

Smart-Réno

Fiabiliser, Professionnaliser, Valoriser la Rénovation Énergétique

Premier Volet : Fiabiliser la Rénovation

*Livrable T1.5 - Calage des approches scientifiques : caractérisation
et modélisation*



F. Benmahiddine, A. Nouviaire, R. Belarbi
LaSIE La Rochelle Université -LaSIE-UMR 7356
Février 2022

Table des matières

I. Présentation de la tâche 1.5 du projet SMART RENO.....	1
I.1. Introduction.....	1
I.2. Présentation des Laboratoires.....	3
I.2.1. LaSIE	3
I.2.2. LERMAB.....	3
I.2.3. LGPM.....	4
I.2.4. LOCIE	5
I.2.5. TIPEE	5
I.3. Matériaux étudiés	6
I.3.1. Terre cuite	6
I.3.2. Terre crue / Pisé.....	6
I.3.3. Pierre dure.....	7
I.3.4. Pierre tendre.....	8
I.3.5. Torchis.....	9
I.3.6. OSB.....	9
I.3.7. Argilus	10
I.3.8. Pare-pluie.....	11
I.3.9. Bois ancien.....	11
I.3.10. Béton cellulaire (LGPM).....	12
I.3.11. Polystyrène expansé	12
I.3.12. Laine de bois.....	13
II. Descriptif et protocoles des essais à réaliser	13
II.1. Caractéristiques hydriques.....	13
II.1.1. Isothermes d'enveloppe.....	13
II.1.2. Isothermes intermédiaires	15
II.2. Coefficient de diffusion	16
II.2.1. Coupelles standards	17
II.2.2. Face arrière.....	20
II.2.3. Coupelles améliorées	25
II.2.4. Croiser les conditions opératoires T et HR entre laboratoires.....	27
II.3. Caractéristiques thermiques.....	29
II.3.1. Conductivité thermique	29
II.3.2. Effusivité thermique.....	31
II.3.3. Capacité thermique.....	32

II.3.4. Diffusivité thermique	32
II.4. Perméabilité	32
II.4.1. Perméabilité intrinsèque air	32
II.4.2. Perméabilité relative liquide	35
III. Résultats et inter-comparaison expérimentale	38
III.1. Terre cuite	38
III.1.1. Isothermes de sorption	38
III.1.2. Coefficient de diffusion	42
III.1.3. Caractéristiques thermiques	43
III.2. Terre crue	46
III.2.1. Isothermes de sorption	46
III.2.2. Coefficient de diffusion	49
III.2.3. Caractéristiques thermiques	51
III.3. Pierre dure.....	56
III.3.1. Isothermes de sorption	56
III.3.2. Coefficient de diffusion	60
III.3.3. Caractéristiques thermiques	62
III.4. Pierre tendre.....	64
III.4.1. Isothermes de sorption	64
III.4.2. Coefficient de diffusion	66
III.4.3. Caractéristiques thermiques	66
III.5. Torchis	68
III.5.1. Isothermes de sorption	68
III.5.2. Coefficient de diffusion	72
III.5.3. Caractéristiques thermiques	74
III.6. OSB	77
III.6.1. Isothermes de sorption	77
III.6.2. Coefficient de diffusion	80
III.6.3. Caractéristiques thermiques	82
III.7. ARGILUS	85
III.7.1. Isothermes de sorption	85
III.7.2. Coefficient de diffusion	90
III.7.3. Caractéristiques thermiques	92
III.8. PARE-PLUIE	95
III.8.1. Isothermes de sorption	95
III.8.2. Coefficient de diffusion	99

III.8.3. Caractéristiques thermiques	101
III.9. BOIS ANCIEN	101
III.9.1. Isothermes de sorption	101
III.9.2. Coefficient de diffusion	105
III.9.3. Caractéristiques thermiques	106
III.10. BETON CELLULAIRE	110
III.10.1. Isothermes de sorption.....	110
III.10.2. Coefficient de diffusion	112
III.11. Polystyrène expansé	113
III.11.1. Coefficient de diffusion	113
III.12. LAINE DE BOIS	114
III.12.1. Isothermes de sorption.....	114
III.12.2. Coefficient de diffusion	116
III.13. Analyse des mesures de perméabilité (tous les matériaux).....	117
III.13.1. Rappels sur la notion de perméabilité (adapté de).....	117
III.13.2. Synthèse des mesures	119
III.13.3. Analyse des mesures.....	121
IV. Conclusions	123
IV.1. Isothermes de sorption.....	123
IV.1.1. Comparaison des méthodes	123
IV.1.2. Comparaison des matériaux	124
IV.1.3. Effet de la température sur les isothermes de sorption	126
IV.2. Coefficient de diffusion	126
IV.2.1. Effet de la méthode CS. Vs. FA	126
IV.2.2. Effet du matériau.....	127
IV.2.3. Autres effets	128
IV.3. Caractéristiques thermiques	129
IV.4. Perméabilité.....	134
V. Annexes	134
V.1. Face arrière	134
V.1.1. Mesures LERMAB	134
V.1.2. Mesures LGPM	140
V.1.3. Mesures LOCIE.....	141
V.2. Coupelle standard.....	143
V.2.1. Mesures TIPEE.....	143
V.2.2. LOCIE	153

V.2.3. LASIE	155
V.3. Coupelle améliorée	155
V.3.1. LGPM.....	155
V.3.2. LASIE	156

I. Présentation de la tâche 1.5 du projet SMART RENO

I.1. Introduction

Le présent rapport synthétise l'ensemble des résultats des investigations expérimentales et numériques réalisées dans le cadre de la tâche 1.5 intitulée : « Calage des approches scientifiques: caractérisation et modélisation » du volet 1 (Fiabiliser la Rénovation) du programme SmartRéno « Fiabiliser, Professionnaliser, Valoriser la Rénovation Energétique » financé par le Ministère de l'environnement et la transition écologique dans le cadre du dispositif des Certificats d'Économies d'Énergie (CEE). Il constitue le livrable de cette sous tâche. Pour rappel, le principal objectif fixé du volet 1 est d'analyser les défauts des systèmes d'isolation dans le domaine de la construction et d'en évaluer expérimentalement leurs impacts. Pour cela, la démarche qui a été retenue a consisté, d'une part, à établir un catalogue exhaustif des défauts les plus courants, d'en identifier les causes, d'en mesurer les conséquences à travers des investigations numériques et expérimentales. Des procédures de contrôle qui permettront de les éviter ont été, d'autre part, proposées.

Il est, cependant, important de mentionner que la principale barrière de l'utilisation des matériaux innovants durables et ceux utilisés dans la construction et la réhabilitation est la méconnaissance de leurs propriétés et de leurs réponses aux différentes sollicitations climatiques. Ainsi, la présente tâche 1.5, qui consiste à caractériser 12 matériaux au sein de 5 laboratoires partenaires du projet en question, à savoir : LaSIE, LERMAB, LGPM, LOCIE et Tipee, s'avère primordiale pour collecter les informations utiles aux différents acteurs de la construction et enrichir la base de données relative aux propriétés des matériaux.

Il est important de noter que chaque matériau étudié a été préparé par un laboratoire et fourni aux autres partenaires de façon à garantir la standardisation des échantillons. La caractérisation expérimentale a concerné 9 propriétés (isothermes de sorption d'enveloppes, boucles d'isothermes de sorption intermédiaires, perméabilité à l'air, perméabilité relative liquide, conductivité thermique, capacité calorifique, coefficient de diffusion par (i) la méthode des coupelles standard, (ii) par la méthode de la face arrière et enfin (iii) par la méthode des coupelles modifiées) qui ont été évaluées dans les laboratoires des partenaires impliqués.

L'ensemble des propriétés mesurées serviront d'une part, à enrichir les bases de données relatives à ces matériaux en termes des propriétés de transferts et de stockage de chaleur et d'humidité, et d'autre part, à alimenter les investigations entreprises dans le cadre de la tâche 1.6 ayant pour objectif le développement d'outils pratiques pour l'évaluation des indicateurs du risque hygrothermique.

Dans ce rapport, nous avons synthétisé l'ensemble des résultats obtenus suivant la répartition des tâches comme décrite dans le tableau prévisionnel ci-dessous, entre les différents partenaires.

I.2. Présentation des Laboratoires

I.2.1. LaSIE

En chiffres : 170 personnes dont 70 Enseignants chercheurs et Chercheurs permanents, 20 personnels technique et administratif, 60 doctorants et 20 postdoctorants.

Chiffre d'affaires : 3.5 M€ réparti principalement : Contrats nationaux, internationaux et Contrats Industrie.

Partenariat avec le CSTB : Convention cadre depuis 2014.

2 Laboratoire Commun EDF-CNRS-La Rochelle Université : **4evLab** : Laboratoire pour l'Efficacité Energétique et Environnementale de l'Enveloppe et des Villes (depuis 2016).

RupeeLab CNRS Tipee SA LaSIE (depuis 2020).

Le LaSIE réunit un large spectre de compétences avec des approches intégrées depuis l'échelle atomique jusqu'au matériau, au bâti et son environnement à différentes échelles de temps et d'espace. Elle établit un continuum du développement d'outils mathématiques aux applications et dépôts de brevets, en passant par des modèles et simulations numériques et expérimentales.

Les thématiques de recherche du LaSIE dans le domaine du bâtiment et villes durables couvrent principalement :

- ✓ Bâtiment et Environnement (Interaction micro-climat urbain bâtiment, traitement des surfaces urbaines et réduction des îlots de chaleur urbains, qualité de l'eau drainée),
- ✓ Qualité des environnements intérieurs (ventilation, QAI, transferts couplés, simulation et contrôle des écoulements, acoustique, ACV,),
- ✓ Transferts de chaleur et de masse dans les matériaux et les enveloppes du bâtiment (modélisation multi physique, transferts d'humidité, parois multifonction, durabilité des matériaux de parois),
- ✓ Caractérisation expérimentale des propriétés Microstructurale, Mécanique, Thermique, Hydrique des matériaux, prise en compte du vieillissement (de l'âge),
- ✓ Comportement hygro-morphique des matériaux biosourcés,
- ✓ Durabilité et résilience des matériaux de construction et élaboration de matériaux à faible impact environnemental,
- ✓ Utilisation rationnelle de l'énergie dans les bâtiments et intégration des énergies renouvelables (modélisation, développements de systèmes de conditionnement innovants).

I.2.2. LERMAB

Le LERMAB (Laboratoire d'Etude et de recherches sur le Matériau Bois) est un laboratoire de l'Université de Lorraine (EA 4370) rattaché au centre INRAE de Nancy-Lorraine sous forme d'USC. Le laboratoire compte un peu plus d'une quarantaine de permanents dont une trentaine d'enseignants-chercheurs (CNU 31, 32, 60, 62, 64) et une trentaine d'étudiants (thèse ou post-doc). Misant sur des compétences scientifiques variées telles que la biologie, la chimie, le génie des procédés, la physique, la mécanique et le génie civil, le laboratoire développe des

recherches en relation avec le bois et les fibres naturelles, allant de l'échelle moléculaire jusqu'au niveau macroscopique du matériau voire des structures bois. Il est structuré par trois champs d'investigation en étroite interaction : Matériau (Physico-chimie des polymères / Chimie du bois et procédés de préservation / Valorisation chimique de la biomasse), Énergie et Procédés (Énergétique du bâtiment / Procédés de valorisation / énergétique biomasse), Mécanique des structures et Ingénierie (Fabrication et production / Construction bois).

1.2.3. LGPM

Le laboratoire LGPM (CentraleSupélec) intervient sur deux champs d'investigation en étroite interaction : le Génie des Procédés et les Matériaux. Modélisation, simulation et expérimentation sont les mots clés communs aux différents thèmes de recherche.

Cette complémentarité permet de partir de la compréhension des phénomènes microscopiques pour aboutir à la simulation et à l'optimisation et à l'intensification des procédés de transformation et d'élaboration. Notre savoir-faire est, en particulier, appliqué aux aspects durables des procédés (par exemple, économies de matière et d'énergie) et aux bio-procédés (utilisation de ressources renouvelables).

Le laboratoire est présent sur deux sites d'égale importance : le campus de Gif-sur-Yvette et le campus recherche de Pomacle (CEBB) à une vingtaine de kilomètres de Reims.

Le laboratoire est structuré en trois équipes de recherche :

Matériaux et biomatériaux

- Métaux, bois et matériaux biosourcés
- Procédés d'élaboration et de transformation
- Matériaux réactifs et bioactifs

Chimie et procédés séparatifs

- Extraction liquide-liquide, contacteurs à membrane ;
- Transport et dépôt de particules, filtration ;
- Chromatographie analytique et préparative

Bio-procédés

- Compréhension des phénomènes physicochimiques et biologiques,
- Modélisation multi échelle, mise en œuvre et contrôle commande de bioréacteurs
- Levures, bactéries, microalgues, champignons, consortia
- Production et purification de molécules d'intérêt

Les compétences du LGPM mobilisées dans le projet Smart-Réno concernent principalement :

- Une expertise en matériaux biosourcés, notamment du bois, utile pour la préparation des échantillons,
- La formulation et la simulation numérique des transferts couplés dans les matériaux hygroscopiques, notamment en mode identification pour analyser les données expérimentales,

- Une spécialisation du laboratoire, en expérimentation et en modélisation, sur les phénomènes dépendant de l'histoire du matériau (hystérésis de sorption, effet de non-équilibre local)
- Un parc de dispositifs expérimentaux originaux, conçus, réalisés et instrumentés au laboratoire (mesures diffusivité par mesure de l'humidité relative en face arrière, mesure de perméabilité au gaz, isotherme de sorption à l'aide d'une balance à suspension magnétique),
- Un parc complet de dispositifs plus classiques (DVS, calorimètre, conductimètre, ATG-DSC, microscopie optique, microscopie électronique, nanotomographie).

1.2.4. LOCIE

Le LOCIE est une unité mixte de recherche UMR 5271 – Université Savoie Mont Blanc et CNRS travaillant dans les sciences de l'ingénierie et des systèmes. Ses activités sont résolument orientées vers des domaines d'application à forts enjeux scientifiques, technologiques et sociétaux : bâtiment et énergie durables. Le LOCIE est également un laboratoire de recherche amont de l'Institut National de l'Énergie Solaire (INES) implanté sur le campus de Savoie Technolac. Il est composé d'environ 70 membres, dont une trentaine de doctorants.

Le LOCIE s'appuie sur une diversité scientifique qui couvre trois grands secteurs :

- l'énergie
- l'environnement
- le bâtiment

Cela se traduit par des compétences relatives sur :

- le génie des procédés,
- l'énergétique, la thermodynamique,
- la thermique du bâtiment,
- la mécanique et les matériaux.

A cela s'ajoutent des compétences méthodologiques en matière de conception, de modélisation, et d'optimisation.

Le projet Smart-reno implique plusieurs chercheurs qui font partie du thème BASE : un des trois thèmes scientifiques du laboratoire. Les actions développées dans ce thème concernent les éléments d'enveloppe et de structure du bâtiment. Le thème s'attache à la compréhension des réponses thermiques, mécaniques, hydriques d'éléments d'enveloppe et de structure d'un bâtiment neuf ou existant comportant en particulier des matériaux non-conventionnels et multifonctionnels.

1.2.5. TIPEE

La plateforme TIPEE est un spin-off de l'Université de La Rochelle (2012-2016) avant d'obtenir son statut de SAS en Juillet 2016. L'entité comporte un laboratoire d'essais pour tester les produits d'enveloppe du bâtiment avec pour compétences principales :

- Mesure des propriétés thermiques des matériaux
- Mesure de perméabilité à la vapeur d'eau

- Mesure des propriétés optiques des matériaux
- Étude de la qualité des environnements intérieurs

Tipee dispose d'une accréditation par le COFRAC (NF EN ISO/CEI 17025) depuis 2018 sur l'un des essais prévus dans le Projet Smart Réno (attestation N° 1-6331 Essais Physiques Bâtiment et Génie Civil, Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau selon NF EN ISO 12572). Celle-ci est la preuve de la compétence technique du laboratoire dans un domaine d'activités clairement défini et du bon fonctionnement dans ce laboratoire d'un système de management adapté. En parallèle, Tipee développe des moyens d'essais à l'échelle quasi réelle et en climat réel.

I.3. Matériaux étudiés

I.3.1. Terre cuite

La terre cuite étudiée dans le cadre de ce projet a été fournie par « Labrouche Antiquaire de Matériaux ». Il s'agit d'un lot de briques anciennes de dimensions (10×10×5) cm. La découpe a été réalisée par le biais d'une scie à eau pour les échantillons prismatiques et d'une carotteuse avec bâti pour les échantillons cylindriques.

Laboratoire	LOCIE	LERMAB	LASIE
Echantillon(s)			/
Fournisseur	LASIE		/
Conditionnement /Séchage	58% HR	/	Séchage en étuve ventilée à 40°C
Teneur en eau (%)		0.4	1.59
Masse volumique (kg/m ³)	1736	1736	1752.5
Géométrie	Isotrope	Isotrope	Isotrope
Etat de surface	Moyenne ; bords abimés (quelques échantillons)	Moyenne, présence de gros pores à la surface ; variabilité entre les échantillons en termes de couleur ; une face plus lisse (propre) que l'autre	Hétérogène
Etat mécanique	Bon	Bon	

Tableau I-1. Caractéristiques de la terre cuite

I.3.2. Terre crue / Pisé

La terre crue utilisée est celle provenant de la construction d'un bâtiment en Pisé dans le quartier de Confluence à Lyon. Elle a été tamisée à 5 mm. Le conditionnement /séchage a été réalisé à

58% d'humidité relative. La masse volumique de ce matériau est de 1977 kg/m^3 . Ce dernier présente une surface rugueuse avec la présence de cailloux de différents diamètres sur les faces.

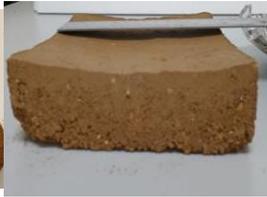
Laboratoire	LOCIE	LERMAB	LASIE
Echantillon(s)			
Fournisseur	LOCIE		
Conditionnement /Séchage	58% HR		Séchage en étuve ventilée à 40°C
Teneur en eau (%)	/	0.75	0.82
Masse volumique (kg/m^3)	1977	2034	1763.3
Géométrie	Isotrope	Isotrope	Isotrope
Etat de surface	Surface rugueuse, présence de cailloux de différents diamètres sur les faces	Surface rugueuse, présence de cailloux de différents diamètres sur les faces	Concavité centrale, bords abimés
Etat mécanique	Friable	Friable	Friable

Tableau I-2. Caractéristiques de la terre crue.

1.3.3. Pierre dure

La pierre dure a été fournie par « SAS Rouvèreau Environnement : *Les pionniers Rochelais de l'environnement* ». Ce matériau est caractérisé par sa forte dureté et sa large hétérogénéité. Les blocs de pierres ont été livrés en vrac et la découpe d'échantillons selon les dimensions souhaitées par les différents partenaires du projet a été réalisée au laboratoire en utilisant une scie à eau.

Laboratoire	LOCIE	LASIE
Echantillon(s)		
Fournisseur	LASIE	
Composition		
Conditionnement /Séchage	58% HR	Séchage en étuve ventilée à 40°C
Masse volumique (kg/m^3)	2560	2807.7
Géométrie	Isotrope	Isotrope
Etat de surface	Moyenne ; surface n'est pas plane à 100%	Bords abimés
Etat mécanique	Bon	Ebréché

Tableau I-3. Caractéristiques de la pierre dure.

1.3.4. Pierre tendre

La pierre calcaire tendre a été fournie par ROCAMAT, sous la dénomination Pierre de Richemont Jaune (Poitou Charente – carrière Pons). Elle est caractérisée par un aspect fond blanc à jaune clair ramagé, et un grain fin et moyen. Elle a été choisie dans un catalogue, selon les propriétés déclarées suivantes :

- Porosité ouverte : 20 / 30% (selon NF EN 1936)
- Résistance à la compression uni-axiale : $15 < R_c < 25$ Mpa
- Masse volumique apparente : 1800 à 2000 kg/m³
- Capillarité C1 : 130 à 190 g.m⁻².s^{-1/2} (NF EN 772-11)
- Capillarité C2 : 150 à 190 g.m⁻².s^{-1/2} (NF EN 772-11)

En se basant sur la classification IRSM /

Type de Roche I.S.R.M.	R _c (MPa)	Roches calcaire Classement	Dureté ¹	Porosité
Extrêmement tendre (sol)	< 1	Très tendre à tendre	1 à 3	> 32%
Très tendre	1 - 5			
Tendre	5 - 25			
Moyennement résistante	25 - 50	Demi-ferme	4 à 5	15 à 31%
Résistante	50 - 100	Ferme	6 à 7	
Très résistante	100 - 250	Dure	8 à 10	6 à 14
Extrêmement résistante	< 250	Froide	11 à 14	0 à 5

Tableau I-4. Type de Roche I.S.R.M.

Elle est utilisée en Revêtement mince (Collé, Attaché, Elévation extérieure, Bandeau et Appui extérieurs) ou en Mur massif (Elévation et Rejaillissement extérieurs, Bandeau et Appui extérieurs). Elle a été prélevée en carotte et découpée et adoucie par le fournisseur.

Laboratoire	LOCIE	LASIE
Echantillon(s)		
Fournisseur	TIPEE	
Conditionnement /Séchage	58% HR	Séchage en étuve ventilée à 40°C
Teneur en eau (%)		0.07
Masse volumique (kg/m ³)	1833	1901.3
Géométrie	Isotrope	Isotrope
Etat de surface	Bon	Fissures
Etat mécanique	Bon	

¹ Résistance offerte par un minéral à la rayure. L'échelle de Mohs classe les duretés par rapport à celles de dix minéraux tests (10 : diamant, 9 : corindon, 8 : topaze, 7 : quartz, etc.)

Tableau I-5. Caractéristiques de la pierre tendre.

1.3.5. Torchis

Le mélange de torchis sec a été fourni par l'entreprise ARGILUS. D'après la fiche technique du fournisseur, ce torchis de remplissage sec est composé de terre argileuse de Vendée (carrières ARGILUS), de sables alluvionnaires de Vendée et de paille d'orge en grande quantité. La préparation des échantillons, selon le protocole d'échantillonnage validé par les partenaires du projet SmartRéno, a été réalisée conformément aux recommandations du fournisseur. Ces recommandations spécifient la quantité d'eau nécessaire par kg d'argile sec, le temps de malaxage et de repos. Les échantillons moulés ont ensuite séché dans les conditions ambiantes de température et d'humidité relative.

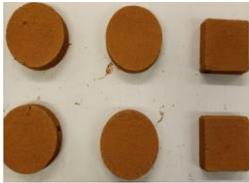
Laboratoire	LOCIE	LERMAB	LASIE
Echantillon(s)			/
Fournisseur	LERMAB		
Composition	/	Sable 79%, argile 20%, paille d'orge <1% (estimation approximative)	/
Conditionnement /Séchage	58% HR	Dans les conditions ambiantes (25°C et 45%)	Séchage en étuve ventilée à 40°C
Teneur en eau (%)		0.77	1.54
Masse volumique (kg/m ³)	1605	1698	1835.4
Géométrie	Isotrope	Isotrope	Isotrope
Etat de surface	Surface rugueuse	Surface rugueuse, une des faces est légèrement courbée	Fissures dans l'épaisseur
Etat mécanique	Friable	Bon	Friable

Tableau I-6. Caractéristiques du torchis.

1.3.6. OSB

Les panneaux KRONOPLY OSB3 d'épaisseur 15 mm ont été fabriqués par KRONOFRANCE. Les performances et les caractéristiques des panneaux OSB sont indiquées dans la fiche déclaration des performances (pièce jointe). Le découpage des échantillons d'OSB, selon le protocole d'échantillonnage validé par les partenaires du projet SmartRéno, s'est effectué par fraisage avec une machine CNC. Le conditionnement des échantillons découpés a été réalisé dans les conditions ambiantes de température et d'humidité relative.

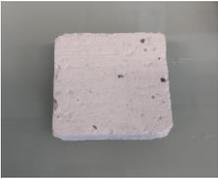
La fiche technique du matériau est donnée en annexe

Laboratoire	LOCIE	LERMAB	LASIE
Echantillon(s)			/
Fournisseur	LERMAB		
Composition	/	Longues et fines lamelles de bois, découpées dans le sens longitudinal, disposées et orientées en couches croisées (perpendiculaires) superposées et liées par une résine synthétique. Le collage est effectué à des températures et des pressions élevées	/
Conditionnement /Séchage	58% HR		Séchage en étuve ventilée à 40°C
Teneur en eau (%)		10	4.05
Masse volumique (kg/m ³)	596	605	565.9
Géométrie	Isotrope	Anisotrope	Isotrope
Etat de surface	Bonne	Bonne, présence de lamelle de différents bois (hétérogène)	Bonne
Etat mécanique	Bon	Bon	Bon

Tableau I-7. Caractéristiques de l'OSB

1.3.7. Argilus

L'enduit ISOL ARGILUS est un enduit naturel issu d'un mélange de billes de perlite / d'argile / de chaux pouzzolanique et d'adjuvants. Il peut s'appliquer sur une épaisseur maximum de 8 à 10 cm et doit être appliqué en 2 ou 3 couches de 4 cm maximum chacune. En utilisation normale, il doit être terminé par un enduit monocouche de finition. La préparation des échantillons, selon le protocole d'échantillonnage validé par les partenaires du projet SmartRéno, a été réalisée conformément aux recommandations du fournisseur. Ces recommandations spécifient la quantité d'eau nécessaire par kg d'argile sec, le temps de malaxage et de repos. Les échantillons moulés ont ensuite séché dans les conditions ambiantes de température et d'humidité relative. Sa Masse volumique apparente déclarée est de 230 kg/m³ et sa conductivité thermique déclarée à 10°C est de 0,06 W/(m.K).

Laboratoire	LOCIE	LERMAB	LASIE
Echantillon(s)			

Fournisseur	TIPEE		
Composition			
Conditionnement /Séchage	58% HR		Séchage en étuve ventilée à 40°C
Teneur en eau (%)		1.36	0.09
Masse volumique (kg/m ³)	816	841	880.4
Géométrie	Isotrope	Isotrope	Isotrope
Etat de surface	Moyenne ; présence de gros pores à la surface	Moyenne ; présence de gros pores à la surface	Bonne
Etat mécanique	Friable (poussière très fine)	Friable (poussière très fine)	Bon

Tableau I-8. Caractéristiques de l'argilus

I.3.8. Pare-pluie

Le rouleau de pare-pluie de façade SOLITEX FRONTA WA, avec un s_d déclaré de 0,05 m, a été fourni par l'entreprise Proclima. Les échantillons du pare-pluie ont été découpés au cutter conformément au protocole d'échantillonnage validé par les partenaires du projet SmartRéno. Les échantillons sont restés dans les conditions ambiantes de température et d'humidité relative.

La fiche technique du matériau est donnée en annexe

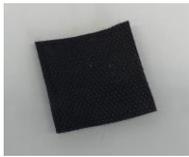
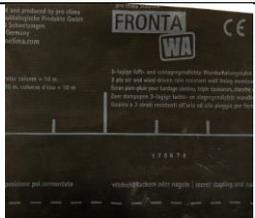
Laboratoire	LOCIE	LERMAB
Echantillon(s)		
Marque		SOLITEX FRONTA WA
Fournisseur		LERMAB
Composition		Microfibres en polypropylène
Grammage (g/m ²)		100
Epaisseur (mm)		0.45
Géométrie	Membrane	Membrane
Coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur μ		110
Valeur s_d (m)		0.05

Tableau I-9. Caractéristiques du pare-pluie

I.3.9. Bois ancien

Le bois étudié dans ce projet provient d'une poutre d'un ancien château. Ce matériau a été fourni par « SAS Rouvèreau Environnement : Les pionniers Rochelais de l'environnement ». Après avoir enlevé les bords qui ont été altérés par les intempéries, la découpe des échantillons selon les dimensions souhaitées a été réalisée en utilisant une scie de découpe de bois à lame verticale.

Laboratoire	LOCIE	LERMAB	LASIE
-------------	-------	--------	-------

Echantillon(s)			
Fournisseur	LASIE		
Composition			
Conditionnement /Séchage	58% HR	/	Séchage en étuve ventilée à 40°C
Teneur en eau (%)		11	4.24
Masse volumique (kg/m ³)	731	790	763
Géométrie	Echantillon anisotrope (mesure isotrope)	Anisotrope ; débit quelconque	Echantillon anisotrope (mesure isotrope)
Etat de surface	Fissures dans quelques échantillons	Les surfaces latérales ne sont pas planes pour quelques échantillons	Échantillons déformés au séchage, surface non lisse, fissures
Etat mécanique	Bon	Bon	

Tableau I-10. Caractéristiques du bois ancien

1.3.10. Béton cellulaire (LGPM)

Ce matériau est de marque SIPOREX avec les caractéristiques commerciales suivantes :

- Aucune émission de Composé Organique Volatil (COV) ;
- Sans formaldéhyde ;
- Sans odeur ;
- Idéal pour préserver une bonne qualité de l'air intérieur ;
- Adapté aux locaux de faible à forte hygrométrie : EA, EB, EB+ privatif et collectif, EC (DTU 20.13).

1.3.11. Polystyrène expansé

Les panneaux de polystyrène expansé utilisés dans le cadre de ce projet étaient de la marque SINIAT, modèle UNIMAT SOL SUPRA, de 20 et 40 mm d'épaisseur.

Les propriétés déclarées sont :

Épaisseur = 40 mm	Épaisseur = 20 mm
Résistance thermique: 1,15 m ² .K/W	Résistance thermique : 0,55 m ² .K/W
Coeff. de conductivité thermique (λ à 10 °C) : 0,034 W/m K	Coeff. de conductivité thermique (λ à 10 °C) : 0,034 W/m K
Classement ISOLE : 51233	Classement ISOLE: 51232
Résistance à la compression de service (Rcs) : 75 Pa	Résistance à la compression de service (Rcs) : 75 Pa
Déformation de service (ds) min : 0,7 %	Déformation de service (ds) min : 0,7 %
Déformation de service (ds) max : 1,3 %	Déformation de service (ds) max : 1,3 %
Compressibilité sous-couche (SC) : SC1a2 Ch	Compressibilité sous-couche (SC) : SC1a2 Ch
Certifications : ACERMI, A+	Certifications : ACERMI, A+

Les échantillons ont été découpés en disques à l'aide d'un fil chaud. Les diamètres ont varié selon les contraintes de chaque analyse et de chaque laboratoire.

1.3.12. Laine de bois

L'isolant à la base de fibre de bois (la laine de bois) utilisé dans le cadre du projet provient d'un projet ANR précédent (Hygrobat). Il a une masse volumique de 146 kg/m³ et une porosité de 90%. 30 échantillons de fibre de bois de différentes tailles ont été découpés au LOCIE et expédiés aux partenaires

II. Descriptif et protocoles des essais à réaliser

II.1. Caractéristiques hydriques

II.1.1. Isothermes d'enveloppe

a) LASIE

Les isothermes de sorption de la vapeur d'eau représentent l'évolution de la teneur en eau d'un matériau ($M_{\text{eau}}/M_{\text{séche}}$) en fonction de l'humidité relative de l'air à l'équilibre pour une température donnée. Les courbes d'adsorption/désorption enveloppes ont été mesurées par une méthode volumétrique en utilisant le dispositif « Belsorp Aqua3 ».

Le principe de mesure consiste à déterminer une quantité de gaz adsorbée par l'échantillon moyennant l'utilisation du nombre de mole du gaz. Initialement, le volume est rempli d'un certain nombre de mole initial donné par la loi des gaz parfaits. Après la détente de ce gaz dans la cellule contenant l'échantillon, ce dernier se met à adsorber une partie du gaz jusqu'à atteindre un état d'équilibre donné. Connaissant la pression finale dans le système, on détermine le nombre de mole restant dans la phase gazeuse et on déduit la quantité adsorbée par le matériau.

Les conditions opératoires suivies pour caractériser les différents matériaux sont récapitulées dans le Tableau II-1:

Paramètres	Détails
Dimensions des échantillons	0,5 à 1 cm ³
Température	10°C / 25°C / 40°C
Paliers d'HR pour l'adsorption	0/15/30/45/60/75/90
Paliers d'HR pour la désorption	90/75/60/45/30/15/0

Tableau II-1. Conditions opératoires pour la mesure des isothermes d'enveloppe.

Les courbes enveloppes ont été interpolées par le modèle de sorption d'Hailwood Horrobin (HH) (1946). Les trois paramètres du modèle HH en adsorption et en désorption ont été identifiés par ajustement et optimisation du R².

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$\frac{HR_b}{X} = A + B \times HR_b - C \times HR_b^2 \quad (2)$$

Où HR est l'humidité relative, X est la teneur en eau et A, B, C les paramètres de forme de la courbe.

b) LERMAB

Dans le cadre de ce travail, deux types de DVS (*dynamic vapour sorption*) ont été utilisés selon l'hétérogénéité du matériau caractérisé. Elles permettent de suivre la masse d'un échantillon placé dans une enceinte régulée en température et en pression partielle de solvant (HR pour l'eau). Le passage à la condition suivante est réalisé selon le critère d'équilibre choisi. La température a été fixée à 25°C alors que l'humidité relative croît de 0% à 90 % par palier de 15%, puis elle décroît de 90% à 15% par palier de 15%, enfin elle croît à 90% pour caractériser la courbe intermédiaire. Pour chaque matériau, une répétition a été réalisée pour s'assurer de la reproductibilité.

La première est une macro DVS, le V-GA de la société *Instruquest*. La capacité maximale de la balance est de 220 grammes. Dans ce travail, elle a été utilisée pour l'OSB et pour le torchis. Typiquement, la mesure a été effectuée sur des échantillons d'environ 100g. Le critère d'équilibre a été fixé pour cette macro-DVS à 0.005% qui correspond à la variation de la masse pour un intervalle de temps choisi (30min ici) divisée par la masse initiale de l'échantillon après la phase de conditionnement (masse anhydre).

La seconde est une DVS *Intrinsic* de la société SMS. Elle a été utilisée sur tous les autres matériaux de ce projet. Elle permet de suivre la masse d'un échantillon d'1g avec une variation de masse jusqu'à 150mg. Typiquement, la mesure a été effectuée sur des échantillons d'environ 50mg. Le critère d'équilibre dm/dt a été choisi à 0,0005% par minute.

Les courbes enveloppes (adsorption et désorption entre les valeurs extrêmes du cycle 0% - 90%-0%) ont été interpolées par le modèle de sorption d'Hailwood Horrobin HH (1946). Les trois paramètres du modèle HH en adsorption et en désorption ont été identifiés par la méthode des moindres carrés (voir équation 1).

c) LGPM

Les isothermes de sorption ont été mesurées à l'aide d'un système DVS (Dynamic Vapour Sorption) IGASORP (HIDEN ISOHEMA). Suivant le protocole mis en place avec l'ensemble des partenaires, la température d'analyse a été fixée à 25 °C. L'humidité relative a varié de 15 à 90% et puis de 90% à 15% par paliers de 15%.

A partir des résultats expérimentaux, les paramètres des modèles de sorption d'Hailwood Horrobin (HH) (3) et Guggenheim, Anderson, de Boer (GAB) (4) ont été identifiés pour chaque matériau en adsorption et en désorption.

$$\frac{RH}{X} = A + B \cdot RH - C \cdot RH^2 \quad (3)$$

$$X = \frac{C \cdot K \cdot M_m \cdot RH}{(1 - K \cdot RH)[1 - K \cdot RH + C \cdot K \cdot RH]} \quad (4)$$

Où RH est l'humidité relative (valeur absolue) et X est la teneur en eau (valeur absolue). A , B et C sont les paramètres du modèle HH et C , K et M_m ceux du modèle GAB.

d) LOCIE

Les mesures des isothermes enveloppes sont obtenues par analyses thermogravimétriques (ATG) couplée à un générateur d'humidité. Les appareils utilisés sont une ATG-DSC 3+ de la société Metler-Toledo® couplé au générateur d'humidité MHG de chez ProUmid®.

La méthode utilisée est un isotherme à 25°C avec des paliers d'humidité allant de 0%HR à 75%HR par pas de 15%. La masse est mesurée en quasi continue (intervalle de mesure de 180s) au sein d'une nacelle de pesée en grillage d'inox afin de laisser le plus de surface d'échantillon en contact avec l'humidité ambiante du four. L'échantillon est broyé afin d'améliorer l'homogénéisation du matériau en vue d'un prélèvement d'environ une centaine de milligrammes pour l'analyse.

Il s'agit ici des mesures exploratoires avec un appareil destiné à la base à d'autres types de mesures. Lors de l'utilisation, nous nous sommes heurtés aux limites de l'appareil, en particulier en termes de plage possible de l'humidité relative.

II.1.2. Isothermes intermédiaires

a) LASIE

La mesure des isothermes intermédiaires a été réalisée à l'aide d'un dispositif de type DVS : l'analyseur SPS de la société ProUmid.

Le principe de mesure de cette dernière repose sur une méthode gravimétrique. L'essai consiste à exposer les échantillons, dans la chambre climatique de l'appareil, à différents paliers d'humidité relative et à une température constante selon les conditions opératoires récapitulés dans le Tableau II-2. Les échantillons sont pesés régulièrement jusqu'à stabilisation de la masse (critère d'équilibre à 0.001% sur 60 minutes) pour chaque palier d'humidité. Les échantillons sont de l'ordre de 1 à 5 g (sauf pour le pare pluie dont la masse volumique est très faible, le prélèvement est de 0.1 g).

Paramètres	Détails
Dimensions des échantillons	1 à 2 cm ³
Température	25°C
	0-90
	(90)-75-60-45-30-15
	(15)-30-45-60-75
	(75)-60-45-30
	(30)- 45-60
	(60)-55-50-45
	(45)-50-55
	(55)-50
Paliers d'humidité relative	

Tableau II-2. Conditions opératoires pour la mesure des isothermes intermédiaires.

b) LERMAB

Après la caractérisation des courbes enveloppes d'adsorption-désorption, une adsorption intermédiaire a été effectuée à la suite avec une variation de HR de 15% à 90%, par palier de

15%. Cette courbe a ensuite été utilisée pour identifier les paramètres alpha et bêta du *Gripped box model* (Rémond et al. 2018) pour caractériser l'hystérésis des isothermes de sorption.

c) LGPM

A la suite des étapes d'adsorption et de désorption des isothermes enveloppe, deux courbes intermédiaires ont été effectuées. Une première en adsorption de 15 à 60% d'humidité relative et la deuxième en désorption de 60 à 15%.

d) LOCIE

Compte tenu des difficultés expérimentales et de la longueur nécessaire des expérimentations, cette partie n'a pas pu être effectuée.

II.2. Coefficient de diffusion

Les laboratoires ont adopté trois méthodes de caractérisation expérimentale : face arrière, coupelle standard et coupelle améliorée afin de déterminer le coefficient de diffusion, aussi appelé perméabilité à la vapeur par la communauté de thermique du bâtiment (NF EN ISO 9346). Celle-ci a été déterminée à partir des mesures soit par une formulation analytique, soit avec l'aide de la simulation numérique (mesure par méthode inverse). Dans cette partie, nous présentons les protocoles expérimentaux utilisés par les laboratoires pour la détermination du facteur de résistance à la diffusion de vapeur m (-). Pour rappel, il intervient dans l'expression de la densité de flux de vapeur à travers le matériau par diffusion (loi de Fick):

$$\bar{J} = -D_v / \mu \cdot \overline{\text{grad}}(\rho_v) \quad (5)$$

Où D_v est le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) et m le facteur de résistance à la diffusion (-).

Ce flux de vapeur d'eau est souvent exprimé par rapport au gradient de pression partielle de vapeur. Le coefficient de diffusion (flux divisé par le gradient de densité de vapeur), également appelé perméabilité à la vapeur :

$$d_p = D_v \times M_v / (m \times RT) \quad (6)$$

où d_p est la perméabilité à la vapeur du matériau ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$), M_v est la masse molaire de vapeur ($0.01802 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$), R la constante des gaz parfait et D_v est le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

La mesure de la perméabilité à la vapeur de douze matériaux a été réalisée par cinq laboratoires adoptant trois méthodes différentes, conformément au tableau suivant :

MATERIAUX	LERMAB	LASIE	LGPM	LOCIE	TIPEE
ARGILUS	FA	x	FA	CS	CS
BETON CELLULAIRE (BC)	FA	CA	FA/CA	FA	x
BOIS ANCIEN: CHENE (BA)	FA	x		x	CS
FIBRE DE BOIS (FDB)	FA	x	FA	FA	x

OSB	FA	x	FA	CS	CS
PARE PLUIE	FA	x	x	CS	CS
PIERRE DURE	FA	x	FA	CS	CS
PIERRE TENDRE	x	CS	x	x	CS
POLYSTYRENE EXPANSE (PSE)	FA	x	FA	x	x
TERRE CRUE	FA	CS	x	x	CS
TERRE CUITE	FA	CS	FA	x	CS
TORCHIS	FA	CS	FA	FA	CS

Tableau II-3. Matériaux et méthodes de mesure de la perméabilité à la vapeur préconisées par laboratoire (avec FA : Face arrière ; CS : Coupelle Standard et CA : Coupelle Améliorée, x : mesure non prévue)

II.2.1. Coupelles standards

a) LaSIE

La perméabilité à la vapeur d'eau représente une caractéristique indispensable dans la caractérisation des matériaux de construction. Elle caractérise l'aptitude d'un matériau à transférer l'humidité sous un gradient de pression de vapeur une fois que l'état d'équilibre est atteint. Cette propriété a été mesurée par la méthode de la coupelle selon la norme NF EN ISO 12572 en utilisant le dispositif GraviTest[®]. L'avantage de ce dernier est l'automatisation de l'essai, notamment pour le suivi de la masse.

Afin de parvenir aux résultats souhaités, une préparation préalable adéquate est requise. Cela consiste à bien sceller le couple matériau/coupelle en utilisant un produit de scellement proposé dans la norme NF EN ISO 12572 afin d'éviter d'éventuelles fuites de la vapeur d'eau entre la coupelle et le matériau.

La méthode de la coupelle consiste à exposer l'échantillon à un gradient de pression de vapeur d'eau constant grâce à une solution saline saturée (à l'intérieur de la coupelle) et une chambre climatique de l'appareil (à l'extérieur de la coupelle). La différence de pression engendre un flux de vapeur allant de la haute à la basse pression. L'évaluation de ce flux se fait par des pesées régulières de l'assemblage afin de déterminer le taux de transmission de la vapeur d'eau à l'équilibre. Avant de commencer l'essais, il est nécessaire de noter l'épaisseur de la couche d'air qui sépare la solution saline et la base de l'échantillon en question afin de corriger les mesures obtenues. En effet, le flux de vapeur mesuré peut être affecté par la formation de cette couche d'air qui provoque une résistance au flux de vapeur, d'où l'intérêt de réaliser des corrections. Les conditions opératoires sont récapitulées dans le Tableau II-4:

	HR (%)			T (°C)
	Int / Ext	3 / 22	3 / 57	
/		22 / 57	22 / 93	
57 / 22		/	57 / 93	
93 / 22		93 / 57	/	

Tableau II-4. Conditions opératoires pour la mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau.

Les sels retenus pour cette expérience sont les suivants :

Gel de silice (3%) ; Acétate de potassium (22%) ; Bromure de sodium (57%) ; Ammonium dihydrogenatephosphate (93%).

b) LOCIE

La mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau consiste à imposer un gradient de pression de vapeur permanent et unidirectionnel à un échantillon d'épaisseur e . Le gradient de pression de vapeur est obtenu en utilisant une solution saline du côté inférieur de l'échantillon, imposant ainsi une humidité relative HR_{int} et en soumettant l'ensemble échantillon-cupelle à une ambiance d'humidité relative HR_{ext} différente de HR_{int} . Une fois le régime permanent établi, le flux de vapeur s'obtient par le suivi de la variation massique de l'ensemble échantillon-cupelle, en fonction du temps. On suppose que le flux de vapeur est purement diffusif et proportionnel à la différence des pressions de vapeur entre les deux faces de l'échantillon.

$$\delta_p = g_v \cdot \frac{e}{\Delta P_v}$$

L'équipement utilisé est appelé RH Box (Figure II-1). Cet appareil dispose de 2 chambres climatiques connectées par un sas. La température interne est contrôlée à 25 °C, et l'humidité est maintenue à 33% HR et 75% HR, par des solutions salines saturées de MgCl₂ et NaCl respectivement. La masse de l'échantillon est mesurée directement par la balance électronique intégrée. L'humidité et la température sont mesurées à l'aide de capteurs hygrométriques de Waranet, Solution Ltd, avec une précision de ± 2% HR et ± 0,5 ° C.



Figure II-1. Photo du dispositif RhBox

La RH Box est utilisée pour les mesures de perméabilité vapeur coupelle standard mais également pour les mesures de diffusion face arrière.

Avant les essais de perméabilité vapeur les échantillons sont tout d'abord conditionnés à 58% RH.

Deux dispositifs similaires sont utilisés (Figure II-2 et Figure II-3), l'un permettant la mesure sur des échantillons carrés de 3,3 cm de côté et l'autre sur des échantillons ronds de 7 cm de diamètre.

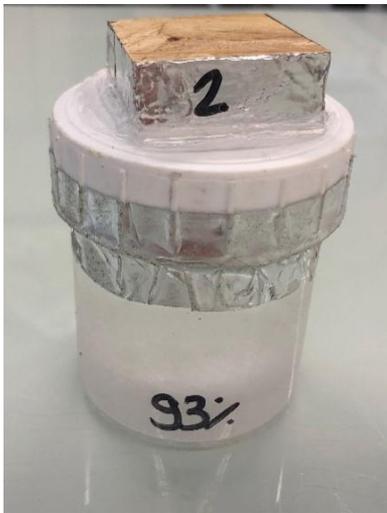


Figure II-2. Coupelle standard format 3.3cm



Figure II-3. Coupelle standard format 7cm de diamètre

33% à l'intérieur de la RH box	Solution Saline à 93%
	Solution Saline à 75%
	Silica Gel à 0%
75% à l'intérieur de la RH box	Solution Saline à 93%
	Solution Saline à 33%
	Silica Gel à 0%

Tableau II-5. Conditions de manips Rh int et Rh ext.

c) TIPEE

Cette grandeur sera évaluée en utilisant la méthode de la coupelle sèche ou humide (les normes NF EN 12086, NF EN ISO 12572 [1], NF EN ISO 7783, NF EN 1931) par le biais d'un équipement permettant une méthode automatisée (Gravitest 6400 de GINTRONIC). L'avantage de l'automatisation de l'essai et la possibilité de passer 6 échantillons de surface 25 cm² par campagne.

Sur la campagne d'essai Smart Réno, nous étudions 9 échantillons, chacun est soumis à 4 différentes humidités appliquées en coupelle sèche puis en coupelle humide. La température de conditionnement est fixée à 23°C.

Sel ou desséchant	HR coupelle	HR enceinte	Typologie	DPv
LiCl	11%	50%	Sèche	1095
		85%	Sèche	2078
Mg(NO ₃) ₂	50%	11%	Humide	1095
		85%	Sèche	983
KCl	85%	11%	Humide	2078
		50%	Humide	983
CaCl ₂	0%	11%	Sèche	309
		50%	Sèche	1404
		85%	Sèche	2387

Tableau II-6. Sels utilisés pour la mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau (coupelles standards).

Les échantillons évalués sont scellés, sur des coupelles d'aluminium rigide, à l'aide d'une cire microcristalline qui a une épaisseur d'air équivalente en résistance au transfert de vapeur d'eau vérifiée supérieure à 70 m sauf pour le pare-vapeur qui est scellé mécaniquement est donc l'étanchéité est réalisée par un mastic étanche.

Les 9 tableaux présentés dans les résultats d'essais selon la méthode de la coupelle standards indiquent les conditions d'essai en humidité relative dans les deux premières colonnes. La dimension des éprouvettes d'essai ne permet un résultat d'essai validant à partir de 5 coupelles. Cette condition est donnée par la mention Oui/Non dans la colonne « COFRAC ? ». Les valeurs présentées sont l'épaisseur d'air équivalente pour la diffusion de vapeur d'eau pour chaque coupelle, une valeur moyenne et l'écart type moyen. Si besoin, d'autres détails sur les méthodes de préparation et sur les résultats obtenus sont disponibles dans les rapports intitulés ES-PJ000229-RAD où l'identification du Radical est indiquée à droite du tableau. Les facteur de résistance à la vapeur d'eau μ [-] seront déclinés après chaque tableau.

II.2.2. Face arrière

a) LERMAB

Le LERMAB a adopté la méthode face arrière (FA) pour la détermination de la perméabilité à la vapeur. Cette méthode a été développée par Perré et al. (2015). Elle consiste à appliquer un échelon d'humidité relative sur la face avant (HR_{FAV}) d'un matériau en équilibre, à température constante, et suivre l'évolution de l'humidité relative en face arrière (HR_{FAR}). La vitesse avec laquelle HR_{FAR} tend vers HR_{FAV} nous renseigne sur le coefficient de diffusion du matériau. Cette méthode face arrière est basée sur deux approches complémentaires :

- Mesure de l'humidité relative en face arrière du matériau,
- Identification du coefficient de résistance à la vapeur à l'aide d'une méthode numérique inverse basée sur le code TransPore dans sa version 1D (Perré et Turner 1999). Ainsi, un algorithme d'optimisation ajuste les paramètres libres afin de minimiser la fonction objective définissant la différence entre les humidités relatives mesurées et prédites en face arrière du matériau jusqu'à la satisfaction du critère de convergence imposé.

• *Préparation des échantillons*

Les échantillons utilisés dans les mesures en face arrière ayant une forme cylindrique sont recouverts d'une feuille d'aluminium sur la face latérale et la face arrière et colmatés à l'aide d'une pâte adhésive afin d'avoir des transferts massiques unidirectionnels selon l'épaisseur des matériaux.

Matériaux	N° échantillon	Epaisseur	Diamètre (mm)	Densité (kg/m ³)
Argilus	1	21	72.5	790
	2	20.3	71.8	778
	3	20.6	73.2	783
Béton cellulaire (BC)	1	13.7	69.8	515
	2	13.3	69.7	531
	3	16.1	69.8	523
	1	8.1	69.8	779

Bois Ancien : Chêne (BA)	2	7.5	69.7	786
	3	8.1	69.6	757
Fibre de bois (FdB)	1	21.4	95.3	169
	2	20.6	95.4	174
	3	20.7	95.6	167
OSB	1	15.07	71.8	553
	2	15.06	71.7	555
	3	15.05	71.8	588
Pare pluie	1	0.45	20	
	2	0.45	20	
	3	0.45	20	
Pierre dure	1	12.2	74.6	2 438
	2	12.3	75	2 516
	3	13	74.6	2 544
Polystyrène expansé (PSE)	1	20	71.4	14
	2	20	71.7	14
Terre crue	1	30	70	2 062
	2	30.3	70	2 032
	3	30	69.7	2 069
Terre cuite	1	29.82	74.44	1 739
	2	28.5	74.6	1 752
	3	30.3	74.52	1 780
Torchis	1	22.4	83.4	1 673
	2	21	83.8	1 645
	3	21.5	84.7	1 637

Tableau II-7. Caractéristiques de échantillons utilisés au LERMAB

- *Dispositif expérimental de mesure en face arrière*

Le dispositif expérimental utilisé dans la mesure de la face arrière a été développé dans le cadre du projet SmartReno et notamment sur la base des travaux de thèse de Challansonnex (2019). Ce dispositif permet de soumettre huit échantillons à un échelon d'humidité relative en face avant à température constante et de mesurer l'humidité relative en face arrière et l'évolution de la masse des échantillons. Ce dispositif est composé essentiellement d'une enceinte climatique (HPP260, Memmert GmbH ; Germany) équipée d'une plateforme rotative desservant à la fois la mesure de masse et de l'humidité relative en face arrière des échantillons.

Le protocole expérimental adopté permet au dispositif de faire, pour chaque échantillon, au minimum une pesée toutes les sept minutes et une mesure de l'humidité relative en face arrière toutes les deux minutes.

Étant donné le nombre important des matériaux à caractériser dans le projet SmartReno, nous avons partagé les mesures en face arrière sur deux dispositifs expérimentaux. Les matériaux fortement hygroscopiques ont été caractérisés dans ce dispositif avec le suivi massique et les échantillons très perméables comme le pare-pluie ou faiblement hygroscopiques dans une enceinte climatique similaire mais sans carrousel et sans suivi massique.

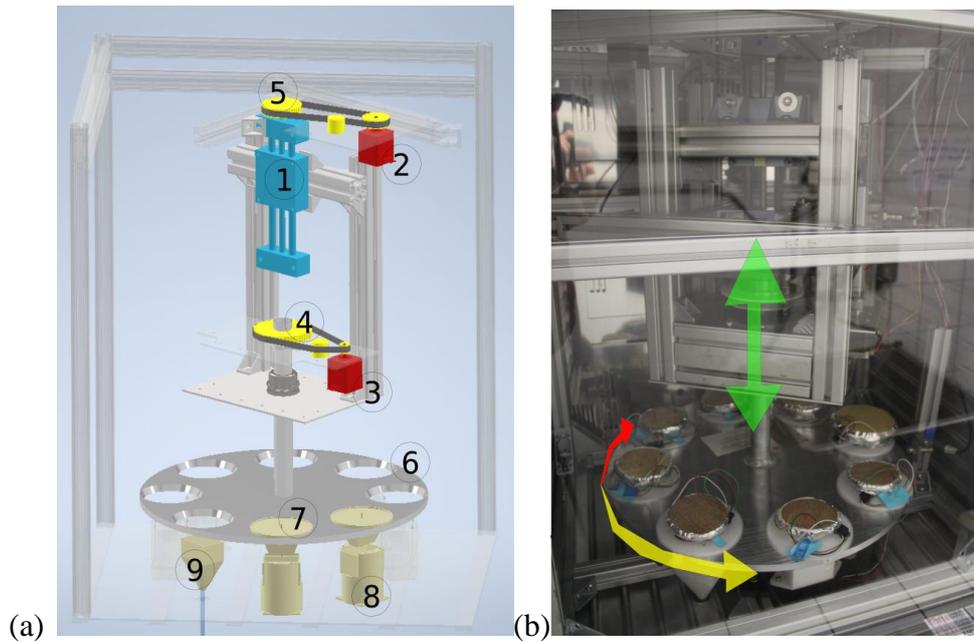


Figure II-4. Gauche : (a) représentation CAO de la machine, comprenant la table verticale (1), les moteurs pas à pas (2) et (3), les poulies et courroies synchrones (4) et (5), la couronne (6), un porte-échantillon (7), un support de lecture (8) et le panier de pesée, relié à la balance par une tige de verre (9). Droite : (b) Photographie de la machine, derrière la vitre de l'enceinte climatique, avec représentation des mouvements de rotation et de translation.

Pour chaque matériau, quatre échelons d'humidité relatives, à 25°C, ont été imposées en face avant :

	Adsorption		Désorption	
Humidité relative en face avant	25 à 50%	50 à 80%	80 à 50%	50 à 25%
Température (°C)	25			

Tableau II-8. Caractéristiques de échantillons utilisés au LERMAB Conditions opératoires de température et humidité relative utilisées au LERMAB

b) LGPM

Le LGPM a développé une nouvelle méthode de détermination du coefficient de diffusion basée sur le suivi temporel de l'humidité relative en face arrière de l'échantillon en réponse à une modification des conditions imposées et mesurées en face avant. Le dispositif expérimental et la méthode ont été décrit dans des travaux précédents (Perré et al., 2015). Il a été utilisé dans le cadre de ce projet (schéma de principe, Figure II-5).

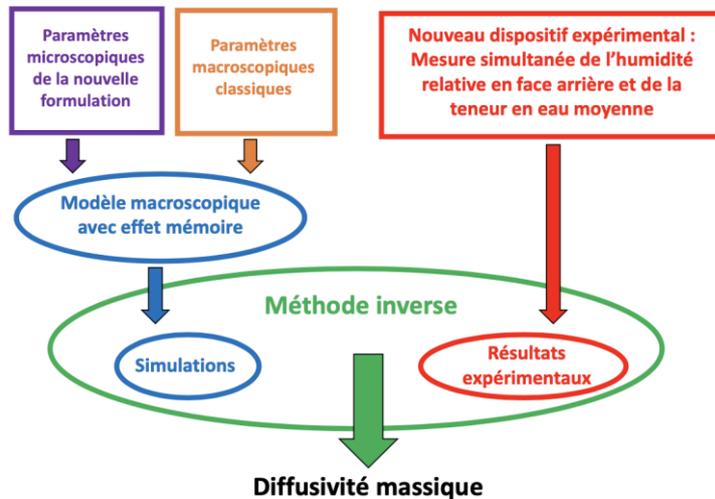


Figure II-5. – Schéma de principe de la mesure de la diffusivité massique (Challansonnex, A. (2019)).

Elle permet de caractériser plusieurs échantillons simultanément et peut déterminer la diffusivité sans atteindre le régime permanent (voir Figure II-6). Le coefficient de diffusion est obtenu par méthode inverse grâce au code numérique TransPore (Perré & Turner, 1999).

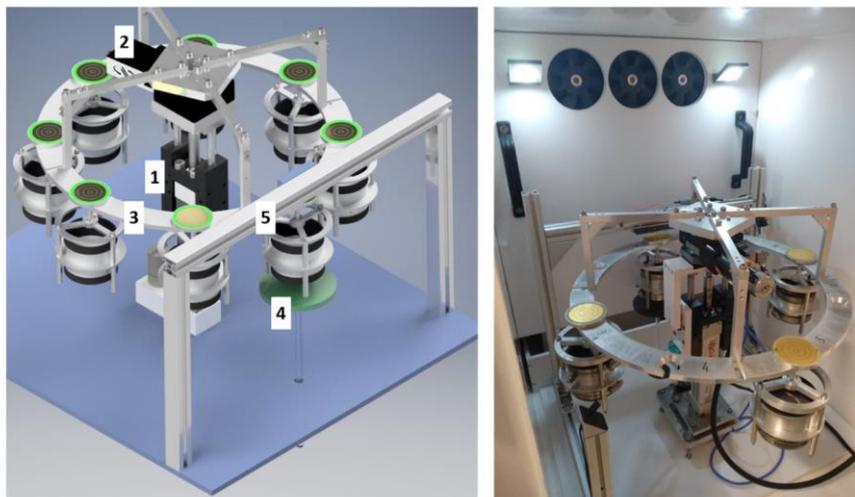


Figure II-6. – De gauche a droite : a) Vue du modèle CAO avec 1) vérin, 2) plateau tournant, 3) couronne, 4) plateau de pesée, b) Photo du dispositif dans l'enceinte climatique (Challansonnex, A. (2019)).

Pour chaque matériau, les conditions d'humidité relative imposées en face avant ont été les suivantes (mesurées à la température constante de 25 °C) :

	Adsorption		Désorption	
Humidité relative en face avant	25 à 50%	50 à 80%	80 à 50%	50 à 25%
Température (°C)	25			

Tableau II-9. Conditions opératoires de température et humidité relative utilisées au LGPM

Les caractéristiques des échantillons utilisés au LGPM pour la mesure de la perméabilité à la vapeur sont détaillés dans le Tableau II-10:

Matériaux	N° ech.	Epaisseur (mm)	Ecart type(mm)	Diamètre (mm)
Polystyrène	1	19.82	0.14	70
Torchis	1	26.99	0.18	
	2	25.67	0.53	
OSB	1	15.02	0.08	
	2	14.81	0.27	
Terre cuite	1	12.2	0.1	
	2	13.72	0.15	
Béton cellulaire	1	16.08	0.22	
	2	14.39	0.25	
Argilus	1	10.74	0.14	
	2	11.52	0.23	
Panneau de fibres	1	23.23	0.15	
Pierre dure	1	12.07	0.35	
	2	11.59	0.23	

Tableau II-10. Caractéristiques de échantillons utilisés au LGPM

c) LOCIE

Le protocole est donné pour les panneaux de fibres de bois. Ils sont équilibrés dans une boîte hermétique à 9% puis lorsqu'ils atteignent l'équilibre hygroscopique, ils sont placés dans une autre ambiance, ici 33% de HR dans la RHbox. Ils passent ensuite dans l'autre atmosphère à 75% toujours dans la RHbox et enfin ils sont remis à 33% puis 9%.

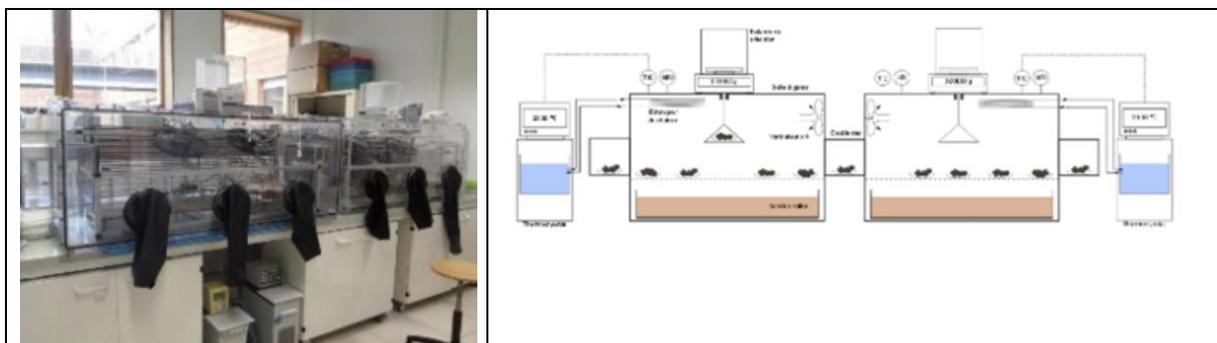


Figure II-7. Double enceinte hygrothermique du Locie (RHbox)

La simulation des transferts d'humidité 1D a été réalisée avec la librairie Python *hamopy*, puis la méthode *scipy.optimize.curve_fit* a été utilisée pour identifier les paramètres pour *fit*ter la courbe simulée à celle mesurée.

Les paramètres identifiés sont :

- Perméabilité vapeur : deux valeurs, à 25% et 75% HR
- Isotherme de sorption : trois valeurs de la pente de l'isotherme, à 25%, 50% et 75% HR.

Hypothèse : le coefficient de transfert surfacique est connu. $h = 10^{-8}$ s/m.

II.2.3. Coupelles améliorées

a) LASIE

Une méthode de coupelle améliorée a été développée sur la base de la méthode normée de la coupelle standard. L'échantillon de béton cellulaire est un échantillon cylindrique de diamètre 100 mm et de 16 mm d'épaisseur. Ce dernier est positionné au-dessus d'une coupelle dans laquelle du gel de silice a été déposé avec une couche d'air de 4 cm entre la surface de l'échantillon et le sel. Un scellement à la cire microcristalline est effectué pour assurer l'étanchéité de la coupelle. Un capteur différentiel de pression (DPS ± 250 Pa, FSM AG) est positionné comme indiqué sur le schéma de la Figure II-8. La coupelle est posée sur une balance (PCE-BT2000) afin de suivre l'évolution de la masse de la coupelle dans le temps. L'ensemble est placé dans une enceinte climatique (C-20/1000/S, CTS) réglée à 50 °C et 50 % d'humidité. En parallèle, une autre coupelle hermétique sans échantillon, étanche, remplie de gel de silice, avec un capteur interne de température et d'humidité (T_{int} , HR_{int}) a été mise en place et sert de coupelle de « contrôle ». Un capteur de température et d'humidité placé à l'intérieur de l'enceinte (T_{ext} , HR_{ext}) permet d'enregistrer les données de conditionnement. Les différents capteurs sont reliés à une centrale d'acquisition (Almemo 5690-2, Ahlbron). Les mesures (pression, température et humidité) ainsi que la pesée de la coupelle (PCE-Soft-SC-Pro) sont enregistrées toutes les 5 mn.

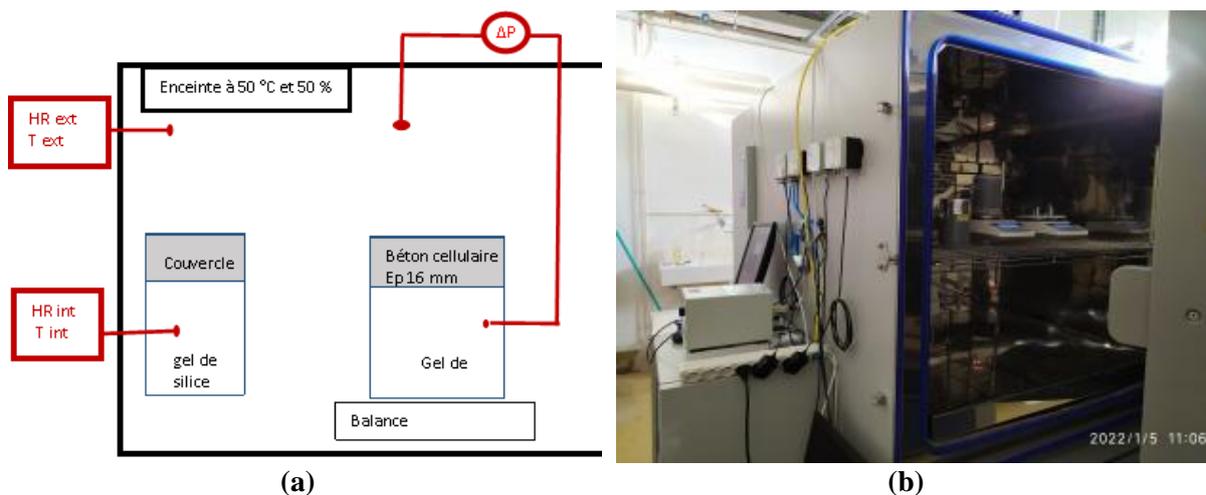


Figure II-8. (a) Descriptif schématique de l'installation de la coupelle modifiée et (b) mise en place de la coupelle modifiée au LaSIE.

b) LOCIE

L'étude expérimentale des propriétés hygrothermiques par la méthode de coupelle modifiée a été étudiée au LOCIE. On a commencé l'étude sur la fibre de bois, puis nous avons cherché à tester la terre crue, torchis et béton cellulaire.

7 échantillons de fibre de bois (FDB) ont été préparés. Des échantillons de taille 100 mm de diamètre et 25 mm d'épaisseur (Figure II-9), ont été coupés à l'aide d'une scie à ruban et une fraiseuse à commande numérique.



Figure II-9. Echantillon de fibre de bois.

Ces échantillons ont été conditionnés dans une ambiance d'humidité relative égale à 58%. Pour assurer cette valeur en humidité, une solution saline d'eau osmosée et bromure de sodium (NaBr) saturée a été préparée. Les 7 échantillons ont été conditionnés dans des boîtes à la température ambiante, jusqu'à l'équilibre.

Après la préparation des échantillons, des coupelles modifiées en ABS ont été imprimées à la taille des échantillons (même diamètre) à l'aide d'une imprimante 3D. Les échantillons et l'instrumentation ont été ensuite installés.



Figure II-10. Echantillons prêts pour les mesures.

Finalement, les échantillons avec les coupelles ont été mis dans le RH Box conditionné à 75% HR et climatisé à 25°C, et les mesures ont été lancées, comme le montre la Figure

II-11.

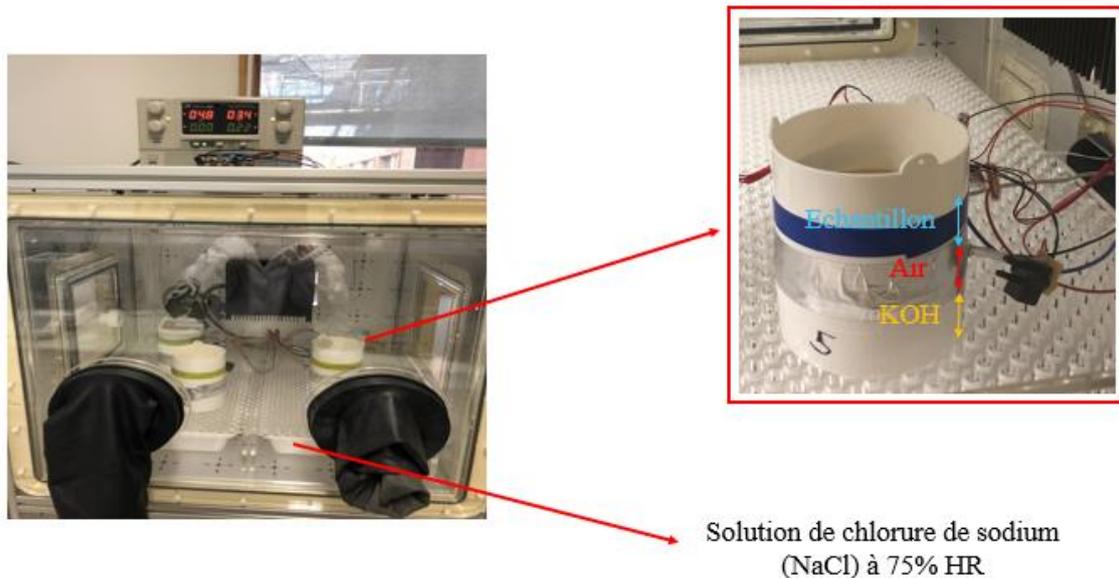


Figure II-11. Banc expérimental pour les mesures coupelle modifiée (fibre de bois).

Ce banc expérimental permet de mesurer la différence de pression entre l'air qui est au-dessous de l'échantillon (humidité relative 9%) et l'air de l'enceinte RH Box qui est en contact avec la face supérieure de l'échantillon (humidité relative 75%). Cette différence d'humidité relative génère un flux d'humidité à travers du matériau du haut vers le bas, ce qui impact la pression au-dessous de l'échantillon. !

c) TIPEE

Le développement du dispositif de la coupelle modifiée réalisé par Tipee s'est basé sur un protocole et des plans fournis par le LOCIE. Le dispositif mis en œuvre permet une mesure de la température et de l'humidité relative dans l'enceinte climatique et dans la coupelle. L'humidité relative dans la coupelle est imposée par la solution saline choisie. La différence de pression est mesurée entre l'intérieur de l'enceinte climatique et l'intérieur de la coupelle par un capteur de pression (+/-1 mBar).

Malheureusement, les différents montages effectués ont montré une problématique non-résolue de l'étanchéité de la coupelle (ou du capteur). Les fortes variations potentielles dues à l'usage du labo (ouverture/fermeture de portes, ventilation dans l'enceinte climatiques, etc) – n'ont pas permis l'obtention de mesures stabilisées.

II.2.4. Croiser les conditions opératoires T et HR entre laboratoires

Les conditions opératoires de température et d'humidité relative (HR) pour déterminer le facteur de résistance à la diffusion varient parfois entre les méthodes et entre les laboratoires en raison des outils expérimentaux et moyens techniques de chacun. Le Tableau II-11 synthétise les conditions utilisées.

Pour certains matériaux de cette étude, le facteur de résistance à la diffusion dépend de l'humidité du matériau et via l'isotherme de sorption de l'HR (Figure II-12). Lorsque ce coefficient est mesuré sur un intervalle d'humidité, un coefficient moyen est obtenu qui intègre cette dépendance sur tout l'intervalle d'humidité de l'essai.

$$\mu_{app} = \bar{\mu} = \frac{1}{HR_2 - HR_1} \int_{HR_1}^{HR_2} \mu(HR) dHR \quad (7)$$

Pour comparer les valeurs mesurées $\bar{\mu}$ d'un essai à l'autre, nous avons pris la valeur centrale de l'intervalle d'HR de l'essai pour en simplifier l'analyse. Il s'agit donc de la moyenne des HR appliquées sur les deux faces de l'échantillon pour la méthode de la CS et la moyenne des deux HR de l'échelon appliqué sur la face avant de l'échantillon pour la méthode FA. Nous voyons sur la Figure II-12 que cette estimation simple, et courante dans la communauté scientifique, n'est pas exacte puisque la valeur d'HR correspondante à $\bar{\mu}$ est légèrement décentrée de façon plus ou moins forte selon la forme de la courbe sur cet intervalle.

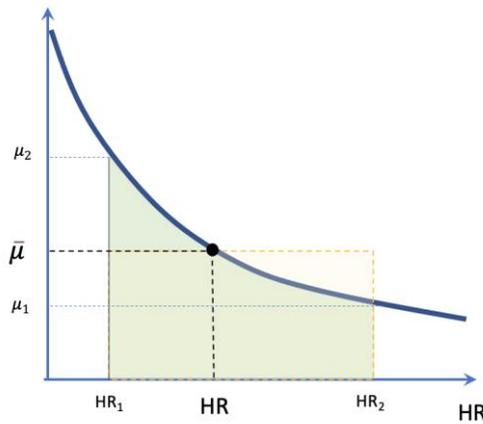


Figure II-12. Représentation schématique de la dépendance du facteur de résistance à la diffusion avec l'humidité lors d'un essai mené entre HR_1 et HR_2

Les analyses par la suite sont basées sur des histogrammes de valeurs moyennes, calculées sans pondération par rapport au nombre d'échantillon afin d'affecter le même poids à chacune des méthodes. Les écarts types correspondants sont également indiqués. Enfin, toutes les valeurs $\bar{\mu}$ par matériau, par échantillon, par méthode et par laboratoire sont présentées en annexe.

	T (°C)	Coupelle standard (CS)		Face arrière (FA)		Coupelle améliorée (CA)	
		Ecart RH (%)	HR moy (%)	Ecart RH (%)	HR moy(%)	Ecart RH (%)	HR moy(%)
LASIE	23	3%int-22%ext	13				
		3%-57%	30				
		3% -93 %	48				
		22%-57%	40				
		22%-93%	58				
		57%-22%	40				
		57%-93 %	75				
		93%-22%	58				
		93%-57%	75				
LOCIE	23	93%int-33%ext	63	9%-33%	21		
		75%int-33%ext	54	33%-75%	54		
		0%int-33%ext	17	75%-33%	54		
		93%int-75%ext	84	33%-9%	21		

		33%int-75%ext	54			
		0%int-75%ext	38			
LERMAB & LGPM	25			25%-50%	38	
				50%-80%	65	
				80%-50%	65	
				50%-25%	38	
LGPM	25				--	--
TIPEE	23	11%int-0%ext	6			
		11%int-50%ext	31			
		11%int-85%ext	48			
		50%int-0%ext	25			
		50%int-11%ext	31			
		50%int-85%ext	68			
		85%int-0%ext	43			
		85%int-11%ext	48			
		85%int-50%ext	68			

Tableau II-11. Conditions opératoires des essais, température et intervalle d'HR, et en bleu et orange les essais ayant une valeur centrée de HR similaire, indépendamment de la méthode.

II.3. Caractéristiques thermiques

II.3.1. Conductivité thermique

a) LASIE

La conductivité thermique a été mesurée dans des conditions stationnaires en utilisant un « λ -meter Ep500e » qui fonctionne sous le principe de la méthode normalisée de la plaque chaude gardée selon les normes NF EN12667 [137] et NF EN12664 [138]. Le principe de cette méthode consiste à placer une éprouvette de dimensions 15×15×5 cm entre deux plaques (l'une chaude et l'autre froide) où s'exerce un gradient de température constant.



Version C

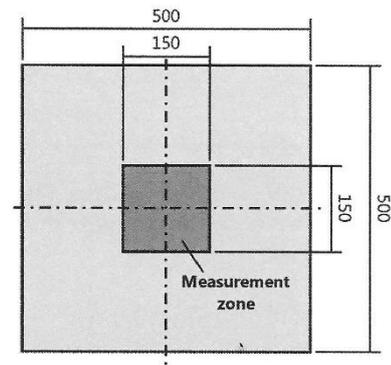


Figure II-13. Dispositif λ -meter Ep500e – version C.

La conductivité thermique du matériau sera ensuite calculée à partir de la puissance électrique de chauffe fournie par le dispositif.

$$\lambda = (U * I) * \frac{e}{A * \Delta T}$$

$U*I$: puissance électrique fournie pour maintenir la température des plaques

e : épaisseur de l'échantillon

A : surface d'échange

ΔT : différence de température entre les plaques (15K)

La caractérisation a été effectuée dans des conditions isothermes pour différentes températures, à savoir : 10°C, 25°C et 40°C.

Les mesures nécessitent :

- **Une dimension stricte** du matériau (150*150 mm étant la section de mesure centrale sur laquelle les températures des plaques sont maintenues)
- Un contact sans air entre le matériau et les plaques :

Surface lisse du matériau

Pression de la plaque supérieure suffisante (en fonction de la déformabilité du matériau)

Exemple : pour une résistance R de 0.3 m²K/W, un maximum de 0.037 mm de couche d'air interstitielle entre la plaque et le matériau est admissible.

Une vérification étalon est effectuée sur la base d'un isolant polystyrène à 0.03 W/m.K.

Ainsi :

- tous les échantillons dont **la surface n'est pas plane** présenteront une sous-évaluation de leur conductivité thermique, d'autant plus prononcée si le matériau est bon conducteur.
- tous les échantillons **dont la surface est trop faible** présenteront une sous-évaluation de leur conductivité thermique, d'autant plus prononcée si le matériau est bon conducteur ($R < 0.1$).

b) LERMAB

Les mesures de conductivité ont été réalisées avec un HOT DISK TPS 1500. La sonde utilisée est le modèle 5501 F1 de rayon 6.403mm. L'analyse des courbes d'élévation de température a été effectuée avec le logiciel Hot Disk 'Thermal Analyzer'. Le module anisotrope du logiciel a été utilisé pour analyser la courbe de l'OSB et du bois de chêne. Pour tous les autres, l'analyse est réalisée avec le module isotrope. Les mesures de conductivité thermique ont été effectuées en respectant les préconisations du fabricant, à savoir : (i) le temps caractéristique total est compris entre 0.33 et 1, (ii) l'augmentation totale de la température de l'échantillon est comprise entre 2 et 5 °C, l'écart type sur la température est dans la gamme de 10⁻⁴ et 10⁻⁵ K.

c) LOCIE

La conductivité thermique des matériaux a été mesurée à l'aide d'un appareil de la société C-Therm basé sur la technique source plane transitoire modifiée. Il utilise un capteur unilatéral et donc nécessite l'utilisation d'un seul échantillon contrairement à la méthode classique. La conductivité thermique a été mesurée directement et rapidement, à température ambiante, fournissant un aperçu des caractéristiques thermiques du matériau. Les échantillons ont été conditionnés à 58% RH avant les mesures.

d) TIPEE

Les mesures de la transmissivité hygrothermique (conductivité thermique pour un produit humide selon la norme NF EN 12664) sont effectuées à l'aide d'une plaque chaude gardée de marque Lambda-Messtechnik modèle λ -Meter EP500e. Une fois le régime stationnaire atteint, l'expérience est poursuivie pendant au moins 12 heures et la conductivité thermique est déterminée par calcul grâce à la formule suivante :

$$\lambda = \frac{U \cdot I \cdot d}{A \cdot \Delta T} \quad (8)$$

Les essais sont réalisés à 2 températures et 2 conditions de teneur en eau spécifiées par un équilibre avec une atmosphère régulée à (23 ± 2) °C et à $0 \pm 1\%$, $50 \pm 5\%$ et $80 \pm 5\%$ HR. Le conditionnement à une teneur en humidité spécifiée dans une atmosphère spécifiée est obtenu lorsque la variation de la teneur en humidité, ΔW_i pendant une période spécifiée de 24 h, est inférieur à une valeur limite :

- $0,15 \text{ kg/m}^3$ pour le bois ancien (environ 25 jours)
- $0,30 \text{ kg/m}^3$ pour la terre crue (environ 10 jours)

Les échantillons sont filmés à la sortie de l'enceinte de conditionnement et durant l'essai à l'aide d'une enveloppe étanche à la vapeur d'eau. La masse de l'éprouvette est mesurée avant et après l'essai, afin de déterminer les variations relatives de masse. Les variations de masse observées sont inférieures à 0,1% de la masse initiale de l'éprouvette.

La différence de température entre la plaque chaude et la plaque froide a été fixée à 15 K pour l'essai à 80%HR et 10 K pour l'essai à 50%HR.

La détermination expérimentale de l'humidité volumique par tranches de matériau telle que présentée dans l'annexe E de la norme NF EN 12664 n'est pas possible pour les éprouvettes de matériaux dont nous disposons car ceux-ci n'ont pas une planéité adaptée et ne peuvent être redécoupés. Nous pouvons éventuellement procéder à une estimation théorique de la répartition de l'humidité à l'aide des courbes de sorption / désorption fournies par les partenaires.

II.3.2. Effusivité thermique

LOCIE

Comme la conductivité thermique, l'effusivité thermique des échantillons a été mesurée par le C-Therm à la température ambiante.

II.3.3. Capacité thermique

a) LaSIE

La capacité thermique des matériaux étudiés dans le cadre de ce projet a été mesurée à l'aide d'un Calorimètre Calvet® pour une gamme de température allant -10 à 45°C avec une vitesse de chauffe de 0.1°C/minute. L'avantage de ce dispositif réside dans le fait qu'il utilise des capteurs fluxmétrique 3D qui entoure entièrement l'échantillon et permet de donner des résultats plus précis. Les échantillons testés sont cylindriques d'environ 0.5 cm de diamètre et 5 cm de hauteur. Avant de commencer l'essai, les échantillons ont été séchés dans une étuve à 40°C jusqu'à stabilisation du poids.

b) LOCIE

Afin de mesurer les capacités thermiques (c_p) des matériaux, nous utilisons une DSC-25 de TA Instrument®. La méthode utilisée est une méthode modulée (MDSC, Modulated Differential Scanning Calorimeter) normalisée ASTM E1952 et E2716 avec comme standard de référence le saphir. Les mesures sont obtenues dans une gamme allant de 10 à 50°C avec une vitesse de chauffe de 2 K.min⁻¹, une période d'oscillation de 120 secondes et une amplitude de 0.64°C. Les mesures sont réalisées sur 3 échantillons du même matériau pour les matières suivantes : Argilus, OSB, pare-pluie, pierre dure, pierre tendre, terre crue, terre cuite, torchis et bois ancien. Les C_p des matériaux sont également calculés à partir des mesures de conductivité et d'effusivité obtenues avec le C-Therm grâce à la relation suivante :

$$Effusivité = \sqrt{\lambda \rho c_p} \quad (9)$$

Avec λ = conductivité thermique (W/m.K), ρ = masse volumique (kg/m³), c_p = chaleur spécifique (J/kg.K).

II.3.4. Diffusivité thermique

La diffusivité thermique des échantillons a été déterminée dans les trois laboratoires (LOCIE, LERMAB et LASIE) par calcul à partir de l'équation suivante :

$$Diffusivité = \frac{k}{\rho c_p} \quad (10)$$

A LOCIE, la diffusivité a été calculée une fois à partir de la chaleur spécifique calculée, et l'autre fois à partir de celle mesurée par le DSC.

II.4. Perméabilité

II.4.1. Perméabilité intrinsèque air

a) LASIE

Le système de mesure est composé d'une bouteille d'azote comprimé, d'un réseau d'acheminement du gaz, d'une cellule contenant le matériau, de manomètres, de débitmètres et d'une station d'acquisition. Le circuit est contrôlé manuellement par une vanne permettant de

maîtriser la pression d'injection dans le circuit amont. Ce dernier est équipé de deux manomètres à l'entrée et à la sortie du circuit, ce qui permet de limiter les pertes de charges. Les circuits amont et aval sont équipés de débitmètres de plusieurs gammes de débit que nous pouvons adapter en fonction de la connectivité des matériaux.

Les échantillons sont placés dans un manchon de diamètre approprié et scellés à l'aide d'une chambre à air à une pression latérale de 8 bars afin d'éviter tout circuit de fuite du gaz. Pour chaque palier de pression appliquée P_i , il faudra attendre un quasi-équilibre entre les débits des circuits amont et aval et ensuite relever cette dernière ; l'azote étant considéré comme un gaz inerte. La relation entre la perméabilité apparente k_a du matériau s'exprime par la relation de Poiseuille pour les fluides compressibles (voir équation 5).

$$k_a = \frac{2\mu \cdot Q \cdot L \cdot P_{atm}}{S(P_i^2 - P_{atm}^2)} \quad (11)$$

Avec :

- Q : le débit volumique de l'azote ;
- S : la surface transversale de l'éprouvette ;
- L : la hauteur de l'éprouvette cylindrique ;
- P_{atm} : la pression atmosphérique ;
- μ : la viscosité dynamique de l'azote à 20°C ($1,75e^{-5}$ Pa.s).

Les résultats sont obtenus à la suite de quatre mesures de k_a . La perméabilité intrinsèque du matériau s'exprime à partir de la relation de Klinkenberg (Equation 6). C'est l'ordonnée à l'origine de la région linéaire de $k_a = f(\frac{1}{P_m})$.

$$k_a = k_v \left(1 + \frac{\beta}{P_m}\right) \quad (12)$$

Avec :

- $P_m = (P_{atm} + P_i)/2$: la pression moyenne du gaz dans l'échantillon ;
- β : le coefficient de Klinkenberg qui dépend de la nature du fluide.

Les éprouvettes cylindriques de diamètre 11 cm et d'épaisseur 4 cm ont été séchées dans une étuve à 50°C jusqu'à la stabilisation de masse, correspondant à une variation de masse de l'échantillon inférieure à 0,05% pendant 24h.

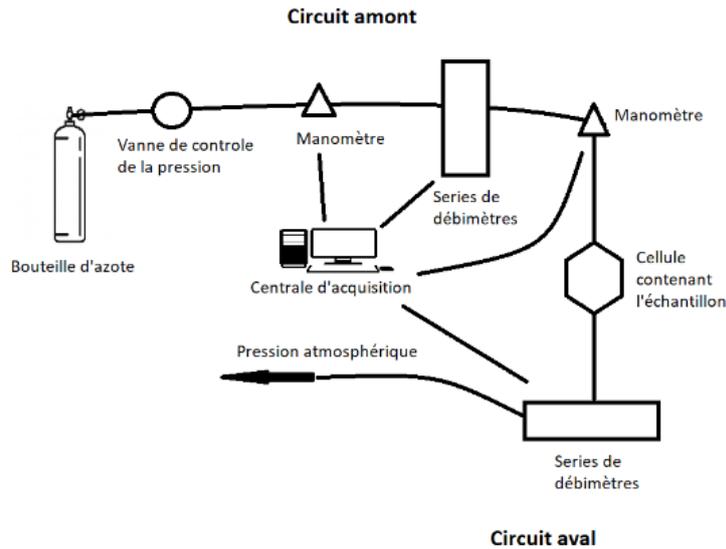


Figure II-14. principe de mesure de la perméabilité au gaz

b) LERMAB

b.1) Préparation des échantillons

Le nombre d'échantillons, leur densité et leurs dimensions sont présentés dans le Tableau II-12. Les échantillons sont de forme cylindrique. La face latérale a été recouverte de résine-époxy afin de lisser la surface et empêcher les transferts latéraux. Ceci permet d'avoir un flux unidirectionnel du gaz dans l'épaisseur des échantillons.

Pour les échantillons de bois de chêne ancien, il n'a pas été possible de caractériser la perméabilité selon la direction tangentielle du bois en raison de l'orientation des cernes dans la planche, et la présence de fentes. Aussi, un seul échantillon pour la mesure de la perméabilité longitudinale a pu être réalisé en raison des fentes.

Matériaux	N° Echantillon	Diamètre (mm)	Epaisseur (mm)	Densité (kg/m3)
OSB	1	69	15.2	618
	2	69	15.3	643
	3	69	15.6	634
	4	69	15.1	642
Torchis	1	68.3	20.8	1 668
	2	68.3	20.1	1 731
	3	67.5	20.1	1 734
Argilus	1	70.5	18	775
	2	69.3	21.1	798
	3	68.7	18.84	813
Terre crue	1	69	30	2 096
	2	69	30.3	2 067
	3	68.7	30	2 105
Terre cuite	1	17	30	1 805
	2	17	30	1 793
	3	17	30	1 731
	4	17	30	1 787
Chêne ancien	1L	18	30	790

	1R	18	8.2	
	2R	18	8.6	
	3R	18	9	
Pare pluie	1	18	0.45	100 g/m ²
	2			
	3			
	4			

Tableau II-12. Caractéristiques des échantillons utilisés

b.2) Dispositif expérimental

Le principe de la méthode consiste à appliquer un gradient de pression d'air sec constant de part et d'autre de l'échantillon et de mesurer le flux le traversant. La perméabilité gazeuse des échantillons est calculée par l'application de la loi de Darcy.

Le dispositif expérimental utilisé dans ce travail a été développé dans la thèse d'Agoua 2001 (Agoua et Perré 2010, Tarmian et Perré 2009).

Pour la mesure de perméabilité gazeuse faible ($<10^{-18}$ m²), le débitmètre actuel ne permet plus la mesure du flux d'air passant à travers l'échantillon. Dans cette situation, le débitmètre est remplacé par un petit dispositif nous permettant de suivre au cours du temps le ménisque d'eau au sein d'une pipette graduée branchée à la sortie de l'échantillon. La pipette est placée verticalement dans un bécher rempli d'eau. Cette technique simple est présentée en détail dans Redman et al. 2012.

c) LGPM

La perméabilité gazeuse a été évaluée grâce à un dispositif original conçu et développé au LGPM. Le principe repose sur la relaxation d'une différence de pression initiale entre deux réservoirs placés dans une enceinte isotherme. Cela permet de mesurer à la fois le flux de gaz et la différence de pression avec les mêmes capteurs. L'analyse des résultats doit toutefois prendre en compte le régime thermique de cette relaxation. La configuration du dispositif et la méthode d'analyse sont décrites dans les travaux de Ai *et al.* (2017)².

II.4.2. Perméabilité relative liquide

LERMAB

La détermination de la perméabilité relative liquide a été effectuée dans ce travail sur le chêne par méthode inverse. Nous proposons de présenter succinctement cette méthode en trois étapes :

- Détermination expérimentale des profils de densité dans l'épaisseur de l'échantillon au cours du séchage par rayon X, puis estimation du champ de teneur en eau,
- Simulation numérique du séchage de l'échantillon

² Ai W., Duval H., Pierre F., Perré P., 2017 – A novel device to measure gaseous permeability over a wide range of pressures: characterisation of slip flow for Norway spruce, European beech and wood-based materials, *Holzforschung*, **71**: 147-162.

- Identification de la perméabilité relative liquide par minimisation de la fonction objective basée sur la différence entre les profils de teneur en eau simulés et ceux mesurés pour différents instants.

Détermination expérimentale des profils d'humidité lors du séchage

Des échantillons de chêne de section 50mmx50mm et d'épaisseur 20mm ou 40mm à l'état vert ont été séchés à l'aide d'une enceinte climatique (HCP 110, Memmert) à 40°C et 65% d'humidité relative. La masse de l'échantillon a été mesurée en continu à l'aide d'une balance avec une précision de ± 0.01 g. Au cours de séchage, les échantillons de chêne ont été retirés de l'enceinte climatique et scannés avec un DAX-5000-Grecon pour déterminer l'évolution du profil de densité selon l'épaisseur. Cet analyseur mesure la densité du matériau par atténuation de rayons-X. Le temps de scan est de quelques minutes par jours, durée faible devant la durée de séchage de 35 jours (épaisseur de 40mm). Afin d'avoir un transfert unidirectionnel dans l'épaisseur de l'échantillon (ici direction tangentielle), les deux faces (plan RT) sont recouvertes de colle-époxy et d'une feuille d'aluminium alors que les deux autres faces (plan LT) sont recouvertes seulement d'un scotch aluminium afin de pouvoir le retirer/remettre respectivement avant/après chaque scan.

Des tests préliminaires avec des cales de bois de teneurs en eau différentes (couvrant toute la plage 8% à 105%) ont permis de vérifier la fiabilité de l'équipement à pouvoir mesurer la densité du matériau humide. La conversion des profils de densité mesurés en profils de teneur en eau la densité anhydre moyenne et le retrait volumique moyen mesurés. L'approche effectuée est similaire à celle présentée par Hansson and Cherepanova 2013. La variation de la position de chaque point de mesure avec le retrait du bois n'est pas prise en compte en l'absence de marqueurs de position. Cependant la plage d'humidité qui nous intéresse ici pour la mesure de l'expression de k_{r1} se situe dans le domaine de l'eau libre sans retrait/gonflement.

Simulation numérique du séchage de l'échantillon

Le code *TransPore* a été utilisé pour simuler le séchage des échantillons de bois de chêne (Perré and Giovanni 1990; Perré and Turner 1999).

Les conditions réelles vues par les échantillons sont utilisées pour simuler le séchage des échantillons. Le code utilise en entrée les paramètres moyens propres à l'essence et certaines propriétés mesurées dans le cadre de ce projet telles que la perméabilité gazeuse, la masse volumique, l'isotherme de sorption.

La fonction objective

La méthode des moindres carrés est utilisée pour construire la fonction objective δ :

$$\delta = A \times \zeta_1 + B \times \zeta_2 \quad (13)$$

avec,

$$\zeta_1 = \sum_{i=1}^n \left(\overline{MC}_i^{calc} - \overline{MC}_i^{mes} \right)^2 \quad (14)$$

$$\zeta_2 = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m \left(Gap_j^{calc} - Gap_j^{mes} \right) \right)^2 \quad (15)$$

\overline{MC}_i^{calc} et \overline{MC}_i^{mes} sont respectivement les teneurs en eau moyennes prédites et mesurées.

Les indices i et j représentent respectivement le temps et la position dans l'épaisseur de l'échantillon. n est le nombre total de mesures et m est le nombre total de points scannés par l'analyseur à rayon X.

Gap_j^{mes} et Gap_j^{calc} sont respectivement l'écart entre les teneurs en eau locales mesurées et prédites (\overline{MC}_i^{mes} , \overline{MC}_i^{calc}) (Figure II-15). ζ_1 est l'erreur sur la cinétique moyenne alors que ζ_2 est l'erreur sur la forme du profil de teneur en eau. A et B quantifient la proportion de ζ_1 et ζ_2 dans la fonction objective en respectant l'égalité $A+B=1$. Les identifications de ce travail ont été réalisées avec une fonction objective ($A=0.5$ et $B=0.5$) afin d'équilibrer l'erreur sur la cinétique moyenne et sur les profils.

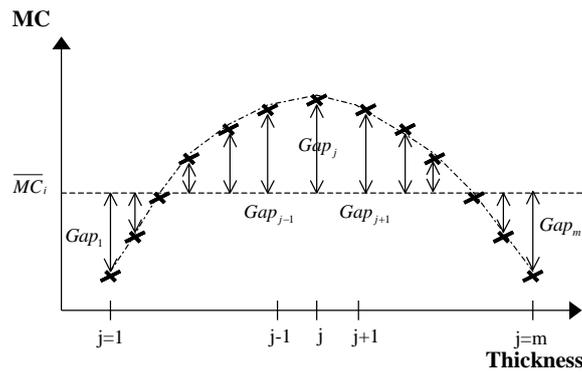


Figure II-15. Gaps et teneur en eau moyenne pour une teneur en eau donnée dans l'épaisseur de la planche

L'algorithme du *downhill-Simplex method* a été utilisé pour minimiser la fonction objective.

Dans l'expression de la perméabilité relative liquide k_{rl} , un seul paramètre est ajustable par le code, la puissance a :

$$k_{rl} = S^a \quad (16)$$

Avec S , la saturation $S = \frac{X_1}{X_{Sat}}$, où X_1 et X_{Sat} représentent respectivement la teneur en eau libre et la teneur en eau à la saturation intégrale. Cette dernière expression a été utilisée dans de nombreux travaux pour le bois massif (Perré et al., 1993, Couture et al. 1996; Feng et al., 2003).

Méthode d'identification

Une analyse de sensibilité a été menée pour apprécier comment l'incertitude des entrées du modèle se propage sur les sorties du code au niveau de la cinétique et de la forme du profil d'humidité. En utilisant conjointement ces deux sorties, il est possible de séparer les influences du coefficient de diffusion et du coefficient de transfert externe du triptyque (P_C , K_L , k_{rl}) (pression capillaire, perméabilité liquide et k_{rl}). Il est en revanche difficile d'isoler les effets respectifs des paramètres de ce triptyque sur les sorties. L'identification de l'expression de k_{rl} nécessite donc de fixer les deux autres. Pour fixer K_L , nous avons mesuré la perméabilité gazeuse K_G sur des échantillons jumeaux (venant de la même planche que l'échantillon étudié) puis supposé que K_L est égale à la moyenne des K_G mesurés. En effet, nous n'avons pas trouvé dans la littérature de travaux comparant ces deux grandeurs pour le chêne. Nous avons ensuite procédé de la manière suivante pour l'essai sur l'échantillon de 20mm d'épaisseur :

- (T1) identification de la puissance de l'expression de k_{rl} , en fixant P_C à l'expression proposée par Spolek et Plumb (1981) pour des résineux :

$$P_c(S) = 1.24 \cdot \sigma \cdot S^{-0.61} \text{ Avec } \sigma = (77.5 - 0.18 \cdot T(^{\circ}\text{C})) \cdot 10^{-3} \text{ et } S = \frac{X_{\text{free water}}}{X_{\text{free water sat}}}$$

- (T2) identification simultanée de la puissance de l'expression de k_{rl} et d'une pondération devant l'expression de P_C de Spolek et Plumb (1981).

L'essai sur la planche de 40mm d'épaisseur est utilisé pour la validation.

III. Résultats et inter-comparaison expérimentale

III.1. Terre cuite

III.1.1. Isothermes de sorption

a) Isothermes d'enveloppe à 3 températures

Les courbes des isothermes de sorption d'enveloppe ont été mesurées sur deux prélèvements à trois températures différentes par manométrie (LaSIE).

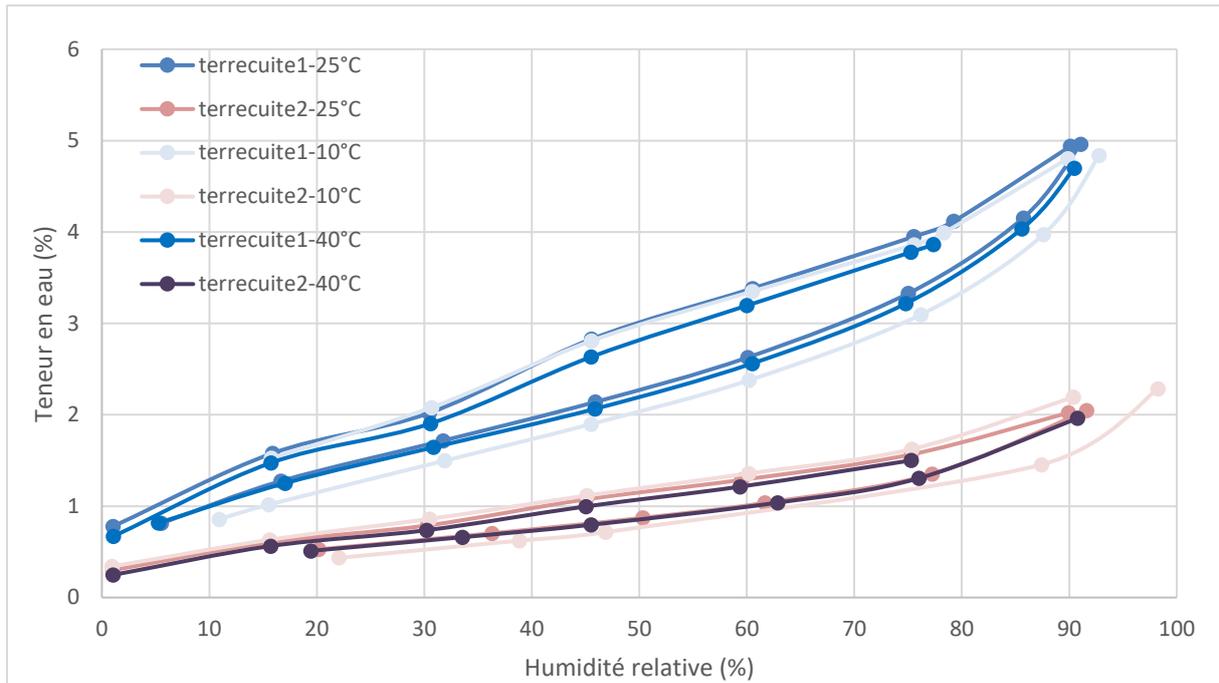


Figure III-1. Isothermes à 10°C,25°C,40°C par manométrie (LaSIE) pour la terre cuite

- Nous n'avons pas noté de variations significatives de teneurs en eau durant les phases d'adsorption et de désorption en fonction de la température.
- La répétabilité entre 2 prélèvements est discutable. Les teneurs en eau varient entre 2% et 5% au maximum d'humidité relative en fonction de l'échantillon prélevé. La terre cuite est un matériau hétérogène, le prélèvement se fait ici sur un volume d'environ 0.5 cm³ et n'est peut-être pas assez représentatif.

b) Isothermes d'enveloppe à 25°C

Deux prélèvements ont été mesurés au LaSIE et au LERMAB. La moyenne a été faite pour les prélèvements du LERMAB car la répétabilité était correcte. Le Tableau III-1 et Tableau III-2 récapitulent les résultats des isothermes d'enveloppes obtenus sur la terre cuite respectivement par le LaSIE et le LERMAB.

Ads- ech1	HR (%)	5,51	16,65	31,73	45,89	60,07	75,03	85,72
	EMC(%)	0,81	1,27	1,72	2,14	2,63	3,33	4,15
Des-ech1	HR (%)	1,0256	15,876	30,447	45,551	60,536	75,532	79,236
	EMC(%)	0,7779	1,578	2,0192	2,8281	3,3827	3,9491	4,117
Ads-ech2	HR (%)		19,843	34,096	47,7	62,679	74,778	90,641
	EMC(%)		0,2785	0,3882	0,4936	0,646	0,8426	1,5015
Des-ech2	HR (%)	1,0209	15,683	30,038	45,147	60,423	75,595	
	EMC(%)	0,1052	0,3097	0,4334	0,5594	0,7337	1,0227	

Tableau III-1. Valeurs des isothermes pour 2 prélèvements sur échantillons de terre cuite mesurés par manométrie au LaSIE

Ads moy	HR (%)	-	12,91	27,79	42,01	56,03	69,38	82,47
	EMC(%)	0,00	0,08	0,12	0,17	0,27	0,58	1,17

	EcartType HR (%)	-	0,21	0,10	0,56	0,80	1,02	1,05
	EcartType EMC(%)	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03
Des moy	HR (%)	-	13,74	28,82	42,94	56,74	69,83	82,47
	EMC(%)	-	0,12	0,20	0,32	0,46	0,66	1,17
	ecartType HR (%)	-	0,31	0,02	0,54	0,83	1,07	1,05
	ecartType EMC(%)	-	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03

Tableau III-2. Valeurs moyennées des isothermes pour 2 prélèvements sur échantillons de terre cuite mesurés par DVS au LERMAB

Afin de mieux illustrer la répétabilité et la reproductibilité sur ces mesures, nous avons présenté dans la Figure III-2 une comparaison graphique des isothermes de sorption mesurées par les deux laboratoires (LaSIE et LERMAB).

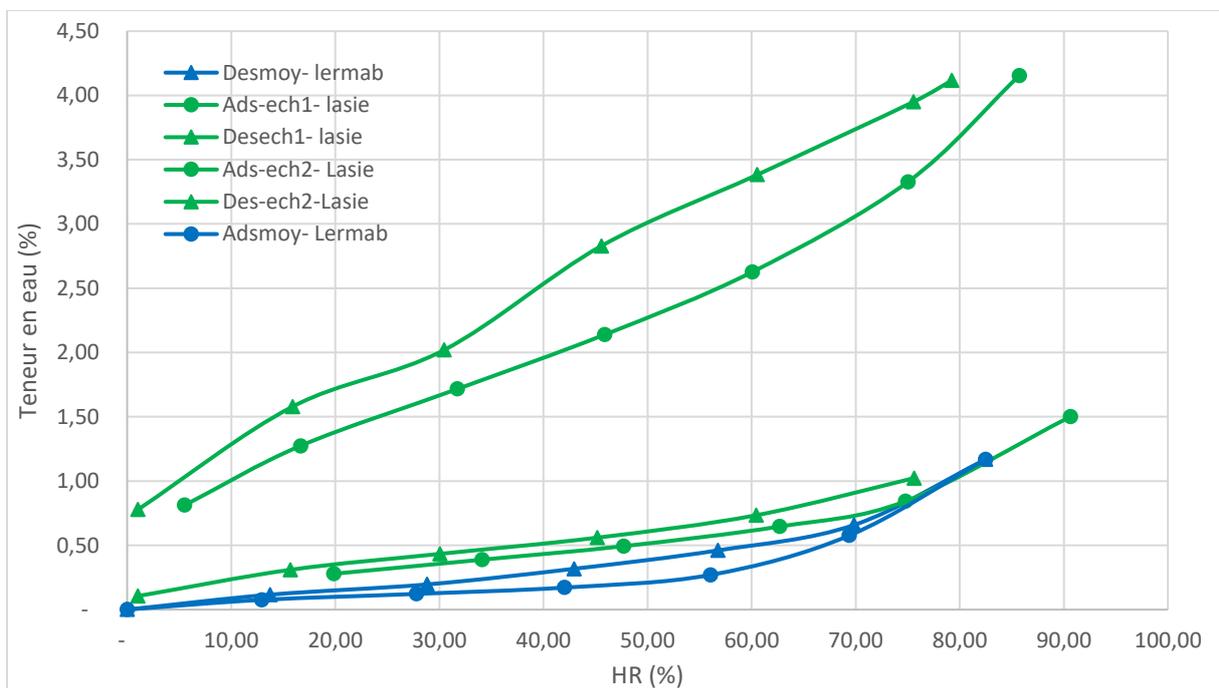


Figure III-2. Isothermes comparées à 25°C mesurées par manométrie (LaSIE) et gravimétrie (LERMAB) pour la terre cuite

En se basant sur les résultats présentés sur la Figure III-2, nous pouvons conclure que :

- La répétabilité des mesures au LERMAB est correcte et montre un échantillon peu hygroscopique avec une teneur en eau maximale de 1.5% pour les humidités relatives les plus élevées.
- La reproductibilité entre les deux laboratoires est correcte pour seulement un des 2 prélèvements.

Par ailleurs, les paramètres du modèle HH pour les courbes enveloppes ont été également calculés pour chaque prélèvement.

	Adsorption				Désorption			
	HH_A+	HH_B+	HH_C+	R ²	HH_A+	HH_B+	HH_C+	R ²
Terre cuite1	3,427	0,646	0,005	0,998	1,007	0,531	0,004	0,982

Terre cuite2	7,822	1,767	0,015	0,999	2,463	1,408	0,011	0,991
--------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Tableau III-3. Paramètres du modèle HH (LaSIE) pour la terre cuite

	Adsorption			Désorption			Moyenne		
	HH_A+	HH_B+	HH_C+	HH_A+	HH_B+	HH_C+	HH_A	HH_B	HH_C
Terre cuite 1	306.7	-139.6	174.3	72.1	303.2	367.2	114.8	284.4	406.6
Terre cuite 2	418.67	-393.80	38.66	117.40	191.21	302.98	172.90	155.39	342.59

Tableau III-4. Paramètres du modèle HH (LERMAB) pour la terre cuite

c) Isothermes intermédiaires

Le Tableau III-5 et Tableau III-6 présentent les résultats des boucles d'isothermes intermédiaires obtenus respectivement par le LaSIE et le LERMAB.

Adsmoy1	HR (%)	-	29,99			60,01	90,34	
	EMC(%)	0,00	1,26			2,20	4,69	
Desmoy1	HR (%)	15,02	30,02	44,99		60,03	75,06	90,26
	EMC(%)	1,16	1,60	2,39		2,96	3,55	4,71
Adsmoy2	HR (%)	15,01	30,01	45,01		59,99	75,14	
	EMC(%)	1,16	1,52	1,90		2,36	3,06	
Desmoy2	HR (%)		30,01	45,01		60,03	75,14	
	EMC(%)		1,62	2,20		2,60	3,07	
Adsmoy3	HR (%)		30,02	45,01		60,04		
	EMC(%)		1,62	1,95		2,39		
Desmoy3	HR (%)			45,01	50,00	55,02	60,04	
	EMC(%)			2,05	2,17	2,28	2,39	
Adsmoy4	HR (%)			45,01	50,00	55,04		
	EMC(%)			2,05	2,14	2,25		
Desmoy4	HR (%)				50,00	55,01		
	EMC(%)				2,15	2,25		

Tableau III-5. Valeurs des isothermes intermédiaires mesurées par SPS au LaSIE pour la terre cuite

Adsmoy1	HR (%)	-	12,91	27,79	42,01	56,03	69,38	82,47
	EMC(%)	0,00	0,08	0,12	0,17	0,27	0,58	1,17
Desmoy1	HR (%)	-	13,74	28,82	42,94	56,74	69,83	82,47
	EMC(%)	-	0,12	0,20	0,32	0,46	0,66	1,17
Adsmoy2	HR (%)		13,74	28,34	42,36	56,18	69,62	
	EMC(%)		0,12	0,16	0,22	0,33	0,61	

Tableau III-6. Valeurs des isothermes intermédiaires mesurées par DVS au LERMAB pour la terre cuite

Dans la Figure III-3, nous avons présenté une comparaison exhaustive de ces résultats afin de bien visualiser les boucles intermédiaires mesurées sur la terre cuite par les deux laboratoires (LaSIE et LERMAB).

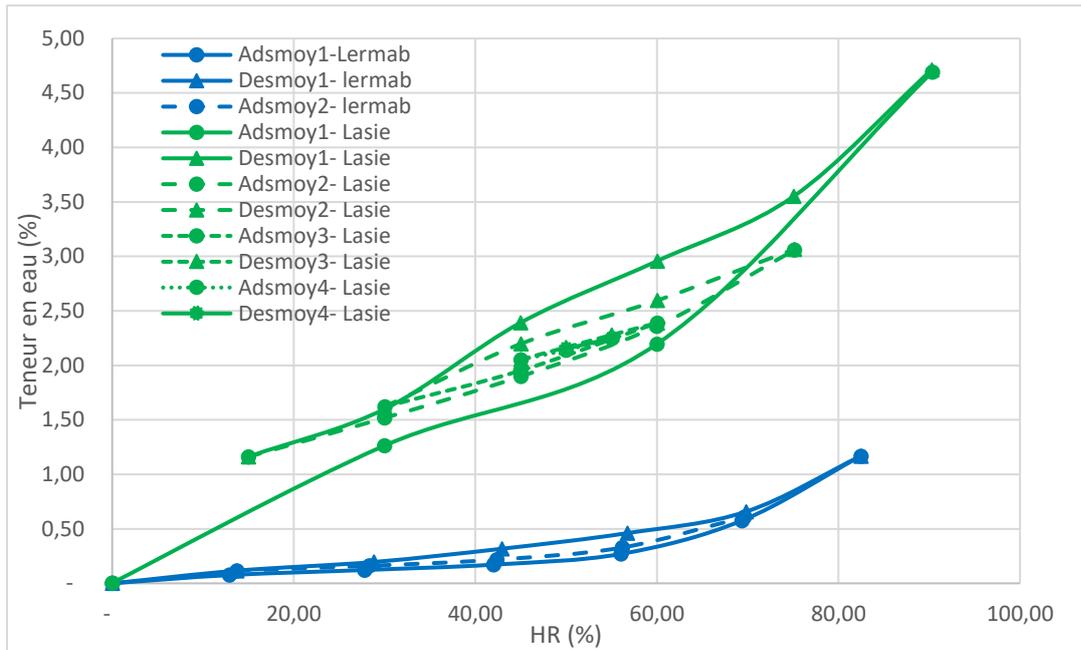


Figure III-3. Boucles intermédiaires moyennées comparées à 25°C mesurées par SPS (LaSIE) et DVS (LERMAB) pour la terre cuite

- Au LaSIE, avec la méthode gravimétrique SPS, on retrouve l'ordre de grandeur de mesure de l'échantillon 1 mesuré avec la méthode manométrique. Les mesures sont répétables.
- Au LERMAB, les mesures sont répétables.
- La reproductibilité est moyenne. On retrouve des écarts de mesure significatifs entre laboratoires alors qu'il s'agit de la même méthode de mesure (méthode gravimétrique). Ce décalage est peut-être dû à la taille du prélèvement effectué (2 à 3 g au LaSIE pour 50 mg au LERMAB). Cela peut également être expliqué par les critères de stabilité aux différents paliers d'humidité relative.

III.1.2. Coefficient de diffusion

Le facteur de résistance à la diffusion de la terre cuite a été mesuré par les méthodes CS et FA. Les valeurs en annexes montrent une dispersion importante des valeurs autour de la moyenne indépendamment de la méthode ou du laboratoire ou de la plage d'humidité caractérisée, indiquant un problème d'homogénéité des échantillons.

Le facteur de résistance à la diffusion moyen $\bar{\mu}$ de la terre cuite est d'environ 153 ± 74 pour une HR moyenne de 40% et de 165 ± 151 pour une HR moyenne de 67%. Ainsi, le $\bar{\mu}$ de ce matériau semble en moyenne peu sensible à la plage d'humidité HR étudiée. Les données du LERMAB en FA se distinguent des données du LGPM (FA), LASIE (CS) et TIPEE (CS) avec des valeurs plus faibles (facteur 2 à 4) et une dépendance avec l'HR. La comparaison simulation-mesure de HR en FA pour ce laboratoire (annexe) montre d'une part que l'indentification par méthode inverse a probablement été faite sur un temps trop court et d'autre part un comportement qui échappe à la loi de Fick avec deux constantes de temps qui apparaissent sur l'évolution de HR en FA. En effet, les échantillons testés au LERMAB semblaient présenter des hétérogénéités locales (dans un même échantillon une zone couleur claire et plus poreuse et des zones de

couleur sombres et denses sur l'autre face) qui ne sont pas prises en compte par le modèle numérique.

Terre cuite	Méthode	Mu moyen (-)		Densité (kg/m ³)	Humidité d'équilibre moyenne (kg d'eau/kg MS)		
		sec (RH moy = 37%)	humide (RH moy = 67%)		HR= 37%	HR= 67%	HR= 90%
LERMAB	FA	73.31± 49.24	34.58± 23.69	1757± 21	0.23	0.55	2.17
LGPM	FA	156 ±67.86	194			
TIPEE	CS	252 ±63	367 ±92	1705± 28			
LASIE	CS	133.25± 91.58	65.08			
Inter laboratoire		153.66± 74.27	165.30 ±151.30				
WUFI (terre cuite rouge mat)		137.8		1935			

Tableau III-7. Facteur de résistance à la diffusion, densité et teneur en eau de la terre cuite

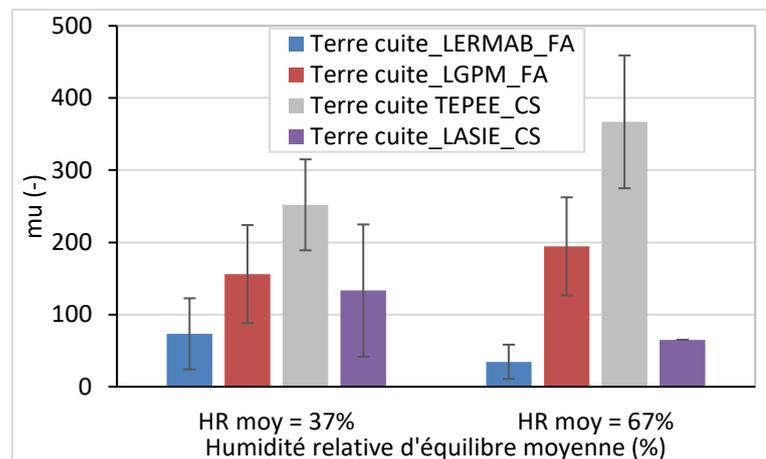


Figure III-4. Comparaison du facteur de résistance à la diffusion de la terre cuite

III.1.3. Caractéristiques thermiques

a) Conductivité thermique

La conductivité thermique de la terre cuite trouvée expérimentalement à LOCIE (0.771 W/m.K) et à LERMAB (0.82 W/m.K) sont presque identiques, tandis que la valeur obtenue à LASIE est beaucoup plus faible (0.24 W/m.K) (voir Figure III-5) . Cette différence peut être liée à l'état de conditionnement des échantillons (teneur en eau des échantillons de LERMAB, 0.4%, est plus faible que celui des échantillons de LaSIE, 1.59%) et aussi leurs formes. Il faut noter que les échantillons de LASIE ont un problème de surface et d'hétérogénéité qui ont affecté les mesures. Ceci implique que les mesures faites à LASIE par le λ -mètre ne sont pas tous fiables en raison de l'état des échantillons qui n'est pas parfait, comme l'instrument utilisé est très sensible aux dimensions et à l'état de surface de l'échantillon.

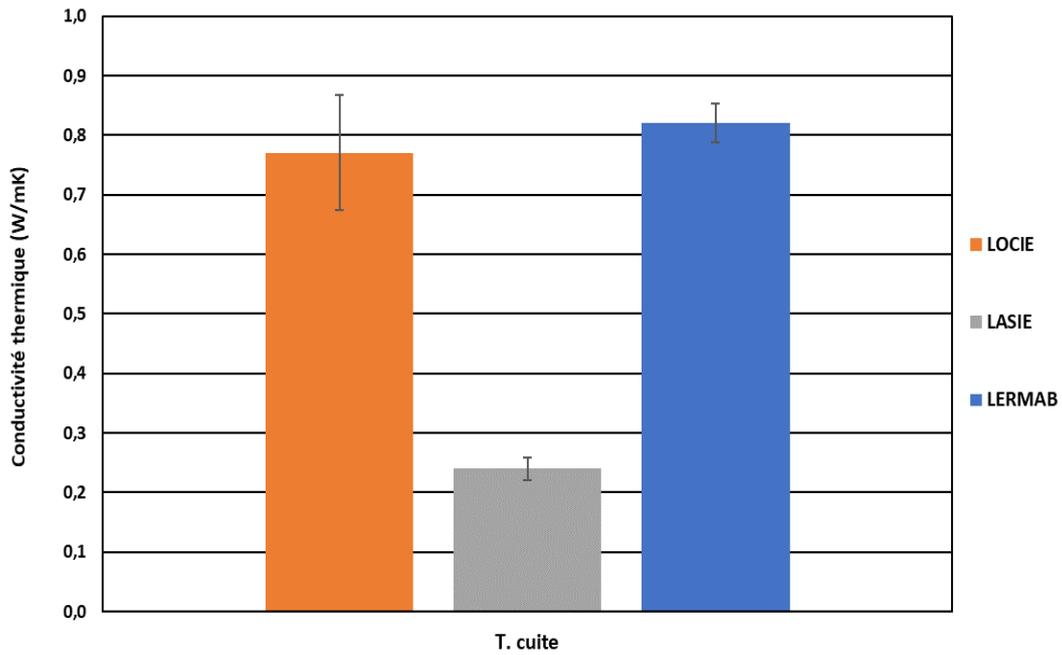


Figure III-5. Conductivité thermique de la terre cuite à LOCIE, LASIE et LERMAB à 25°C.

b) Effusivité thermique

Comme le montre la Figure III-6, l'effusivité thermique mesurée à LOCIE (1116.86 $Ws^{0.5}/(m^2K)$) a le même ordre de grandeur de celle calculée à LERMAB (1028.81 $Ws^{0.5}/(m^2K)$).

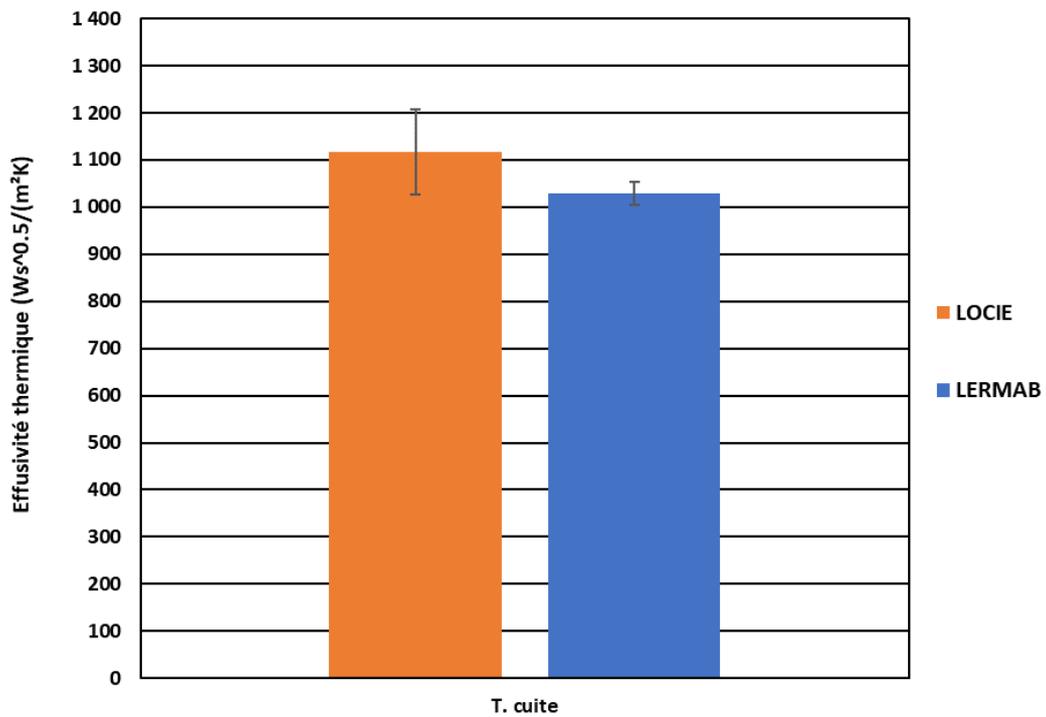


Figure III-6. Effusivité thermique de la terre cuite à LOCIE et LERMAB à 25°C.

c) Capacité thermique

La capacité thermique des échantillons de terre cuite a été mesurée expérimentalement à LOCIE par une DSC et à LASIE par un calorimètre, et a été calculée à partir de la conductivité thermique, de l'effusivité et de la densité à LOCIE et LERMAB. Les résultats sont illustrés dans la Figure III-7. On peut remarquer que toutes les valeurs obtenues sont presque similaires en tenant compte des barres d'erreur (733, 824 et 746 J/kg.K à LOCIE par DSC, LASIE par calorimètre et LERMAB par calcul, respectivement) sauf celle trouvée à LOCIE par calcul qui est un peu plus élevée (942 J/kg.K). Cette différence peut être liée aux petits écarts dans les valeurs de conductivité et effusivité thermiques comme les densités sont les mêmes (voir Figure III-5 et Figure III-6).

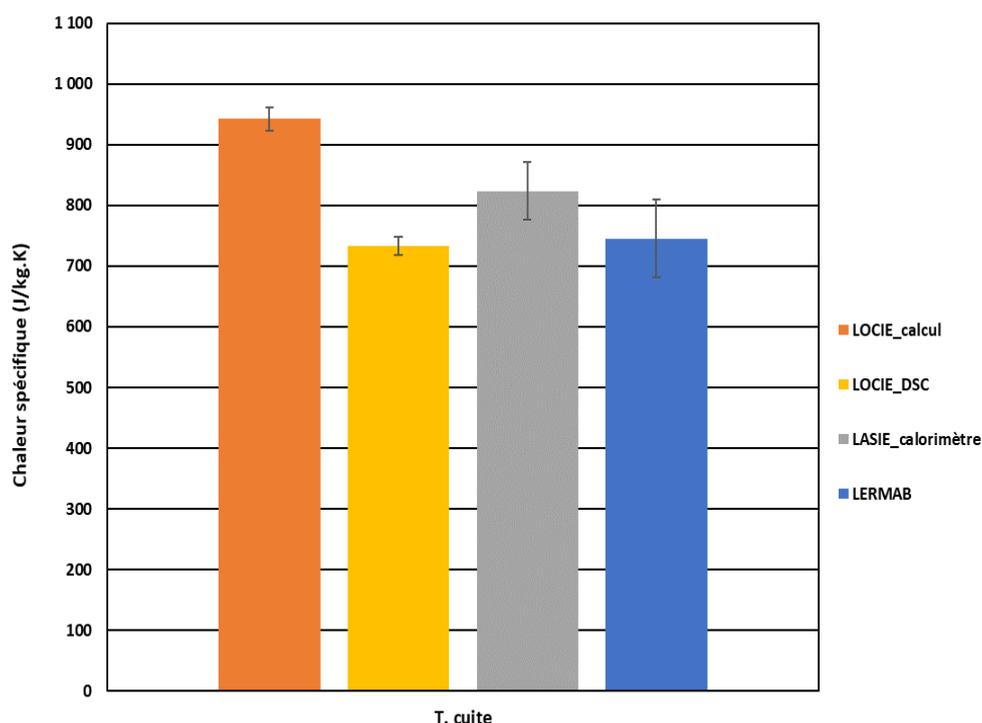


Figure III-7. Chaleur spécifique de la terre cuite à LOCIE, LASIE et LERMAB à 25°C.

d) Diffusivité thermique

Les résultats de la terre cuite ont montré que la valeur trouvée à LOCIE à partir de c_p calculée (0.474 mm²/s) est plus faible que celle obtenue à partir du c_p mesurée (0.606 mm²/s), qui est presque similaire à celle calculée à LERMAB (0.64 mm²/s) (voir Figure III-8).

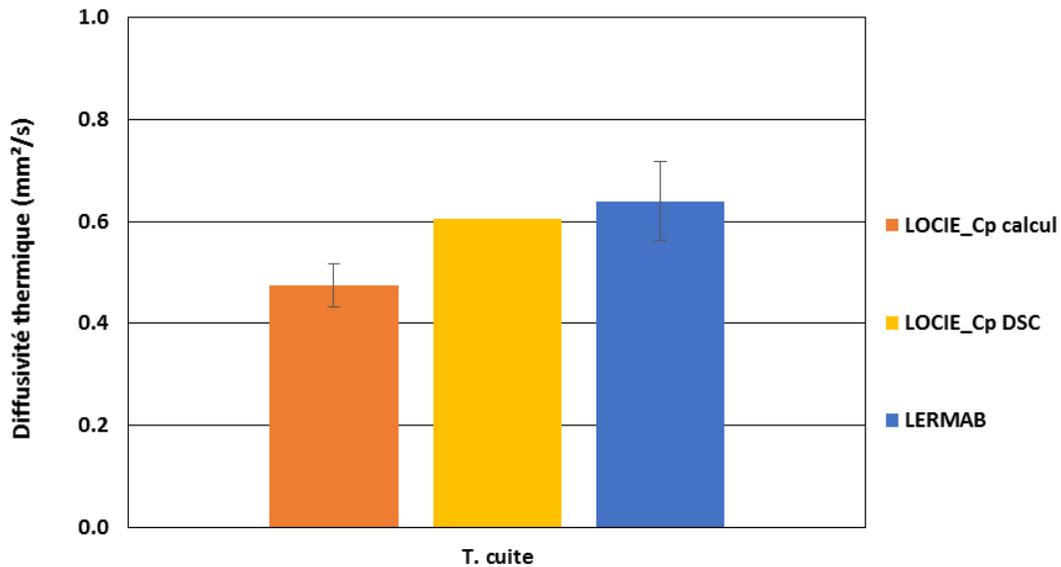


Figure III-8. Diffusivité thermique de la terre cuite à LOCIE et LERMAB à 25°C.

III.2. Terre crue

III.2.1. Isothermes de sorption

a) Isothermes d'enveloppe à 25°C

Les courbes d'isothermes de sorption à 25°C ont été mesurées sur un prélèvement au LERMAB, LGPM par DVS et au LOCIE par ATG.

Le Tableau III-8, Tableau III-9 et Tableau III-10 récapitulent les résultats des isothermes d'enveloppes obtenus sur la terre cuite respectivement pour chaque laboratoire.

Ads	HR (%)	0	12,906	27,848	42,846	57,294	71,354	85,094
	EMC (%)	0,00	0,45	0,75	0,99	1,24	1,69	2,67
Des	HR (%)	-	13,58	28,70	43,68	58,02	71,88	85,09
	EMC (%)	-	0,52	0,84	1,13	1,49	2,02	2,67

Tableau III-8. Valeurs d'isothermes pour un échantillon de terre crue mesurés par DVS au LERMAB

Ads	HR (%)	15,00	30,00	45,00	60,00	75,00	90,00
	EMC (%)	0,15	0,27	0,34	0,41	0,68	1,09
Des	HR (%)	15,00	30,00	45,00	60,00	75,00	90,00
	EMC (%)	0,45	0,50	0,57	0,61	0,73	1,09

Tableau III-9. Valeurs d'isothermes pour un échantillon de terre crue mesurés par DVS au LGPM

Ads	HR (%)	0	15	30	45	60	75
	EMC (%)	0,35	0,64	0,88	1,13	1,13	1,33
Des	HR (%)	0	15	30	45	60	
	EMC (%)	-	0,36	0,62	0,85	1,03	

Tableau III-10. Valeurs d'isothermes pour un échantillon de terre crue mesurés par ATG au LOCIE

Afin de mieux illustrer la répétabilité et la reproductibilité sur ces mesures, nous avons présenté dans la Figure III-9 une comparaison graphique des résultats obtenus.

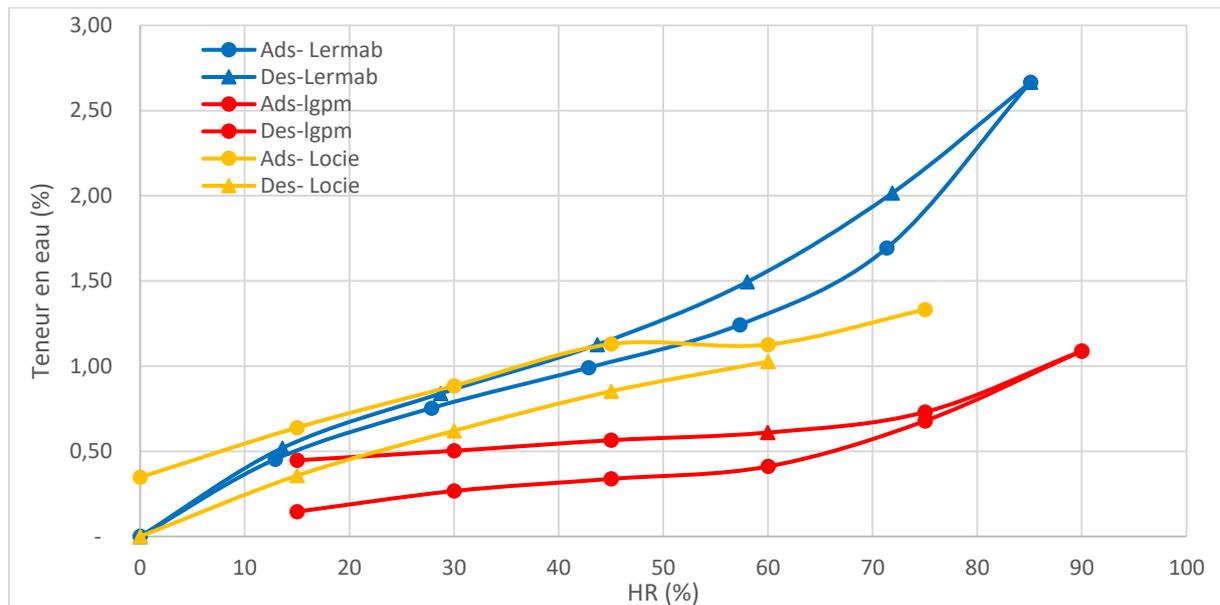


Figure III-9. Valeurs d'isothermes pour un échantillon de terre crue mesurés par DVS au LERMAB et LGPM, par ATG au LOCIE

En se basant sur les résultats présentés sur la Figure III-9, nous pouvons conclure que :

- La teneur en eau d'équilibre de la terre crue est entre 1.09% et 2.7% à 90% de HR. Les mesures présentent un léger écart entre les laboratoires. Le matériau semble très peu hygroscopique.
- L'isotherme d'adsorption/désorption mesurée à l'aide de l'ATG montre un ordre de grandeur correct des masses à l'adsorption et à la désorption. Cependant, l'allure de la courbe n'est pas cohérente (courbe de désorption sous celle d'adsorption). En étudiant la cinétique d'évolution des masses (Figure III-10), nous observons que la méthode de mesure par ATG ne permet pas une mesure assez précise et stable de la masse par paliers d'humidité. Ces mesures ne seront donc pas retenues pour la modélisation.

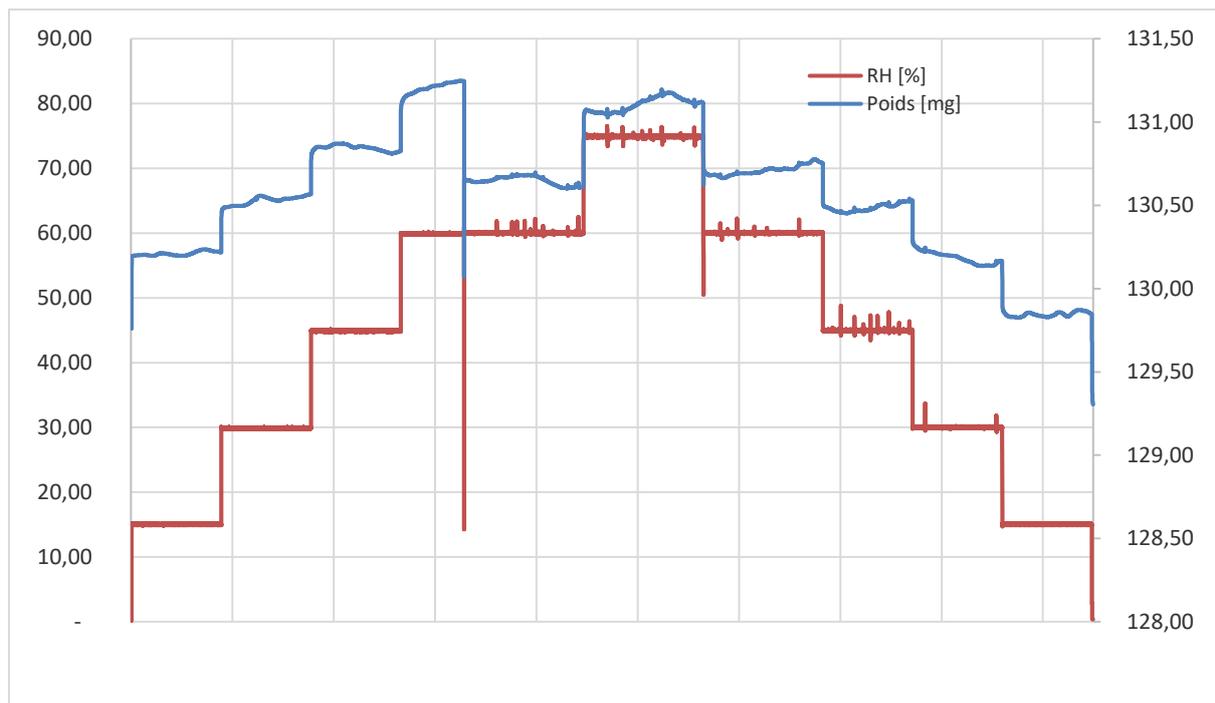


Figure III-10. Cinétique d'adsorption et d'absorption des isothermes à 25 °C réalisées par ATG au LOCIE pour l'échantillon de terre crue.

Par ailleurs, les paramètres du modèle HH pour les courbes enveloppes et la courbe moyenne (courbe unique) sont présentés dans le Tableau III-11 et Tableau III-12.

Matériaux	Paramètres du modèle Hailwood-Horrobin HH								
	Adsorption			Désorption			Moyenne		
	A+	B+	C+	A-	B-	C-	A	B	C
Terre crue	11.67	132.51	127.57	17.96	76.64	71.01	14.76	103.11	97.46

Tableau III-11. Paramètres du modèle HH par le LERMAB pour la terre crue

Matériau x	Paramètres du modèle Hailwood-Horrobin HH							
	Adsorption			HH_RMSE	Désorption			HH_RMSE
	A+	B+	C+		A-	B-	C-	
Terre Crue	1,63E+0 2	1,63E- 01	9,88E+0 1	4,56E-04	4,37E+0 1	6,20E+0 1	1,35E- 01	1,24E-03
Terre Crue	Paramètres du modèle GAB							
	Adsorption			GAB_RMS E	Désorption			GAB_RMS E
	GAB_M m	GAB_C	GAB_K		GAB_M m	GAB_C	GAB_K	
	3,22E-01	2,66E- 01	9,83E- 02	1,08E-03	3,67E-03	1,10E+0 5	7,23E- 01	4,27E-04

Tableau III-12. Paramètres des modèles HH et GAB par le LGPM pour la terre crue

b) Isothermes intermédiaires

Le Tableau III-13 et Tableau III-14 présentent les résultats des boucles d'isothermes intermédiaires obtenus respectivement par le LERMAB et le LGPM.

Ads1	HR (%)	0	12,906	27,848	42,846	57,294	71,354	85,094
	EMC (%)	0,00	0,45	0,75	0,99	1,24	1,69	2,67
Des1	HR (%)	-	13,58	28,70	43,68	58,02	71,88	85,09
	EMC (%)	-	0,52	0,84	1,13	1,49	2,02	2,67
Ads2	HR (%)		13,582	28,33	43,194	57,556	71,896	
	EMC (%)		0,52	0,78	1,02	1,30	1,75	

Tableau III-13. Valeurs des isothermes intermédiaires mesurées par DVS au LERMAB pour la terre crue

Ads1	HR (%)	15,00	30,00	45,00	60,00	75,00	90,00
	EMC (%)	0,15	0,27	0,34	0,41	0,68	1,09
Des1	HR (%)	15,00	30,00	45,00	60,00	75,00	90,00
	EMC (%)	0,45	0,50	0,57	0,61	0,73	1,09
Ads2	HR (%)	15	30	45	60		
	EMC (%)	0,435	0,456	0,509	0,582		
Des2	HR (%)	15	30	45	60		
	EMC (%)	0,428	0,539	0,539	0,582		

Tableau III-14. Valeurs des isothermes intermédiaires mesurées par DVS au LGPM pour la terre crue

Dans la Figure III-11, nous avons présenté une comparaison des résultats obtenus afin de bien montrer les boucles intermédiaires mesurées sur la terre crue par les deux laboratoires (LGPM et LERMAB).

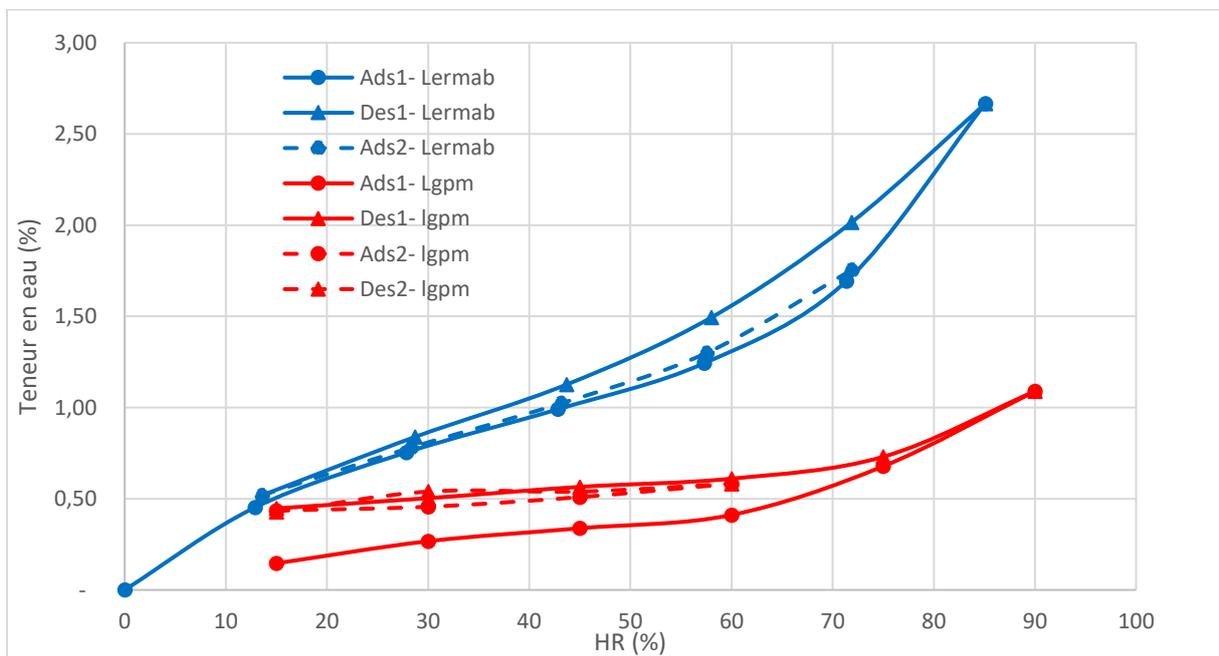


Figure III-11. Boucles intermédiaires comparées à 25°C mesurées par DVS (LERMAB et LGPM) pour la terre crue

III.2.2. Coefficient de diffusion

Le facteur de résistance à la diffusion $\bar{\mu}$ de la terre crue a été mesuré par les méthodes CS et FA. Les valeurs trouvées sont relativement proches à faible HR de 37% et légèrement

dispersées à plus haute HR de 67%. Ce faible écart type semble montrer une bonne homogénéité des échantillons de terre crue. Pour ce type de matériau, la méthode utilisée (CS ou FA) ne semble pas avoir d'impact sur la mesure. Le $\bar{\mu}$ de la terre crue est d'environ 16.2 ± 1.5 pour une HR moyenne de 37% et d'environ 9.2 ± 3.4 pour une HR moyenne de 67%.

Terre crue	Méthode	Mu moyen (-)		Densité (kg/m ³)	Humidité d'équilibre moyenne (kg d'eau/kg MS)		
		Mu sec (HR moy = 37%)	Mu humide (HR moy = 67%)		HR=37 %	HR=67 %	HR = 90%
LERMAB	FA	15.64±0.41	8.07±0.25	2055±20	0.93	1.67	3.14
TIPEE	CS	15±1	13	1986±30			
LASIE	CS	17.84±0.06	6.46±0.04			
Inter laboratoire		16.16±1.49	9.18±3.41				

Tableau III-15. Facteur de résistance à la diffusion, densité et teneur en eau de la terre crue

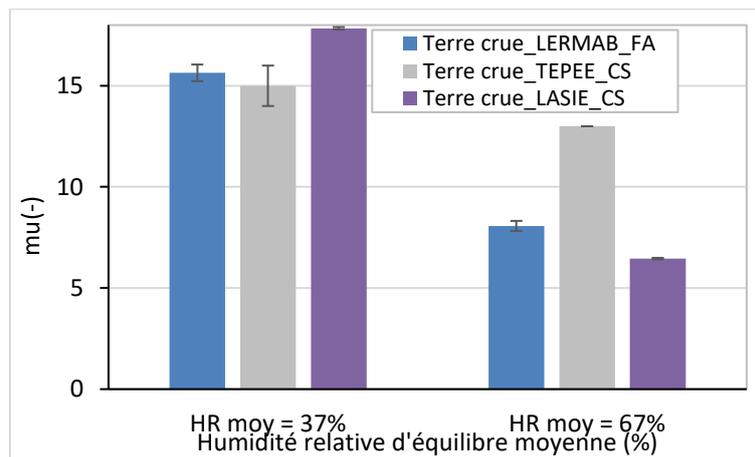


Figure III-12. Comparaison du facteur de résistance à la diffusion de la terre crue

III.2.3. Caractéristiques thermiques

a) Conductivité thermique

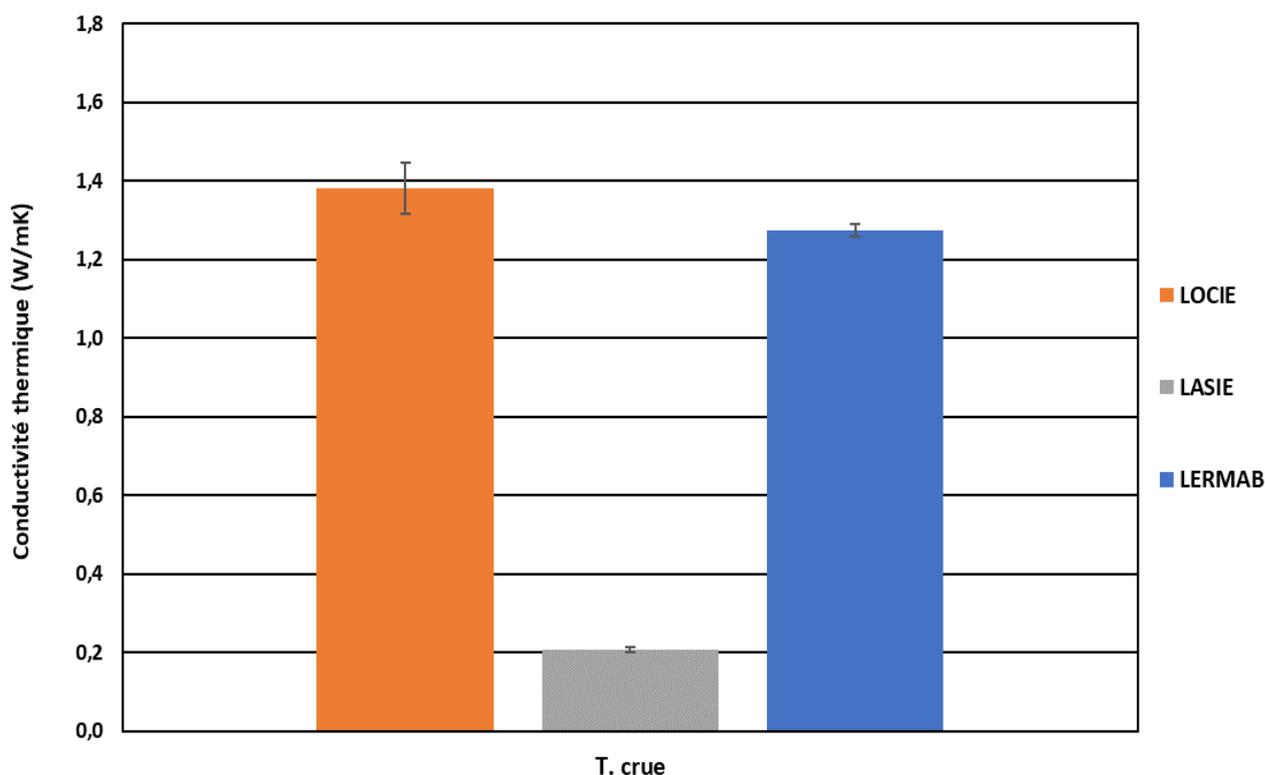


Figure III-13. Conductivité thermique de la terre crue à LOCIE, LASIE et LERMAB à 25°C.

Pareil que la terre cuite, la conductivité thermique de la terre crue trouvée à LOCIE (1.38 W/m.K) et LERMAB (1.27 W/m.K) ont le même ordre de grandeur tandis qu'elles sont plus grandes que celle trouvée à LASIE (0.21 W/m.K), comme le montre la Figure III-13. Cette différence peut aussi être liée à l'état des échantillons. Les échantillons de LERMAB et LOCIE sont friables et présentent de cailloux de différents diamètres sur les faces. D'une autre part, les échantillons de LASIE sont aussi friables, présentent une concavité centrale et ont les bords abimés. Les mesures à LOCIE ont été refaites sur un Hot Disk qui a donné une valeur égale à 1.42 W/m.K, qui est très proche à celle obtenue par le C-Therm à LOCIE, et légèrement plus grande que celle trouvée par le Hot Disk à LERMAB.

Ci-dessous les détails de la mesure par TPEE de la conductivité thermique par la méthode de la Plaque Chaude Gardée (NF EN 12667:2001) à 20 et 30 °C pour un échantillon de terre crue (Tc, EC-20210515DG-002) qui a préalablement été conditionné en enceinte climatique à trois humidités relatives (80%, 50% et 30%) et une température (23°C) jusqu'à obtention d'une masse constante.

La variation massique relative observée entre le début et la fin du conditionnement sont reportées dans le Tableau III-16. Les éprouvettes marquées d'une étoile ont été conditionnée dans l'enceinte WKL64, celle marquée de deux étoiles dans l'enceinte SPCOV et l'essai sec en

étuve. Les mesures dimensionnelles sont la moyenne de 5 déterminations par côté et 10 déterminations par épaisseur réalisées au pied à coulisse.

Identifiant éprouvette/essai	Dimensions $h \times l \times e$ (mm)	Masse finale (g)	Durée [jours]	Masse volumique finale (kg/m^3)	Variation massique finale (%)
Tc _{1_80} *	149,18 x 148,93 x 29,68	1319.67	26	2001	0.7
Tc _{1_50} *	149,18 x 148,93 x 29,68	1310.50	9	1987	-0.65
Tc _{1_30}	149,18 x 148,93 x 29,68	1304.86	7	1979	-0.17
T _{CB_sec}	150,67 x 148,21 x 29,89	1310.83	5	1963	-0.62

Tableau III-16. Données de conditionnement de l'éprouvette Tc

Les variations de masse volumique semblent cohérentes. Les variations massiques en relatif correspondent à 3 à 10 g en absolu. Il faut aussi prendre en compte que les échantillons très friables ont pu perdre de la matière dans les différentes manipulations.

Les conditions expérimentales pour chaque essai sont reportées dans le Tableau III-17. L'éprouvette marquée d'une étoile a été mesurée avec les pads de compensation à cause de l'irrégularité de l'échantillon. Les pads ont été abandonnés pour les autres essais. Les variations de masse reportées sont relatives aux échantillons filmés.

Identifiant éprouvette	Pression appliquée (Pa)	Différence de température moyenne (K)	Temps de stabilisation (min)	T ambiante moyenne (°C)	HR ambiante moyenne (%)	Variation massique pendant l'essai (%)
Tc _{1_80} *	1000	10.0	1440	18.4	68.5	-0.04
Tc _{1_50}	1000	10.0	1440	19.0	70.0	-0.01
Tc _{1_30}	1000	10.0	1440	22.9	70.9	+0,03
T _{CB_sec}	1000	10.0	1440	21.2	65.7	+0.04

Tableau III-17. Conditions d'essai de l'éprouvette Tc

Les résultats sont récapitulés dans le Tableau III-18. L'incertitude ne prend pas en compte les résistances de contact induites par la non-planéité de l'éprouvette et par la présence d'un film plastique pour éviter les migrations de vapeur d'eau.

ID Essai	Température de mesure (°C)	Epaisseur moyenne échantillon (mm)	Densité de flux thermique (mW/m^2)	Conductivité thermique ($\text{mW}/(\text{m.K})$)	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ ($\text{mW}/(\text{m.K})$)	Incertitude de mesure ($\text{mW}/(\text{m.K})$) ($k = 2$)
Tc _{1_80}	21.8	29.43	238.94	469	409	±14.1
	31.4		265.09	520		
Tc _{1_50}	20.0	30.66	137.5	405	380	±13.2
	30.0		145.9	429		
Tc _{1_30}	20.0	30.61	137.3	420	396	±13.7

	30.0		145.2	444		
T _{CB_sec}	20.0	31.45	106.80	336	316	±11.0
	30.0		113.04	356		

Tableau III-18.Résultats de mesure de la conductivité thermique sur l'échantillon Tc₁

Les épaisseurs moyennes reportées sont directement mesurées par le dispositif de plaque chaude gardée utilisé. Elles concernent des échantillons filmés. Tous les échantillons ont été emballés dans un film plastique pour la mesure de la conductivité thermique. Des pesées avant/après essai sont réalisées avec le film plastique dont les résultats sont rapportés dans le Tableau III-19.

ID essai	m ₃ (g)	Date/heure	m ₄ (g)	Date/heure	Variation masse (%)	Epaisseur mes. (mm)
T _{c1_80}	1323.2	21/06/2021 16:32	1322.7	25/06/2021 09:50	-0.04%	29.43
T _{c1_50}	1309.3	29/07/2021 16:30	1309.1	02/08/2021 14:25	-0.02%	30.66
T _{c1_30}	1304.9	15/09/2021 14:45	1305.2	20/09/2021 16:45	+0.03%	30.61
T _{CB_sec}	1310.9	27/09/2021 14:40	1311.4	31/09/2021 10:30	+0.04%	31.45

Tableau III-19.Variation de masse de Tc durant l'essai

Les résultats des conductivités thermiques pour un conditionnement à 50% et 30% ne sont pas significativement différents et ne sont pas dans l'ordre attendu. Les résultats d'essai sur échantillon sec et à 80% semblent plus cohérents.

b) Effusivité thermique

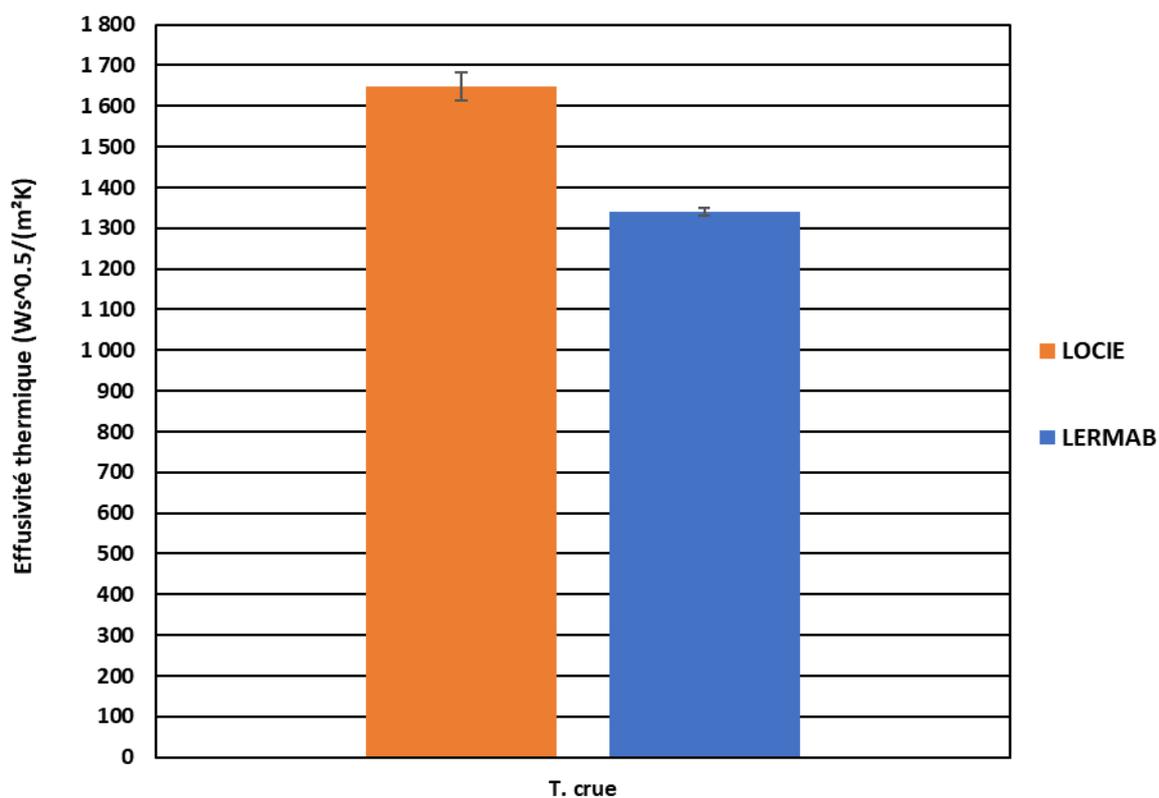


Figure III-14. Effusivité thermique de la terre crue à LOCIE et LERMAB à 25°C.

L'effusivité thermique de la terre crue trouvée expérimentalement à LOCIE est égale à 1648.45 $Ws^{0.5}/(m^2K)$, plus grande que celle obtenue à LERMAB qui est égale à 1339.29 $Ws^{0.5}/(m^2K)$ (voir Figure III-14).

c) Chaleur spécifique

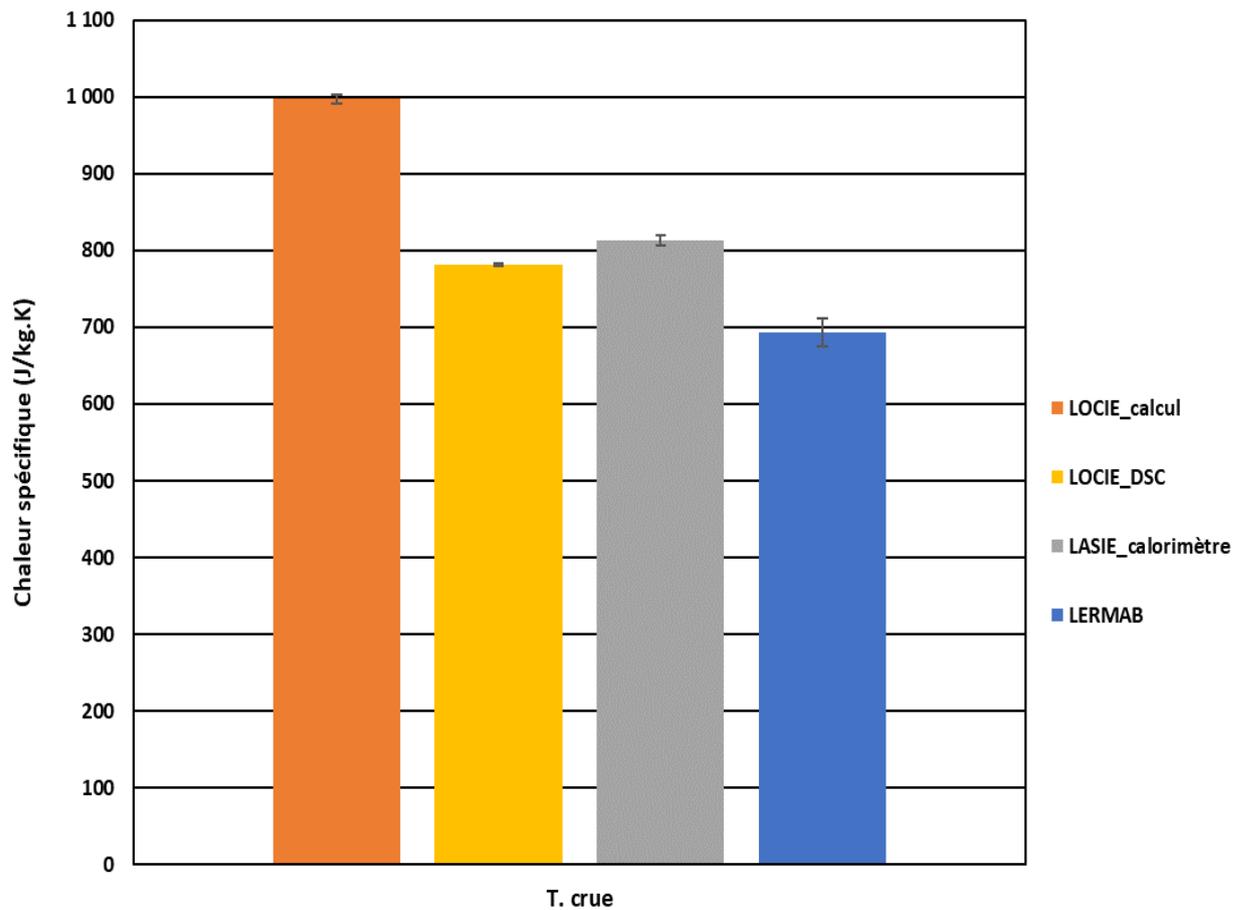


Figure III-15. Chaleur spécifique de la terre crue à LOCIE, LASIE et LERMAB à 25°C.

Figure III-15 représente la chaleur spécifique de la terre crue dans les trois laboratoires. On peut remarquer qu'ils ont trouvé des valeurs de chaleur spécifique proches (782, 813 et 692 J/kg.K à LOCIE par DSC, LASIE par calorimètre et LERMAB par calcul, respectivement) sauf dans le cas de LOCIE, le calcul a donné une valeur plus élevée (997 J/kg.K). Cet écart peut venir de la différence dans les valeurs de conductivité thermique et d'effusivité thermique dans le cas de chaleur spécifique calculée (voir Figure III-13 et Figure III-14).

d) Diffusivité thermique

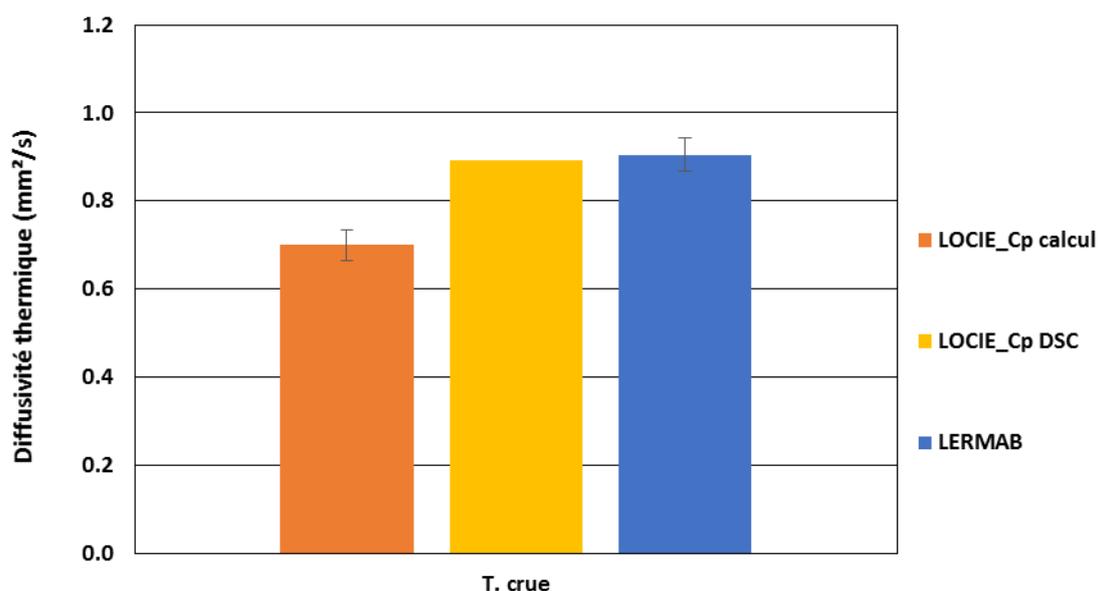


Figure III-16. Diffusivité thermique de la terre crue à LOCIE et LERMAB à 25°C.

Pareil que la terre cuite, la terre crue a des valeurs de diffusivité thermique similaires obtenues à LOCIE à partir de c_p expérimentale (0.893 mm²/s) et à LERMAB (0.906 mm²/s), qui sont plus élevées que le résultat trouvé à partir de c_p calculée à LOCIE (0.7 mm²/s).

III.3. Pierre dure

III.3.1. Isothermes de sorption

a) Isothermes d'enveloppe à 3 températures

Les courbes des isothermes de sorption d'enveloppe ont été mesurées sur deux prélèvements à 3 températures différentes par manométrie (LaSIE). Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure III-17.

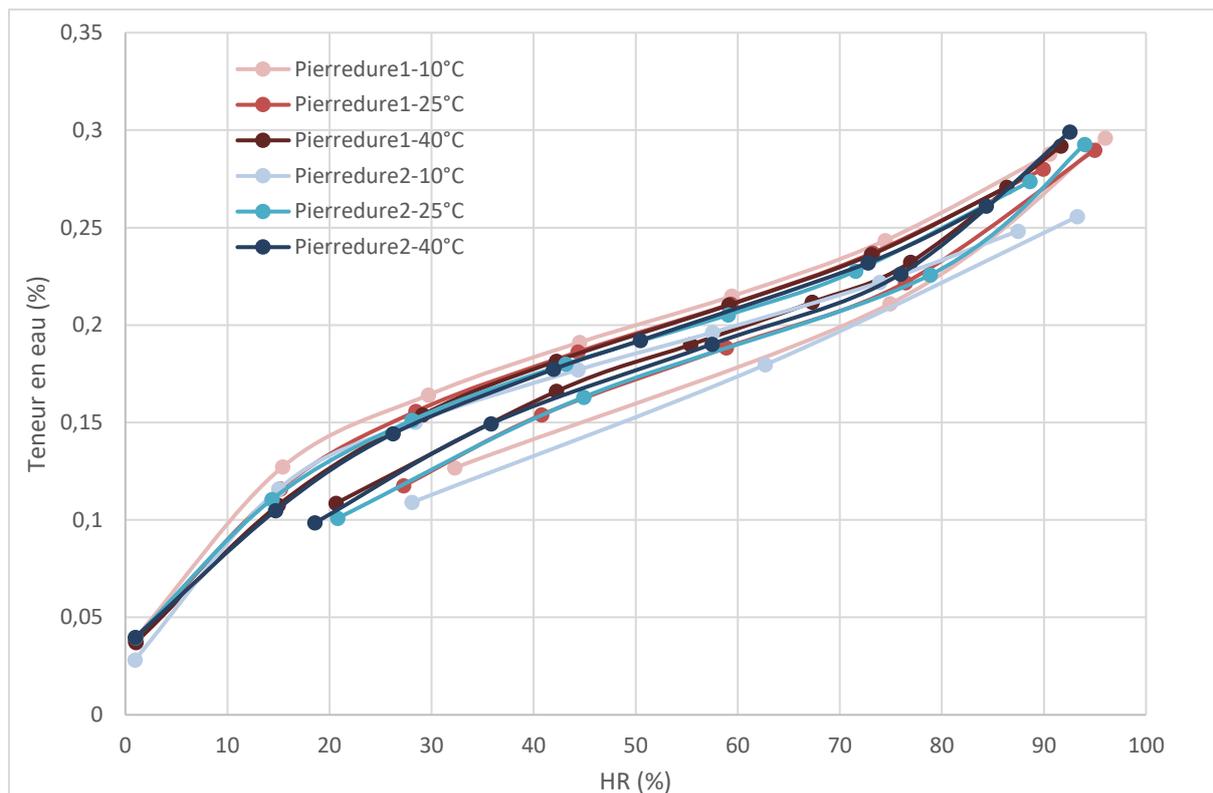


Figure III-17. Isothermes à 10°C,25°C,40°C par manométrie (LaSIE) pour la pierre dure

Nous pouvons observer une très faible adsorption du matériau (un maximum de 0.35% de teneur en eau).

- La répétabilité des mesures est correcte.
- Il ne peut pas être fait d'exploitation des isothermes à différentes températures car la variation en fonction de la température n'est pas significative au vu de la répétabilité.

b) Isothermes d'enveloppe à 25°C

Deux prélèvements ont été mesurés au LaSIE et un prélèvement au LGPM.

Le Tableau III-20 et Tableau III-21 récapitulent les résultats des isothermes d'enveloppes obtenus sur la terre cuite respectivement par le LaSIE et le LGPM.

Ads-Pd1	HR (%)	27,26	40,76	58,86	76,43	94,97	
	EMC (%)	0,12	0,15	0,19	0,22	0,29	
DesPd1	HR (%)	0,97	15,19	28,46	44,35	59,31	73,20 89,90
	EMC (%)	0,04	0,12	0,16	0,19	0,21	0,24 0,28
AdsPd2	HR (%)	20,80	44,90	78,84	93,99		
	EMC (%)	0,10	0,16	0,23	0,29		
DesPd2	HR (%)	0,99	14,36	28,09	43,15	59,05	71,53 88,62
	EMC (%)	0,04	0,11	0,15	0,18	0,21	0,23 0,27

Tableau III-20. Valeurs d'isothermes pour 2 échantillons de pierre dure mesurées par manométrie au LaSIE

Ads1	HR (%)	15	30	45	60	75	90
	EMC (%)	0,118	0,198	0,256	0,304	0,405	0,624
Des1	HR (%)	15	30	45	60	75	90
	EMC (%)	0,153	0,232	0,287	0,348	0,435	0,624

Tableau III-21. Valeurs d'isothermes pour un échantillon de pierre dure mesurées par DVS au LGPM

Afin de mieux illustrer la répétabilité et la reproductibilité sur ces mesures, nous avons présenté dans la Figure III-18 une comparaison graphique des isothermes de sorption obtenues.

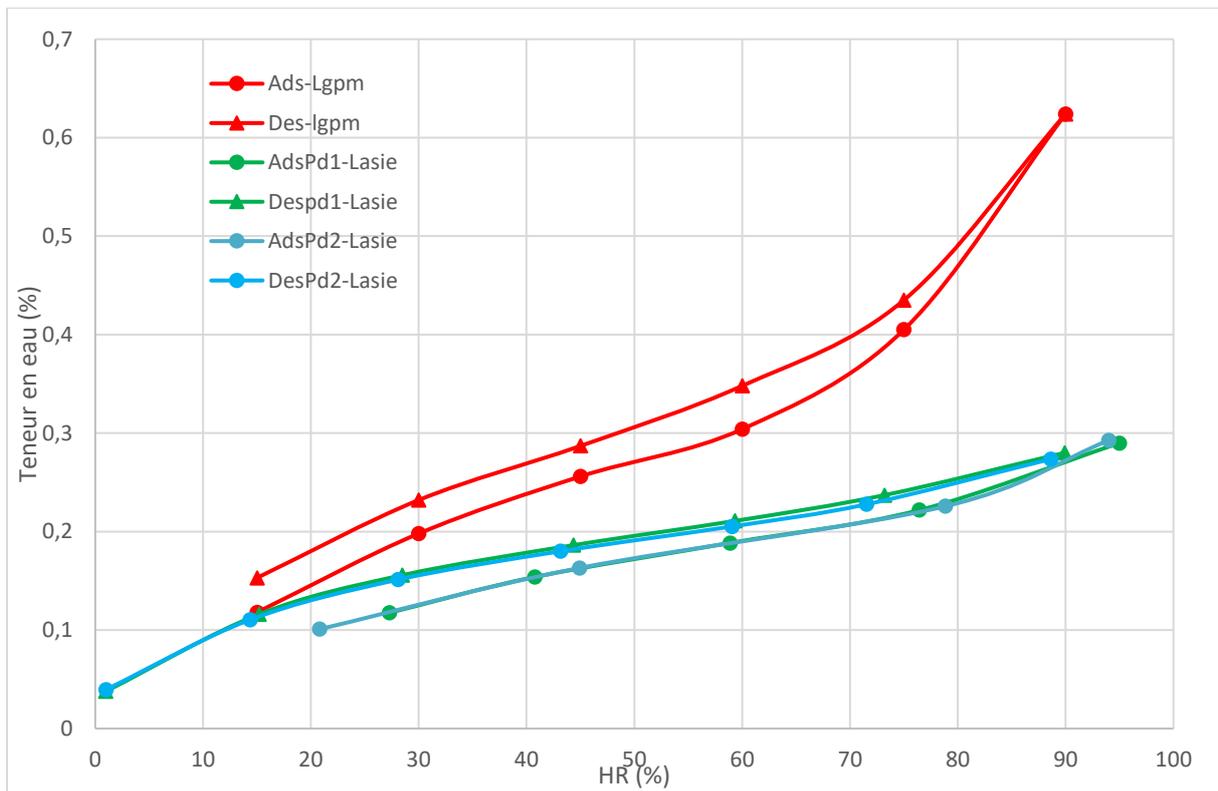


Figure III-18. Isothermes de sorption des échantillons de pierre dure mesurées par manométrie au LaSIE et par DVS au LGPM

En se basant sur les résultats présentés sur la Figure III-18, nous pouvons conclure que :

- Nous notons un écart dans les mesures des isothermes de sorption en fonction de la méthode utilisée, mais cet écart doit être relativisé au vu des très faibles taux d'adsorption. Les critères de stabilité des méthodes peuvent avoir une grande influence dans ce cas.
- La répétabilité est correcte en manométrie.

Par ailleurs, les paramètres des modèles HH ont été mesurés pour l'ensemble des isothermes d'adsorption/désorption.

	Paramètres du modèle Hailwood-Horrobin HH							
	Adsorption				Désorption			
	HH_A+	HH_B+	HH_C+	R ²	HH_A-	HH_B-	HH_C-	R ²
Pierre dure 1	86,377	6,120	0,037	0,999	27,532	6,540	0,037	0,996
Pierre dure 2	81,422	6,547	0,042	0,999	25,123	6,908	0,040	0,995

Tableau III-22. Paramètres du modèle HH par le LaSIE pour la pierre dure

Matériau x	Paramètres du modèle Hailwood-Horrobin HH							
	Adsorption			HH_RMSE	Désorption			HH_RMSE
	A+	B+	C+		A-	B-	C-	
Pierre dure	8,75E+0 1	5,19E+0 1	2,64E- 02	1,67E-03	4,94E+0 1	2,59E+0 2	2,00E+0 2	1,16E-03
Matériau x	Paramètres du modèle GAB							
	Adsorption			GAB_RMS E	Désorption			GAB_RMS E
	GAB_M m	GAB_C	GAB_K		GAB_M m	GAB_C	GAB_K	
Pierre dure	1,51E-02	9,34E- 01	2,72E- 01	5,29E-04	7,54E-02	1,72E- 01	3,02E- 01	7,53E-04

Tableau III-23. Paramètres des modèles par le LGPM pour la pierre dure

c) Isothermes intermédiaires

Le Tableau III-24 et Tableau III-25 présentent les résultats des boucles d'isothermes intermédiaires obtenus respectivement par le LaSIE sur deux prélèvements et le LGPM sur un prélèvement. Une moyenne a été faite pour le LaSIE car la répétabilité était correcte.

Adsmoy1	HR (%)	29,99			60,01		90,34
	EMC (%)	0,00	0,14		0,19		0,29
Desmoy1	HR (%)	15,02	30,02	44,99	60,03	75,06	90,26
	EMC (%)	0,10	0,15	0,18	0,21	0,24	0,29
Adsmoy2	HR (%)	15,01	30,01	45,01	59,99	75,14	
	EMC (%)	0,10	0,14	0,17	0,20	0,23	
Desmoy2	HR (%)	30,01		45,01	60,03	75,14	
	EMC (%)	0,15		0,18	0,20	0,23	
Adsmoy3	HR (%)	30,02		45,01	60,04		
	EMC (%)	0,15		0,17	0,20		
Desmoy3	HR (%)	45,01		50,00	55,02	60,04	
	EMC (%)	0,18		0,18	0,19	0,20	
Adsmoy4	HR (%)	45,01		50,00	55,04		
	EMC (%)	0,18		0,18	0,19		
Desmoy4	HR (%)	50,00		55,01			
	EMC (%)	0,18		0,19			

Tableau III-24. Valeurs des isothermes intermédiaires moyennées mesurées par DVS au LaSIE pour la pierre dure

Ads1	HR (%)	15	30	45	60	75	90
	EMC (%)	0,118	0,198	0,256	0,304	0,405	0,624
Des1	HR (%)	15	30	45	60	75	90
	EMC (%)	0,153	0,232	0,287	0,348	0,435	0,624
Ads2	HR (%)	15	30	45	60		
	EMC (%)	0,125	0,212	0,272	0,341		

Des2	HR (%)	15	30	45	60
	EMC (%)	0,184	0,253	0,289	0,341

Tableau III-25. Valeurs des isothermes intermédiaires mesurées par DVS au LGPM pour un échantillon de pierre tendre

Dans la Figure III-19, nous avons présenté une comparaison exhaustive de ces résultats afin de bien montrer les boucles intermédiaires mesurées sur la terre cuite par les deux laboratoires (LaSIE et LERMAB).

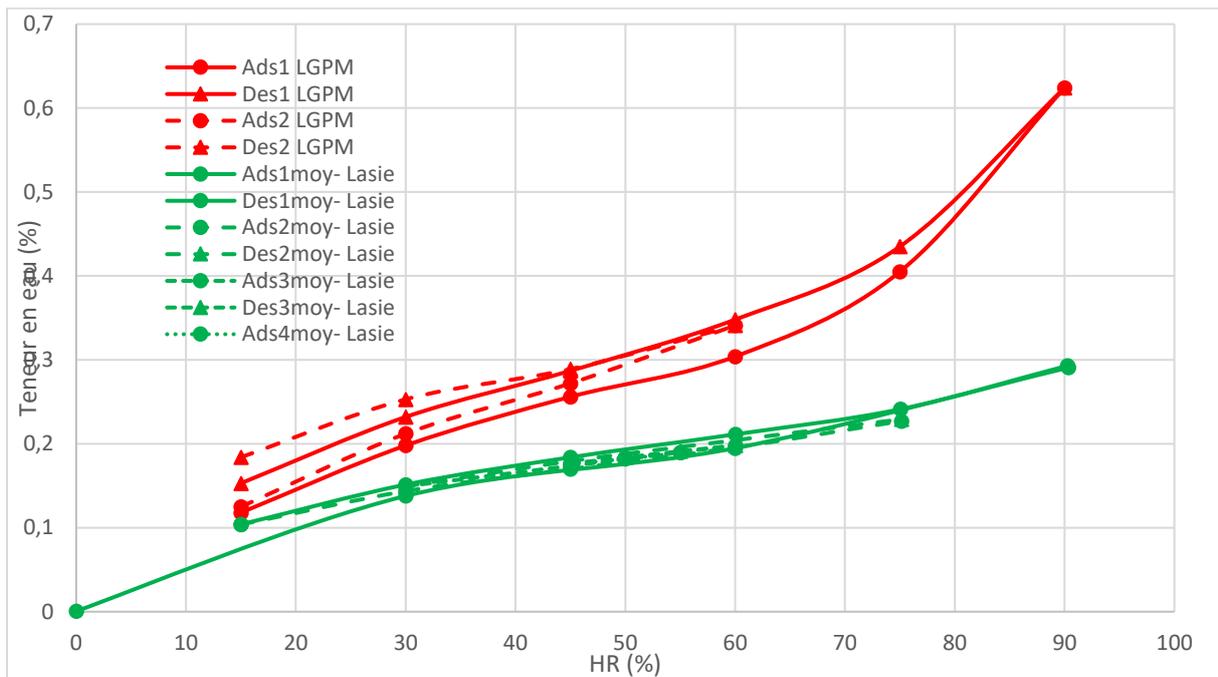


Figure III-19. Boucles intermédiaires comparées à 25°C mesurées par DVS (LaSIE et LGPM)

- L'analyse des boucles intermédiaires de la pierre dure montre une très faible adsorption du matériau (0.3% de teneur en eau maximum) en cohérence avec l'isotherme d'adsorption manométrique.
- Les deux prélèvements effectués n'ont pas d'écart de mesure. Nous notons une très faible diminution de hystérésis, cela reste dans la marge de répétition de la mesure, donc non significatif.

III.3.2. Coefficient de diffusion

Le facteur de résistance à la diffusion $\bar{\mu}$ de la pierre dure a été mesuré par les méthodes CS et FA. Les valeurs inter et intra laboratoires sont relativement dispersées. La valeur de $\bar{\mu}$ est d'environ 231 ± 98 pour une HR moyenne de 37% et d'environ 182 ± 115 pour une HR moyenne de 67%. Le fort écart type semble indiquer une hétérogénéité des échantillons qui pourtant avaient une masse volumique centrée sur la moyenne (TIPEE : $\rho = 2560 \pm 62 \text{ kg/m}^3$; LERMAB : $\rho = 2499 \pm 55 \text{ kg/m}^3$). Les mesures du LGPM en FA, effectuées sur un seul échantillon, et les mesures de TIPEE (CS) ne semblent pas indiquer d'effet de la plage d'humidité relative sur $\bar{\mu}$. Celles du LERMAB, au contraire, montre un effet significatif. Il est à noter que malgré la faible hygroscopicité des matériaux comme la terre crue, la pierre dure, l'argilus, etc., la cinétique de HR en FA, et donc la valeur $\bar{\mu}$ identifiée, est très sensible à l'isotherme de sorption et la densité

injecté dans le modèle. Une variation de pente de l'isotherme de sorption avec HR peut artificiellement conduire à changer la valeur $\bar{\mu}$ identifiée et ainsi faire apparaître une hydro-activation de la diffusion qui n'existe pas. L'utilisation de l'isotherme de sorption du LGPM a permis à posteriori au LERMAB de retraiter ses données et de trouver des valeurs proches de celles du LGPM.

Pierre dure	Méthode	Mu sec (37% RH)	Mu humide (67% RH)	Densité (kg/m ³)	Humidité d'équilibre moyenne (% kg d'eau/kg MS)		
					HR= 25%	HR= 50%	HR= 80%
LERMAB	FA	265± 76.94	89.51± 38.04	2499±55	0.35	0.59	1.18
LGPM	FA	192.31	215.05	2651	0.25	0.44	0.62
TIPEE	CS	349± 17	332 ±60	2530±62			
LOCIE	CS	119.55± 19.88	92.41± 16.02	...			
Inter-laboratoire		231.48±98.32	182±115.72				

Tableau III-26. Facteur de résistance à la diffusion et densité de la pierre dure

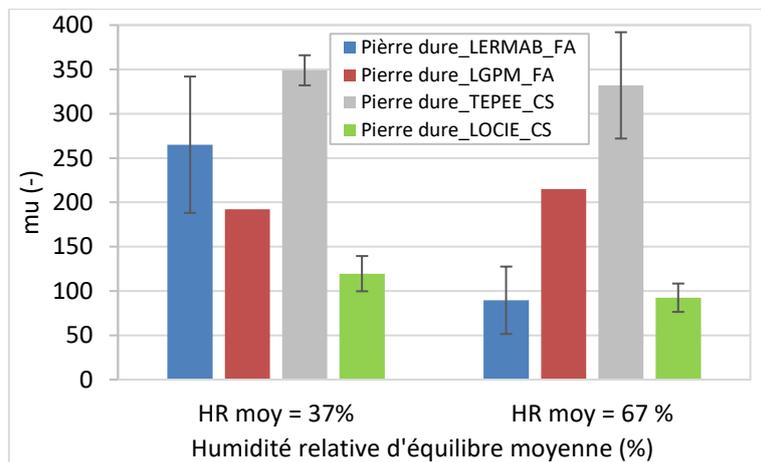


Figure III-20. Comparaison du facteur de résistance à la diffusion de la pierre dure

III.3.3. Caractéristiques thermiques

a) Conductivité thermique

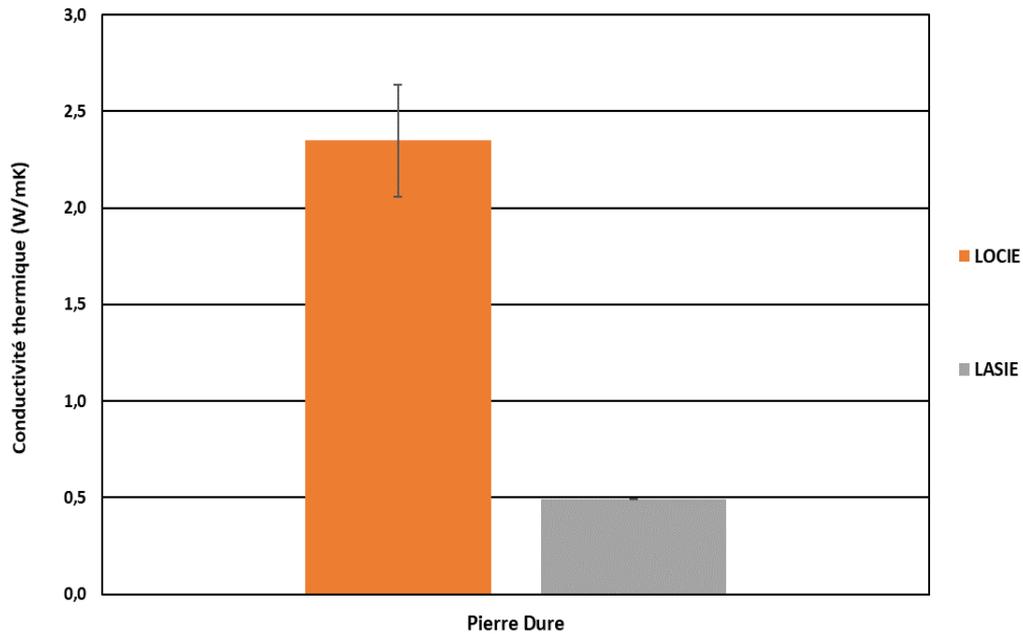


Figure III-21. Conductivité thermique de la pierre dure à LOCIE et LASIE à 25°C.

Pour la pierre dure, la conductivité thermique a été juste testée à LOCIE et LASIE qui ont trouvé des résultats différents, comme le montre la Figure III-21. La valeur obtenue à LASIE est 0.49 W/m.K, est beaucoup plus faible que celle trouvée à LOCIE qui est égale à 2.35 W/m.K. La petite valeur obtenue à LASIE vient de l'état des échantillons qui sont ébréchés, ce qui a affecté les mesures comme l'instrument utilisé est très sensible à la forme et les dimensions de l'échantillon et à son état. Alors comme ils ont eu des problèmes de surface et de dimension, la mesure a été considérée comme non valide sur le λ -mètre, et elle a été refaite sur un hot disk qui a donné une valeur de 2.72 W/m.K, qui est proche de celle trouvée à LOCIE.

b) Chaleur spécifique

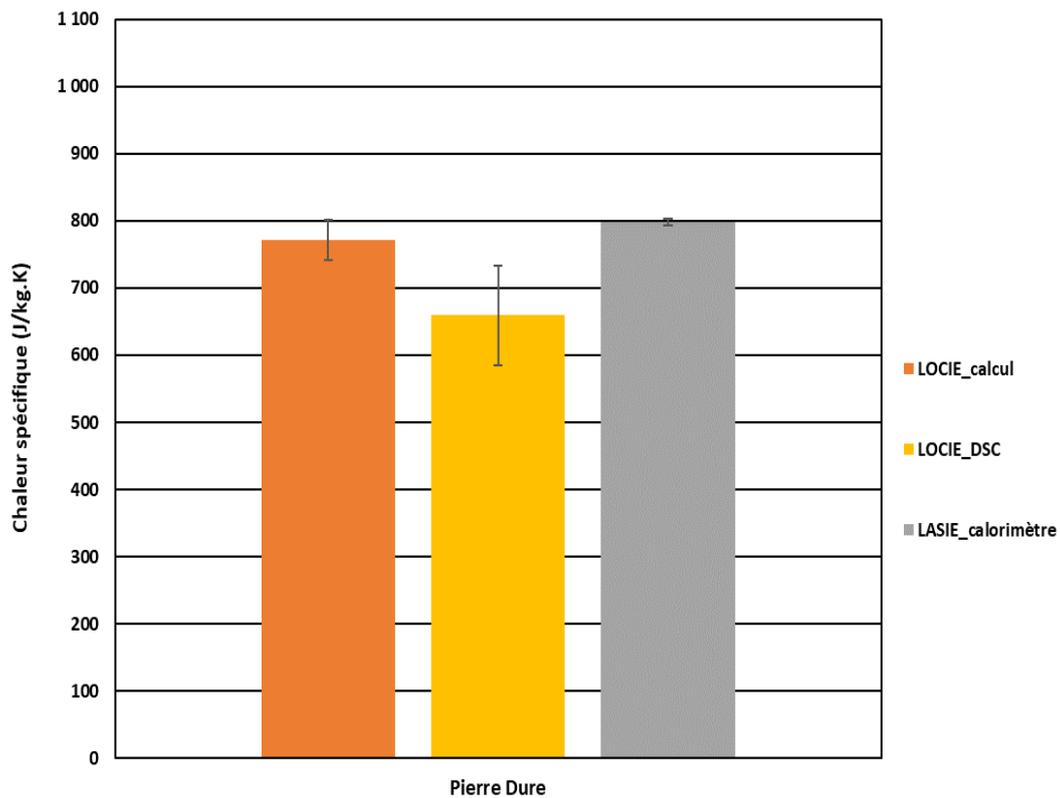


Figure III-22. Chaleur spécifique de la pierre dure à LOCIE et LASIE à 25°C.

La chaleur spécifique des échantillons de pierre dure trouvée à LOCIE par calcul (771.8 J/kg.K) et par DSC (659 J/kg.K) et à LASIE (798.36 J/kg.K) sont dans le même ordre de grandeur en tenant compte des barres d'erreur, et surtout celle de LOCIE obtenue par calcul et l'autre de LASIE trouvée expérimentalement par le calorimètre (voir Figure III-22).

c) Diffusivité thermique

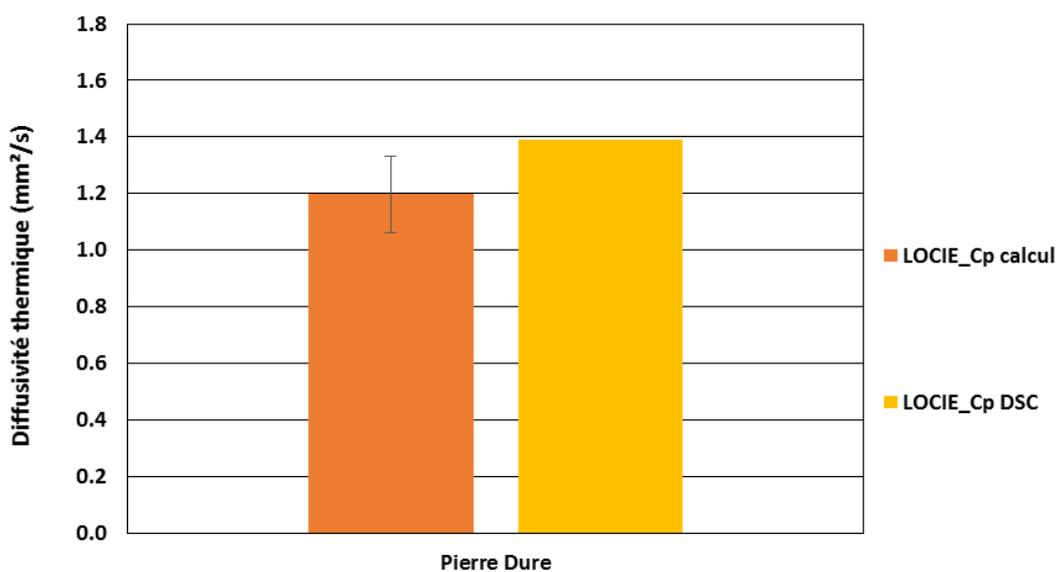


Figure III-23. Diffusivité thermique de la pierre dure à LOCIE à 25°C.

Comme le montre la Figure III-23, la diffusivité thermique de la pierre dure déterminée à LOCIE à partir de c_p calculée ($1.198 \text{ mm}^2/\text{s}$) est légèrement inférieure à celle déterminée en utilisant c_p expérimentale ($1.392 \text{ mm}^2/\text{s}$).

III.4. Pierre tendre

III.4.1. Isothermes de sorption

a) Isothermes d'enveloppe à 25°C

Un prélèvement a été mesuré au LGPM et le Tableau III-27 récapitule les résultats de l'isotherme d'enveloppe obtenue sur la pierre tendre.

Ads1	HR (%)	0	15,00	30,00	45,00	60,00	75,00	90,00
	EMC (%)	0	0,08	0,12	0,15	0,22	0,35	0,69
Des1	HR (%)		15,00	30,00	45,00	60,00	75,00	90,00
	EMC (%)		0,16	0,22	0,27	0,34	0,43	0,69
Ads2	HR (%)		15,00	30,00	45,00	60,00		
	EMC (%)		0,05	0,08	0,16	0,25		
Des2	HR (%)		15,00	30,00	45,00	60,00		
	EMC (%)		0,07	0,09	0,15	0,25		

Tableau III-27. Valeurs d'isothermes pour un échantillon de pierre tendre mesurées par DVS au LGPM

Afin de mieux visualiser l'isotherme de sorption de la pierre tendre mesurée par DVS au LGPM, nous l'avons présenté graphiquement dans la Figure III-24.

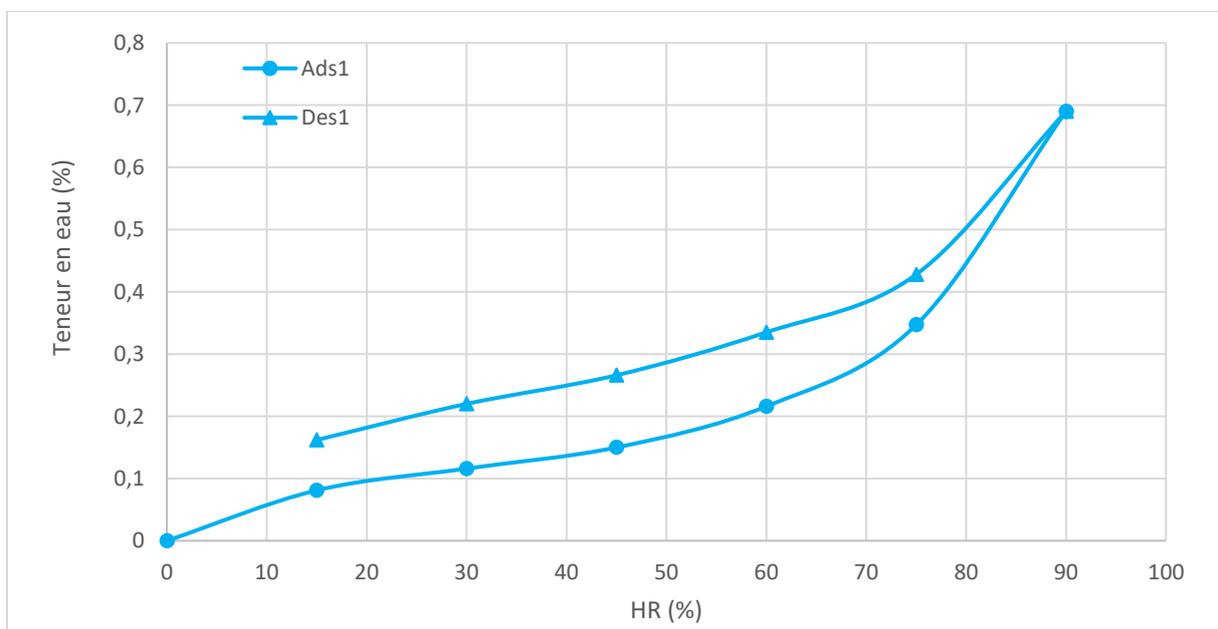


Figure III-24. Valeurs de l'isotherme pour un échantillon de pierre tendre mesuré par DVS au LGPM

En se basant sur les résultats présentés sur la Figure III-24, nous pouvons conclure que l'isotherme montre une très faible adsorption (0.7% maximum à 90% d'humidité) et donc un matériau très peu hygroscopique.

Par ailleurs, les paramètres du modèle HH pour la courbe enveloppe a été également calculé et indiqué dans le Tableau III-28.

Matériaux	Paramètres du modèle Hailwood-Horrobin HH							
	Adsorption			HH_RMSE	Désorption			HH_RMSE
	A+	B+	C+		A-	B-	C-	
pierre Tendre	3,76E+02	5,69E-05	3,02E+02	2,22E-04	1,90E+02	1,50E+00	6,70E+01	5,11E-04

Matériaux	Paramètres du modèle GAB							
	Adsorption			GAB_RMSE	Désorption			GAB_RMSE
	GAB_Mm	GAB_C	GAB_K		GAB_Mm	GAB_C	GAB_K	
pierre Tendre	-1,97E-03	6,50E+00	-1,55E-01	2,83E-04	-8,26E-03	3,60E+00	-1,68E-01	5,47E-04

Tableau III-28. Valeurs des paramètres des modèles pour un échantillon de pierre tendre mesurées par DVS au LGPM

b) Isothermes intermédiaires

La Figure III-25 présente les résultats de la boucle d'isotherme intermédiaire obtenue sur la pierre tendre. Cette dernière à été mesurée par DVS au LGPM.

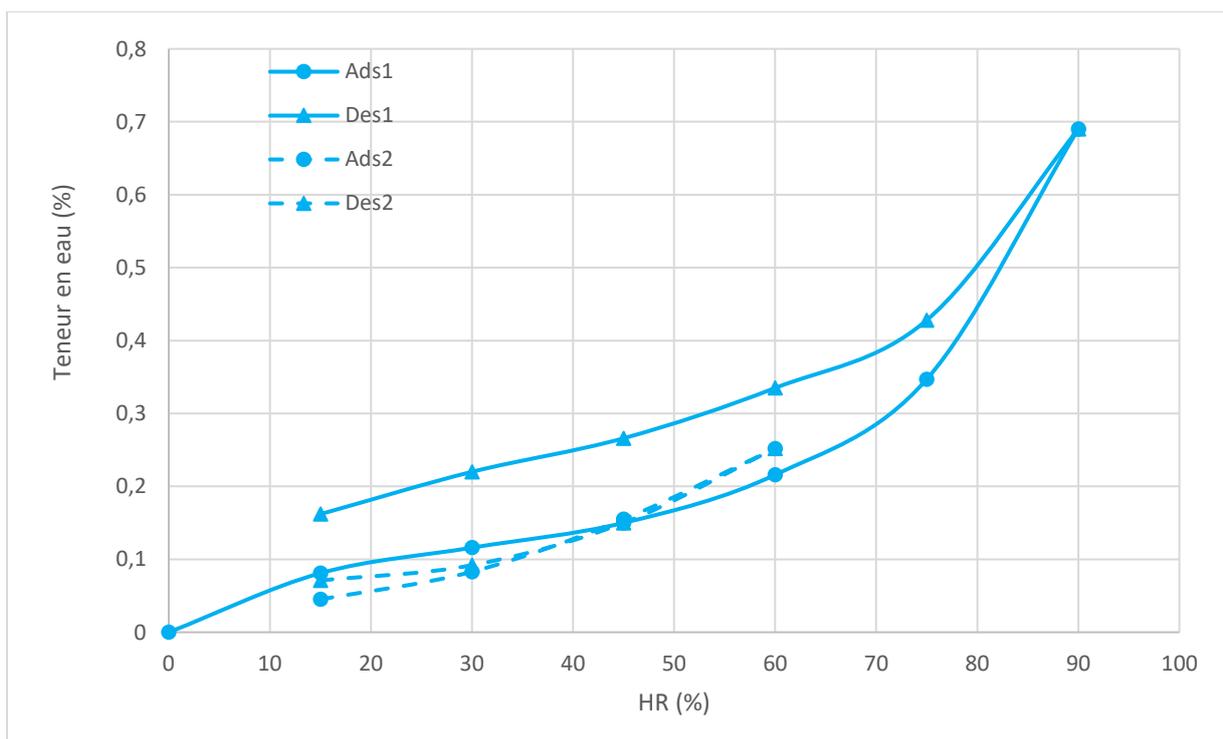


Figure III-25. Boucle intermédiaire pour un échantillon de pierre tendre mesuré par DVS au LGPM

Dans le cas d'une boucle intermédiaire, nous pouvons noter que l'hystérésis est réduite mais les taux d'adsorption sont très faibles et cette remarque devra être confirmée par reproductibilité.

III.4.2. Coefficient de diffusion

Le facteur de résistance à la diffusion $\bar{\mu}$ de la pierre tendre a été mesurée uniquement avec la méthode de la coupelle CS. C'est un matériau relativement perméable à la vapeur avec des valeurs $\bar{\mu} < 15$. Le facteur de résistance à la diffusion de la pierre tendre est d'environ 11.2 ± 4.5 pour une HR moyenne de 37% et de 12 ± 1.5 pour une humidité relative moyenne de 67%. Il ne semble donc pas avoir de dépendance de ce paramètre avec l'HR.

Pierre tendre	Méthode	Mu moyen (-)		Densité (kg/m ³)
		Sec (37% RH)	humide (65% RH)	
LASIE	CS	14.47±2.53	13.24±4.34	
TIPEE	CS	8±1.3	11.1±0.4	1774±26
Inter laboratoire		11.24±4.58	12.2±1.51	

Tableau III-29. Facteur de résistance à la diffusion et densité de la pierre tendre

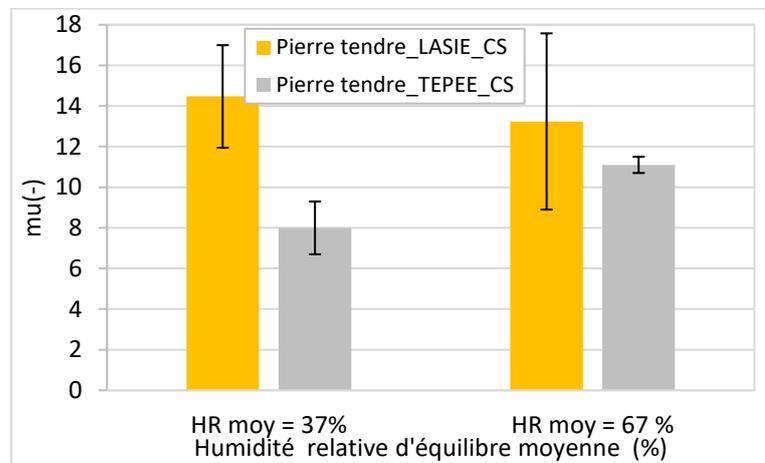


Figure III-26. Comparaison du facteur de résistance à la diffusion de la pierre tendre

III.4.3. Caractéristiques thermiques

a) Conductivité thermique

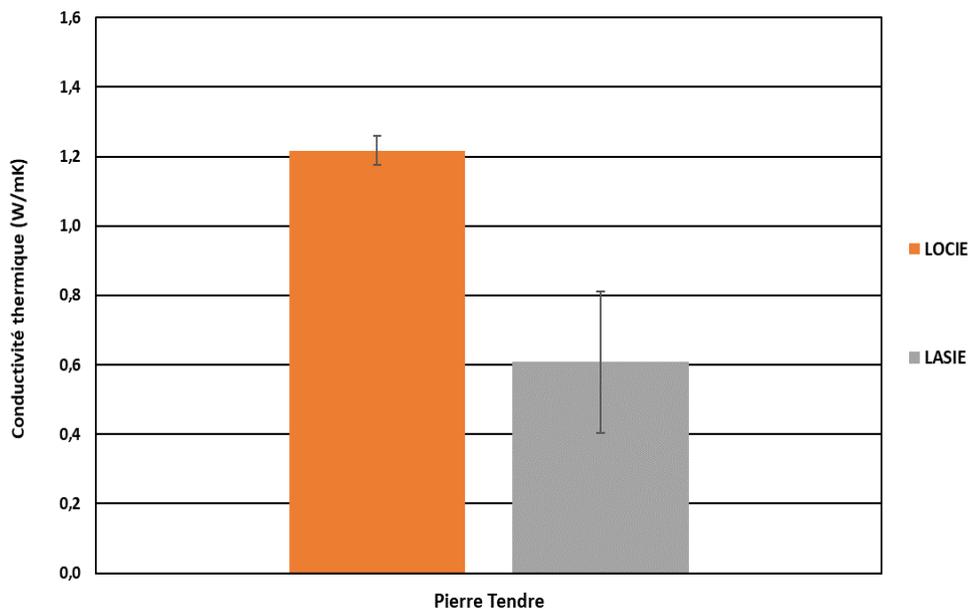


Figure III-27. Conductivité thermique de la Pierre tendre à LOCIE et LASIE à 25°C.

Pour la pierre tendre, une différence significative a été remarquée en comparant la conductivité thermique mesurée à LOCIE (1.22 W/m.K) et celle de LASIE (0.61 W/m.K) (voir Figure III-27). La valeur trouvée à LOCIE est plus importante que celle obtenue à LASIE. Les échantillons de LASIE ont présenté des fissures et ont eu un problème de répétabilité sur un même échantillon. Alors sa mesure a été refaite sur un hot disk et une valeur égale à 1.09 W/m.K a été obtenue, qui est légèrement inférieure de celle de LOCIE.

b) Chaleur spécifique

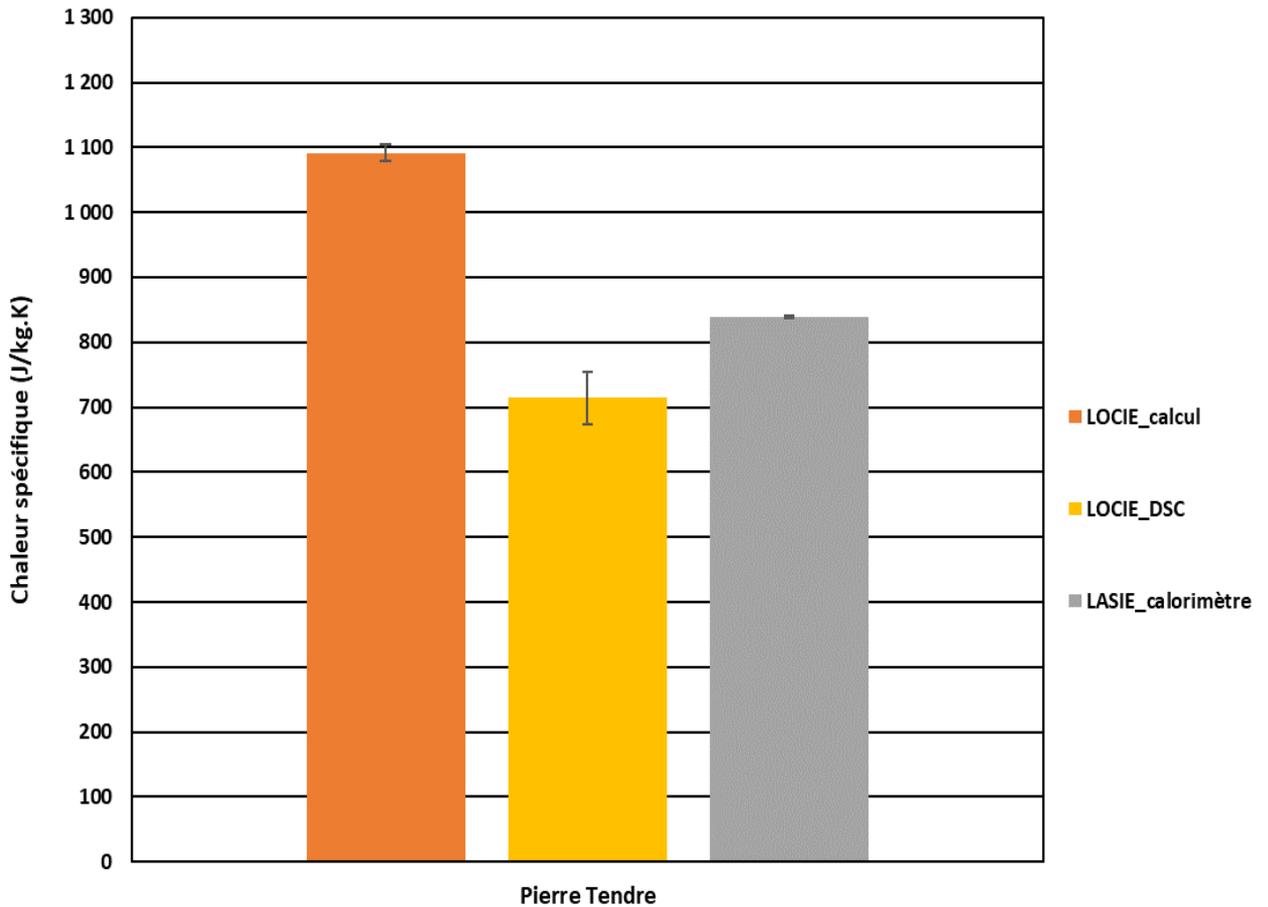


Figure III-28. Chaleur spécifique de la pierre tendre à LOCIE et LASIE à 25°C.

Pour la chaleur spécifique, LOCIE et LASIE ont donné des valeurs différentes de chaleur spécifique pour la pierre tendre (voir Figure III-28). Le résultat expérimental de LOCIE trouvé par le DSC (714 J/kg.K) est plus proche à l'autre obtenu par LASIE avec le calorimètre (839 J/kg.K), alors que la valeur calculée à LOCIE (1092 J/kg.K) est plus élevée que les deux.

c) Diffusivité thermique

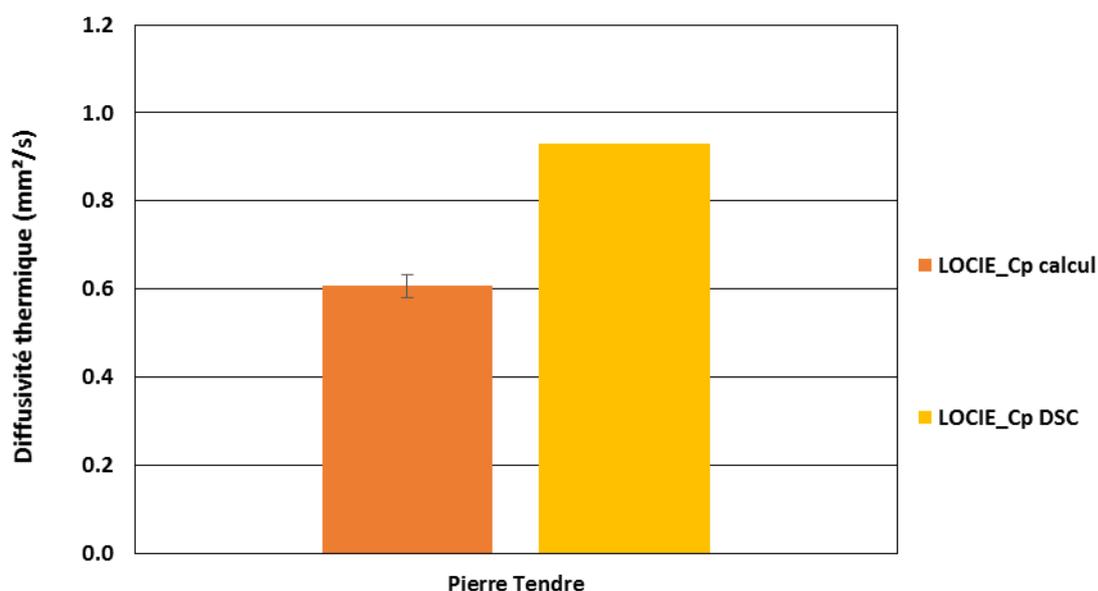


Figure III-29. Diffusivité thermique de la pierre tendre à LOCIE à 25°C.

La diffusivité thermique de la pierre tendre déterminée à LOCIE à partir de c_p expérimentale (0.93 mm²/s) est supérieure à celle déterminée en utilisant c_p calculée (0.608 mm²/s), comme le montre la Figure III-29.

III.5. Torchis

III.5.1. Isothermes de sorption

a) Isothermes d'enveloppe à 3 températures

Les courbes des isothermes de sorption d'enveloppe ont été mesurées sur deux prélèvements à 3 températures différentes par manométrie (LaSIE).

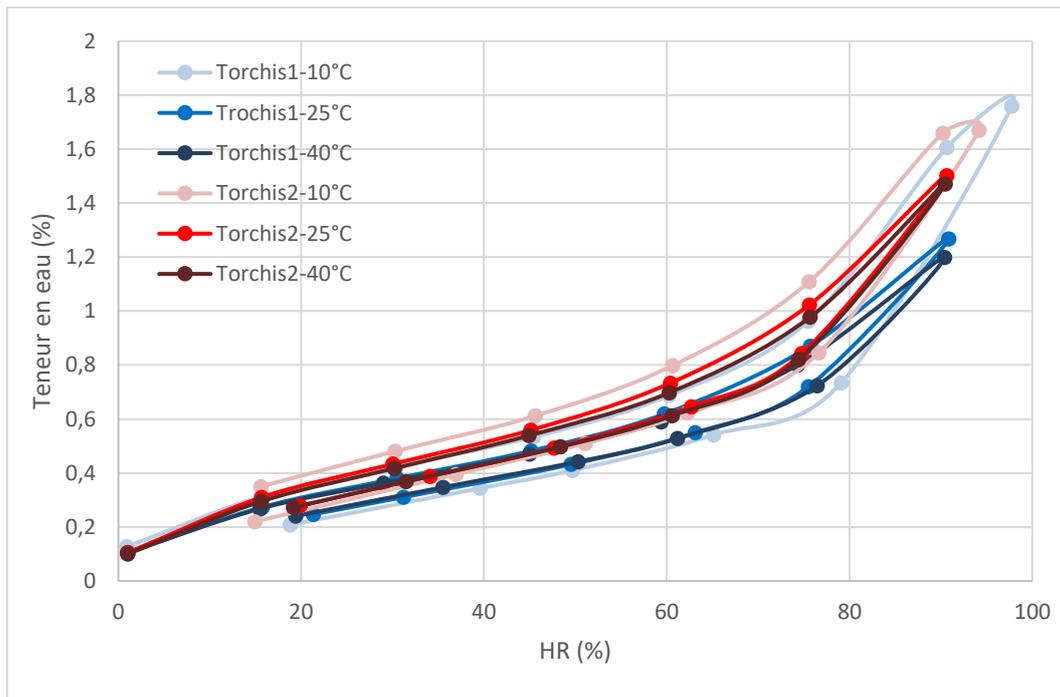


Figure III-30. Isothermes à 10°C,25°C,40°C par manométrie (LaSIE) pour le torchis

- L'analyse des isothermes du torchis montre une très faible adsorption du matériau (1.8% de teneur en eau maximum).
- La répétabilité est correcte sur les deux prélèvements.
- L'adsorption n'est pas modifiée de façon significative avec la température.

b) Isothermes d'enveloppe à 25°C

Deux prélèvements ont été mesurés au LaSIE et un prélèvement au LERMAB. La moyenne a été faite pour les prélèvements du LaSIE car la répétabilité était correcte. Le Tableau III-30 et Tableau III-31 récapitulent les résultats des isothermes d'enveloppes obtenus sur le torchis respectivement par le LaSIE et le LERMAB.

Ads1 moy	HR (%)	20,59	32,64	48,62	62,89	75,14	90,74
	EMC(%)	0,26	0,35	0,46	0,60	0,781	1,38
	ecartType HR (%)	1,05	2,06	1,31	0,31	0,51	0,14
	ecartType EMC(%)	0,02	0,05	0,04	0,07	0,09	0,16
Des1 moy	HR (%)	1,02	15,71	30,26	45,15	60,07	75,65
	EMC(%)	0,11	0,29	0,41	0,52	0,68	0,95
	ecartType HR (%)	0,02	0,03	0,32	0,01	0,50	0,08
	ecartType EMC(%)	0,00	0,03	0,04	0,05	0,08	0,11

Tableau III-30. Valeurs des isothermes moyennées mesurées par manométrie au LaSIE pour le torchis

Ads1	HR (%)	0,45	15,00	30,01	45,00	60,00	75,00	88,00
	EMC(%)	0,02	0,26	0,39	0,53	0,72	1,02	1,55
Des1	HR (%)	0,45	15,09	30,00	45,00	60,00	75,01	88,00
	EMC(%)	0,02	0,36	0,51	0,67	0,86	1,18	1,55

Tableau III-31. Valeurs des isothermes mesurées par VGA au LERMAB pour le torchis

Afin de mieux illustrer la répétabilité et la reproductibilité sur ces mesures, nous avons présenté dans la Figure III-31 une comparaison graphique des isothermes de sorption.

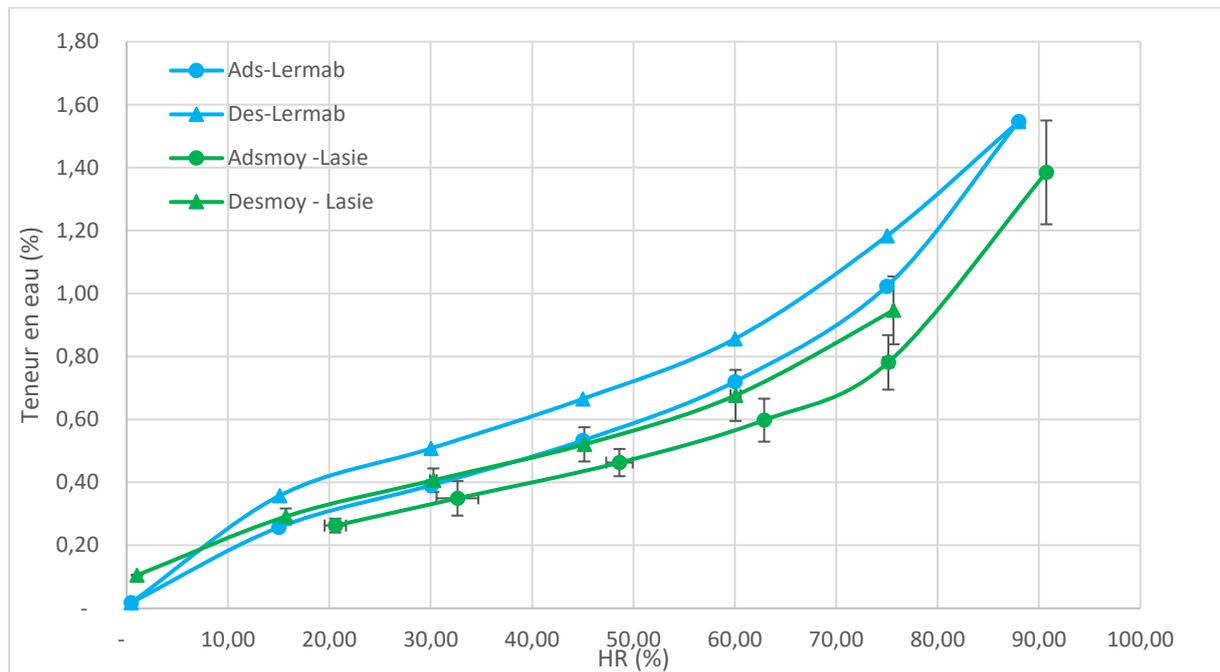


Figure III-31. Valeurs des isothermes moyennées mesurées par DVS au LaSIE et VGA au LERMAB pour le torchis

En se basant sur les résultats présentés sur la Figure III-31, nous pouvons conclure que :

- La mesure est reproductible et montre une faible adsorption. L'allure de l'isotherme est de type II. Ce torchis riche en sable et argile et pauvre en paille d'orge est donc très peu hygroscopique.
- La reproductibilité est correcte entre les méthodes de mesures

Par ailleurs, les paramètres du modèle HH pour les courbes enveloppes et la courbe moyenne (courbe unique) sont présentés dans le Tableau III-32 et Tableau III-33.

	Paramètres du modèle Hailwood-Horrobin HH							
	Adsorption				Désorption			
	HH_A+	HH_B+	HH_C+	R ²	HH_A-	HH_B-	HH_C-	R ²
Torchis 1	21,255	3,645	0,034	1,000	7,366	3,310	0,030	0,998
Torchis 2	19,997	3,016	0,028	1,000	8,756	2,779	0,025	0,999

Tableau III-32. Valeurs des paramètres du modèle HH par le LaSIE pour le torchis

Matériaux	Paramètres du modèle Hailwood-Horrobin HH								
	Adsorption			Désorption			Moyenne		
	A+	B+	C+	A-	B-	C-	A	B	C
Torchis	31.76	209.80	205.92	22.56	160.19	138.13	25.98	184.55	169.95

Tableau III-33. Valeurs des paramètres du modèle HH par le LERMAB pour le torchis

c) Isothermes intermédiaires

Le Tableau III-34 et Tableau III-35 présentent les résultats des boucles d'isothermes intermédiaires obtenus respectivement par le LaSIE et le LERMAB.

Ads1 moy	HR (%)	-	30,03		60,04	90,34	
	EMC(%)	0,00	0,41		0,68	1,61	
Des1 moy	HR (%)	15,01	30,03	45,04	60,04	75,07	90,25
	EMC(%)	0,30	0,44	0,58	0,75	1,03	1,60
Ads2 moy	HR (%)	15,02	30,01	45,02	60,01	75,14	
	EMC(%)	0,30	0,42	0,54	0,67	0,91	
Des2 moy	HR (%)		30,01	45,05	60,05	75,14	
	EMC(%)		0,44	0,57	0,71	0,91	
Ads3 moy	HR (%)		30,06	45,00	60,05		
	EMC(%)		0,44	0,54	0,68		
Des3 moy	HR (%)			45,02	50,01	55,02	60,09
	EMC(%)			0,56	0,60	0,64	0,68
Ads4 moy	HR (%)			45,04	50,04	55,04	
	EMC(%)			0,56	0,59	0,63	
Des4 moy	HR (%)				49,98	55,02	
	EMC(%)				0,59	0,63	

Tableau III-34. Valeurs des isothermes intermédiaires mesurées par manométrie au LaSIE pour le torchis

Ads1	HR (%)	0,45	15,00	30,01	45,00	60,00	75,00	88,00
	EMC(%)	0,02	0,26	0,39	0,53	0,72	1,02	1,55
Des1	HR (%)	0,45	15,09	30,00	45,00	60,00	75,01	88,00
	EMC(%)	0,02	0,36	0,51	0,67	0,86	1,18	1,55
Ads2	HR (%)		15,09	29,81	45,00	60,00	75,00	88,00
	EMC(%)		0,36	0,49	0,57	0,73	1,04	1,55

Tableau III-35. Valeurs des isothermes intermédiaires mesurées par VGA au LERMAB pour le torchis

Dans la Figure III-32, nous avons présenté une comparaison exhaustive de ces résultats afin de bien analyser les boucles intermédiaires mesurées sur le torchis par les deux laboratoires (LaSIE et LERMAB).

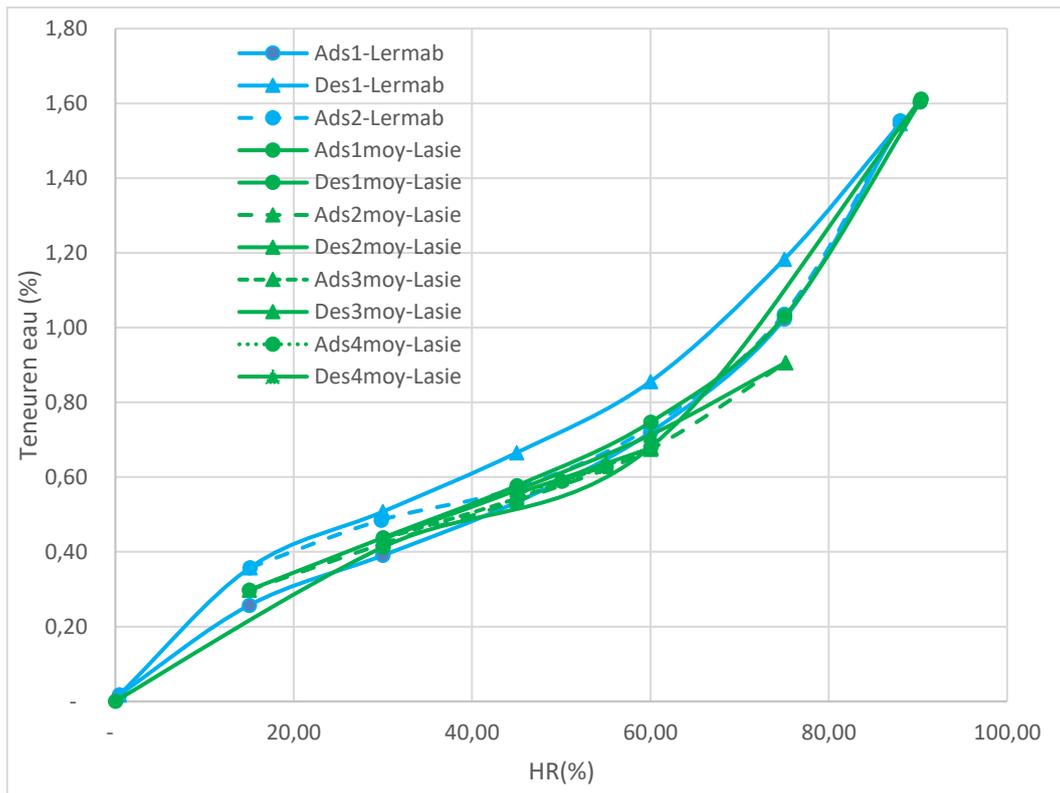


Figure III-32. Isothermes intermédiaires mesurées par DVS au LaSIE et VGA au LERMAB pour le torchis

- Comme l'hystérésis est inférieur à 0.2%, la courbe intermédiaire a été caractérisée, mais les paramètres du modèle *Gripped box* (Rémond et al. 2018) n'ont pas été identifiés.
- L'analyse des boucles intermédiaires du torchis par gravimétrie montre une très faible adsorption du matériau (1.6 % de teneur en eau maximum) en cohérence avec l'isotherme d'adsorption manométrique.
- L'hystérésis est inférieure à 0.2%

III.5.2. Coefficient de diffusion

Le facteur de résistance à la diffusion $\bar{\mu}$ du torchis a été mesuré par les méthodes CS et FA. Globalement les valeurs sont relativement proches. $\bar{\mu}$ du torchis est d'environ 7.9 ± 0.8 pour une HR moyenne de 37% et de 5.8 ± 1.2 pour une HR moyenne de 67%. L'augmentation de l'HR affecte donc peu $\bar{\mu}$. Les mesures du LOCIE indiquées dans le Tableau III-37 à haute HR moyenne de 67% sont proches de celles du LERMAB et du LGPM alors qu'elles s'écartent pour une HR moyenne de 37% (confrontation mesure-simulation ne semble pas bonne sur cette plage d'humidité (voir annexe)). Les mesures CS sont proches de celles FA pour une HR moyenne de 37% alors qu'elles sont dispersées pour une HR moyenne de 67%. Une différence de densité de 204 kg/m^3 est enregistrée entre les échantillons caractérisés au LERMAB et ceux caractérisés par TIPEE. Il est possible que la dispersion des valeurs ait pour origine l'hétérogénéité des échantillons de torchis. Malgré le soin apporté lors de la réalisation des échantillons préparés par le LERMAB sur la base de la matière première fournis par le fournisseur 'Argilus' une répartition hétérogène des composants est toujours à craindre (argile, sable, paille) pour certains échantillons.

Torchis	Méthode	Mu moyen (-)		Densité (kg/m ³)	Humidité d'équilibre moyenne (% kg d'eau/kg MS)		
		sec (RH moy = 37%)	humide (RH moy = 67%)		HR= 37%	HR= 67%	HR= 90%
LERMAB	FA	8.04±0.3	5.48±0.36	1652±19	0.52	0.91	1.65
LGPM	FA	7.54±1.1	5.62±0.22				
TIPEE	CS	7±0.1	7.7±0.5	1423±44			
LASIE	CS	8.89±1.8	4.29±0.56				
LOCIE	FA	3.58	5.85				
Inter laboratoire		7.87±0.8	5.79±1.23				

Tableau III-36. Facteur de résistance à la diffusion, densité et teneur en eau d'équilibre du torchis

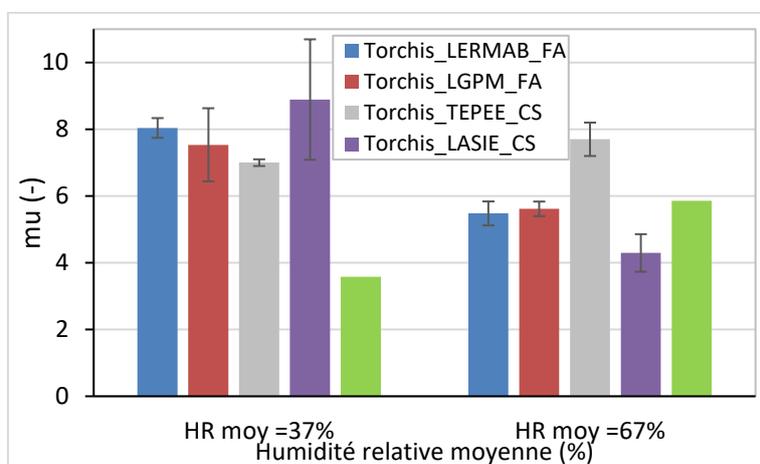


Figure III-33. Comparaison du facteur de résistance à la diffusion du torchis

III.5.3. Caractéristiques thermiques

a) Conductivité thermique

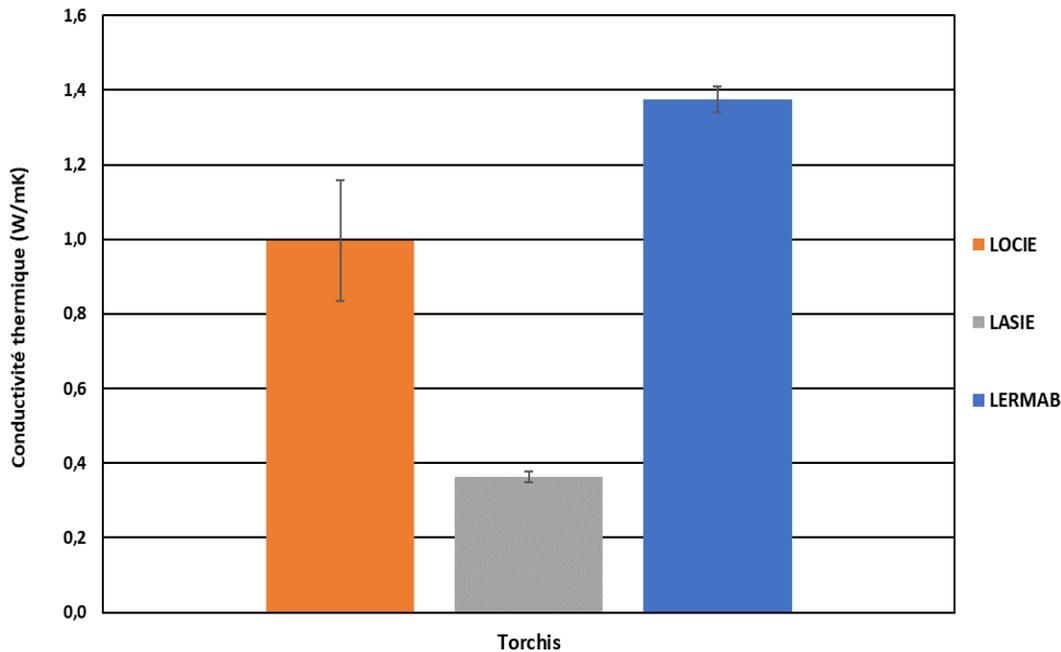


Figure III-34. Conductivité thermique du torchis à LOCIE, LASIE et LERMAB à 25°C.

Dans le cas du torchis, LOCIE, LASIE et LERMAB, ont trouvé des conductivités thermiques différentes qui sont égales à 0.997, 0.36 et 1.37 W/m.K, respectivement (voir Figure III-34). Ce qui a provoqué cette différence peut être l'état des échantillons (conditionnement/ séchage) (teneur en eau des échantillons de LASIE et LERMAB sont respectivement 1.54 et 0.77%) et la forme géométrique qui joue un rôle important dans les mesures. Par exemple, Les échantillons de LOCIE sont friables et ont une surface rugueuse. Les échantillons de LERMAB ont une surface rugueuse, et une des faces est légèrement courbée. Tandis que ceux de LASIE sont friables et ont des fissures dans l'épaisseur, ce qui a modifié leurs dimensions, et par suite comme l'instrument utilisé (λ -mètre) est très sensible à la surface et les dimensions, les résultats trouvés ne sont pas considérés comme fiables. La mesure à LOCIE a été refaite sur un hot disk qui a donné une valeur de 1.11 W/m.K, qui est proche de celle trouvée à LOCIE par le C-Therm.

b) Effusivité thermique

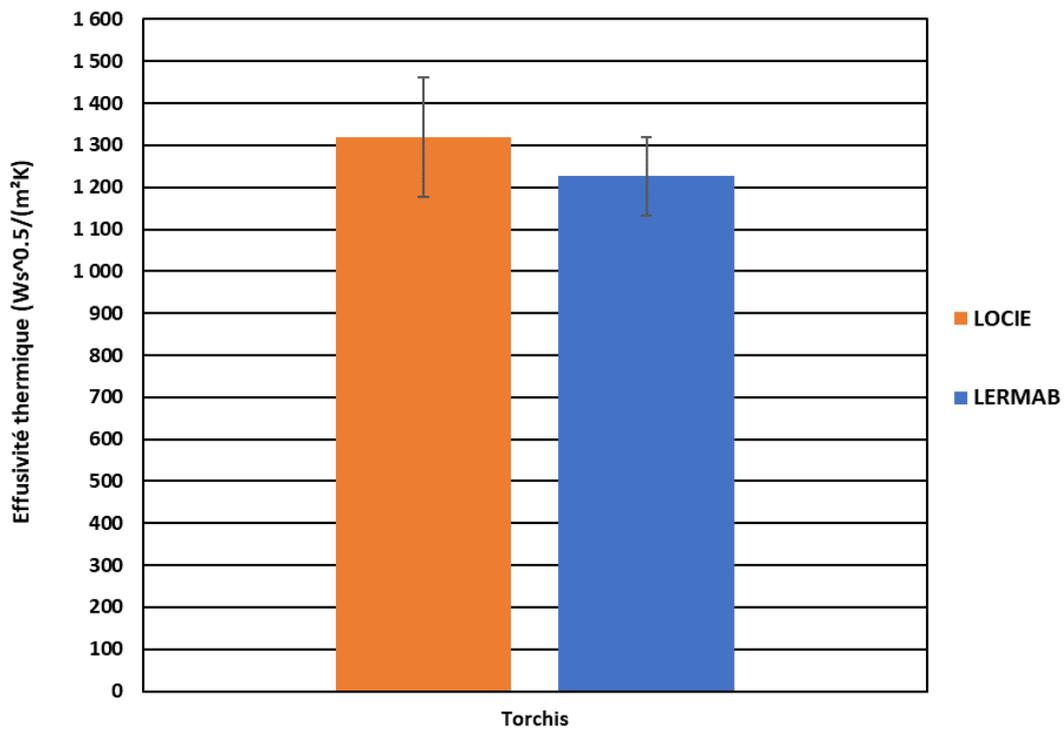


Figure III-35. Effusivité thermique du torchis à LOCIE et LERMAB à 25°C.

A propos de l'effusivité thermique du torchis testée à LOCIE et LERMAB, les résultats trouvés sont presque identiques, comme le montre la Figure III-35. Les valeurs obtenues sont égales à 1319.53 et 1225.82 $Ws^{0.5}/(m^2K)$, respectivement.

c) Chaleur spécifique

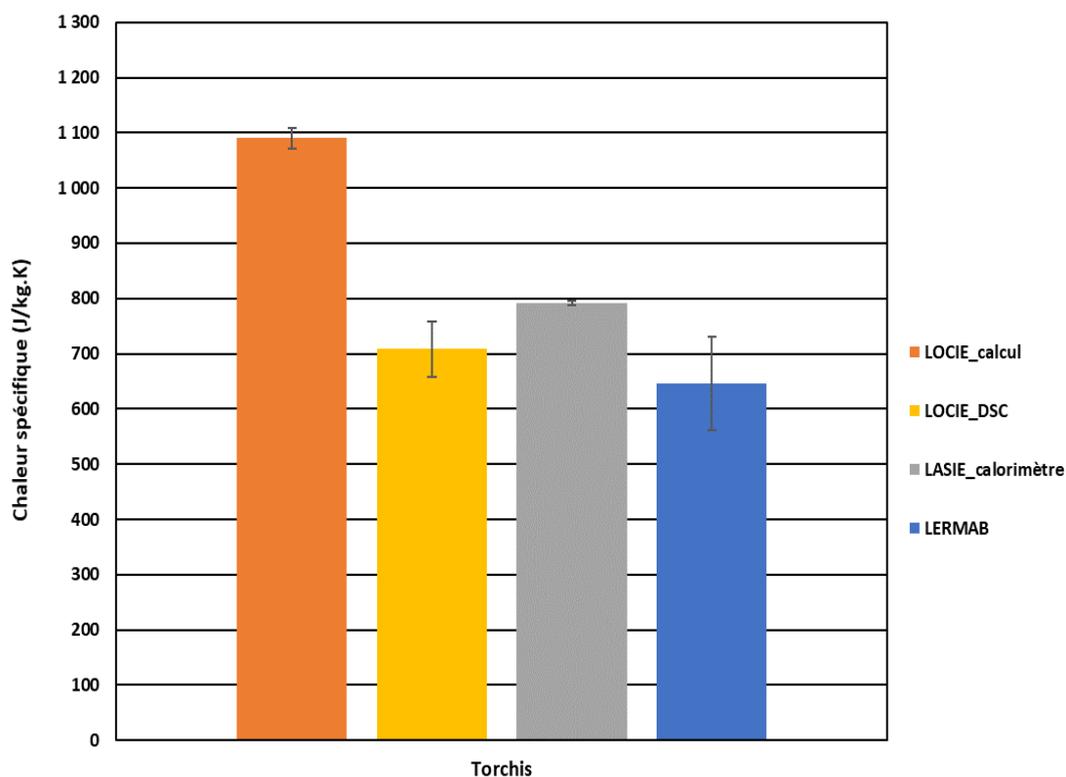


Figure III-36. Chaleur spécifique du torchis à LOCIE, LASIE et LERMAB à 25°C.

Pour la chaleur spécifique, toutes les valeurs obtenues par mesure expérimentale par le DSC à LOCIE (708 J/kg.K) et le calorimètre à LASIE (792 J/kg.K) et par calcul à LERMAB (645 J/kg.K) sont proches et plus faibles que le résultat calculé à LOCIE (1090 J/kg.K) (voir Figure III-36). La différence des résultats de calcul à LOCIE et LERMAB vient de la différence des valeurs de conductivité (la différence de densité n'a pas d'effet significatif sur les résultats de chaleur spécifique) comme l'effusivité thermique des deux laboratoires sont trouvés presque les mêmes (voir Figure III-34 et Figure III-35).

d) Diffusivité thermique

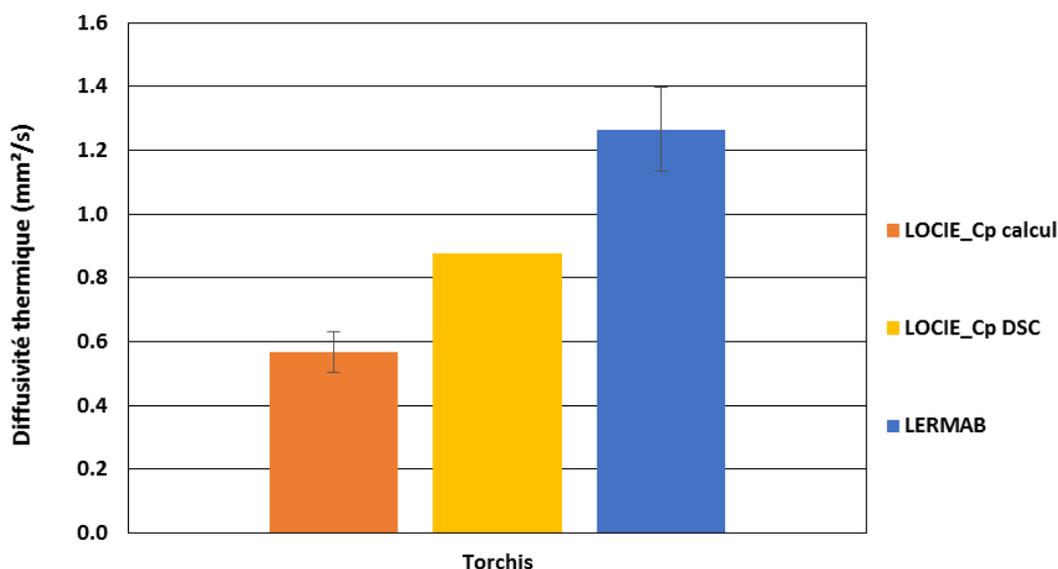


Figure III-37. Diffusivité thermique du torchis à LOCIE et LERMAB à 25°C.

Les résultats de diffusivité thermique du torchis sont représentés dans la Figure III-37. Ils montrent que la valeur trouvée à LOCIE à partir de c_p calculée (0.567 mm²/s) est inférieure à celle obtenue à partir du c_p mesurée par le DSC (0.878 mm²/s), qui est aussi inférieure à celle calculée à LERMAB (1.265 mm²/s).

III.6. OSB

III.6.1. Isothermes de sorption

a) Isothermes d'enveloppe à 25°C

Deux prélèvements ont été mesurés au LERMAB par VGA et un prélèvement au LGPM par DVS. La moyenne a été faite pour les prélèvements du LERMAB car la répétabilité était correcte. Le Tableau III-37 et Tableau III-38 récapitulent les résultats des isothermes d'enveloppes obtenus sur l'OSB respectivement par le LERMAB et le LGPM.

Adsmoy	HR (%)moy	0,45	15,03	30,00	45,00	60,00	75,00	88,00
	EMC(%) moy	0,00	2,71	4,51	6,46	8,52	11,28	15,54
	ecartTypeHR	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	ecartTypeEMC	0,00	0,07	0,06	0,04	0,06	0,17	0,14
Desmoy	HR (%)moy	0,45	15,01	30,00	45,00	60,00	75,00	88,00
	EMC(%) moy	0,00	3,78	5,67	7,66	9,89	12,61	15,54
	ecartTypeHR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ecartTypeEMC	0,00	0,15	0,06	0,19	0,09	0,12	0,14

Tableau III-37. Valeurs des isothermes moyennées mesurées par VGA au LERMAB pour l'OSB

Ads	HR (%)moy	15	30	45	60	75	90
	EMC(%) moy	2,913	4,71	6,49	8,449	11,154	15,928
Des	HR (%)moy	15	30	45	60	75	90

	EMC(%) moy	3,769	5,882	7,954	9,958	12,872	15,928
--	------------	-------	-------	-------	-------	--------	--------

Tableau III-38. Valeurs des isothermes mesurées par DVS au LGPM pour l'OSB

Afin de mieux illustrer la répétabilité et la reproductibilité sur ces mesures, nous avons présenté dans la Figure III-38 une comparaison graphique des isothermes de sorption.

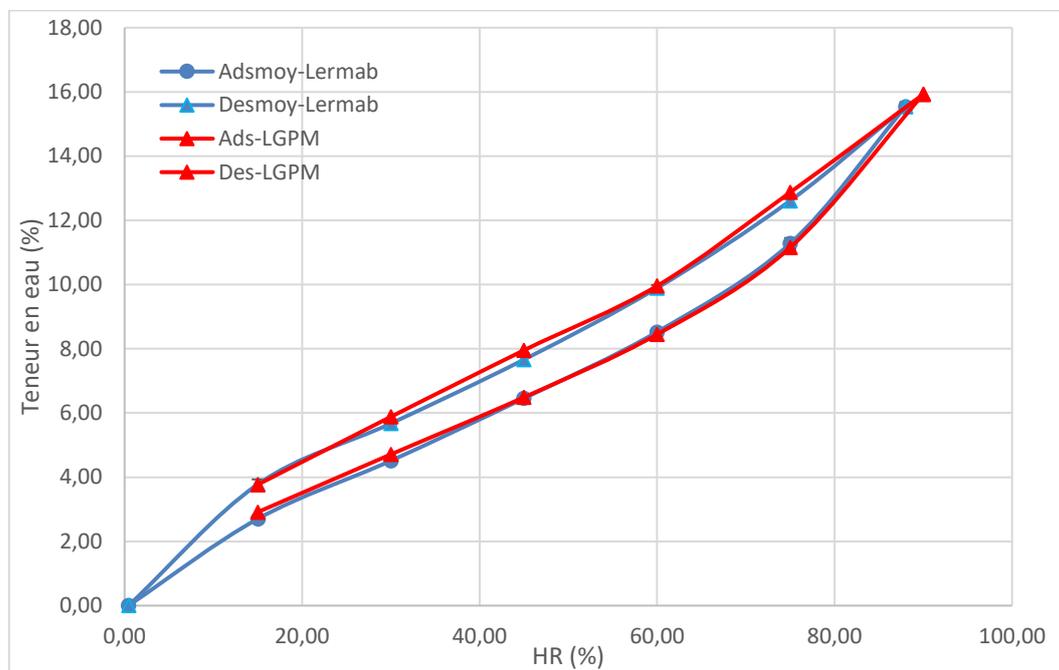


Figure III-38. Isothermes comparées mesurées par VGA au LERMAB et DVS au LGPM pour l'OSB

En se basant sur les résultats présentés sur la Figure III-38, nous pouvons conclure que :

- L'isotherme de sorption de l'OSB montre un maximum d'adsorption d'eau de 15% à 90% de HR, soit 25% moins hygroscopique que le bois de chêne.
- L'allure de l'isotherme est de type II décrivant également les trois zones de fixation d'eau.
- L'hystérésis maximale est d'environ 2.8% de teneur en eau (différence entre les courbes enveloppes de désorption-adsorption). Avec la macro-DVS (VGA), une vingtaine de jours a été nécessaire pour obtenir le cycle complet adsorption-désorption et la courbe intermédiaire.
- La reproductibilité des mesures est correcte.

Par ailleurs, les paramètres du modèle HH pour les courbes enveloppes et la courbe moyenne (courbe unique) ont été également calculés pour chaque prélèvement.

Matériaux	Paramètres du modèle Hailwood-Horrobin HH								
	Adsorption			Désorption			Moyenne		
	A+	B+	C+	A-	B-	C-	A	B	C
OSB1	3.76	12.71	11.91	2.12	8.48	5.12	2.68	10.57	8.13
OSB2	4.11	11.87	11.51	2.39	7.27	4.16	**	**	**

Tableau III-39. Paramètres des modèles des isothermes mesurées par VGA au LERMAB pour l'OSB

Paramètres du modèle Hailwood-Horrobin HH

		adsorption				désorption			
		HH_a	HH_b	HH_c	HH_RMSE	HH_a	HH_b	HH_c	HH_RMSE
OS B		3,30	13,90	12,50	5,04E-04	2,86	9,27	6,89	1,32E-03
	Paramètres du modèle GAB								
		GAB_M m	GAB_C	GAB_K	GAB_RMS E	GAB_M m	GAB_C	GAB_K	GAB_RMS E
		5,29E-02	7,51E+0 0	7,63E- 01	5,04E-04	7,79E-02	7,19E+0 0	6,24E- 01	1,32E-03

Tableau III-40. Paramètres des modèles des isothermes mesurées par DVS au LGPM pour l'OSB

b) Isothermes intermédiaires

Le Tableau III-41 et Tableau III-42 présentent les résultats des boucles d'isothermes intermédiaires obtenus respectivement par le LaSIE et le LERMAB.

Ads1 moy	HR (%)moy	0,45	15,03	30,00	45,00	60,00	75,00	88,00
	EMC(%) moy	0,00	2,71	4,51	6,46	8,52	11,28	15,54
Des1 moy	HR (%)moy	0,45	15,01	30,00	45,00	60,00	75,00	88,00
	EMC(%) moy	0,00	3,78	5,67	7,66	9,89	12,61	15,54
Ads2 moy	HR (%)moy		15,01	30,01	45,01	60,00	75,00	88,00
	EMC(%) moy		4,79	6,17	7,69	9,64	11,47	15,65

Tableau III-41. Valeurs des isothermes intermédiaires moyennées mesurées par VGA au LERMAB pour l'OSB

Ads1	HR (%)	15	30	45	60	75	90
	EMC(%)	2,913	4,71	6,49	8,449	11,154	15,928
Des1	HR (%)	15	30	45	60	75	90
	EMC(%)	3,769	5,882	7,954	9,958	12,872	15,928
Ads2	HR (%)	15	30	45	60		
	EMC(%)	2,901	4,62	6,32	8,282		
Des2	HR (%)	15	30	45	60		
	EMC(%)	3,564	5,531	6,979	8,282		

Tableau III-42. Valeurs des isothermes intermédiaires mesurées par DVS au LGPM pour l'OSB

Dans la Figure III-39, nous avons présenté une comparaison exhaustive de ces résultats afin de bien montrer les boucles intermédiaires mesurées sur l'OSB par les deux laboratoires (LERMAB et LGPM).

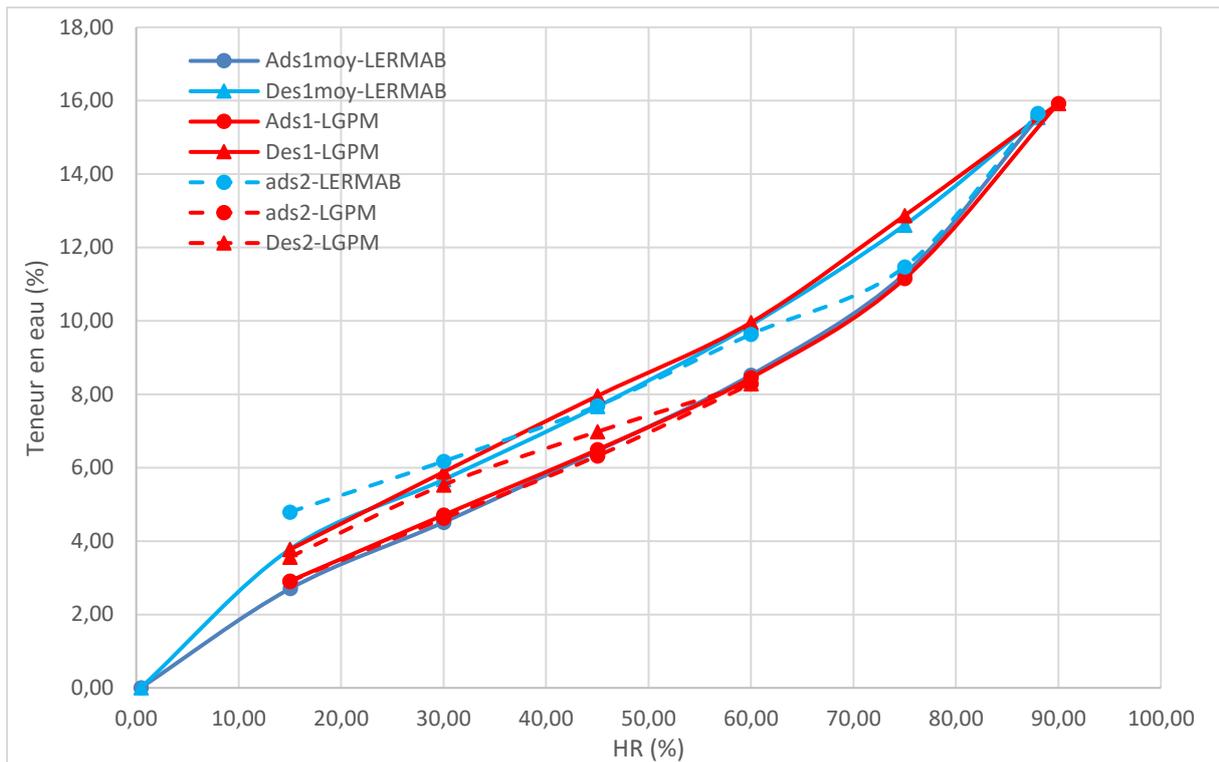


Figure III-39. Valeurs des isothermes intermédiaires mesurées par VGA au LERMAB et DVS au LGPM pour l’OSB

Les paramètres alpha et bêta utilisés pour modéliser la courbe intermédiaire avec le modèle *Gripped box* (Rémond et al. 2018) sont présentés dans le Tableau III-43.

Matériaux	Paramètres de la courbe intermédiaire	
	alpha	Bêta
OSB1	0.12	0.23
OSB2	0.12	0.12

Tableau III-43. Paramètres des modèles de l’isotherme intermédiaire mesurée par VGA au LERMAB pour l’OSB

III.6.2. Coefficient de diffusion

Le facteur de résistance à la diffusion $\bar{\mu}$ de l’OSB a été mesuré par les méthodes CS et FA. Nous observons ici des valeurs de $\bar{\mu}$ relativement dispersées indépendamment de la méthode. L’OSB est un matériau très hétérogène avec des particules de bois de grandes dimensions en surface qui peuvent conduire les échantillons sur lesquels les caractérisations sont menées à ne pas être homogénéisable. La valeur obtenue par le LOCIE à forte humidité ne semble néanmoins pas cohérente par rapport aux autres valeurs et sort de l’écart type des autres.

La valeur de $\bar{\mu}$ inter laboratoire de l’OSB est d’environ 50 ± 20 pour une HR moyenne de 37% et d’environ 43 ± 22 pour une humidité relative moyenne de 65%. Elle est donc six fois plus faible que celle du chêne pour une HR moyenne de 37% et de 1.5 fois plus

faible pour une HR moyenne de 67%. A noter qu'il existe pour ce produit une grande disparité des valeurs de $\bar{\mu}$ dans la littérature car ce coefficient dépend évidemment de la conformation des panneaux, la nature de la résine, le taux d'encollage, la nature du bois (essence, bois recyclé) qui sont propres à chaque fabricant.

OSB3	Méthode	Mu moyen (-)		Densité (kg/m ³)	Humidité d'équilibre moyenne (% kg d'eau/kg MS)		
		sec (37% HR)	humide (65% HR)		HR=37%	HR=67%	HR=90%
LERMAB	FA	55.67±34	41.43 ±7.28	565±34	6.76	11	16
LGPM	FA	75.61±6.77	58.73 ±5.34				
TIPEE	CS	35± 6.8	58± 1	575±20			
LOCIE	CS	33.09±4.85	12.61 ±0.85				
Inter-laboratoire		49.81±19.85	42.7±21.6				
Fournisseur kronoply OSB3		50	30	650			

Tableau III-44. Facteur de résistance à la diffusion, densité et teneur en eau de l'OSB

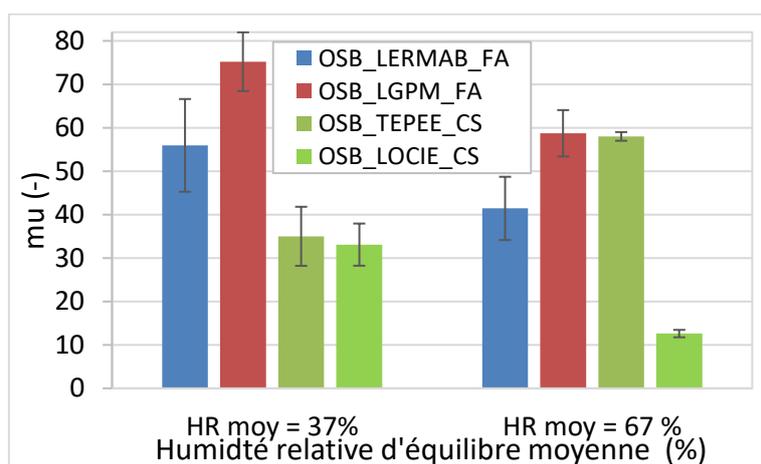


Figure III-40. Comparaison du facteur de résistance à la diffusion de l'OSB

III.6.3. Caractéristiques thermiques

a) Conductivité thermique

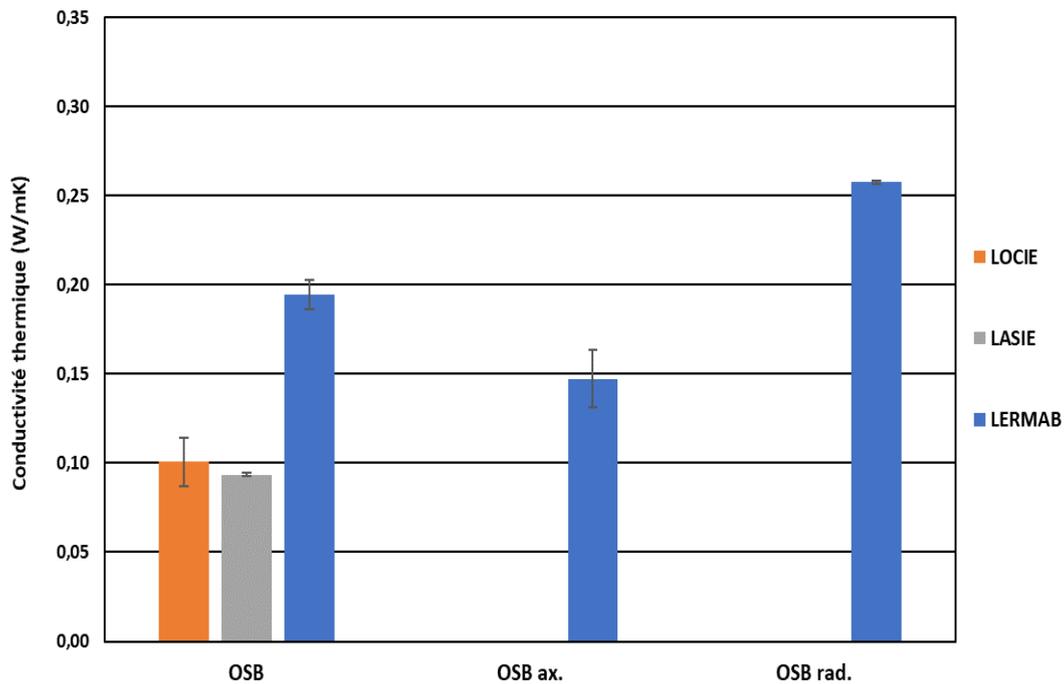


Figure III-41. Conductivité thermique de l'OSB isotrope à LOCIE, LASIE et LERMAB, et anisotrope à LERMAB, à 25°C.

Dans le cas d'OSB, LOCIE et LASIE ont trouvé des résultats de conductivité thermique similaires (0.101 et 0.094 W/m.K respectivement) tandis qu'ils se diffèrent des valeurs obtenues à LERMAB pour les échantillons isotropes (OSB, 0.194 W/m.K) et anisotropes (OSB axial, 0.147 W/m.K, et OSB radial, 0.257 W/m.K) qui sont aussi différents (voir Figure III-41). Les échantillons de LERMAB anisotropes hétérogènes ont un teneur d'eau (10%) plus grand que celui de l'OSB de LASIE (4.05%). C'est une raison qui peut expliquer la différence dans les résultats.

b) Effusivité thermique

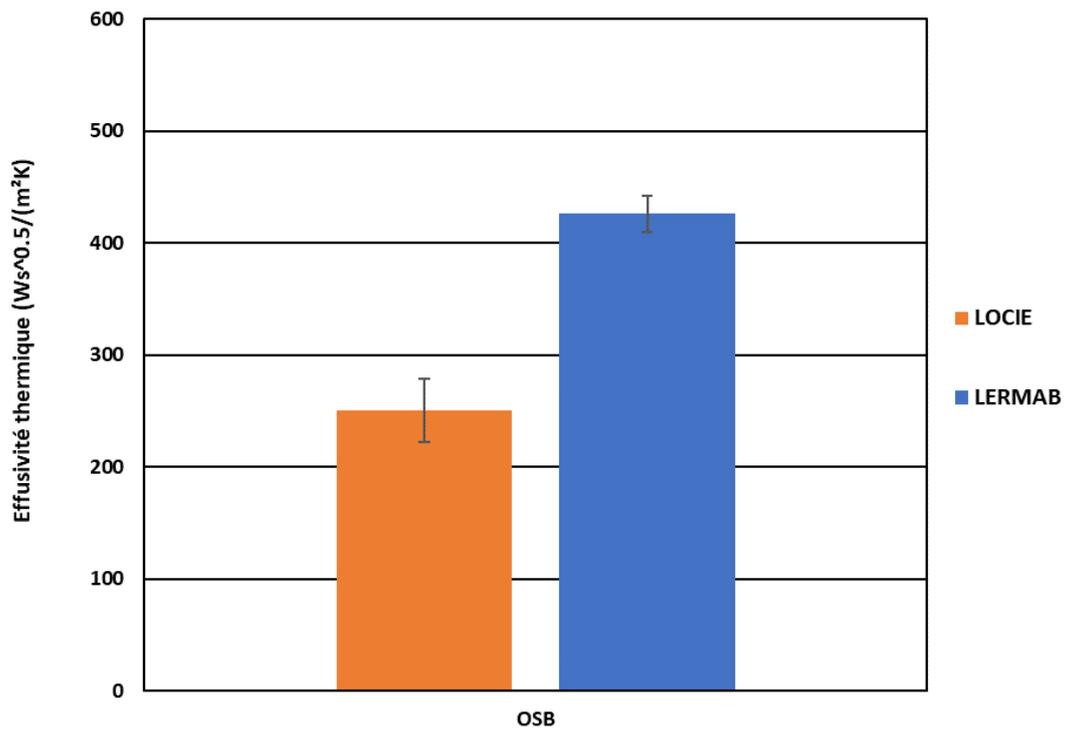


Figure III-42. Effusivité thermique de l'OSB à LOCIE et LERMAB à 25°C.

L'effusivité thermique mesurée à LERMAB ($425.98 Ws^{0.5}/(m^2K)$) est beaucoup plus élevée que celle testée à LOCIE ($250.33 Ws^{0.5}/(m^2K)$), comme le montre la Figure III-42.

c) Chaleur spécifique

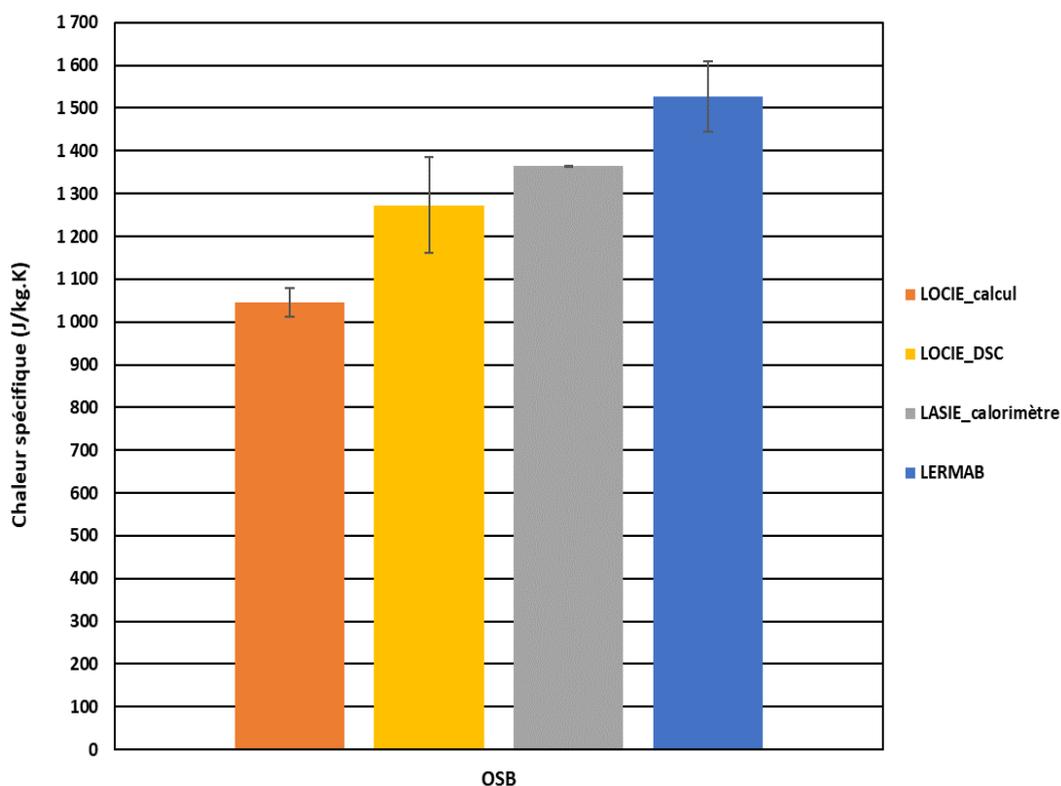


Figure III-43. Chaleur spécifique de l'OSB à LOCIE, LASIE et LERMAB à 25°C.

Les chaleurs spécifiques de l'OSB (isotrope) trouvées par le DSC à LOCIE (1273 J/kg.K) et par le calorimètre à LASIE (1364 J/kg.K) sont presque similaires et sont plus grandes que celle calculée à LOCIE (1046 J/kg.K) et plus faibles que celle calculée à LERMAB (1527 J/kg.K) (voir Figure III-43). Les résultats trouvés par le calcul à LOCIE et LERMAB sont pas les mêmes comme les valeurs de conductivité et d'effusivité thermique sont différentes (voir Figure III-41 et Figure III-42).

d) Diffusivité thermique

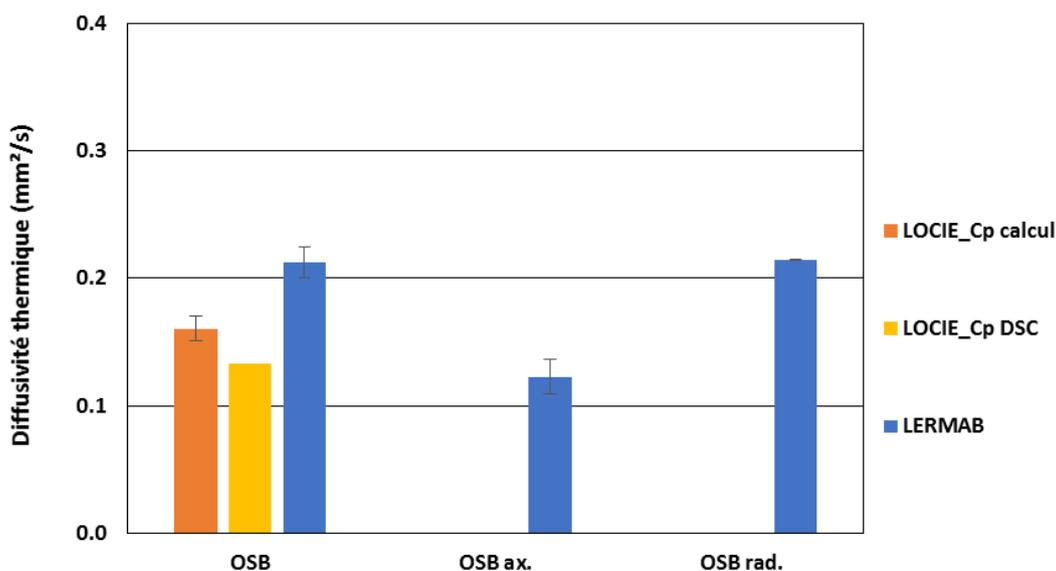


Figure III-44. Diffusivité thermique de l'OSB isotrope et anisotrope à LOCIE et LERMAB à 25°C.

La diffusivité thermique de l'OSB trouvée à LOCIE à partir de c_p calculée (0.16 mm²/s) est supérieure à celle obtenue à partir du c_p mesurée par le DSC (0.133 mm²/s), qui est presque similaire à celle calculée à LERMAB pour l'échantillon anisotrope axial (0.123 mm²/s). Tandis que les résultats de l'OSB isotrope (0.213 mm²/s) et anisotrope radial (0.215 mm²/s) trouvés à LERMAB sont identiques et plus élevés que les autres, comme montré dans la Figure III-44.

III.7. ARGILUS

III.7.1. Isothermes de sorption

a) Isothermes d'enveloppe à 3 températures

Les courbes des isothermes de sorption d'enveloppe ont été mesurées sur deux prélèvements à 3 températures différentes par manométrie (LaSIE).

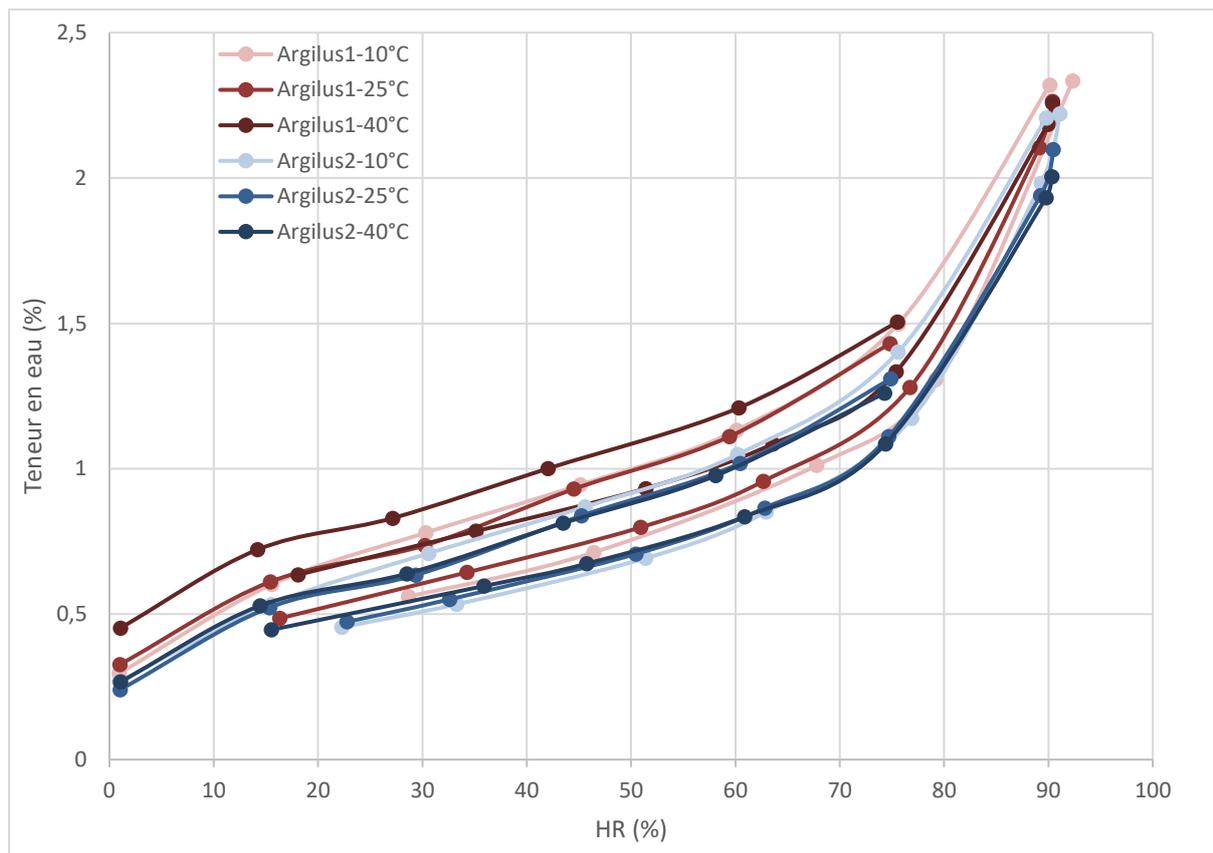


Figure III-45. Isothermes à 10°C, 25°C et 40°C pour 2 prélèvements d'argilus par manométrie au LaSIE

Il ne peut pas être fait d'exploitation de ces isothermes à différentes températures car la variation en fonction de la température est dans l'ordre de grandeur de la répétabilité des mesures.

b) Isothermes d'enveloppe à 25°C

Deux prélèvements ont été mesurés au LaSIE et au LERMAB et un prélèvement au LGPM. La moyenne a été faite pour les prélèvements du LERMAB et LaSIE car la répétabilité était correcte.

Le Tableau III-45 et Tableau III-46 récapitulent les résultats des isothermes d'enveloppes obtenus sur l'argilus respectivement par le LaSIE, le LERMAB et le LGPM.

Ads moy	HR (%)moy		19,55	33,44	50,69	62,74	75,71	89,19	90,46
	EMC(%) moy		0,48	0,60	0,75	0,91	1,20	2,02	2,10
	ecarttypeHR		4,57	1,17	0,32	0,12	1,45	0,08	
	ecarttypeEMC		0,01	0,07	0,06	0,06	0,12	0,12	
Des moy	HR (%)moy	1,00	15,37	29,80	44,87	59,93	74,86	89,13	
	EMC(%) moy	0,28	0,57	0,69	0,88	1,06	1,37	2,11	
	ecarttypeHR	0,01	0,05	0,60	0,51	0,72	0,04		
	ecarttypeEMC	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,09		

Tableau III-45. Valeurs des isothermes moyennées mesurées par manométrie au LaSIE pour l'argilus

Ads moy	HR (%)moy	0,00	12,70	27,96	42,62	56,94	70,77	84,71
---------	-----------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

	EMC(%) moy	0,00	0,30	0,43	0,56	0,71	0,92	1,59
	ecarttypeHR	0,00	0,26	0,27	0,09	0,08	0,09	0,05
	ecarttypeEMC	0,00	0,03	0,03	0,04	0,04	0,02	0,04
Des moy	HR (%)moy	0,00	13,54	28,95	43,68	57,92	71,51	84,71
	EMC(%) moy	0,00	0,32	0,47	0,67	0,82	1,03	1,59
	ecarttypeHR	0,00	0,34	0,22	0,13	0,12	0,18	0,05
	ecarttypeEMC	0,00	0,03	0,02	0,02	0,02	0,00	0,04

Tableau III-46. Valeurs des isothermes moyennées mesurées par DVS au LERMAB pour l'argilus

Ads	HR (%)moy	15	30	45	60	75	90
	EMC(%) moy	0,437	0,75	0,933	1,12	1,437	2,156
Des	HR (%)moy	15	30	45	60	75	90
	EMC(%) moy	0,786	1,062	1,344	1,585	2,156	71,51

Tableau III-47. Valeurs des isothermes mesurées par DVS au LGPM pour l'argilus

Afin de mieux illustrer la répétabilité et la reproductibilité sur ces mesures, nous avons présenté dans la Figure III-46 une comparaison graphique des isothermes de sorption.

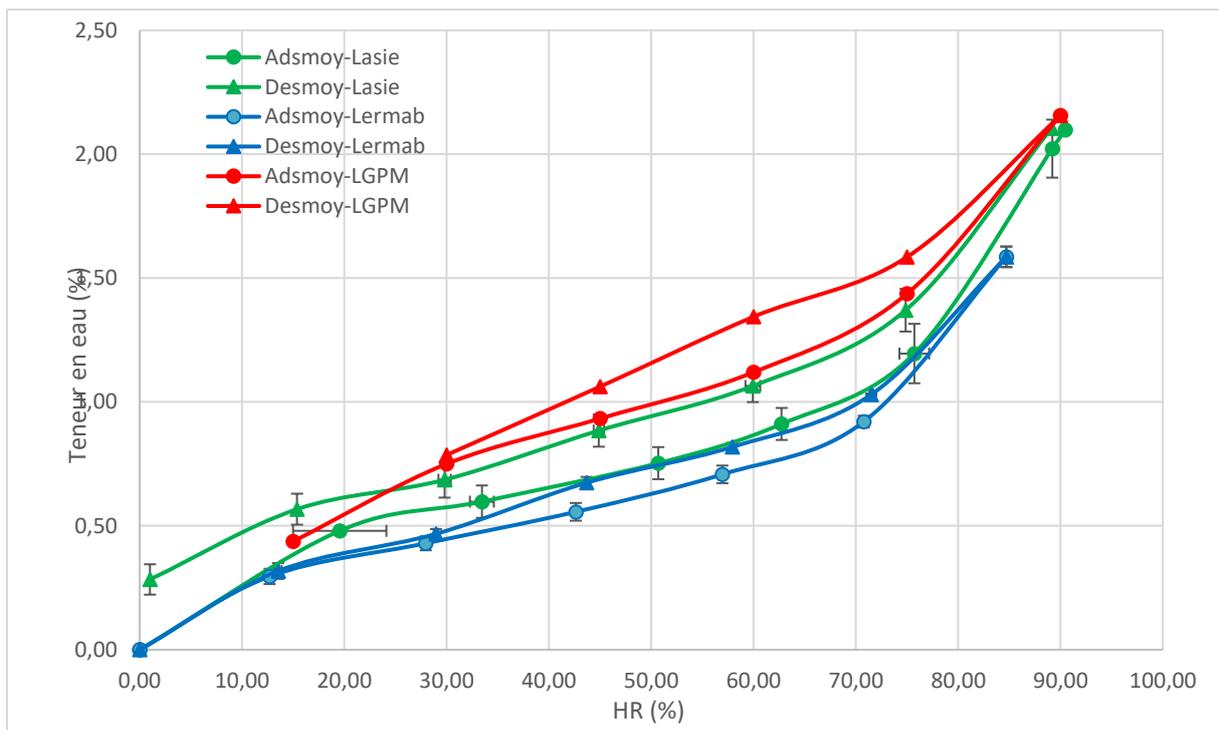


Figure III-46. Valeurs des isothermes comparées mesurées par manométrie au laSIE et DVS au LERMAB et LGPM pour l'argilus

En se basant sur les résultats présentés sur la Figure III-46, nous pouvons conclure que :

- La reproductibilité des mesures est correcte entre les 3 laboratoires.
- L'analyse des isothermes à 25 °C de l'Argilus montre un matériau peu hygroscopique (1.6 à 2.1 % de teneur en eau à 90% de HR).
- L'allure des isothermes est de type II.

- Les échantillons d'argilus présentent des isothermes très proches, traduisant l'homogénéité de sa composition.

Par ailleurs, les paramètres du modèle HH de l'adsorption, de la désorption et de la courbe moyenne ont été également calculés pour chaque prélèvement.

Paramètres du modèle Hailwood-Horrobin HH

	Adsorption				Désorption			
	HH_A+	HH_B+	HH_C+	R ²	HH_A-	HH_B-	HH_C-	R ²
Argilus 1	0,000	2,408	0,022	0,997	1,418	1,687	0,014	0,997
Argilus 2	0,000	2,695	0,024	0,999	2,412	1,905	0,016	0,996

Tableau III-48. Paramètres des modèles de courbes mesurées par manométrie au LaSIE pour l'argilus

Matériaux	Paramètres du modèle Hailwood-Horrobin HH								
	Adsorption			Désorption			Moyenne		
	A+	B+	C+	A-	B-	C-	A	B	C
Argilus 1	8.31	269.35	253.28	14.93	203.19	184.15	11.59	235.28	217.48
Argilus 2	10.53	298.16	293.06	19.47	205.38	195.81	15.01	249.30	241.53

Tableau III-49. Paramètres des modèles de courbes mesurées par DVS au LERMAB pour l'argilus

	Adsorption				Désorption			
	HH_a	HH_b	HH_c	HH_RMSE	HH_a	HH_b	HH_c	HH_RMSE
Argilus	16,61	124,17	106,20	4,72E-04	15,49	93,78	71,39	3,50E-04
	GAB_Mm	GAB_C	GAB_K	GAB_RMSE	GAB_Mm	GAB_C	GAB_K	GAB_RMSE
	-0,05	3,50	-0,11	1,41E-03	-0,31	2,83	-0,03	8,78E-04

Tableau III-50. Paramètres des modèles de courbes mesurées par DVS au LGPM pour l'argilus

c) Isothermes intermédiaires

Le Tableau III-51 et Tableau III-52 présentent les résultats des boucles d'isothermes intermédiaires obtenus respectivement par le LaSIE, le LERMAB et le LGPM.

Adsmoy1	HR (%)	0,00	29,99	60,01	90,34		
	W (%)	0,00	0,86	1,29	2,57		
Desmoy1	HR (%)	15,02	30,02	44,99	60,03	75,06	90,26
	W (%)	1,16	1,30	1,53	1,67	1,90	2,59
Adsmoy2	HR (%)	15,01	30,01	45,01	59,99	75,14	
	W (%)	1,15	1,28	1,40	1,58	1,85	
Desmoy2	HR (%)	30,01	45,01	60,03	75,14		
	W (%)	1,49	1,65	1,76	1,89		
Adsmoy3	HR (%)	30,02	45,01	60,04			
	W (%)	1,49	1,59	1,73			
Desmoy3	HR (%)	45,01	50,00	55,02	60,04		
	W (%)	1,64	1,67	1,70	1,73		
Adsmoy4	HR (%)	45,01	50,00	55,04			

	W (%)	1,64	1,67	1,70
Desmoy4	HR (%)	50,00	55,01	
	W (%)	1,68	1,70	

Tableau III-51. Valeurs des isothermes intermédiaires moyennées mesurées par DVS au LaSIE pour l'argilus

Ads1	HR (%)	0	12,696	27,957	42,618	56,943	70,773	84,705
	W (%)	0,001	0,296	0,430	0,556	0,708	0,920	1,586
Des1	HR (%)	0,000	13,543	28,953	43,675	57,924	71,511	84,705
	W (%)	0,000	0,318	0,468	0,674	0,819	1,030	1,586
Ads2	HR (%)		13,543	28,578	43,099	57,261	71,100	
	W (%)		0,318	0,445	0,569	0,718	0,939	

Tableau III-52. Valeurs des isothermes intermédiaires moyennées mesurées par DVS au LERMAB pour l'argilus

Ads1	HR (%)	15	30	45	60	75	90
	W (%)	0,437	0,75	0,933	1,12	1,437	2,156
Des1	HR (%)		30	45	60	75	
	W (%)		0,786	1,062	1,344	1,585	2,156
Ads2	HR (%)	15	30	45	60		
	W (%)	0,318	0,818	1	1,25		
Des2	HR (%)	15	30	45	60		
	W (%)	0,362	0,852	1,098	1,25		

Tableau III-53. Valeurs des isothermes intermédiaires mesurées par DVS au LGPM pour l'argilus

Dans la Figure III-47, nous avons présenté une comparaison exhaustive de ces résultats afin de bien montrer les boucles intermédiaires mesurées sur l'Argilus par les trois laboratoires (LaSIE, LERMAB et LGPM).

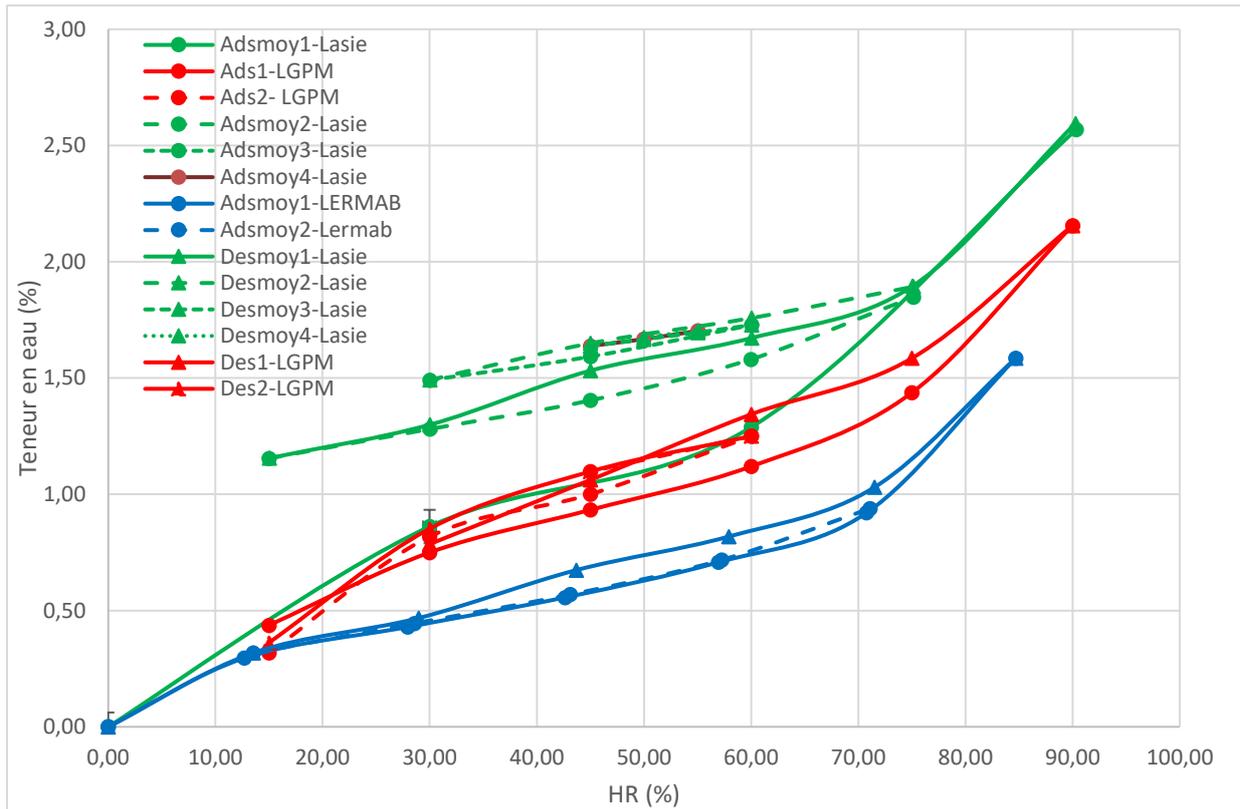


Figure III-47. Valeurs des isothermes intermédiaires mesurées par DVS au LaSIE, LERMAB et LGPM pour l'argilus

- La réalisation de boucles intermédiaires permet de voir l'influence de l'historique « humidité » de l'échantillon. Bien que mesurer sur de faible adsorption nous pouvons observer qu'un échantillon subissant des répétitions de sorption aura une valeur plus élevée de teneur en eau pour la même humidité donnée.
- Par ailleurs, l'analyse des boucles intermédiaires de l'argilus par gravimétrie confirme une très faible adsorption du matériau en cohérence avec l'isotherme d'adsorption manométrique.

III.7.2. Coefficient de diffusion

Le facteur de résistance à la diffusion $\bar{\mu}$ de l'Argilus a été mesuré par les méthodes de la CS et la FA. Les mesures FA et CS sont similaires sauf celles en FA du LGPM qui sont très faibles et ne sont pas retenues pour l'inter comparaison des résultats. La différence de pente au de l'isotherme de sorption utilisé par les modèles (Tableau III-54) peut en être la cause.

La valeur $\bar{\mu}$ de l'argilus est d'environ 7 ± 0.5 pour HR de 37% et d'environ 5.3 ± 1.2 pour HR de 67%. L'augmentation de l'HR de 37% à 67% diminue la perméabilité à la vapeur de l'Argilus de 25%.

Argilus	Méthode	mu moyen (-)		Densité (kg/m ³)	Humidité d'équilibre moyenne (% kg d'eau/kg MS)		
		Sec (37% RH)	Humide (65% RH)		HR=37%	HR=67%	HR=90%
LERMAB	FA	6.6±0.99	4.02±0.93	784±4.9	0.54	0.94	1.91

LGPM	FA	0.94	1.47	825	0.78	1.29	2.13
TIPEE	CS	6.9±0.2	6.4±0.1	815± 24			
LOCIE	CS	7.64±0.14	5.39±0.5				
inter-laboratoires		7.05±0.53	5.3±1.2				

Tableau III-54. Facteur de résistance à la diffusion, densité et teneur en eau d'équilibre de l'argilus

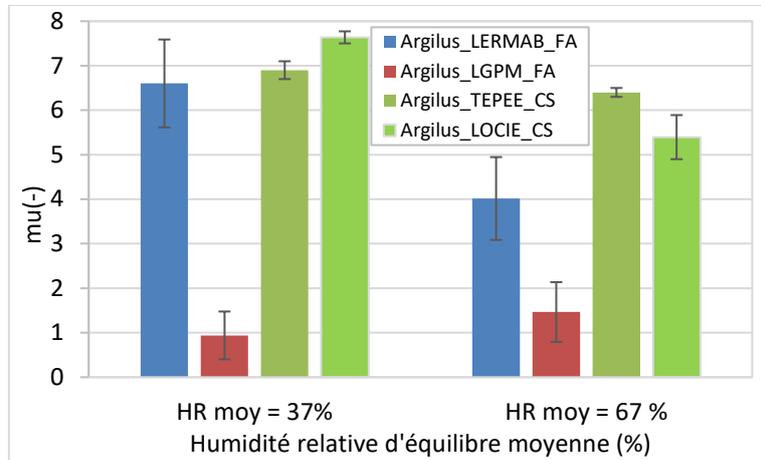


Figure III-48. Comparaison du facteur de résistance à la diffusion de l'argilus

A noter que les valeurs $\bar{\mu}$ mesurées par le LOCIE avec la méthode CS sur des plages d'HR différentes, 0%int-75%ext et 0%int-33%ext (annexe) sont respectivement 24.93 ± 0.14 et 26.68 ± 0.87 . Ces valeurs sont trois fois plus élevées que celles inter-laboratoires et ne sont pas cohérentes. Toutefois, pour des configurations similaires 0%-11%, 0%-50% et 0%-85%, les mesures CS de TIPEE donnent des valeurs $\bar{\mu}$, respectivement de 16.3 ± 1.6 , 9.1 ± 0.5 et 7.9 ± 0.4 , comparables à celles inter-laboratoire.

III.7.3. Caractéristiques thermiques

a) Conductivité thermique

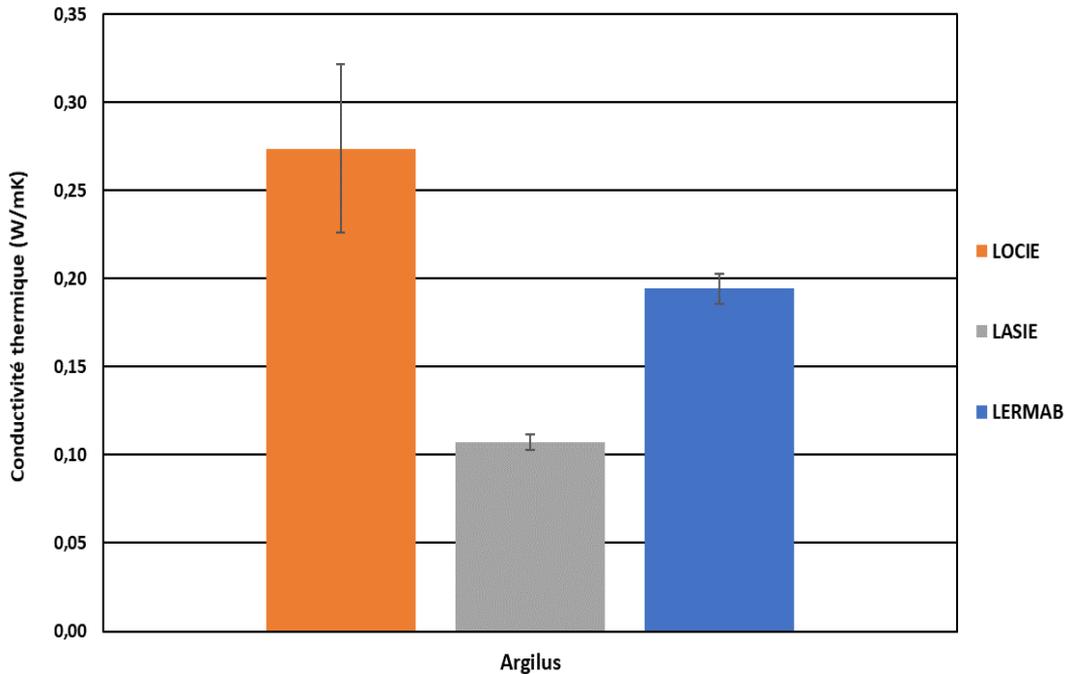


Figure III-49. Conductivité thermique de l'argilus à LOCIE, LASIE et LERMAB à 25°C.

Les mesures de conductivité thermique de l'argilus dans les trois laboratoires sont illustrées dans la Figure III-49, où on remarque des résultats différents. LOCIE a trouvé une valeur égale à 0.274 W/m.K qui est plus élevée que le résultat de LERMAB, 0.194 W/m.K, et la valeur la plus faible a été obtenue à LASIE, 0.107 W/m.K. Ceci implique que cette différence peut venir de l'état de conditionnement des échantillons qui se diffère d'un laboratoire à un autre (teneur en eau des échantillons de LERMAB et LASIE sont égales à 1.36 et 0.09% respectivement), et à l'état géométrique des échantillons. Par exemple, l'argilus de LERMAB et LOCIE était friable et présente de gros pores à la surface, tandis que LaSIE ont eu un problème de dimensions des échantillons qui peut être responsable de la faible conductivité thermique trouvée.

b) Effusivité thermique

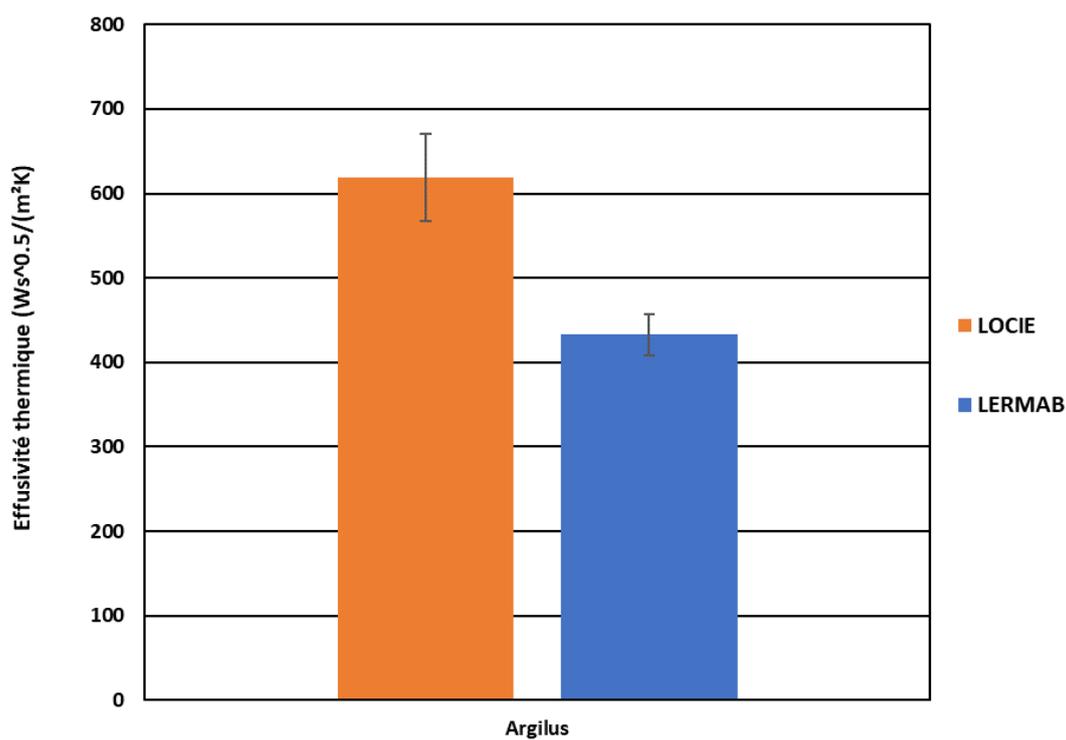


Figure III-50. Effusivité thermique de l'argilus à LOCIE et LERMAB à 25°C.

Les mesures d'effusivité thermique des échantillons d'argilus de LOCIE ont donné une valeur égale à $618.97 \text{ Ws}^{0.5}/(m^2K)$, tandis que celle obtenue à LERMAB est plus faible, et est égale à $432.63 \text{ Ws}^{0.5}/(m^2K)$ (voir Figure III-50).

c) Chaleur spécifique

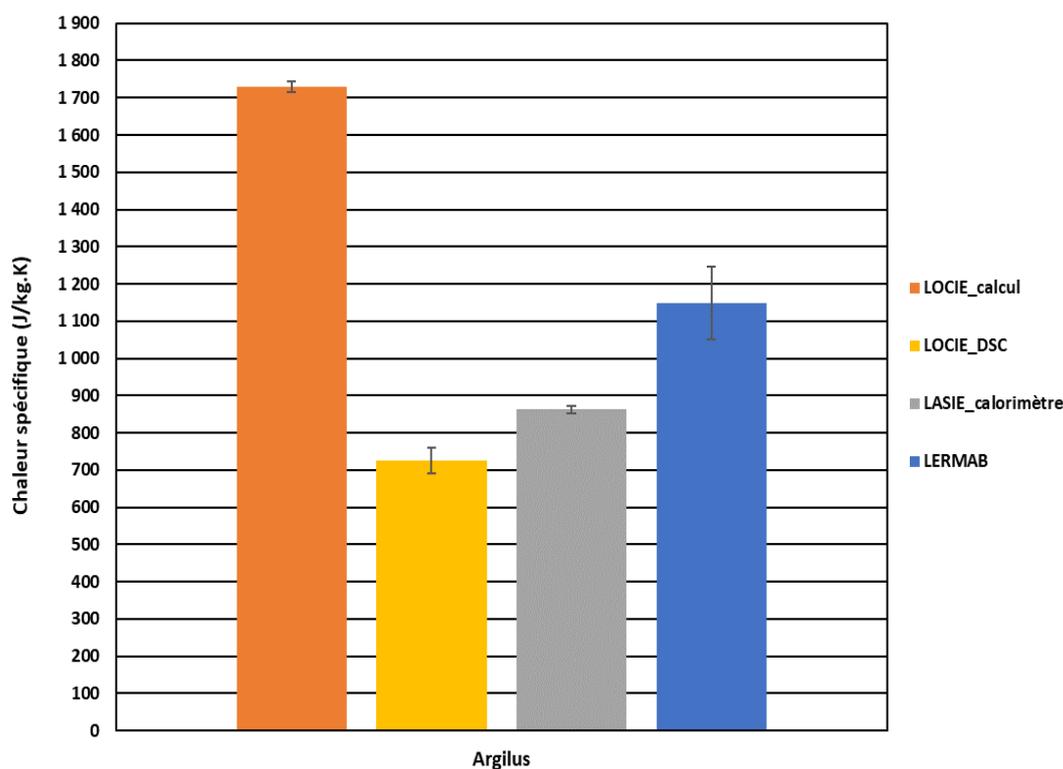


Figure III-51. Chaleur spécifique de l'argilus à LOCIE, LASIE et LERMAB à 25°C.

Comme LOCIE et LERMAB ont trouvé une différence dans la conductivité et l'effusivité thermique (voir Figure III-49 et Figure III-50), alors ça résulte d'une différence dans la chaleur spécifique calculée (1730 et 1149 J/kg.K, respectivement), comme le montre la Figure III-51. Expérimentalement, les résultats de la chaleur spécifique obtenus par le DSC à LOCIE (726 J/kg.K) et le calorimètre à LASIE (863 J/kg.K) ne sont pas les mêmes aussi, mais sont dans le même ordre de grandeur et beaucoup plus faibles que les valeurs calculées à LOCIE et LERMAB.

d) Diffusivité thermique

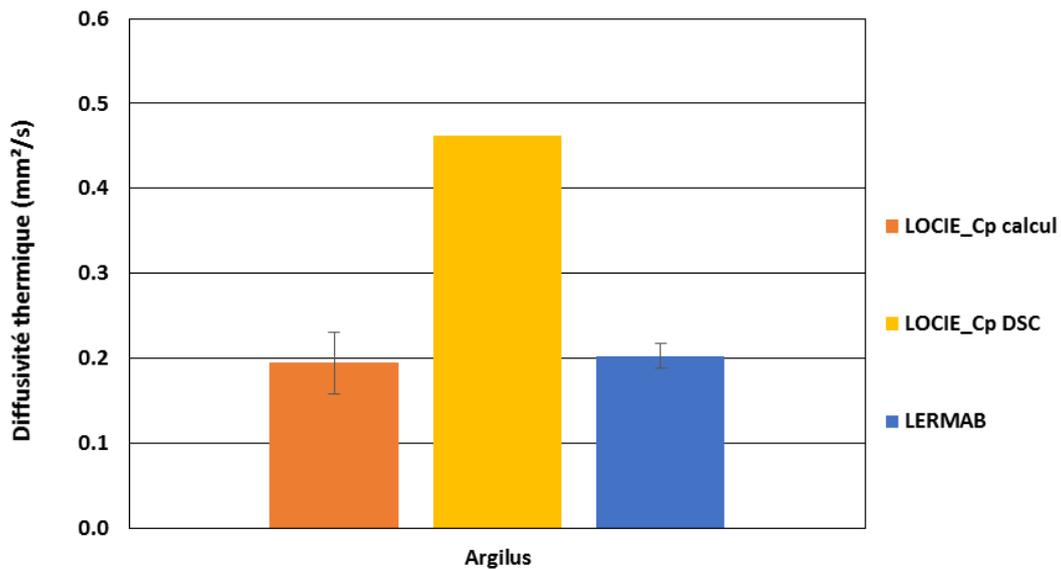


Figure III-52. Diffusivité thermique de l'argilus à LOCIE et LERMAB à 25°C.

Figure 29 représente les résultats de diffusivité thermique de l'argilus. Elle montre que la valeur trouvée à LOCIE à partir de c_p calculée (0.195 mm²/s) est similaire à celle de LERMAB (0.203 mm²/s), et inférieure à celle déterminée à partir du c_p mesurée (0.462 mm²/s).

III.8. PARE-PLUIE

III.8.1. Isothermes de sorption

a) Isothermes d'enveloppe à 3 températures

Les courbes des isothermes de sorption d'enveloppe ont été mesurées sur deux prélèvements à 3 températures différentes par manométrie (LaSIE).

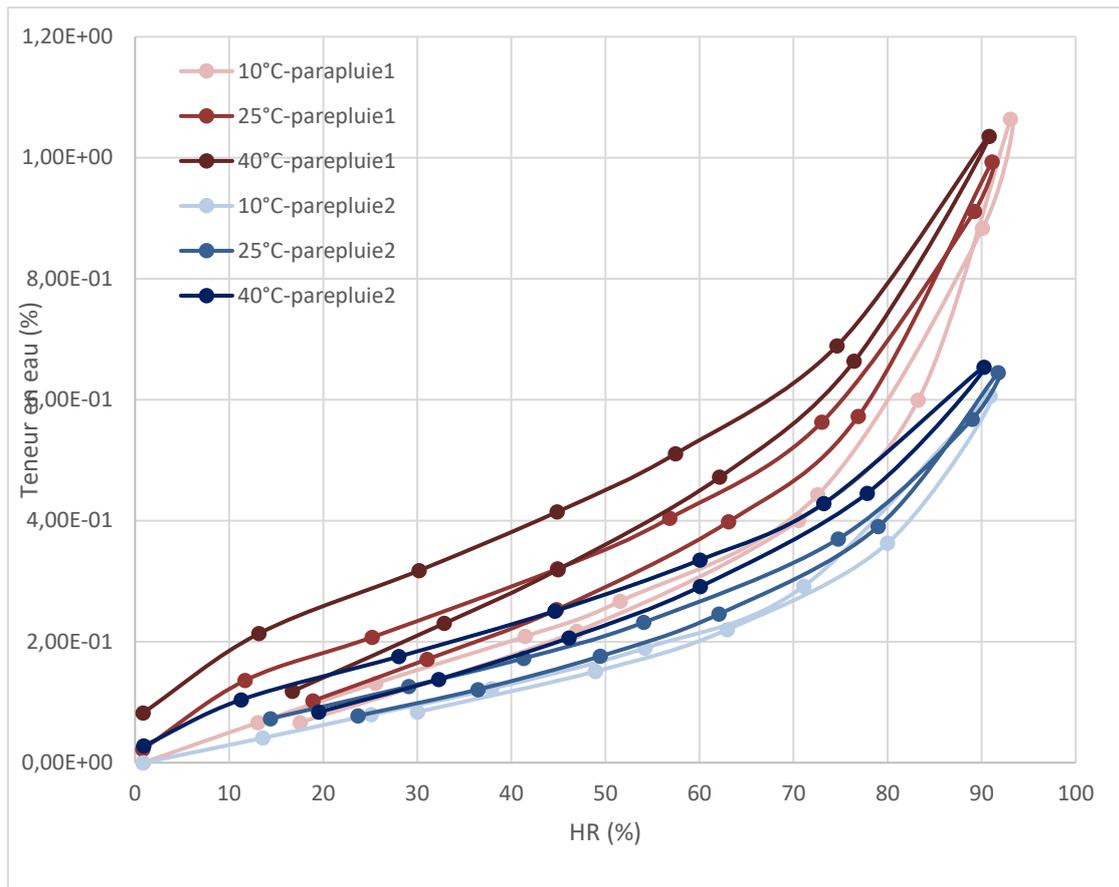


Figure III-53. Valeurs des isothermes à 10°C, 25°C, 40°C mesurées par manométrie au LaSIE, pour le pare-pluie

Nous notons une très légère augmentation de l'adsorption avec l'augmentation de température mais cette variation n'est pas significative car elle est inférieure à la répétabilité de la mesure sur 2 prélèvements.

b) Isothermes d'enveloppe à 25°C

Deux prélèvements ont été mesurés au LaSIE et au LERMAB. La moyenne a été faite pour chaque laboratoire. Le Tableau III-55 et Tableau III-56 récapitulent les résultats des isothermes d'enveloppes obtenus sur le pare-pluie respectivement par le LaSIE et le LERMAB.

Ads moy	HR (%)	21,317	33,753	47,1425	62,6	77,9585	91,445	
	Change (%)	0,09	0,15	0,21	0,32	0,48	0,82	
	Ecart type HR (%)	3,37	3,82	3,27	0,72	1,51	0,46	
	Ecart type Change (%)	0,02	0,04	0,05	0,11	0,13	0,25	
Déso moy	HR (%)	0,83	13,06	27,16	43,13	55,48	73,89	89,12
	Change (%)	0,02	0,10	0,17	0,25	0,32	0,47	0,74
	Ecart type HR (%)	1,90	2,76	2,54	1,96	1,24	0,17	
	Ecart type Change (%)	0,045	0,058	0,105	0,122	0,136	0,243	

Tableau III-55. Valeurs des isothermes moyennées mesurées par manométrie au LaSIE, pour le pare-pluie

Adsmoy	HR (%)	0	12,763	27,487	42,169	56,368	69,893	82,921
	Change (%)	0,00	0,03	0,07	0,11	0,18	0,29	0,47
	ecarttypeHR (%)	0,00	0,07	0,48	0,73	0,68	0,68	1,11
	EcarttypeChange (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Dés moy	HR (%)	0,00	13,97	28,86	43,39	57,32	70,52	82,92
	Change (%)	0,00	0,03	0,07	0,12	0,19	0,29	0,47
	ecarttypeHR (%)	0,01	0,16	0,57	0,90	1,04	1,04	1,11
	EcarttypeChange (%)	0,006	0,006	0,005	0,006	0,008	0,011	0,010

Tableau III-56. Valeurs des isothermes moyennées mesurées par DVS au LERMAB, pour le pare-pluie

Afin de mieux illustrer la répétabilité et la reproductibilité sur ces mesures, nous avons présenté dans la Figure III-54 une comparaison graphique des isothermes de sorption.

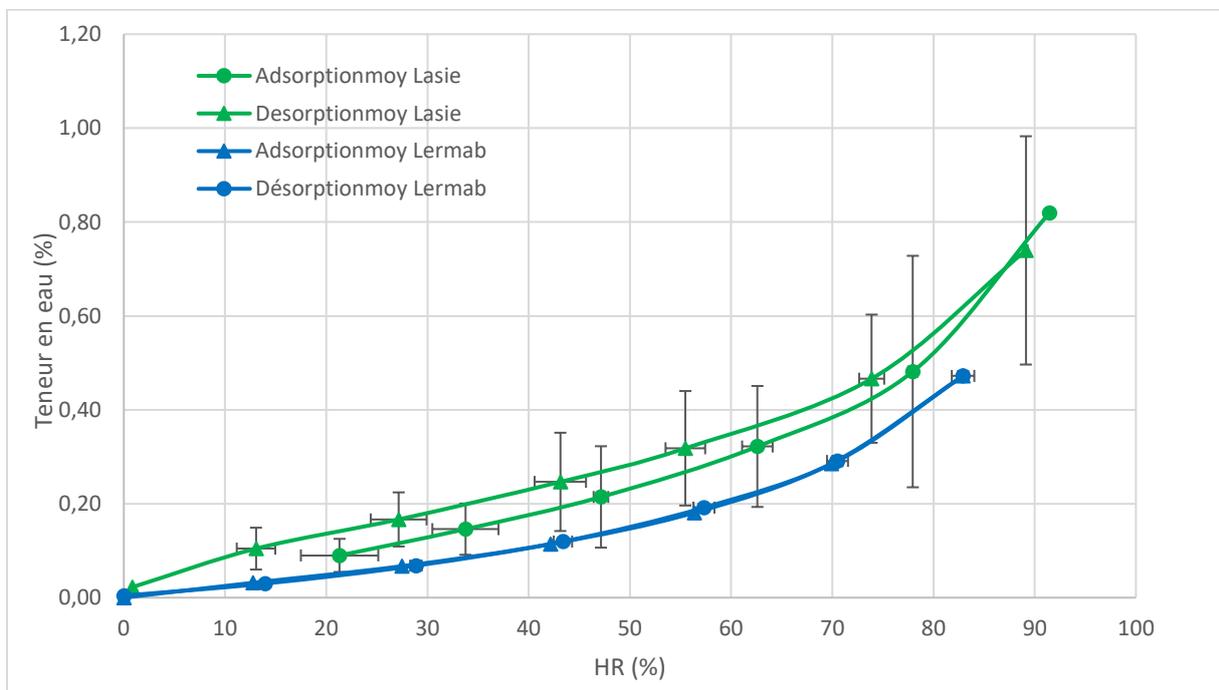


Figure III-54. Isothermes moyennées comparées mesurées par manométrie au LaSIE et DVS au LERMAB, pour le pare-pluie

En se basant sur ces résultats, nous pouvons conclure que :

- Les isothermes réalisées suivant les deux méthodes sont cohérentes.
- L'isotherme du pare pluie montre que l'humidité d'équilibre ne dépasse pas 1% à 90% de HR. Il s'agit donc d'une membrane très peu hygroscopique.
- L'allure de l'isotherme est de type III.
- L'adsorption et la désorption du pare pluie sont pratiquement superposées traduisant une hystérésis négligeable.
- Il faut noter la particularité du parapluie qui a une masse volumique très faible. Les prélèvements ont ainsi été réalisés en manométrie sur 43 mg seulement.

Par ailleurs, les paramètres du modèle HH pour les courbes enveloppes ont été également calculés pour chaque prélèvement.

	Paramètres du modèle Hailwood-Horrobin HH							
	Adsorption				Désorption			
	HH_A+	HH_B+	HH_C+	R ²	HH_A-	HH_B-	HH_C-	R ²
Pare pluie 1	144,938	2,123	0,030	1,000	50,522	3,515	0,033	1,000
Pare pluie 2	264,128	2,415	0,041	1,000	153,602	3,808	0,042	1,000

Tableau III-57. Paramètres des modèles de courbes mesurées par manométrie au LaSIE pour le pare-pluie

Matériaux	Paramètres du modèle Hailwood-Horrobin HH								
	Adsorption			Désorption			Moyenne		
	A+	B+	C+	A-	B-	C-	A	B	C
Parepluie 1	459,60	- 156,57	236,97	451,45	- 161,22	218,94	455,52	- 158,87	228,20
Parepluie 2	458,93	- 46,32	342,83	550,44	- 310,56	157,37	506,51	- 187,36	242,09

Tableau III-58. Paramètres des modèles de courbes mesurées par DVS au LERMAB pour le pare-pluie

c) Isothermes intermédiaires

Les tableaux III.8.1.c.1 et III.8.1.c.2 présentent les résultats des boucles d'isothermes intermédiaires obtenus respectivement par le LaSIE et le LERMAB.

Adsmoy1	HR (%)	0,00	29,99	60,01	90,34		
	W (%)	0,01	0,10	0,21	0,55		
Desmoy1	HR (%)	15,02	30,02	44,99	60,03	75,06	90,26
	W (%)	0,07	0,11	0,17	0,23	0,33	0,54
Adsmoy2	HR (%)	15,01	30,01	45,01	59,99	75,14	
	W (%)	0,07	0,11	0,16	0,23	0,34	
Desmoy2	HR (%)	30,01	45,01	60,03	75,14		
	W (%)	0,12	0,17	0,24	0,34		
Adsmoy3	HR (%)	30,02	45,01	60,04			
	W (%)	0,12	0,17	0,24			
Desmoy3	HR (%)	45,01	50,00	55,02	60,04		
	W (%)	0,18	0,20	0,22	0,24		
Adsmoy4	HR (%)	45,01	50,00	55,04			
	W (%)	0,17	0,19	0,22			
Desmoy4	HR (%)	50,00	55,01				
	W (%)	0,20	0,22				

Tableau III-59. Isothermes intermédiaires moyennées mesurées par DVS au LaSIE pour le pare-pluie

Adsmoy1	HR (%)	0,00	12,76	27,49	42,17	56,37	69,89	82,92
	W (%)	0,00	0,03	0,07	0,11	0,18	0,29	0,47
Desmoy1	HR (%)	0,00	13,97	28,86	43,39	57,32	70,52	82,92
	W (%)	0,00	0,03	0,07	0,12	0,19	0,29	0,47
Adsmoy2	HR (%)		13,86	27,97	42,27	56,13	69,48	
	W (%)		0,03	0,07	0,12	0,19	0,30	

Tableau III-60. Isothermes intermédiaires moyennées mesurées par DVS au LERMAB pour le pare-pluie

Dans la Figure III-55, nous avons présenté une comparaison exhaustive de ces résultats afin de bien montrer les boucles intermédiaires mesurées sur le pare-pluie par les deux laboratoires (LaSIE et LERMAB).

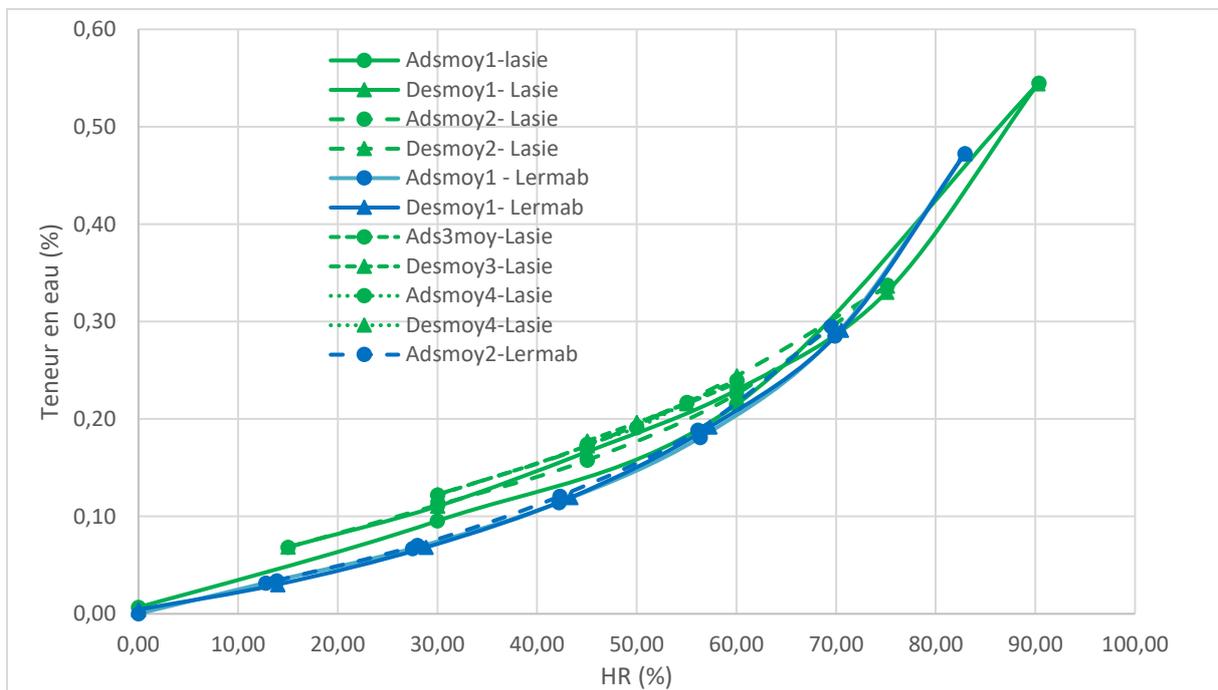


Figure III-55. Isothermes intermédiaires moyennées mesurées par DVS au LaSIE et LERMAB pour le pare-pluie

L'analyse des boucles intermédiaires du pare-pluie en gravimétrie montre une très faible adsorption du matériau (1 % de teneur en eau maximum) en cohérence avec l'isotherme d'adsorption manométrique.

III.8.2. Coefficient de diffusion

Le facteur de résistance à la diffusion $\bar{\mu}$ du pare-pluie a été mesuré par les méthodes FA et CS. La valeur $\bar{\mu}$ du pare-pluie (Solitex fronta WA) indiquée par le constructeur est de 110 ce qui correspond à une valeur $s_d (= \bar{\mu} \times e)$ de 0.05 m.

Les valeurs de $\bar{\mu}$ mesurées par la méthode FA (LERMAB) et CS (TIPEE) donnent un s_d en moyenne 10 fois plus élevées que celle donnée par le fabricant. Le LOCIE a obtenu en revanche, avec la méthode CS, des valeurs plus proches de celle du fabricant. Il est difficile de conclure sur l'origine de ces écarts, nous pouvons seulement faire des hypothèses. Pour la méthode FA,

l'étude de ce matériau a été compliquée pour le LERMAB en raison de la rapidité de sa réponse à un échelon d'humidité. Le LERMAB a dû réaliser l'essai sur une macro-DVS qui possède une chambre climatique de petite dimension afin d'assurer un échelon d'HR en face avant de l'échantillon qui se réalise en moins de 10 min. Pour le LOCIE, cette difficulté n'apparaît pas avec la RHbox qui permet d'avoir un échelon parfait de HR. Pour la méthode CS, le pare-pluie est micro-perforé et a une face pelucheuse qui l'un comme l'autre peut affecter l'étanchéité nécessaire entre le matériau et la coupelle.

Pare pluie	Méthode	Mu moyen (-)		Densité (kg/m ³)	Humidité d'équilibre moyenne (% kg d'eau/kg MS)		
		Sèche (RH moy = 37%)	Humide (RH moy = 67%)		HR= 37%	HR= 67%	HR= 90%
LERMAB	FA	1435±543	815±300	222	0.1	0.27	0.7
TIPEE	CS	833±151	860±99	451			
LOCIE	CS	220±11.5	88±21.4	...			
Inter laboratoire		830±607	231±98				
Constructeur Solitex fronta WA	NF EN ISO12572	110		100g/m ²			

Tableau III-61. Facteur de résistance à la diffusion, densité et teneur en eau d'équilibre du pare-pluie

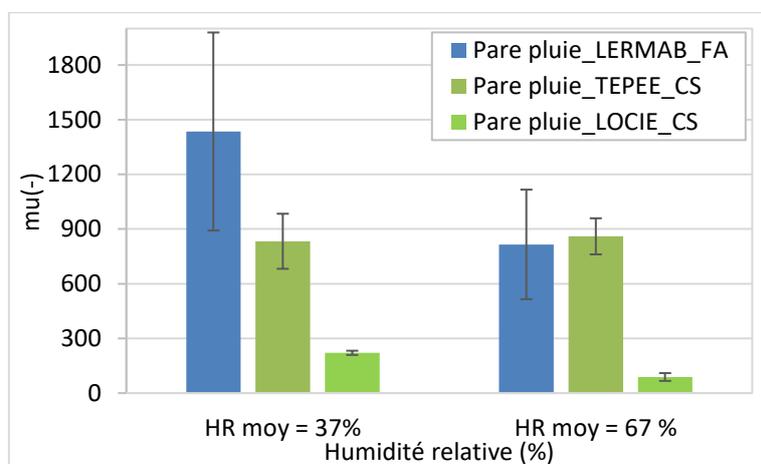


Figure III-56. Comparaison du facteur de résistance à la diffusion du pare pluie

III.8.3. Caractéristiques thermiques

a) Chaleur spécifique

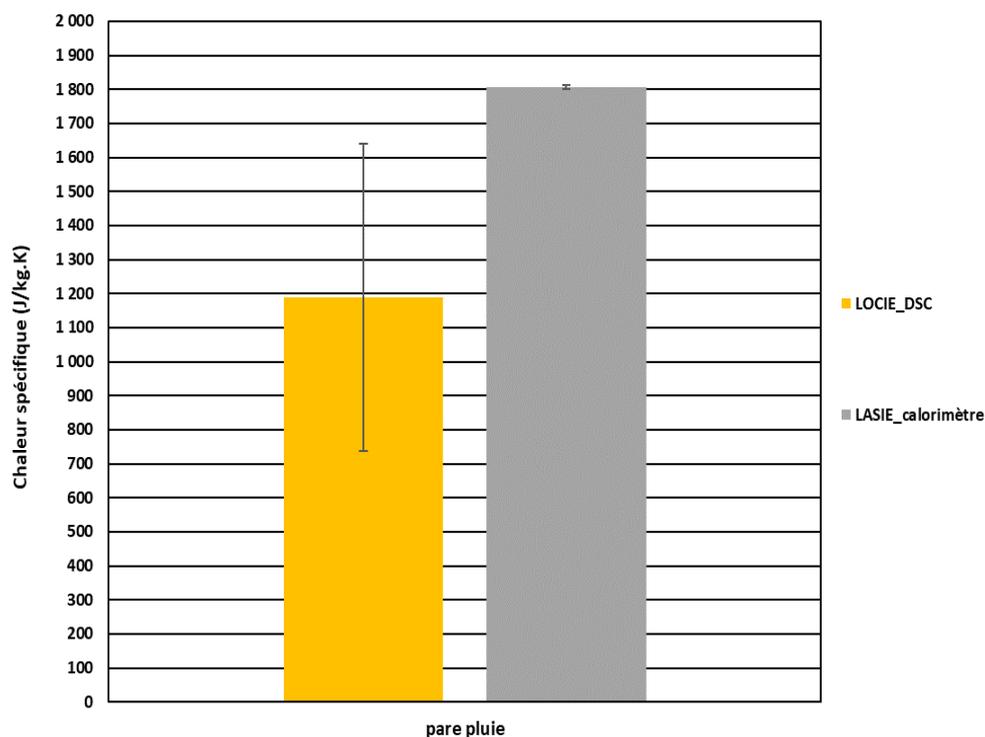


Figure III-57. Chaleur spécifique de la pare-pluie à LOCIE et LASIE à 25°C.

La chaleur spécifique du pare pluie mesurée par le DSC à LOCIE a été trouvée plus faible que celle mesurée par le calorimètre du LaSIE malgré les barres d'erreur (voir Figure III-57). Les valeurs sont égales à 1188 et 1806 J/kg.K, respectivement.

III.9. BOIS ANCIEN

III.9.1. Isothermes de sorption

a) Isothermes d'enveloppe à 25°C

Deux prélèvements de bois récents et un prélèvement de bois ancien ont été mesurés au LERMAB tandis que deux prélèvements de bois anciens ont été mesurés au LGPM. La moyenne a été faite pour les prélèvements. Le Tableau III-62, Tableau III-63 et Tableau III-64 récapitulent les résultats des isothermes d'enveloppes obtenus pour le bois respectivement par le LERMAB et le LGPM.

Ads moy	RH (%)	0,00	12,88	28,23	42,91	57,36	71,18	84,79
	W (%)	0,00	3,06	5,19	7,27	9,80	13,35	19,34
	ecart type RH (%)	0,00	0,29	0,10	0,45	0,60	0,88	0,83
	ecart type W (%)	0,00	0,11	0,05	0,16	0,18	0,31	0,46
Des moy	RH (%)	0,00	13,45	28,71	43,12	57,51	71,49	84,79
	W (%)	0,00	3,90	6,70	9,49	12,48	15,80	19,34
	ecart type RH (%)	0,000	0,418	0,057	0,548	0,842	0,933	0,831
	ecart type W (%)	0,000	0,124	0,012	0,063	0,165	0,189	0,460

Tableau III-62. Valeurs des isothermes moyennées mesurées par DVS au LERMAB pour le bois récent

Ads1	RH (%)	0,00	13,10	28,61	42,64	56,65	70,58	83,67
	W (%)	0,00	2,81	4,81	6,45	8,61	11,93	18,69
Des1	RH (%)	0,00	13,03	28,59	42,85	56,93	70,37	83,67
	W (%)	0,00	3,29	5,91	8,40	11,16	14,33	18,69

Tableau III-63. Valeurs de l'isotherme mesurée par DVS au LERMAB pour le bois ancien

Ads moy	RH (%)	15,00	30,00	45,00	60,00	75,00	90,00
	W (%)	3,46	5,46	7,19	9,16	12,13	20,91
	ecart type RH (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ecart type W (%)	0,08	0,23	0,27	0,16	0,16	0,90
Des moy	RH (%)	15,00	30,00	45,00	60,00	75,00	90,00
	W (%)	4,31	6,90	9,26	12,01	15,11	20,91
	ecart type RH (%)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	ecart type W (%)	0,055	0,132	0,197	0,174	0,062	0,902

Tableau III-64. Valeurs des isothermes moyennées mesurées par DVS au LGPM pour le bois ancien

Afin de mieux illustrer la répétabilité et la reproductibilité sur ces mesures, nous avons présenté dans la Figure III-58 une comparaison graphique des isothermes de sorption.

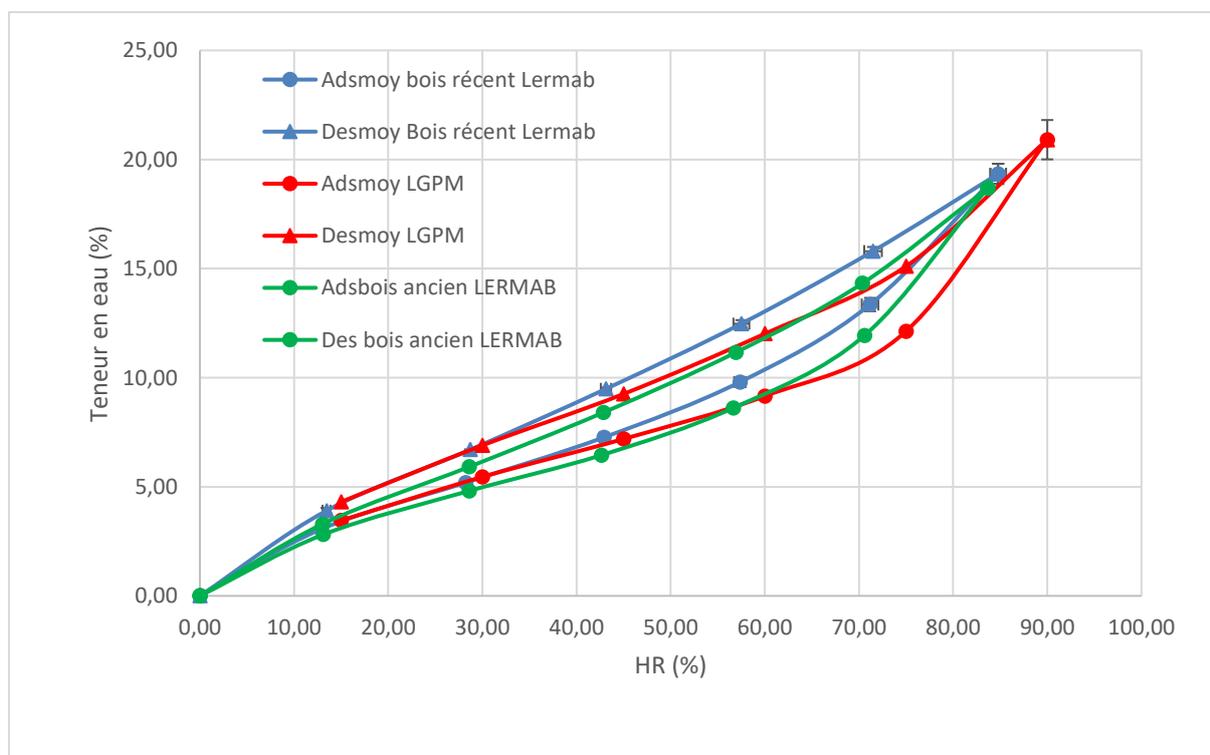


Figure III-58. Isothermes moyennées comparées mesurées par DVS au LERMAB et au LGPM pour le bois ancien

En se basant sur les résultats présentés sur la Figure III-58, nous pouvons conclure que :

- L'isotherme d'adsorption du bois de chêne présente une isotherme de type II avec une humidité d'équilibre d'environ 19% à 90% de HR.
- L'hystérésis maximale de l'isotherme du chêne (différence entre les courbes enveloppes de désorption-adsorption) est de 2.6% de teneur en eau.
- Les isothermes de bois ancien et bois récents sont comparables.

Par ailleurs, les paramètres du modèle HH pour les courbes enveloppes ont été également calculés pour chaque prélèvement.

Les paramètres des modèles sont comparés dans le Tableau III-65 et Tableau III-66:

Matériaux	Paramètres du modèle Hailwood-Horrobin HH								
	Adsorption			Désorption			Moyenne		
	A+	B+	C+	A-	B-	C-	A	B	C
Chêne 1 ancien	2.54	17.43	18.05	3.27	7.12	6.80	2.94	11.68	11.75
Chêne 2 récent	2.99	12.16	12.43	3.08	4.98	4.05	3	8.28	7.82
Chêne 3 récent	2.85	12.25	12.31	2.94	5.67	4.75	**	**	**

Tableau III-65. Paramètres des modèles des isothermes mesurées par DVS au LERMAB pour le bois

	Paramètres du modèle Hailwood-Horrobin HH							
	Adsorption				Désorption			
	HH_a	HH_b	HH_c	HH_RMS E	HH_a	HH_b	HH_c	HH_RMS E
Bois ancien A1	1,44	19,1	17,4	3,72E-03	2,26	9,05	7,36	1,32E-03
Bois ancien A2	1,51	20,3	19,2	2,69E-03	2,04	10,5	9,03	2,18E-03
Bois ancien D	1,97	17,8	16,9	1,61E-03	2,43	9,68	8,4	2,49E-03
	Paramètres du modèle GAB							
	GAB_M m	GAB_C	GAB_K	GAB_RM SE	GAB_M m	GAB_C	GAB_K	GAB_RM SE
	Bois ancien A1	4,64E-02	1,74E+0 1	8,59E- 01	3,72E-03	8,21E-02	7,77E+0 0	6,93E- 01
Bois ancien A2	4,36E-02	1,71E+0 1	8,89E- 01	2,69E-03	7,36E-02	8,90E+0 0	7,49E- 01	2,18E-03
Bois ancien D	4,71E-02	1,24E+0 1	8,65E- 01	1,61E-03	7,55E-02	7,45E+0 0	7,33E- 01	2,49E-03

Tableau III-66. Paramètres des modèles des isothermes mesurées par DVS au LGPM pour le bois

b) Isothermes intermédiaires

Le Tableau III-67 et Tableau III-68 présentent les résultats des boucles d'isothermes intermédiaires obtenus respectivement par le LERMAB et le LGPM.

Adsmoyl	RH (%)	0,00	12,88	28,23	42,91	57,36	71,18	84,79
	W (%)	0,00	3,06	5,19	7,27	9,80	13,35	19,34
Desmoyl	RH (%)	0,00	13,45	28,71	43,12	57,51	71,49	84,79
	W (%)	0,00	3,90	6,70	9,49	12,48	15,80	19,34

Adsmoy2	RH (%)	13,45	28,22	42,65	56,87	70,60	84,79
	W (%)	3,90	5,87	7,93	10,31	13,43	19,34

Tableau III-67. Isothermes intermédiaires moyennées mesurées par DVS au LERMAB pour le bois récent

Ads1	RH (%)	15	30	45	60	75	90
	W (%)	3,516	5,617	7,385	9,272	12,014	20,27
Des1	RH (%)	15	30	45	60	75	90
	W (%)	4,349	6,992	9,116	12,137	15,151	20,27
Ads2	RH (%)	15	30	45	60		
	W (%)	3,475	5,4	7,16	9,273		
Des2	RH (%)	15	30	45	60		
	W (%)	4,184	6,377	8,083	9,273		

Tableau III-68. Isothermes intermédiaires mesurées par DVS au LGPM pour le bois ancien

Dans la Figure III-59, nous avons présenté une comparaison exhaustive de ces résultats afin de bien visualiser les boucles intermédiaires mesurées sur le bois par les deux laboratoires (LERMAB et LGPM).

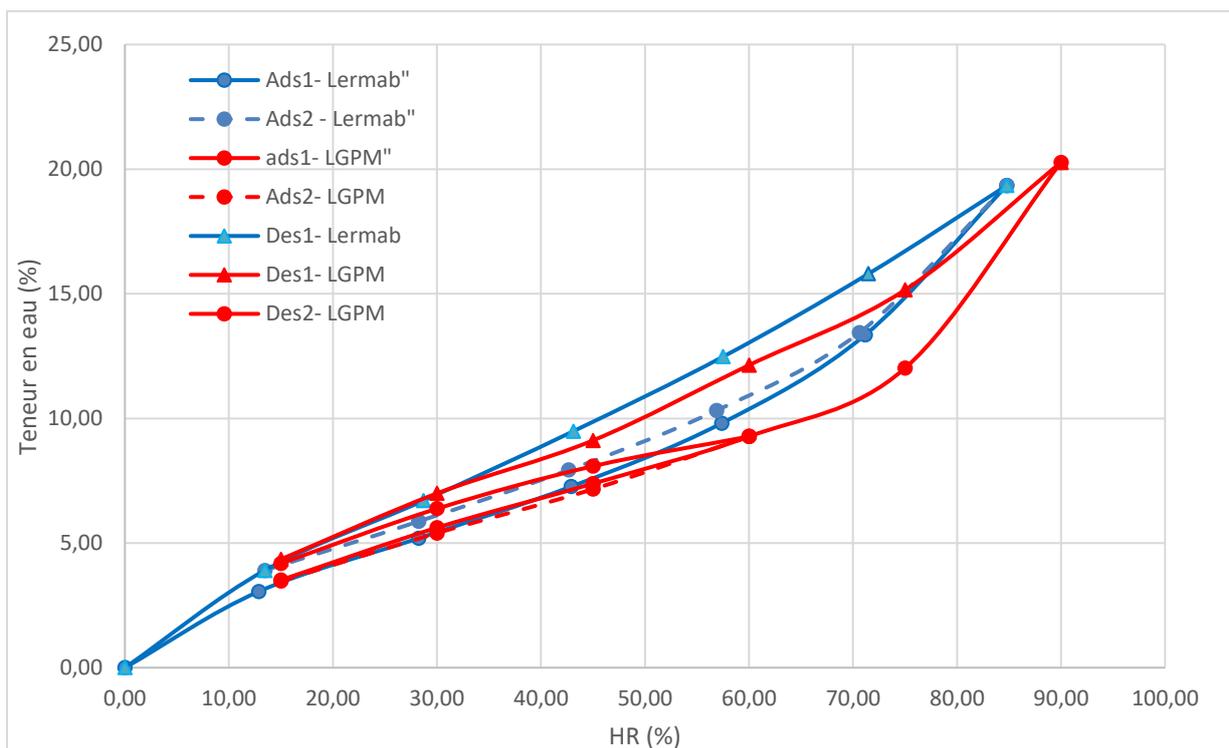


Figure III-59. Isothermes intermédiaires comparées mesurées par DVS au LERMAB et au LGPM pour le bois

Matériaux	Paramètres de la courbe intermédiaire
------------------	--

	alpha	Béta
Chêne 1 ancien	-	-
Chêne 2 récent	0.15	0.12
Chêne 3 récent	0.16	0.24

Tableau III-69. Paramètres alpha et béta du modèle Grippé box des courbes intermédiaires réalisées du bois au LERMAB

III.9.2. Coefficient de diffusion

Le facteur de résistance à la diffusion $\bar{\mu}$ du bois de chêne a été mesuré par la méthode FA et la méthode CS. Les échantillons présentaient de nombreuses fentes de séchage, des déformations et des débits hétérogènes d'un échantillon à l'autre. L'échantillonnage a donc été compliqué et la lenteur des essais n'a pas permis à tous les laboratoires de finaliser les essais sur ce matériau. TIPEE a ainsi présenté une seule condition de mesure. Les valeurs de perméabilités à la vapeur mesurées par CS et FA sont remarquablement proches. L'écart type est important pour les raisons évoquées plus haut.

Le $\bar{\mu}$ du bois de chêne est d'environ 304 ± 7 pour une HR moyenne de 37% et de 60.6 ± 6 pour une HR moyenne de 67%. L'augmentation de l'HR de 37% à 67% conduit $\bar{\mu}$ à diminuer de 80%. Ce résultat est en bon accord avec la littérature.

	Méthode	Mu moyen (-)		Densité moyenne (kg/m ³)	Humidité d'équilibre moyenne (% kg d'eau/kg MS)		
		Sec (37% RH)	Humide (65% RH)		HR=37%	HR=67%	HR=90%
LERMAB	FA	308.97±35.6	60.62±6.2	774±12	6.55	12.21	22.9
TIPEE	CS	299	---	...			
inter-laboratoire		304±7	60.6±6.2				
Energieplus		370	40				
WUFI (chêne radial)		140		685			

Tableau III-70. Facteur de résistance à la diffusion, densité et teneur en eau d'équilibre du bois de chêne

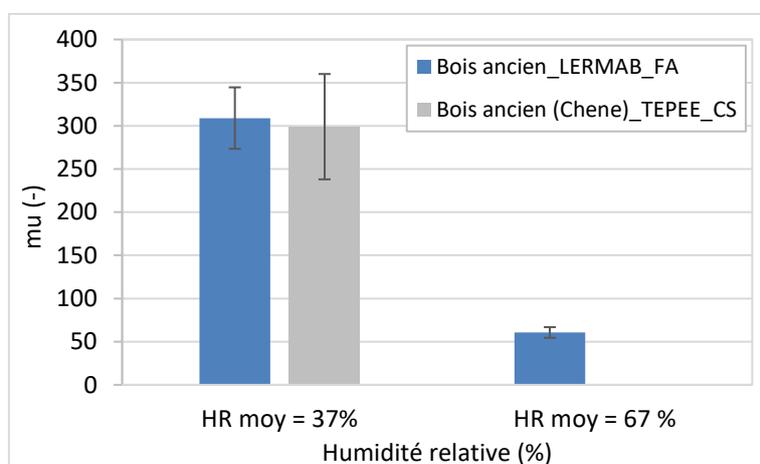


Figure III-60. Comparaison du facteur de résistance à la diffusion du bois de chêne

III.9.3. Caractéristiques thermiques

a) Conductivité thermique

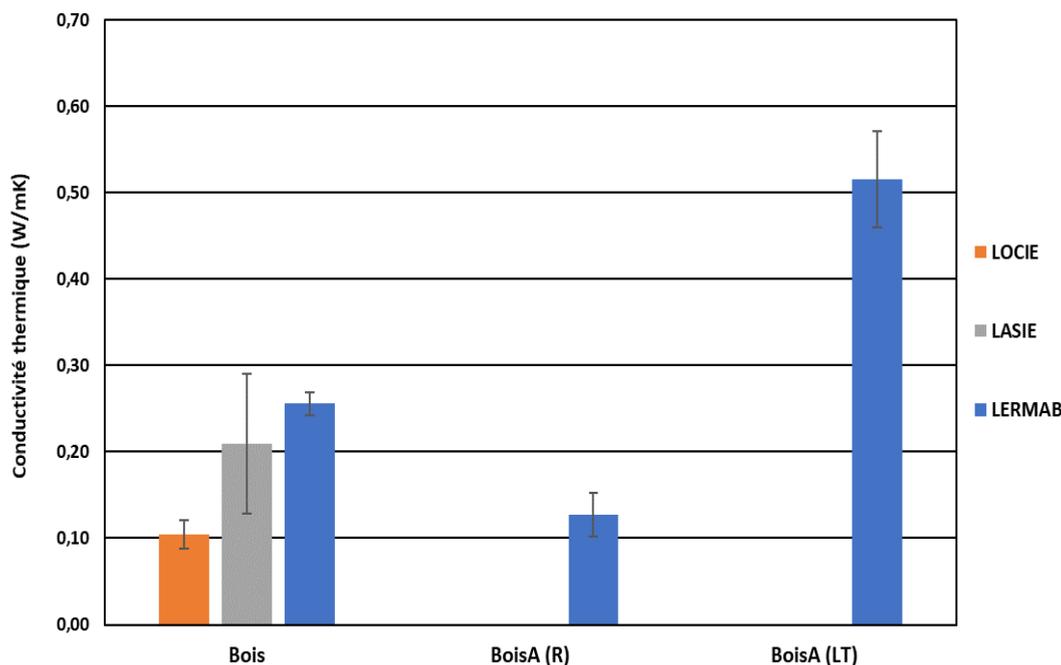


Figure III-61. Conductivité thermique du bois ancien isotrope à LOCIE, LASIE et LERMAB, et anisotrope à LERMAB, à 25°C.

Dans le cas du bois ancien, les résultats de conductivité thermique des échantillons isotropes (0.256 W/m.K) et anisotropes (radial, 0.127 W/m.K, et longitudinal, 0.516 W/m.K) sont différents (voir Figure III-61). Les résultats trouvés à LOCIE (0.104 W/m.K) et à LASIE (0.209 W/m.K) sont aussi différents. La valeur de conductivité thermique trouvée à LOCIE est proche de celle du bois anisotrope radial trouvée à LERMAB et plus faible que la valeur obtenue à LASIE qui est proche à celle du bois isotrope de LERMAB. Donc on peut dire que la forme et le conditionnement du bois jouent un rôle important dans les mesures, car les surfaces latérales du bois ancien anisotrope de LERMAB ne sont pas planes pour quelques échantillons et il y a des fissures dans les échantillons de LASIE qui sont aussi déformés au séchage. Pour le bois ancien de LOCIE, quelques échantillons présentent des fissures. De plus, le teneur en eau dans les échantillons de LERMAB anisotropes (11%) est plus grand que celui dans les échantillons de LASIE (4.24%).

Ci-dessous les détails de la mesure par TPEE de la conductivité thermique par la méthode de la Plaque Chaude Gardée (NF EN 12667:2001) à 20 et 30 °C pour un échantillon de bois ancien (Ba, EC-20210515DG-001) qui a préalablement été conditionné en enceinte climatique à trois humidités relatives (80%, 50% et 30%) et une température (23°C) jusqu'à obtention d'une masse constante.

Identifiant éprouvette	Dimensions $h \times l \times e$ (mm)	Masse (g)	Durée [jours]	Masse volumique finale (kg/m ³)	Variation massique finale (%)
Ba ₂ _80	152,19 x 151,41 x 52,39	992.02	27	823.8	2.6

Ba ₂ _50	152,19 x 151,41 x 52,39	955.34	23	815.7	-3.72
Ba ₂ _30	152,19 x 151,41 x 52,39	931.35	30	773.5	-2.51
Ba _A _sec	144,43 x 144,13 x 51,66	797.51	10	740.5	7.87

Tableau III-71. Données de conditionnement de l'éprouvette Ba

Les variations de masse volumique semblent cohérentes. Les variations massiques en relatif correspondent à 3 à 10 g en absolu. Les conditions expérimentales pour chaque essai sont reportées dans le Tableau III-71.

Identifiant éprouvette	Pression appliquée (Pa)	Différence de température moyenne (K)	Temps de stabilisation (min)	T ambiante moyenne (°C)	HR ambiante moyenne (%)	Variation massique pendant l'essai (%)
Ba ₂ _80	1000	10.0	1440	18.5	67.0	-0.05
Ba ₂ _50	1000	10.0	1440	19.0	70.0	-0.02
Ba ₂ _30	1000	10.0	1440	21.9	58.7	+0,05
Ba _A _sec	1000	10.0	1440	19.1	72.5	+0,09

Tableau III-72. Conditions d'essai de l'éprouvette Ba₂

Les résultats sont récapitulés dans le Tableau III-73. L'incertitude ne prend pas en compte les résistances de contact induites par la non-planéité de l'éprouvette et la présence d'un film plastique pour éviter les migrations de vapeur d'eau.

ID Essai	Température de mesure (°C)	Epaisseur de l'échantillon (mm)	Densité de flux thermique (mW/m ²)	Conductivité thermique (mW/(m.K))	$\lambda_{10^{\circ}\text{C}}$ (mW/(m.K))	Incertitude de mesure (mW/(m.K)) (k = 2)
Ba ₂ _80	22.0	52.56	112.07	393	368	±10.8
	31.7		117.89	413		
Ba ₂ _50	20.0	53.48	63.4	339	326	±11.7
	30.0		65.8	352		
Ba ₂ _30	20.0	52.96	67.4	357	345	±12.3
	30.0		69.7	369		
Ba _A _sec	20.0	52.58	54.2	285	277	±10.0
	30.0		55.7	293		

Tableau III-73. Résultats de mesure de la conductivité thermique sur l'échantillon Ba₂

Tous les échantillons ont été emballés dans un film plastique pour la mesure de la conductivité thermique. Des pesées avant/après essai sont réalisées avec le film plastique dont les résultats sont reportés dans le Tableau III-74.

ID essai	m ₃ (g)	Date/heure	m ₄ (g)	Date/heure	Variation masse (%)	Epaisseur mes. (mm)
----------	--------------------	------------	--------------------	------------	---------------------	---------------------

Ba ₂ _80	995.71	18/06/2021 14:42	995.18	21/06/2021 16:01	-0.05%	52.56
Ba ₂ _50	955.34	03/08/2021 14:30	955.14	05/08/2021 17:00	-0.02%	53.48
Ba ₂ _30	931.56	20/09/2021 16:50	931.98	23/09/2021 09:45	0.05%	52.96
Ba _A _sec	797.3	19/07/2021 17:00	798.0	22/07/2021 09:55	0.09%	52.58

Tableau III-74. Variations de masse de Ba₂ durant l'essai

Les résultats des conductivités thermiques pour un conditionnement à 50% et 30% ne sont pas significativement différents et ne sont pas dans l'ordre attendu. Les résultats d'essai sur échantillon sec et à 80% semblent, eux, plus cohérents.

b) Effusivité thermique

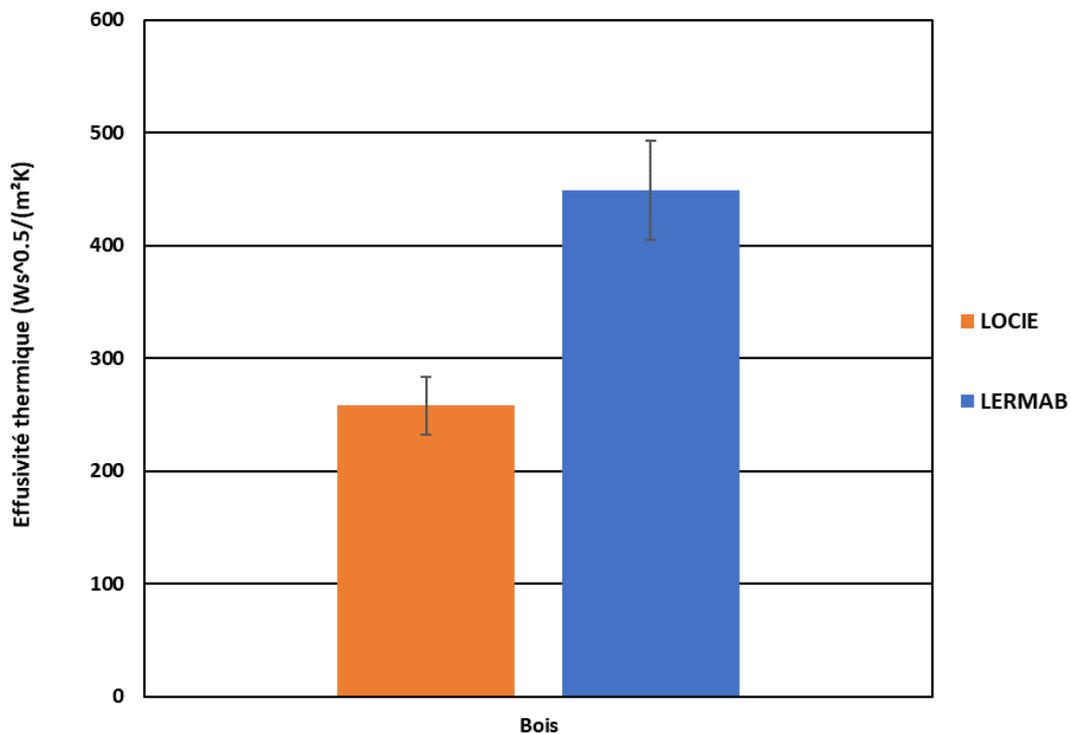


Figure III-62. Effusivité thermique du bois ancien à LOCIE et LERMAB à 25°C.

A propos de l'effusivité thermique du bois ancien (Figure III-62), les mesures de LOCIE et de LERMAB ne sont pas identiques. Celle de LOCIE est égale à 257.74 Ws^{0.5}/(m²K) et elle est beaucoup plus faible que celle de LERMAB qui est égale à 448.61 Ws^{0.5}/(m²K).

c) Chaleur spécifique

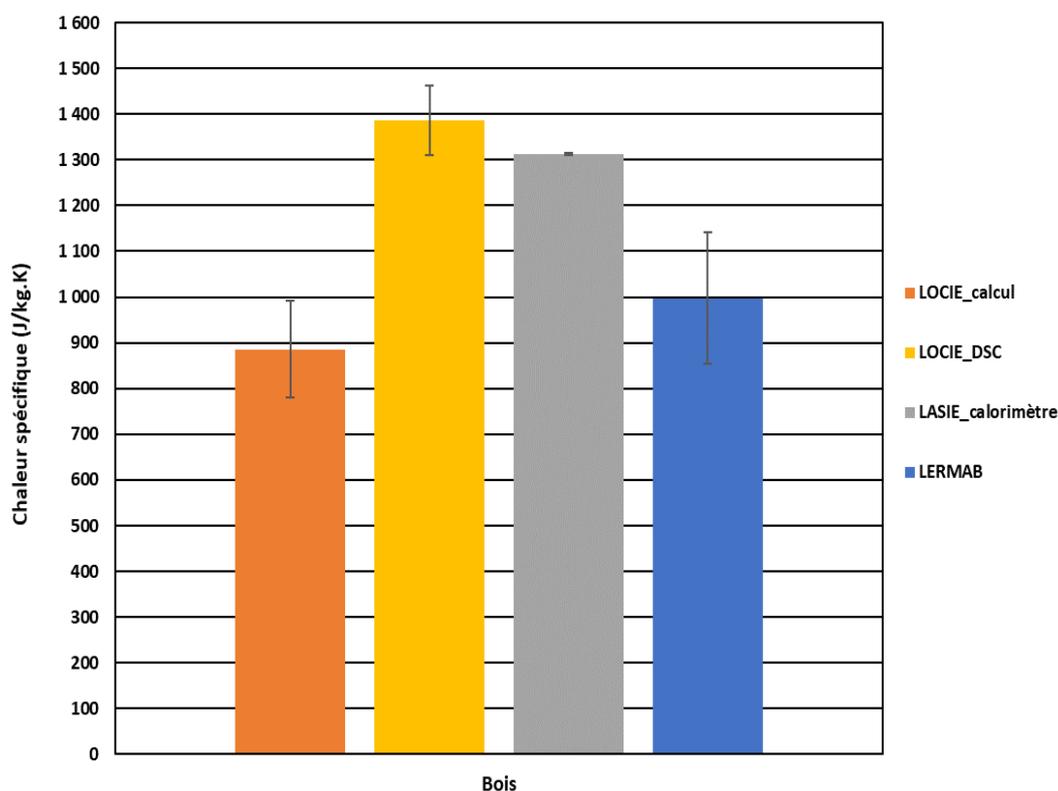


Figure III-63. Chaleur spécifique du bois ancien à LOCIE, LASIE et LERMAB à 25°C.

La chaleur spécifique mesurée à LOCIE par le DSC (1386 J/kg.K) est légèrement plus grande que celle testée à LASIE par le calorimètre (1311.92 J/kg.K), comme le montre la Figure III-63. Par contre, ces deux valeurs sont plus grandes que celles calculées à LOCIE (885.21 J/kg.K) et LERMAB (997.74 J/kg.K) qui sont presque similaires, malgré la différence dans les résultats de conductivité et d'effusivité thermique (voir Figure III-61 et Figure III-62).

d) Diffusivité thermique

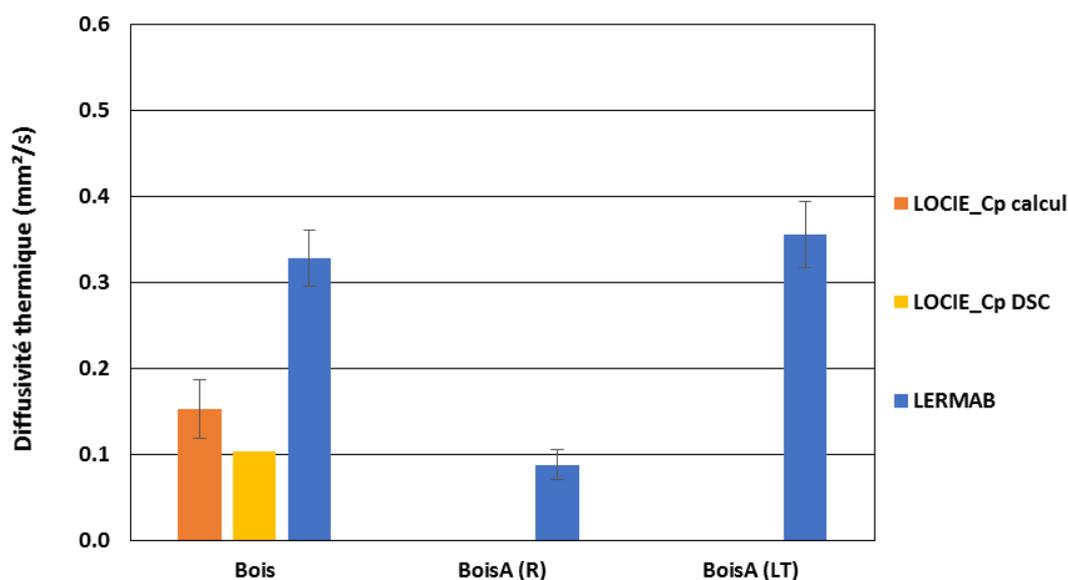


Figure III-64. Diffusivité thermique du bois ancien isotrope et anisotrope à LOCIE et LERMAB à 25°C.

La diffusivité thermique du bois ancien trouvée à LOCIE à partir de c_p calculée (0.153 mm²/s) est supérieure à celle obtenue à partir du c_p mesurée par le DSC (0.103 mm²/s), qui est presque similaire à celle calculée à LERMAB pour l'échantillon anisotrope radial (0.088 mm²/s). Tandis que les résultats du bois ancien isotrope (0.328 mm²/s) et anisotrope longitudinal (0.356 mm²/s) trouvés à LERMAB sont identiques (en tenant compte des barres d'erreur) et plus élevés que les autres. Les résultats sont illustrés dans la Figure III-64.

III.10. BETON CELLULAIRE

III.10.1. Isothermes de sorption

a) Isothermes d'enveloppe à 25°C

Un prélèvement a été mesuré au LGPM. Le Tableau III-75 récapitule le résultat de l'isotherme d'enveloppe obtenu sur le béton cellulaire par le LGPM.

Ads 1	HR (%)	15	30	45	60	75	90
	Sorption	0,996	1,202	1,358	1,528	1,856	3,062
DES 1	HR (%)	15	30	45	60	75	90
	Desorption	1,042	1,257	1,513	1,69	2,005	3,062

Tableau III-75. Valeurs de l'isotherme mesurées par DVS au LGPM pour le béton cellulaire

La Figure III-65 présente l'isotherme enveloppe de façon graphique.

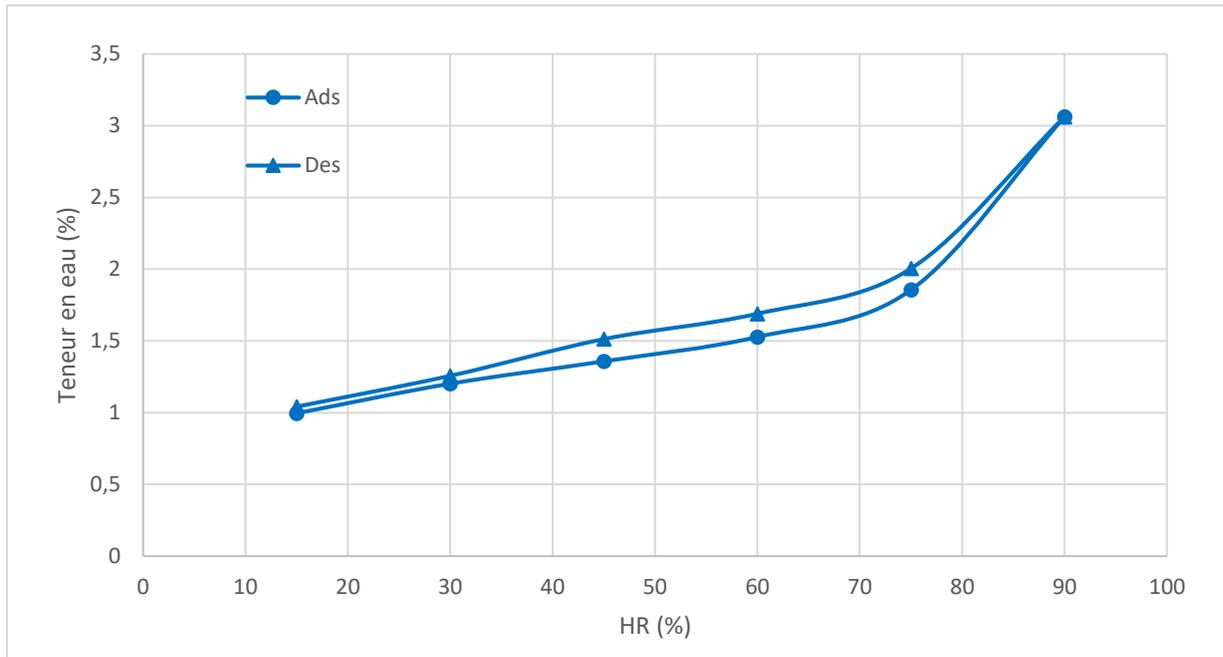


Figure III-65. Isotherme mesurée par DVS au LGPM pour le béton cellulaire

En se basant sur ces résultats, nous pouvons conclure que :

- Le béton cellulaire est un matériau peu hygroscopique, sa teneur en eau est de 3 % pour une humidité de 90%
- L’hystérésis en adsorption et désorption est faible

Par ailleurs, les paramètres du modèle HH pour la courbe enveloppe ont été également calculés.

Paramètres du modèle Hailwood-Horrobin HH								
Béton cellulaire	sorption				desorption			
	HH_a	HH_b	HH_c	HH_RMSE	HH_a	HH_b	HH_c	HH_RMSE
	1,06E-04	1,22E+0 2	9,83E+0 1	1,16E-03	8,67E-06	1,08E+0 2	8,34E+0 1	9,05E-04
Paramètres du modèle GAB								
	GAB_M m	GAB_C	GAB_K	GAB_RMS E	GAB_M m	GAB_C	GAB_K	GAB_RMS E
	8,19E-03	1,61E+0 6	8,05E-01	1,16E-03	9,22E-03	1,56E+0 7	7,69E-01	9,05E-04

Tableau III-76. Paramètres des modèles des isothermes mesurées par DVS au LGPM pour le béton cellulaire

b) Isothermes intermédiaires

Le Tableau III-77 présente les résultats des boucles d’isothermes intermédiaires obtenus par le LGPM.

Ads 1	HR (%)	15	30	45	60	75	90
	Sorption	0,996	1,202	1,358	1,528	1,856	3,062
Des 1	HR (%)	15	30	45	60	75	90
	Desorption	1,042	1,257	1,513	1,69	2,005	3,062
Ads 2	HR (%)	15	30	45	60		

	Sorption	0,992	1,194	1,353	1,525		
DesS 2	HR (%)	15	30	45	60		
	Desorption	1,021	1,228	1,38	1,525		

Tableau III-77. Valeurs des isothermes intermédiaires mesurées par DVS au LGPM pour le béton cellulaire

Dans la Figure III-66, nous avons présenté graphiquement les boucles intermédiaires mesurées sur le béton cellulaire.

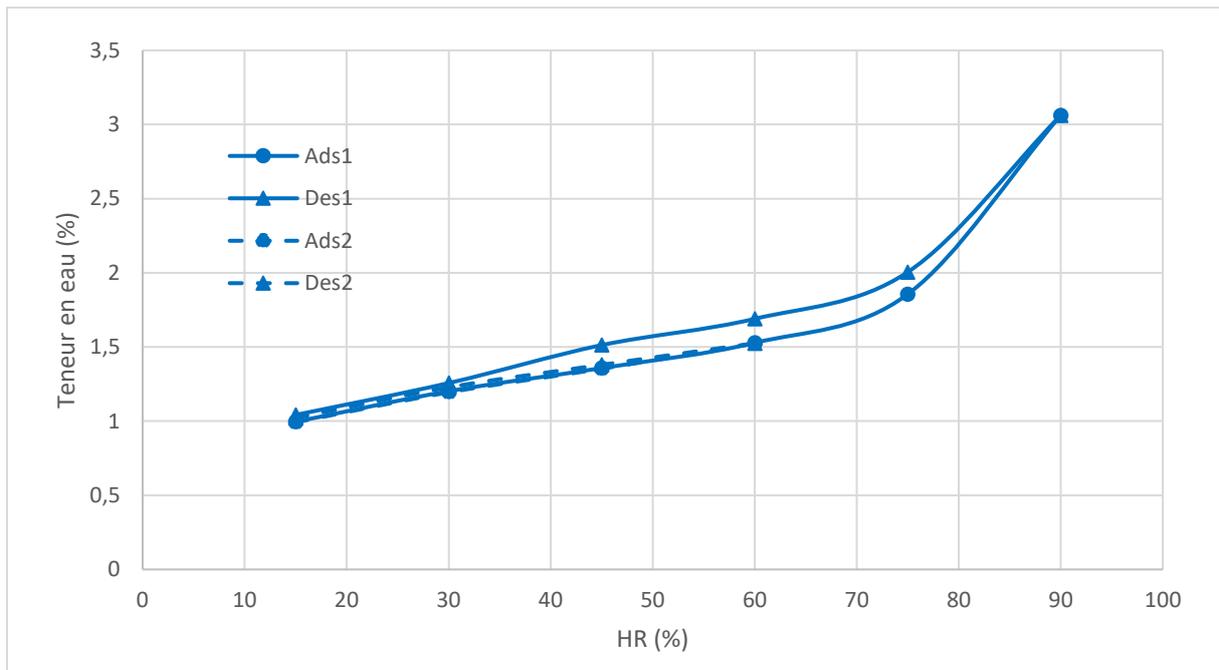


Figure III-66. Isothermes intermédiaires mesurées par DVS au LGPM pour le béton cellulaire

III.10.2. Coefficient de diffusion

Le facteur de résistance à la diffusion $\bar{\mu}$ du béton cellulaire a été mesuré par les méthodes de la FA et de la CA. Les mesures de la CA sont en cours et au moment de la rédaction de ce rapport, les résultats n'ont pas pu être intégrés. Les valeurs présentées de $\bar{\mu}$ par FA sont vraiment dispersées. Nous avons déjà évoqué précédemment la sensibilité de la méthode à la pente de l'isotherme de sorption entrée dans le modèle. A noter que les valeurs de diffusion $\bar{\mu}$ obtenues par le LGPM sont proches de celles que l'on rencontre dans la littérature et qui ont été déterminées par la méthode classique de la CS. Ceci montre la pertinence de la méthode FA, moyennant le bon jeu de paramètres en entrée du modèle.

	Méthode	Sèche (37% RH)	Humide (65% RH)	Densité moyenne (kg/m ³)	Humidité d'équilibre moyenne (% kg d'eau/kg MS)		
					HR=25%	HR=50%	HR=80%
LERMAB	FA	1.98±0.36	1.43±0.21	523±6.4	0.99	2.02	3.87
LGPM	FA	5.61±0.26	2.94±0.25	530	1.03	1.37	2.31
LOCIE	FA	1.85	5.55				
LaSIE	CA	/	/	/			
inter-laboratoire		3.79±2.6	2.2 ±1.1				
WUFI		8		500			
Enegieplus		6	3	500-549			

Tableau III-78. Facteur de résistance à la diffusion et densité du béton cellulaire

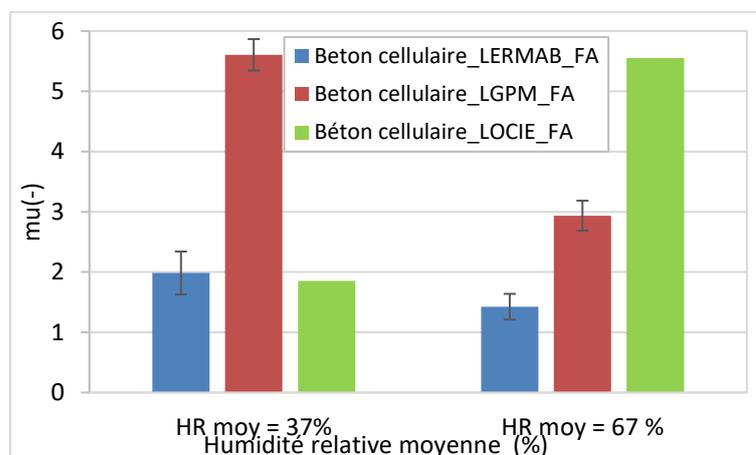


Figure III-67. Comparaison du facteur de résistance à la diffusion du béton cellulaire

III.11. Polystyrène expansé

III.11.1. Coefficient de diffusion

Le facteur de résistance à la diffusion $\bar{\mu}$ du PSE a été déterminé par la méthode FA. Les mesures sont très dispersées. Là encore, la cause probable est l'isotherme de sorption utilisée par les modèles puisqu'elle n'a été mesurée dans le cadre de ce projet et vient de données de la littérature. Les mesures du LGPM donnent un $\bar{\mu}$ beaucoup trop faible et inférieur à celui de l'air pour une HR moyenne de 37%. En prenant les valeurs du LERMAB, $\bar{\mu}$ du PSE est d'environ 10.1 ± 0.41 pour une HR moyenne de 37% et d'environ 7.9 ± 0.51 pour une HR moyenne de 67%.

PSE	Méthode	Mu moyen (-)		Densité (kg/m ³)
		Sec (RH moy = 37%)	humide (RH moy = 67%)	
LERMAB	FA	10.11±0.41	7.9±0.51	14
LGPM	FA	0.78	1.53	...
Inter laboratoire		10.11±0.41	7.9±0.51	
WUFI		21.7		20

Tableau III-79. Facteur de résistance à la diffusion et densité du polystyrène expansé (PSE)

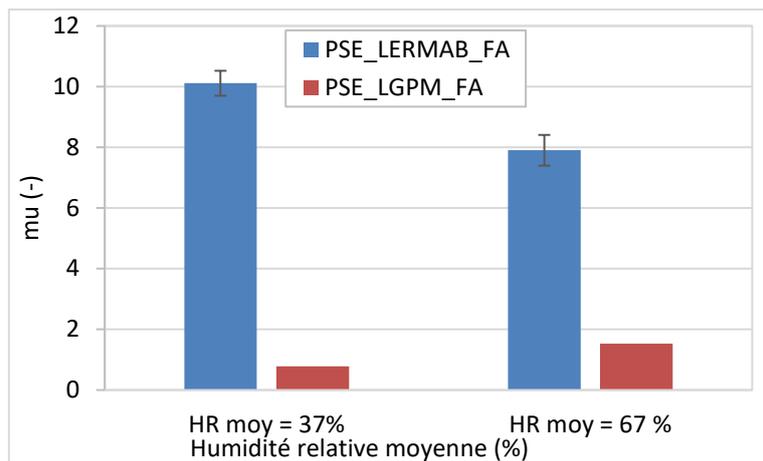


Figure III-68. Comparaison du facteur de résistance du PSE

III.12. LAINE DE BOIS

III.12.1. Isothermes de sorption

a) Isothermes d'enveloppe à 25°C

Un prélèvement a été mesuré au LGPM. Le Tableau III-80 récapitule les résultats de l'isotherme d'enveloppe obtenu sur la laine de bois par le LGPM.

Ads 1	HR (%)	15	30	45	60	75	90
	W (%)	3,528	5,56	7,256	8,833	11,102	16,675
Des 1	HR (%)	15	30	45	60	75	90
	W (%)	4,464	6,666	8,893	10,91	13,409	16,675

Tableau III-80. Valeurs d'isotherme mesurées par DVS au LGPM pour la laine de bois

La Figure III-69 montre graphiquement l'isotherme de sorption de la laine de bois mesurée par DVS au LGPM.

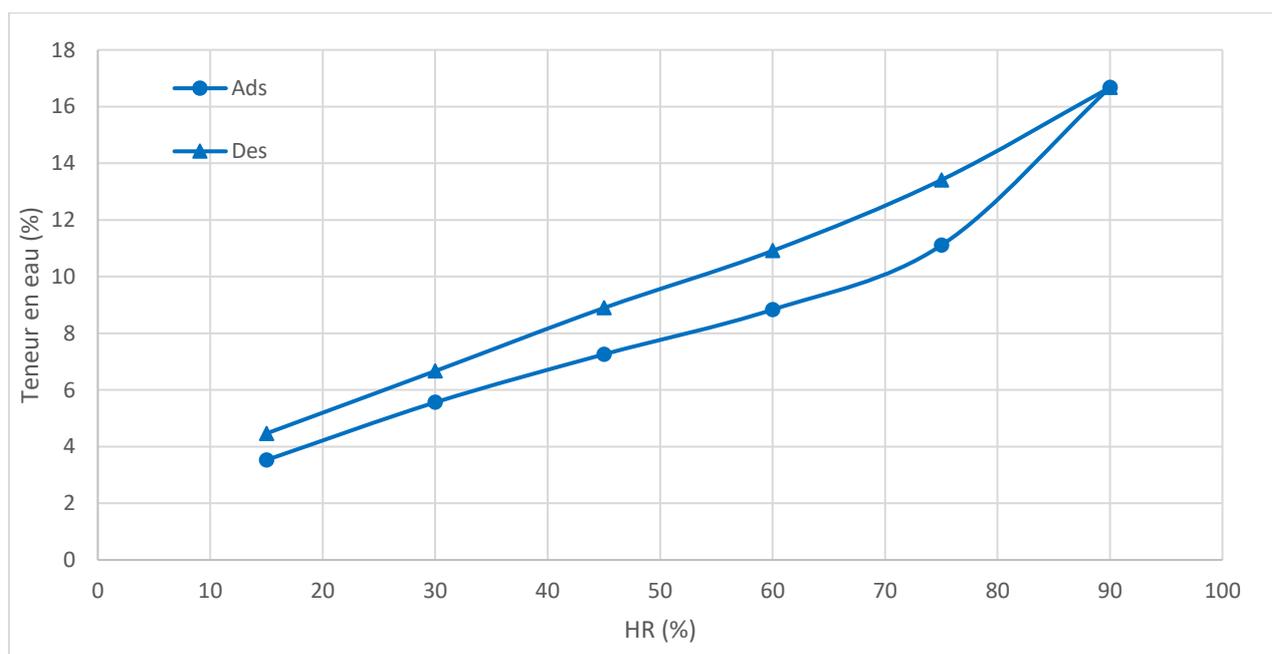


Figure III-69. Courbes des isothermes mesurées par DVS au LGPM pour la laine de bois

Par ailleurs, les paramètres du modèle HH pour la courbe enveloppe ont été également calculés pour ce prélèvement.

		Paramètres du modèle Hailwood-Horrobin HH							
		sorption				desorption			
Laine de bois	HH_a	HH_b	HH_c	HH_RMSE	HH_a	HH_b	HH_c	HH_RMSE	
		1,70E+00	1,73E+0 1	1,46E+0 1	2,90E-03	1,70E+00	1,73E+0 1	1,46E+0 1	2,90E-03
	Paramètres du modèle GAB								
	GAB_M m	GAB_C	GAB_K	GAB_RMS E	GAB_M m	GAB_C	GAB_K	GAB_RMS E	
	5,00E-02	1,50E+0 1	7,84E-01	2,90E-03	8,20E-02	9,45E+0 0	6,09E-01	7,10E-04	

Tableau III-81. Paramètres des modèles des valeurs d'isothermes mesurées par DVS au LGPM pour la laine de bois

b) Isothermes intermédiaires

Le Tableau III-82 présente les résultats des boucles d'isothermes intermédiaires obtenus par le LGPM sur la laine de bois.

Ads 1	HR (%)	15	30	45	60	75	90
	W (%)	3,528	5,56	7,256	8,833	11,102	16,675
Des 1	HR (%)	15	30	45	60	75	90
	W (%)	4,464	6,666	8,893	10,91	13,409	16,675
Ads 2	HR (%)	15	30	45	60	75	90
	W (%)	3,3	5,223	7,08	8,986		
Des 2	HR (%)	15	30	45	60		
	W (%)	3,815	5,989	7,338	8,986		

Tableau III-82. Isothermes intermédiaires mesurées par DVS au LGPM pour la laine de bois

La Figure III-70 présente la forme graphique des isothermes intermédiaires de la liane de bois mesurées par DVS au LGPM.

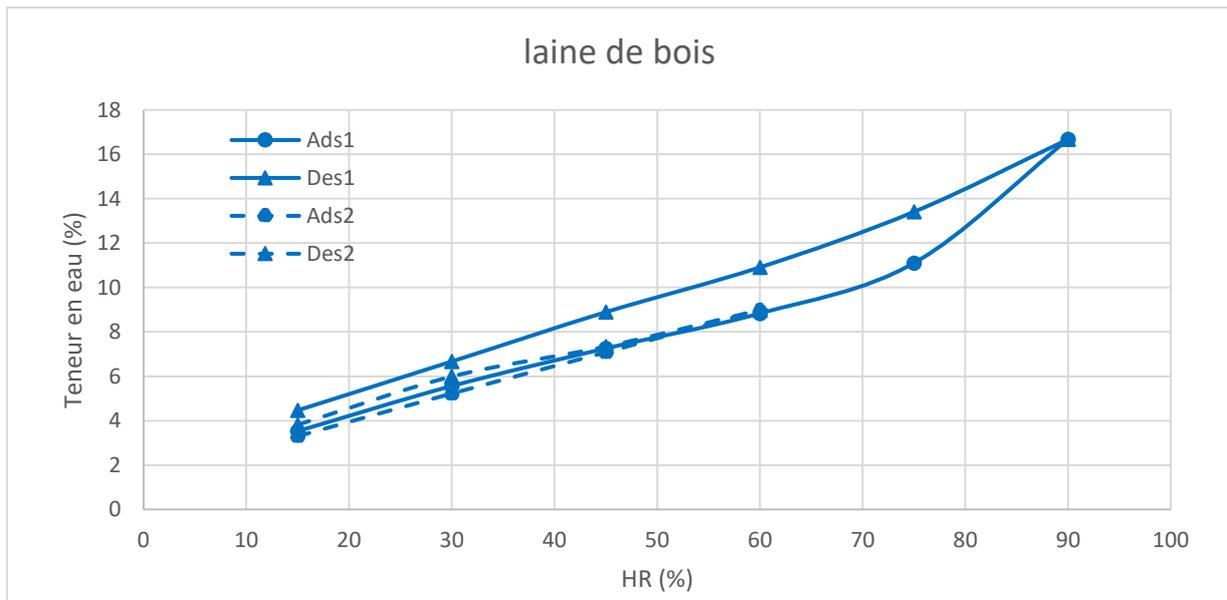


Figure III-70. Isothermes intermédiaires mesurées par DVS au LGPM pour la laine de bois

III.12.2. Coefficient de diffusion

Le facteur de résistance à la diffusion $\bar{\mu}$ d'un panneau de fibres du bois a été mesuré par la méthode FA. Les valeurs présentées par LERMAB et LGPM sont très proches alors que celles du LOCIE sont beaucoup plus faibles et n'ont pas été retenues dans l'inter comparaison des résultats.

Le $\bar{\mu}$ de la laine de bois est d'environ 1.5 ± 0.1 pour une HR moyenne de 37% et de 0.8 ± 0.1 pour une HR moyenne de 67%. Cette dernière valeur inférieure à 1 peut paraître surprenante. Plusieurs travaux antérieurs menés au LGPM et au LERMAB ont révélés les mécanismes de diffusion double échelle dans ces panneaux de fibres végétales conduisant à sous-estimer le coefficient de diffusion en régime transitoire. En régime permanent, les fibres sont en équilibre avec le flux de vapeur traversant le matériau à travers les vides interconnectés. En revanche au cours des essais de sorption, la diffusion intrafibre peut contribuer à réduire le flux de vapeur traversant l'échantillon. La prise en compte de ce mécanisme qui échappe à la loi de Fick a été modélisé avec succès dans Challansonnet et al. (2019).

Fibre de bois	Méthode	Mu moyen (-)		Densité (kg/m ³)
		Sec (37% RH)	Humide (65% RH)	
LERMAB	FA	1.56 ± 0.3	0.73 ± 0.1	170 ± 3
LGPM	FA	1.41	0.93	...
LOCIE	FA	0.66	0.02	...
inter-labo		1.48 ± 0.1	0.8 ± 0.1	
WUFI		3		140

Tableau III-83. Facteur de résistance à la diffusion et densité du fibre de bois

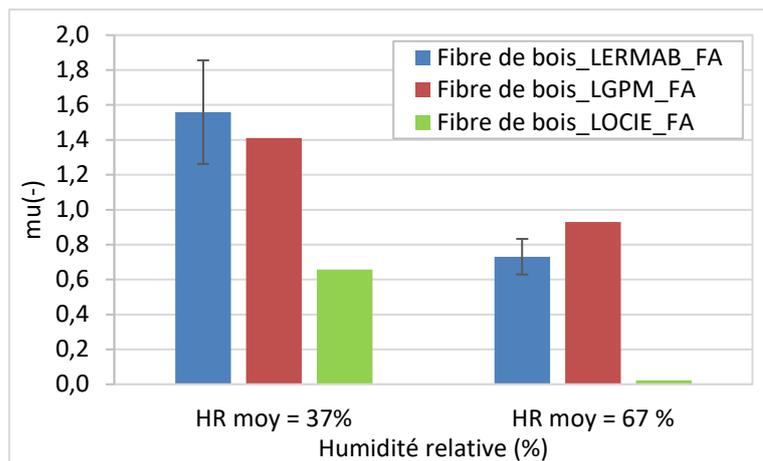


Figure III-71. Comparaison du facteur de résistance à la diffusion de la laine de bois

III.13. Analyse des mesures de perméabilité (tous les matériaux)

III.13.1. Rappels sur la notion de perméabilité (adapté de ³)

La perméabilité à un liquide ou à un gaz traduit sa plus ou moins grande aptitude à se laisser traverser par le fluide (liquide ou gaz) sous l'effet d'un gradient de pression (différence de pression divisée par la longueur traversée, exprimée en Pa/m). Ce phénomène est schématisé sur la Figure III-72.

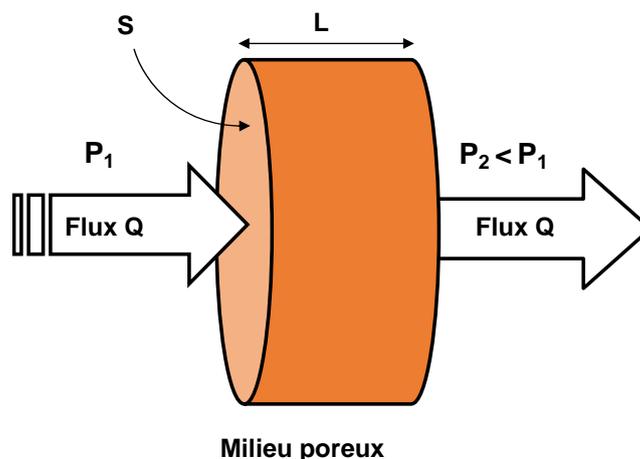


Figure III-72. Perméabilité : faculté d'un milieu poreux à laisser passer un fluide en réponse à un gradient de pression.

Les travaux de Darcy sur les fontaines de Dijon (Darcy, 1856) ont montré que pour de faibles vitesses d'écoulement, il y a proportionnalité entre débit et différence de pression appliquée de part et d'autre du milieu considéré :

$$\frac{QL}{S\Delta P} = \text{constante} \quad (17)$$

³ Perré P. et Colin J., Transferts couplés de masse et de chaleur, notes de cours, CentraleSupélec, 2021.

En fait, l'écoulement dépend à la fois de la viscosité du fluide et de la morphologie du milieu poreux. L'expression actuelle de la loi de Darcy distingue des deux effets, ce qui permet de définir la perméabilité spécifique ou intrinsèque :

$$\vec{u} = -\frac{K}{\mu} \text{grad}P \quad (18)$$

μ est la viscosité dynamique du fluide (Pa.s), \vec{u} la vitesse macroscopique du fluide (m/s), K la perméabilité spécifique ou intrinsèque du milieu poreux considéré (m^2) et P la pression du fluide (Pa).

Afin de mieux réaliser l'effet de la morphologie des pores sur la valeur de la perméabilité K , le milieu poreux peut être représenté schématiquement par un faisceau de tubes de rayon moyen $\langle r \rangle$ placés en parallèle. La porosité du milieu poreux permet de savoir le nombre de tels tubes par unité de surface sur la section orthogonale au gradient de pression. On définit également la tortuosité τ comme le rapport au carré entre la longueur du cheminement le long du tube ℓ à la longueur macroscopique le long du gradient de pression L :

$$\tau = \left(\frac{\ell}{L} \right)^2 \quad (19)$$

Pour parvenir à la grandeur perméabilité, nous devons utiliser la formule donnant le débit d'un fluide newtonien dans un tube cylindrique soumis à un gradient de pression en régime laminaire (écoulement de Poiseuille) :

$$Q = \frac{\pi D^4 \Delta P}{128\mu L} \quad (20)$$

Tous calculs faits et par identification, nous obtenons la formule suivante pour la perméabilité intrinsèque de ce milieu modèle :

$$K = \frac{\varepsilon}{\tau} \left(\frac{\langle r \rangle^2}{8} \right) \quad (21)$$

L'équation ci-dessus nous apprend que la perméabilité est proportionnelle à la porosité (qui donne le nombre de tubes par unité de surface) et inversement proportionnelle à la tortuosité (le rapport de longueur intervient au carré car, d'une part, il allonge le parcours et, d'autre part, réduit le gradient de pression sur le parcours). Le rayon moyen $\langle r \rangle$ intervient au carré. En effet, le débit dans un tube est proportionnel au rayon puissance 4 (loi de Poiseuille) mais le nombre de tubes par unité de surface est proportionnel au rayon au carré.

Même si cette relation s'applique à un milieu idéal, les termes de l'équation restent valables en pratique. En particulier, l'effet de la taille des pores, qui intervient au carré, donne une tendance bien observée en pratique : la perméabilité décroît fortement quand on passe du gravier ($\approx 10^{-9} m^2$), au sable grossier ($\approx 10^{-12} m^2$), au sable fin ($\approx 10^{-15} m^2$) puis à l'argile ($< 10^{-19} m^2$). Pour les milieux granulaires, la taille des pores est liée à la taille des grains. Cela a permis à Kozeny-Carman de proposer une formule semi-empirique largement utilisée pour avoir des

ordres de grandeurs. Pour des grains sphériques de diamètre d , la relation suivante est proposée⁴ :

$$K = \frac{\varepsilon^3 d^2}{180 (1 - \varepsilon^2)} \quad (22)$$

La perméabilité est une grandeur directionnelle : la valeur peut dépendre de la direction selon laquelle la mesure est effectuée. De façon rigoureuse, la perméabilité K de l'équation de Darcy devrait être un tenseur d'ordre 2. Dans le cas du bois, les directions matérielles sont connues et l'on peut parler de perméabilité intrinsèque dans chacune de ces directions. En se rappelant que, dans l'arbre, le bois permet la migration de la sève brute, il n'est pas surprenant de constater que le bois est toujours plus beaucoup plus perméable dans la direction longitudinale. Les rapports constatés entre perméabilité axiale et perméabilité dans le plan transverse vont de plusieurs milliers pour les résineux qui n'ont pas d'éléments spécifiques pour le flux de sève à des centaines de milliers, voire des millions pour le feuillus, très efficaces dans la direction axiale grâce à leurs vaisseaux. Les records sont logiquement trouvés chez les feuillus à zone initiale poreuse. Les rapports constatés sont plus faibles dans le duramen, notamment parce que le bois de cœur est généralement beaucoup moins perméable dans la direction axiale.

Il faut savoir que de tels rapports d'anisotropie sont exceptionnels en sciences des matériaux et rendent assez délicat la mesure en direction transverse, celle qui intéresse la thermique du bâtiment.

La perméabilité intrinsèque est définie avec la présence d'une seule phase fluide dans le milieu poreux (pleine saturation ou milieu complètement sec). Cela est bien différent avec un milieu partiellement saturé d'eau. Dans ce cas, la loi de Darcy est généralisée grâce au concept de perméabilité relative.

III.13.2. Synthèse des mesures

Trois laboratoires ont effectué des mesures de perméabilité dans ce projet Smart-Réno (LaSIE, LERMAB et LGPM). L'ensemble des données disponibles sont regroupées dans le Tableau III-84). Seules les moyennes ont été reprises dans ce tableau synthétique, en mentionnant tout de même le nombre de mesures disponibles pour faire ces moyennes. Les formules proposées en III.13.1. montrent la très grande dépendance de la valeur de perméabilité en fonction de la taille moyenne des pores. Sachant que c'est la taille des pores connectés, et sur ces cheminement continus la taille des plus petits pores rencontrés qui comptent. S'ajoutent à la taille des pores des paramètres morphologiques globaux comme la porosité et la tortuosité. In fine, il est bien connu que la perméabilité des milieux poreux peut d'étaler sur de nombreuses décades. Pour l'ensemble des matériaux testés ici, la perméabilité mesurée varie de $4 \cdot 10^{-13}$ à moins de 10^{-20}

⁴ Schulz, R., Ray, N., Zech, S., Rupp, A., & Knabner, P. (2019). Beyond Kozeny–Carman: predicting the permeability in porous media. *Transport in Porous Media*, 130(2), 487-512.

m², soit une gamme de 7 décades. Et encore, aucun des matériaux testés n'est très perméable (cf. les ordres de grandeurs donnés en section III.13.1. , par exemple 10⁻⁹ m² pour du gravier).

C'est aussi pour cette raison que les valeurs du Tableau III-84 se limite à deux chiffres significatifs. La répartition initiale des échantillons était destinée à avoir au moins deux laboratoires impliqués pour chaque matériau, de façon à pouvoir comparer les mesures. Cela est respecté en fin de projet sauf pour le béton cellulaire et la pierre dure. Ce n'est pas un problème pour le béton cellulaire, bien connu par ailleurs et pour lequel les mesures sont en bon accord avec la littérature. Cela est plus ennuyeux pour la pierre dure car le LGPM n'a pas réussi à détecter le moindre flux sur un temps de relaxation de 8 heures.

Matériaux	LERMAB		LaSIE		LGPM	
	Moyenne	Nombre échantillons	Moyenne	Nombre échantillons	Moyenne	Nombre échantillons
Argilus	3.8.10 ⁻¹⁴	3			6.7.10 ⁻¹⁴	2
Béton cellulaire					4.8.10 ⁻¹³	3
Chêne L	1.7.10 ⁻¹⁵	1				
Chêne R	1.9.10 ⁻¹⁹	3	5.2.10 ⁻¹⁶	1	8.3.10 ⁻²⁰	2
OSB	6.8.10 ⁻¹⁴	4	5.7.10 ⁻¹⁵	1	6.2.10 ⁻¹⁴	3
Pare-pluie	1.5.10 ⁻²⁰	3			4.4.10 ⁻¹⁶	3 ⁽¹⁾
Pierre dure					< 10 ⁻²⁰	1 ⁽²⁾
Pierre tendre			6.6.10 ⁻¹⁵	1	4.9.10 ⁻¹⁴	2
Terre crue	8.9.10 ⁻¹⁴	3	7.7.10 ⁻¹⁵	1	4.1.10 ⁻¹⁴	1
Terre cuite	4.9.10 ⁻¹⁷	4			5.1.10 ⁻¹⁷	2 ⁽³⁾
Torchis	4.1.10 ⁻¹³	3	6.5.10 ⁻¹⁵	1	7.5.10 ⁻¹³	1

⁽¹⁾ Assez grande dispersion des 3 mesures

⁽²⁾ Pas de débit de gaz détecté sur 8 heures de manip. Perméabilité inférieure à la limite de détection

⁽³⁾ Dont un échantillon fissuré non pris en compte

Tableau III-84. Synthèse des mesures effectuées par les trois laboratoires (perméabilités gazeuses en m²).

Lorsque les mesures sont disponibles sur au moins deux laboratoires, les ordres de grandeurs sont tout à fait cohérents entre les laboratoires LERMAB et LGPM, ce qui donne une bonne fiabilité car ces laboratoires utilisent des dispositifs expérimentaux originaux et basés sur des principes différents. Les répétitions effectuées au LERMAB sont remarquablement proches, même pour le bois réputé par sa très grande variabilité biologique, même au sein du même arbre.

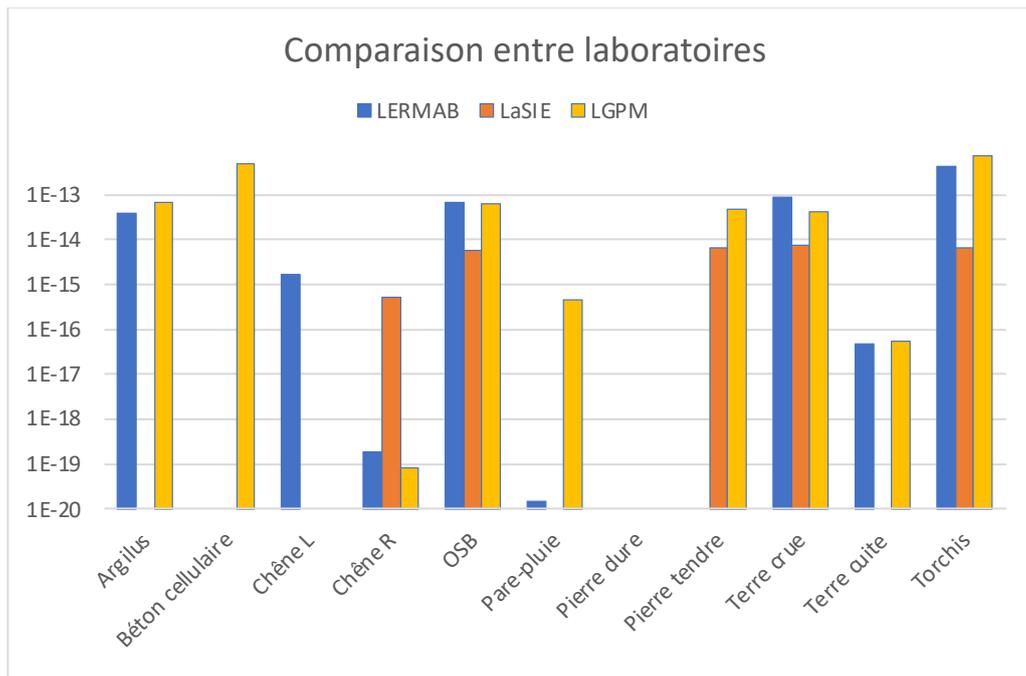


Figure III-73. Mesure de perméabilité gazeuse : valeurs obtenues pour les matériaux du projet Smart-Réno et pour l'ensemble des laboratoires impliqués.

En revanche, les mesures effectuées au LaSIE semblent incohérentes, parfois de plusieurs ordres de grandeur (Figure III-73). Par exemple, pour le chêne en direction radiale, nous avons dans l'ordre croissant : $8.3 \cdot 10^{-20}$, $1.9 \cdot 10^{-19}$ et $5.2 \cdot 10^{-16}$ m², respectivement pour LGPM, LERMAB et LaSIE. Soit un facteur 2 entre les deux premières mesures et presque 4 décades entre les valeurs extrêmes. Pour les autres matériaux, les mesures LaSIE sont au contraire plus faibles que les autres mesures, d'un facteur de 10 à 100. D'ailleurs, les mesures effectuées au LaSIE ne portent que sur un échantillon par matériau et présentent une gamme de valeurs bien plus faible que pour les 2 autres laboratoires : un facteur 10 seulement, entre $5 \cdot 10^{-15}$ et $5 \cdot 10^{-16}$ m².

Face à ce constat, il a été décidé de ne pas prendre en compte les mesures du LaSIE pour la suite de l'analyse.

III.13.3. Analyse des mesures

Les valeurs validées ont été utilisées pour calculer les valeurs moyennes pour chaque matériau, en utilisant le nombre d'échantillons par laboratoire comme pondération pour le calcul de ces moyennes. Pour éviter de doubler ce graphe par un tableau, les valeurs numériques ont été ajoutées sur les barres de l'historgramme. Deux valeurs ont été différenciées par un fond plus clair :

- Le pare-pluie car les mesures disponibles ne sont pas cohérentes entre LERMAB et LGPM
- La pierre dure, pour rappeler que la valeur de $1 \cdot 10^{-20}$ m² n'est pas une mesure mais une valeur maxi qui correspond au seuil de détection du dispositif expérimental.

L'historgramme, présenté en échelle log, montre la très grande disparité de la perméabilité en fonction du type de matériau. Béton cellulaire et torchis sont les échantillons les plus

perméables parmi les matériaux testés, avec une valeur proche de 5.10^{-13} m^2 . A noter que cela reste assez faible comme valeur de perméabilité par rapport à certains matériaux de construction (5.10^{-13} m^2 pour un panneau de fibre de bois de 156 kg/m^3 par exemple⁵). Vient ensuite un groupe de matériaux dans une gamme étroite de $5 \text{ à } 8.10^{-14} \text{ m}^2$: Argilus, OSB, Pierre tendre et terre crue. La terre cuite (5.10^{-17} m^2) est 1000 fois moins perméable que la terre crue !

Enfin le chêne confirme les connaissances sur le bois : il est très fortement anisotrope. Spécificité du chêne par rapport à d'autres essences de bois : il est très peu perméable même en direction longitudinale, direction pourtant structurée pour conduire la sève brute. Cela est dû au développement de tylose dans les gros vaisseaux de la zone initiale poreuse, caractère bien connu des espèces de chêne utilisées en tonnellerie.

Il a déjà été dit que la valeur de la pierre dure n'est pas une véritable mesure. Cependant, à ce niveau de perméabilité, la pierre dure doit être considérée comme imperméable pour les simulations en bâtiment.

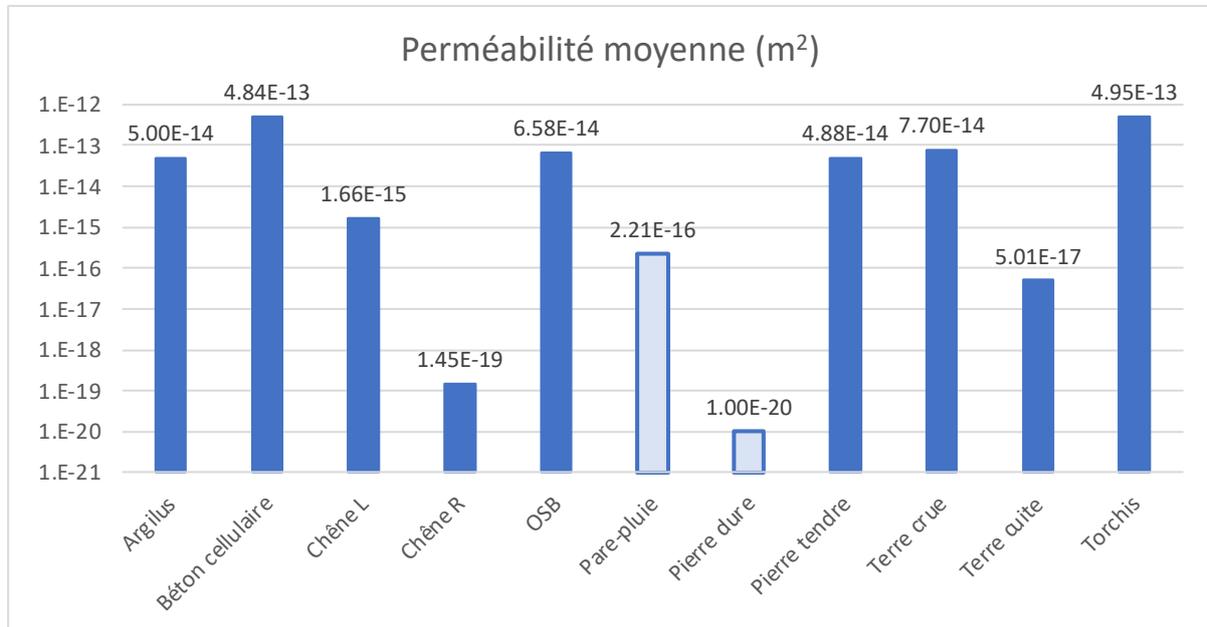


Figure III-74. Mesure de perméabilité gazeuse : valeurs moyennes validées après analyse des résultats. Les moyennes ont été pondérées par le nombre d'échantillons.

Afin de prolonger l'analyse, les mêmes valeurs ont été tracées en fonction de la fraction volumique de la phase solide. Cette fraction a été évaluée à partir des masses volumiques des échantillons et en estimant simplement la masse volumique de la fraction solide. Cela permet de dégager une tendance générale en dépit de la forte dispersion : la perméabilité tend à diminuer quand la fraction solide tend vers 1. Des courbes ont aussi été ajoutées en utilisant l'équation de Kozeny-Carman (équation 4) pour différentes valeurs de taille de particule, en se

⁵ Ai W., Duval H., Pierre F., Perré P., 2017 – A novel device to measure gaseous permeability over a wide range of pressures: characterisation of slip flow for Norway spruce, European beech and wood-based materials, *Holzforschung*, 71: 147-162.

rappelant que cette équation est une version qui ne prend pas en compte la tortuosité (qui peut être ajoutée comme dans l'équation 3).

Béton cellulaire, OSB, pierre tendre et pierre dure sont pratiquement sur la courbe $d = 10 \mu\text{m}$. Mentionnons ici que définir une taille moyenne revient à quantifier la taille des plus petits pores nécessaires à un cheminement continu à travers le milieu poreux. Torchis, Argilus, et terre crue restent relativement proches de la même courbe. La terre cuite est bien en-dessous, entre les courbes $1 \mu\text{m}$ et 100nm , ce qui démontre des pores connectés par de très petits (ou très rares) passages. Le chêne mériterait une analyse plus poussée prenant en compte la différence de tortuosité en selon la direction de migration.

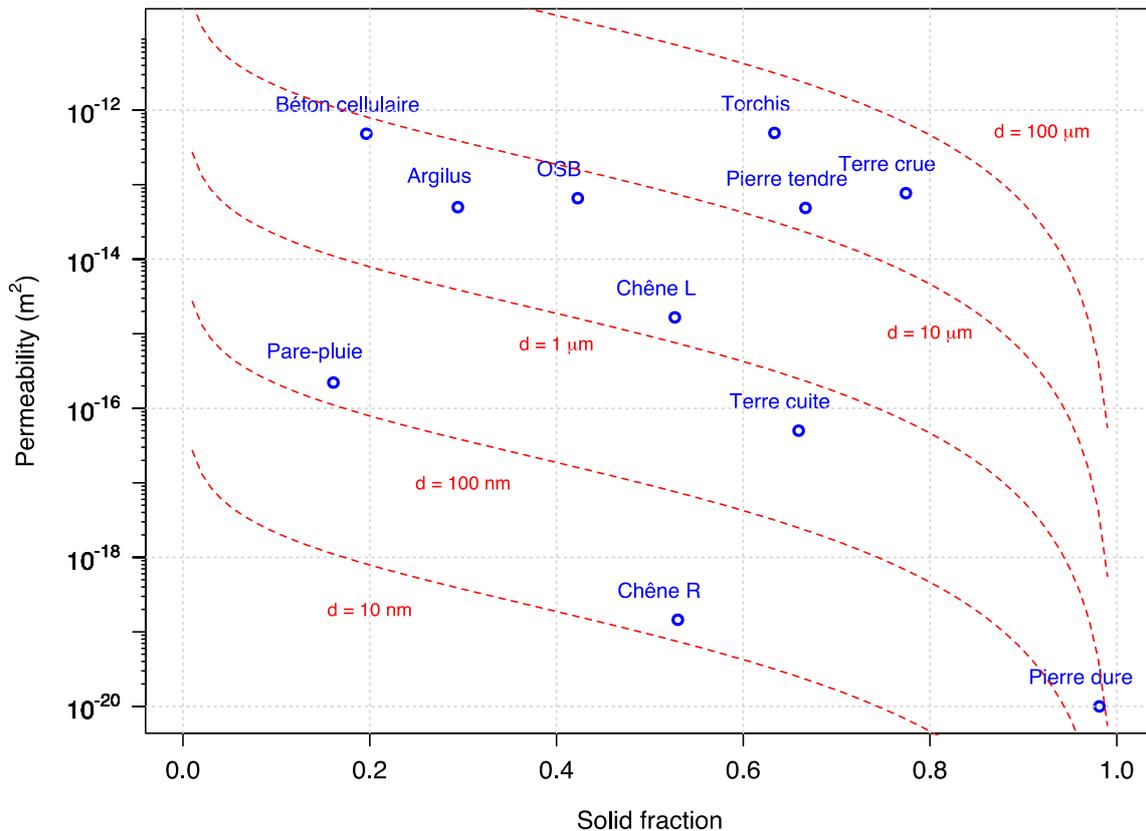


Figure III-75. Graphique de synthèse montrant les valeurs de perméabilité en fonction de la fraction solide du milieu poreux. Les isovaleurs obtenues avec la formule de Kozeny-Carman pour une gamme de diamètre de pore est superposées aux valeurs expérimentales.

IV. Conclusions

IV.1. Isothermes de sorption

IV.1.1. Comparaison des méthodes

Le Tableau IV-1 récapitule les méthodes utilisées pour l'analyses des isothermes de sorption.

	LaSIE	LERMAB	LGPM	LOCIE
Terre cuite	Mano+DVS	DVS		
Terre crue		DVS	DVS	ATG
Pierre dure	Mano+DVS		DVS	
Pierre tendre			DVS	

Torchis	Mano+DVS	VGA		
OSB		VGA	DVS	
Argilus	Mano+DVS	DVS	DVS	
Pare pluie	Mano+DVS	DVS		
Bois ancien		DVS	DVS	
Béton cellulaire			DVS	
Polystyrène				
Laine de bois			DVS	

Tableau IV-1. Matériaux et méthodes utilisées pour l'analyse des isothermes de sorption (mano = méthode manométrique, DVS et VGA : méthode gravimétrique)

Les analyses varient sur la méthode de mesure et au sein d'une même méthode, le protocole est lui-même différent, notamment sur le critère de stabilité ou sur la taille des prélèvements :

- Au LaSIE : en manométrique, la taille des échantillons est de l'ordre de 1 cm³ et représente donc globalement 1 à 2 g. Pour le DVS, le prélèvement est de l'ordre de 2 à 6 g.
- Au LERMAB : le prélèvement est de l'ordre de 0.05g pour le DVS alors qu'il est de 100 g pour le VGA
- Au LGPM : l'échantillon mesure jusqu'à 1 g.
- Au LOCIE : la mesure d'ATG a été réalisée sur des échantillons de 0.1 g

Si on tient compte des différentes méthodes et de la taille des prélèvements qui peuvent varier, les résultats inter-laboratoires sont globalement cohérents sauf :

- La terre cuite pour laquelle un seul prélèvement de manométrie est reproductible entre le LERMAB et le LaSIE. Cela peut être dû à l'hétérogénéité du produit.
- Terre crue pour laquelle un écart des isothermes peut être noté bien que la méthode inter laboratoire soit la même. Il faut noter cependant que le prélèvement varie d'un facteur de 20 entre le LERMAB et le LGPM.

Par ailleurs, la méthode de l'ATG n'a pas été retenue car présentant trop d'instabilité.

IV.1.2. Comparaison des matériaux

Les valeurs maximales de teneur en eau sont difficiles à comparer car l'humidité relative maximale n'est pas la même pour toutes les analyses. Nous avons donc comparé les matériaux entre eux en se basant sur leur isotherme d'adsorption regroupées dans la Figure IV-1.

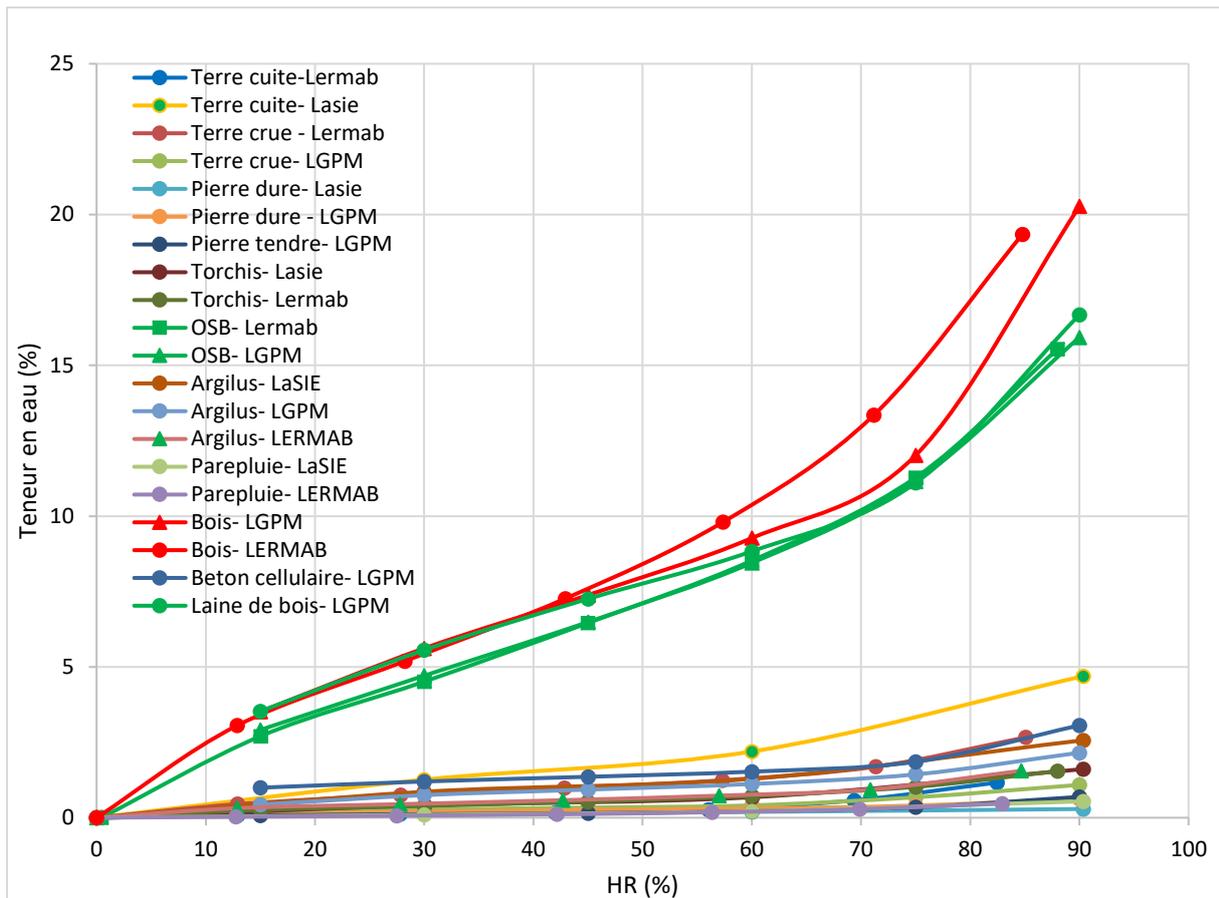


Figure IV-1. Isothermes d'adsorption des matériaux étudiés.

La comparaison des courbes d'adsorption permet de valider en inter-laboratoire le comportement des matériaux hygroscopiques, à savoir : le bois, la laine de bois et l'OSB. Les autres matériaux ont quant à eux des valeurs de teneur en eau inférieures à 5 % pour 80 % d'humidité relative et sont donc peu hygroscopiques.

Pour les matériaux peu hygroscopiques, les isothermes sont détaillées dans la Figure IV-2.

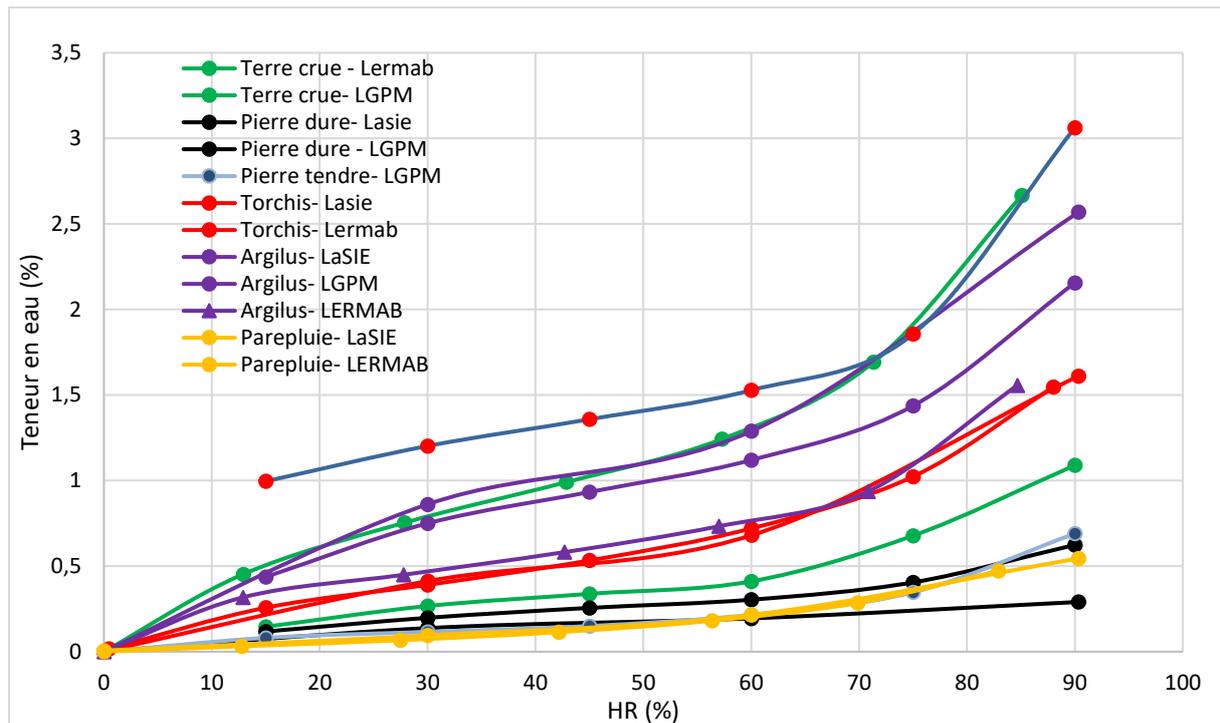


Figure IV-2. Isothermes d'adsorption des matériaux peu hygroscopiques

En tenant compte des disparités entre les mesures inter-laboratoires, nous pouvons quand même voir que le béton cellulaire a une courbe d'absorption supérieure aux autres matériaux. Viennent ensuite dans l'ordre d'une diminution de la courbe d'adsorption : l'argilus puis le torchis et enfin les matériaux très peu hygroscopiques (<1% de teneur en eau) tels que la pierre tendre, la pierre dure et le pare-pluie. La terre cuite et la terre crue présentant un écart de mesure inter laboratoire n'ont pas été classées.

IV.1.3. Effet de la température sur les isothermes de sorption

Il ne peut pas être fait d'exploitation des courbes d'isothermes de sorption à différentes températures. Les résultats obtenus sont en effet dans la marge de répétition effectuée sur les 2 prélèvements en manométrie. Les résultats auraient peut-être été plus significatifs sur des matériaux plus hygroscopiques.

IV.2. Coefficient de diffusion

IV.2.1. Effet de la méthode CS. Vs. FA

Nous ne reviendrons pas sur la méthode CS, méthode normée et dont les biais ont été présentés par exemple dans Duforestel (2015). La méthode en régime transitoire FA a été, quant à elle, présentée dans Perré et al. (2015). Elle permet de réduire la durée de l'essai de façon significative. Pour du bois massif, Challansonnex (2019) a par exemple montré que la méthode FA permettait la mesure du coefficient de diffusion en 2 jours contre plus de 15 jours habituellement pour la méthode CS avec une erreur relative inférieure à 10%. Ce gain de temps n'a pas pu être utilisé dans ce projet car l'étude de l'effet de l'humidité sur $\bar{\mu}$ a nécessité d'attendre l'équilibre hygroscopique à chaque palier d'HR. Nous avons également observé dans ce projet que la valeur mesurée par FA pour l'isolant de fibre de bois est très inférieure à

celle mesurée en CS en régime permanent, notamment à plus haute HR. Elle a même une valeur non-physique (inférieur à 1, ie à celle de l'air). Le matériau n'obéit donc plus à la loi de diffusion classique, la loi de Fick, en raison de l'absence d'équilibre thermodynamique à l'échelle local (Challansonnex 2019). Nous avons vu également que cette méthode FA était très sensible aux valeurs entrées dans le modèle pour la densité du matériau et les humidités d'équilibre de chaque palier de HR (isotherme de sorption). Si on augmente par l'isotherme ou la densité le Δm_{eau} adsorbé sur l'épaisseur du matériau et sur l'échelon de HR_{face} avant, alors le code devra réduire $\bar{\mu}$ pour venir coller à la courbe expérimentale de HR en face arrière. Ceci est une des causes des différences observées entre les laboratoires pour les mesures par FA. A titre d'exemple, la Figure IV-3 montre l'impact d'un petit changement d'isotherme de sorption du béton cellulaire, matériau peu hygroscopique, sur la valeur $\bar{\mu}$ identifiée.

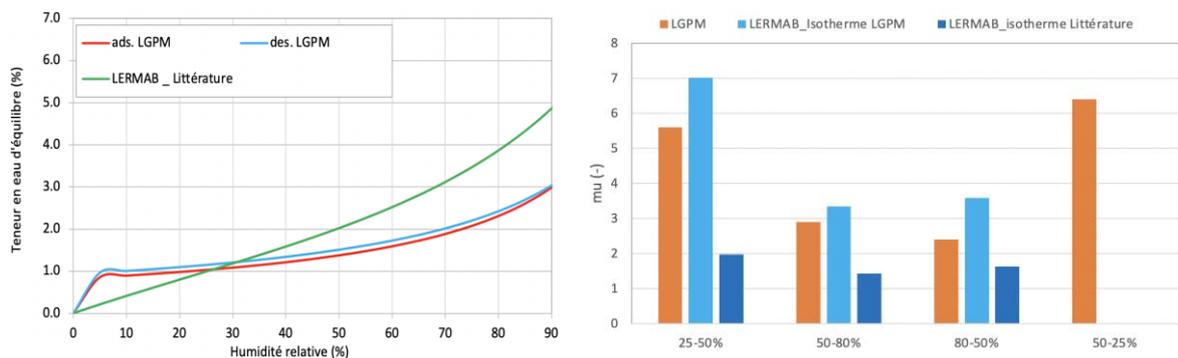


Figure IV-3. Exemple de l'impact d'une variation de l'isotherme de sorption sur la valeur $\bar{\mu}$ du coefficient identifié pour le béton cellulaire

IV.2.2. Effet du matériau

Les matériaux caractérisés dans ce projet sont fibreux, granulaires, homogène ou hétérogène, hygroscopique ou non,.... Pour la diffusion, la phase conductrice au sein du milieu poreux étant l'air, le facteur de résistance à la diffusion est relativement bien corrélé à la fraction massique de solide (Figure IV-4). Deux matériaux sortent de cette tendance, l'EPS et le bois de chêne. Pour ce dernier, des tyllés viennent obstruer les voies de passage dans les gros vaisseaux de la zone initiale poreuse, augmentant drastiquement la tortuosité du cheminement du flux de vapeur au sein du milieu poreux. Lorsque le bois est humide, la résistance à la diffusion des parois cellulaires est moindre et la diffusion sous forme d'eau liée à travers les parois cellulaire contribue à augmenter le flux traversant l'échantillon pour un gradient de pression de vapeur donné (Figure IV-4b).

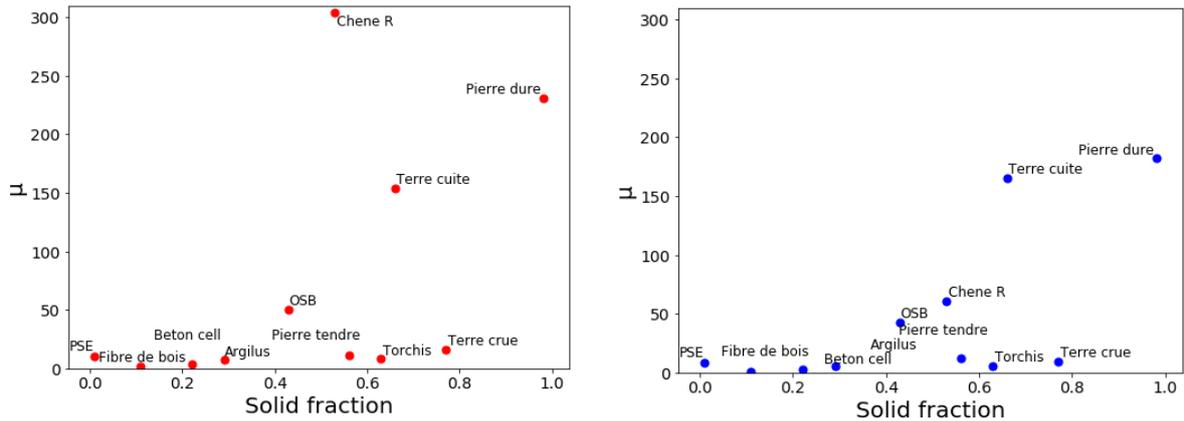


Figure IV-4. Valeurs $\bar{\mu}$ en fonction de la fraction solide des matériaux de cette étude, avec à gauches le $\bar{\mu}$ sec et à droite le $\bar{\mu}$ humide.

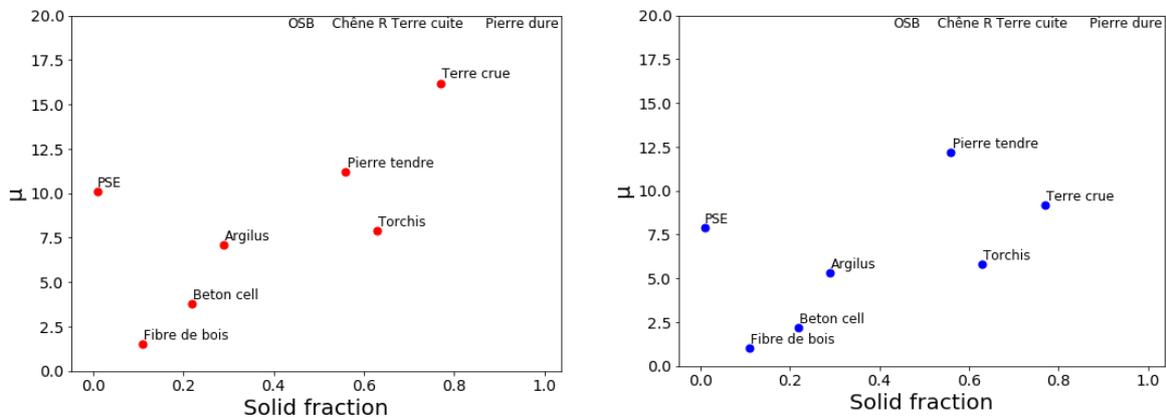


Figure IV-5. Zoom de la Figure IV-4.

IV.2.3. Autres effets

a) Effet de l'HR

Les essais menés, en CS ou FA, ont montré une dépendance de $\bar{\mu}$ avec l'humidité pour le chêne, l'OSB, la terre crue, le béton cellulaire, le panneau de fibres de bois et le torchis. Cette dépendance semble absente ou faible pour le PSE, la pierre dure et l'argilus, le pare-pluie, la pierre tendre, la terre cuite. Certaines tendances sont néanmoins contradictoires pour une même méthode et entre les laboratoires (par exemple pour le béton cellulaire).

b) Effet du sens de variation adsorption-désorption pour FA

Il est difficile de conclure sur l'effet du sens de variation de la sorption lors de l'essai FA, une analyse plus fine avec des essais complémentaires est nécessaire. La dépendance de $\bar{\mu}$ avec l'humidité conduit dans un sens à aller de plus en plus vite vers l'équilibre et dans l'autre à un équilibre fuyant. Ainsi, considérer $\bar{\mu}$ constant sur l'échelon est probablement une hypothèse plus difficile pour l'identification en désorption. A cela s'ajoute l'hystérésis de l'isotherme de sorption, qui doit être prise en compte par les modèles alors que parfois une courbe unique a été utilisée par les laboratoires.

c) Effet du sens du flux pour CS

Concernant le sens du flux de vapeur pour la méthode CS, les résultats du LaSIE et de TIPEE ne donnent pas la même tendance (Tableau IV-2 et Tableau IV-3).

- Pour les faibles HR, les résultats du LASIE (menés avec des HR 22% -57%) montrent que $\bar{\mu}_{ext \rightarrow int} > \bar{\mu}_{int \rightarrow ext}$
- Pour les hautes HR, les résultats du LASIE (menés avec des HR 57%-93%) montrent une tendance inverse $\bar{\mu}_{int \rightarrow ext} > \bar{\mu}_{ext \rightarrow int}$

La tendance est marquée pour le LASIE et faible ou absente pour TIPEE.

Cet effet semble disparaître pour les essais du LASIE sur une plage étendue (22%-93%).

HRint (%) - HRext	Terre cuite	Terre crue	Torchis	Pierre tendre
22%-57%	133 ±91	24±0.17	16.7±0.06	20.4±4.63
57%-22%	74.6±69.67	17.8±0.06	8.9±1.8	14.5±2.53
57%-93%	65.1	6.5±0.04	4.3±0.56	13.24±4.34
93%-57%	125.1±55.8	17.3±0.02	14.2±0.06	12.95±2.31
22%-93%	121.77±84.9	18.1±0.05	15.38±0.05	10.73±4.3
93%-22%	226.42±69.9	20.92±0.26	15.7±0.14	13.4±0.84

Tableau IV-2. Effet du sens de la diffusion de la vapeur sur la perméabilité à la vapeur (LASIE)

HRint (%) - HRext	Terre cuite	Terre crue	Pierre dure	Torchis	OSB	Argilus	Pare pluie
50%-11%	252±63	15±1	349±17	7±0.1	35±6.8	6.9±0.2	833±151
11%-50%	254±109	18±1	402±6	9.7±0.2	...	8±0.2	974±72
85%-50%	455±226	13±0	466±138	7.7±0.5	140±1	6.4±0.1	860±99
50%-85%	367±92	13±0	332±60	9.2±0.4	58±7	9.1±0.2	763±142

Tableau IV-3. Effet du sens de la diffusion de la vapeur sur la perméabilité à la vapeur (TIPEE)

IV.3. Caractéristiques thermiques

Un récapitulatif de tous les résultats de densité, conductivité thermique, et chaleur spécifique obtenus à LOCIE, LERMAB et LASIE déjà présentés dans le rapport, et une comparaison avec des valeurs trouvées dans la littérature, se trouvent respectivement dans le Tableau IV-4, Tableau IV-5 et Tableau IV-6 :

Matériaux	Densité moyenne (kg/m ³)			
	LOCIE	LERMAB	LASIE	Littérature
Argilus	816	841	880.4	
Terre Cuite	1736	1736	1752.5	1700-1800 [1,2]
Torchis	1605	1698	1835.4	1400 (1800 humide) [4]
T. crue	1977	2034	1763.3	1500 (2000 humide) [5]
OSB	596		565.9	650 [1], 600 [6]
OSB ax.		606		
OSB rad.		606		
Bois Ancien	731		763	600-750 [2]
BoisA (R)		791		
BoisA (LT)		791		
Pierre Tendre	1833		1901.3	1600-1790 [2]
Pierre Dure	2560		2807.7	2550 [1], 2000-2190 [2]

Tableau IV-4. La densité des échantillons des trois laboratoires avec celle trouvée dans la littérature.

Matériaux	Conductivité thermique (W/m.K)					Littérature
	LOCIE (C-Therm)	LOCIE (Hot Disk)	LERMAB (Hot Disk)	LASIE (λ-mètre)	LASIE (Hot Disk)	
Argilus	0,274		0,194	0,107		
Terre Cuite	0,771		0,820	0,240		1-1,35 [3], 0,65 [1], 0,69 [2]
Torchis	0,997	1,110	1,374	0,364		1,05 [4]
T. crue	1,380	1,418	1,274	0,207		0,75 (1,1 humide) [5]
OSB	0,101		0,194	0,094		0,13 [1,6,7,8]
OSB ax.			0,147			
OSB rad.			0,257			
Bois Ancien	0,104		0,256	0,209		0,21 [2], 0,12-0,23 [9]
BoisA (R)			0,127			
BoisA (L T)			0,516			
Pierre Tendre	1,217			0,608	1,09	1,1 [2], 1,05 [3]
Pierre Dure	2,349			0,493	2,72	2,91 [1], 1,7 [2], 2,2 (calcaire) [3]

Tableau IV-5. La conductivité thermique des échantillons des trois laboratoires avec celle trouvée dans la littérature.

Matériaux	Chaleur spécifique (J/Kg.K)				
	LOCIE calcul	LOCIE DSC	LERMAB	LASIE calorimètre	Littérature
Argilus	1730	726	1149	863	
Terre Cuite	942	733	746	824	1000 [1,2]
Torchis	1090	708	645	792	
T. crue	997	782	692	813	
OSB	1046	1273		1364	1880 [1]
OSB ax.					
OSB rad.					
Bois Ancien	885	1386		1312	1600 [2]
BoisA (R)					
BoisA (LT)					
Pierre Tendre	1092	714		839	1000 [2]
Pierre Dure	772	659		798	1000 [1,2]

Tableau IV-6. La chaleur spécifique des échantillons des trois laboratoires avec celle trouvée dans la littérature.

Les résultats qui sont dans le même ordre de grandeur des valeurs trouvées dans la littérature sont considérés comme fiables.

En conclusion, une comparaison des propriétés thermiques de différents types de matériaux de construction a été faite entre les laboratoires LOCIE, LERMAB et LASIE. La conductivité thermique a été mesurée par un C-Therm à LOCIE, Hot Disk à LERMAB, et λ -mètre et Hot Disk à LASIE. L'effusivité thermique a été mesurée à LOCIE et LERMAB. La chaleur spécifique a été calculée à LOCIE et LERMAB, mesurée à LOCIE par un DSC et à LASIE par un calorimètre. Finalement, La diffusivité thermique a été calculée à LOCIE à partir de C_p calculée et C_p mesurée par le DSC, et à LERMAB à partir de C_p calculée. Les résultats de comparaison de chaque propriété sont montrés dans les tableaux suivants :

Conductivité thermique					
Matériau	LOCIE (C-Therm)	LOCIE (Hot Disk)	LERMAB (Hot Disk)	LASIE (λ -mètre)	LASIE (Hot Disk)
Terre cuite	✓	NaN	✓	✗	NaN
Terre crue	✓	✓	✓	✗	NaN
Pierre dure	✓	NaN	NaN	✗	✓
Pierre tendre	✓	NaN	NaN	✗	✓

Torchis					NaN
OSB		NaN			NaN
Argilus		NaN			NaN
Pare-pluie	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
Bois ancien		NaN			NaN

En regardant le tableau de la conductivité thermique, on peut dire que les résultats donnés par le C-Therm à LOCIE et par le Hot Disk à LOCIE, LERMAB et à LASIE sont compatibles, sauf dans le cas d'argilus ce qui nécessite de faire plus de mesures sur ce matériau pour arriver à des résultats comparables au moins dans deux laboratoires. Les résultats trouvés par le λ -mètre ne semblent pas fiables comme cet instrument est très sensible à la dimension de l'échantillon (doit être stricte), à sa surface (doit être lisse), et nécessite une pression de la plaque supérieure suffisante (en fonction de la déformabilité du matériau). Donc comme certains des matériaux à LASIE ont des problèmes de géométrie et de surface, ça a affecté les mesures ce qui a provoqué les écarts entre leurs résultats et ceux de LOCIE et LERMAB.

Effusivité thermique			
Matériau	LOCIE	LERMAB	LASIE
Terre cuite			NaN
Terre crue			NaN
Pierre dure	NaN	NaN	NaN
Pierre tendre	NaN	NaN	NaN
Torchis			NaN
OSB			NaN
Argilus			NaN
Pare-pluie	NaN	NaN	NaN
Bois ancien			NaN

Pour l'effusivité thermique, seuls les résultats de la terre cuite et du torchis sont similaires entre LOCIE et LERMAB.

Chaleur spécifique				
Matériau	LOCIE (Calcul)	LOCIE (DSC)	LERMAB (Calcul)	LASIE (Calorimètre)
Terre cuite	✗	✓	✓	✓
Terre crue	✗	✓	✓	✓
Pierre dure	✓	✓	NaN	✓
Pierre tendre	✗	✓	NaN	✓
Torchis	✗	✓	✓	✓
OSB	✗	✓	✗	✓
Argilus	✗	✓	✗	✓
Pare-pluie	NaN	✗	NaN	✗
Bois ancien	✗	✓	✗	✓

Dans le cas de chaleur spécifique, Les résultats trouvés expérimentalement par le DSC à LOCIE et par le calorimètre à LASIE sont presque identiques, sauf dans le cas du pare-pluie ils sont différents. Ils sont compatibles avec les valeurs calculées à LERMAB dans le cas de la terre cuite, la terre crue et du torchis.

Diffusivité thermique				
Matériau	LOCIE (C_p Calcul)	LOCIE (C_p DSC)	LERMAB	LASIE
Terre cuite	✗	✓	✓	NaN
Terre crue	✗	✓	✓	NaN
Pierre dure	✓	✓	NaN	NaN

Pierre tendre			NaN	NaN
Torchis				NaN
OSB				NaN
Argilus				NaN
Pare-pluie	NaN	NaN	NaN	NaN
Bois ancien				NaN

Enfin, pour la diffusivité thermique, les résultats de la terre cuite et terre crue obtenus à LOCIE à partir de C_p mesurée par le DSC et à LERMAB sont similaires. Par contre, ceux déterminés à LOCIE à partir de C_p calculée sont compatibles avec les valeurs de LOCIE trouvés à partir de C_p mesurée par le DSC dans le cas de la pierre dure, et avec les valeurs de LERMAB dans le cas de l'argilus.

IV.4. Perméabilité

Cette partie du rapport a proposé une synthèse de l'ensemble des mesures de perméabilité effectuées sur les matériaux sélectionnés et préparés dans le cadre du projet Smart-Réno. Une première analyse a permis de proposer un ensemble de valeurs typiques, moyennes des mesures disponibles, pouvant servir de base de données pour les codes de simulation en thermique du bâtiment.

Les matériaux testés sont dans l'ensemble relativement peu perméables : la majorité des échantillons se positionne dans une gamme de 5.10^{-14} m^2 à 5.10^{-13} m^2 . La terre cuite est nettement moins perméable (5.10^{-17} m^2) et la pierre dure peut être considérée comme complètement imperméable. Enfin, le chêne, sans surprise, est fortement anisotrope, mais reste peu perméable, même en direction longitudinale.

V. Annexes

V.1. Face arrière

V.1.1. Mesures LERMAB

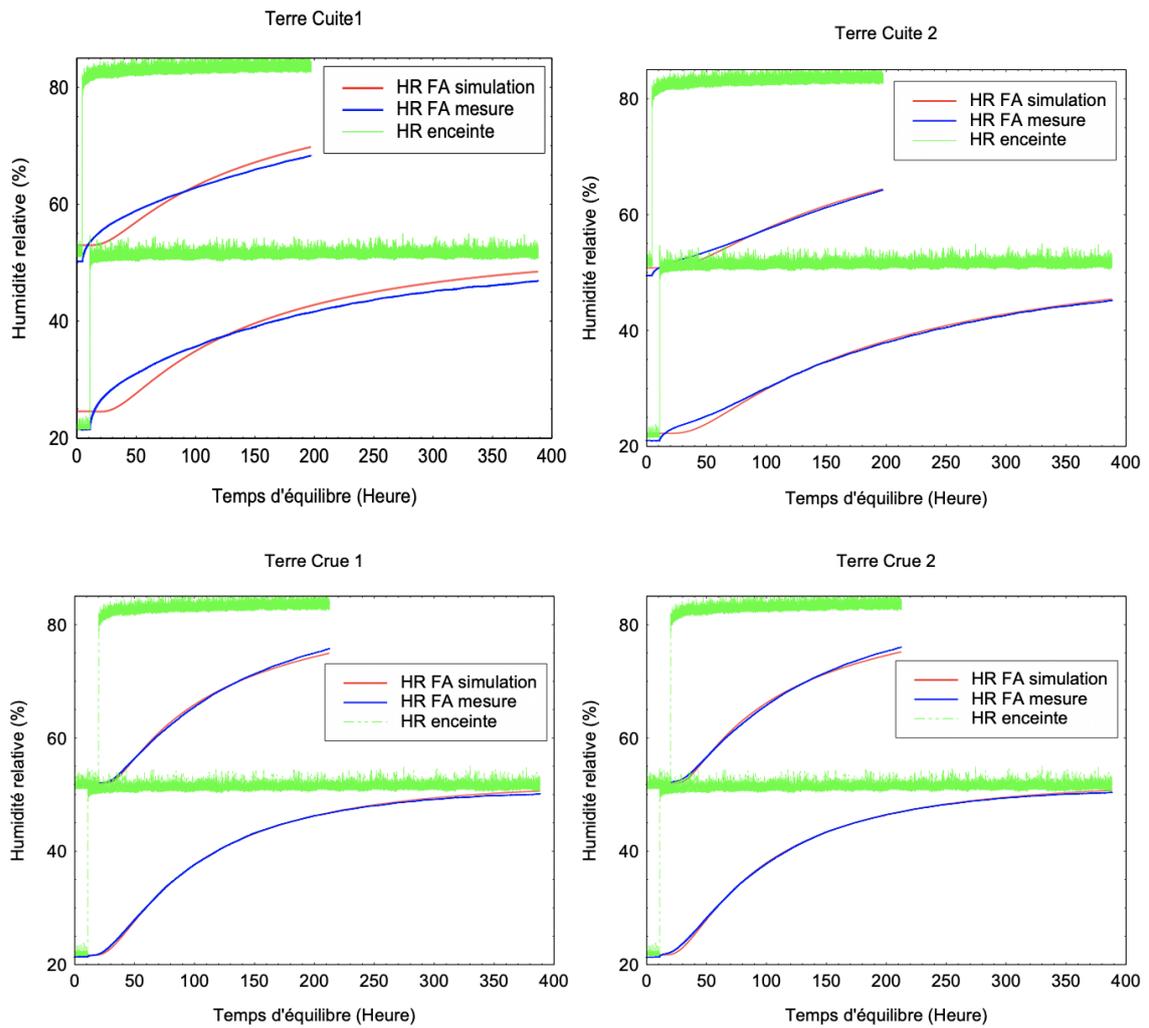
a) Tableau de valeurs

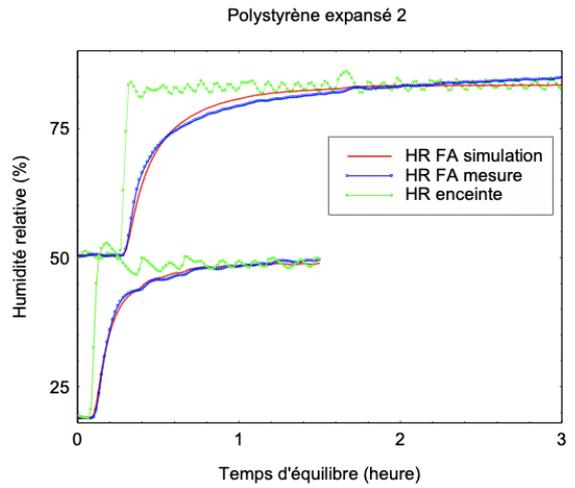
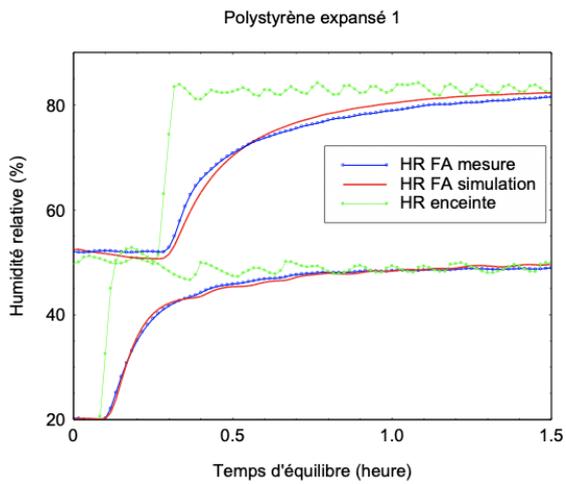
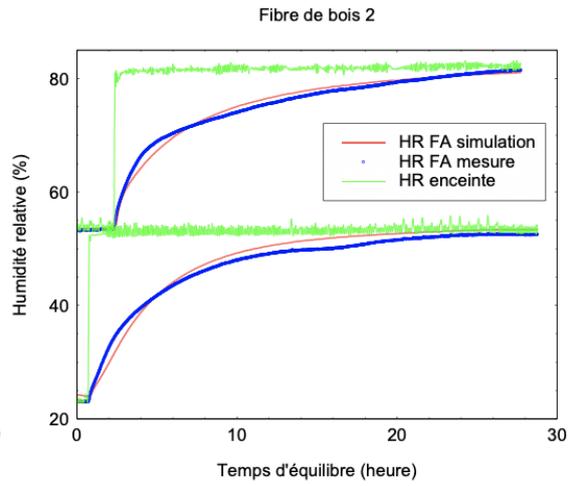
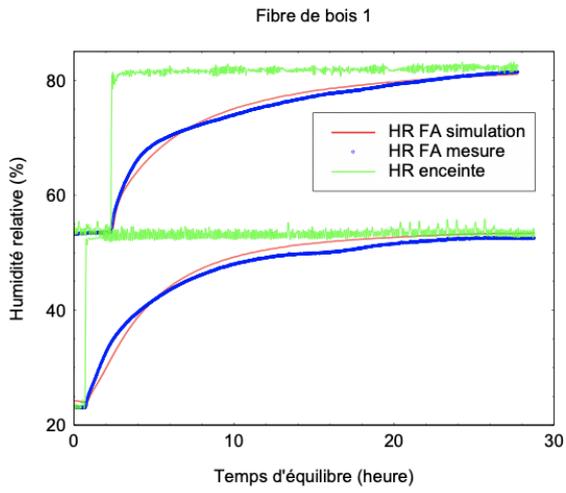
Matériau	N°	H _R ext=20%-50%			H _R ext=50%-80%			H _R ext=80%-50%			H _R ext=50%-20%		
		Mu (-)	mu moy (-)	Ecart type (-)	Mu (-)	Mu moy (-)	Ecart type (-)	Mu (-)	mu moy (-)	Ecart type (-)	Mu(-)	Mu moy(-)	Ecart type (-)

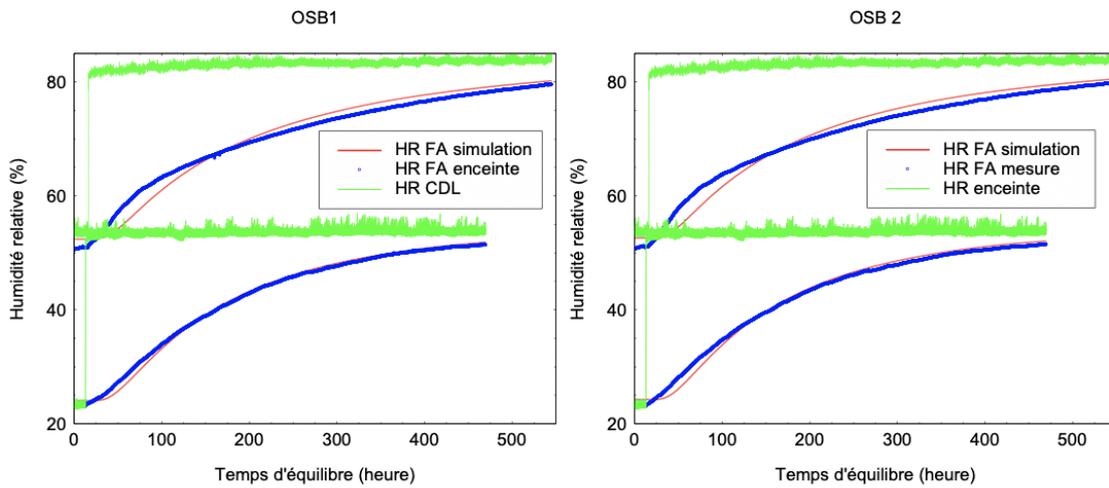
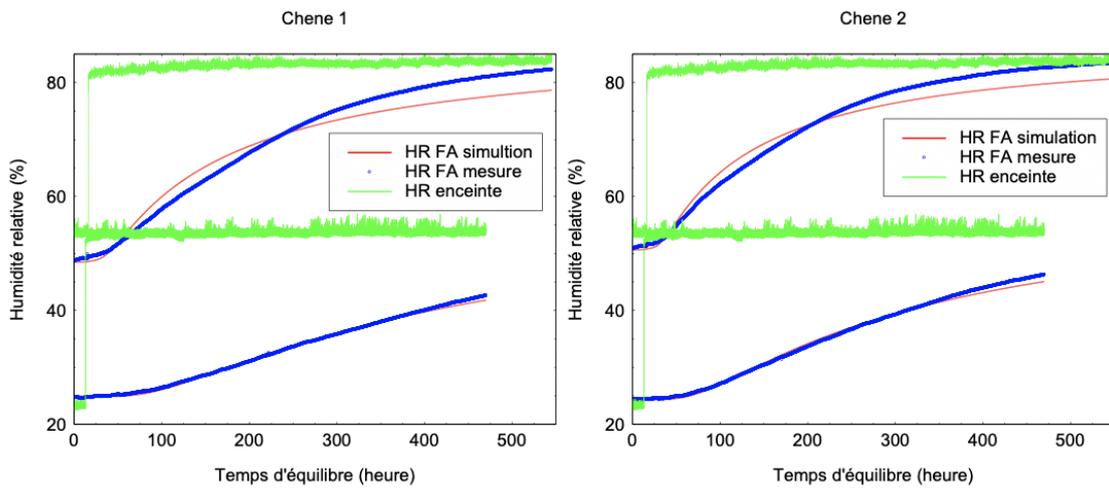
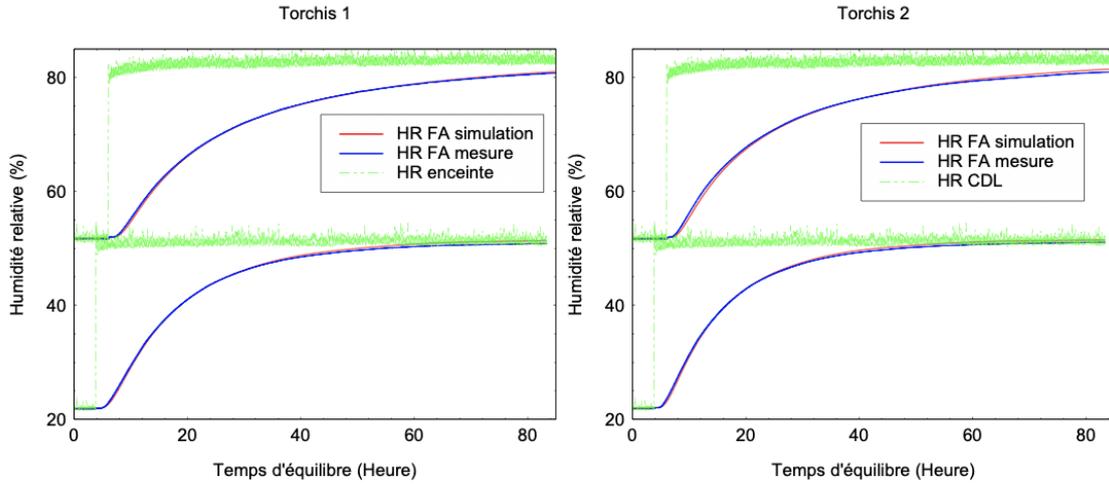
Bois de chêne	1	348.1 3	309	35.59	67.6 7	60.6 2	6.18	101.4 3	83.1 5	16.0 9	217.1 9	20 4.1 2	15.6 6
	2	300.1 9			56.1 7			76.91			208.4 0		
	3	278.5 9			58.0 2			71.11			186.7 7		
OSB	1	50.91	55.9	10.67	38.1 9	41.4 3	7.28	35.59	39.7 2	7.2	38.46	52. 39	13.9 3
	2	48.71			36.3 3			35.53			52.41		
	3	68.19			49.7 6			48.04			66.32		
Fibre de Bois	1	1.73	1.56	0.30	0.66	0.73	0.10	0.61	0.60	0.01	1.57	1.5 2	0.09
	2	1.73			0.68			0.59			1.56		
	3	1.22			0.85			0.60			1.41		
PSE	1	10.40	10.1 1	0.41	8.26	7.90	0.51	18.55	17.9 8	0.79	28.22	24. 51	5.25
	2	9.82			7.54			17.42			20.80		
Torchis	1	8.27	8	0.30	5.61	5.48	0.36	5.26	5.16	0.10	7.48	7.3 9	0.23
	2	8.14			5.76			5.06			7.55		
	3	7.71			5.07			5.16			7.13		
Terre cru	1	16.06	15.6	0.41	8.33	8.07	0.25	7.88	7.78	0.11	14.02	13. 75	0.28
	2	15.63			8.06			7.81			13.76		
	3	15.24			7.84			7.66			13.46		
Terre cuite	1	75.93	73.3	49.24	32.4 3	34.5 8	23.6 9	35.79	39.9 7	5.09	94.42	89. 03	47.0 7
	2	121.1 9			59.2 7			45.63			133.1 7		
	3	22.81			12.0 4			38.49			39.50		
Pierre dure	1	218.6	265	76.94	64.0 7	89.5 1	38.0 4	56.46	68.4 2	20.9 2	210.6 2	22 7.3 3	39.8 3
	2	222.7			71.2 3			56.22			198.5 9		
	3	353.8			133. 24			92.57			272.8 0		
Argilus	1	5.97	6.6	0.99	3.35	4.02	0.93	2.85	3.34	0.54	6.38	7.3 5	1.08
	2	6.09			3.62			3.26			7.15		
	3	7.74			5.08			3.92			8.52		
Beton cellulaire	1	2.18	1.98	0.36	1.55	1.43	0.21	1.64	1.64	0.04			
	2	1.57			1.18			1.60					
	3	2.20			1.55			1.68					

Tableau V-1. Perméabilité à la vapeur déterminée par la méthode FA des différents matériaux en adsorption et en désorption (LERMAB)

b) Courbes de confrontation HR mesure-HR simulation







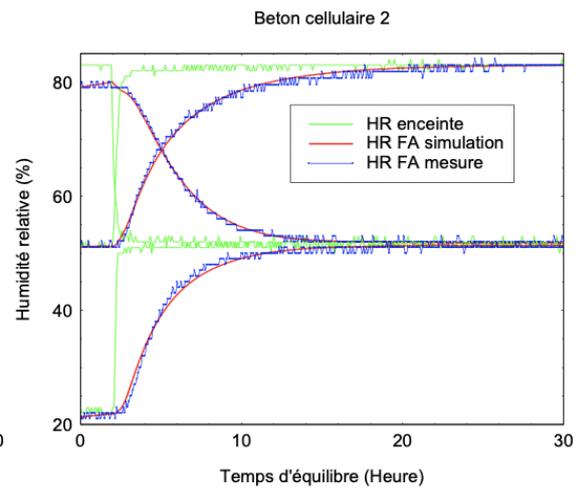
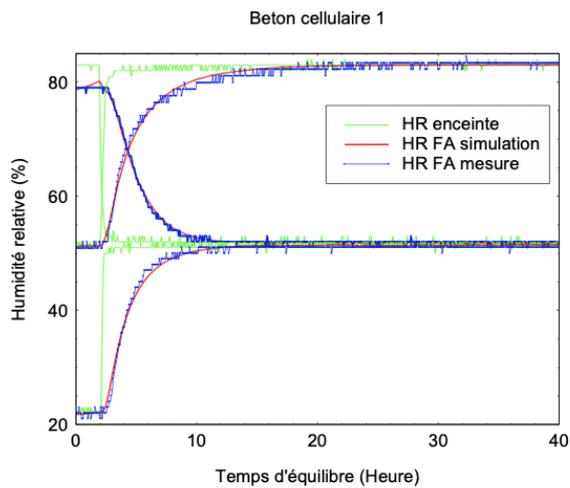
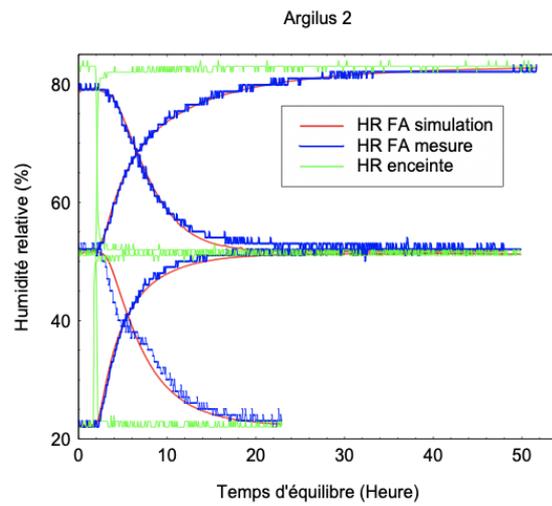
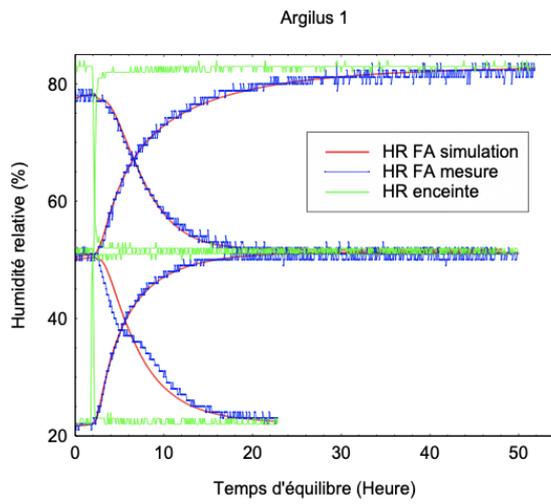
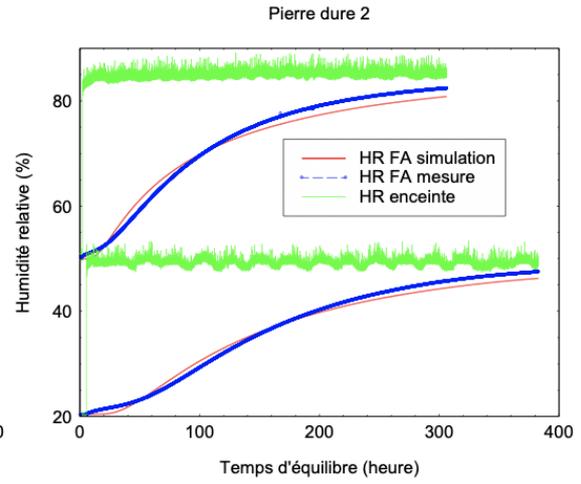
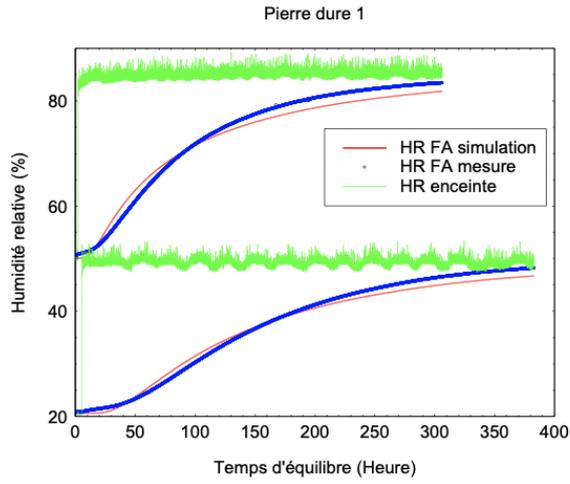


Figure V-1. Courbes de confrontation de HR FA mesurées à celles simulées par TransPore pour les différents matériaux (LERMAB)

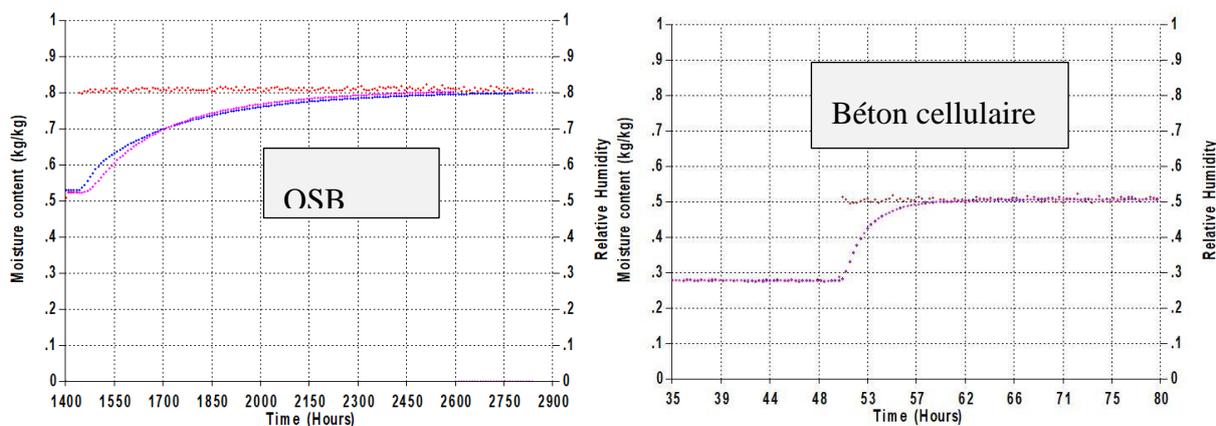
V.1.2. Mesures LGPM

a) Tableau de valeurs

Matériau	N° ech.	HRext=20-50%			HRext=50-80%			HRext=80-50%			HRext=50-20%		
		mu	mu moy.	Ecart type									
OSB	1	80.0	75.2	6.8	62.5	58.7	5.3	41.8	40.2	2.4	62.5	59.7	4.0
	2	70.4			55.0			38.5			56.9		
Fibre de Bois	1	1.4	1.4		0.9	0.9		0.9	0.9		1.4	1.4	
PSE	1	0.8	0.8		1.5	1.5		1.0	1.0		2.9	2.9	
Torchis	1	8.3	7.5	1.1	5.8	5.6	0.2	6.6	5.9	1.0	8.0	7.5	0.7
	2	6.8			5.5			5.2			7.1		
Terre cuite	1	108.1	156.1	67.9	194.6	194.6	0.0	135	135		177.0	177	
	2	204.1			194.6								
Pierre dure	1	192.3	192.3		215.1	215.1		159.2	200.4	58.2	308.6	328.5	28.1
	2							241.6			348.4		
Argilus	1	1.3	0.9	0.5	1.9	1.5	0.7	1.3	1.0	0.4	3.2	2.7	0.7
	2	0.6			1.0			0.7			2.2		
Béton cellulaire	1	5.4	5.6	0.3	2.8	2.9	0.2	2.2	2.4	0.3	6.1	6.4	0.3
	2	5.8			3.1			2.6			6.6		
Pare pluie	1	2.10E-04			0.00151			5.55E-03			0.000391		

Tableau V-2. Perméabilité à la vapeur déterminée par la méthode FA des différents matériaux en adsorption et en désorption (LGPM)

b) Courbes de confrontation mesure-simulation



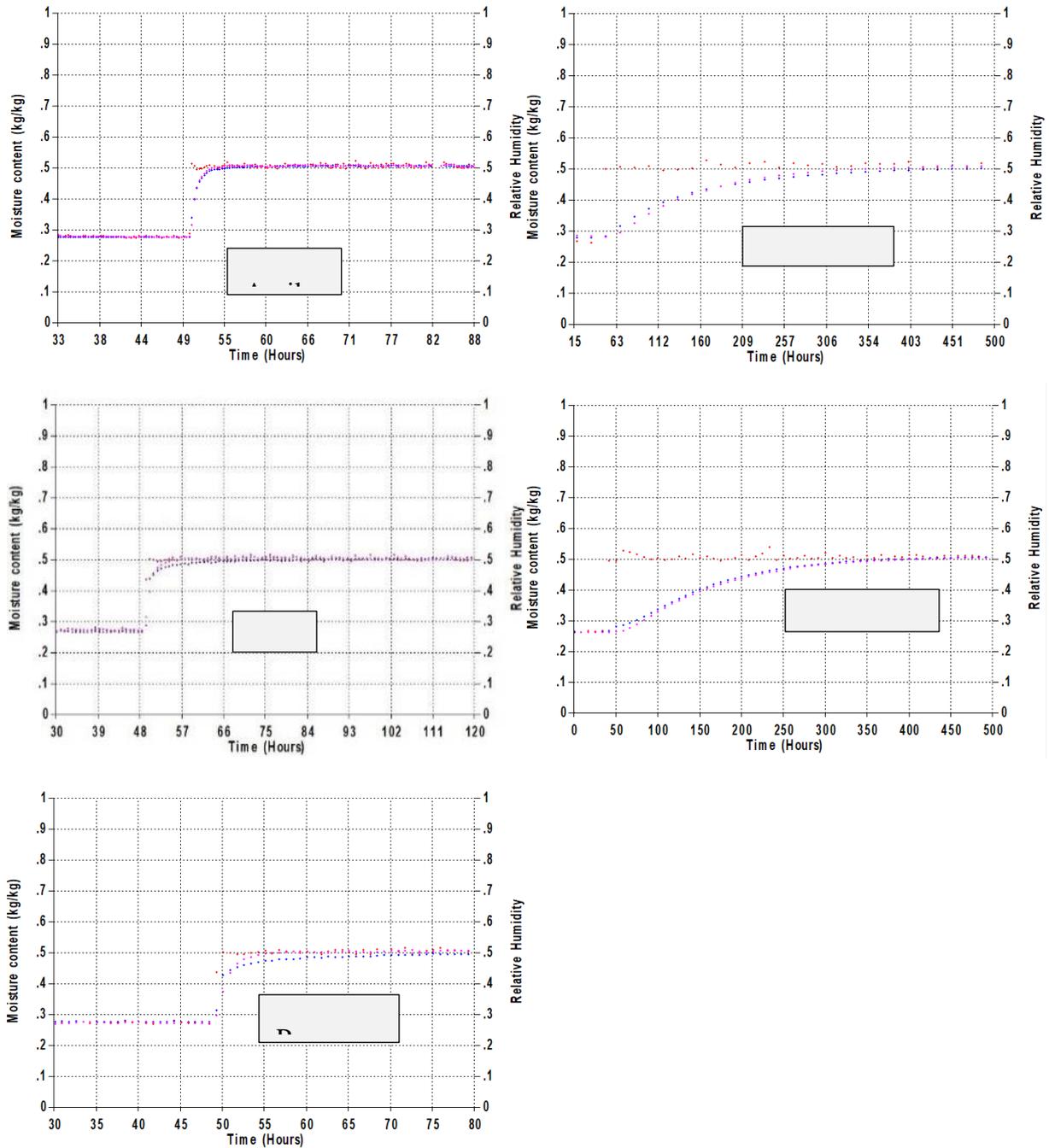


Figure V-2. Courbes de confrontation de HR FA mesurées à celles simulées par TransPore pour les différents matériaux (LGPM)

V.1.3. Mesures LOCIE

a) Tableau de valeurs

	HR=25%		HR=75%	
	Perméabilité (s)	mu (-)	Perméabilité (s)	mu (-)
Fibre de bois	2.93E-10	0.66	8.29E-09	0.02
Torchis	5.38E-11	3.58	3.29E-11	5.85
Béton cellulaire	1.04E-10	1.85	3.47E-11	5.55

Tableau V-3. Perméabilité à la vapeur déterminée par la méthode FA des différents matériaux (LOCIE)

b) Courbes de validation mesure_simulation

Les courbes de confrontation de l'HR en FA mesurée et simulée sont de qualité moyenne pour le fibre de bois et le torchis alors qu'elles sont ne sont pas bonnes pour le béton cellulaire.

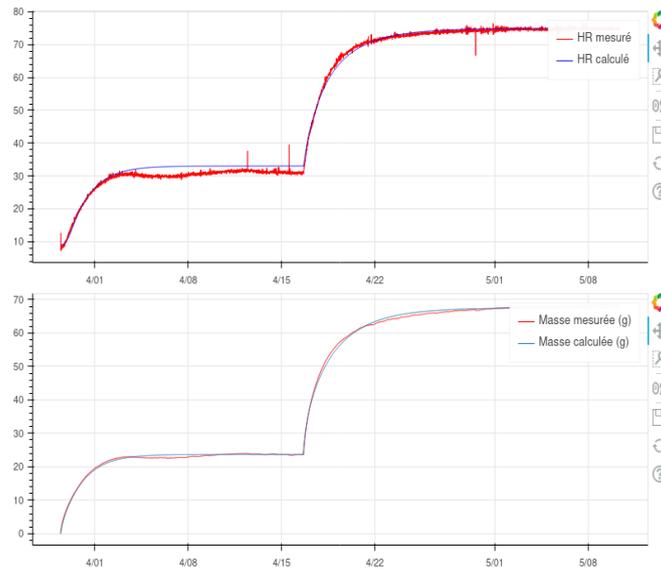


Figure V-3. Courbes de confrontation mesure-simulation de l'HR en FA du fibre de bois

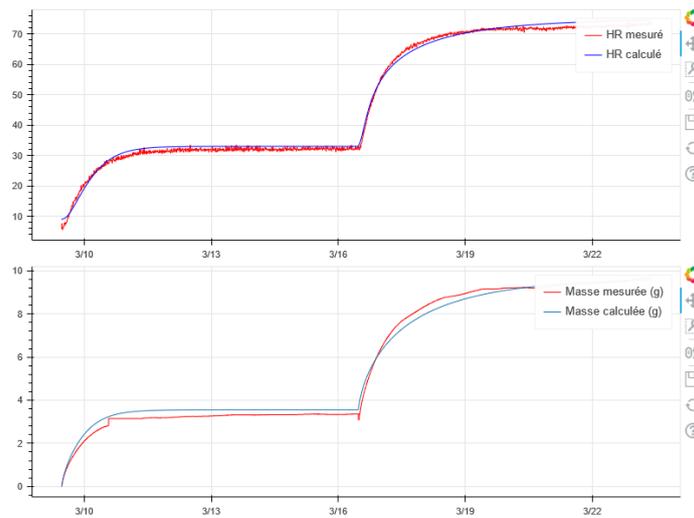


Figure V-4. Courbes de confrontation mesure-simulation de l'HR en FA du torchis

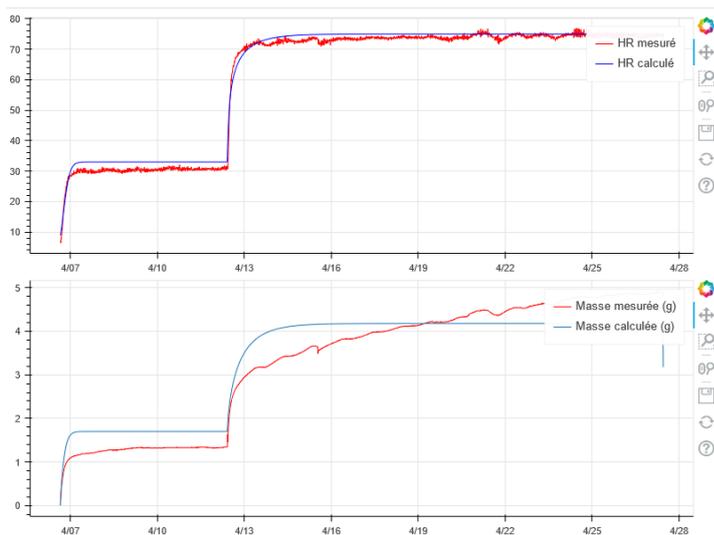


Figure V-5. Courbes de confrontation mesure-simulation de l'HR en FA du béton cellulaire

V.2. Coupelle standard

V.2.1. Mesures TIPEE

a) Caractéristiques des échantillons

Id échantillon	Diamètre (mm)	Épaisseur nominale (mm)	Masse volumique (kg/m ³)	Bords cachés (mm)
Terre cuite				
1A	84.63	12.95	1 715	2.4
2A	84.29	10.76	1 694	2.3
3 A, 3B, 3D	85.07	11.66	1 706	2.6
4 D	84.82	13.83	1 623	2.5
5 D	84.74	12.84	1 711	2.5
6 D	84.51	11.25	1 792	2.4
7 C	84.66	11.56	1 745	2.4
8 E	83.25	12.75	1 664	1.7
9 B, 9E	85.29	10.76	1 654	2.8
10 F	83.18	13.36	1 701	1.7
11 F	83.68	13.28	1 755	1.9
Terre crue				
A	69.76	14.5	1 971	0
A	69.76	13.65	1 922	0
B	69.83	13.14	1 989	0
B	69.71	14.02	1 999	0
C	69.8	12.82	2 011	0
C	69.55	13.79	2 018	0
D	69.71	14.2	1 977	0
D	69.66	14.63	1 999	0
Pierre dure				
A	74.61	11.51	2 573	0
A	74.75	11.54	2 628	0
B	74.78	12.5	2 546	0
B	74.26	13.16	2 487	0
C	74.54	10.43	2 456	0

C	74.63	12.79	2 452	0
D	74.58	13.36	2 567	0
D	74.5	13.51	2 532	0
Pierre tendre				
1	85.32	13.48	1 765	2.5
2	85	14.4	1 762	2.6
3	85.24	13.58	1 754	2.6
4	85.28	13.85	1 759	2.6
5	85	13.08	1 751	
6	85.34	13.86	1 786	
1	86.52	12.94	1 851	
2	85.13	11.09	1 781	
3	85.56	13.55	1 762	
3	85.18	11.63	1 757	2.7
4	84.94	11.7	1 770	2.6
5	84.98	12.28	1 775	2.6
6	85.28	11.61	1789	2.7
Torchis				
A	82.42	7.96	1 384	1.3
A	82.45	7.99	1 501	1.3
B	84.6	9.6	1 388	2.4
B	83.31	8.17	1 418	1.8
C	84.61	8.5	1 450	2.4
C	84.39	10.19	1 466	2.3
D	85.03	8.18	1 388	2.6
D	83.04	8.59	1 389	1.6
OSB				
A	85.11	15.2	569	2.7
A	84.98	15.12	581	2.6
A	85.17	15.19	577	2.7
A	85.14	15.58	569	2.7
A	84.97	15.59	574	2.6
A	85.11	15.58	604	2.7
B	85.1	15.26	604	2.7
B	85.08	15.06	559	2.6
B	82.1	14.76	570	1.2
C	85.3	15.12	601	2.8
C	84.9	15.12	606	2.8
C	85.14	15.23	589	2.7
D	81.89	15.71	535	1.1
D	81.85	14.72	552	1
D	84.93	15.08	567	2.6
Argilus				
ARGILUS-1	92.6	10.5	825	N
ARGILUS-2	92.6	11.6	796	N
ARGILUS-3	92.9	11.9	826	N
ARGILUS-4	92.3	11.7	774	N
ARGILUS-5	92.9	10.8	824	N
ARGILUS-6	93.1	13.2	839	N
ARGILUS-1	92.8	11.7	818	N

ARGILUS-2	93.3	13.5	815	N
ARGILUS-3	92.7	12.1	825	N
ARGILUS-4	93.1	13.6	817	N
ARGILUS-5	92.2	12.2	770	N
ARGILUS-6	92.5	11.9	847	N
Pare pluie				
A	89.6	0.229	432	N
A	90.4	0.21	500	N
A	89.5	0.204	463	N
A	89.9	0.229	414	N
A	90	0.21	438	N
A	90.1	0.195	490	N
B	90.3	0.226	442	N
B	88.9	0.223	444	N
B	91.1	0.213	460	N
C	89.9	0.213	462	N
C	89.6	0.222	450	N
C	88.6	0.229	452	N
D	89.6	0.208	468	N
D	90.7	0.24	419	N
D	90.6	0.223	443	N
E	90.5	0.22	436	N
E	90.5	0.215	453	N
E	88.8	0.208	467	N
Bois ancien				
Bois ancien - 1	91.86	18.1	634	2.5
Bois ancien - 2	91.96	19.74	574	2.6
Bois ancien - 3	82.29	18.43	909	2.6

Tableau V-4. Caractéristiques de échantillons utilisés par TIPEE

b) Tableau de valeurs et courbes de mesure par matériaux

Terre cuite

Humidité enceinte (%)	Hum. Rel. Coupelle (%)	HR Moyenne (%)	Moy. μ (-)	Ecart type μ (-)	Jeux d'éprouvettes
11%	0%	5.50%	50	-	A
11%	50%	30.50%	252	63	D
11%	85%	48%	343	14	B
50%	0%	25%	244	-	A
50%	11%	30.50%	254	109	C
50%	85%	67.50%	455	226	B
85%	0%	42.50%	0	-	A
85%	11%	48%	0	-	-
85%	50%	67.50%	367	92	E

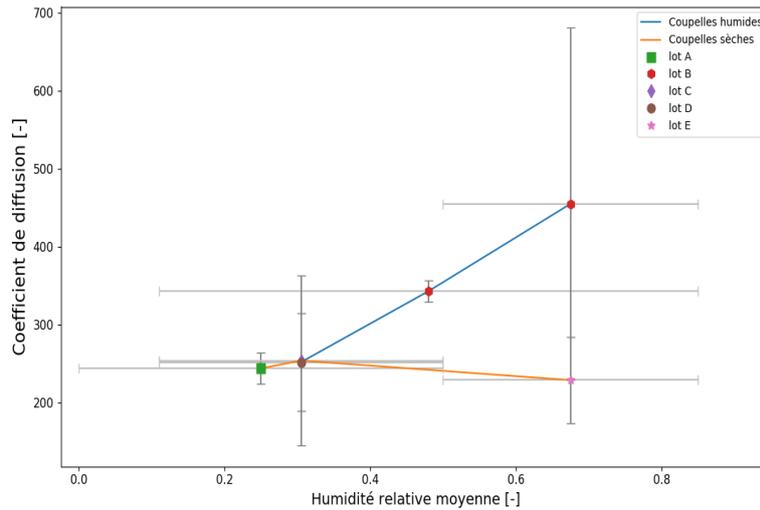


Figure V-6. Variabilité de la résistance à la diffusion de vapeur d'eau en fonction de l'humidité relative moyenne d'essai pour la terre cuite

Terre crue

Humidité enceinte (%)	Hum. Rel. Coupelle (%)	HR Moyenne (%)	Moy. μ (-)	Ecart type μ (-)	Jeux d'éprouvettes
11%	0%	5.50%	21	1	A
11%	50%	30.50%	15	1	B
11%	85%	48%	16	2	C
50%	0%	25%	19	1	A
50%	11%	30.50%	18	1	D
50%	85%	67.50%	13	0	B
85%	0%	42.50%	15	1	A
85%	11%	48%	14	0	D
85%	50%	67.50%	13	0	B

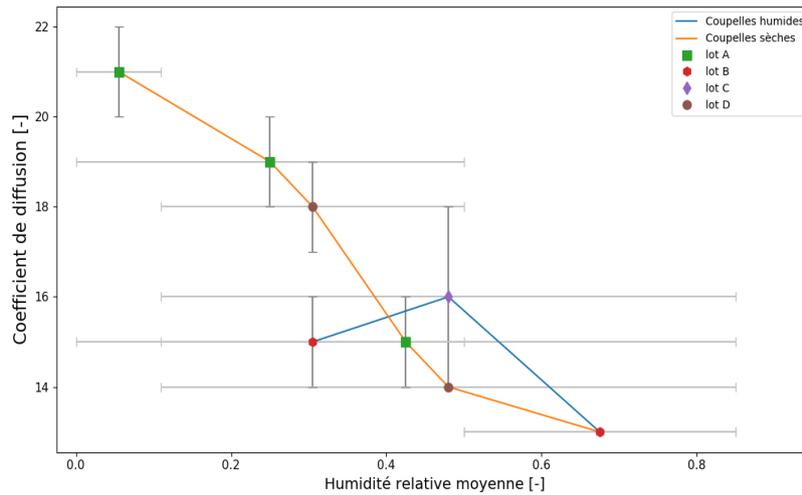


Figure V-7. Variabilité de la résistance à la diffusion de vapeur d'eau en fonction de l'humidité relative moyenne d'essai pour la terre crue

Pierre dure

Humidité enceinte (%)	Hum. Rel. Coupelle (%)	HR Moyenne (%)	Moy. μ (-)	Ecart type μ (-)	Jeux d'éprouvettes
11%	0%	5.50%	1007	200	C
11%	50%	30.50%	349	17	A
11%	85%	48%	393	71	B
50%	0%	25%	771	559	C
50%	11%	30.50%	402	6	D
50%	85%	67.50%	466	138	B
85%	0%	42.50%	614	433	C
85%	11%	48%	315	30	A
85%	50%	67.50%	332	60	B

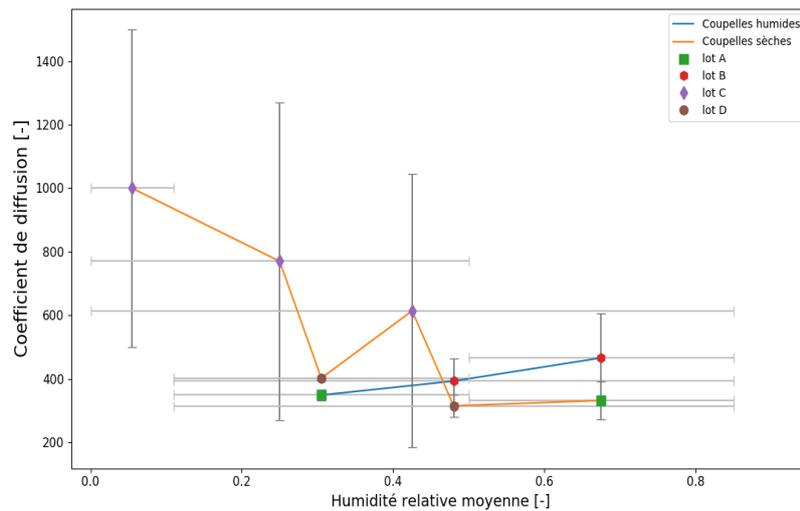


Figure V-8. Variabilité de la résistance à la diffusion de vapeur d'eau en fonction de l'humidité relative moyenne d'essai pour la pierre dure

Pierre tendre

Humidité enceinte (%)	Hum. Rel. Coupelle (%)	HR Moyenne (%)	Moy. μ (-)	Ecart type μ (-)	Jeux d'éprouvettes
11%	0%	5.50%	13	4	
11%	50%	30.50%			
11%	85%	48%			
50%	0%	25%	11.5	0.7	
50%	11%	30.50%	8	1.3	
50%	85%	67.50%			
85%	0%	42.50%	11.1	0.4	
85%	11%	48%			
85%	50%	67.50%			

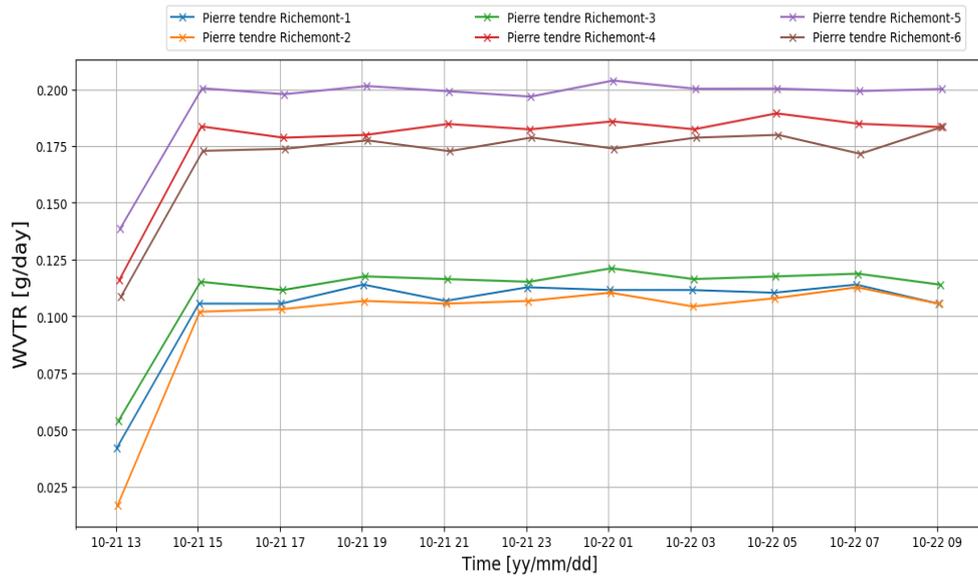


Figure V-9. Vitesse de variation de la masse pour la Pierre tendre (Enceinte 11% / Coupelle 0%)

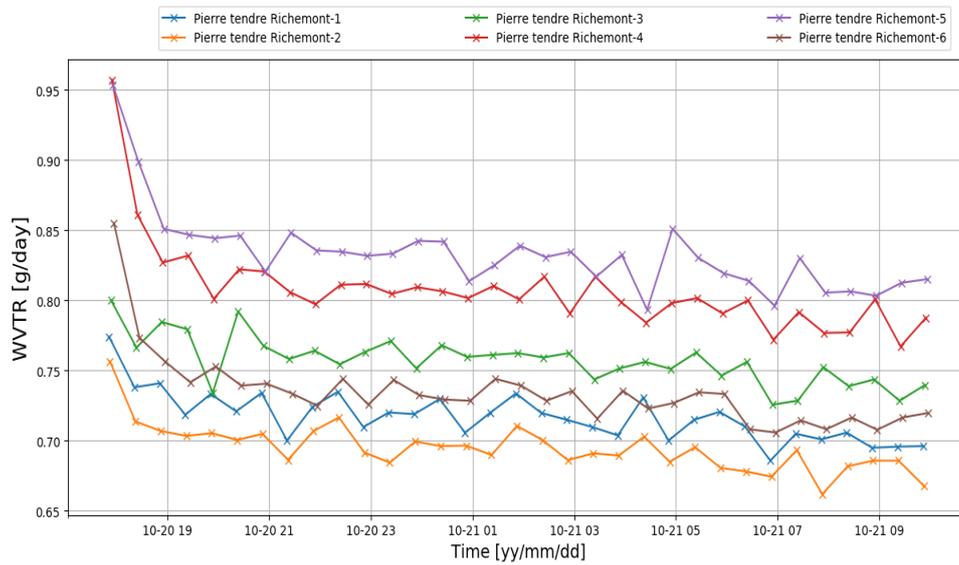


Figure V-10. Vitesse de variation de la masse pour la Pierre tendre (Enceinte 50% / Coupelle 0%)

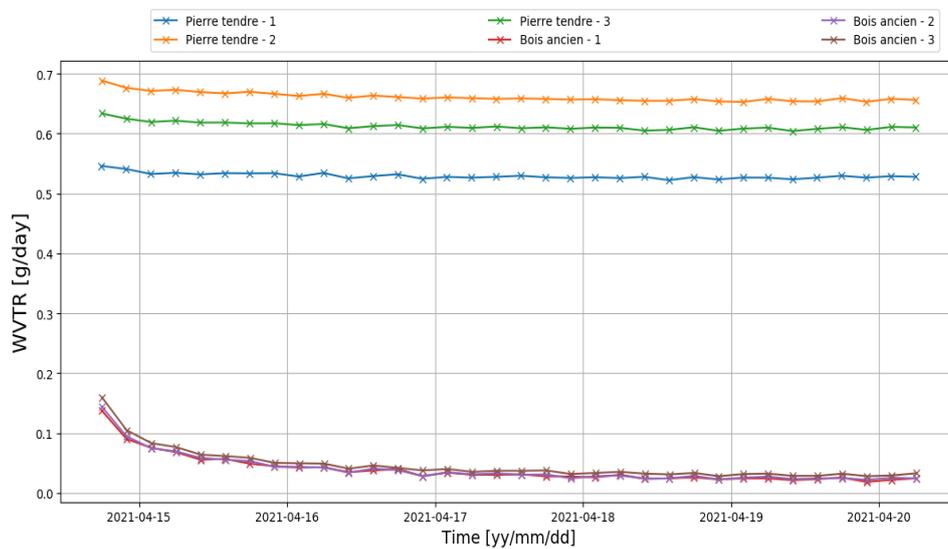


Figure V-11. Vitesse de variation de la masse pour la Pierre tendre (Enceinte 50% / Coupelle 11%)

Attention au moins 48 h d'établissement du régime Figure V-9, Figure V-10 et Figure V-12 arrêt essai intervient après moins de 20h.

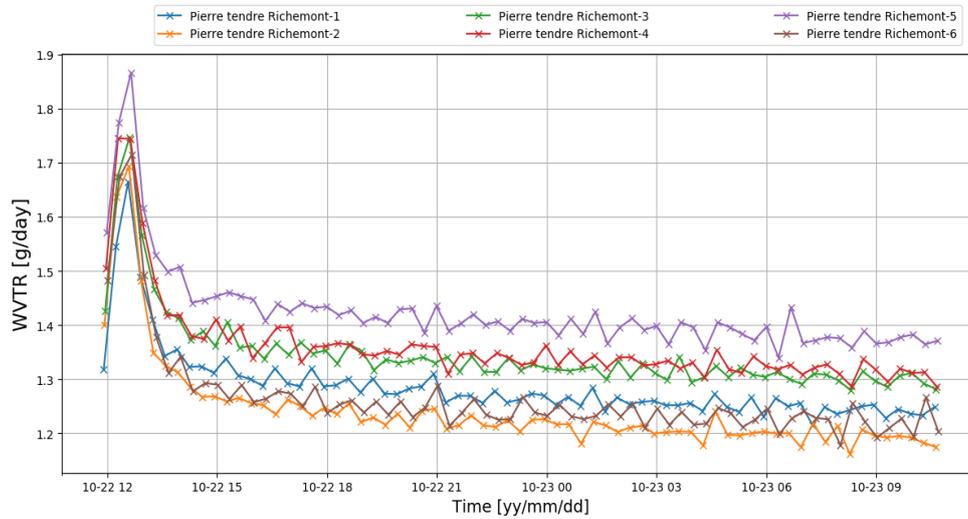


Figure V-12. Vitesse de variation de la masse de la pierre tendre (Enceinte 85% / Coupelle 0%)

Torchis

Humidité enceinte (%)	Hum. Rel. Coupelle (%)	HR Moyenne (%)	Moy. μ (-)	Ecart type μ (-)	Jeux d'éprouvettes
11%	0%	5.50%	15	2	A
11%	50%	30.50%	7	0.1	B
11%	85%	48%	10.6	0.2	C
50%	0%	25%	11.6	1.1	A
50%	11%	30.50%	9.7	0.2	D
50%	85%	67.50%	7.7	0.5	C
85%	0%	42.50%	13.5	1.5	A
85%	11%	48%	9.4	0.3	D
85%	50%	67.50%	9.2	0.4	B

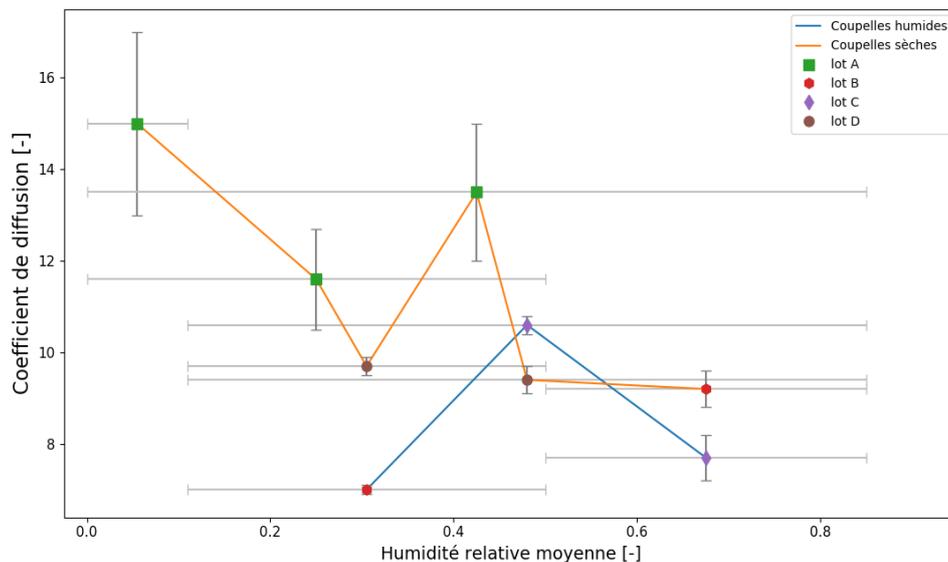


Figure V-13. Variabilité de la résistance à la diffusion de vapeur d'eau en fonction de l'humidité relative moyenne d'essai pour le torchis

OSB

Humidité enceinte (%)	Hum. Rel. Coupelle (%)	HR Moyenne (%)	Moy. μ (-)	Ecart type μ (-)	Jeux d'éprouvettes
11%	0%	5.50%	25.5	1.3	A
11%	50%	30.50%	35	6.8	D
11%	85%	48%	70	3	B
50%	0%	25%	160	67	A
50%	11%	-	-	-	C
50%	85%	67.50%	140	1	B
85%	0%	42.50%	63	10	A
85%	11%	48%	93	11	B
85%	50%	67.50%	58	7	C

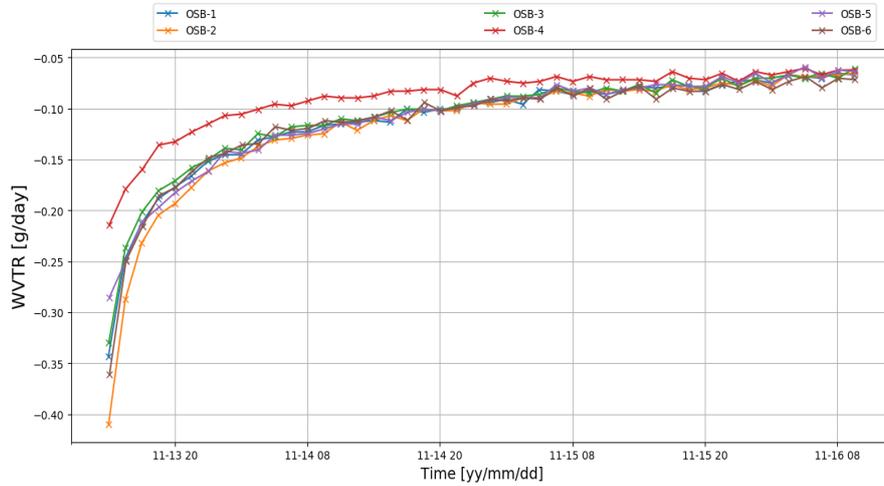


Figure V-14. Prise de masse pour Essai WC (11% HR en enceinte / 0% HR en coupelle)

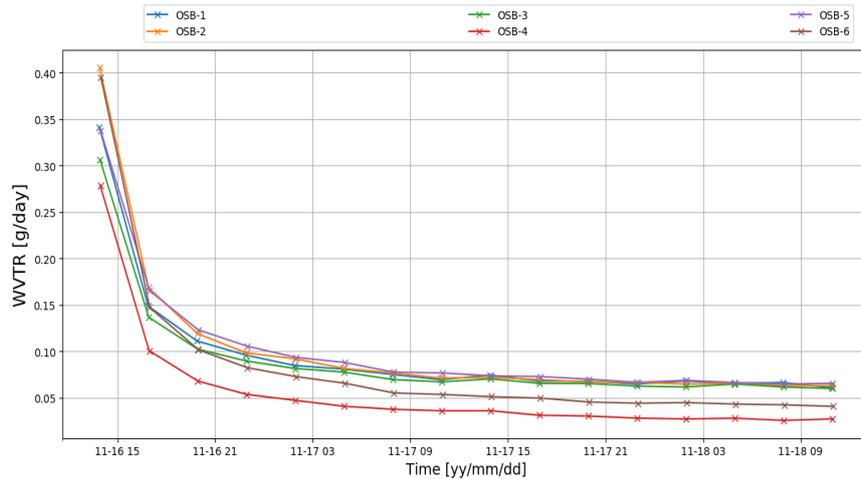


Figure V-15. Prise de masse pour Essai WC (50% HR en enceinte / 0% HR en coupelle)

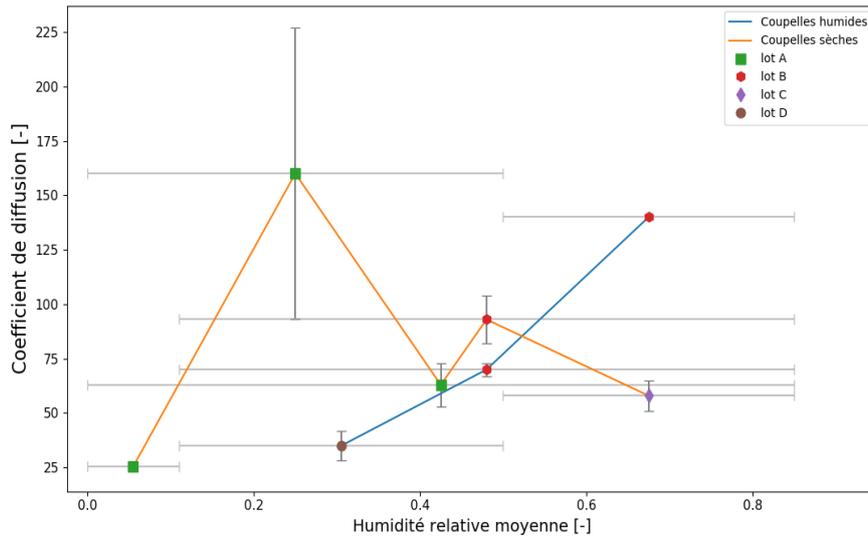


Figure V-16. Variabilité de la résistance à la diffusion de vapeur d'eau en fonction de l'humidité relative moyenne d'essai pour l'OSB

Argilus

Humidité enceinte (%)	Hum. Rel. Coupelle (%)	HR Moyenne (%)	Moy. μ (-)	Ecart type μ (-)	Jeux d'éprouvettes
11%	0%	5.50%	16.3	1.6	
11%	50%	30.50%	6.9	0.2	
11%	85%	48%	7	0.5	
50%	0%	25%	9.1	0.5	
50%	11%	30.50%	8	0.2	
50%	85%	67.50%	6.4	0.1	
85%	0%	42.50%	7.9	0.4	
85%	11%	48%	7.6	0.2	
85%	50%	67.50%	9.1	0.2	

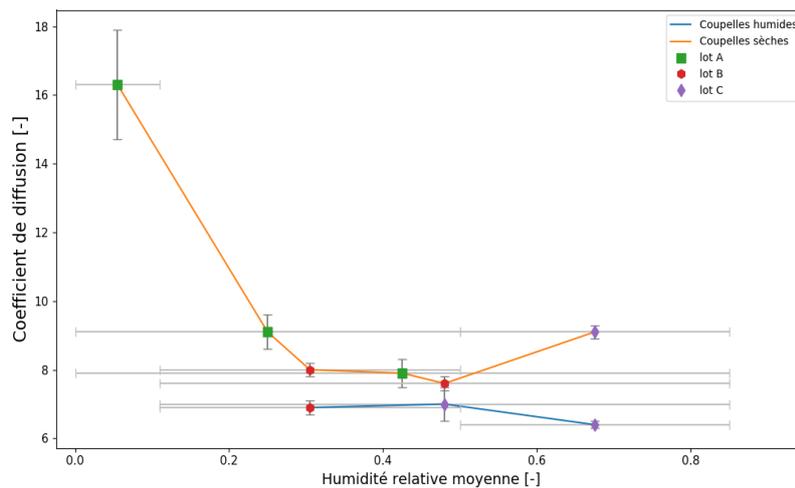


Figure V-17. Variabilité de la résistance à la diffusion de vapeur d'eau en fonction de l'humidité relative pour l'Argilus

Pare pluie

Humidité enceinte (%)	Hum. Rel. Coupelle (%)	HR Moyenne (%)	Moy. μ (-)	Ecart type μ (-)	Jeux d'éprouvettes
11%	0%	5.50%			
11%	50%	30.50%	833	151	
11%	85%	48%	976	31	
50%	0%	25%	1122	466	
50%	11%	30.50%	974	72	
50%	85%	67.50%	860	99	
85%	0%	42.50%	980	413	
85%	11%	48%	904	45	
85%	50%	67.50%	763	142	

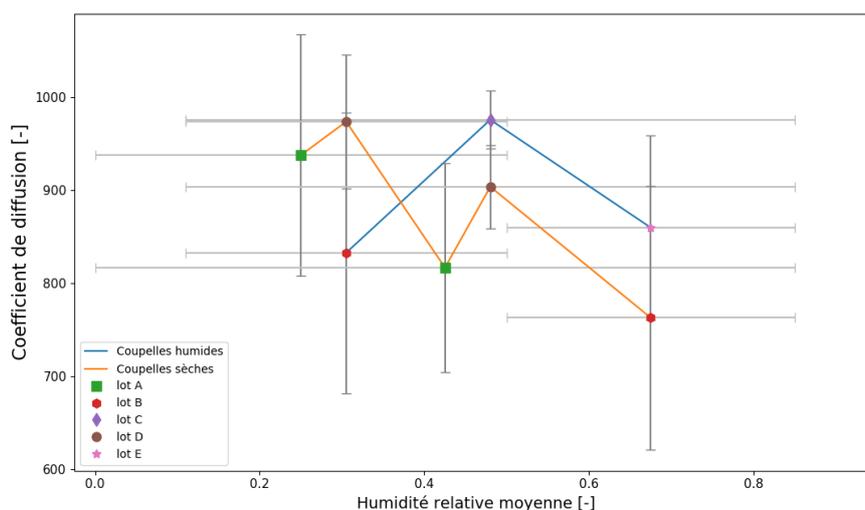


Figure V-18. Variabilité de la résistance à la diffusion de vapeur d'eau en fonction de l'humidité relative pour le pare pluie

Bois ancien (Chêne)

Humidité enceinte (%)	Hum. Rel. Coupelle (%)	HR Moyenne (%)	Moy. μ (-)	Ecart type μ (-)	Jeux d'éprouvettes
11%	0%	5.50%			
11%	50%	30.50%			
11%	85%	48%			
50%	0%	25%			
50%	11%	30.50%	299	61	
50%	85%	67.50%			
85%	0%	42.50%			
85%	11%	48%			
85%	50%	67.50%			

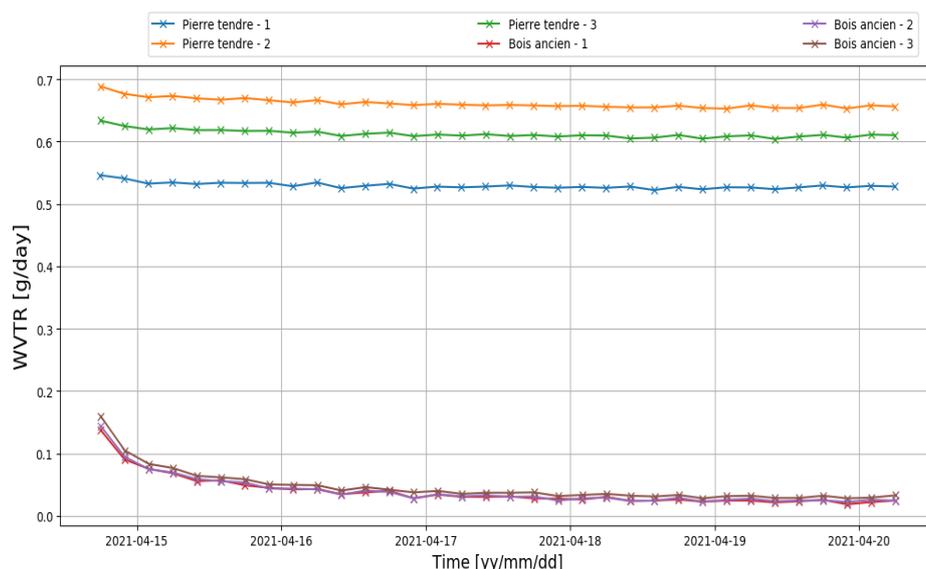


Figure V-19. Vitesse de variation de la masse pour le bois ancien - Enceinte 50% /Coupelle 11%

V.2.2. LOCIE

a) Tableau de valeurs

Echantillons ronds diamètre = 70mm				
Humidité relative (%)		mu (-)	mu moyen (-)	écart type mu (-)
33% int-75% ext	osb1	48.38	44.92	3.46
	osb3	41.46		
	argilus 1	7.8	7.64	0.14
	argilus 2	7.5		
	argilus 3	7.6		
	93%int-75ext	pierre dure 1	339.2	356.78
pierre dure 2		374.4		
0%int-75ext	argilusV10	4.9	4.66	0.21
	argilusV11	4.5		
93%int-33ext	argilusV12	24.8	24.93	0.14
	argilusV13	25.1		
75%int-33ext	argilusV1	5.9	5.39	0.50
	argilusV2	4.9		
	argilusV4	3.4		
0%int-33ext	argilusV5	4.6	4.25	0.59
	argilusV6	4.7		
93%int-33ext	argilusV7	27.6	26.68	0.87
	argilusV8	25.8		

Tableau V-5. Perméabilité à la vapeur déterminée par la méthode CS des échantillons ronds de diamètre 70mm (LOCIE)

Echantillons carrés 33 mm x 33 mm				
Humidité relative (%)	Materiaux	Mu (-)	mu moyen (-)	écart type mu (-)
93%int-33ext	osb V1	11.8	12.61	0.85
	osbV3	13.5		
	pare pluie V1	118.5	88.28	21.37
	pare pluie V2	73.2		
	pare pluie V3	73.2		
		pierre dure V7	89.5	92.41

	pierre dure V8	74.4		
	pierre dure V9	113.3		
75%int-33ext	osbV4	18.0	20.44	3.45
	osbV5	25.3		
	osbV6	18.0		
	parepluieV4	67.3	107.30	28.31
	parepluieV5	128.3		
	parepluieV6	126.3		
	pierre dure V4	86.6	96.48	8.56
	pierre dure V5	95.3		
pierre dure V6	107.5			
0%int-33ext	osbV7	26.7	29.06	3.95
	osbV8	34.6		
	osbV9	25.9		
	parepluieV7	182.7	182.86	6.73
	parepluieV8	174.7		
	parepluieV9	191.2		
	pierre dure v1	160.1	129.21	38.16
	pierre dure V2	75.4		
pierre dure V3	152.1			
93%int-75ext	osbV10	11.3	12.85	4.23
	osbV11	8.6		
	osbV12	18.6		
	parepluieV10	168.4	147.78	29.13
	parepluieV11	168.4		
	parepluieV12	106.6		
	pierre dure V16	56.4	91.05	32.48
	pierre dure V17	82.2		
pierre dure V18	134.5			
33%int-75ext	osbV13	18.9	19.89	1.58
	osbV14	22.1		
	osbV15	18.7		
	parepluieV13	161.8	132.04	51.11
	parepluieV14	60.1		
	parepluieV15	174.2		
	pierre dure V13	124.1	98.06	25.45
	pierre dure V14	63.5		
pierre dure V15	106.6			
0%int-75ext	osbV16	26.9	33.09	4.85
	osbV17	38.7		
	osbV18	33.6		
	parepluieV16	206.3	220.96	11.51
	parepluieV17	234.5		
	parepluieV18	222.1		
	pierre dure V10	95.8	119.55	19.88
	pierre dure V11	144.5		
pierre dure V12	118.4			

Tableau V-6. Perméabilité à la vapeur déterminée par la méthode CS des échantillons carrés (LOCIE)

b) Courbes de mesures

(Pas de courbes disponibles pour le moment)

V.2.3. LASIE

a) Tableau de valeurs

HRint- HRExt	N° ech.	Terre cuite			Terre crue			Torchis			N° ech	Pierre tendre		
		Mu (-)	mu moy (-)	Sd (-)	mu (-)	mu moy (-)	Sd (-)	mu (-)	mu moy (-)	sd (-)		mu (-)	mu moy (-)	sd (-)
3%-22%	1	122.4	94.4	39.6	30.1	30.1	0.00	19.6	19.2	0.55	1	28.8	26.5	3.15
	2	66.4			30.1			18.8			4	24.3		
3%-57%	1	139.3	103.8	50.2	32.1	32.0	0.15	23.5	23.1	0.62	1	95.9	78.7	24.43
	2	68.4			31.9			22.7			4	61.4		
3% -93%	1	131.0	90.7	57.0	19.9	19.8	0.15	16.6	16.7	0.20	1	38.9	33.9	7.05
	2	50.4			19.7			16.9			4	28.9		
22% -57%	7	68.5	133.3	91.6	24.5	24.6	0.17	16.7	16.7	0.06	2	23.7	20.4	4.63
	8	198.0			24.7			16.8			5	17.1		
22%-93%	7	61.7	121.8	84.9	18.1	18.1	0.05	15.3	15.4	0.05	2	13.8	10.7	4.30
	8	181.8			18.1			15.4			5	7.7		
57%-22%	3	123.9	74.6	69.7	17.9	17.8	0.06	7.6	8.9	1.80	2	16.3	14.5	2.53
	4	25.3			17.8			10.2			5	12.7		
57%-93%	3	65.1	65.1		6.5	6.5	0.04	3.9	4.3	0.56	3	16.3	13.2	4.34
	4				6.4			4.7			6	10.2		
93%-22%	5	275.9	226.4	69.9	20.4	20.6	0.26	15.8	15.7	0.14	3	14.0	13.4	0.84
	6	177.0			20.8			15.6			6	12.8		
93%-57%	5	85.7	125.1	55.8	17.3	17.3	0.02	14.2	14.2	0.06	3	14.6	12.9	2.31
	6	164.5			17.3			14.2			6	11.3		

Tableau V-7. Perméabilité à la vapeur déterminée par la méthode CS (LOCIE)

b) Courbes de variation

(Pas de courbes disponibles)

V.3. Coupelle améliorée

V.3.1. LGPM

(En cours)

V.3.2. LASIE

Courbe de pression

Remarque : Au bout du premier jour, les connexions du capteur différentiel ont été inversées d'où l'inversion de pression.

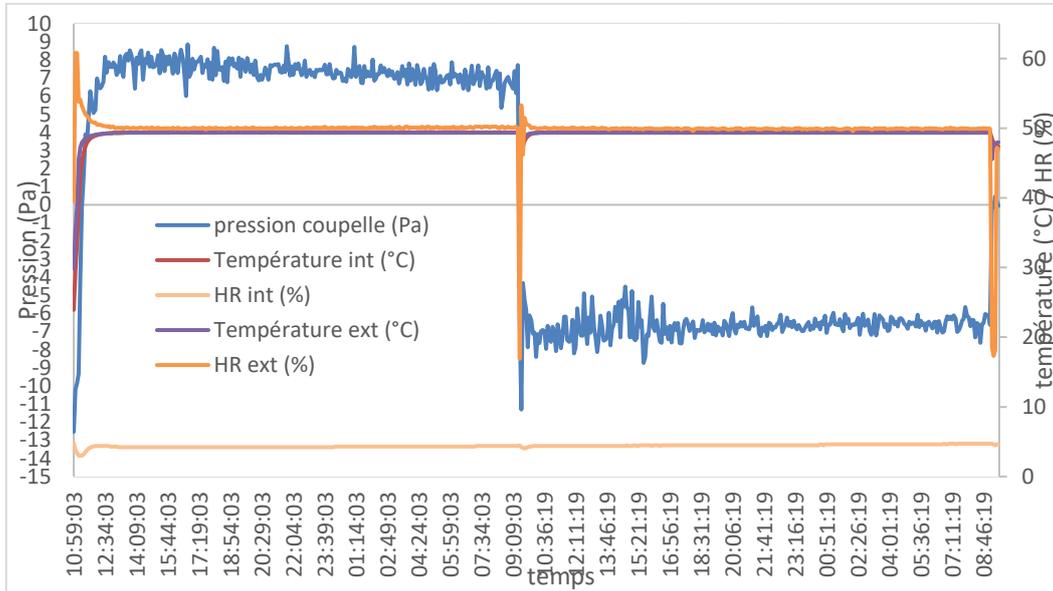


Figure V-20. Évolution de la pression, de la température et de l'HR à l'intérieur de la coupelle

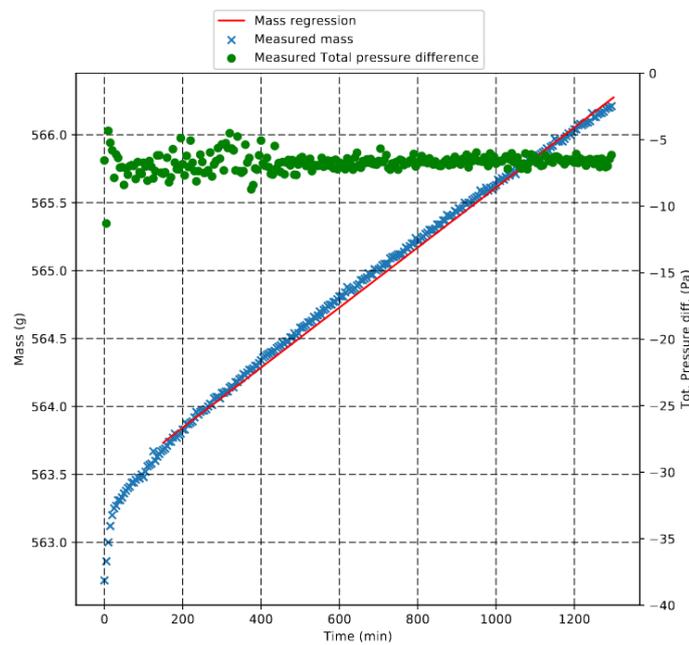


Figure V-21. Mesure de la masse et de la différence de la pression totale du béton cellulaire [Thèse de Imane OUBRAHIM].

Materials	Conditions			Vapor mass flow rate (g/min) (the slope of the linear curve)	The total pressure difference (Pa)
	$HR_{int}(\%)$	$HR_{ext}(\%)$	$T(^{\circ}C)$		
Cellular concrete	4.5	50	49.4	2.17×10^{-3}	6.65

Tableau V-8. Résultats des flux massiques du béton cellulaire obtenus par la CA.

Références du Tableau IV-4, Tableau IV-5 et Tableau IV-6 :

- [1]<https://energieplus-lesite.be/donnees/enveloppe44/enveloppe2/conductivite-thermique-des-materiaux/>
- [2]http://www.rt-batiment.fr/IMG/pdf/2-fascicule_materiaux.pdf
- [3]<https://bilans-thermiques.fr/energetique-batiments/isolation-thermique/conductivite-thermique-materiaux>
- [4]<https://www.asterre.org/torchis/>
- [5]<https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/2-thermique-la-terre-crue-ameliore-le-confort-hygrothermique.27319>
- [6]https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiLlLig-vvzAhXLGewKHc3QCtIQFnoECAyQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.domus-materiaux.fr%2Fmedia%2Fproductfile%2Ff%2Fi%2Ffiche_materiau_-_le_bois.pdf&usg=AOvVaw1sWJh2LC1ocNRuxaNE0Oj
- [7]<https://materiaux-namur.com/magazine/325/osb-panneau-tout-savoir>
- [8]https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiLlLig-vvzAhXLGewKHc3QCtIQFnoECDoQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.materiaux-naturels.fr%2Fdoc%2Fproduct%2Fn_452.pdf&usg=AOvVaw17u4wZkwzrTp0qUENNS8O2
- [9]<http://skyriding.fr/wp-content/uploads/2020/02/conductivitetableau.png>