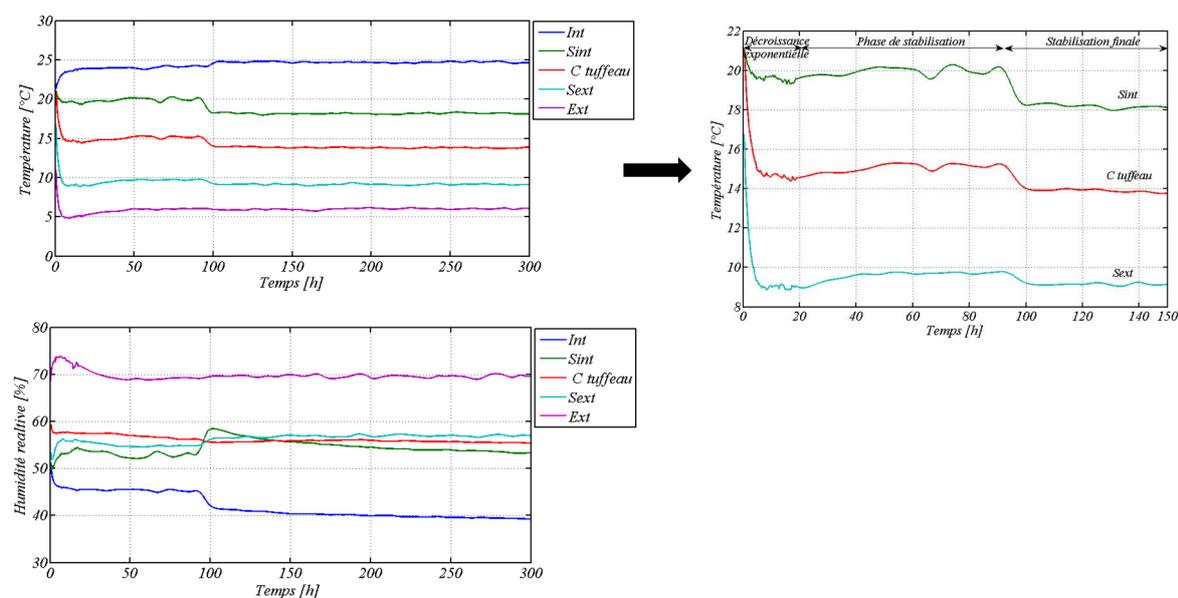


Figure IV. 16 : Evolution des champs de température et d'humidité relative dans une paroi simple en tuffeau soumise à des sollicitations réelles statiques et extraction des Profils de température aux surfaces et au centre de la paroi.

Nous remarquons que pour le tuffeau l'évolution de la température présente une décroissance exponentielle, suivie d'une phase de stabilisation puis une nouvelle décroissance de la température (Figure IV. 16). Cette évolution concorde avec les observations effectuées à partir de l'étude numérique où nous avons également observé que la chute de température est liée à l'augmentation d'humidité (teneur en eau) dans la paroi. Il existe toutefois un déphasage temporel entre la variation d'humidité et la chute de température, ce qui souligne l'inertie hydrique du matériau.

Les bétons de chanvre (Figure IV. 17) présentent un comportement différent de celui du tuffeau. En effet, contrairement au tuffeau, les températures surfaciques des différentes parois simples en béton de chanvre sont fortement liées aux conditions aux limites.

Ces observations sont soulignées par un gradient de température $\Delta T = T_{\infty} - T_s$ plus faible pour les parois en béton de chanvre, ce gradient est de 3 à 6 fois plus faible pour ces derniers comme il est indiqué dans le Tableau IV. 5. Les conditions aux limites sont alors prépondérantes pour le comportement thermique surfacique de la paroi en béton de chanvre.

Tableau IV. 5 : Gradient de température moyen aux bornes de la paroi en béton de chanvre

	Tuffeau	Bdc - préfa	Bdc - NHL	Bdc - PF
$\Delta T_{ext} [^{\circ}C]$	3,23	0,57	0,76	1,40
$\Delta T_{int} [^{\circ}C]$	6,52	0,95	1,14	0,93

En régime statique et pour une paroi plane sans dissipation interne de chaleur, on sait que l'écart de température aux bornes de la paroi est lié à la densité de flux traversant la paroi et à la résistance thermique totale de la paroi (IV. 27).

$$\Delta T = \frac{q}{\lambda} + \frac{q}{h_{ext}} + \frac{q}{h_{int}} = \frac{q}{\lambda} \left(1 + \frac{h_{ext} + h_{int}}{\lambda} \right) \quad IV. 27$$

Sur le même principe, on peut écrire l'écart de température en surface de la paroi :

$$\Delta T_{surf} = \frac{q}{h_{ext}} \quad IV. 28$$

Soit, en intégrant le résultat de IV. 27 dans IV. 28:

$$\Delta T_{surf} = \frac{\Delta T}{\frac{\lambda}{h_{ext}} \left(1 + \frac{h_{ext} + h_{int}}{\lambda} \right)} \quad IV. 29$$

Cette équation montre que le gradient de température en surface est lié au rapport entre les résistances superficielles d'échange en paroi et la résistance thermique des différentes couches de la paroi.

a. Pour les parois isolantes, on peut poser :

$$\frac{\Delta T_{\text{ext}}}{\Delta T_{\text{int}}} \ll \frac{\lambda}{\mu} \text{ et dans ce cas } \Delta T_{\text{ext}} \approx \frac{\lambda}{\mu} \Delta T \quad \text{IV. 30}$$

b. Pour les parois conductrices

$$\frac{\Delta T_{\text{ext}}}{\Delta T_{\text{int}}} \gg \frac{\lambda}{\mu} \text{ et dans ce cas } \Delta T_{\text{ext}} \approx \frac{\mu}{\lambda} \Delta T \quad \text{IV. 31}$$

Ainsi, l'écart de température en surface dépend, selon les cas, fortement des propriétés de la paroi (parois isolantes) ou bien des résistances superficielles d'échange en paroi (parois de faible résistance thermique). Nous remarquons que plus la résistance thermique de la paroi est faible, plus le gradient de température en paroi est élevé. C'est ce qui est observé sur les évolutions temporelles des températures. Les gradients sont plus élevés pour la paroi de tuffeau que pour les parois de béton de chanvre plus isolantes.

IV.4.1.2. Flux de pression de vapeur

Les évolutions des champs de pression de vapeur sont données dans la Figure IV. 18. Les bétons de chanvre ont une résistance à la diffusion de vapeur Sd (IV. 32) de 4,1m pour le *bdc- préfa*, de 2,4m pour le *bdc-NHL* et de 2m *bdc-PF*, ce qui peut expliquer que les gradients de pressions de vapeur sont plus faibles pour les bétons moulés que pour le béton préfabriqué. Comme pour la température, des fortes interactions se font entre la surface et son milieu environnant.

$$Sd = \frac{d}{\mu} \quad \text{IV. 32}$$

Le transfert se fait globalement de l'intérieur vers l'extérieur dans le sens de l'équilibre hygrique tel est le cas pour la paroi en tuffeau et en béton de chanvre préfabriqué.

Les conclusions ne sont pas identiques pour les parois *bdc-NHL* et *bdc-PF*. L'état initial de ces parois (au centre de la paroi) est plus humide que les parois simples en tuffeau et *bdc-préfa* pour une température égale. Cela crée par conséquent une 3^{ème} zone d'équilibre hygrique dans la paroi.

En effet, le principal inconvénient des bétons de chanvre moulés est le temps de séchage très long comme le liant est de la chaux ce qui impose de nouvelle concentration de vapeur d'eau.

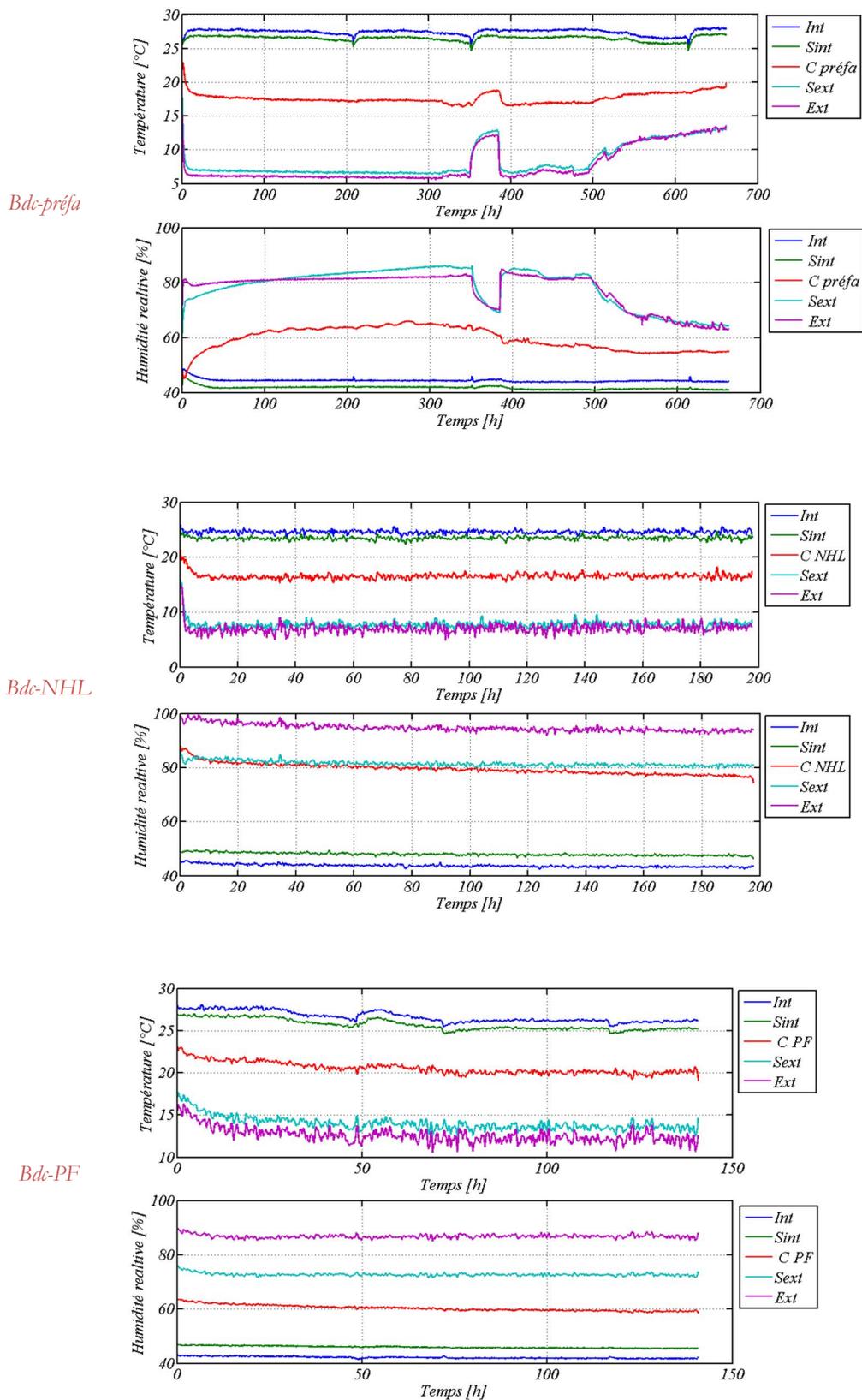


Figure IV. 17 : Evolution des champs de température et d'humidité relative dans les parois simples en bétons de chanvre soumises à des sollicitations réelles statiques

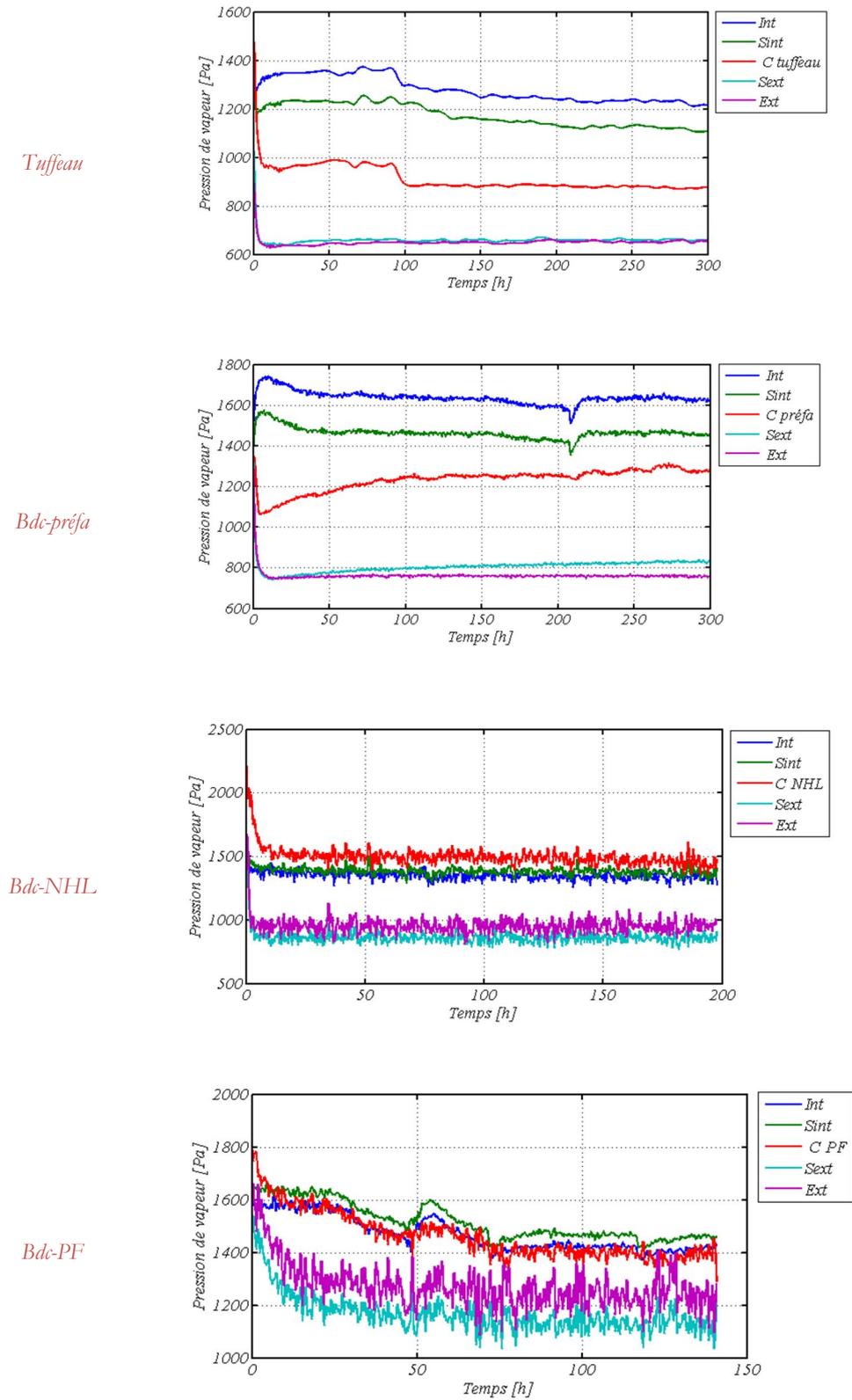


Figure IV. 18 : Evolution des champs de pression de vapeur dans les parois simples en tuffeau et en bétons de chanvre soumises à des sollicitations réelles statiques

IV.4.1.3. Temps de stabilisation

Nous avons déterminé la constante de temps τ_T pour un transfert de chaleur pour les différentes positions : surface intérieure, centre de la paroi et surface extérieure (Figure IV. 19). τ_T est déterminée suivant une évolution exponentielle décroissante donnée dans l'équation IV. 10.

Les temps de stabilisation thermique obtenus varient suivant la position dans la paroi. En effet, ils dépendent des conditions aux limites, de l'épaisseur de la paroi et de la diffusion de la chaleur dans le matériau. Comme évoqué dans le § IV.4.1.1, τ_T surfacique est plus élevé pour le tuffeau, du fait de l'effusivité thermique de ce dernier. Or nous remarquons que le *bdc - PF* a un τ_T à la surface extérieure qui ne suit pas notre hypothèse. Ce constat, nous l'expliquons par l'état surfacique de la paroi qui est plus dense (concentration du liant plus importante à la surface de la paroi), ce qui a changé les propriétés du matériau à la surface.

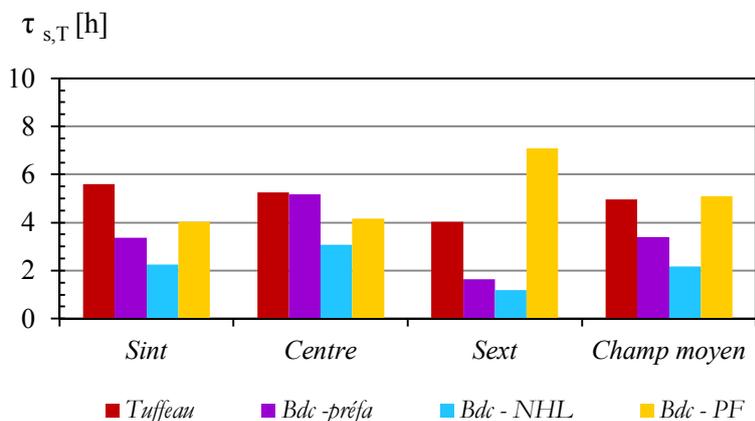


Figure IV. 19 : Evolution des temps de stabilisation thermique pour les parois simples

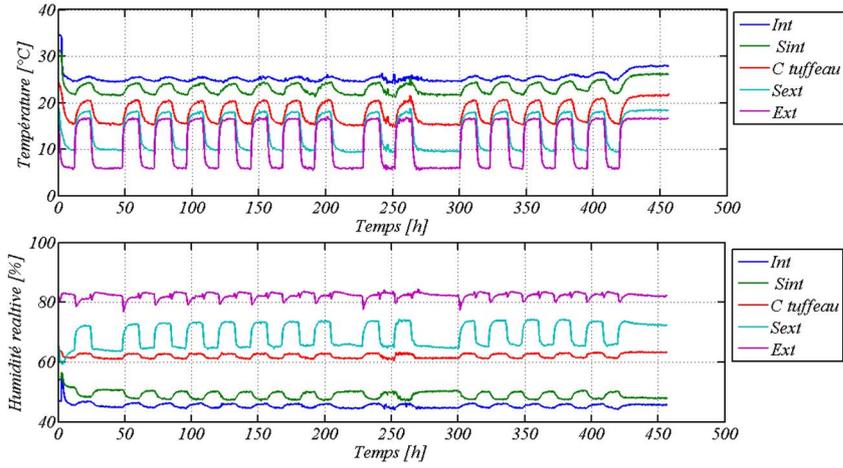
IV.4.2. Cas de sollicitations cycliques

IV.4.2.1. Flux de chaleur et de masse

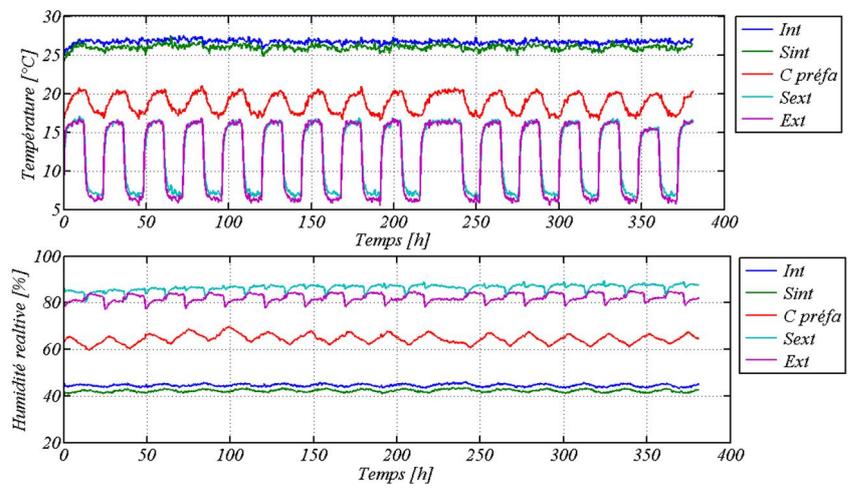
Les matériaux sont soumis à une sollicitation thermique cyclique extérieure d'une amplitude de 10°C et d'une période de 24h. La Figure IV. 20 illustre les conditions aux limites et les réponses en températures et en humidités relatives des parois étudiées, pour différentes positions dans la paroi.

Les mesures en différents points de la paroi de tuffeau montrent que les variations cycliques imposées dans les ambiances se traduisent par des variations cycliques à l'intérieur de la paroi. Ces variations se font avec la même période, mais l'amplitude est moindre du fait de l'atténuation de la paroi. Les fluctuations de températures sont également décalées dans le temps. Ce décalage temporel est difficile à estimer sur les évolutions temporelles. Les méthodes présentées dans le chapitre précédent permettront de déterminer les atténuations et déphasages occasionnés par la paroi.

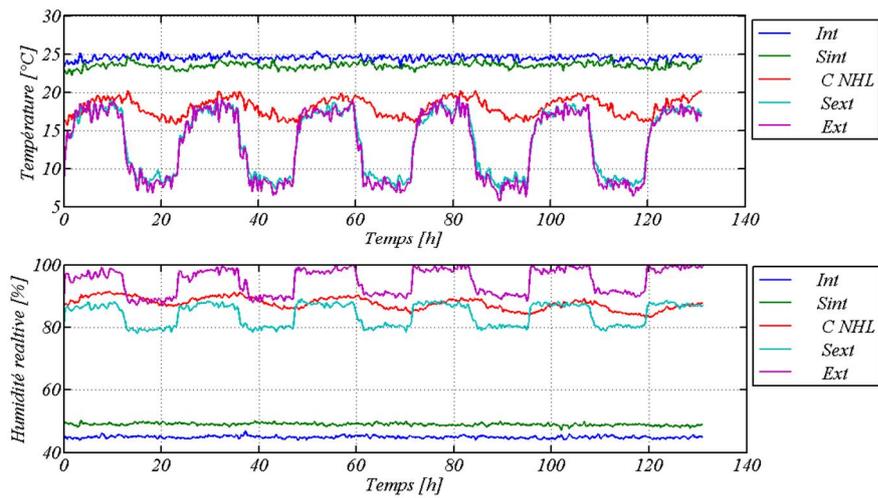
Tuffeau



Bdc-préfa



Bdc-NHL



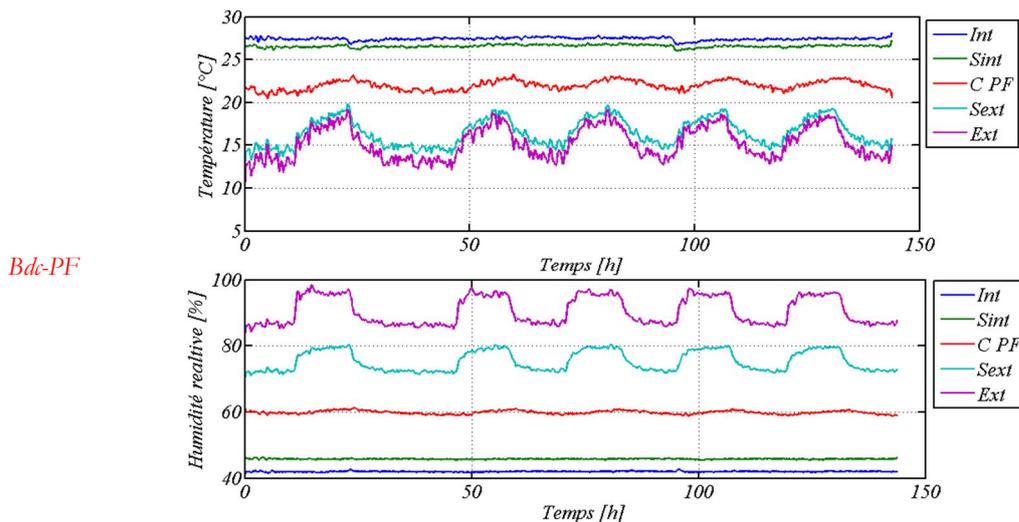


Figure IV. 20 : Evolution des champs de température et d'humidité relative dans les parois simples en tuffeau et en bétons de chanvre soumises à des sollicitations cycliques en températures extérieures

Les fluctuations de température dans l'ambiance extérieure entraînent également des fluctuations d'humidité relative de même période et permettent par conséquent d'imposer une sollicitation cyclique en humidité des parois. La variation de l'humidité relative ne dépasse pas les 3,5 % (en écart absolu) sauf pour la surface extérieure où la variation de l'humidité relative est de l'ordre de 7,7 %.

Pour les parois en béton à base de chanvre, nous pouvons remarquer une plus forte atténuation de telle sorte que les fluctuations de température sont imperceptibles du côté intérieur de la paroi. Il en est de même pour les fluctuations d'humidité relative. La température de surface de la face interne de la paroi ne dépend donc que de la température de l'ambiance intérieure.

Ces résultats montrent des différences de comportement entre les parois de tuffeau et les parois de béton de chanvre qui peuvent être attribuées à une différence de caractéristiques thermiques et hydriques dynamiques. Il est donc indispensable de définir le taux d'amortissement thermique et hydrique et les déphasages temporels de chaque paroi.

IV.4.2.2. Flux de vapeur

Nous nous intéressons désormais à la variation du flux de vapeur dans ces parois (Figure IV. 21). En effet, le sens de ce flux permet de mieux comprendre les transferts de masse dans la paroi. Pour cela nous avons observé ces variations par $\frac{1}{2}$ période.

Pendant la première $\frac{1}{2}$ période où la température extérieure est plus élevée, en moyenne de 17°C, il n'y a pas de variation de pression de vapeur marquée, puisque les variations de température sont couplées avec une augmentation de la pression de vapeur saturante, ce qui a permis de créer un équilibre de concentration. Or pendant la deuxième $\frac{1}{2}$ période, c'est-à-dire lorsque la température est basse, le flux se fait de l'intérieur vers l'extérieur pour les deux premières parois en tuffeau et en *bdc-préfa*.

Les parois *bdc-NHL* et *bdc-PF* se comportent d'une façon différente car à la surface intérieure, la pression de vapeur reste constante tout au long de la période d'expérimentation mais la paroi a tendance à s'humidifier puisque le flux de l'extérieur se propage jusqu' au centre de ces parois.

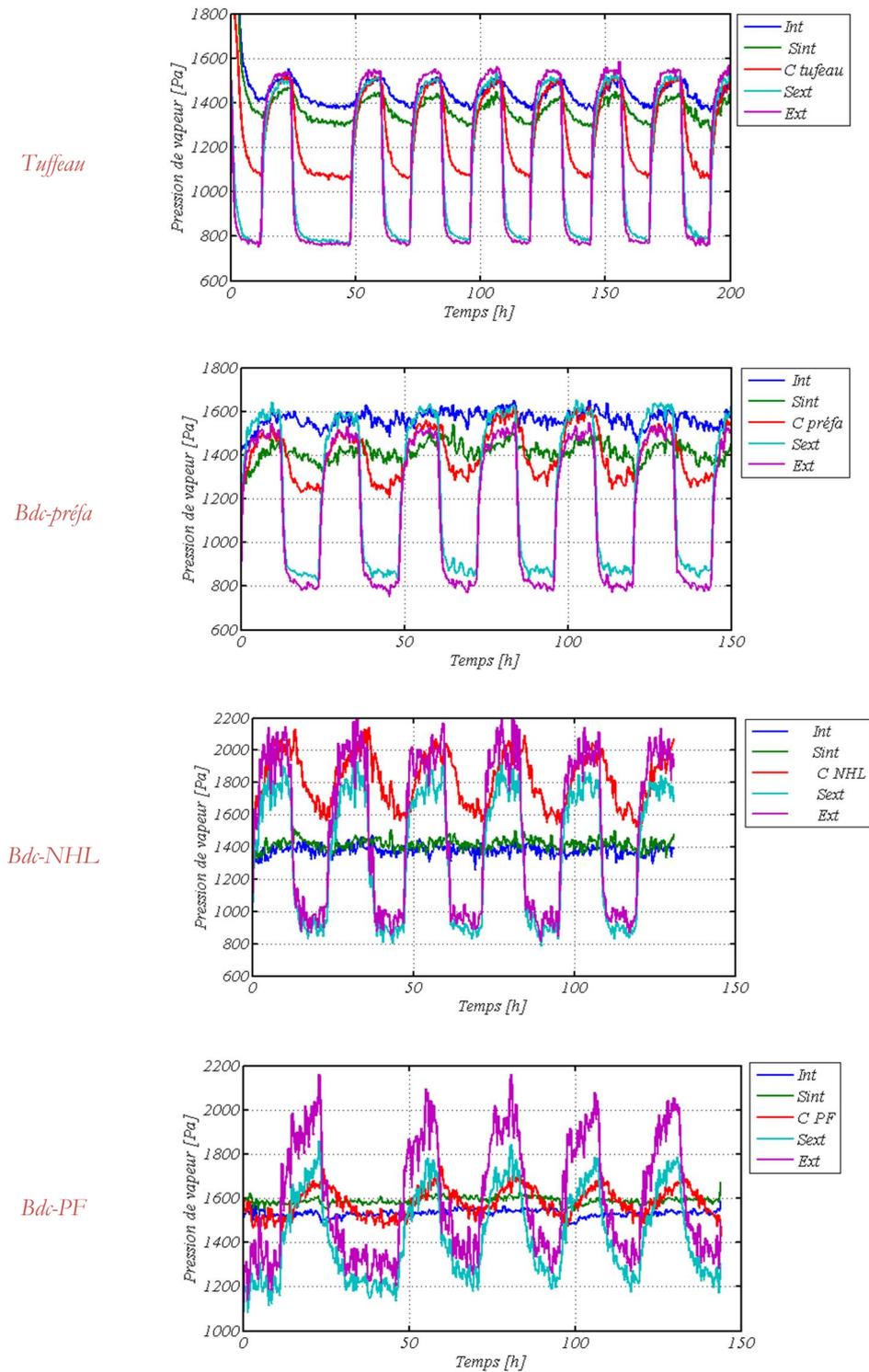


Figure IV. 21 : Evolution des champs de pression de vapeur dans les parois simples en tuffeau et en bétons de chanvre soumises à des sollicitations réelles cycliques en températures extérieures

IV.4.2.3. Facteurs d'amortissement et déphasages

a. Facteurs d'amortissement

- Norme NF EN ISO 13786

Nous avons appliqué le calcul normatif du facteur d'amortissement thermique en utilisant les propriétés des matériaux secs. Les résultats sont donnés dans le Tableau IV. 6.

Tableau IV. 6 : Facteurs d'amortissement thermiques déterminés par la norme NF EN ISO 13786 pour des parois simples sollicitées en températures extérieures cycliques

	Tuffeau	Bdc-préfa	Bdc - NHL	Bdc - PF
f_T	0,88	0,3	0,85	0,57

- Méthode d'Asan et al

Les facteurs d'amortissement sont calculés pour le transfert thermique et hydrique à partir de l'équation IV. 16 dans laquelle apparaissent les amplitudes intérieures et extérieures mesurées. Ces amplitudes sont déterminées pour chaque jour sur une durée de 10 jours afin d'en déduire une moyenne sur plusieurs valeurs. Le facteur d'amortissement pour les différents jours est donné sur la Figure IV. 22.

Le facteur d'amortissement thermique moyen du tuffeau ($e= 8$ cm) est de 0,34 alors qu'il est de 0,15 pour les différents bétons de chanvre. Quant au facteur d'amortissement hydrique, nous remarquons qu'il est en moyenne de 0,23 pour le tuffeau ($e= 8$ cm) et le béton de chanvre préfabriqué ($e=15$ cm), de 0,15 pour le *bdc - NHL* et de 0,12 pour le *bdc - PF*.

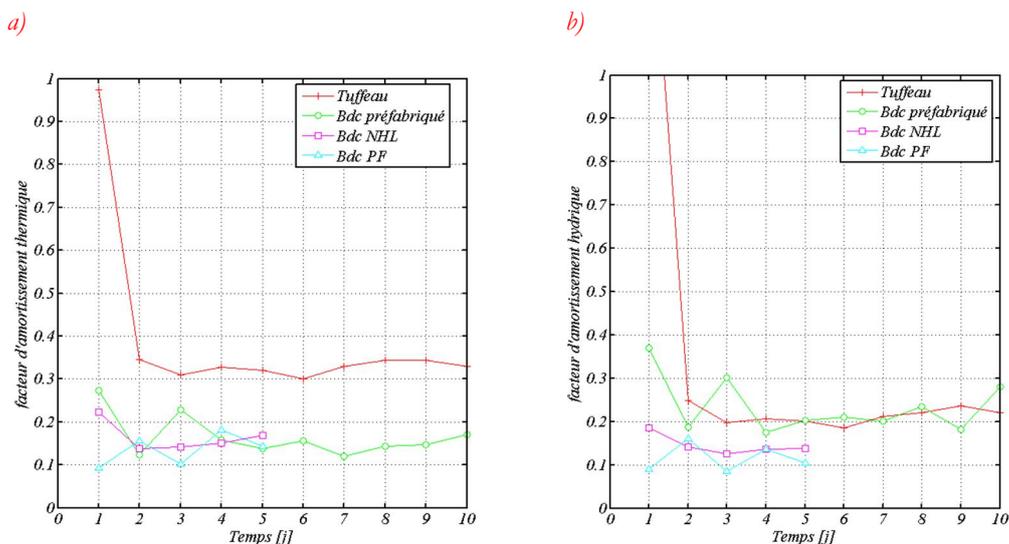


Figure IV. 22 : Facteurs d'amortissement thermiques (a) et hydriques (b) journaliers déterminés par la méthode d'Asan et al. pour des parois simples sollicitées en régime cyclique en températures extérieures

- La méthode d'inter-corrélation

La détermination des facteurs d'amortissement thermique et hydrique par la méthode d'inter-corrélation repose sur le même principe que pour la méthode d'*Asan et al.* Cependant, les amplitudes de température ou d'humidité relative sont déterminées sur la totalité du signal et non pour chaque jour. Ceci est possible du fait de la sollicitation cyclique contrôlée de l'expérience, alors que la méthode d'*Asan et al.* est utilisée dans [84,86–88] pour déterminer les facteurs d'amortissement de parois soumises à des sollicitations météorologiques réelles.

Tableau IV. 7 : Facteurs d'amortissement thermiques et hydriques déterminés par la méthode d'intercorrélation pour des parois simples sollicitées en températures extérieures cycliques

	Tuffeau	Bdc-préfa	Bdc - NHL	Bdc - PF
f_T	0,32	0,2	0,16	0,14
f_p	0,22	0,24	0,15	0,11

Les amplitudes maximales et minimales sont sélectionnées visuellement à partir des champs de température et de pression de vapeur (Figure IV. 14). Par conséquent, les valeurs trouvées par les deux méthodes sont assez proches. Bien que certaines valeurs telles que pour le *bdc-préfa* soient supérieures à celles trouvées précédemment, l'ordre de grandeur est globalement respecté.

- Méthode de décomposition en série de Fourier

La méthode de décomposition en série de *Fourier* a principalement pour objectif de décomposer le signal cyclique en plusieurs signaux sinusoïdaux. En effet, les parois testées sont soumises à une sollicitation extérieure de période de 24h. Nous avons donc calculé les harmoniques (10 harmoniques dont la fondamentale de $T=24h$) suivant l'équation IV. 26 appliquée pour les champs de température et de pression de vapeur à la surface des parois

La Figure IV. 23 illustre les résultats obtenus pour le facteur d'amortissement thermique pour les différentes périodes (2,4 - 2,66 - 3 - 3,42 - 4 - 4,8 - 6 - 8 - 12 et 24h). Nous retenons pour comparaison avec les méthodes utilisées auparavant les résultats obtenus pour la fondamentale. Ce choix est fait suite aux conclusions cités dans les travaux de *Ramdani et Znouda* [90,91] où il a été montré que l'harmonique la plus influente est celle de 24h soit par une analyse des sollicitations par la DSP (Densité Spectrale de Puissance), soit par analyse de série de *Fourier*.

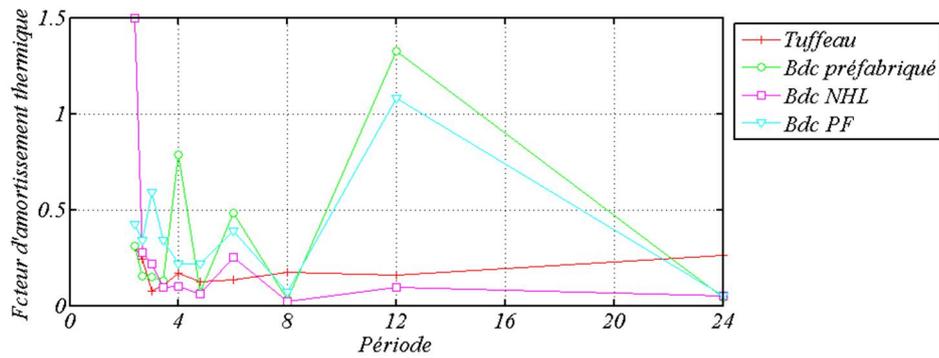


Figure IV. 23 : Facteurs d'amortissement thermique des parois simples sollicitées en régime cyclique en température extérieure pour les premières harmoniques de la décomposition

Tableau IV. 8 : Facteurs d'amortissement thermiques et hydriques des parois simples sollicitées en températures extérieures cycliques pour la fondamentale ($T=24h$)

	Tuffeau	Bdc-préfa	Bdc - NHL	Bdc - PF
f_T	0,26	0,04	0,06	0,05
f_w	0,14	0,09	0,05	0,04

b. Déphasages temporels

- Norme NF EN ISO 13786

Il est nécessaire de rappeler que la norme NF EN ISO 13786 ne prend pas en compte le transfert de vapeur d'eau dans les parois et par conséquent les propriétés dynamiques sont exclusivement de caractère thermique. Les déphasages temporels sont calculés entre les températures entre les deux faces. Les résultats obtenus sont globalement cohérents car les parois en béton de chanvre ont des propriétés thermiques assez proches. Le *bdc- NHL* a une capacité thermique C_p inférieure (rapport de 2) à celle de *bdc- PF* ce qui permettrait un déphasage plus long. Or, pour le *bdc-préfa* de caractéristiques comparables au *bdc -PF* l'épaisseur de la première paroi est plutôt de 15 cm ce qui lui aurait donné une inertie plus importante.

Tableau IV. 9 : Déphasages temporels thermiques déterminés par la norme NF EN ISO 13786 et appliqués sur des parois simples sollicitées en températures extérieures cycliques

	Tuffeau	Bdc-préfa	Bdc - NHL	Bdc - PF
$\Phi_1[h]$	5	12,8	6,2	9,1

- Méthode d'Asan et al

Le Tableau IV. 10 montre que les déphasages thermique et hydrique pour le tuffeau sont de l'ordre de 2,5h. Pour les bétons de chanvre, ils varient de 2,8h pour le *bdc - préfa* à 11,2h pour le *bdc- PF*.

Les résultats obtenues par cette méthode, en particulier pour le *bdc – préfa*, sont discutables puisque pour cette dernière paroi les amplitudes des températures et pressions de vapeur sur la surface intérieure sont faibles. Par conséquent, la détection de l'instant du maximum de température intérieure peut être faussée par le bruit de mesure. Le signal est certes lissé par rapport aux mesures brutes mais contient toujours les incertitudes de mesure de la sonde.

Le suivi des valeurs de déphasages temporels quotidiennes (mesurées sur 24h) a permis de noter des écarts types (σ) très élevés et qui dépassent souvent la valeur moyenne calculé. Par exemple, pour le *bdc préfa*, σ_{Φ_T} est de 4,1h et σ_{Φ_w} est de 6,7h pour des valeurs moyennes de 2,8h et 5,1h respectivement. Ce constat est loin d'être propre à la paroi en brique de chanvre préfabriqué car il est le cas de toutes les parois simples en tuffeau et en bétons de chanvre moulés. Les valeurs de déphasage peuvent être erronées à cause de la détermination des instants où les amplitudes sont maximales à l'intérieure et à l'extérieure sans qu'elles soient obligatoirement corrélées.

Tableau IV. 10 : Déphasages temporels thermiques et hydriques déterminés par la méthode d'Asan et al. pour des parois simples sollicitées en températures extérieures cycliques

	Tuffeau	Bdc-préfa	Bdc - NHL	Bdc - PF
Φ_T [h]	2,2	2,8	6,2	11,2
Φ_w [h]	2,8	5,1	5,1	11,2

- Méthode d'inter-corrélation

La méthode d'inter corrélation est utilisée pour déterminer le déphasage thermique et hydrique. Elle permet de superposer les deux signaux surfaciques intérieur et extérieur sur toute la période de sollicitation.

Nous retrouvons des déphasages thermique et hydrique moyen de 2h pour le tuffeau, ce qui en accord avec la méthode précédente. Or pour les bétons de chanvre, les déphasages thermiques et hydriques sont plus cohérents entre ces matériaux. Ils sont compris entre 3,6h et 5,6h.

Tableau IV. 11 : Déphasages temporels thermiques et hydriques déterminés par la méthode d'inter corrélation pour des parois simples sollicitées en températures extérieures cycliques

	Tuffeau	Bdc-préfa	Bdc - NHL	Bdc - PF
Φ_T [h]	1,7	4,4	3,9	3,6
Φ_w [h]	2,1	4,7	5,6	4,7

- Méthode de décomposition en série de Fourier

Les déphasages thermiques déterminés pour $T=24$ h convergent vers les valeurs trouvées par la méthode d'inter corrélation.

Les déphasages thermiques varient entre 2h pour le tuffeau et 5,1h pour le béton de chanvre formulé avec la PF 70. Le même ordre de grandeur est respecté pour les déphasages temporels hydriques puisqu'elle varie entre 2,6h pour le tuffeau et de 6,1h pour le *bdc*-PF.

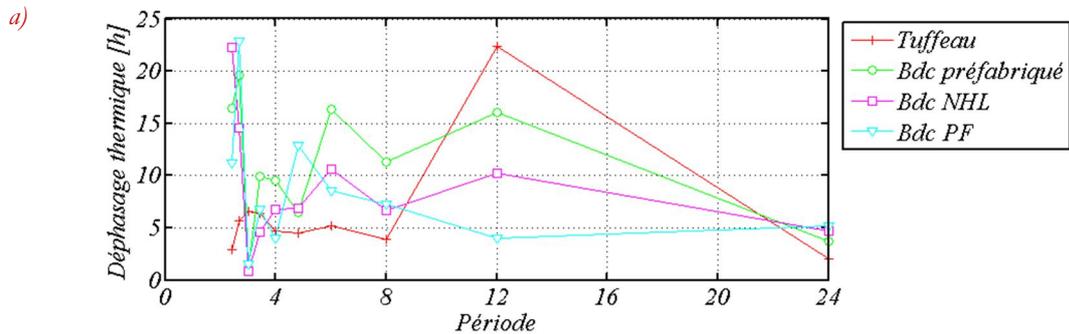


Figure IV. 24 : Déphasages temporels thermiques des parois simples sollicitées en régime cyclique en température extérieure pour les premières harmoniques de la décomposition

Tableau IV. 12 : Déphasages temporels thermiques et hydriques déterminés pour la fondamentale ($T=24h$) pour les parois simples sollicitées en températures extérieures cycliques

	Tuffeau	Bdc-préfa	Bdc - NHL	Bdc - PF
Φ_T [h]	2	3,5	5,1	5,1
Φ_w [h]	2,6	4,8	6	6,1

c. Comparaison entre les méthodes

Les paramètres déterminés dans les parties précédentes par les quatre méthodes (norme, *Asan et al*, l'inter corrélation et la décomposition en série *Fourier*) sont comparés dans cette partie. Ces méthodes ont été appliquées pour des parois simples en tuffeau et en bétons de chanvre. Les bétons de chanvre diffèrent d'une part par la nature du liant et d'autre part par la procédure de fabrication.

Tout d'abord, nous rappelons que le calcul du facteur d'amortissement et du déphasage suivant la norme *NF EN ISO 13786* se limite au comportement thermique.

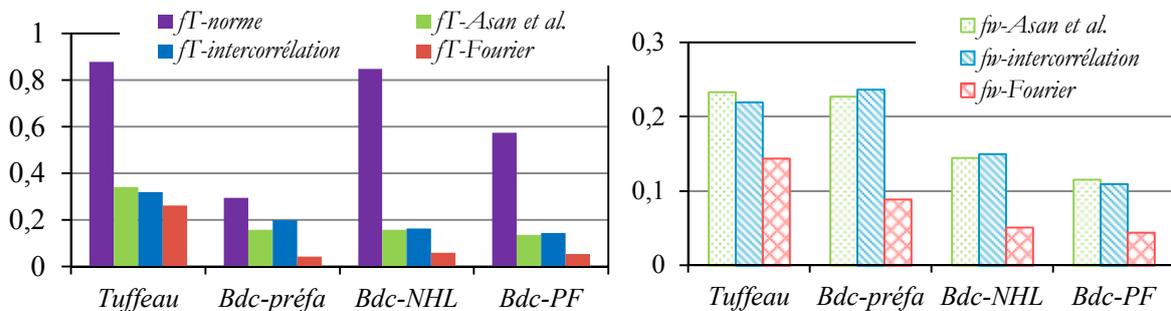


Figure IV. 25 : Comparaison des facteurs d'amortissement thermique (à gauche) et hydrique (à droite) obtenus pour les parois simples étudiées

La source d'erreur est ainsi double. D'une part la paroi est soumise à des sollicitations harmoniques régulières variant de façon sinusoïdale et d'autre part, le seul mode de transfert dans les parois se fait par conduction.

Ensuite, nous soulignons que les résultats sont relativement similaires pour le tuffeau alors qu'ils sont plus dispersés pour les bétons de chanvre. En effet, les évolutions sur la face intérieure sont plus nettes pour le tuffeau, du fait de la plus faible résistance thermique du tuffeau notamment. Plus les parois amortissent les signaux cycliques, plus il est difficile d'obtenir les caractéristiques thermiques et hydriques dynamiques de ces parois par les méthodes présentées ici.

La détection des maxima et minima et leurs positions respectives est plus précise pour le tuffeau que pour les bétons de chanvre. Par conséquent, nous trouvons que la méthode par décomposition en série de Fourier semble la plus adaptée pour déterminer le facteur d'amortissement car elle est fondée sur le principe de détermination des coefficients a_n et b_n (voir §.IV.3.2.4.c) qui traduisent les sollicitations réellement produites. En revanche, les méthodes d'inter corrélation et d'*Asan et al* sont basées sur la recherche visuelle de l'amplitude et l'on a vu plus haut que cette amplitude peut être difficilement détectable sur les faces intérieures pour des parois à fort facteur d'amortissement.

Les différentes méthodes convergent vers des valeurs de déphasage globalement proches. Néanmoins, la méthode d'inter corrélation est à notre avis la plus adéquate à cette fin. En effet, elle est basée sur l'application d'une fonction mathématique aux signaux et sur la détection du maximum de la fonction qui apparaît très nettement, même pour des signaux de faible amplitude sur la face intérieure.

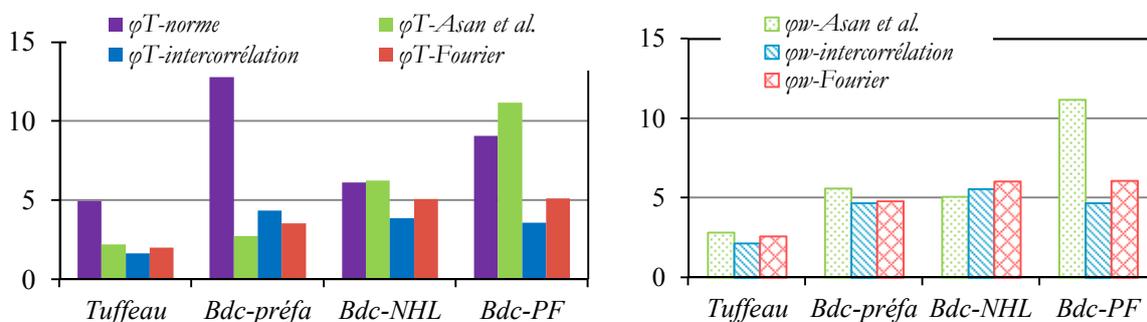


Figure IV. 26 : Comparaison des facteurs d'amortissement thermique (à gauche) et hydrique (à droite) obtenus pour les parois simples étudiées

La méthode d'*Asan et al.* semble moins adaptée, dans le cas général, à la détermination du déphasage, dans la mesure où elle est basée sur la détermination visuelle ou automatique de maxima (ou de minima) sur les faces intérieure et extérieure. Or, la méthode ne permet pas de déterminer si le maxima extérieur est la cause du maxima intérieur, et peut conduire à une évaluation d'un déphasage à partir de deux informations qui ne sont pas corrélées.

Elle permet cependant, pour les signaux contrôlés obtenus en cellule biclimatique, de retrouver des résultats globalement en accord avec les autres méthodes.

La méthode de décomposition en série de *Fourier*, donne des résultats en accord avec les autres méthodes pour le déphasage, mais sous-estime fortement les facteurs d'amortissement lorsque l'atténuation de la paroi est importante. Les coefficients déterminés par la méthode dans ce dernier cas sont plus incertains du fait de la faible amplitude des signaux sur la face intérieure.

IV.5. Application à une paroi multicouche

IV.5.1. Cas de sollicitations statiques

IV.5.1.1. Flux de chaleur et de masse

Nous étudions dans ce qui suit, les évolutions de masse et de chaleur dans des parois bicouche composée de tuffeau et de béton de chanvre (Figure IV. 27).

Nous remarquons que pour les bétons de chanvre nous retrouvons le même comportement des parois simples au niveau de la surface intérieure, cette dernière est fortement influencée par les conditions intérieures.

Alors que la juxtaposition des deux parois (tuffeau et béton de chanvre) a modifié le comportement thermique de la surface extérieure en tuffeau qui devient voisin à celui imposé dans l'ambiance extérieure ; ce qui n'était pas le cas lorsque la paroi est simple en tuffeau.

Nous remarquons également que les températures à l'interface et au centre tuffeau sont similaires et elles dépendent plutôt de la température extérieure. La température au centre de la paroi en béton de chanvre (désignés par C préfa, C NHL et C PF) se maintient à une température proche de la température initiale de 20 °C. Pour les évolutions de l'humidité relative, le comportement pour la surface intérieure et pour la surface extérieure est similaire à celui observé lorsque les parois sont simples. L'interface des deux matériaux s'humidifie à l'instar du centre tuffeau pour dépasser, dans le cas du *bdc - NHL*, l'humidité relative enregistrée à la surface extérieure. Au centre du béton de chanvre, l'humidité relative converge vers un état d'équilibre de 60% à partir d'un état initial de 80% en particulier dans le cas des parois directement moulées sur le tuffeau.

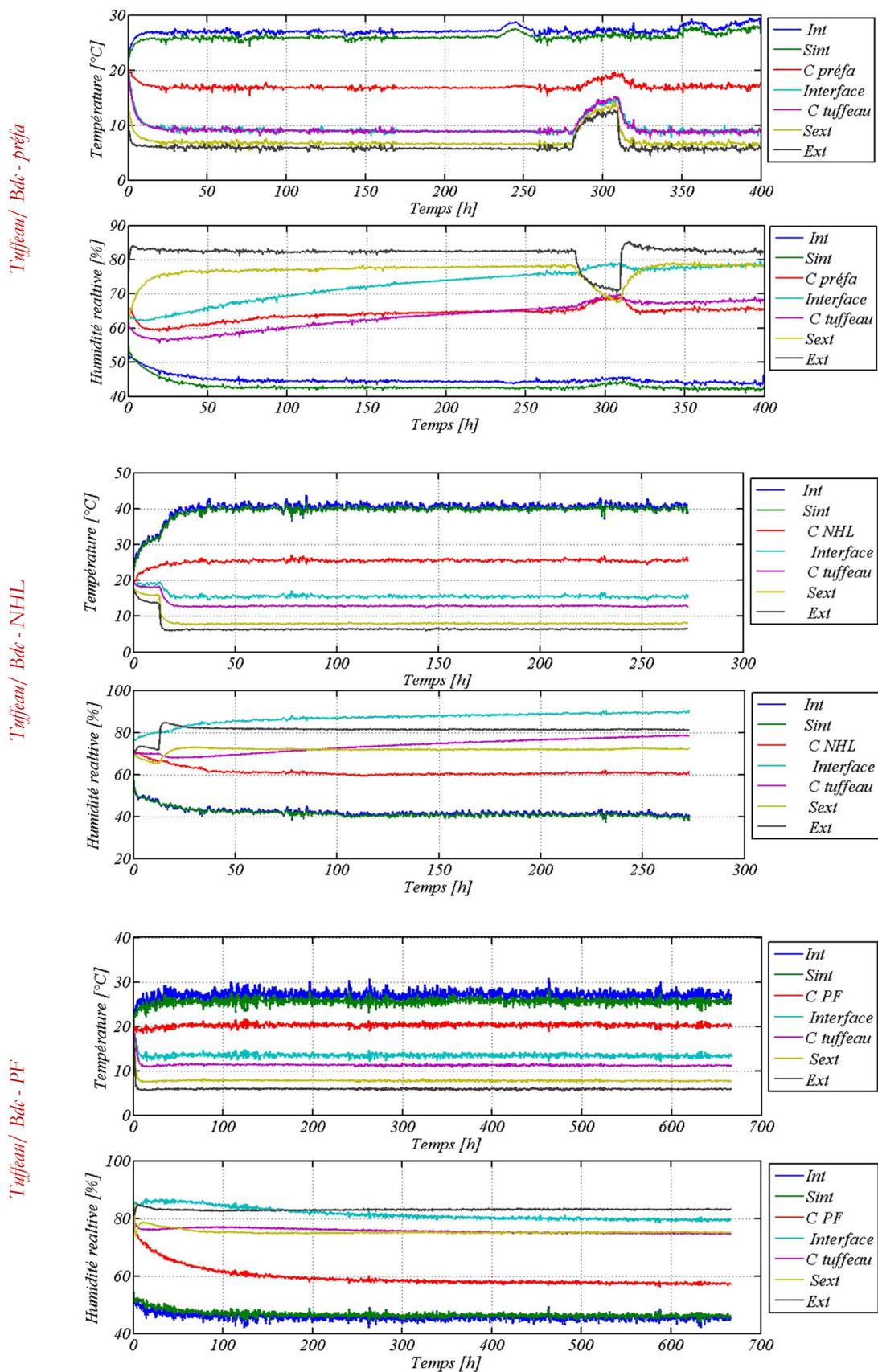


Figure IV. 27 : Evolution des champs de température et d'humidité relative dans les parois multicouches soumises à des sollicitations statiques

IV.5.1.2. Flux de vapeur

Nous présentons dans la Figure IV. 31 les variations de flux de vapeur dans les parois en tuffeau isolées par du béton de chanvre sollicitées en régime statique. Pour la paroi *tuffeau/bdc - préfa* le flux de vapeur d'eau se partage en deux, le premier de l'ambiance intérieure vers l'interface des deux parois et le second de l'ambiance extérieure vers le centre de la paroi en tuffeau ce qui pourrait témoigner un risque de condensation dans la pierre. Cependant, les deux parois composées du tuffeau et de bétons de chanvre moulés maintiennent une diffusion de vapeur d'eau de l'ambiance intérieure vers l'ambiance extérieure, et à souligner également que les variations surfaciques sont très proches de leurs ambiances environnantes.

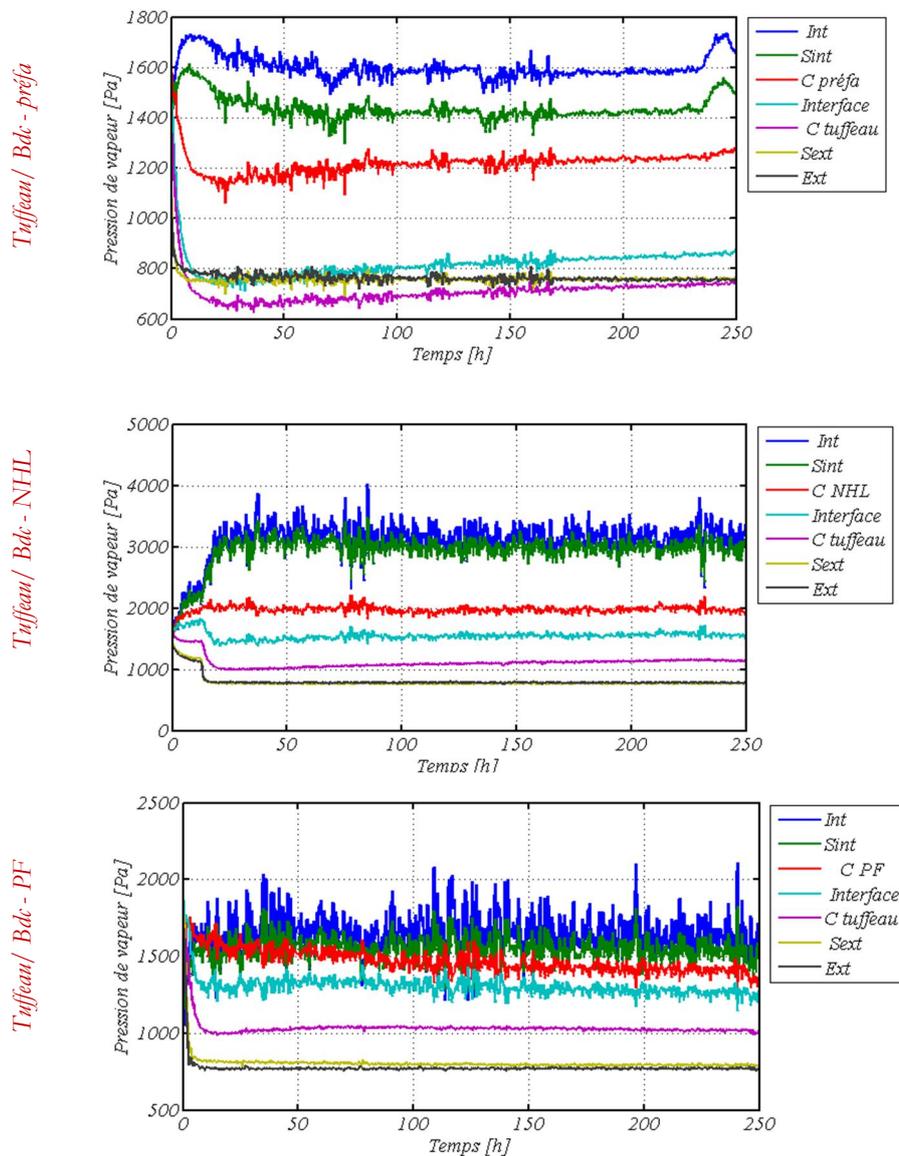


Figure IV. 28 : Evolution des champs de pression de vapeur dans les parois multicouches soumises à des sollicitations statiques

IV.5.1.3. Temps de stabilisation

Comme pour les parois simples, nous déterminons les temps de stabilisation pour les parois multicouches. Ces temps de stabilisation sont thermiques et sont déterminés par rapport aux différentes positions de la paroi (Figure IV. 29).

La paroi *tuffeau/ bdc - préfa* a un temps de stabilisation globalement le même tout au long de la paroi et vaut en moyenne 4,7h.

Nous rappelons ici que les parois en béton de chanvre n'ont pas la même épaisseur. En effet, les parois moulées ont une épaisseur moyenne de 5,45 cm alors que le béton de chanvre préfabriqué a une épaisseur de 15 cm (voir § IV.2.1.2). Par conséquent dans ce qui suit, nous comparons entre les deux parois multicouches *tuffeau/bdc - NHL* et *tuffeau/ bdc - PF*.

Les deux parois multicouches ont le même temps de stabilisation du côté extérieur. La différence entre les deux parois est soulignée au niveau du centre des bétons de chanvre et à la surface intérieure. Le multicouche confectionné avec du *bdc -PF* a un temps de stabilisation plus élevé que celui calculé pour un multicouche confectionné avec du *bdc -PF*.

Nous avons souligné dans le paragraphe précédent que le comportement thermique de l'interface suit celui du centre tuffeau et dépend des conditions extérieures. Ceci explique donc le $\tau_{s,T}$ égal pour ces deux positions. Néanmoins, du côté intérieur, il ne s'agit pas de la même structure porale car le *bdc - PF* est fabriqué à partir d'une chaux pouzzolanique qui remplit les pores des produits hydratés, ce qui pourrait retarder les transferts de chaleur au sein de la paroi.

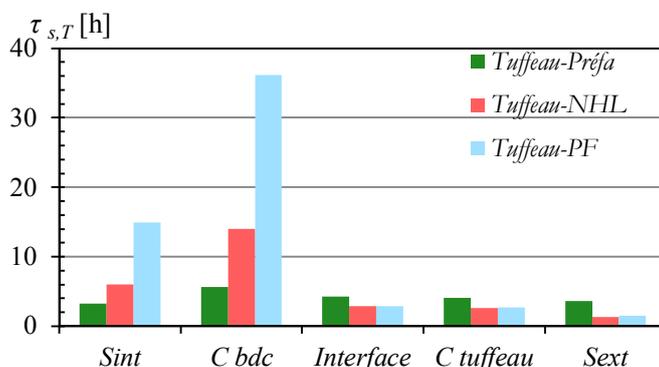


Figure IV. 29 : Evolution des temps de stabilisation thermique pour les parois multicouches

IV.5.2. Cas de sollicitations cycliques

IV.5.2.1. Flux de chaleur et de masse

Après avoir été soumises à des gradients de température et d'humidité relative constants, les parois multicouches sont sollicitées en régime cyclique en température extérieure.

Ces sollicitations ont une période de 24 h et une amplitude de 10°C. Les évolutions en T/φ enregistrées dans les ambiances et dans la paroi sont données sur la Figure IV. 30.

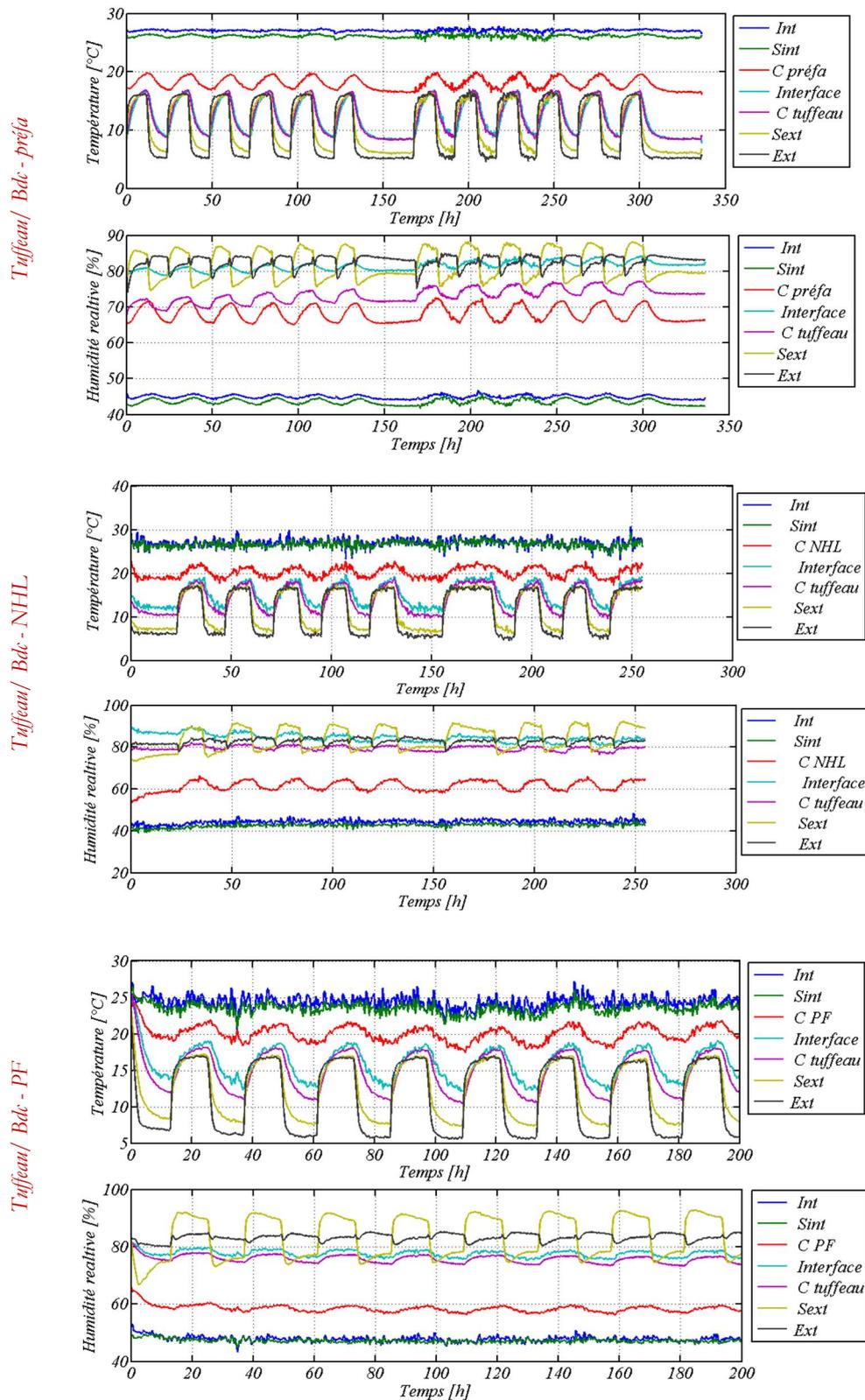


Figure IV. 30 : Evolution des champs de température et d'humidité relative dans les parois multicouches soumises à des sollicitations cycliques en températures extérieures

De façon générale, les variations en température extérieure engendrent des variations en humidité relative extérieure. Ces variations sont de l'ordre de 6 % et elles sont supérieures aux variations théoriques données par les tableaux de l'activité de l'eau dans les solutions salines. Par exemple une solution saline saturée en KCl dégage théoriquement une humidité relative de 87,7% à 5°C et 85,9 % à 15°C. La température et par conséquent l'humidité relative de l'ambiance extérieure influence celles enregistrées au centre de la paroi en béton de chanvre voire la surface intérieure dans le cas de *bdc-préfa*.

Les surfaces intérieures des bétons moulés sont moins influencées par les sollicitations cycliques et maintiennent un comportement plutôt statique aussi bien en température qu'en humidité relative.

IV.5.2.2. Flux de vapeur

La Figure IV. 31 illustre les variations de pression de vapeur dans les parois multicouches sollicitées en régime cyclique en température extérieure. Les variations surfaciques sont comparables à celles notées en régime statique où elles sont plus marquées pour la paroi *Tuffeau/bdc-préfa* alors qu'elles sont fortement liées pour les parois *tuffeau/bdc-NHL* et *tuffeau/bdc-PF*.

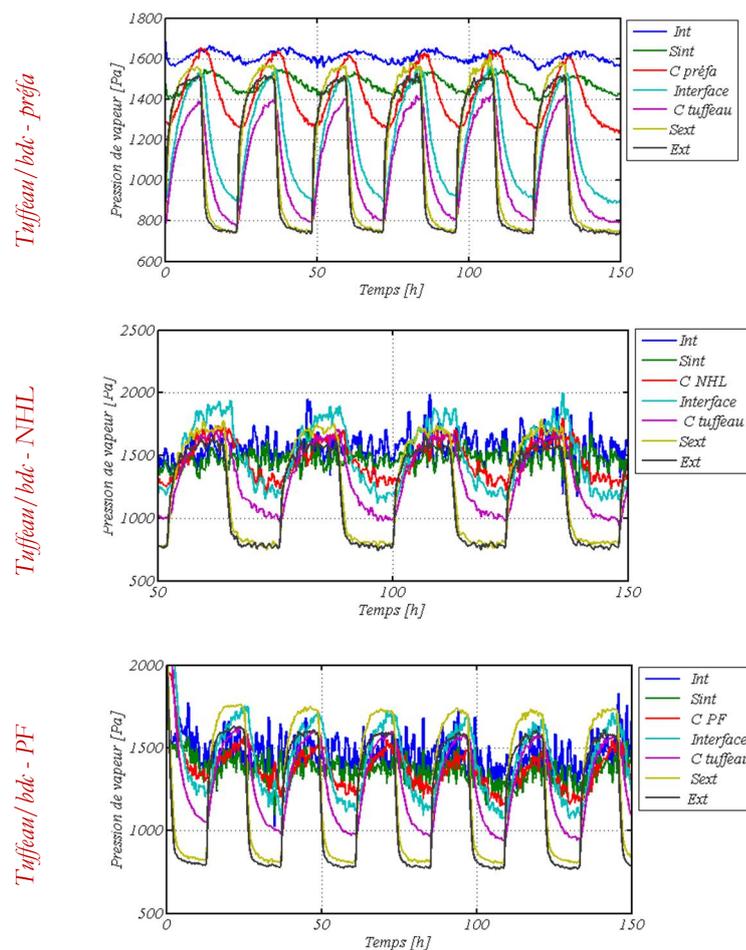


Figure IV. 31 : Evolution des champs de pression de vapeur dans les parois multicouches soumises à des sollicitations cycliques en températures extérieures

Sur une $\frac{1}{2}$ période (Température extérieure est élevée), pour la première paroi le flux est du centre préfa (C préfa) vers le centre tuffeau alors qu'il est de l'interface vers le centre tuffeau pour les deux autres parois. Les variations au centre de la paroi en béton de chanvre moulé (C NHL et C PF) sont influencées par l'ambiance intérieure. Cependant pendant la deuxième $\frac{1}{2}$ période, le sens du flux est plus net et plus marqué et est de l'intérieur vers l'extérieur. Ceci témoigne donc une qualité perspirante de la paroi.

IV.5.2.3. Facteurs d'amortissement et déphasages temporels

a. Facteurs d'amortissement

- *Norme NF EN ISO 13786*

Les facteurs d'amortissements sont calculés pour les parois en tuffeau isolées avec le béton de chanvre par application sèche (*bdc - préfa*) et par application humide (*bdc - NHL* et *bdc - PF*).

Le transfert de vapeur étant négligé dans la norme *NF EN ISO 13786*, nous nous limitons aux calculs des facteurs d'amortissement thermiques

Les valeurs obtenues pour les différentes parois sont inférieures aux valeurs obtenues des parois simples. Elles sont pour les deux parois tuffeau/béton de chanvre moulé sensiblement les mêmes ce qui est en accord avec les hypothèses de la théorie de calcul. En effet, la norme est basée sur les propriétés thermo physiques des matériaux secs (λ et ρC_p) et leurs épaisseurs.

Ceci explique davantage l'amélioration de la performance d'amortissement de la paroi *tuffeau/bdc-préfa* où la couche en béton de chanvre est plus épaisse (donc plus inertie).

Tableau IV. 13 : Facteurs d'amortissement thermiques déterminés suivant la norme *NF EN ISO 13786* pour les parois multicouches sollicitées en température extérieure cyclique

	<i>Tuffeau/bdc-préfa</i>	<i>Tuffeau/bdc - NHL</i>	<i>Tuffeau/bdc - PF</i>
f_T	0,14	0,57	0,54

- *Méthode d'Asan et al.*

A partir des profils surfaciques temporels en température et en pression de vapeur, nous calculons les facteurs d'amortissement thermique et hydrique (Figure IV. 32). Ces derniers varient pour les bétons de chanvre moulés alors qu'ils sont stables pour le béton de chanvre préfabriqué. En effet, les variations à la surface des *bdc - NHL* et *bdc - PF* sont plus incertaines par rapport à celle du *bdc - préfa* où les profils de la température et de l'humidité relative sont plus statiques (voir Figure IV. 30).

Par ailleurs, le *bdc - préfa* a un facteur d'amortissement plus faible que celui de *bdc - NHL* ou le *bdc - PF*. Ceci peut être expliqué par son épaisseur plus importante qui lui offre donc plus d'inertie.

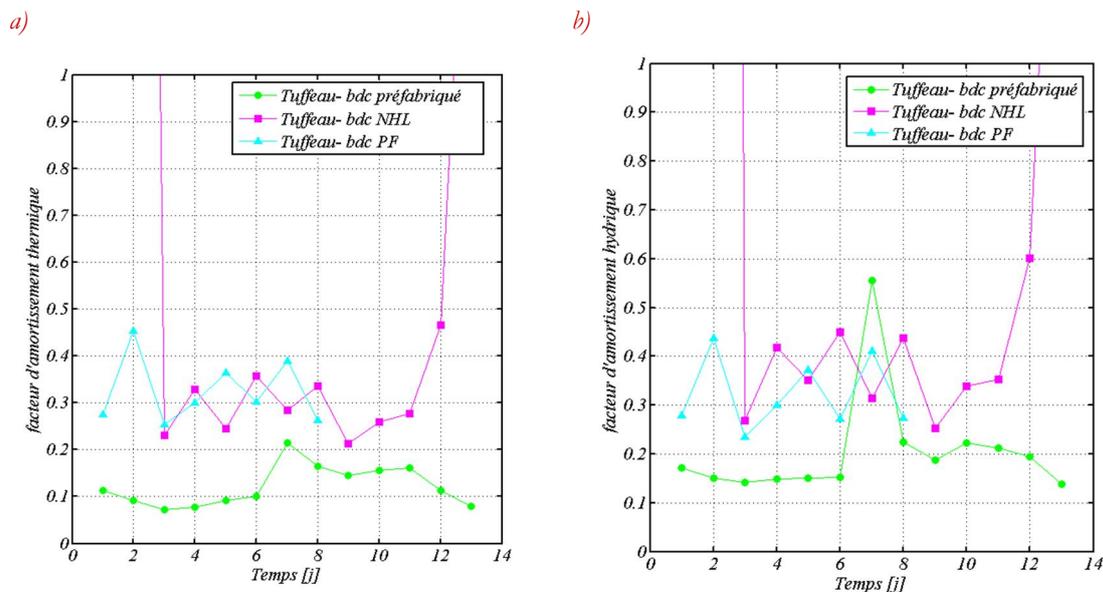


Figure IV. 32 : Facteurs d'amortissement thermiques (a) et hydriques (b) déterminés par la méthode d'Asan et al. pour différents jours et pour des parois multicouches sollicitées en régime cyclique en température extérieure

- Méthode d'inter-corrélation

Les facteurs d'amortissement sont aussi déterminés par la sélection manuelle des amplitudes maximales et minimales. Cette méthode est très similaire à la méthode d'Asan et al pour le calcul des facteurs d'amortissement et ce qui explique les valeurs proches trouvés.

Nous trouvons donc un facteur d'amortissement thermiques moyen de 0,1 pour la paroi tuffeau/bdc-préfa, de 0,32 pour la paroi tuffeau/bdc - NHL et de 0,41 pour la paroi tuffeau/bdc -PF.

Tableau IV. 14 : Facteurs d'amortissement moyens thermiques et hydriques des parois multicouches sollicitées en température extérieure cyclique

	Tuffeau/ bdc-préfa	Tuffeau/ bdc - NHL	Tuffeau/ bdc - PF
f_T	0,11	0,32	0,41
f_w	0,17	0,43	0,47

- Méthode de décomposition en série de Fourier

Après avoir calculé le facteur d'amortissement suivant la norme en vigueur et en se basant sur les amplitudes intérieures et extérieures, nous faisons appel à la méthode de décomposition de série de Fourier. Nous retenons pour la comparaison avec les autres méthodes les valeurs trouvés pour la fondamentale ($T=24h$). Les valeurs ainsi calculées sont de 2 à 4 fois inférieures puisque les facteurs d'amortissement thermique sont compris entre 0,04 et 0,1.

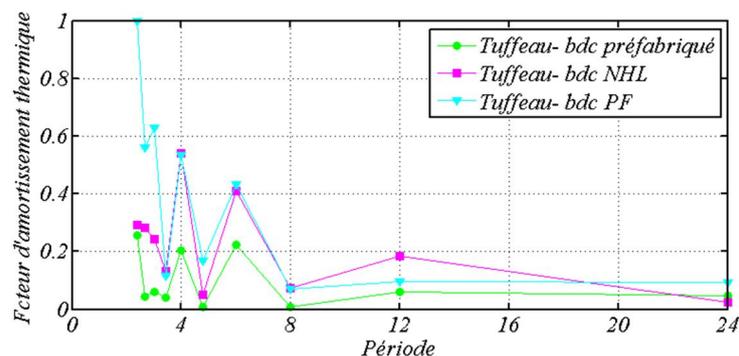


Figure IV. 33 : Facteurs d'amortissement thermique pour les 10 premières harmoniques retenues pour les parois multicouches sollicitées en régime cyclique en température extérieure

Tableau IV. 15 : Facteurs d'amortissement thermiques pour la fondamentale ($T=24h$) des parois multicouches sollicitées en température extérieure cyclique

	Tuffeau/ bdc-préfa	Tuffeau/ bdc - NHL	Tuffeau/ bdc - PF
f_T	0,05	0,04	0,1
f_w	0,11	0,03	0,06

b. Déphasages temporels

- Norme NF EN ISO 13786

Le calcul des déphasages temporels est effectué pour les parois multicouches. La première méthode appliquée est celle de la norme *NF EN ISO 13786* et elle concerne le comportement thermique de la paroi. Les valeurs obtenues sont calculées suivant le gradient de températures aux surfaces intérieure et extérieure de la paroi en tuffeau isolée avec du béton de chanvre.

Tableau IV. 16 : Déphasages temporels thermiques calculés suivant la norme *NF EN ISO 13786* pour des parois multicouches sollicitées en température extérieure cyclique

	Tuffeau/ bdc-préfa	Tuffeau/ bdc - NHL	Tuffeau/ bdc - PF
Φ_T [h]	16,8	6,5	7,8

- Méthode d'Asan et al

Le déphasage thermique des parois multicouches varie de 4h à 12h. Pourtant la paroi *tuffeau/bdc-préfa* est la plus épaisse, le déphasage thermique résultant est le plus faible. Cette observation va *a priori* à l'encontre des hypothèses admises en termes de transfert de chaleur.

Cette méthode est certes la plus utilisée dans les travaux scientifiques mais elle est adaptée à des conditions aux limites en température présentant des variations marquées aux surfaces des parois.

Pour un matériau tel que le béton de chanvre qui permet de lisser les variations intérieures (forte atténuation), la détermination des amplitudes n'est pas évidente. Ceci a donc une influence sur la précision des écarts des températures enregistrées et par conséquent sur la détermination des déphasages.

Tableau IV. 17 : Déphasages temporels moyens thermiques et hydriques des parois multicouches sollicitées en température extérieure cyclique

	Tuffeau/ bdc-préfa	Tuffeau/ Bdc - NHL	Tuffeau/ Bdc - PF
Φ_T [h]	4,5	5,51	11,9
Φ_w [h]	5,5	4,9	9,4

- *Méthode d'inter-corrélation*

La méthode d'inter corrélation est à notre avis la méthode qui permet le mieux de calculer le déphasage par rapport aux autres méthodes exposées dans ce rapport comme expliqué précédemment lors de l'étude des parois monocouches.

Tableau IV. 18 : Déphasages temporels moyens thermiques et hydriques déterminés par la méthode d'inter corrélation appliquée sur les parois multicouches sollicitées en température extérieure cyclique

	Tuffeau/ bdc-préfa	Tuffeau/ Bdc - NHL	Tuffeau/ Bdc - PF
Φ_T [h]	6,5	4,7	2,9
Φ_w [h]	7,1	4,8	3,6

Nous obtenons donc des déphasages compris entre 3h et 7h. Les deux parois à base de béton de chanvre moulé présentent des valeurs de déphasage thermique et hydrique proches alors que la paroi à base de béton de chanvre préfabriqué possède un déphasage thermique et hydrique plus élevé et c'est en particulier dû à l'épaisseur de la paroi.

- *Méthode de décomposition en série de Fourier*

La méthode de décomposition en série de *Fourier* a permis de retrouver les valeurs de déphasage de la méthode précédente. Cette vérification permet de valider la décomposition de la sollicitation cyclique en un ensemble de sollicitations sinusoïdales.

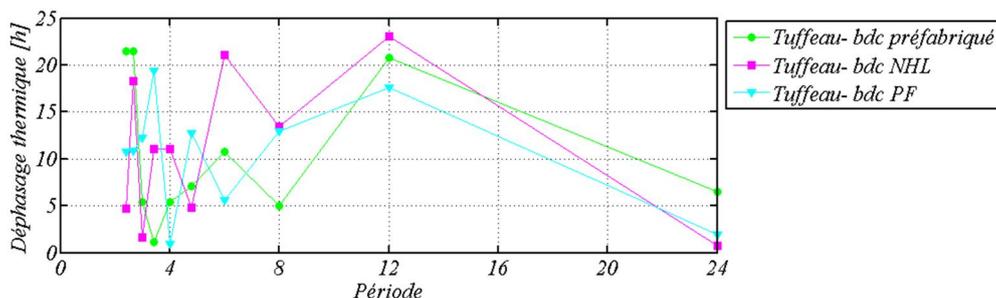


Figure IV. 34 : Déphasages thermiques pour les 10 premières harmoniques retenues pour les parois multicouches sollicitées en régime cyclique en température extérieure

Tableau IV. 19 : Déphasages temporels moyens thermiques et hydriques déterminés pour la fondamentale ($T=24h$) des parois multicouches sollicitées en température extérieure cyclique

	Tuffeau/ bdc-préfa	Tuffeau/ Bdc - NHL	Tuffeau/ Bdc - PF
Φ_T [h]	6,6	4,2	2,7
Φ_w [h]	7,3	4,4	1,3

c. Comparaison entre les méthodes

En guise de conclusion, nous comparons les valeurs trouvées par les différentes méthodes (voir Figure IV. 35 et Figure IV. 36)

Nous soulignons de nouveau une similitude entre les résultats trouvés par la méthode de la littérature et la méthode d'inter corrélation en termes de facteur d'amortissement. Les résultats de la méthode de décomposition en série de *Fourier* sont néanmoins différents parce que la méthode à notre avis est plus rigoureuse et plus adaptée à des sollicitations cycliques réelles. Par conséquent, le béton de chanvre présente des bonnes propriétés d'amortissement des variations extérieures. A rappeler également que le *bdc-préfa* est d'épaisseur de 15 cm alors que le *bdc - NHL* et *bdc - PF* sont de 5,45 cm.

La méthode d'inter corrélation est la méthode adaptée à la détermination du déphasage puisque elle n'intervient pas sur le signal lui-même, elle conserve donc les sollicitations réelles telles qu'elles sont et calcul le décalage par interférence des signaux surfaciques intérieure et extérieure.

Les valeurs voisines des deux méthodes nouvelles et appliquées dans ce projet de recherche, l'inter corrélation et la décomposition en série de *Fourier*, permet de vérifier si la décomposition en signaux sinusoïdaux est correcte. En effet, la même fonction permet de calculer à la fois le facteur d'amortissement et le déphasage et donc nos valeurs de facteurs d'amortissement sont vérifiés grâce aux valeurs de déphasage.

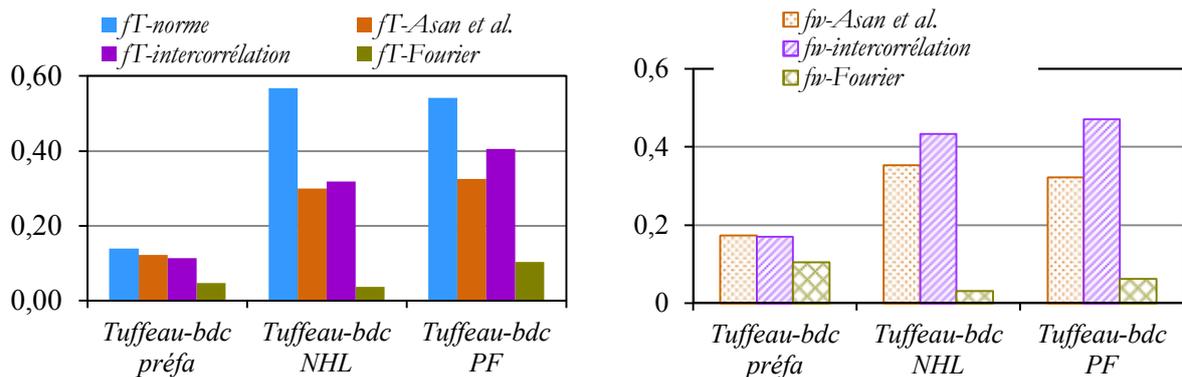


Figure IV. 35 : Comparaison des facteurs d'amortissement thermiques (à gauche) et hydriques (à droite) obtenus pour les parois multicouches étudiées

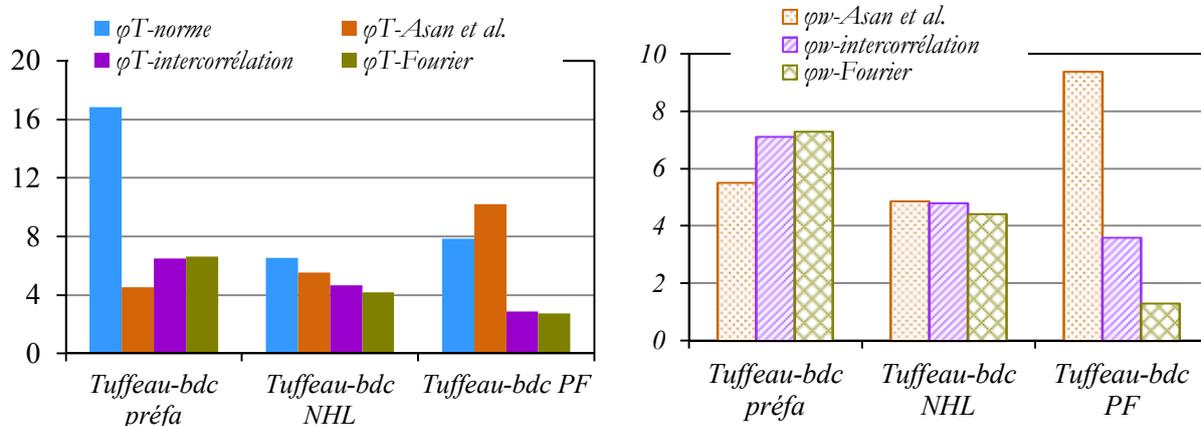


Figure IV. 36 : Comparaison des déphasages thermiques (à gauche) et hydriques (à droite) obtenus pour les parois multicouches étudiées

IV.6. Conclusion

Le développement d'une cellule bi climatique composée de deux ambiances différentes *intérieure* et *extérieure* a permis d'étudier les transferts de chaleur et d'humidité relative dans les parois simples et multicouches. L'ambiance intérieure est une ambiance de confort avec une T de 23°C et de ϕ de 47% alors que l'ambiance extérieure est de T de 5°C et de ϕ de 87% ce qui correspond à des valeurs hivernales moyennes. Cette ambiance est modifiée au cours du temps pour qu'elle soit cyclique en température extérieure avec une T de 15°C.

Au terme de cette analyse des résultats expérimentaux relatifs à l'évolution spatio-temporelle de la température et de l'humidité relative, les conclusions suivantes peuvent être dressées :

Les variations à la surface intérieure (côté béton de chanvre) sont plus faibles (par rapport à une paroi simple en tuffeau), ce qui est dû à la résistance thermique des bétons de chanvre.

L'exposition des parois à des sollicitations instationnaires a permis de déterminer leurs propriétés dynamiques d'amortissement et de déphasages temporels. Ces deux propriétés sont donc calculées suivant des différentes méthodes, la norme en vigueur *NF EN ISO 13786*, la méthode *d'Asan et al* qui est largement utilisée dans les travaux de recherche mais aussi suivant la méthode d'inter corrélation et la décomposition en série de *Fourier*.

Lorsque les parois sont soumises à des variations cycliques réelles en température extérieure (et en humidité relative), les méthodes actuelles utilisées semblent ne pas reproduire les propriétés d'inertie des parois testées soit simples ou multicouches. En effet, elles sont basées sur des sollicitations théoriques de type sinusoïdale et par conséquent leurs paramètres ne sont pas facilement détectés et sont souvent entachés d'erreur de corrélation.

Le recours à l'utilisation de nouvelles méthodes qui sont plutôt adaptées aux sollicitations réelles enregistrées grâce à l'expérimentation nous ont permis de mieux évaluer les réponses hygrothermiques des parois, en particulier les parois en tuffeau isolées par du béton de chanvre.

La technique d'isolation du tuffeau avec un matériau perspirant tel que le béton de chanvre par application sèche ou humide semble présenter une amélioration des propriétés dynamiques de la paroi d'origine, ce qui a influencé la température et l'humidité relative à la surface intérieure (en contact avec les occupants) qui est désormais en béton de chanvre.

V. ÉTUDE NUMÉRIQUE DES TECHNIQUES D'ISOLATION À BASE DE CHANVRE

Après avoir testé les matériaux étudiés en configuration simple et multicouche. Nous poursuivons dans ce chapitre cette étude de manière numérique par utilisation du modèle de Künzel implémenté dans le logiciel de transferts couplés de masse et de chaleur WUFI.

D'abord, nous présentons en détails le modèle en termes d'hypothèse de calcul, des équations de conservation, expressions de flux et des conditions aux limites. Ensuite, nous réaliserons une étude de sensibilité afin d'identifier les paramètres qui influencent la réponse hygrothermique des parois testées. Le modèle est également appliqué aux parois testées dans le chapitre IV afin de confronter les résultats expérimentaux et numériques. Enfin, nous évaluons des techniques d'isolation suggérées dans le cadre du projet « Notre patrimoine a de l'avenir : un bâti en tuffeau pour aujourd'hui » en conditions météorologiques d'hiver.

V.1. Présentation du modèle

Le choix des potentiels est essentiel dans la formulation des équations. Galbraith s'appuie sur la thermodynamique des phénomènes irréversibles pour montrer que les couples température/humidité relative ou température/pression de vapeur sont les véritables potentiels des transferts d'humidité [72].

Il convient cependant de préciser que les modèles basés sur des potentiels dérivés de l'humidité relative et de la pression de vapeur ont montré leurs limites car ces potentiels dérivés introduisent souvent des discontinuités aux frontières du matériau. Le choix du potentiel est donc primordial et il doit aussi satisfaire un critère important qui est son accessibilité par la mesure.

Notre choix s'est tourné vers un système d'équations de transferts couplées basé sur le modèle de *Künzle* et utilisé au sein d'un logiciel de simulation *WUFI*, développé par le *Fraunhofer Institut Bauphysik IBP* [4,50,52,53,92,93].

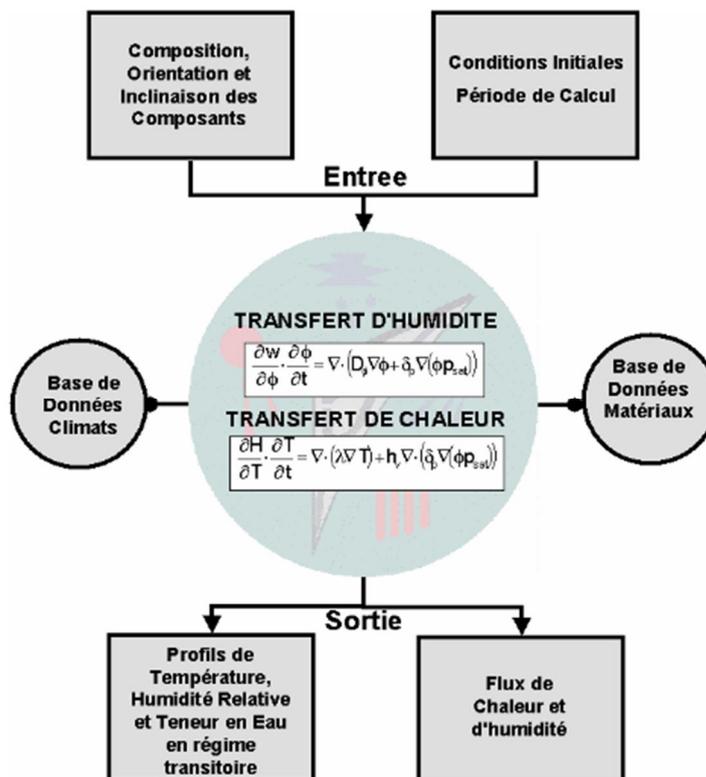


Figure V. 1 : Organigramme du modèle de WUFI [54]

V.1.1. Equations

Le modèle de *Künzle* est basé sur les potentiels de température T et de l'humidité relative ϕ . Ces deux équations sont composées d'un terme de stockage et de termes de transfert.

Le terme de stockage de la chaleur est ρC_p alors que celui d'humidité est donné par la pente de l'isotherme d'adsorption $\frac{\partial w}{\partial p}$ (variation de teneur en eau pour une variation d'humidité relative).

Le gradient de pression de vapeur est présent dans la première et la seconde équation. Dans la première équation, il traduit le transfert de chaleur latente du fait des mécanismes d'évaporation et condensation dans le matériau. Dans la seconde équation, il correspond au transfert d'humidité sous forme de vapeur d'eau sous un gradient de pression de vapeur. Il s'agit donc d'un terme de couplage liant les évolutions de la température et de l'humidité dans le matériau.

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad \text{V. 1}$$

Où :

ρC_p	[J/m ³ .K]	Capacité thermique volumique
$\frac{\partial w}{\partial p}$	[-]	Dérivée de l'isotherme d'adsorption
λ	[W/m.K]	Conductivité thermique
L_v	[J/kg]	Chaleur latente de vaporisation
μ	[kg/Pa.m.s]	Perméabilité du matériau à la diffusion de la vapeur d'eau
p_{vs}	[Pa]	Pression de vapeur saturante
ρ	[kg/m.s]	Coefficient de conduction liquide

La pression de vapeur P_v est donc la force motrice du flux de vapeur et elle est fortement influencée par la température (V. 2 et V. 3) :

$$P_v = P_{vs}(T) \quad \text{V. 2}$$

La pression de vapeur saturante P_{vs} s'écrit suivant la relation de *Clausius - Clapeyron* :

$$P_{vs} = P_0 \exp \left[\frac{L_v}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad \text{V. 3}$$

Avec M [kg/mol] la masse molaire de l'eau, L_v [J/kg] la chaleur latente de vaporisation de l'eau, R la constante des gaz parfaits et égale à 8,31447 J/K.mol et T_0 [K] la température d'ébullition à une pression P [Pa] donnée.

La densité du flux de diffusion de vapeur peut ainsi être écrite comme suit :

$$\dot{m}_v = - (D_m \frac{dm}{dx} + D_T \frac{dT}{dx}) \approx - D_m \frac{dm}{dx} = - D_m \frac{P_v}{P_0} \frac{dP_v}{dx} \quad V. 4$$

Avec D_m [kg/m s] le coefficient de diffusion lié à la masse, m [-] la fraction massique de la vapeur d'eau par rapport à la masse du mélange de l'air humide, D_T [kg/m.s.K] le coefficient de thermo-migration (diffusion de l'eau du fait du gradient de température), δ_p [kg/Pa.m.s] la perméabilité à la vapeur d'eau et P_v [Pa] la pression partielle de la vapeur d'eau. Le terme de thermo-migration n'est pas pris en compte dans le modèle de *Künzsel*.

La perméabilité de l'air à la vapeur d'eau peut être exprimée en fonction de la température :

$$D_p = \frac{2,306 \cdot 10^{10} \cdot \frac{1}{273,15} \cdot \frac{1}{P_0}}{273,15} = 2 \cdot 10^{10} \frac{1}{P_0} \quad V. 5$$

Avec μ_v la constante spécifique de la vapeur d'eau (= 461,5 J/K.kg) et P_0 [Pa] la pression atmosphérique.

Dans le cas de diffusion dans les capillaires, le coefficient de diffusion à la vapeur d'eau (μ) est introduit. La densité de flux de diffusion de la vapeur se réécrit comme suit :

$$\dot{m}_v = - D_p \frac{dm}{dx} = \frac{\mu}{P_0} \frac{dP_v}{dx} \text{ puisque } \mu = \frac{\mu_v}{P_0} \quad V. 6$$

En intégrant V. 2 dans V. 6, la densité de diffusion de la vapeur peut également être exprimée de la manière suivante :

$$\dot{m}_v = - D_p \frac{dm}{dx} = - D_p \frac{dP_v}{dx} \frac{\mu}{P_0} - D_p \frac{dP_v}{dx} \frac{\mu}{P_0} \quad V. 7$$

Les transferts en phase liquide se font sous l'action de forces capillaires d'interactions entre les phases fluides et d'interaction entre phases fluides et matrice solide. La conduction liquide est décrite par la densité du flux liquide tel que :

$$\dot{m}_l = - D_w \frac{dw}{dx} \quad V. 8$$

Avec D_w [m²/s] la diffusivité massique, w [kg/m³] la teneur en eau.

La conduction liquide peut être également écrite suivant la loi de *Darcy* :

$$q_l = -K_l \frac{P_k}{\mu} \quad V. 9$$

Avec K_l [kg/m.s.Pa] la perméabilité liquide, P_k [Pa] la pression de la succion capillaire.

La succion capillaire s'exprime en fonction de loi de de *Kelvin* comme :

$$P_k = -\frac{2\sigma_w}{r} \quad V. 10$$

Avec σ_w [kg/m³] la masse volumique de l'eau.

L'équation V. 9 peut être réarrangée dans une nouvelle forme en substituant P_k par son expression proposée dans V. 10.

$$q_l = -\frac{2\sigma_w K_l}{\mu r} \approx -\frac{2\sigma_w K_l}{\mu r} \quad V. 11$$

Le terme $\frac{2\sigma_w K_l}{\mu r} \ll \frac{2\sigma_w}{r}$ et il est donc souvent négligé [53]. De ce fait la densité du flux liquide s'écrit comme suit :

$$q_l = -\frac{2\sigma_w}{r}; \quad q_v = S_w \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad V. 12$$

En comparant les équations V. 8 et V. 12 :

$$q_l = -\frac{2\sigma_w}{r} = -\frac{2\sigma_w}{r} = -\frac{dw}{d\phi} \rightarrow \frac{dw}{d\phi} = \frac{2\sigma_w}{r} \quad V. 13$$

Sachant que le bilan de conservation de masse est :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial q_l}{\partial x} + \frac{\partial q_v}{\partial x} + S_w \quad V. 14$$

Avec S_w [kg/m³ s] un terme source d'humidité.

Après la substitution des expressions des densités de flux vapeur V. 7 et liquide V. 12 dans l'équation du bilan en V. 14 .

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} &= \frac{\partial \rho_v}{\partial x} + \frac{\partial \rho_l}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \\ &= \frac{\partial \rho_v}{\partial x} + \frac{\partial \rho_l}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \end{aligned} \quad V. 15$$

Le terme à gauche pourrait être écrit sous la forme :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \frac{\partial \theta}{\partial \theta} \quad V. 16$$

Quant au transport de chaleur, il se fait par conduction (λ) et *via* les mécanismes d'évaporation/condensation provoquant un flux de chaleur latente (L_v). L'équation de conservation de la chaleur est basée sur la conservation de l'enthalpie du système et elle s'écrit :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = - \text{div}(\lambda \text{grad} \theta) + S_b \quad V. 17$$

Avec H [J/m³] l'enthalpie totale du système tel que $H = H_s + H_w$ (l'enthalpie du matériau sec et du matériau humide respectivement), S_b [W/m³] la source de chaleur et q_T [W/m²] la densité du flux de chaleur. Cette dernière s'écrit suivant la loi de *Fourier* :

$$q_T = - \lambda \text{grad} \theta \quad V. 18$$

Le terme source de chaleur s'écrit sous la forme :

$$S_b = - \text{div}(\rho L_v \text{grad} \theta) \quad V. 19$$

Remplaçons V. 7 dans V. 17,

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} &= \rho c_s \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho c_w w \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho L_v \frac{\partial w}{\partial t} + \text{div}(\lambda \text{grad} \theta) \\ &= \rho c_s \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho c_w w \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho L_v \frac{\partial w}{\partial t} + \text{div}(\lambda \text{grad} \theta) \end{aligned} \quad V. 20$$

Comme pour l'équation de conservation de masse, la dérivée temporelle de l'enthalpie dans l'équation de conservation de chaleur peut être écrite sous la forme :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \rho c_s \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho c_w w \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho L_v \frac{\partial w}{\partial t} = \rho c_s \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho c_w w \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho L_v \frac{\partial w}{\partial t} \quad V. 21$$

Avec ρ_s [kg/m³] la masse volumique du matériau sec, C_s [J/kg K] est la chaleur spécifique du matériau sec, w [kg/kg] est la teneur en eau massique et C_w [J/kg K] est la chaleur spécifique de l'eau.

La résolution de ce système d'équations couplées est réalisée par discrétisation par la méthode des volumes finis avec un schéma implicite pour la discrétisation temporelle

V.1.2. Données d'entrée

La résolution des systèmes d'équation couplées nécessite de connaître les propriétés des matériaux constituant les parois. Ces propriétés sont physiques, hydriques et thermiques. Elles sont accessibles par la mesure (normes, standard, etc.). En cas de manque d'informations, le modèle de *Künzler* propose des relations empiriques pour les calculer, d'où la possibilité de les générer par le biais d'autres paramètres.

V.1.2.1. Propriétés physiques

Les deux propriétés à introduire sont :

- La masse volumique ρ_s [kg/m³]
- La porosité n [m³/m³]

V.1.2.2. Propriétés de transfert hydrique

- L'isotherme d'adsorption (ou la courbe de rétention d'eau) w^* [kg/m³] = $f(\varphi)$ est une donnée fondamentale. L'étude de sensibilité détaillée dans le § V.2 soulignera l'importance de ce paramètre. *WUFI* prend la teneur en eau comme étant le produit de teneur en eau massique et la masse volumique du matériau sec ($w^* = w \cdot \rho_s$).

- La perméabilité à la vapeur d'eau [kg/m s Pa] en fonction de l'humidité de l'air. Deux valeurs sont au moins nécessaires : celle de la coupelle sèche (3 - 50%) et la coupelle humide (50 - 93%).

- La diffusivité liquide D_w [m²/s] permet d'obtenir le coefficient de conduction de l'eau liquide D_φ en multipliant D_w par la pente de l'isotherme d'adsorption comme il est détaillé dans l'équation V. 13. D_φ peut être toutefois accessible par la mesure par le biais de l'essai à la coupelle.

$$\mu(\varphi) = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_0} \right) \quad V. 22$$

Avec P_{sat} [Pa], la pression de vapeur saturante, δ_0 [kg/Pa.m.s], la perméabilité de l'air à la vapeur d'eau et $\mu(\varphi)$ et μ_0 [-] sont respectivement le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau pour la coupelle humide et la coupelle sèche.

Le coefficient de D_w est une propriété qui dépend du matériau mais son intervention dans les calculs dépend des conditions aux limites du système [94] et permet la prise en compte des humidifications par de l'eau liquide (précipitations liquide, remontées capillaires...). Le modèle fait donc intervenir deux coefficients de transport liquide distincts en fonction des conditions aux limites (pluie/pas de pluie). Le modèle de *Künzler* distingue la diffusivité liquide (D_{w1}) pour la phase d'absorption et la diffusivité liquide (D_{w2}) pour la redistribution/séchage du matériau.

En effet, D_{mv} décrit la propagation de l'eau imbibée dans la structure porale lorsque le mouillage est fini ; ce qui correspond à la migration de l'eau (vapeur et liquide) en absence de pluie.

La redistribution est dominée par les petits capillaires à de la succion capillaire qui attire l'eau hors des capillaires plus larges. D_{ms} décrit l'absorption capillaire quand la surface du matériau est totalement humidifiée suite à une pluie battante ou/et une remonté capillaire. D_{ms} est conditionnée par les grands capillaires et peut être calculée à partir de la relation V. 23 [50,94] :

Künzler a proposé une relation empirique telle que :

$$D_{ms}(w) = 3,8 \frac{A}{\rho} \frac{1000}{w} \quad \text{V. 23}$$

Avec A [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{0.5}$] le coefficient de prise de masse par capillarité (voir § II.4.1) et w_f [kg/m^3] la saturation en eau libre.

L'expression de w_f est obtenue grâce à l'emploi d'un modèle équivalent de *BET* pour extrapoler les valeurs de teneurs en eau pour les fortes humidités relative (pour 100%).

$$w = \frac{b}{b-1} \frac{w_{80} - 1}{w_{80} - 1} \quad \text{V. 24}$$

Avec b un facteur d'approximation qui doit être supérieur à 1 et peut être calculé à partir de la teneur en eau à 80%. (w_{80}).

D_{mv} [m^2/s] est ensuite défini à partir de D_{ms} tel que :

$$D_{mv} = \frac{D_{ms}}{10} \quad \text{V. 25}$$

V.1.2.3. Propriétés thermiques

- La conductivité thermique du matériau sec à 10°C λ_s [$\text{W}/\text{m K}$]. L'état sec ne présente pas l'état réaliste des matériaux en état de service, il est donc nécessaire de donner son évolution en fonction de la teneur en eau ou de l'humidité relative. Le modèle de *Künzler* propose une loi d'évolution de la conductivité thermique en cas de manque d'informations telle que :

$$\lambda = \lambda_s \left(1 + \frac{b}{100} w \right) \quad \text{V. 26}$$

Avec b [%] le pourcentage d'augmentation de la conductivité thermique induit par l'humidité.

Il est également demandé de renseigner la variation de la conductivité thermique en fonction de la température, en particulier la conductivité thermique à la plus basse température utilisée en conditions aux limites. *WUFI* procèdera par interpolation pour des valeurs supplémentaires.

- La chaleur spécifique massique d'un matériau sec C_{ps} [J/kg.K]. La chaleur massique pourrait être estimée à 850 J/kg.K pour les matériaux minéraux et 1500 J/kg.K pour les matériaux organiques [95].

V.1.3. Conditions aux limites

Lorsque nous désirons appliquer les équations du modèle de *Künzle* pour suivre les évolutions de l'humidité et de la température, il est essentiel d'appliquer les conditions aux limites convenables et donc qui traduisent au mieux ce qui se passe dans les ambiances de part et d'autre de la paroi testée. Nous allons dans ce qui suit nous attarder sur les conditions aux limites qu'il est possibles d'imposer dans *WUFI*.

V.1.3.1. Coefficients de transfert

A la surface des parois, la chaleur est échangée avec l'environnement à la fois par convection et par rayonnement. La densité du flux de chaleur dans l'ambiance adjacente à la paroi dépend des fluctuations de la température dans l'air ambiant T_a et de la température à la surface de la paroi T_s par l'intermédiaire d'un coefficient de transfert thermique α :

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r; \quad \alpha = \alpha_c + \alpha_r \quad V. 27$$

Ce dernier est la somme du coefficient de transfert par convection α_c [W/m².K] et du coefficient de transfert par rayonnement (grandes longueurs d'onde GLO) α_r [W/m².K].

Pour une convection naturelle, les coefficients d'échange par convection intérieur et extérieur, notés h_i et h_e dans le rapport, sont des valeurs moyennes soit attribuées suivant la norme *NF EN ISO 6946*, soit mesurés dans la cellule bi climatique (§IV.3.2.1). Cependant pour une convection forcée, le coefficient d'échange convectif intérieur est maintenu constant alors que le coefficient d'échange convectif extérieur dépend de la vitesse du vent et de sa direction et défini comme suit :

- Face au vent

$$\alpha_c = 1,6 v_v + 4,5 \quad V. 28$$

- Face sous le vent

$$\alpha_c = 0,33 v_v + 4,5$$

Avec v_v [m/s] la vitesse du vent, 4,5 W/m².K correspond au coefficient de transfert de chaleur par convection pour $v_v = 0$ m/s.

A l'instar de la densité de flux thermique, la densité de flux de vapeur d'eau est une fonction du gradient de pression de vapeur pariétal entre l'air ambiant P_{v_a} et la surface de la paroi P_{v_s} suivant un coefficient d'échange massique β :

$$\dot{m} = \beta (P_{v_a} - P_{v_s}) \quad \text{V. 29}$$

β [kg/m².s.Pa] dépend du coefficient de transfert thermique (voir programme Fortran dans l'Aide de *WUFI*). A titre d'exemple pour $h_i = 8$ W/m² K, $\beta_i = 2,2 \cdot 10^{-8}$ kg/m².s.Pa.

V.1.3.2. Données météorologiques

WUFI propose une base de données des fichiers météorologiques des villes du globe et la possibilité d'en charger d'autres à condition de respecter les formats compatibles. Ces fichiers contiennent la mesure de la pluviométrie [mm/h], la composante verticale du rayonnement solaire [W/m²], la température [°C], l'humidité relative [%], la vitesse du vent [m/s] et son orientation.

A partir de ces données, il y a essentiellement deux paramètres supplémentaires à souligner : la quantité de pluie battante (charge de pluie) et l'absorptivité solaire.

$$\text{Pluie battante} = \text{précipitations} \times (R_1 + R_2 \times v) \quad \text{V. 30}$$

Avec R_1 et R_2 deux coefficients tel que $R_1 = 0$ pour un mur vertical et $R_2 = 0,07$ s/m au centre de la façade et v [m/s] est la vitesse du vent

L'absorptivité solaire est la fraction absorbée du rayonnement solaire incident à la surface, elle dépend de l'orientation de la paroi et de son inclinaison. Le flux résultant est exprimé comme suit :

$$\dot{Q} = a_s I \quad \text{V. 31}$$

Avec a_s [-] absorptivité du matériau (courtes longueurs d'ondes CLO) et I [W/m²] la densité du flux solaire vertical à la surface de la paroi.

En général, Les échanges par rayonnement comprennent (voir Figure V. 2) :

- Rayonnement solaire incident (courtes longueurs d'ondes)
- Rayonnement grandes longueurs d'ondes incident (rayonnement infrarouge provenant de l'environnement, du sol, de l'atmosphère)
- Émission grandes longueurs d'ondes

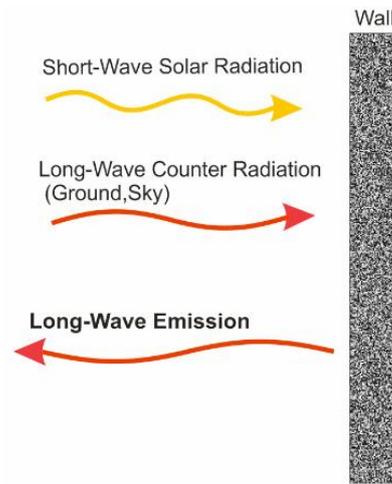


Figure V. 2 : Bilan radiatif explicite à la surface extérieure de la paroi [95]

V.2. Etude de sensibilité

En général, l'analyse de sensibilité (AS) permet d'analyser un modèle mathématique en étudiant l'impact de la variabilité des facteurs d'entrée du modèle sur les variables de sortie. Par conséquent, en déterminant des entrées responsables de cette variabilité à l'aide d'indices de sensibilité, l'AS permet de prendre les mesures nécessaires pour diminuer la variance de la sortie [96]. Certains paramètres peuvent exiger des efforts pour atteindre des valeurs fiables et précises. Néanmoins, il peut être inutile de chercher une grande précision d'un paramètre si le modèle de *Künzel* lui est faiblement sensible.

L'AS étudiée ci-après est basée sur la méthode d'analyse locale, qui évalue quantitativement l'impact de la variation autour d'une valeur donnée des entrées. En effet, l'analyse de sensibilité locale s'intéresse plus à la valeur de la variable réponse, l'analyse de sensibilité globale s'intéresse quant à elle à sa variabilité [97]. Nous nous intéressons à faire varier individuellement chaque paramètre matériau (ils sont détaillés dans le § V.1.2) au voisinage de sa valeur mesurée de $\pm 5\%$. Cette incertitude est une valeur moyenne sur les valeurs mesurées par moyens expérimentaux (Tableau V. 1). Les coefficients d'échange convectif ont été variés de $\pm 10\%$ puisque ces derniers oscillent plus au cours du temps. Ce choix est également utilisé par *Spitz et al.* et *Stefanoiu et al.* [98,99].

Tableau V. 1 : Variations des paramètres pour l'analyse de sensibilité

	n	$Q_s C_{ps}$	λ_s	$w=f(\varphi)$	$\mu(\varphi)$	h_i	h_e
$\Delta=0\%$	n_{moy}	$(Q_s C_{ps})$	λ_{smoy}	$w_{moy}=f(\varphi)$	$\mu_{moy}(\varphi)$	h_i	h_e
Δ^+	$1,05 n_{moy}$	$1,05 (Q_s C_{ps})$	$1,05 \lambda_{smoy}$	$1,05 w_{moy}=f(\varphi)$	$1,05 \mu_{moy}(\varphi)$	$1,1 h_i$	$1,1 h_e$
Δ^-	$0,95 n_{moy}$	$0,95 (Q_s C_{ps})$	$0,95 \lambda_{smoy}$	$0,95 w_{moy}=f(\varphi)$	$0,95 \mu_{moy}(\varphi)$	$0,9 h_i$	$0,9 h_e$

V.2.1. Parois testées

Les deux parois testées sont en tuffeau et en béton de chanvre. Leur configuration est présentée dans la Figure V. 3. Ces deux parois sont sollicitées en régime statique en température et en humidité relative et sans prise en compte de la remontée capillaire. Les conditions intérieures sont de 20°C et 50% et de 5°C et 90% à l'extérieur. Les coefficients d'échange convectif sont invariables et attribués suivant la norme *NF EN ISO 6946*.

La durée totale de simulation est de 3000 h avec un pas de 1h. Les observations des champs de température, d'humidité relative et de teneur en eau se font tous les 10 mm à l'intérieur de la paroi.

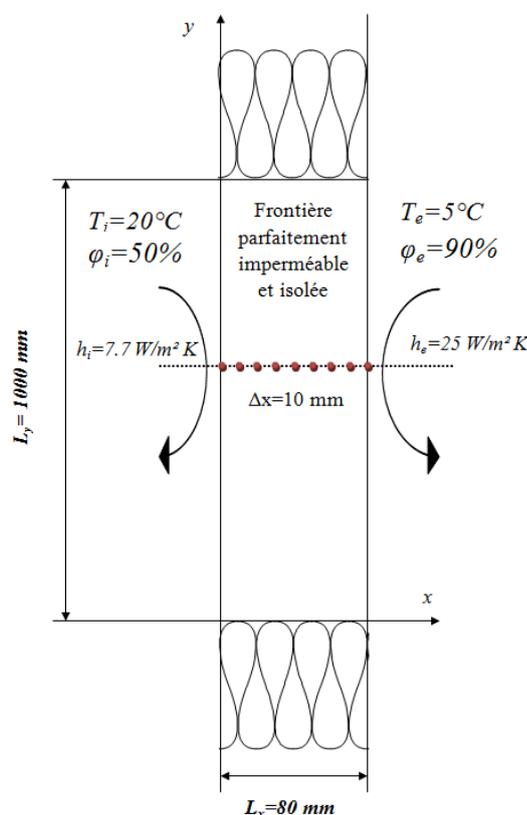


Figure V. 3 : Schéma de la paroi testée pour l'analyse de sensibilité

V.2.2. Outils d'analyse statistique

L'analyse de sensibilité est ici basée sur la comparaison des résultats d'une simulation donnée et des résultats d'une simulation de référence. Pour chaque simulation, on calcule donc l'écart relatif des variations des champs de sortie par rapport aux valeurs de référence ($\Delta=0\%$). L'écart est retenu comme indice de sensibilité. Cet indice est calculé comme suit:

$$\delta_y [\%] = 100 \frac{y_{sim} - y_{ref}}{y_{ref}}$$

V. 32

Avec δ_y [%] l'écart relatif, y_{sim} la valeur obtenue pour Δ ($= \pm 5\%$ ou $\pm 10\%$) et y_{ref} est la valeur de référence ($\Delta = 0\%$).

Les écarts calculés à chaque instant de la simulation et en chaque point permettent d'établir des indicateurs statistiques permettant d'apprécier la répartition de ces écarts autour de leur valeur moyenne. Cette répartition est représentée à l'aide du *diagramme de Tuckey*. Il s'agit d'une méthode de la statistique descriptive qui est appliquée ici afin de quantifier l'impact de la variabilité des facteurs d'entrée sur chaque variable de sortie. Chaque diagramme contient (voir Figure V. 4) :

- L'étendue des écarts relatifs qui est délimitée par la valeur minimale m et la valeur maximale M
- Les 3 quartiles Q_1 , Q_2 (ou médiane) et Q_3 qui représentent respectivement les valeurs de l'écart relatif auxquelles 25%, 50 % et 75 % des valeurs obtenues sont inférieures
- La valeur moyenne obtenue moy

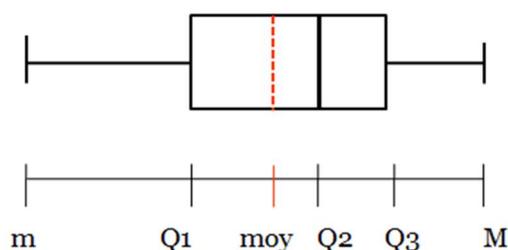


Figure V. 4 : Représentation du diagramme de Tuckey

V.2.3. Cas d'une paroi simple en tuffeau

Le tuffeau est initialement à 20°C et 50% d'humidité relative, ce qui correspond à une teneur en eau initiale de 18,6 kg/m³.

Les propriétés du tuffeau utilisées pour l'analyse de sensibilité sont essentiellement déduites à partir de la thèse de Beck [7] (masse volumique, porosité, isotherme d'adsorption), de la RT 2012 (résistance à la diffusion de la vapeur d'eau et chaleur spécifique) et des résultats préliminaires réalisés en laboratoire (conductivité thermique). Ces propriétés sont regroupées dans le Tableau V. 2. Nous avons donc réalisé 19 simulations en faisant varier 9 paramètres (7 paramètres matériaux et 2 paramètres des conditions aux limites).

Les premiers résultats nous permettent de distinguer deux phases :

- La phase **transitoire** où 99% des variations sur les champs de température et d'humidité relative se produisent.
- La phase **permanente** quand le régime stationnaire est établi et que les champs de température et d'humidité relative n'évoluent plus dans le temps.

Tableau V. 2 : Les propriétés de la pierre de tuffeau utilisée pour l'analyse de sensibilité

Masse volumique sèche	ρ [kg/m ³]	1310
Porosité	n [m ³ /m ³]	0,487
Chaleur spécifique	C_p [J/kg.K]	1000
Conductivité thermique	λ [W/m ² .K]	0,41
Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau	μ [-]	30

Paramètres du modèle de GAB pour l'isotherme d'adsorption :

$$m = m_m \frac{C k^k}{k^k - 1 - C} \frac{1}{1 - k} \frac{1}{1 - C} \frac{1}{1 - C}$$

$$m_m = 0,082 \text{ kg/kg}$$

$$k = 0,9329$$

$$C = 14,1289$$

Nous définissons également les instants à partir desquels ces variations ont eu lieu. Il s'agit des temps du début de front (lorsque 1% des variations par rapport à l'état initial sont produites) et de fin de front (lorsqu'il reste 1% des variations par rapport au régime permanent) qui sont présentés en lignes en pointillés dans la Figure V. 5.

Il est nécessaire de définir l'étendue de la phase transitoire lors du calcul des indicateurs statistiques afin d'éviter de fausser cette analyse. En effet, si l'on ne réalise pas ce repérage, il est possible de prendre en compte, dans les calculs statistiques, des valeurs qui n'évoluent plus dans le temps. Un calcul prenant en compte une phase stabilisée trop longue donnerait ainsi plus de poids à la phase établie et masquerait les écarts observés lors de la phase transitoire.

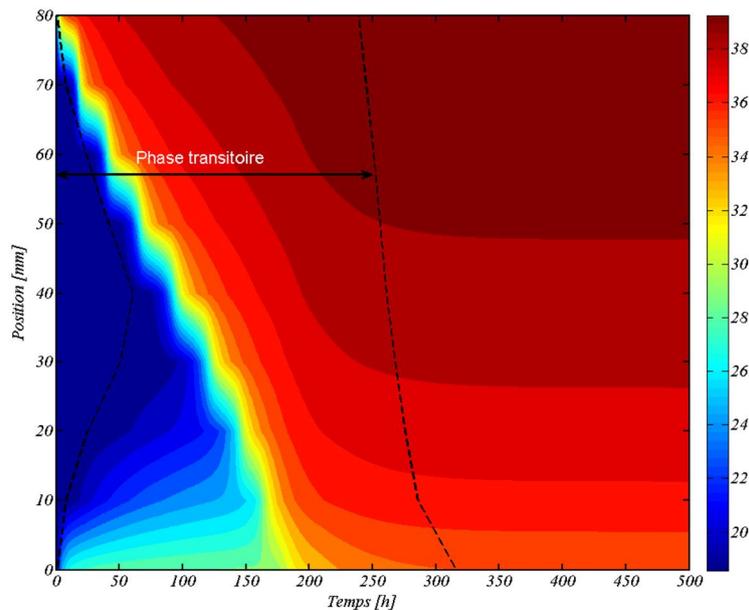


Figure V. 5 : Présentation de l'évolution du champ de teneur en eau pour une paroi de tuffeau de 80mm

V.2.3.1. Profils des champs de sortie

Nous retenons pour l'analyse de sensibilité l'évolution des champs d'humidité relative, de température et de teneur en eau pour le coefficient d'échange convectif intérieur h_i et pour l'isotherme d'adsorption (Figure V. 5).

Au premier abord, les variations de $\pm 5\%$ ou $\pm 10\%$ pourraient engendrer des variations temporelles des champs de sortie mais l'allure des courbes demeure la même par rapport à la référence.

Pour l'isotherme d'adsorption, qui est un paramètre matériau, les différences apparaissent dès le début parce que la condition initiale est définie en termes d'humidité relative initiale. Une variation globale de l'isotherme d'adsorption implique logiquement des différences des teneurs en eau initiales. Pour une humidité relative donnée, l'isotherme d'adsorption présentant des valeurs de teneurs en eau plus élevées (cas où $\Delta = +5\%$) donne les courbes supérieures.

Pour le coefficient d'échange convectif intérieur, qui est un paramètre des conditions aux limites, l'état initial est le même. Toutefois, la différence entre les courbes augmente avec le temps. En effet, les courbes relatives à une position donnée commencent à la même température, car le paramètre varié se réfère à l'état de la limite intérieure. En outre, une valeur plus faible de h_i donne un profil de température plus basse, ce qui est conforme aux conclusions théoriques liées à l'influence de h_i (avec conservation de flux) Nous remarquons que l'influence de h_i diminue au fur et à mesure que la distance de la surface intérieure augmente. Pour la température l'effet de h_i est donc dominant à la surface de la paroi puisque la convection est le seul phénomène de transfert de chaleur.

Pour l'humidité relative et la teneur en eau, le coefficient d'échange massique β est proportionnel au coefficient d'échange convectif (voir V. 29) d'où les mêmes observations pour les profils des humidités (décroissance de l'influence allant de l'intérieur vers l'extérieur).

Les paramètres décrivant les conditions aux limites, ici h_i et h_e , ainsi que l'isotherme d'adsorption sont des paramètres qui influencent la réponse en température et en teneur en eau respectivement. Les mêmes conclusions sont déduites dans les travaux de *Spitz et al* et *Hamad et al.*[100,101].

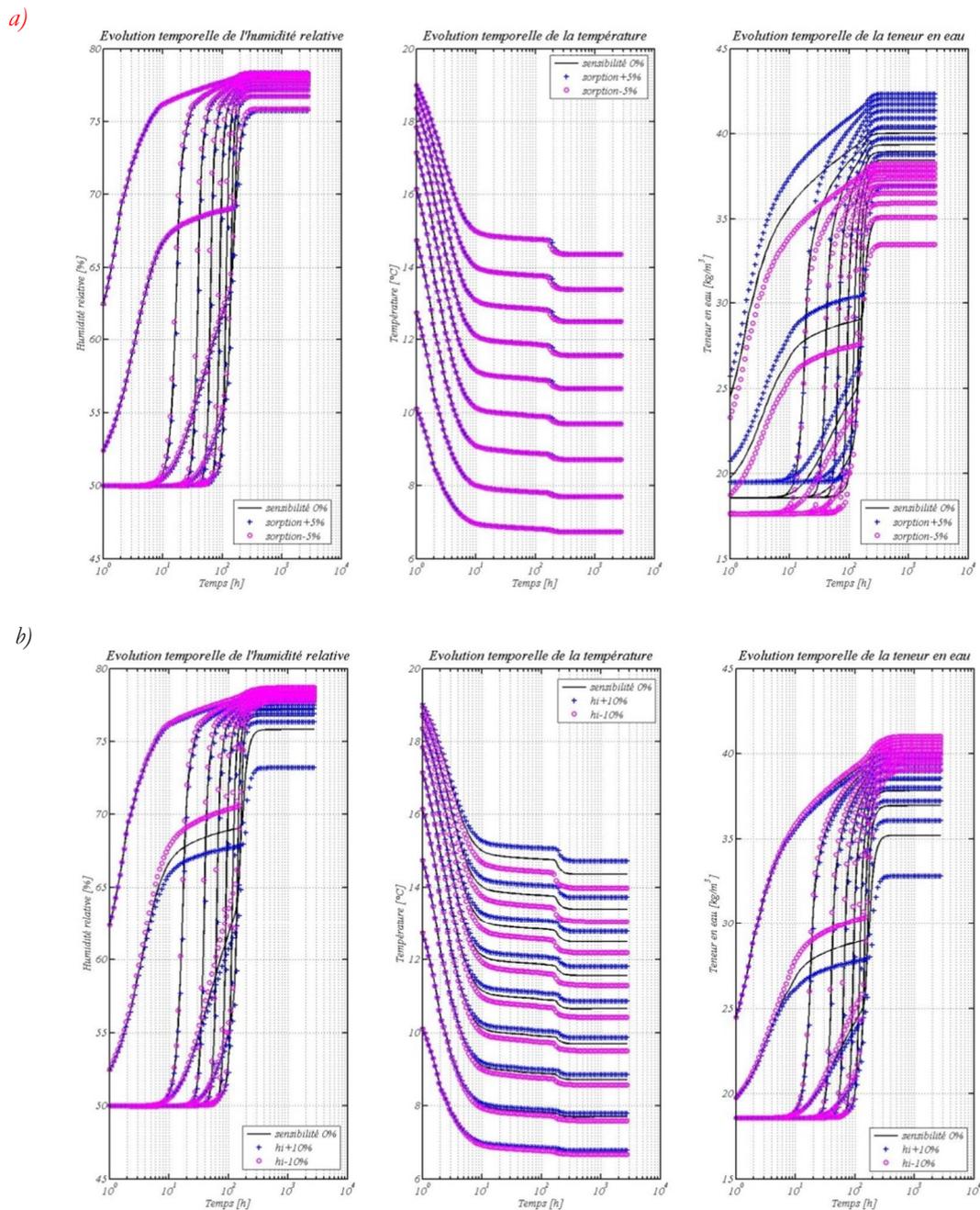


Figure V. 6 : Evolutions temporelles des profils de φ , T et w pour a) l'isotherme de sorption et b) coefficient d'échange convectif intérieur

V.2.3.2. Présentation de l'indice de sensibilité

Les résultats décrits dans le paragraphe précédent sont qualitatifs. Dans ce qui suit, ces résultats sont représentés sous la forme des diagrammes de Tuckey par le biais des écarts relatifs.

Cette technique permettra de quantifier l'influence des paramètres sur les champs de sortie du modèle qui sont la température et la teneur en eau.

Dans un premier temps, nous nous intéressons à la sensibilité du profil de température pour des incertitudes de la valeur de h_i pendant la phase transitoire. Nous soulignons d'une façon quantitative, l'évolution de l'incertitude dans la paroi

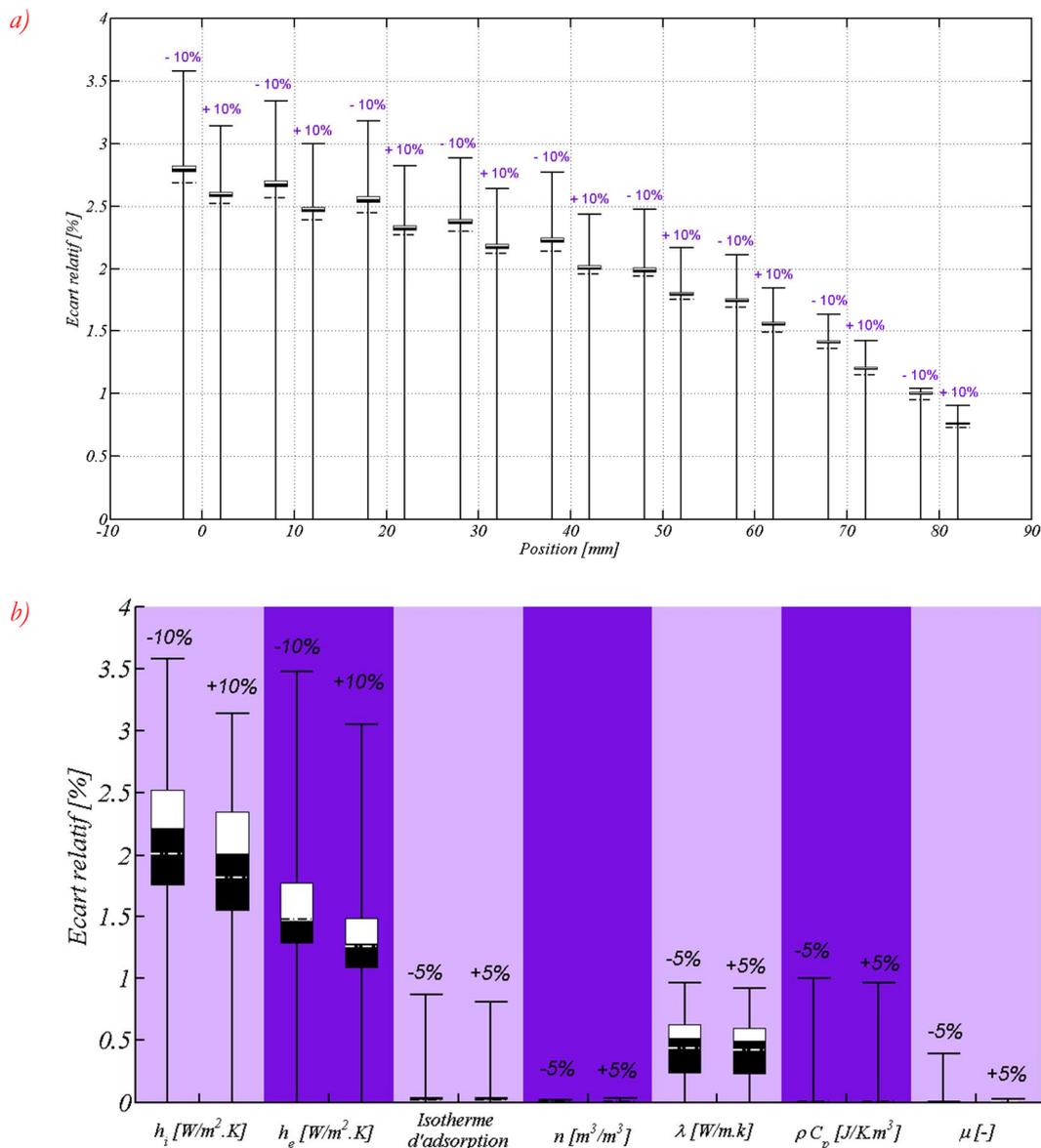


Figure V. 7 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le profil de température pendant la phase transitoire a) effet de h_i et b) effet de tous les paramètres de simulation

En effet, comme il a été évoqué ci-dessus, l'influence de h_i diminue dans la paroi en allant de la surface intérieure à la surface extérieure. L'incertitude sur la connaissance de h_i avec $\pm 10\%$ engendre globalement une variation de la valeur de la température ne dépassant pas 4% avec une faible dispersion puisque les 3 quartiles sont rapprochés.

Pour les résultats du profil de température pour les simulations, illustré dans la Figure V. 7.b, nous notons que les paramètres les plus influents sont les coefficients d'échange convectif même si leurs influences sont relativement faibles puisque la valeur maximale du digramme de Tuckey ne dépasse pas 4%.

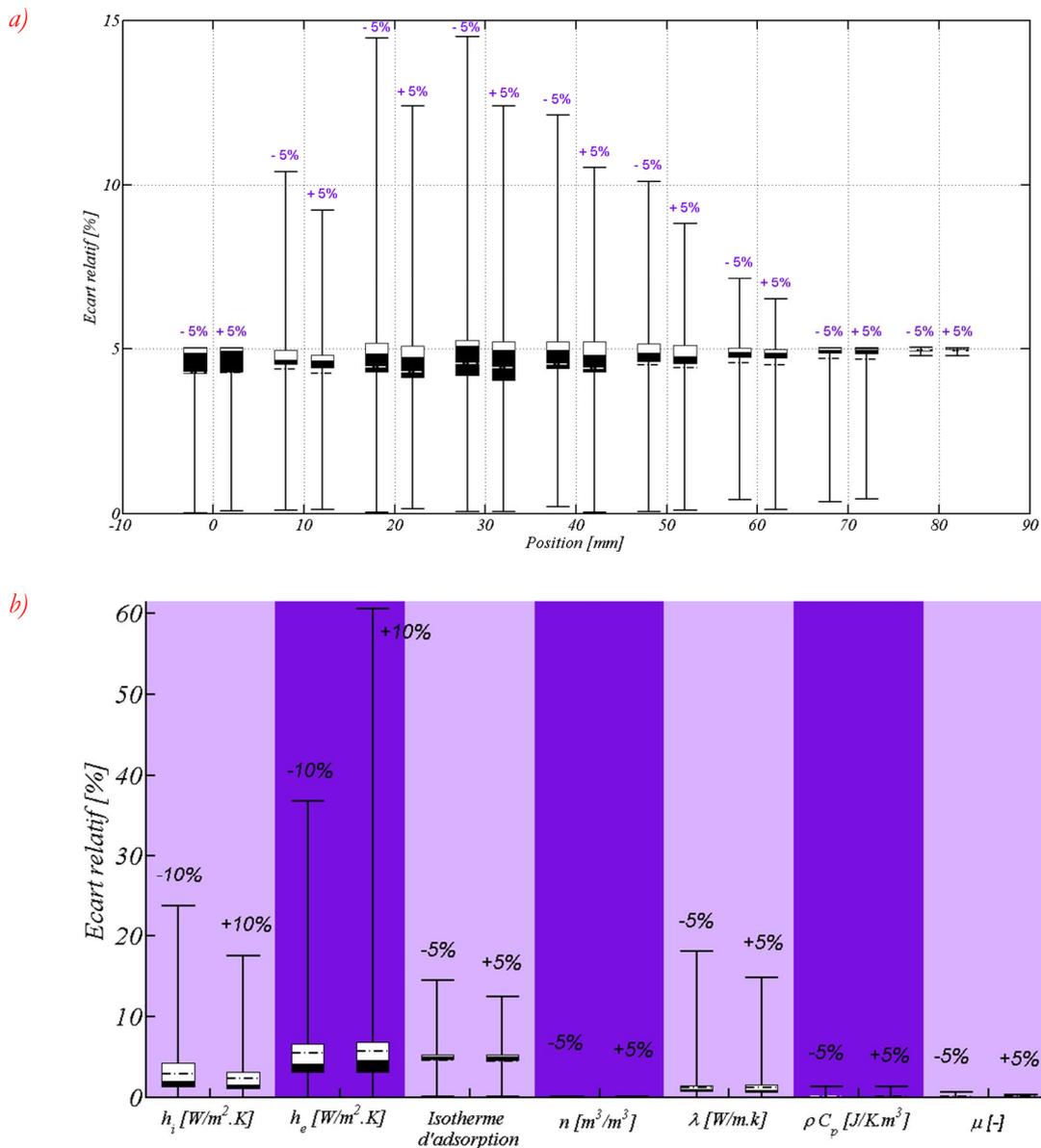


Figure V. 8 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le profil de teneur en eau pendant la phase transitoire a) effet de l'isotherme d'adsorption et b) effet de tous les paramètres de simulation

Nous remarquons que la température est sensible aux différents paramètres hydriques (isotherme d'adsorption) et propriétés thermiques (conductivité thermique et capacité thermique). Cette sensibilité est très faible et ne dépasse pas 1%.

Dans un second temps, nous nous intéressons à l'influence de l'isotherme d'adsorption sur la teneur en eau. L'effet de l'isotherme d'adsorption comme souligné dans le § V.2.3.1 est global. Une incertitude de $\pm 5\%$ engendre une variation moyenne de la valeur de la teneur en eau de $\pm 5\%$ dans toute la paroi. Les variations maximales atteignent 15%, ce qui correspond aux résultats finaux observés dans la Figure V. 9.a.

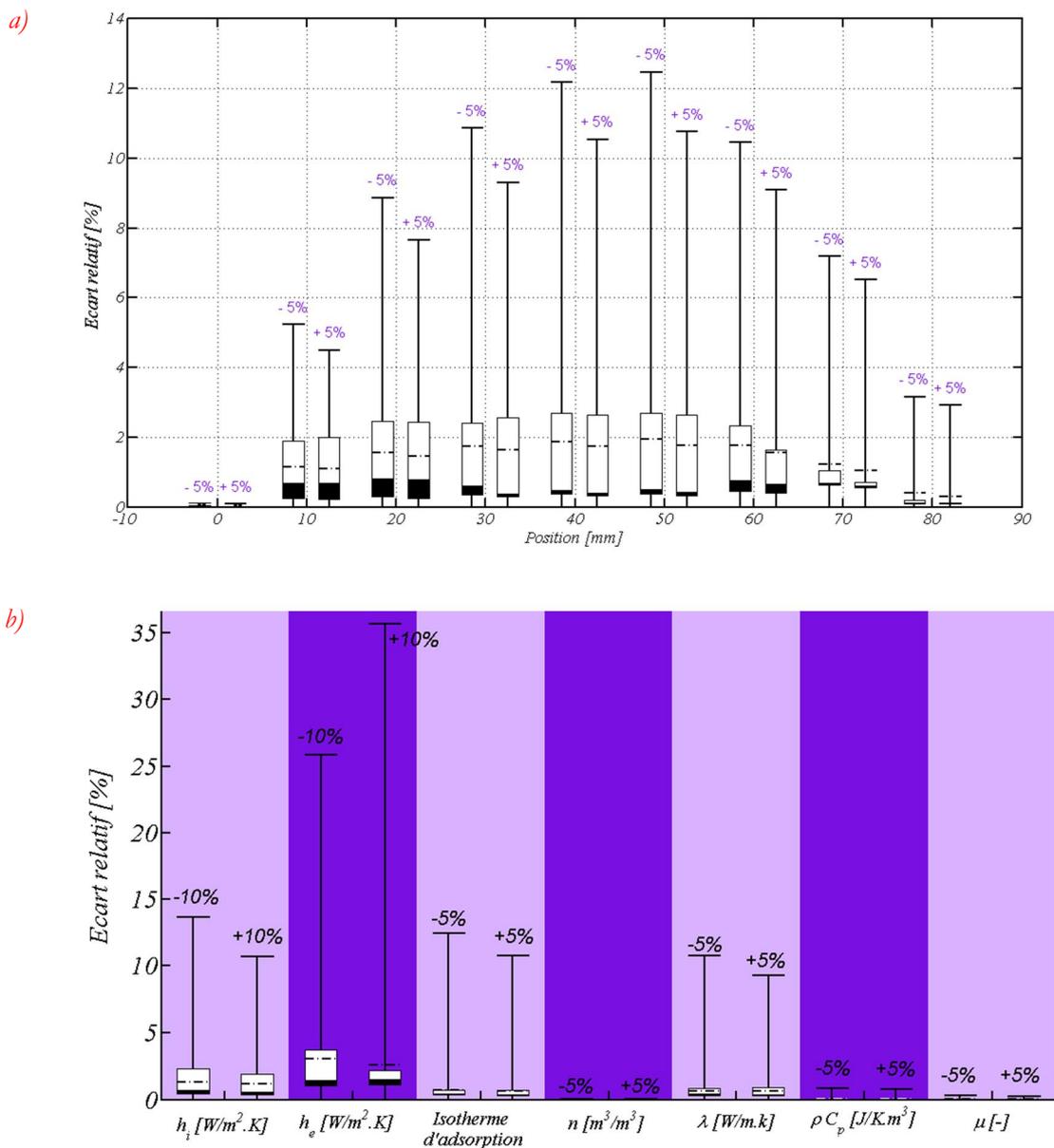


Figure V. 9 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le profil d'humidité relative pendant la phase transitoire a) effet de l'isotherme d'adsorption et b) effet de tous les paramètres de simulation

D'une façon générale, la teneur en eau est plus sensible aux incertitudes de mesure. Les valeurs du quartile Q_2 (autrement 50% des valeurs) ne dépassent pas l'incertitude initialement introduite, l'étendue est souvent multipliée par 2.

Dans un dernier temps, les variations de l'humidité relative sont initialement nulles avec une dispersion très serrées comme les conditions aux limites (positions 0 et 80 mm) sont définies en terme des coefficients d'échange. L'étendue pour 80 mm est plus large par rapport à la position 0 mm puisque le coefficient massique extérieur est plus grand que celui à l'intérieur. Suivant l'équation V. 6 appliquée en une position donnée, nous remarquons que les variations de la teneur en eau sont beaucoup plus liées à la pente de la courbe de l'isotherme d'adsorption.

L'humidité relative influence particulièrement les paramètres liés aux conditions aux limites.

V.2.3.3. Paramètres influents

A partir des diagrammes de Tuckey, nous proposons un classement des paramètres relatif au champ d'observation : température ou teneur en eau. Un classement basé sur les valeurs des quartiles Q_2 ou Q_3 (définis respectivement comme étant 50% ou 75% des valeurs qui y sont inférieures) permettra de distinguer entre les paramètres :

- *Amplificateurs* : si la valeur de l'écart relatif est supérieur à l'incertitude initialement introduite
- *Neutres* : si la valeur de l'écart relatif est égale à l'incertitude
- *Atténuateurs* : si la valeur de l'écart relatif est inférieure à l'incertitude.

Tableau V. 3 : Influence des paramètres sur le champ de température

Amplificateurs	-
Neutres	-
Atténuateurs	$h_i, h_e, \lambda, \rho C_p, w=f(\varphi)$ et μ

A noter que la porosité n'a pas d'effet sur le champ de température.

Tableau V. 4 : Influence des paramètres sur le champ de teneur en eau

Amplificateurs	-
Neutres	$w=f(\varphi)$
Atténuateurs	h_i, h_e, λ

Bien que les paramètres soient atténuateurs, les valeurs maximales pour les coefficients d'échange et la conductivité dépassent l'incertitude appliquée, elles sont souvent multipliées par un coefficient de 3 à 4. Les paramètres $\rho C_p, n$ et μ n'influencent pas le champ de teneur en eau (variations totales quasi nulles).

V.2.4. Cas d'une paroi simple en béton de chanvre

Les propriétés de la paroi en béton de chanvre sont extraites de la base de données de *WUFI*. Il s'agit des propriétés d'une application étudiée dans le cadre de la thèse d'Evrard [4]. Comme pour le tuffeau, les propriétés de béton de chanvre sont récapitulées dans le Tableau V. 5.

Nous avons également étudié les variations pendant la phase transitoire où 99 % des variations totales ont eu lieu. Cette phase est décrite dans la Figure V. 10.

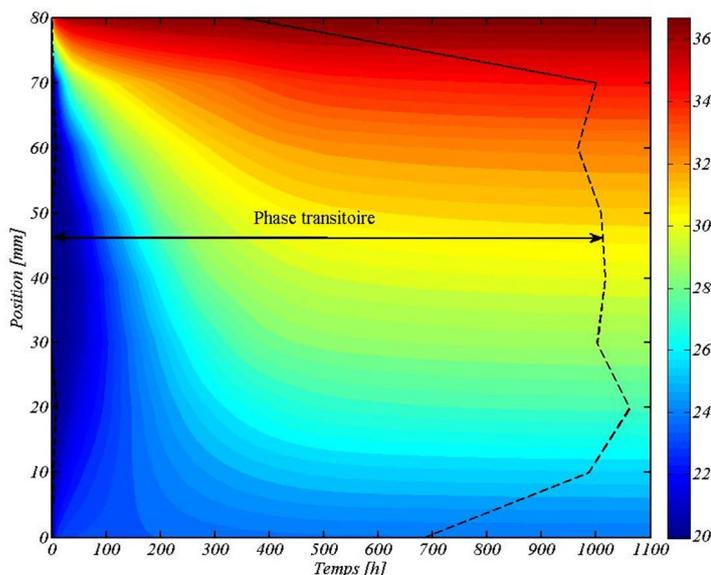


Figure V. 10 : Présentation de l'évolution du champ de teneur en eau pour une paroi de tuffeau de 80mm

Tableau V. 5 : Les propriétés du béton de chanvre utilisées pour l'analyse de sensibilité [4]

Masse volumique sèche	ρ [kg/m ³]	440
Porosité	n [m ³ /m ³]	0,73
Chaleur spécifique	C_p [J/kg.K]	1560
Conductivité thermique	λ [W/m ² .K]	0,115
Coefficient de résistance à la vapeur d'eau	μ [-]	4,85
Paramètres du modèle de <i>GAB</i> pour l'isotherme d'adsorption :		
	$w_m = 0,0017$ kg/kg	$k = 0,9985$
		$C = 62,1225$

V.2.4.1. Profils des champs de sortie

Comme pour le tuffeau, les évolutions temporelles pour l'isotherme d'adsorption et le coefficient d'échange convectif intérieur sont données dans la Figure V. 11.

Les données sont présentées pour les positions 0, 20, 40, 60 et 80 mm et les 3 courbes de référence et des incertitudes ($\Delta = 0\%$, $\Delta = 5\%$, $\Delta = 5\%$) sont liées.

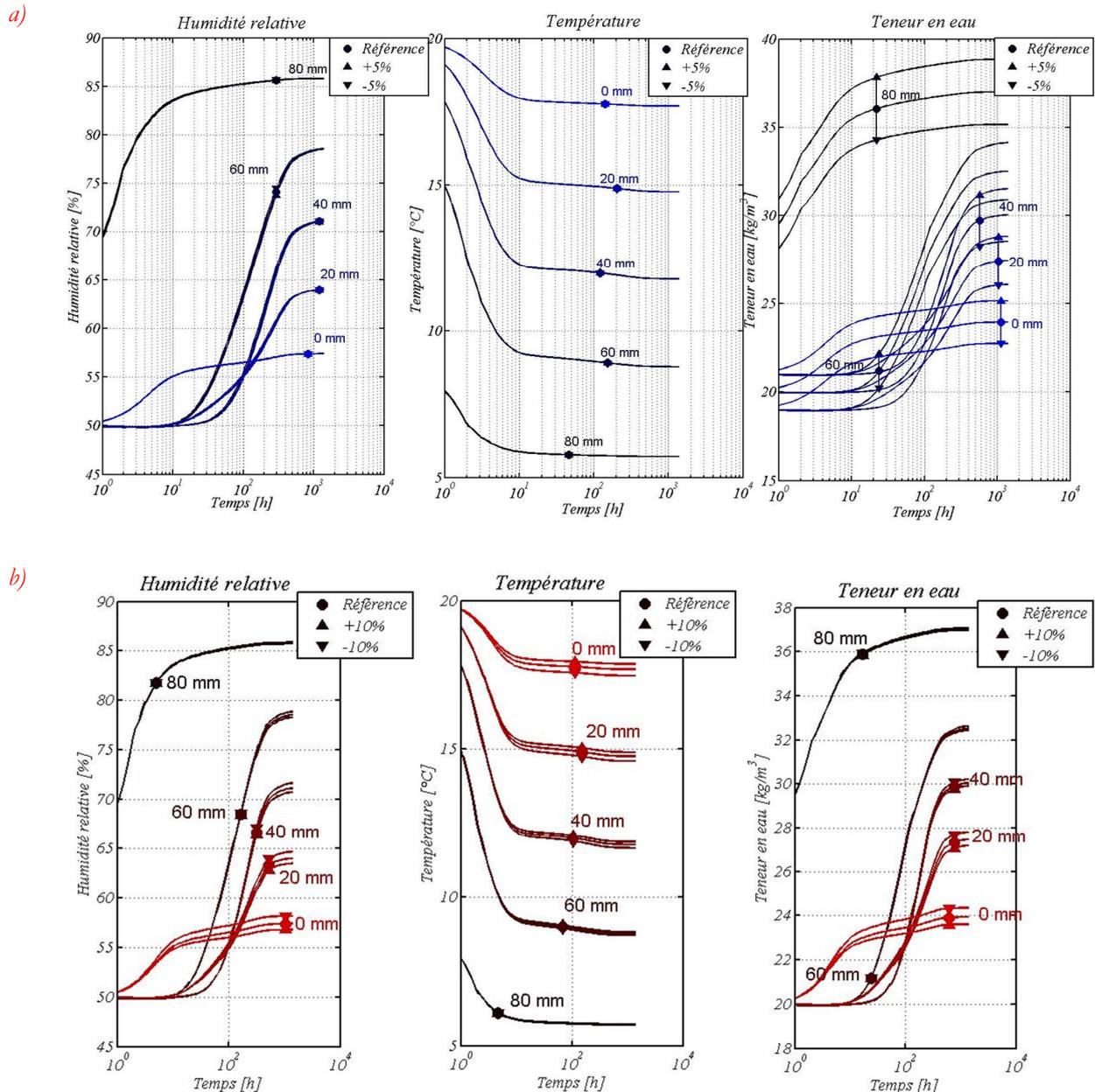


Figure V. 11 : Evolutions temporelles des humidités et de la température pour une paroi simple en béton de chanvre a) isotherme d'adsorption et b) coefficient h_i

Nous retenons les mêmes conclusions observées dans le cas d'une paroi simple en tuffeau de 80 mm. L'isotherme d'adsorption entraîne des variations en teneur en eau dès l'instant t_0 alors que les profils d'humidité relative restent les mêmes.

Les conditions aux limites sont en effet définies en température et en humidité relative et en faisant varier la courbe d'adsorption, il y a que la quantité de la teneur en eau qui change pour une humidité relative donnée. Néanmoins, la variation de h_i de $\pm 5\%$ engendre des variations des différents champs de sorties : φ , T et w . Comme les coefficients d'échange massique sont proportionnelles aux coefficients d'échange convectif, toute modification de ce dernier influence le champ de pression de vapeur, de la température et donc de l'humidité relative et de la teneur en eau. Puisqu'il s'agit du coefficient d'échange convectif intérieur, l'effet de l'incertitude de $\pm 10\%$ est plus marquant à l'intérieur (0 mm) et il décroît dans la paroi en allant vers la position de la surface extérieure à 80 mm.

V.2.4.2. Présentation de l'indice de sensibilité

La représentation des courbes illustrées dans la Figure V. 11 sous forme de diagramme de Tuckey permet de quantifier les variations et de mettre l'accent sur la dispersion des valeurs avec incertitudes par rapport à la référence. Nous remarquons que, comme pour le tuffeau les étendus sont plus serrées aux surfaces que dans la paroi. L'état hygrothermique des surfaces est fortement influencé par les conditions aux limites et l'état initial du matériau. En plus, les conditions aux limites à l'intérieur sont égales à celle du béton de chanvre alors qu'elle est de 5°C et 90% à l'extérieur ce qui explique les variations plus serrées en position de 0mm. Ces observations sont valables pour les différents champs de sortie : T , φ et w .

La Figure V. 12 a illustre les variations spatiales de l'écart relatif engendré par l'isotherme d'adsorption sur le champ de teneur en eau. Nous observons que les variations pour le béton de chanvre sont comprises entre 4% et 5,1 % contrairement au tuffeau où les variations sont entre 0 et 15 %. Par ailleurs, les variations spatiales de l'écart relatif entraîné sur le champ d'humidité relative (Figure V. 13 a) montrent que ce dernier est faiblement sensible aux incertitudes de mesures de l'isotherme d'adsorption. Nous concluons donc en se basant sur l'équation V. 16 que $\frac{\partial w}{\partial h_i}$ conditionne les valeurs de la teneur en eau du béton de chanvre alors que pour le tuffeau les deux termes $\frac{\partial w}{\partial h_i}$ et $\frac{\partial w}{\partial T}$ interviennent.

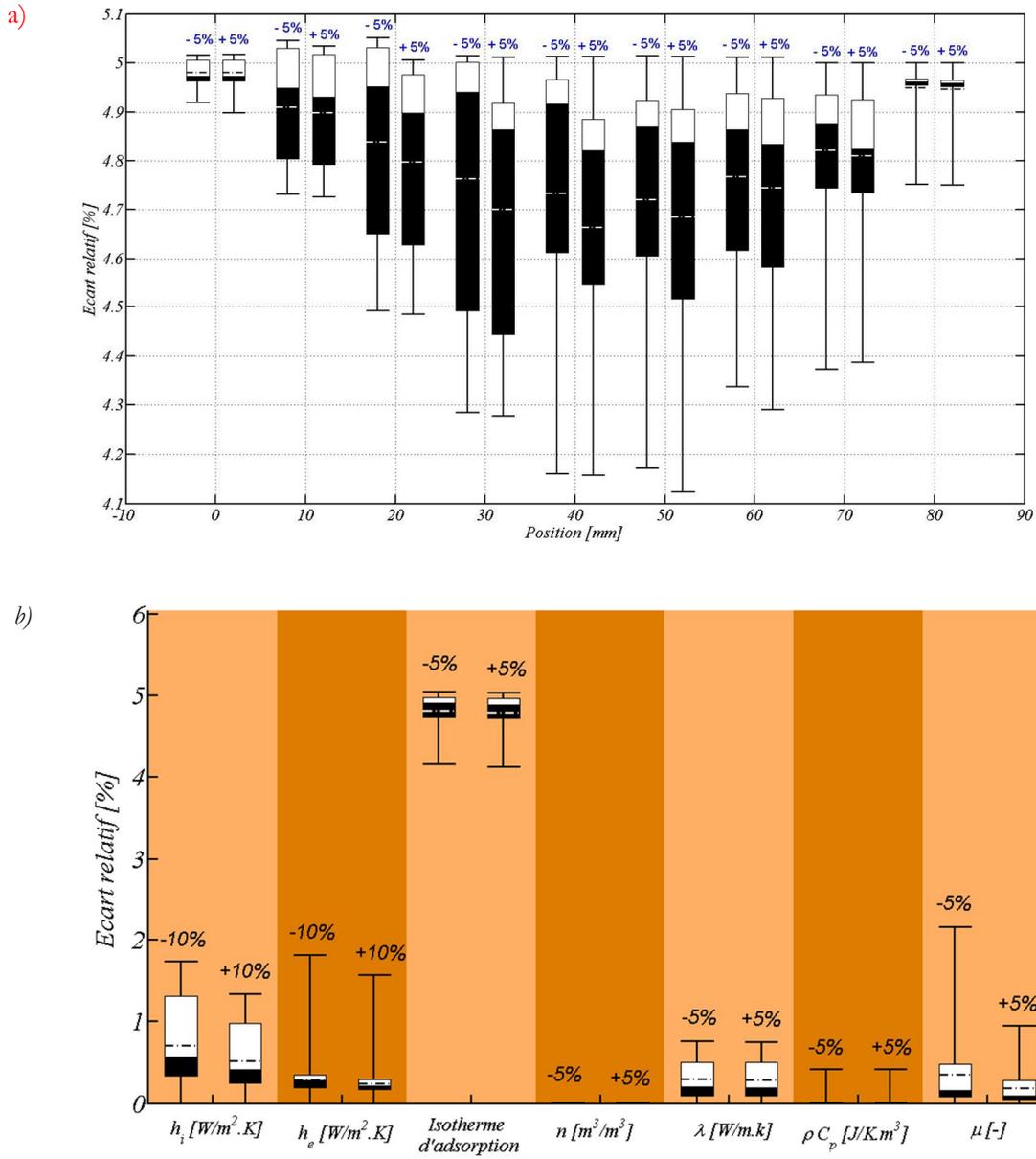


Figure V. 12 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le profil de teneur en eau pendant la phase transitoire a) effet de l'isotherme d'adsorption et b) effet de tous les paramètres de simulation

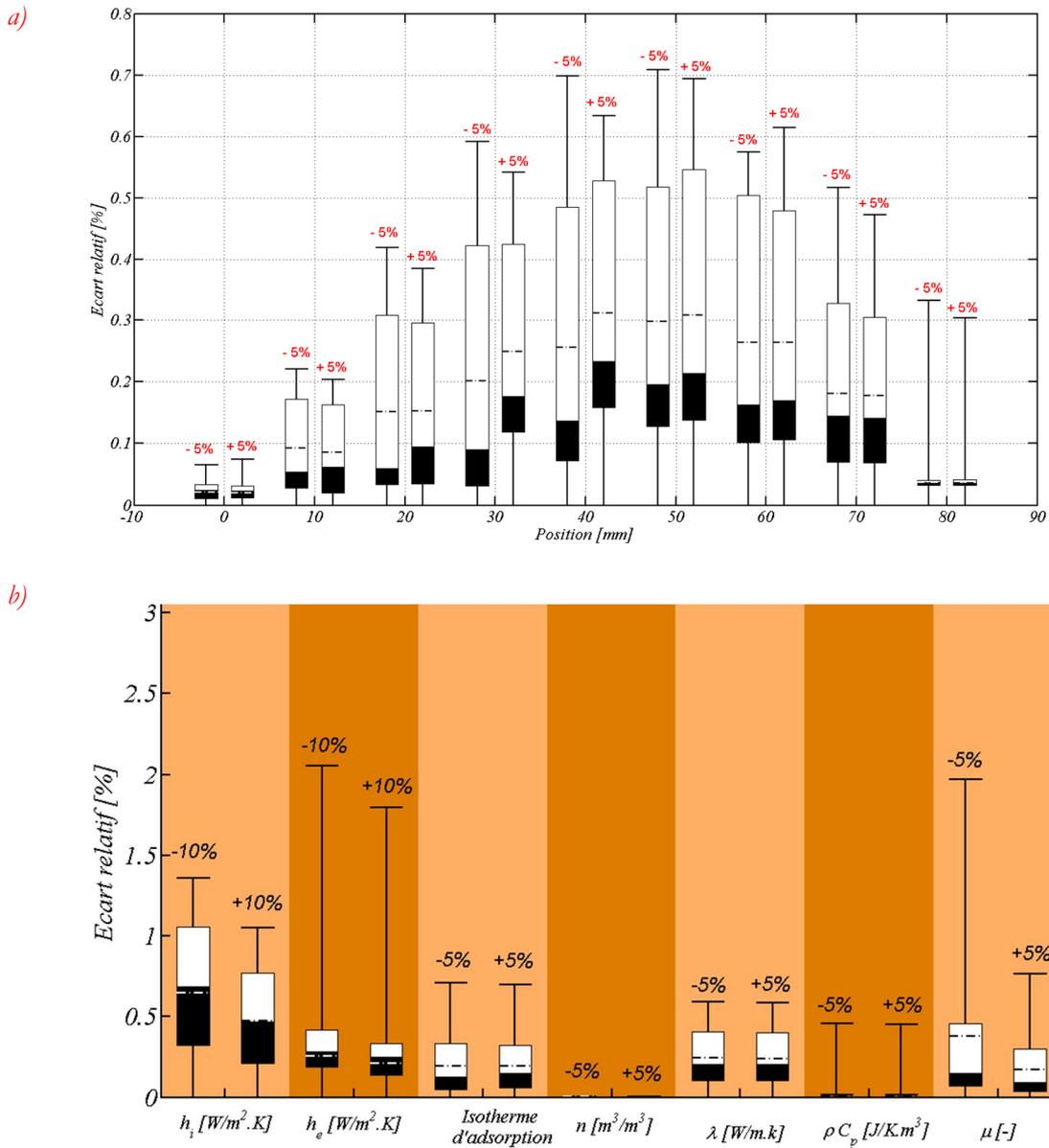


Figure V. 13 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le profil d'humidité relative pendant la phase transitoire a) effet de l'isotherme d'adsorption ; b) effet de tous les paramètres de simulation

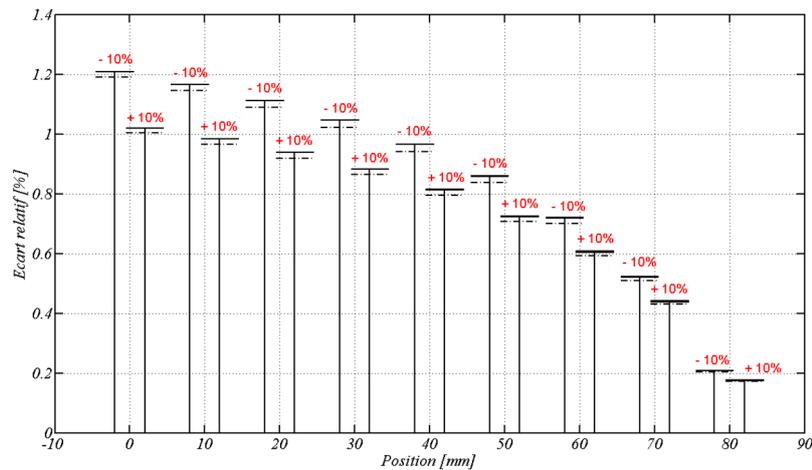
De manière globale, les mêmes conclusions sont retenues aussi bien pour le tuffeau que pour le béton de chanvre pour les champs de teneur en eau et d'humidité relative. Ces champs sont sensibles aux coefficients d'échange convectif, le coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur et particulièrement l'isotherme d'adsorption. La classification de l'influence des paramètres pour le champ de teneur en eau est donnée dans le Tableau V. 6.

Pour le champ de température, nous nous intéressons dans un premier temps à l'évolution spatiale de l'écart relatif induit par l'incertitude de $\pm 10\%$ sur le coefficient d'échange convectif intérieur.

Nous constatons que les évolutions décroissent dans la profondeur de la paroi, ce qui est justifié par l'influence de h_i sur la surface intérieure mais aussi dans toute la paroi jusqu'à la surface extérieure. Cette influence est concentrée en valeurs maximales (les quartiles sont égaux à la valeur maximale).

Globalement, les coefficients d'échange, la conductivité thermique et la résistance à la diffusion de vapeur d'eau introduisent des différences mais elles ne dépassent pas 2% alors que la valeur maximale peut parfois dépasser 5%. Elles sont inférieures à l'incertitude initialement introduite. Cette analyse de sensibilité montre que le champ de température reste moins sensible aux incertitudes de mesure des paramètres qu'ils soient paramètres matériaux ou paramètres liés aux conditions aux limites.

a)



b)

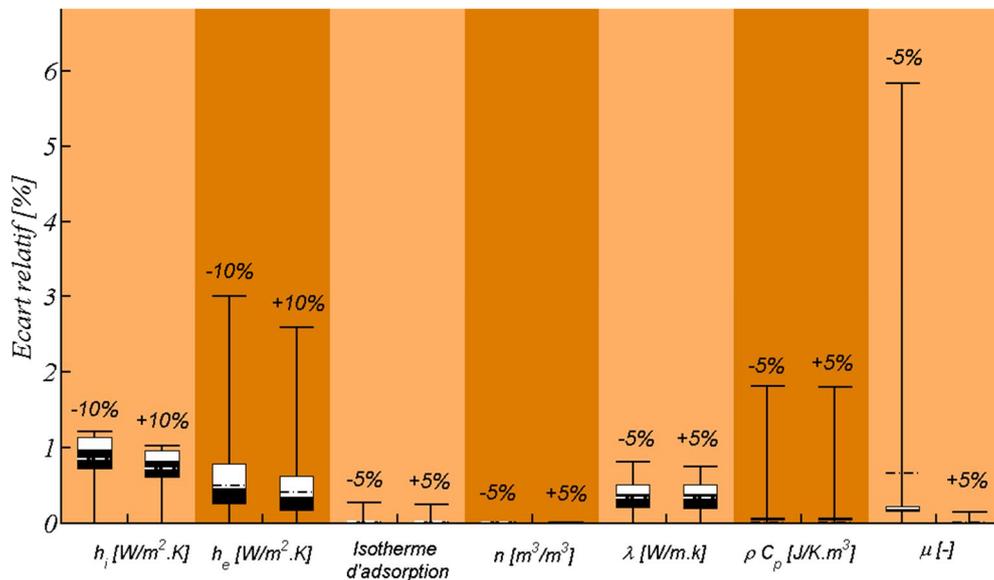


Figure V. 14 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le profil de température pendant la phase transitoire a) effet de h_i et b) effet de tous les paramètres de simulation

V.2.4.3. Paramètres influents

A l'issue de l'analyse de sensibilité appliquée à une paroi simple en béton de chanvre, les paramètres sont classés en paramètres amplificateurs, conservateurs ou atténuateurs par rapport au résultat du Q_3

Tableau V. 6 : Influence des paramètres sur le champ de température

Amplificateurs	-
Neutres	-
Atténuateurs	$h_i, h_e, \lambda, \rho C$ et μ

La porosité et l'isotherme d'adsorption $w=f(\varphi)$ n'ont pas d'influence sur le champ de température, elle est quasi nulle.

Tableau V. 7 : Influence des paramètres sur le champ de teneur en eau

Amplificateurs	-
Neutres	$w=f(\varphi)$
Atténuateurs	h_i, h_e, λ et μ

n et ρC influencent très peu le champ de teneur d'eau

V.2.5. Comparaison paroi simple en tuffeau et en béton de chanvre

L'analyse de sensibilité est appliquée sur deux parois simples de 8 cm, la première paroi est en tuffeau et la deuxième est en béton de chanvre. Nous avons appliqué une incertitude de $\pm 5\%$ sur les paramètres matériaux et de $\pm 10\%$ sur les coefficients d'échange convectif. La comparaison des résultats obtenus à l'issue des deux études souligne d'une part une réponse en champ de température similaire. Mais d'autre part une différence entre les champs d'humidité relative et donc de son champ dérivé qui est la teneur en eau. En effet, le champ d'humidité relative pour une paroi simple en tuffeau est plus sensible aux incertitudes des mesures, en particulier celles des coefficients d'échange et de l'isotherme d'adsorption.

Cette sensibilité a donc conditionné la réponse en teneur en eau. Nous avons noté que pour les variations maximales pour h_i et h_e sont de 2 % (Figure V. 12) pour une paroi simple en béton de chanvre alors qu'elles sont en moyennes de 40 % pour une paroi simple en tuffeau (Figure V. 8).

Les réponses en humidité relative et en teneur en eau due à l'effet d'incertitude en isotherme d'adsorption sont différentes pour les deux parois. Les variations des humidités relatives aux surfaces de la paroi en béton de chanvre sont proches de celles pour le tuffeau (Tableau V. 8).

Néanmoins pour une variation similaire, la variation en teneur en eau est plus faible pour le béton de chanvre pour une étude réalisée en régime statique.

A titre d'exemple, l'humidité relative à la surface extérieure du béton de chanvre varie entre 70% et 86 % et la teneur en eau varie par conséquent entre 30 et 37 kg/m³. Néanmoins, à la surface extérieure du tuffeau, l'humidité relative varie entre 62% et 78% ce qui induit une variation de teneur en eau entre 24,5 kg/m³ et 43 kg/m³.

Tableau V. 8. Variations des humidités relatives et des teneurs en eau aux surfaces des parois simples étudiées

	Surface intérieure		Surface extérieure	
	$\Delta\varphi$ [%]	Δw [kg/m ³]	$\Delta\varphi$ [%]	Δw [kg/m ³]
Tuffeau	23	15	16	16
Béton de chanvre	7	4	16	7

Ces variations coïncident donc avec les observations notées dans les boîtes des quartiles où nous rappelons qu'elles sont dispersées pour le tuffeau et serrées pour le béton de chanvre, et cela est dû à la pente de l'isotherme qui est plus faible pour le béton de chanvre et aux variations des humidités relatives aux surfaces (Figure V. 15).

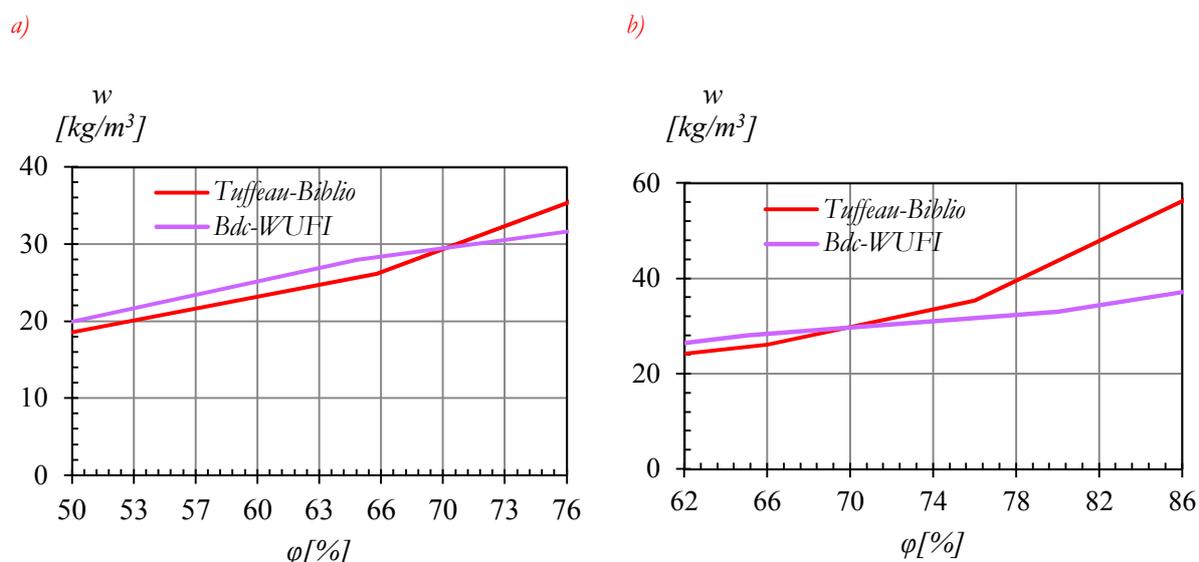


Figure V. 15 : Variations des pentes des isothermes d'adsorption aux surfaces des parois simples étudiées a) surfaces intérieures et b) surfaces extérieures

V.2.6. Cas d'une paroi multicouche

Dans ce paragraphe, nous étudions une configuration bicouche composée d'une paroi en tuffeau de 22 cm et d'une paroi en béton de chanvre de 15 cm. Le choix des épaisseurs est fait pour simuler une configuration réelle. Il est indispensable de comprendre le comportement d'un mur multicouche et particulièrement évaluer ses réponses en températures et en teneur en eau suite aux incertitudes de mesures des propriétés de chacun de ses constituants.

Nous réalisons donc une étude de sensibilité et nous nous intéressons à 2 paramètres matériaux qui sont l'isotherme d'adsorption et la conductivité thermique.

L'analyse de sensibilité appliquée à une paroi simple montre que l'isotherme d'adsorption est un paramètre influent et que la teneur en eau conserve l'incertitude introduite. La conductivité thermique malgré son effet atténuateur, est un paramètre qui pourrait influencer la réponse en température lorsqu'il s'agit d'une paroi multicouche. La vérification de ces hypothèses sera donnée dans le paragraphe V.2.6.2.

V.2.6.1. Profils des champs de réponse

La paroi en tuffeau est isolée par l'intérieur par une paroi en béton de chanvre. L'ensemble est parfaitement adiabatique et imperméable aux surfaces horizontales. La surface intérieure qui est en béton de chanvre est sollicitée en régime statique à 20°C et 50% d'humidité relative avec un coefficient d'échange convectif de 7,7 W/m².K. La surface extérieure est en tuffeau et elle est sollicitée à 5°C, 90% d'humidité relative et un coefficient d'échange convectif de 25 W/m².K.

Les évolutions spatio-temporelles des champs de température, humidité relative et teneur en eau de cette paroi sont données par simulations numériques. Nous nous limitons à 4 positions dans cette paroi-multicouche : surface intérieure, interface coté bdc (béton de chanvre), interface coté tuffeau et surface extérieure. La Figure V. 16 illustre les variations temporelles aux points d'observation. Nous remarquons que la température et l'humidité relative convergent à l'interface, ce qui est conforme à la théorie (continuité du champ d'humidité relative) et ce qui montre aussi que le contact entre les couches est supposé parfait. L'humidité relative à l'interface des matériaux est conditionnée par celle à la surface extérieure mais pour un niveau égal, la teneur en eau du béton de chanvre est inférieure à celle du tuffeau. Le béton de chanvre est un matériau qui présente des avantages parmi lesquels sa teneur en eau dans le domaine hygroscopique inférieure à la teneur en eau de la pierre de tuffeau. Grâce à sa porosité, cette quantité d'eau diffuse peu à la surface intérieure et donc le bdc a conservé un comportement proche de celui initialement supposé.

L'augmentation de l'humidité relative à l'interface des matériaux nous a conduit à la détermination de deux propriétés supplémentaires : la température de rosée et la pression de vapeur saturante afin de détecter un risque de condensation. La pression de vapeur saturante est donnée en fonction des intervalles de température, la relation utilisée est donnée ci- après :

$$p_{vs}(T) = 288,7 \times \left(1,098 + \frac{T}{273,15}\right)^{12,73}, T \in [0,30] \text{ °C} \quad V. 33$$

La température de rosée est calculée suivant la formule d'*Heinrich Gustav Magnus-Tetens* :

$$T_r = \frac{a \cdot \ln(h) + b}{1 - \ln(h)}, \quad h = \frac{p_v}{p_{vs}(T)} \text{ tel que } a = 17,27 \text{ et } b=237,7 \text{ [°C]} \quad V. 34$$

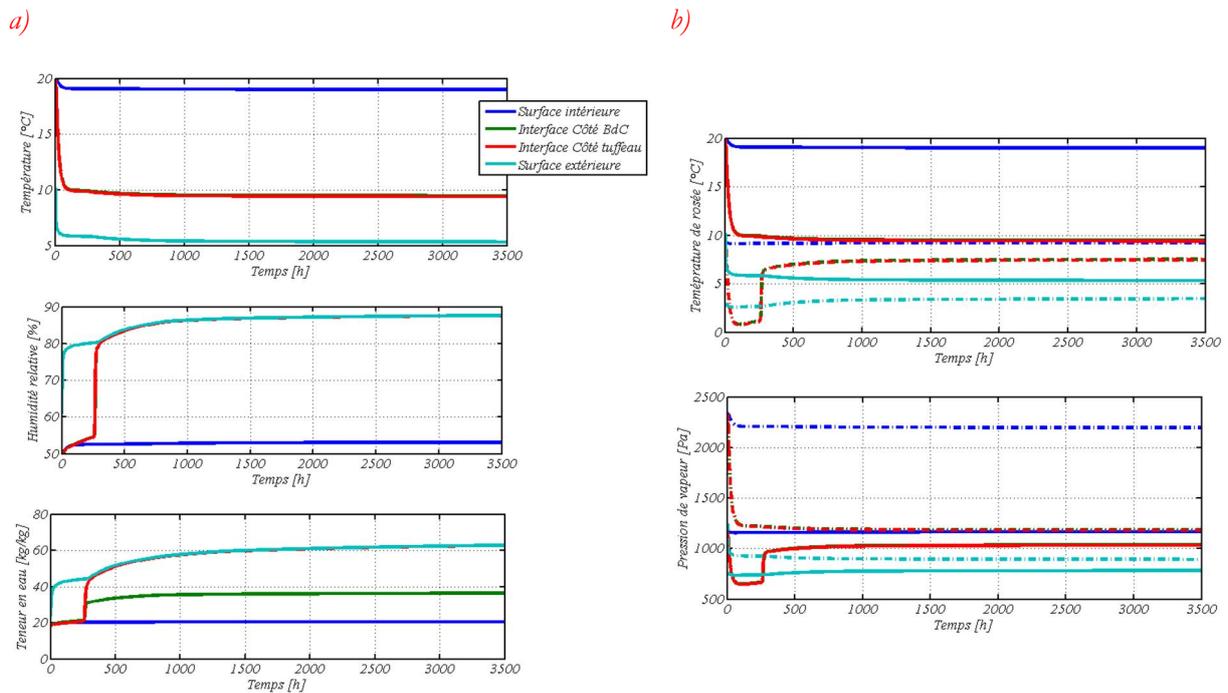


Figure V. 16 : Variations temporelles des champs de T, Hr, w et Pv (lignes continues) (a) et température de rosée et pression de vapeur saturante (lignes discontinues) (b)

La Figure V. 16.b permet de comparer les variations temporelles de la température (ligne continue) par rapport à celle de la température de rosée (ligne discontinue) et la pression de vapeur (ligne continue) par rapport à celle de la pression de vapeur saturante (ligne discontinue). Il n’y a pas d’intersection entre les courbes, et a priori il n’y a pas de phénomène de condensation.

Ces résultats sont donnés pour le cas de référence, nous nous intéressons désormais à l’analyse de sensibilité où les paramètres conductivités et isothermes d’adsorption sont étudiés.

V.2.6.2. Présentation de l’indice de sensibilité

L’analyse de sensibilité pour la paroi multicouche se limite à l’étude de l’influence de la conductivité et l’isotherme d’adsorption de chacun des constituants sur les champs de température et teneur en eau. Le schéma de l’étude est résumé dans le Tableau V. 9.

Tableau V. 9 : Schéma de l’étude de sensibilité pour un paramètre X – cas d’une paroi tuffeau/ béton de chanvre

Tuffeau	Béton de chanvre		
	$\Delta = 0\%$	$\Delta = +5\%$	$\Delta = -5\%$
$\Delta = 0\%$	Référence	+5% bdc	-5% bdc
$\Delta = +5\%$	+5% tuffeau		
$\Delta = -5\%$	-5% tuffeau		

Les écarts relatifs sont ainsi calculés par rapport à la référence et ils sont donnés comme pour les parois simples sous formes des diagrammes de Tuckey.

La Figure V. 18 présente les résultats pour le champ de teneur en eau suite à des incertitudes de mesures de l'isotherme d'adsorption ou la conductivité thermique soit du tuffeau soit du béton de chanvre. Nous soulignons toujours l'importance des mesures précises de l'isotherme de l'adsorption. Il joue autant à la surface qu'à l'interface du matériau. Une incertitude de mesure $\pm 5\%$ de l'isotherme d'adsorption du béton de chanvre modifie la teneur en eau de $\pm 5\%$ à la surface et à l'interface du côté intérieur. Cette influence se propage jusqu'à la surface extérieure avec une valeur de Q_3 de 3%. Quant au tuffeau, pour la même incertitude mesure, l'isotherme d'adsorption est un paramètre amplificateur de la teneur en eau à la surface extérieure et à l'interface. Cependant, l'effet de cette incertitude est négligeable dans la paroi, en particulier à la surface intérieure.

En outre, pour l'influence des isothermes d'adsorption sur le champ de teneur en eau, nous retrouvons les mêmes propriétés de dispersion des écarts relatifs trouvés dans le cas d'une paroi simple, où le caractère dispersif est omni présent pour le tuffeau alors que les boîtes du béton de chanvre sont plus serrées.

La conductivité thermique du tuffeau ou du béton de chanvre est un paramètre atténuateur puisque les écarts relatifs calculés sont souvent inférieurs à l'incertitude de $\pm 5\%$ initialement introduite. Mais la teneur en eau est tout de même sensible à ce paramètre thermique avec des valeurs maximales qui dépassent souvent les 5%.

Il est également intéressant de souligner l'influence de la prise en compte d'une conductivité thermique qui varie en fonction de la teneur en eau. La Figure V. 17 illustre les résultats de l'analyse de sensibilité du champ de teneur en eau à la conductivité thermique.

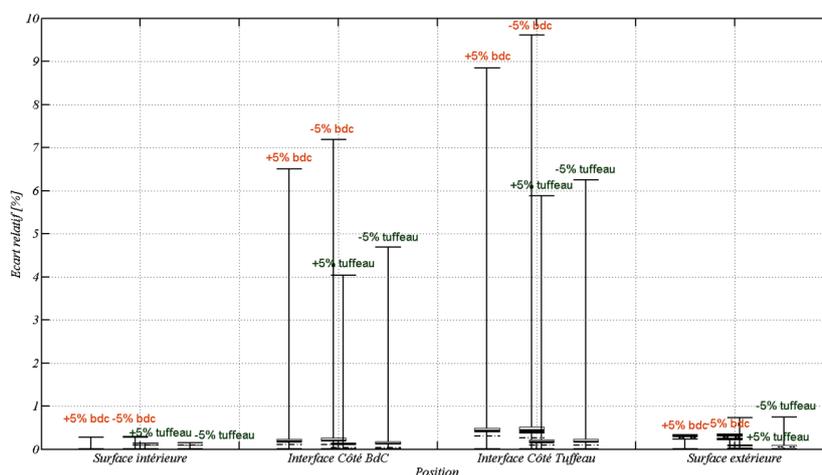


Figure V. 17 : Sensibilité du champ de teneur en eau à la conductivité thermique sèche

Dans cette figure, la conductivité thermique est prise constante pour le béton de chanvre et pour le tuffeau, contrairement à la Figure V. 18 où la conductivité thermique du béton de chanvre est une fonction de la teneur en eau. Les différences sont particulièrement dans la dispersion des valeurs des quartiles qui sont serrées pour des valeurs de conductivités thermiques constantes.

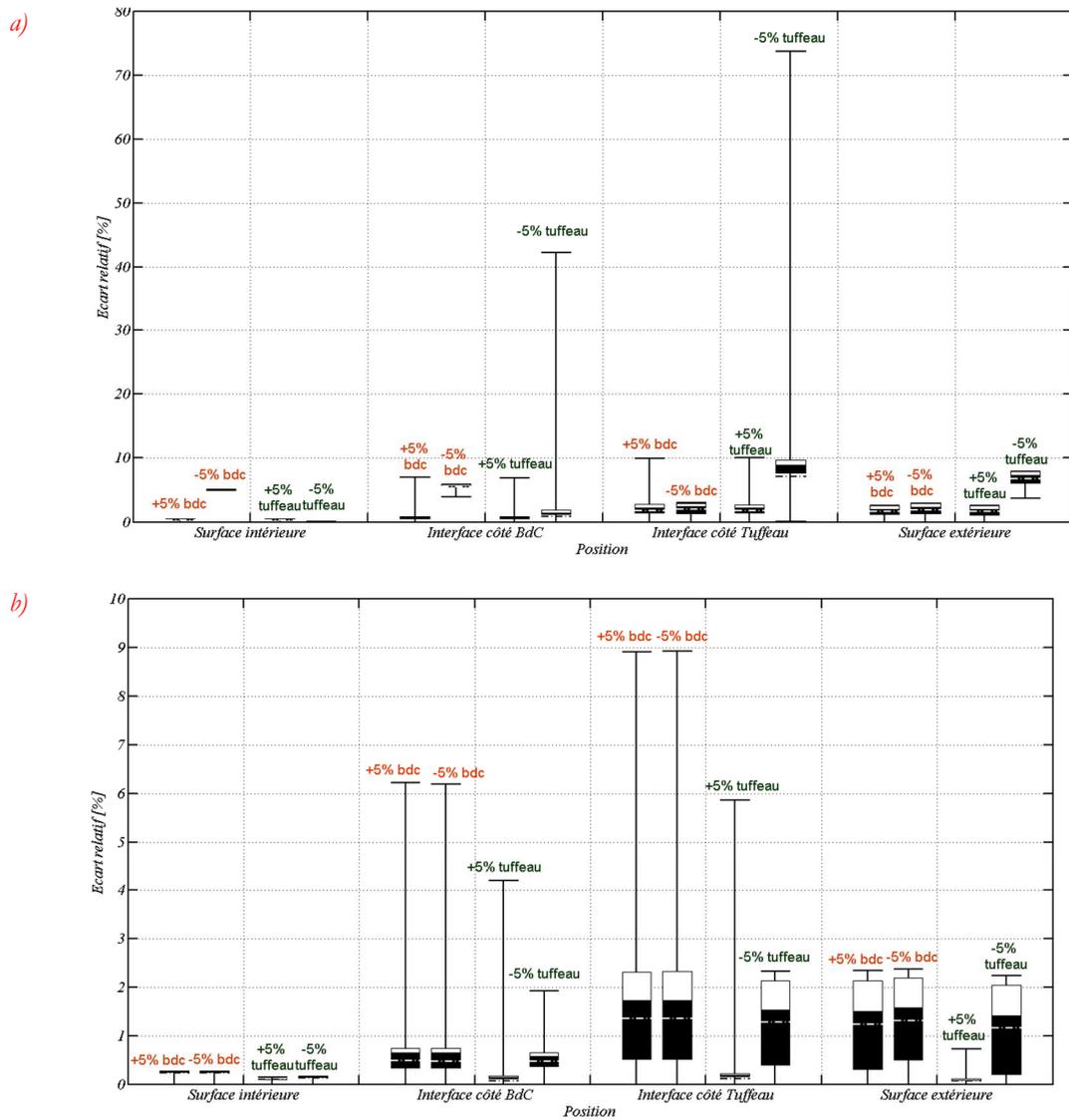


Figure V. 18 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le champ de teneur en eau a) isothermes d'adsorption et b) conductivités thermiques

La Figure V. 19 présente l'influence des isothermes d'adsorption et des conductivités thermiques du tuffeau et du béton de chanvre sur le champ de température. Les isothermes d'adsorption ont un effet qui décroît de la surface extérieure à la surface intérieure. Cet effet bien qu'il soit différent en fonction de la position dans la paroi, est inférieur à 1%.

Le champ de température est plus sensible à la conductivité thermique puisque nous notons que les variations sont globalement comprises entre Q_2 et Q_3 . Il est à noter aussi que les conductivités influencent conformément à la théorie, le champ de température à l'interface des matériaux.

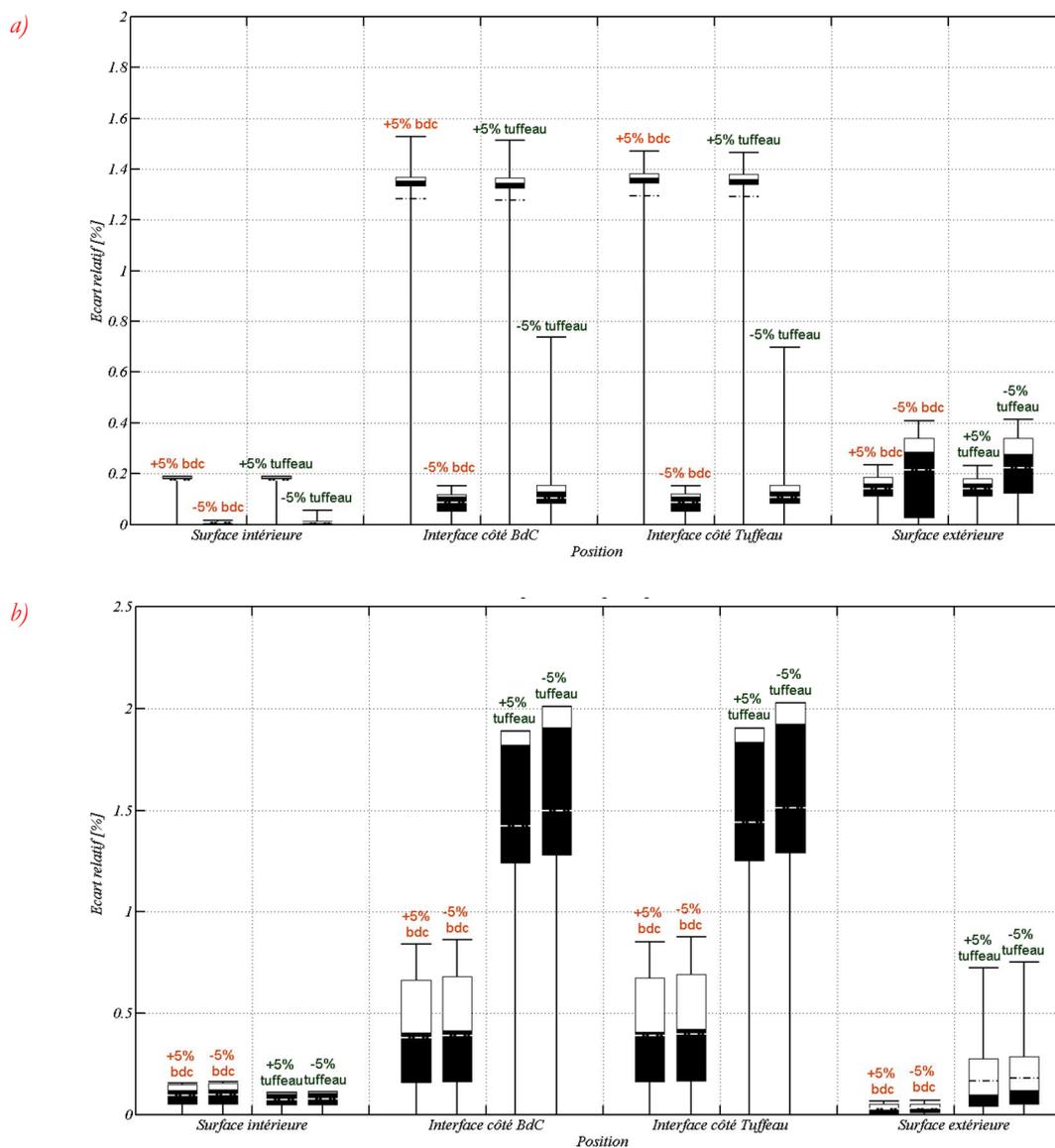


Figure V. 19 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le champ de température a) isothermes d'adsorption et b) conductivités thermiques

Quant à la prise en compte d'une conductivité thermique constante, elle n'influence pas le résultat final puisque l'effet de ce paramètre demeure atténuateur. Cependant comme nous l'avons indiqué pour le champ de teneur en eau, les boîtes sont serrées et donc l'effet de l'évolution de la conductivité thermique suivant l'état hydrique du matériau est effacé.

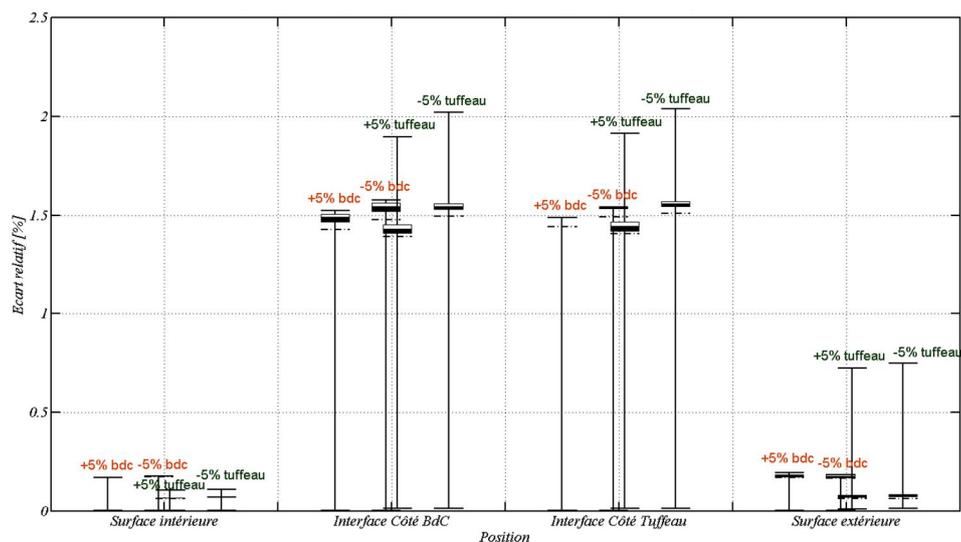


Figure V. 20 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le champ de température pour des conductivités thermiques prises constantes

V.3. Comparaison aux résultats expérimentaux

Dans ce paragraphe nous présentons les résultats de la comparaison entre les évolutions temporelles et spatiales des champs de température et d'humidité relative obtenues par la cellule biclimatique et celle de la simulation numérique obtenue par l'utilisation du logiciel *WUFI*.

La confrontation des résultats expérimentaux aux résultats numérique va se limiter à l'étude des parois simples en tuffeau et en béton de chanvre et la paroi bi couche *tuffeau/bdc-NHL* soumises à des sollicitations statiques et cycliques en température extérieure réelles.

V.3.1. Données de la simulation

V.3.1.1. Conditions aux limites

Les conditions aux limites en températures et en humidités relatives sont enregistrées dans les deux ambiances intérieure et extérieure à partir de la cellule bi climatique et elles sont introduites dans le logiciel comme étant des fichiers météo de format KLI avec un pas de temps de 180 s.

V.3.1.2. Coefficients d'échange convectif

Les simulations sont initialement réalisées avec les résistances thermiques surfaciques données dans le Tableau IV. 2. Or les premiers résultats, en particulier pour les parois en tuffeau non isolées et isolées soulignent une différence supérieure à celle de l'incertitude théorique de la sonde donc supérieure à 1% en humidité relative et de 0,3°C en température.

Le nouveau coefficient d'échange convectif obtenu par ajustement des résultats entre l'expérience et la simulation est de 17 W/m².K pour l'extérieur alors que celui de l'intérieur est maintenu à 20 W/m².K.

V.3.1.3. Propriétés des matériaux

Les propriétés des matériaux sont détaillées dans le chapitre III et elles sont rappelées dans le Tableau V. 10.

La conductivité thermique est donnée selon l'état hydrique et la perméabilité à la vapeur d'eau est donnée pour la coupelle sèche (pour $\varphi=25\%$) et humide (pour $\varphi=72\%$).

Il est également nécessaire de donner la teneur en eau finale w_f déterminée à partir de la loi de BET pour une humidité relative de 100% (voir équation V.24). Elle est obtenue comme suit pour le tuffeau et le bdc-NHL. Les valeurs de la teneur en eau libre retenues correspondent aux valeurs obtenues par la méthode gravimétrique (solutions salines saturées).

Tableau V. 10 : Les propriétés de la paroi en tuffeau et en bdc -NHL

		Tuffeau	Bdc-NHL
Masse volumique sèche	ρ [kg/m ³]	1397	454
Porosité	n [m ³ /m ³]	0,43	0,68
Chaleur spécifique	C_p [J/kg.K]	1181	1211
Conductivité thermique	λ [W/m ² .K]	0,55	0,13
Coefficient d'absorption	A [kg/m ² .s ^{1/2}]	0,31	0,2
Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau	μ [-]	9,9	4,85
	w_m [kg/kg]	0,005	0,01
Paramètres du modèle de GAB	k	0,957	0,978
	C	6,712	1,405

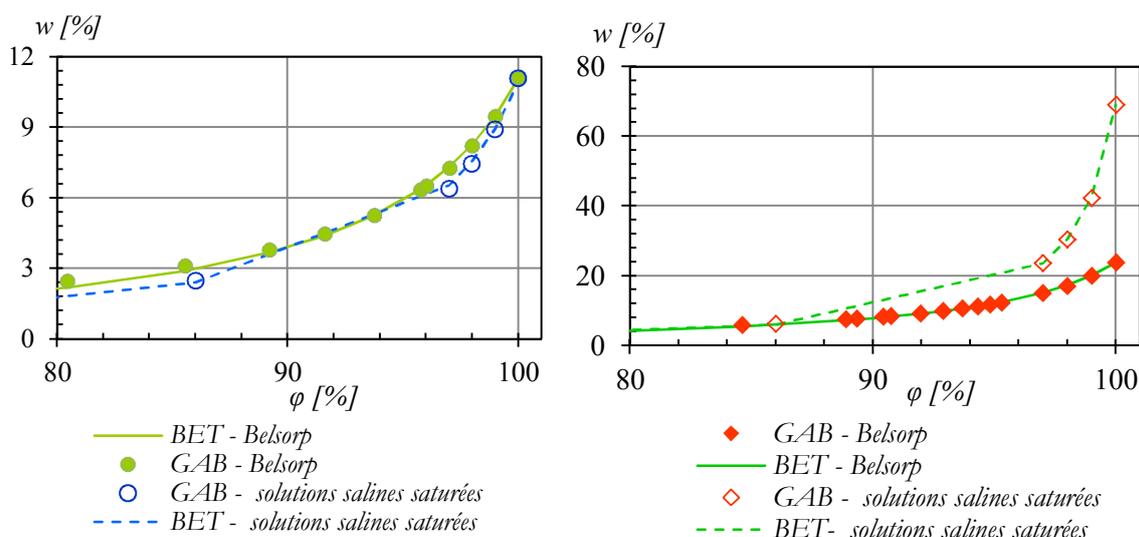


Figure V. 21 : Détermination de la teneur en eau libre w_f pour les parois en tuffeau et en bdc-NHL

V.3.2. Profils de température et d'humidité relative

V.3.2.1. 1^{ers} résultats : $h_{se}=6,7 \text{ W /m}^2\cdot\text{K}$

Les résistances thermiques utilisées dans les simulations sont de $0,05 \text{ m}^2\text{K/W}$ pour l'intérieur et de $0,15 \text{ m}^2\text{K/W}$ (§ IV.1.3.2). Les évolutions temporelles des champs de sortie en T et ϕ sont données par Δx . En effet, la résolution du système d'équations aux dérivées partielles du modèle de *Künzle* est réalisée par une discrétisation en volumes finis. Le maillage est souvent de l'ordre de 1mm dans le sens de flux. Nous avons remarqué que les résultats sont souvent meilleurs (un écart absolu plus faible) lorsque la position des surfaces est prise à 4 mm des limites intérieure et extérieure (diamètre de la sonde hygrothermique=8 mm).

Alors que pour la paroi bi couche *tuffeau/Bdc NHL*, l'interface est plutôt prise du côté tuffeau, ce qui concorde avec les observations faites dans le chapitre IV.

Ces résultats sont donnés pour les sollicitations cycliques dans la Figure V. 22 et la Figure V. 23. Les résultats des sollicitations statiques sont donnés en annexes.

Nous remarquons que les variations entre les résultats expérimentaux et numériques à la surface intérieure sont assez proches dans le cas des parois simples et bicouche. Ces observations sont valables aussi bien pour la température que pour l'humidité relative. Nous remarquons toutefois que les sollicitations cycliques extérieures se propagent jusqu'au centre de la paroi de *bdc -NHL* en termes de températures alors qu'en humidité relative les variations sont retrouvées de manière quantitative mais pas qualitative. Les variations temporelles du champ d'humidité relative au C bdc, en configuration simple ou bicouche, tendent vers une valeur moyenne en cohérence avec la valeur moyenne expérimentale mais l'allure périodique est effacée. Ces différences pourraient provenir de la position soit réelle (incertitude de mesure de la règle) qui est de l'ordre de quelques millimètres, soit de la position dans le maillage numérique.

Or des variations de la position dans la grille de la paroi montrent qu'il faut se mettre à quelques centimètres du milieu théorique pour retrouver ces variations. Des erreurs engendrées par des incertitudes de mesures sont certes inéluctables mais nous pourrions expliquer cette différence par la définition de la diffusivité hydrique utilisée dans *WUFI*.

En effet, cette dernière est obtenue par une loi empirique donnée dans l'équation V.23. Elle est donc calculée à partir des valeurs moyennes du coefficient d'absorption, de la prédiction de w_f et de la courbe d'adsorption. Il serait plus judicieux de mesurer ce paramètre surtout qu'à l'institut de recherche en génie civil et mécanique (*GeM*), un banc expérimental a été mis en place à cet effet.

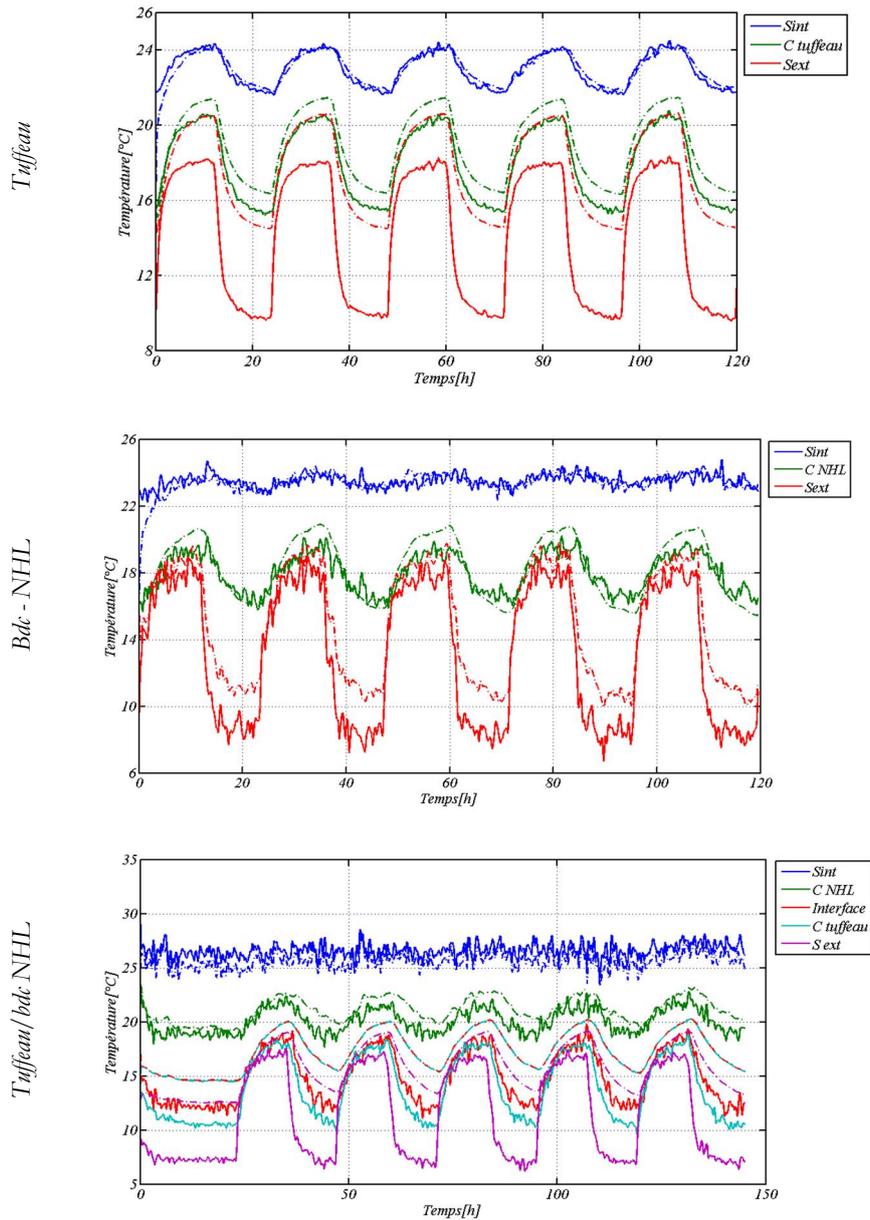


Figure V. 22 : Comparaison des évolutions temporelle des champs de température entre les résultats expérimentaux (lignes continues) et les résultats obtenues par simulations (lignes interrompues)

Des différences entre l'expérience et la simulation se creusent d'avantage du côté extérieur, en particulier à la surface extérieur du tuffeau. Des écarts absolus allant jusqu'à 20% en φ et 5°C en T sont notés pour la paroi en tuffeau non isolée et isolée.

Nous allons désormais présenter ces mêmes résultats avec une résistance thermique extérieure de 0,06 W/m²K.

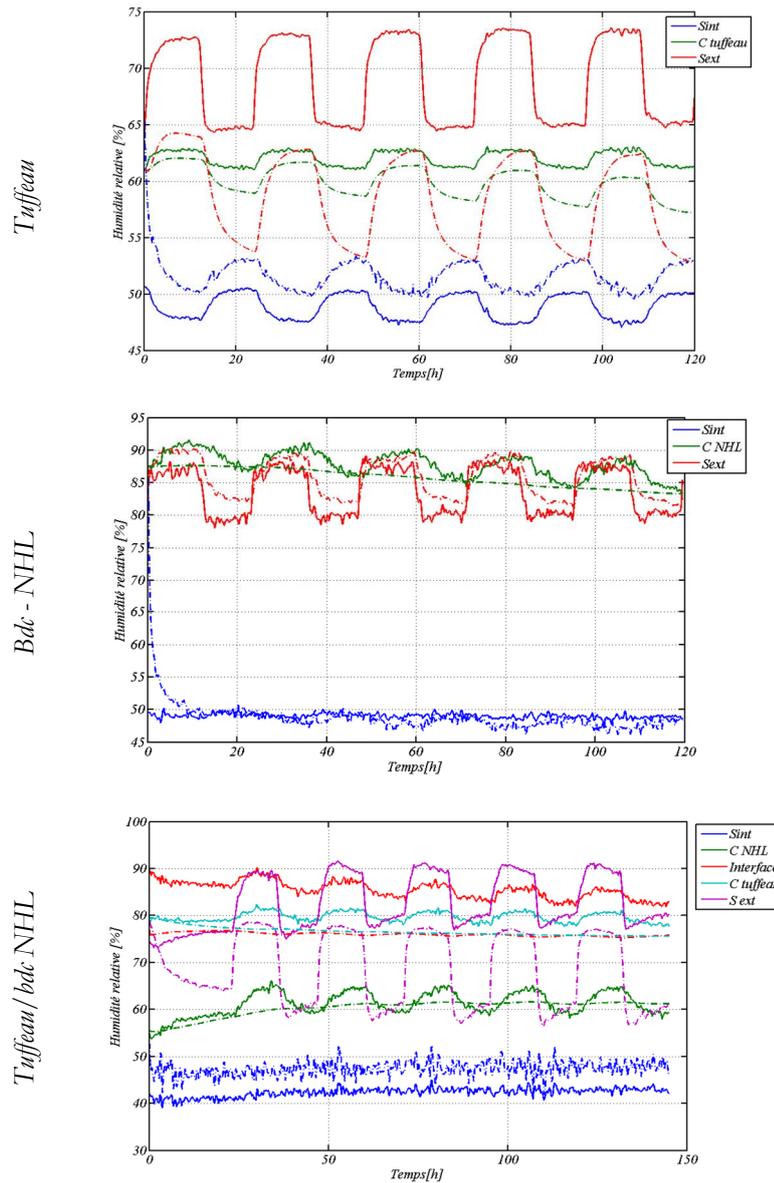


Figure V. 23 : Comparaison des évolutions temporelles des champs de l'humidité relative entre les résultats expérimentaux (lignes continues) et les résultats obtenus par simulations (lignes interrompues)

V.3.2.2. Résultats avec ajustement de $h_{se}=17 \text{ W/m}^2\text{K}$

Les résultats obtenus sont donnés dans la Figure V. 24 et la Figure V. 25. Les évolutions temporelles de la température sont plus proches de celles enregistrées à l'aide de la cellule bi climatique en particulier pour le tuffeau. L'écart relatif maximal entre la température expérimentale et la température simulée est réduit à un 1°C . Pour la paroi en *bdc - NHL* les différences dues à cet ajustement de résistance surfacique extérieure sont sensiblement inchangées. C'est un résultat qui est en concordance avec l'analyse de sensibilité décrite dans le § V.3 où la température est plus sensible au coefficient d'échange convectif extérieur dans le cas du tuffeau que dans le cas d'une paroi en béton de chanvre (1,5 % contre 0,5 % en moyenne pour une variation de 5% de h_e).

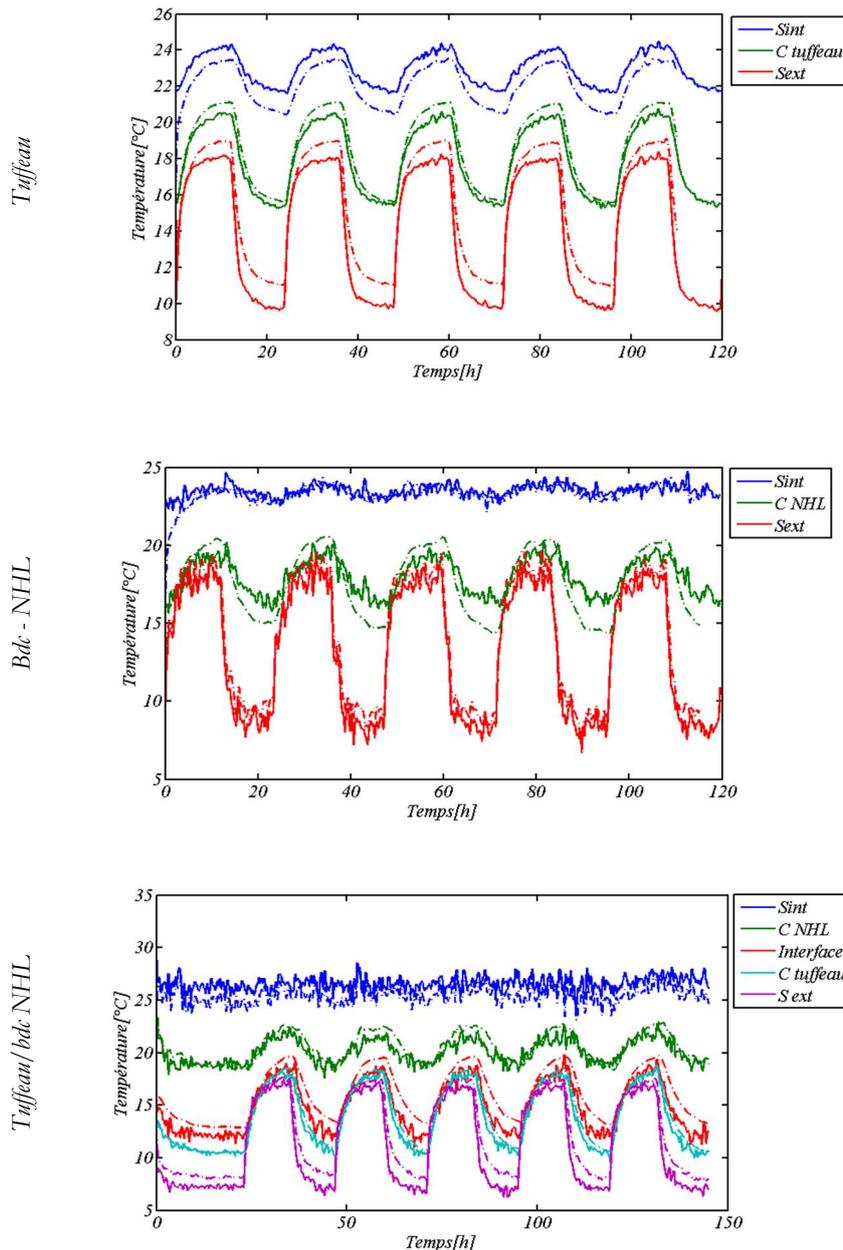


Figure V. 24 : Comparaison des évolutions temporelles des champs de température entre les résultats expérimentaux (lignes continues) et les résultats obtenues par simulations (lignes interrompues)

Les variations en termes d'humidité relatives sont plus marquantes. Une nette amélioration entre les résultats expérimentaux et numériques est certes observée car globalement les écarts absolus ne dépassent pas les 12 % avec une moyenne de 7 %. Ces différences sont principalement calculées à l'interface entre le tuffeau et le *bdc - NHL* et qui pourraient être dues à l'état initial de cette interface qui est généré à partir de l'état initial de *bdc-NHL*. Or initialement, l'interface est plus humide qu'au C *bdc*. Il aurait fallu peut être réaliser une paroi fictive en béton de chanvre de quelques millimètres avec un état initial humide afin de remédier à cette discontinuité créée par l'application humide du béton de chanvre, surtout que le séchage se fait dans une salle de stockage sèche (20°C et 50%) sans convection forcée.

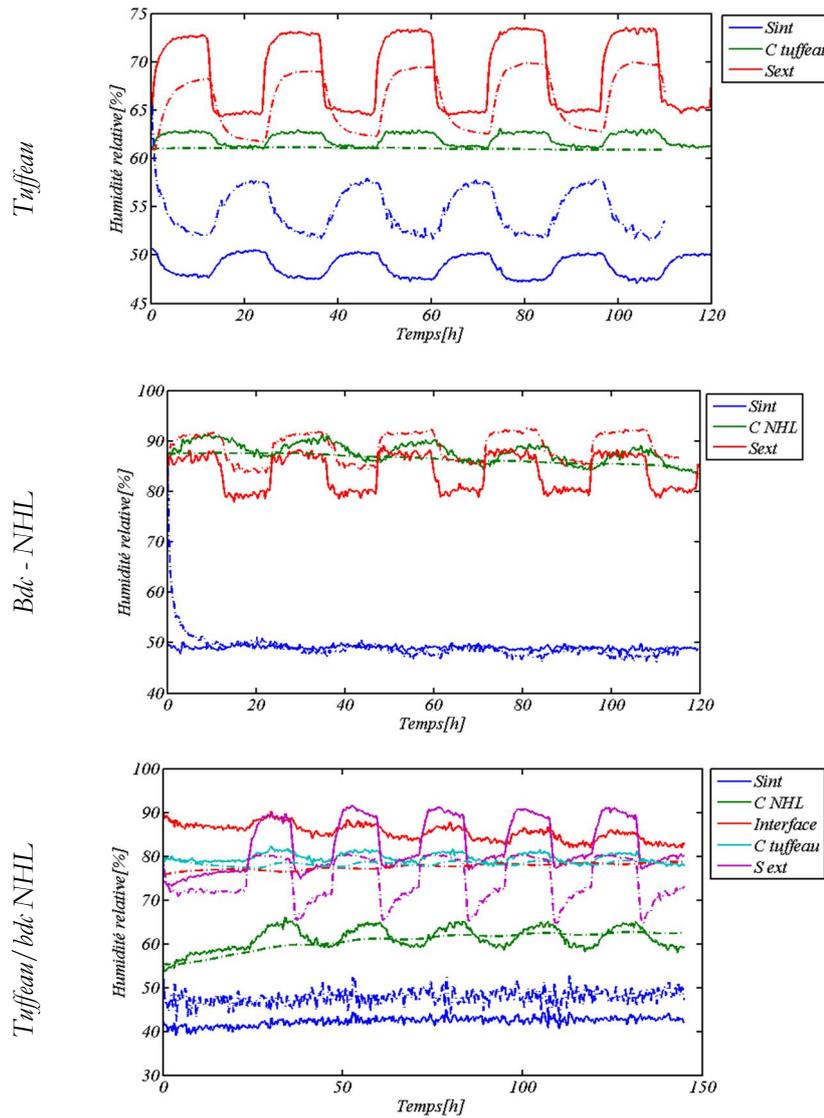


Figure V. 25 : Comparaison des évolutions temporelles des champs de l'humidité relative entre les résultats expérimentaux (lignes continues) et les résultats obtenus par simulations (lignes interrompues)

V.3.3. Calcul des propriétés thermo physiques dynamiques

Il est nécessaire de comparer les résultats numériques par l'évaluation des facteurs d'amortissement et le déphasage temporel thermique et hydrique. Ces propriétés sont calculées par la méthode d'intercorrélation. La méthode de décomposition en série de *Fourier* donne des résultats comparables et ne sera donc pas appliquée ici. Nous avons donc représenté dans la Figure V. 26 les facteurs d'amortissements et les déphasages temporels obtenus suite à l'expérimentation et ceux obtenus par simulation numérique. Les résultats obtenus par application du modèle de *Künzler* implémenté dans le logiciel *WUFI* corroborent les résultats obtenus par l'expérience en utilisant la cellule biclimatique. Pour la paroi en tuffeau isolée avec du *bdc NHL*, la performance s'est dégradée à cause des différences en champ d'humidité relative à la surface extérieure. Cela pourrait être expliqué par la nature de l'application qui est une application par voie humide et que *WUFI* ne l'a pas pris en compte.

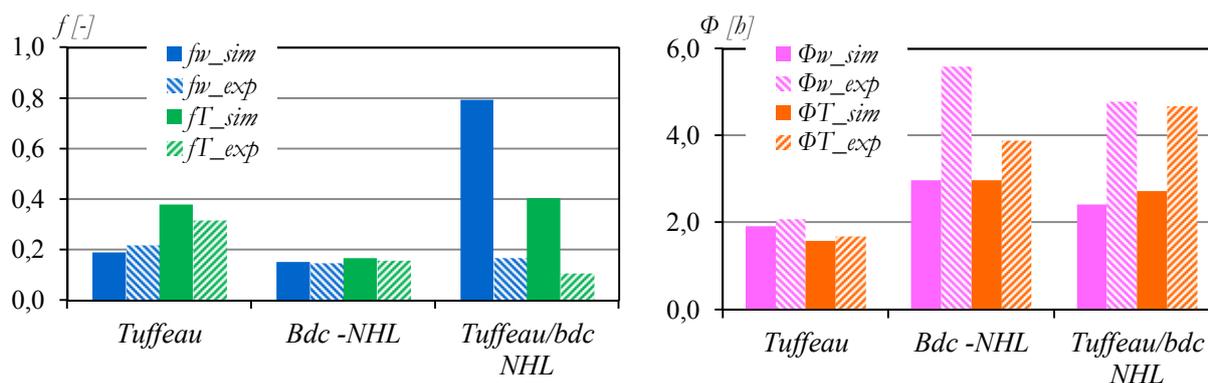


Figure V. 26 : Comparaison entre les propriétés dynamiques expérimentales et numériques obtenues par application de la méthode d'inter corrélation

V.4. Etudes des techniques d'isolation soumises à des conditions réelles

V.4.1. Configuration des parois multicouches

Afin de franchir la limite des coefficients d'échange convectif qui, en partie, ont conditionné la comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques des parois testées en laboratoire, les conditions aux limites sont des conditions aux limites réelles.

L'accent est désormais porté sur l'évaluation des solutions techniques proposées par les différents acteurs du bâtiment dans le cadre des workshops au parc National Loire Anjou Touraine «*Notre patrimoine a de l'avenir : un bâti en tuffeau pour aujourd'hui*».

Ces techniques sont illustrées dans la Figure V. 27. Elles diffèrent par le choix des matériaux utilisés et l'utilisation ou pas de frein vapeur.

Le mur 1 est basé sur un système d'isolation à base de briques. C'est une technique passée puisque sa résistance thermique totale est inférieure à $2.3 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, la résistance imposée par la RT existant (élément par élément) pour l'isolation de l'enveloppe du bâtiment.

Il est indispensable de noter qu'actuellement la RT élément par élément n'oblige pas l'isolation thermique des constructions en pierre en zone de protection du patrimoine architectural, urbain et paysager (Article 6) [102]. Or le système d'isolation proposé dans ce document est un système d'isolation par l'intérieur (ITI) et donc n'entraîne pas de modifications de l'aspect de la construction, ce qui est conforme aux exigences décrites dans l'article 6 de l'arrêté de 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants [102].

Les techniques d'isolation 2 et 4 sont des techniques faisant appel à des matériaux bio-sourcés: le lin et le béton à base de chanvre. Les murs 3 et 4 sont configurés pour répondre aux exigences réglementaires.

Pour le mur 4 trois cas seront discutés :

- Mur 4-a : cas avec frein vapeur de S_d variable.
- Mur 4- b : cas avec frein vapeur $S_d = 2m$.
- Mur 4-c : cas sans frein vapeur.

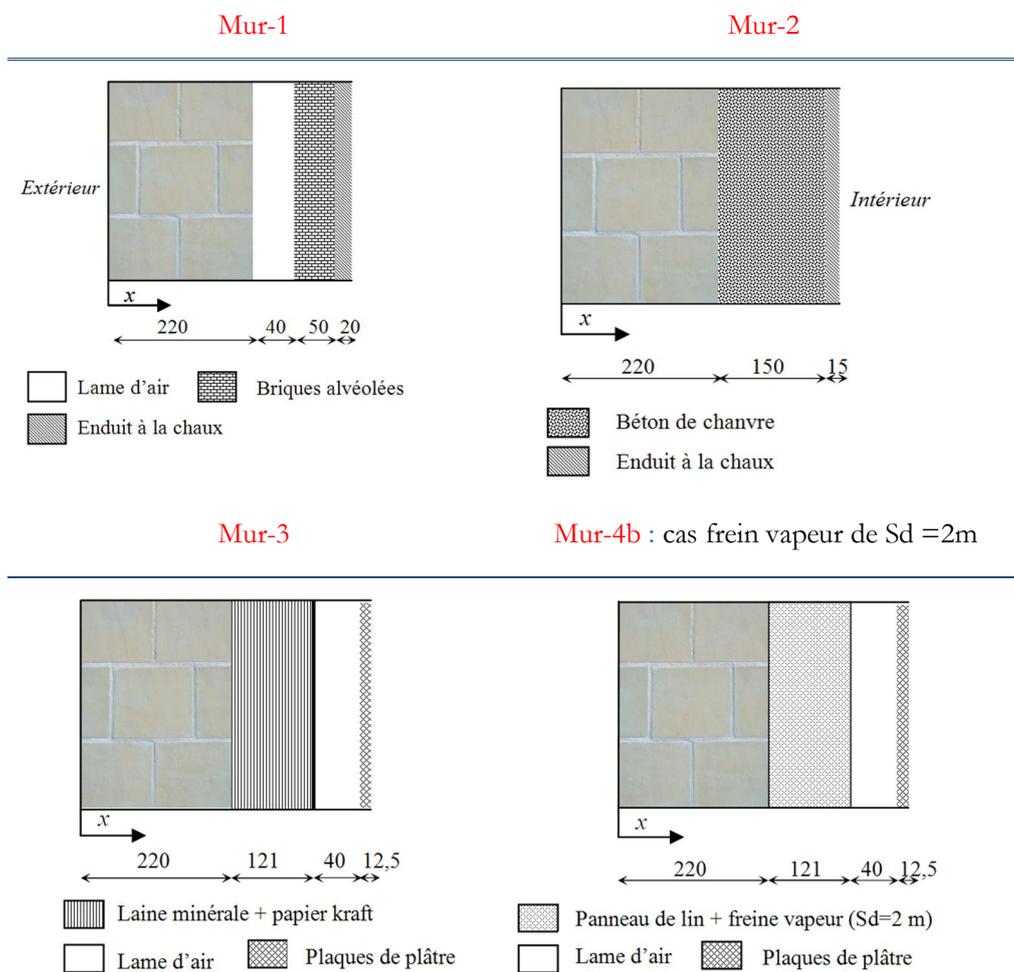


Figure V. 27 : Constituants des parois multicouches [103]

Les propriétés thermiques et physiques des matériaux d'isolation utilisés ci-dessus sont issues de la base des données de WUFI et récapitulées dans le Tableau V. 11.

Tableau V. 11 : Propriétés thermophysiques des matériaux étudiés

Matériau	ρ [kg/m ³]	n [m ³ /m ³]	λ_0 [W/m.K]	C_0 [J/kg.K]	μ_0 [-]
Tuffeau	1310	0,45	0,41	1000	20
Briques	1800	0,31	0,6	850	15
Laine minérale	115	0,95	0,043	850	3,4
Panneau de lin	38	0,95	0,036	1660	1,5
Béton de chanvre	440	0,73	0,115	1560	4,85
Enduit à la chaux	1600	0,30	0,7	850	7
Plaques de plâtre	850	0,65	0,2	850	8,3
Papier kraft	120	0,60	0,42	1500	3000
Frein vapeur	130	0,001	2,3	2300	2000
Frein vapeur à Sd variable	83	0,111	1	1800	4000
Lame d'air	1,3	0,999	0,23	1000	0,38

Toutes ces propriétés sont données pour un matériau sec d'où l'indice 0.

Les résistances thermiques de conduction des parois ainsi que celle de la paroi de référence composée du tuffeau seul d'une épaisseur de 22 cm sont données dans le Tableau V. 12.

Tableau V. 12 : Résistance de conduction des parois testées

Paroi	R_T^* [m ² K/W]	Sd [m]
Tuffeau seul	0,54	4,4
Mur 1	1,11	5,1
Mur 2	1,92	7,9
Mur 3	3,53	6,7
Mur 4	4,11	4,7 : 6,7

*(sans coefficients d'échange surfacique)

V.4.2. Conditions de simulations

L'ensemble des matériaux est initialement maintenu à 20°C et à 50% d'hygrométrie. Les surfaces intérieure et extérieure sont soumises à des variations horaires de température et d'humidité relative réelles. A l'intérieur, la température et l'humidité relative sont constantes à 20°C et à 50%. Les données météorologiques (environnement extérieur) sont mesurées au CEREMA d'Angers par une station météorologique.

Les températures et humidités relatives intérieures et extérieures sont représentées dans la Figure V. 28.

De plus, les simulations sont effectuées avec des conditions de rayonnement, de pluie et de vent réels sans prise en compte de remontées capillaires.

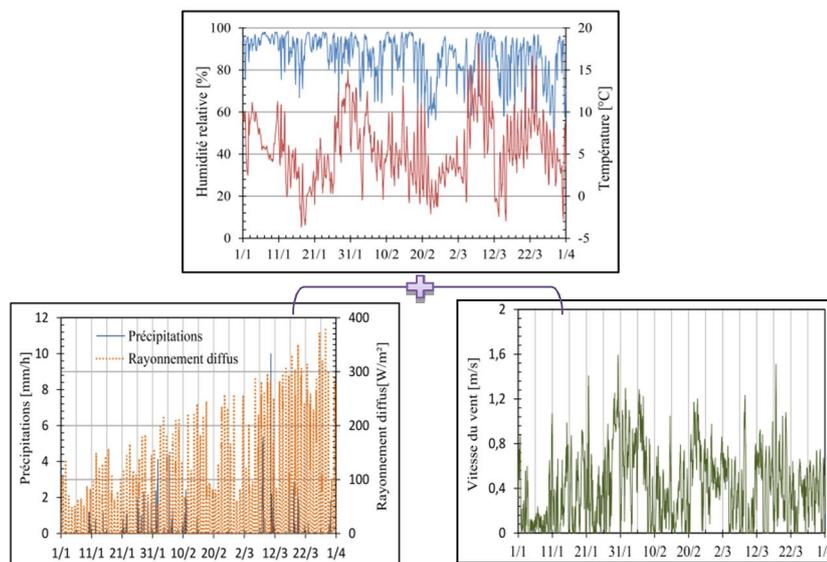


Figure V. 28 : Conditions extérieures

V.4.3. Profils temporels obtenus : T , φ et P_v

Afin d'exclure l'influence de l'état initial des matériaux constituant les différentes parois étudiées, les analyses sont effectuées après un temps suffisamment loin de l'initialisation des simulations (après 500h) En effet, la période de simulations totale est de 3 mois (de janvier à mars) alors que les observations sont faites sur 300 h. Figure V. 29 illustre les variations de la température, de l'humidité relative et de la pression de vapeur aux surfaces intérieures et extérieures.

Ces variations sont plus marquées au niveau de la surface extérieure. Ceci est dû aux fluctuations des conditions aux limites extérieures. Ces dernières sont des données dynamiques réelles qui varient plus au cours du temps par rapport aux conditions intérieures constantes.

En effet les surfaces extérieures de la paroi de référence (tuffeau seul) et les parois multicouches (murs de 1 à 6) ont un comportement assez similaire compte tenu des sollicitations dynamiques extérieures et du coefficient d'échange total $h_{T_{ext}}$ regroupant la composante convective (voir l'équation V. 28), radiative et massique. Ce coefficient influence donc le comportement surfacique des parois par rapport à leurs propriétés thermo physiques.

Néanmoins, les surfaces intérieures des parois multicouches présentent un comportement amélioré en termes de température et d'humidité relative en comparaison avec la paroi simple en tuffeau. Cette dernière a une surface intérieure plus froide et plus humide.

Le mur 1 (isolation avec une lame d'air, des briques alvéolées et un enduit à la chaux) se rapproche plus du comportement d'une paroi simple en tuffeau alors que les températures et surfaces intérieures des murs 2, 3 et 4 sont très similaires.

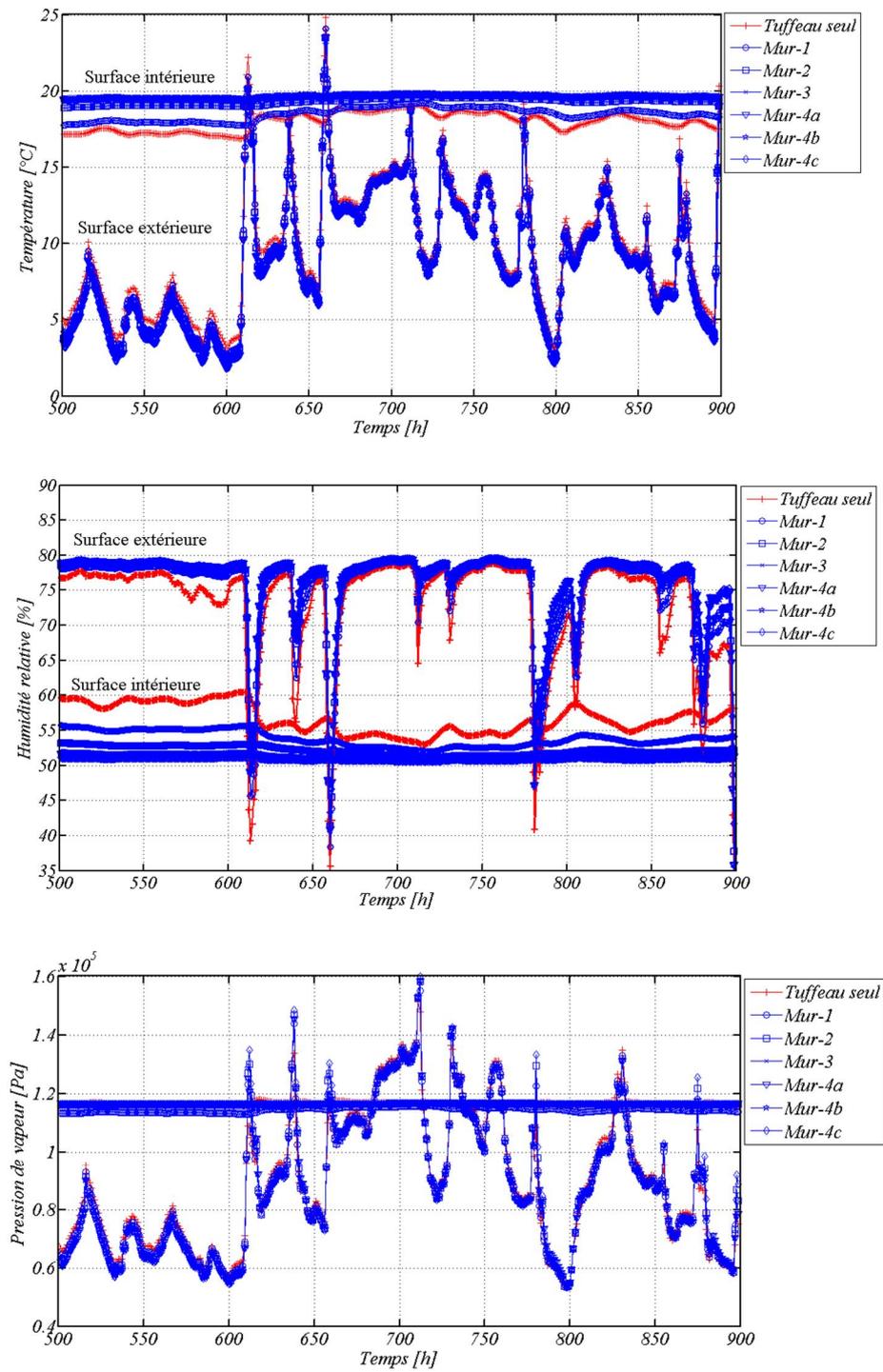


Figure V. 29 : Variations temporelles des champs de T , φ et P_v pour les différentes configurations III retenues

Nous observons dans la Figure V. 30 que la configuration du mur 2 (isolation en béton de chanvre) est intéressante. Bien que sa résistance thermique de conduction soit proche de celle du mur 1 (respectivement 1,92 et 1,11 $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$) la température à la surface intérieure diffère de 0,5 °C par rapport aux murs 3 et 4 qui ont une résistance thermique réglementaire.

Les propriétés de diffusion et de stockage d'humidité du béton de chanvre lui offre une bonne capacité de régulation des taux d'humidité dans le matériau et en particulier à la surface.

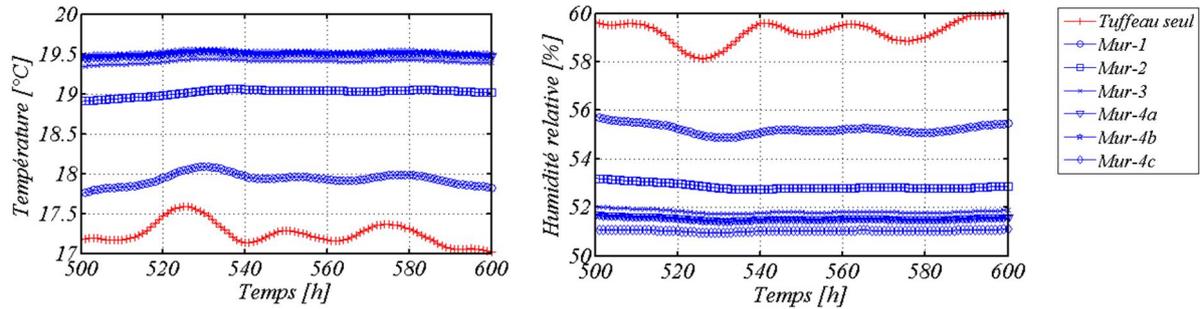


Figure V. 30 : Profils temporels des surfaces intérieures des parois entre 500 et 600h

La Figure V. 31 illustre les teneurs en eau à la surface intérieure et souligne d'avantage la performance intéressante du mur en tuffeau isolé avec du béton de chanvre. D'une part, le mur 1 présente une teneur en eau à la surface proche de celle du tuffeau seul. D'autre part, le béton de chanvre, comme les solutions 3 et 4, réduisent la teneur en eau surfacique.

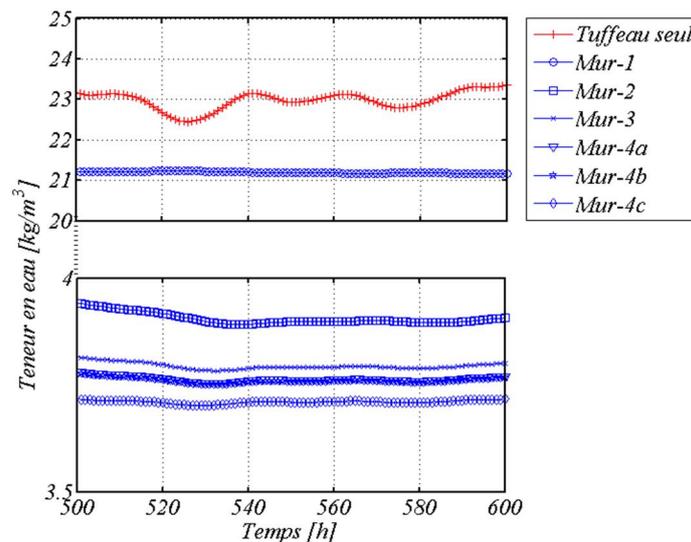


Figure V. 31 : Profils temporels de la teneur en eau aux surfaces intérieures des parois entre 500h et 600 h

Ces observations seront dans ce qui suit argumentées par des facteurs d'amortissement et de déphasages thermiques. Compte tenu des variations dynamiques extérieures aléatoires, la méthode d'inter corrélation demeure la mieux adaptée pour déterminer les facteurs dynamiques.

V.4.4. Facteurs d'amortissement et déphasages thermiques

Les facteurs d'amortissement et les déphasages thermiques sont calculés à partir des variations de température alors que les facteurs d'amortissement hydriques sont calculés à partir des profils de pressions de vapeur (voir § IV.5.2.2-c).

La Figure V. 32 résume les différents facteurs dynamiques calculés. D'abord, les parois multicouches présentent un facteur d'amortissement inférieur à celui d'une paroi simple. D'où leurs inerties thermiques supplémentaires améliorant le confort intérieur. A noter que le mur 1 engendre une amélioration de 32% (par rapport à la paroi de référence) alors que les autres murs engendrent une amélioration entre 70% (cas mur 2) et 83% (murs 3 et 4).

Ensuite, les solutions 3 et 4 ne diffèrent que par la présence d'un frein-vapeur dans la paroi. Ce frein-vapeur n'a pas d'influence sur le comportement thermique de ces parois. Nous calculons donc le facteur d'amortissement hydrique.

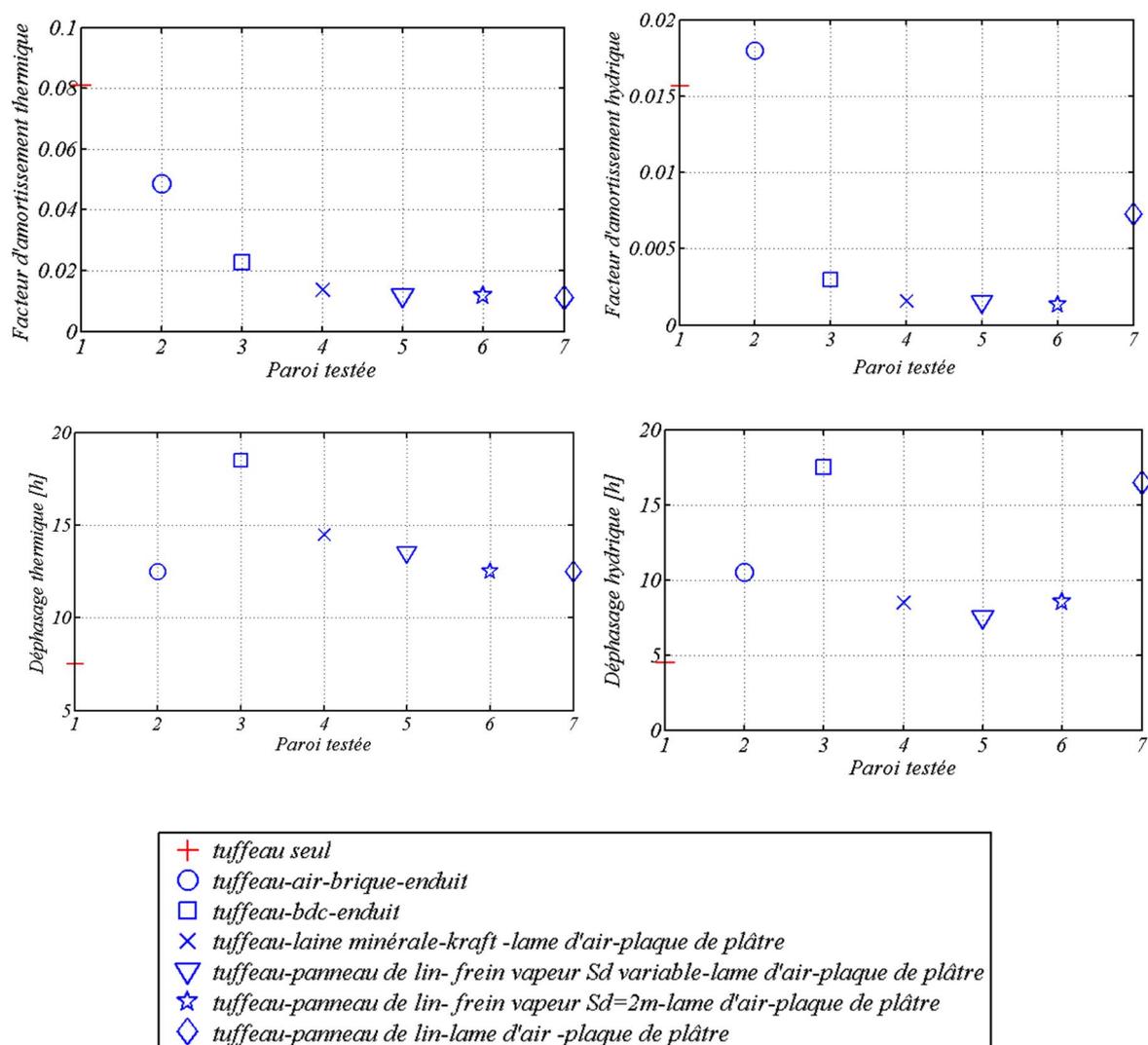


Figure V. 32 : Facteurs d'amortissement et déphasages thermiques et hydriques des configurations testées

En effet, les murs 3 (papier Kraft), 4-a (frein vapeur de Sd variable) et 4-b (frein vapeur de Sd= 2 m) présentent un facteur d'amortissement hydrique plus faible que celui du mur 4-c (sans frein de vapeur). L'inertie hydrique assure l'équilibre hygrothermique par le biais d'un matériau hygroscopique [104]. C'est le cas du béton de chanvre qui a une grande capacité d'absorption de l'humidité [3, 20].

V.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dans un premier exposé les équations du modèle de *Kinzel* qui est le modèle de base du logiciel utilisé *WUFI*. Nous avons ensuite effectué l'analyse de sensibilité locale des champs de sortie du modèle (T , φ et w) à l'incertitude des données d'entrée. Nous avons donc souligné l'importance des paramètres tels que les coefficients d'échange convectif et l'isotherme d'adsorption dans le cas des parois simples et multicouches en tuffeau et en béton de chanvre. L'influence de ces paramètres est caractérisée à partir de leurs écarts relatifs par rapport à la simulation de référence (pas d'incertitudes sur les paramètres d'entrée) et représenté suivant la méthode de la statistique descriptive sous formes de diagrammes de *Tuckey* (ou box plot).

Nous avons également comparé les résultats des évolutions de la température et de l'humidité relative dans les parois simples en tuffeau et en bdc -NHL et dans une paroi en tuffeau isolée à l'intérieur avec du bdc NHL appliqué par voie humide aux résultats de la simulation numérique de ces parois sollicitées dans les mêmes conditions intérieures et extérieures. Or chaque paroi est considérée à l'état d'équilibre par rapport aux mesures relevées au centre de la paroi. Cette limite a présenté une contrainte qui pourrait expliquer des différences entre l'état réel de la paroi *tuffeau/bdc-NHL* et l'état de l'interface calculé par *WUFI*. Les comparaisons entre les résultats sont quantifiées par la détermination des propriétés dynamiques thermiques (par rapport au champ de température) et hydriques (par rapport au champ de pression de vapeur) : facteurs d'amortissement et déphasage temporels.

Enfin, plusieurs techniques d'isolation du référentiel technique « *Un bâti en tuffeau pour aujourd'hui et demain* » proposées par le parc national *Loire Anjou Touraine* sont testées numériquement avec des conditions météorologiques réelles de la ville d'*Angers* pour la saison d'hiver. Nous avons donc calculé les paramètres dynamiques thermiques et hydriques pour les configurations sélectionnées et nous avons établi des comparaisons en tenant compte de critères de la qualité environnementale du matériau, de l'encombrement de la technique et de la résistance thermique. La technique à base de chanvre semble satisfaire plusieurs de ces critères et présente un potentiel d'isolation intéressant.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

L'objectif de cette étude est d'évaluer la compatibilité d'une technique d'isolation à base de chanvre avec une paroi en tuffeau. Le choix de cette technique innovante s'intègre dans une approche d'éco rénovation soutenue par l'ADEME.

Nous avons donc procédé au cours de cette étude à l'évaluation expérimentale et numérique de la performance hygrothermiques de ces parois lorsqu'elles sont simples et bicouches lorsqu'elles sont soumises à des sollicitations statiques et cycliques en températures extérieures.

D'abord, nous avons présenté l'état de l'art au sujet de la rénovation par l'utilisation des matériaux qui respectent les engagements de la France à l'échelle nationale et internationale en termes du respect de l'environnement et réduction des gaz à effet de serre. Nous avons également mis l'accent sur les différents résultats des travaux de recherche au sujet du tuffeau et de béton de chanvre. Ces études ont permis de mieux comprendre le comportement de ces matériaux souvent en configuration simple, d'où la présente initie à la compréhension du comportement de ces deux parois en configuration bi couche et en système d'isolation par l'intérieur.

Ensuite, nous avons décrit dans le chapitre II les différentes méthodes de caractérisation, qu'elles soient normalisées, développées au sein de l'institut de recherche en génie civil et mécanique ou nouvelles. Ces techniques nous ont ainsi permis d'étudier les propriétés du tuffeau et des trois bétons de chanvre : préfabriqué, confectionné avec de la chaux hydraulique NHL 3,5 et de la chaux pouzzolanique PF70.

Le chapitre III est dédié au dépouillement des propriétés physiques, de transfert hydrique et thermique. Nous avons souligné la propriété perspirante du tuffeau et des bétons de chanvre. Cette qualité est justifiée par des valeurs faibles des coefficients de résistance à la diffusion de vapeur d'eau. Les propriétés thermiques des matériaux sont également faibles de $0,55 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ pour le tuffeau et de $0,11 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ pour le béton de chanvre.

Dans le chapitre IV, nous avons présenté le dispositif expérimental « cellule biclimatique » qui a permis de suivre les évolutions de température et d'humidité relative dans les parois simples et bi couches. Les parois simples sont fabriquées avec le matériau alors que la paroi bi couche est une paroi avec une juxtaposition du support en tuffeau de 8 cm avec une paroi en béton de chanvre. Les différentes parois sont sollicitées en régime statique et en régime cyclique- dans le premier cas, nous avons déterminés les temps de stabilisation alors que pour le deuxième type de sollicitation, nous avons mis l'accent sur le comportement dynamique des parois par la détermination du facteur d'amortissement et le déphasage temporel. Ces deux propriétés sont calculées à partir de différentes méthodes, celle de la norme

NF EN ISO 13786, la méthode d'*Asan et al.* Ces dernières sont les méthodes les plus utilisées dans la littérature. Nous avons ainsi adapté la méthode d'inter corrélation et la décomposition en série de *Fourier*.

Enfin dans le chapitre V, les techniques d'isolations sont étudiées du point de vue numérique en utilisant le modèle de transferts couplés de masse et chaleur de *Künzel* implémenté dans le logiciel *WUFI*. L'analyse de sensibilité réalisée a mis l'accent sur l'importance de l'isotherme d'adsorption sur les résultats des champs de teneur en eau et les coefficients d'échange convectif influencent plutôt le champ de température.

Les comparaisons entre les résultats expérimentaux et numériques montrent une bonne concordance, à rappeler que le coefficient d'échange, en particulier à l'extérieur est modifié afin d'avoir une meilleure similitude. Ce résultat justifie ainsi l'importance des conditions aux limites car les fichiers météo établis sont des fichiers résultants d'une interaction entre l'ambiance extérieure et intérieure.

Pour cela trois prolongements sont importants :

- Améliorer la technique de mesure des propriétés thermiques selon l'état hydrique tout en diminuant les incertitudes de mesures obtenues sur un matériau hétérogène comme le béton de chanvre. pour cela, on propose d'utiliser des thermocouples montés en parallèle et répartis sur une surface suffisamment grande pour obtenir une température moyenne représentative de l'évaluation de température réelle du matériau c'est-à-dire tenant compte des hétérogénéités (pores, chènevotte, matrice liante). Il faudrait aussi améliorer la précision de mesure des coefficients de diffusion hydrique en suggérant des techniques de mesures directes en s'appuyant sur les travaux antérieurs de *Kbelidj* [106] qui a déterminé les coefficients de transferts thermo physiques par mesures expérimentales par gamma densimétrie.

- Étudier des parois avec un enduit de finition, cet enduit pourrait être en chaux chanvre, ou en terre afin de préserver un bilan environnemental positif. En effet, des études sur les transferts de chaleur et d'humidité ont débuté pour des parois en tuffeau/béton de chanvre et enduit chaux chanvre. Cette étude expérimentale est accompagnée des mesures des propriétés de l'enduit décrites dans le rapport mais aussi d'une mesure de sa capacité hydrique tampon car c'est l'enduit qui en configuration réelle est exposé aux variations d'humidité.

- Étendre les phénomènes pris en compte dans le modèle de *Künzel* en rajoutant des conditions aux limites en particulier du côté ambiance intérieure plus globale, en tenant en compte des bilans plus complets : activité métabolique des occupants, chauffage, renouvellement d'air intérieur, etc. Il est également intéressant d'intégrer le phénomène d'hystérésis et de généraliser le modèle de *Künzel* en le réécrivant sous formes de nombres adimensionnels qui décrivent les phénomènes pris en compte.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Magniont C.** Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources. Thèse de doctorat. Toulouse 3- Paul Sabatier, 2010.
- [2] **Cerezo V.** Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique. Thèse de doctorat. INSA de Lyon, 2005.
- [3] **Collet F.** Caractérisations hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux. Thèse de doctorat. Université de Rennes, 2005.
- [4] **Evrard A.** Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials. Text. UCL, 2008.
- [5] **Asan H, Sancaktar YS.** Effects of Wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy Build* 1998;28:159–66. doi:10.1016/S0378-7788(98)00007-3.
- [6] **Peuportier B.** Eco-conception des bâtiments: bâtir en préservant l'environnement. Presses des MINES; 2003.
- [7] **Beck K.** Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité. Thèse de doctorat. Université d'Orléans, 2006.
- [8] **Bromblet P.** Guide Altérations de la pierre. Association MEDISTONE; 2010.
- [9] **Gaylarde C, Glyn Morton LH.** Deteriogenic biofilms on buildings and their control: A review. *Biofouling* 1999;14:59–74. doi:10.1080/08927019909378397.
- [10] **Berdoulay M.** Analyses physico-chimiques et microbiologiques de façades en pierre exposées aux embruns marins du golfe de Gascogne. Thèse de doctorat. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2008.
- [11] **Ryu SH, Moon HJ, Kim JT.** Evaluation of the influence of hygric properties of wallpapers on mould growth rates using hygrothermal simulation. *Energy Build* n.d. doi:10.1016/j.enbuild.2014.09.058.
- [12] **Warscheid T, Braams J.** Biodeterioration of stone: a review. *Int Biodeterior Biodegrad* 2000;46:343–68. doi:10.1016/S0964-8305(00)00109-8.
- [13] **Adamo P, Violante P.** Weathering of rocks and neogenesis of minerals associated with lichen activity. *Appl Clay Sci* 2000;16:229–56. doi:10.1016/S0169-1317(99)00056-3.
- [14] **Flemming H-C, Neu TR, Wozniak DJ.** The EPS Matrix: The "House of Biofilm Cells." *J Bacteriol* 2007;189:7945–7. doi:10.1128/JB.00858-07.
- [15] **Dessandier D.** Etude du milieu poreux et des propriétés de transfert des fluides du tuffeau blanc de Touraine. Application à la durabilité des pierres en oeuvre. Thèse de doctorat. Université de Tours, 1995.
- [16] **Chéné G.** Modélisation physique des transferts hydrique dans un bloc de tuffeau. thèse de doctorat. Université de Nantes, 1999.
- [17] **Van TT.** Vieillessement du tuffeau en présence de sels: approche expérimentale et numérique. Thèse de doctorat. Université d'Orléans, 2008.
- [18] **Dessandier D, Bromblet P, Mertz J-D.** Durability of tuffeau stone in buildings: Influence of mineralogical composition and microstructural properties. In: Fassina V, editor. *Proc. 9th Int. Congr. Deterioration Conserv. Stone*, Amsterdam: Elsevier Science B.V.; 2000, p. 69–78.
- [19] **Cardell C, Delalieux F, Roumpopoulos K, Moropoulou A, Auger F, Van Grieken R.** Salt-induced decay in calcareous stone monuments and buildings in a marine environment in SW France. *Constr Build Mater* 2003;17:165–79. doi:10.1016/S0950-0618(02)00104-6.
- [20] **Bousquié P.** Texture et porosité de roches calcaires: relations avec perméabilité, ascension capillaire, gélivité, conductivité thermique. Thèse de docteur-ingénieur. École nationale supérieure des mines, 1979.
- [21] **ADEME** Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie. ADEME n.d. <http://www2.ademe.fr/>
- [22] **Céline A, Gonçalves O.** Utilisation de la spectrométrie infrarouge pour le développement d'une approche de quantification rapide du taux d'humidité dans des fibres végétales. *Rev Compos Matér Avancés* 2014;1:81
- [23] **bâtiment F française du.** Construire en chanvre règles professionnelles d'exécution. Paris: SEBTP; 2008.
- [24] **Nguyen T.T,** Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre. Université de Bretagne-sud, 2010.
- [25] **Garnier P.** Le séchage des matériaux poreux. Approche expérimentale et approche théorique par homogénéisation des structures périodiques. Thèse de doctorat. ENITPE, n.d.

- [26] **Arnaud L**, Gourlay E. Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Constr Build Mater* 2012;28:50–6. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052.
- [27] **Chamoïn J**. Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation. Mémoires, Thèses et HDR. Centre pour la communication scientifique directe, 2013.
- [28] **Collet F**, Chamoïn J, Pretot S, Lanos C. Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes. *Energy Build* 2013;62:294–303. doi:10.1016/j.enbuild.2013.03.010.
- [29] **Bruijn P de**, Johansson P. Moisture fixation and thermal properties of lime–hemp concrete. *Constr Build Mater* 2013;47:1235–42. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.006.
- [30] **Dinh TM**. Contribution au développement de béton de chanvre préfabriqué utilisant un liant pouzzolanique innovant. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2014.
- [31] **Samri D**. Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique. Thèse doctorat. Institut national des sciences appliquées, 2008.
- [32] **Tran Le AD**. Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment: simulation numérique et approche expérimentale. Thèse de doctorat. Université de Reims - Champagne Ardenne, 2010.
- [33] **Walker R**, Pavia S. Moisture transfer and thermal properties of hemp–lime concretes. *Constr Build Mater* 2014;64:270–6. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.081.
- [34] **Amziane S**, Arnaud L. Les bétons de granulats d'origine végétale: Application au béton de chanvre. Paris: Hermes Science Publications; 2013.
- [35] **Collet F**, Pretot S. Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content. *Constr Build Mater* 2014;65:612–9. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039.
- [36] **De Bruijn PB**, Jeppsson K-H, Sandin K, Nilsson C. Mechanical properties of lime–hemp concrete containing shives and fibres. *Biosyst Eng* 2009;103:474–9. doi:10.1016/j.biosystemseng.2009.02.005.
- [37] **Ait Oumeziane Y**. Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique: application aux parois en béton de chanvre. Thèse de doctorat. Université européenne de Bretagne, 2013.
- [38] **Rode C**, Peuhkuri RH, Hansen KK, Time B, Svennberg K, Arfvidsson J, et al. Moisture Buffer Value of Building Materials. *Denmarks Tekniske Universitet*; 2005.
- [39] **Collet F**, Pretot S. Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete. *Constr Build Mater* 2012;36:58–65. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.139.
- [40] **Mendes N**, Philippi PC. A method for predicting heat and moisture transfer through multilayered walls based on temperature and moisture content gradients. *Int J Heat Mass Transf* 2005;48:37–51.
- [41] **Trabelsi A**, Belarbi R, Qin M. Transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les bâtiments climatisés. Congrès SFT09, Vannes, France: 2009, p. x.
- [42] **Crausse P**, Laurent JP, Perrin B. Influence des phénomènes d'hystérésis sur les propriétés hydriques de matériaux poreux: Comparaison de deux modèles de simulation du comportement thermohydrique de parois de bâtiment. *Rev Générale Therm* 1996;35:95–106.
- [43] **Kwiatkowski J**, Woloszyn M, Roux J-J. Modelling of hysteresis influence on mass transfer in building materials. *Build Environ* 2009;44:633–42.
- [44] **Van Belleghem M**, Steeman H-J, Steeman M, Janssens A, De Paepe M. Sensitivity analysis of CFD coupled non-isothermal heat and moisture modelling. *Build Environ* 2010;45:2485–96.
- [45] **Luikov AV**. Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies. In: Thomas F. Irvine and James P. Hartnett, editor. *Adv. Heat Transf.*, vol. Volume 1, Elsevier; 1964, p. 123–84.
- [46] **Philip JR**, De Vries DA. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Eos Trans Am Geophys Union* 1957;38:222–32.
- [47] **Abahri K**, Belarbi R, Trabelsi A. Contribution to analytical and numerical study of combined heat and moisture transfers in porous building materials. *Build Environ* 2011;46:1354–60.
- [48] **Qin M**, Ait-Mokhtar A, Belarbi R. Two-dimensional hygrothermal transfer in porous building materials. *Appl Therm Eng* 2010;30:2555–62.
- [49] **De Vries DA**. Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media. *Trans Am Geophys Union* 1958;39:909.
- [50] **Künzel HM**. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One and two dimensional calculation using simple parameter. Fraunhofer IRB Verlag, 1995.
- [51] **Evrard A**, Flory-Celini C, Claeys-Bruno M, De Herde A. Influence of liquid absorption coefficient on hygrothermal behaviour of an existing brick wall with Lime–Hemp plaster. *Build Environ* 2014;79:90–100.
- [52] **Barclay M**, Holcroft N, Shea AD. Methods to determine whole building hygrothermal performance of hemp–lime buildings. *Build Environ* 2014;80:204–12. doi:10.1016/j.buildenv.2014.06.003.
- [53] **Kruis J**, Madera J. Numerical analysis of coupled heat and moisture transfer based on kunzel model. 18 Th Int Conf Eng Mech 2012:763–74.
- [54] **Künzel HM**, Holm A. Simulation des transferts de chaleur et d'humidité dans l'enveloppe de bâtiment n.d.:10.

- [55] **Whitaker S.** Simultaneous Heat, Mass, and Momentum Transfer in Porous Media: A Theory of Drying. In: James P. Hartnett and Thomas F. Irvine, editor. *Adv. Heat Transf.*, vol. Volume 13, Elsevier; 1977, p. 119–203.
- [56] **Ben Fraj Amor.** Transfert dans les bétons non saturés : influence des laitiers et de l'endommagement mécanique. Université de Nantes, 2009.
- [57] **Trabelsi A.** Etudes numérique et expérimentale des transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux de construction. Thèse de doctorat. Université de la Rochelle, 2010.
- [58] **Lu S-G, Malik Z, Chen D-P, Wu C-F.** Porosity and pore size distribution of Ultisols and correlations to soil iron oxides. *CATENA* 2014;123:79–87. doi:10.1016/j.catena.2014.07.010.
- [59] **Malvault G.** Détermination expérimentale de la distribution de taille de pores d'un milieu poreux par l'injection d'un fluide à seuil ou analyse harmonique. Arts et Métiers ParisTech, 2013.
- [60] **Colas E.** Impact de l'humidité et des solutions salines sur le comportement dimensionnel de grès du Buntsandstein: contribution à la sélection de faciès de restauration. Thèse de doctorat. Ecole doctorale Sciences, technologies, santé, 2011.
- [61] **Boer JH.** The dynamical character of adsorption. Clarendon Press; 1953.
- [62] **Guggenheim EA.** Applications of Statistical Mechanics. Clarendon Press; 1966.
- [63] **Homain H.** GranDuBé: grandeurs associées à la durabilité des bétons. Presses des Ponts; 2007.
- [64] **Khelidj A, Baroghel-Bouny V, Bastian G, Godin J, Villain G.** Transferts dans les betons et durabilite des ouvrages: determination experimentale des gradients resultant d'une interaction hydratation - sechage dans une dalle en beton. Paris: Laboratoire central des ponts et chaussees; 2002.
- [65] **Poullain P, Mounanga P, Bastian G, Khelidj A.** Détermination rapide des propriétés de transfert thermique de matériaux cimentaires soumis au séchage. Congrès Transf. 2006, Lille, France: 2006.
- [66] **Mounanga P, Bastian G, Bron G, Coué R.** Rapid determination of the thermophysical properties of various materials. Method of the hot plane film. *Eur Phys J - Appl Phys* 2004;26:65–72.
- [67] **Poullain P, Mounanga P, Bastian G, Coué R.** Determination of the thermophysical properties of evolutive porous media: application to Civil Engineering materials. *Eur Phys J Appl Phys* 2006;33:35–49.
- [68] **Mounanga P.** Étude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge : hydratation, retraits, propriétés thermophysiques. Nantes; 2003.
- [69] **Derbal R, Defer D, Chauchois A, Antczak E.** A simple method for building materials thermophysical properties estimation. *Constr Build Mater* 2014;63:197–205.
- [70] **Beck K, Al-Mukhtar M, Rozenbaum O, Rautureau M.** Characterization, water transfer properties and deterioration in tuffeau: building material in the Loire valley—France. *Build Environ* 2003;38:1151–62.
- [71] **Gummerson RJ, Hall C, Hoff WD.** Water movement in porous building materials—II. Hydraulic suction and sorptivity of brick and other masonry materials. *Build Environ* 1980;15:101–8.
- [72] **Galbraith GH, Mclean RC, Guo JS.** Moisture permeability data presented as a mathematical relationship. *Build Res Inf* 1998;26:157–68.
- [73] **Collet F, Pretot S.** Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content. *Constr Build Mater* 2014;65:612–9.
- [74] **Evrard A.** Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials. Ecole polytechnique de Louvain, 2008.
- [75] **Magdalena L, Gualtieri MR.** Full quantitative phase analysis of hydrated lime using the Rietveld method. *Cem Concr Res* 2012;42:1273–9.
- [76] **Nguyen TT.** Contribution to the study of mix design and process of pre-cast building elements made of lime and hemp concrete. Thèse de doctorat. Université de Bretagne Sud, 2010.
- [77] **Les règles professionnelles d'exécution des ouvrages en béton de chanvre-** Règles techniques n.d. <http://www.lemoniteur.fr/185-regles-techniques/article/actualite/18683864-beton-de-chanvre-des-regles-professionnelles-validees-par-l-aqc> (accessed July 12, 2014).
- [78] **Othmen I, Poullain P, Leklou N.** Capillary action in three hemp concretes, Johannesburg, South Africa: IOS Press Ebooks; 2014, p. 1358–63.
- [79] **Brunauer S, Emmett PH, Teller E.** Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *J Am Chem Soc* 1938;60:309–19.
- [80] **Othmen I, Poullain Philippe, Leklou Nordine.** Réhabilitation des bâtiments en tuffeau : études numérique et expérimentale, Gerardmer: SFT; 2013, p. 8.
- [81] **Poullain P.** Étude comparative de l'écoulement d'un fluide viscoplastique dans une maquette de malaxeurs pour bétons : PIV, IRM et simulation numérique. Nantes; 2003.
- [82] **Jedrzejewski F.** Introduction aux méthodes numériques. Springer Science & Business Media; 2006.
- [83] **Ruiz JD.** Thermal Design Optimization of Multi-passage Internally Cooled Turbine Blades. ProQuest; 2008.
- [84] **Asan H.** Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials. *Build Environ* 2006;41:615–20.
- [85] **Kontoleon KJ, Eumorfopoulou EA.** The influence of wall orientation and exterior surface solar absorptivity on time lag and decrement factor in the Greek region. *Renew Energy* 2008;33:1652–64.

- [86] **Kontoleon KJ**, Theodosiou TG, Tsikaloudaki KG. The influence of concrete density and conductivity on walls' thermal inertia parameters under a variety of masonry and insulation placements. *Appl Energy* 2013;112:325–37.
- [87] **Mavromatidis LE**, EL Mankibi M, Michel P, Santamouris M. Numerical estimation of time lags and decrement factors for wall complexes including Multilayer Thermal Insulation, in two different climatic zones. *Appl Energy* 2012;92:480–91. doi:10.1016/j.apenergy.2011.10.007.
- [88] **Ozel M**. Effect of insulation location on dynamic heat-transfer characteristics of building external walls and optimization of insulation thickness. *Energy Build* 2014;72:288–95. doi:10.1016/j.enbuild.2013.11.015.
- [89] **Friedt J-M**. Auto et intercorrélation, recherche de ressemblance dans les signaux: application à l'identification d'images floutées | UNIX Garden 2011.
- [90] **Ramdani N**. Validation expérimentale et analyse de signaux: développement d'une méthodologie de comparaison modèle/mesures en thermique du bâtiment. Université Paris 12, 1994.
- [91] **Znouda E**, Ghrab-Marcos N, LEFEBVRE G. Etude des réponses harmoniques pour la caractérisation de l'inertie, France: 2008.
- [92] **Guimara A.**, de Freitas VP, Delgado J. Rising damp in walls: Evaluation of the level achieved by the damp front. *J Build Phys* 2012;6–27.
- [93] **Künzel HM**. Moisture Risk Assessment of Roof Constructions by Computer Simulation in comparison to the Standard Glaser-Method, Eindhoven: 2000.
- [94] **Krus M**. Moisture transport and storage coefficients of porous mineral building materials. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag; 1996.
- [95] **IBP team work**. Moisture Transport In Building Materials: Computer Simulation with the WUFI Model. WUFIOverview WUFI n.d. http://www.wufi.de/index_e.html.
- [96] **Jacques J**. Contributions à l'analyse de sensibilité et à l'analyse discriminante généralisée. Thèse de doctorat. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2005.
- [97] **Saltelli A**, Chan K, Scott EM. Sensitivity Analysis. New York; Chichester; Weinheim etc: Wiley-Blackwell; 2008.
- [98] **Stefanoiu AM**, Woloszyn M, Wurtz E, Jay A. Comparaison mesures–simulations et analyse de sensibilité n.d.
- [99] **Spitz C**, Mora L, Wurtz E, Jay A. Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house. *Energy Build* 2012;55:459–70.
- [100] **Hamad M AA**, Uddin MJ, Ismail AIM. Investigation of combined heat and mass transfer by Lie group analysis with variable diffusivity taking into account hydrodynamic slip and thermal convective boundary conditions. *Int J Heat Mass Transf* 2012;55:1355–62.
- [101] **Spitz C**, Woloszyn M, Buhe C, Labat M. Simulating Combined Heat And Moisture Transfert With Energyplus: Uncertainty Study And Comparison With Experimental Data. *Build. Simul.*, Chambéry France: Etienne Wurtz; 2013.
- [102] **Arrêté du 3 mai 2007** relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants. *J Off Répub Fr* 2007.
- [103] **Othmen I**, Poullain P, Leklou N. Etude numérique des techniques d'isolation: application à la réhabilitation du bâti ancien en tuffeau. 32 Èmes Rencontres Univ. Génie Civ., Orléans, France: 2014.
- [104] **Medjelakh D**, Abdou S. Impact de l'inertie thermique sur le confort hygrothermique et la consommation énergétique du bâtiment. *Rev Energies Renouvelables* 2008;11:329–41.
- [105] **Maalouf C**, Le ADT, Umurigirwa SB, Lachi M, Douzane O. Study of hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope under summer conditions in France. *Energy Build* 2014;77:48–57.
- [106] **Khelidj A**. Transferts couplés dans les bétons: apports de l'expérimentation. Volume I: Synthèse de l'activité scientifique. Saint Nazaire: 2003.

ANNEXES

A. Les propriétés des bétons de chanvre *bdc – préfa* et *bdc -PF*

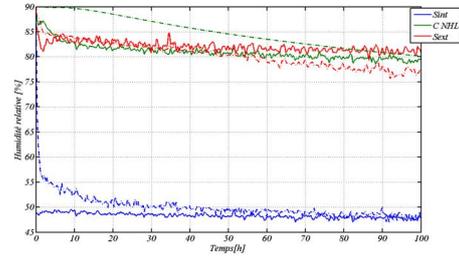
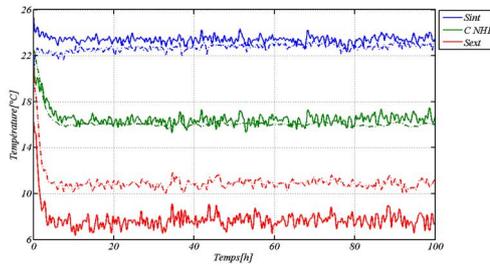
Les propriétés des bétons de chanvre

		<i>Bdc-préfa</i>	<i>Bdc-PF</i>
Masse volumique sèche	ρ [kg/m ³]	455	442
Porosité	n [m ³ /m ³]	62	64
Chaleur spécifique	C_p [J/kg.K]	2615	2398
Conductivité thermique	λ [W/m ² .K]	0,1	0,11
Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau	μ [-]	1,64	2,99
Paramètres du modèle de GAB	w_m [kg/kg]	1,228	0,01
	k	0,357	0,922
	C	0,083	43,955

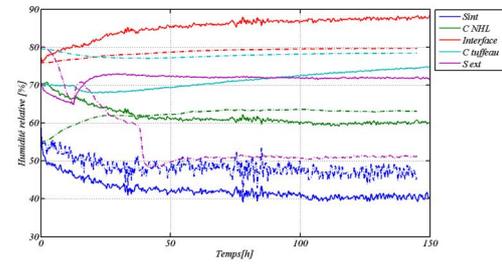
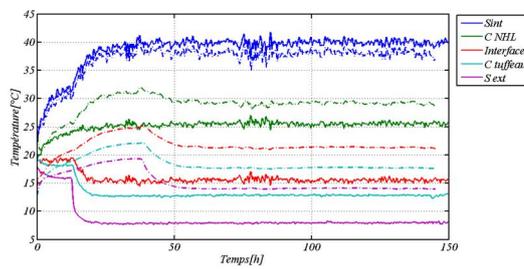
B. Variations des champs de température et d'humidité relative : comparaison avec les résultats expérimentaux

1. Cas de $b_c=6,7 \text{ m}^2\text{K/W}$

a)



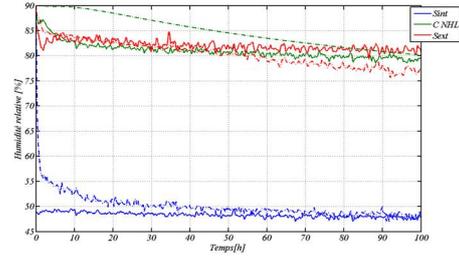
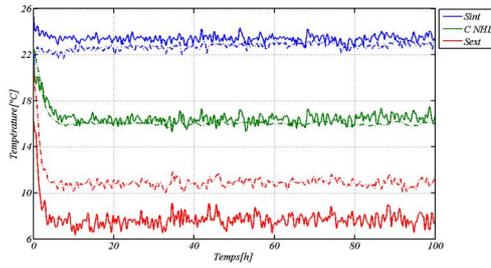
b)



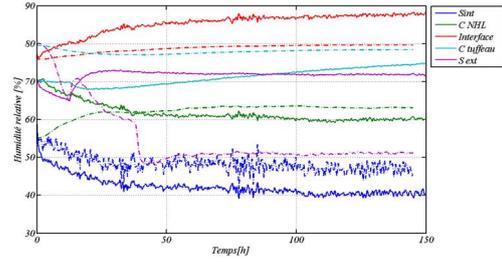
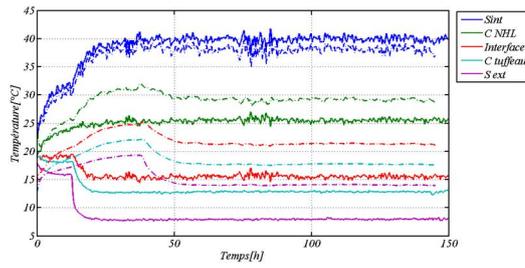
Comparaison des évolutions temporelle des champs de température et d'humidité relative entre les données expérimentales (lignes continues) et les résultats obtenues par simulations (lignes interrompues) a) pour une paroi simple en bdc- NHL et b) pour une paroi en tuileau isolée avec du bdc NHL

2. Cas de $h_e = 17 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

a)



b)



Comparaison des évolutions temporelle des champs de température et d'humidité relative entre les données expérimentales (lignes continues) et les résultats obtenues par simulations (lignes interrompues) a) pour une paroi simple en bdc- NHL, et b) pour une paroi en tuffeau isolée avec du bdc NHL

Résumé

En France, le secteur du bâtiment constitue un enjeu majeur car est responsable à lui seul d'environ la moitié de la consommation d'énergie finale et près du quart des émissions nationales de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, les réglementations concernant l'efficacité énergétique des bâtiments amènent les professionnels du bâtiment à s'interroger sur la question de l'isolation du bâti dit « ancien », en particulier, sur le bâti en tuffeau de la vallée de la Loire.

Or, il n'existe pas actuellement de réponses technologiques avérées pour la réhabilitation de bâtiments en tuffeau. Dans ce cadre, on privilégiera des solutions techniques innovantes faisant appel au chanvre par deux applications sèche et humide. En effet, des travaux de recherche récents ont souligné la performance hygrothermique intéressante de cet éco-matériau, en outre de son respect à l'environnement et la démarche du développement durable.

Dans cette thèse, trois objectifs sont ainsi visés. Le premier, a été axé sur une étude paramétrique du tuffeau et des bétons de chanvre ce qui permettra d'élaborer une base de données regroupant les propriétés nécessaires à l'évaluation de la technique d'isolation et à la modélisation numérique des transferts couplés chaleur/humidité dans les parois. Le deuxième objectif a été de tester les parois isolées sous des conditions d'humidité et de température réelles imposées avec la réalisation d'une cellule bi-climatique. Enfin le troisième objectif de ce travail fut de vérifier les résultats expérimentaux aux résultats numériques obtenus par le biais d'un logiciel de simulation bidimensionnel des transferts couplés en milieux poreux (chaleur/humidité – WUFI)

MOTS CLES: *tuffeau, béton de chanvre, transferts couplés de masse et de chaleur, isolation, modèle de Künzler/WUFI, paroi multicouche*

Abstract

In France, the building sector is a major challenge because alone is responsible for about half of the final energy consumption and nearly a quarter of national greenhouse gas emissions. In this context, the regulations concerning the energy efficiency of buildings lead professionals to wonder about the issue of the insulation of buildings said “old”, built before 1948, in particular, those of Loire Valley made with tuffeau.

However, there are no proven technology answers for the rehabilitation of buildings in limestone. In this context, we preferred use innovative technical solutions using hemp by wet and dry applications. Indeed, recent research has highlighted the interesting hygrothermal performance of this eco-material, in addition to its respect for the environment and sustainable development approach.

In this PhD work, three objectives are well pointed out. The first focused on a parametric study of limestone and concrete hemp to create a database of properties necessary for the evaluation of the insulation technique and numerical modeling of coupled heat and moisture transfer in the walls. The second objective was to test the insulated walls under real relative humidity and temperature conditions imposed within a bi-climatic device. Finally, the third objective was to verify the experimental results with the numerical results obtained through two-dimensional software in porous media (heat / moisture - WUFI)

KEY WORDS: *tuffeau, hemp concrete, coupled heat and moisture transfer, insulation, Künzler model/WUFI, multilayer wall*