

LOT 5

MIGRATION DE VAPEUR EN ITI BIOSOURCEE - MESURE IN-SITU ET COMPARAISON AU CALCUL WUFI



Rapport d'étude

Coordination : Enertech Scop

Décembre 2025



EXPERTISES



Perf in Mind
Rénovation performante de maisons individuelles



ENERTECH SCOP

Muriel
DUPRET

effinergie

Khedidja
MAMOU

RECTO

verzo

arcane

REMERCIEMENTS

Ce rapport constitue le **Rapport D5.2** prévu à la convention ADEME n°2204D0021.

Livrables rédigé par Enertech Scop

Soutiens du projet et Comité de Pilotage :

ADEME : Jonathan LOUIS - DGEC, ANAH – CLER - AREC Occitanie, Envirobat Occitanie - Région Normandie, Région Bourgogne-Franche-Comté, Région Centre-Val de Loire – Dorémi

Participation au Comité technique :

ADEME - CSTB, CEREMA – AQC – Karibati - EDF R&D, Uwe BRANKAMP

CITATION DE CE RAPPORT

SCOP Enertech : Nicolas ANDREAU, Thierry RIESER, Julien SPILEMONT, Mickaël GUERNEVEL, Yoann BAUDOUIN, Roman Nicolas, Damien JANNOT, Jean-Paul ZIMMERMANN, Victor CAMBON, Stéphane MOTEAU, Thérèse DEVIGON, Edwina PEDLEY, Muriel DUPRET, Effinergie : Sébastien LEFEUVRE, Laura BRUNO, Khedidja MAMOU, REcto : Grégory HERFRAY, Verso : Marion SIE, Arcanne : Samuel COURGEY, François GROSDÉMOUGE, Etienne SAMIN. 2025. SYNTHÈSE TRANSVERSALE. 191 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Tous les livrables du projet seront disponibles sur <https://www.effinergie.org/>

Des fiches opérations de certaines maisons suivies dans le cadre de Perf in Mind et Perf in Mind 2 sont également disponibles sur l'Observatoire BBC d'Effinergie :

<https://www.observatoirebbc.org/perfinmind>.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Cette publication, réalisée à l'initiative de son/ses auteur(s), a reçu un soutien financier de l'ADEME, mais n'engage pas l'ADEME. Son contenu (ou les données qu'elle contient) n'engage que la seule responsabilité de son/ses auteur(s) et ne représente pas la position de l'ADEME.

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2204D0021

Étude réalisée par SCOP Enertech, Muriel DUPRET, Effinergie, REcto, Verso, Arcanne, Khedidja MAMOU pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Jonathan LOUIS
Appel à projet de recherche : Vers des bâtiments responsables
Coordination technique - ADEME : Jonathan LOUIS

1.1 Table des matières

Contexte et objectifs	5
Résumé de l'étude	6
Glossaire.....	8
1. Méthodologie d'instrumentation.....	9
1.1 Le choix des logements instrumentés	9
1.2 Instrumentation in situ.....	11
1.3 Critères d'analyse.....	15
2. Analyse des mesures in situ.....	19
2.1 Maison Jura A	19
2.1.1 Présentation de la maison	19
2.1.2 Visualisation des mesures – maison Jura A	20
2.1.3 Conclusions sur la maison Jura A.....	28
2.2 Maison Jura B	29
2.2.1 Présentation de la maison	29
2.2.2 Visualisation des mesures – maison Jura B	30
2.2.3 Conclusions sur la maison Jura B	42
2.3 Maison Jura C	43
2.3.1 Présentation de la maison	43
2.3.2 Visualisation des mesures – maison Jura C	45
2.3.3 Conclusions sur la maison Jura C.....	57
2.4 Maison Jura D	58
2.4.1 Présentation de la maison	58
2.4.2 Visualisation des mesures – maison Jura D	59
2.4.3 Conclusions sur la maison Jura D	74
2.5 Appartement Brest 1	75
2.5.1 Présentation du logement	75
2.5.2 Visualisation des mesures – appartement Brest 1	76
2.5.3 Conclusions sur l'appartement Brest 1.....	81
2.6 Appartement Brest 2	82
2.6.1 Présentation du logement	82
2.6.2 Visualisation des mesures – appartement Brest 2.....	83
2.6.3 Conclusions sur l'appartement Brest 2	89
2.7 Maison Ardèche.....	90
2.7.1 Présentation de la maison	90
2.7.2 Visualisation des mesures – maison Ardèche	91
2.7.3 Conclusions sur la maison Ardèche.....	104

2.8	Conclusions sur la visualisation des mesures	105
3.	Comparaison entre mesure et modélisation	108
3.1	Modélisations sous WUFI	108
3.1.1	Choix des cas d'étude à simuler	108
3.1.2	Logiciel utilisé	108
3.1.3	Paramètres d'entrée	108
3.2	Simulations BREST 1	113
	Rappel des caractéristiques du logement.....	113
3.2.1	Variante 1 – Climat ext. WUFI / int. WTA 6-2 humidité moyenne	115
3.2.2	Variante 2 – Climat ext. WUFI / int. mesuré Brest 1.....	122
3.2.3	Variante 3 – Climat ext. WUFI / int. WTA 6-2 humidité élevée	128
3.2.4	Variante 4 – Climat ext. WUFI / int. ISO 13788 classe 4.....	134
3.2.5	Variante 5 – Climat ext. année réelle / int. mesuré Brest 1	139
3.2.6	Variante 6 – Nature de la pierre	144
3.2.7	Variante 7 – Largeur de joint.....	146
3.2.8	Conclusions sur les Simulations Brest 1	148
3.3	Simulations JURA A	150
	Rappel des caractéristiques du logement.....	150
3.3.1	Variante 1 – Climat ext. année réelle / int. mesuré Jura A.....	152
3.3.2	Variante 2 – Climat ext. année réelle / int. WTA 6-2 humidité moyenne	158
3.3.3	Variante 3 – Climat ext. année réelle / int. WTA 6-2 humidité moy. +5%	162
3.3.4	Variante 4 – Climat ext. année réelle / int. ISO 13788 classe 1	166
3.3.5	Conclusions sur les Simulations Jura A	170
3.4	Simulations JURA C	171
	Rappel des caractéristiques du logement.....	171
3.4.1	Variante 1 – Climat ext. année réelle / int. mesuré Jura C	173
3.4.2	Variante 2 – Climat ext. année réelle / int. normé WTA et ISO	180
3.4.3	Variante 3 – Climat ext. WUFI / int. normé WTA et ISO	185
3.4.4	Conclusions sur les Simulations Jura C	190
3.5	Simulations Ardèche	192
	Rappel des caractéristiques du logement.....	192
3.5.1	Variante 1 – Climat ext. année réelle / int. mesuré vs. WTA.....	194
3.6	Conclusion Comparaison entre mesure et modélisation	198

Contexte et objectifs

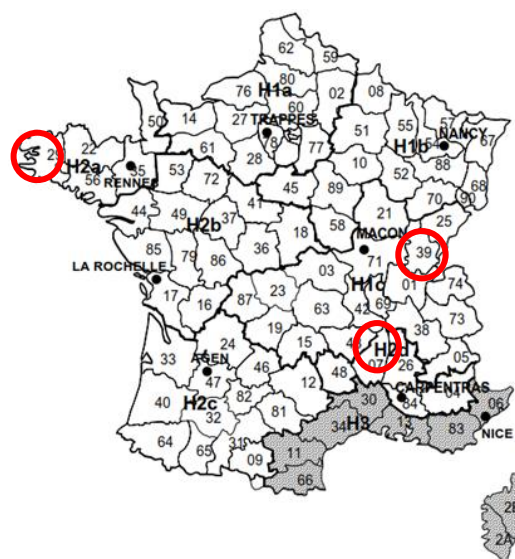
Le présent rapport a été réalisé dans le cadre du projet **Perf in Mind 2** avec le soutien de l'ADEME dans le cadre de son Appel à Projet Recherche « Vers des bâtiments responsables ». Dans la continuité de Perf in Mind¹, ce programme de recherche vise à éclairer le débat sur la rénovation performante des maisons individuelles, par des mesures et recueil de données sur le terrain.

Le Lot 5 de Perf in Mind 2 adresse spécifiquement la question de **l'isolation des murs par l'intérieur en isolant biosourcé**. En effet, malgré l'intérêt environnemental du biosourcé (voir à ce sujet les livrables du Lot 4 de Perf in Mind 2), l'usage de ces isolants en isolation par l'intérieur ne va pas de soi aujourd'hui, et peine à trouver sa place dans le corpus normatif.

La tâche 5.1, coordonnée par ARCANNE, fait un état des lieux bibliographique à l'échelle française et européenne sur les biosourcés, leurs propriétés, et leurs conditions de mise en œuvre pérenne. Nous invitons le lecteur à prendre connaissance des livrables de cette tâche en préalable au présent rapport.

La présente tâche 5.2, coordonnée par Enertech SCOP, s'est centrée sur la mesure in-situ de la température et de l'hygrométrie à plusieurs niveaux dans des complexes d'isolation intérieure en biosourcé, sur des murs potentiellement les plus problématiques à savoir les murs en pierre très dure (pierres de classe 3 au sens du rapport « Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien »²). Au total nous avons pu instrumenter 19 murs dans 7 logements, les parois et le climat des cas d'étude ayant été volontairement choisis pour être *a priori* défavorables :

Dépt	Altitude	Logements	Nb murs
39	235 m	Maison Jura A	3
39	270 m	Maison Jura B	4
39	1240 m	Maison Jura C	3
39	905 m	Maison Jura D	3
29	<100 m	Appart. Brest 1	1
29	<100 m	Appart. Brest 2	2
07	486 m	Maison Ardèche	3
Total		7 logements	19 murs



Le présent rapport expose la méthodologie d'instrumentation, l'analyse des résultats mesurés in situ, et la comparaison entre ces mesures et la modélisation des mêmes murs avec les mêmes climats avec le logiciel WUFI.

¹ <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/5265-perf-in-mind-renovation-performante-de-maisons-individuelles.html>

² Etude réalisée par Enertech SCOP pour Oktave et le programme Climaxion de la Région Grand Est et de l'ADEME, en partenariat avec DORÉMI. Rapport publié en décembre 2017. Rapport disponible sur : <https://www.enertech.fr/migration-dhumidite-et-de-vapeur-dans-les-parois-du-bati-ancien-2/>

Résumé de l'étude

La [partie 1](#) présente la méthodologie de l'étude, en particulier les critères adoptés pour cette étude qui proviennent du rapport SimHuBat.

La [partie 2](#) présente les résultats de la mesure in situ. On peut retenir les conclusions principales :

Globalement, 18 murs sur les 19 instrumentés ne présentent pas de risque pathologique.

Malgré le risque que présente à priori l'isolation par l'intérieur sur un mur en pierres dures (ici calcaire dur et granite), les complexes avec freine-vapeur (ici tous hygrovariables sauf 2 parois) répondent aux critères de SimHuBat, y compris pour les climats de montagne à plus de 900m ([Jura C](#) et [Jura D](#)), et même en l'absence d'une ventilation mécanique pour ces deux mêmes logements.

On note au passage l'efficacité des freine-vapeurs pour diminuer l'humidité dans l'isolant. La pertinence de la règle dite des 1/3 – 2/3 semble également confirmée.

Seul l'un des murs du logement [Brest 2](#) ne respecte pas 2 des critères de SimHuBat à l'interface entre le mur et l'isolant. Le cas de ce logement se distingue pour 5 raisons :

- Le climat est particulièrement humide toute l'année, du fait de la **proximité immédiate de l'océan** (climat de bord de mer).
- Le **chauffage n'est pas continu tout l'hiver**.
- **La VMC du logement Brest 2 a été souvent à l'arrêt et son débit est faible**.
- Un **enduit intérieur** a été réalisé avant isolation. Or la mesure a été réalisée sur la 1^e année après isolation. Il est possible que l'enduit intérieur, pas encore sec, ait apporté de l'humidité à l'interface mur-isolant. Si c'est le cas, l'humidité va baisser sur les années à venir.

On note que les murs de Brest 1 et 2 ont été isolés en fibre de bois alors que c'est de la ouate de cellulose qui est utilisée pour les autres murs. Or la conversion du critère de SimHuBat de 23% d'humidité en masse correspond à une humidité relative de 93,5% pour la ouate de cellulose contre 86,6 % HR pour la fibre de bois (voir [l'encadré méthodologie](#)). **Ce critère est donc bien plus exigeant a priori**. A la lumière du livrable 5.1, on peut s'interroger sur la robustesse de ce critère appliqué à des isolants biosourcés dans leur grande diversité. On peut s'interroger également sur l'absence de prise en compte dans les critères de SimHuBat de la température en combinaison avec l'humidité, comme cela se fait ailleurs en Europe (voir le livrable 5.1).

Enfin, la maison [Ardèche](#) a permis d'instrumenter un **mur semi-enterré**. On y observe une migration inversée du mur vers le logement toute l'année. Le caractère hygrovariable du freine-vapeur semble bien aider à permettre le séchage du mur. L'humidité à l'interface entre mur et isolant atteint des valeurs élevées (HR maximale de 93% en TH1) sans toutefois dépasser les critères de SimHuBat.

La [partie 3](#) du rapport présente les comparaisons entre ces mesures et des simulations WUFI. Les conclusions que nous en tirons sont de 2 ordres : d'une part les conclusions pour les concepteurs qui utilisent WUFI, et d'autres parts les conclusions sur le caractère optimiste ou pessimiste de la simulation WUFI.

Pour les concepteurs qui utilisent WUFI, on note :

- Que le climat intérieur normé EN15026 / WTA 6-2 humidité moyenne ou ISO 13788 humidité classe 1 semble bien représenter les logements correctement ventilés.
- Que le climat WTA 6-2 humidité élevée ou ISO 13788 humidité classe 4 reflète plutôt des logements où la ventilation est absente ou dysfonctionnelle. Voir [§3.2.3](#) et [3.2.4](#).

- Les cas où WUFI indique une absence de risque pathologique correspondent aux cas où la mesure n'indique pas de problème. Le cas de Brest 2 est indiqué comme à risque par la simulation, à juste titre. En revanche la simulation du cas Brest 1 ne respecte par le critère 1 de SimHuBat (augmentation de l'humidité d'année en année). La mesure, réalisée sur 1 an, ne permet pas de confirmer ou d'infirmer la présence de ce risque.
- Pour la simulation à Brest, les variantes sur la nature de la pierre et l'épaisseur des joints n'impacte que peu le résultat. Voir [§3.2.6](#) et [3.2.7](#). Pour cette configuration et ce climat, ce sont les variantes sur le climat intérieur qui ont le plus d'impact sur les résultats.

Du point de vue du caractère optimiste ou pessimiste de WUFI :

- Pour l'ensemble des comparaisons, les simulations WUFI sont plus pessimistes que la mesure in situ. Les humidités simulées à l'interface entre le mur et l'isolant sont toujours supérieures (ou égale dans un cas) aux humidités mesurées.
- Pour certaines parois, WUFI ne reflète pas l'importante inertie hygrothermique des complexes mur/isolant mesurés. C'est le cas des murs [Jura C](#) et [Ardèche](#).

Le rapport propose également une réflexion sur la méthode d'instrumentation (voir [§2.8](#)), et des pistes d'investigations complémentaires (voir [§2.6.3](#)).

Glossaire

Voir aussi le [glossaire « Humidité »](#) mis en ligne par Arcanne.

Capillarité : un matériau est dit capillaire s'il comporte des « canaux » dans lesquels l'eau liquide se déplace facilement. Ainsi un matériau capillaire peut sécher rapidement en cas d'humidité accidentelle ou occasionnelle. Les isolants biosourcés sont généralement capillaires (laine de bois, ouate de cellulose, etc...) à l'exception notable du liège. Les enduits à la chaux naturelle (NHL, voire CL ou DL) sont également capillaires, à la différence des enduits à base de ciment.

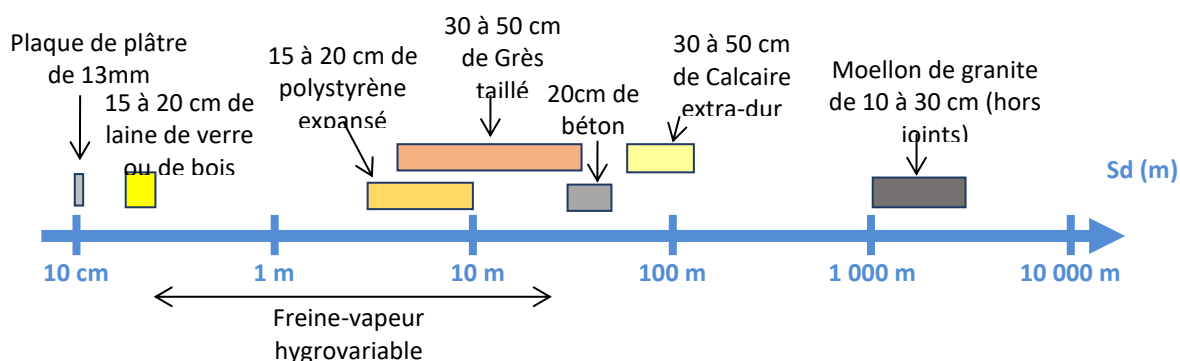
Courbe de sorption : pour un matériau donné, la courbe de sorption indique la masse en eau contenue par le matériau à l'équilibre pour une humidité relative donnée. Voir à ce sujet le [Zoom méthodologique](#) page 16.

FV : Freine-vapeur. Un freine-vapeur est une membrane d'étanchéité à l'air qui régule le flux de vapeur, sans le bloquer totalement. Il existe des freine-vapeurs hygrovariables, dont la résistance à la migration de vapeur (S_d) varie selon les conditions. On parle de freine vapeur hygrovariable « à fort S_d » lorsqu'il peut dépasser un S_d de 18m en hiver (type Isover Vario Xtra, Pro Clima Intello F18, etc.). Voir aussi : pare-vapeur.

HR : Humidité Relative

Hygroscopique : un matériau est dit hygroscopique s'il est capable de stocker en eau liquide de la vapeur d'eau dans sa structure (pores). Les isolants biosourcés sont généralement hygroscopiques.

S_d : résistance à la migration de vapeur d'eau. Exprimé en mètre (m), il représente l'épaisseur d'air qui a une même résistance au passage de la vapeur que le matériau. Pour les matériaux courants hors membranes, il se calcule comme le produit de l'épaisseur du matériau par le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau, μ (μ). $S_d = e \times \mu$.



Quelques ordres de grandeur de S_d (sources diverses)

VMC : Ventilation Mécanique Contrôlée.

1. Méthodologie d'instrumentation

1.1 Le choix des logements instrumentés

Le choix des logements instrumentés a été guidé par différents critères :

- Maison en pierre, plutôt des pierres « fermées » de type granite ou calcaire dur ;
- Maison rénovée avec une isolation par l'intérieur en biosourcé de type ouate de cellulose ou laine de bois (les plus utilisées en ITI) ;
- La recherche d'une grande diversité de climats et d'altitude, incluant des climats a priori défavorables pour une ITI.
- Isolation réalisée si possible depuis quelques années.

Nous avons pu obtenir l'accord des ménages pour instrumenter 7 logements, soit un total de 19 murs :

Dépt	Logements	Altitude	Nature des murs	Isolant (âge de l'isolation)	Ventilation	Murs
39	Maison Jura A	235 m	Pierre calcaire dure jaune	Ouate de cellulose projetée humide (1 an)	Double flux	3 murs (chambre, salon, salle de bain)
39	Maison Jura B	270 m	Pierre calcaire dure jaune	Ouate de cellulose projetée humide (10 ans)	Simple flux hygro A	4 murs (3 dans 2 chambres 1 dans le bureau)
39	Maison Jura C	1240 m	Moellons de pierres calcaires dures	Ouate de cellulose (bureau 15 ans / chambres 1 an)	Sans VMC, aération par ouverture des fenêtres	3 murs (2 chambres et un bureau)
39	Maison Jura D	905 m	Mur pierre calcaire dure, enduit ext. au ciment	Ouate de cellulose insufflée (15 ans)	Sans VMC, aération par ouverture de fenêtre	3 murs (2 dans la cuisine – séjour et 1 dans une chambre)
29	Appart. Brest 1	<100 m	Granite (?)	Laine de bois (1 an)	VMC SF	1 mur (chambre)
29	Appart. Brest 2	<100 m	Granite (?)	Laine de bois (1 an)	VMC SF (souvent arrêtée)	2 murs (chambre et cuisine)
07	Maison Ardèche	486 m	Pierre granite d'Ardèche	Ouate de cellulose insufflée (8 ans)	Double flux	3 murs (3 chambres)
Total	7 logements					19 murs

Cet échantillon de murs, bien que de taille relativement modeste, permet de couvrir une variété intéressante de situations :

- Le Jura présente un climat continental aux hivers froids, en particulier en altitude. 1 maison sur les 4 du Jura comporte un enduit à base de ciment, 2 cumulent l'absence de ventilation mécanique et une altitude de plus de 900m, ce qui semble a priori une configuration particulièrement défavorable.
- La ville de Brest présente un climat de bord de mer, à l'humidité élevée toute l'année.
- La maison en Ardèche, en altitude moyenne, bénéficie d'un climat plus chaud et moins humide. Cependant l'un des murs est semi-enterré ce qui est également une configuration a priori défavorable.

Pour chacune des maisons, le choix des murs à instrumenter a pris en compte les critères suivants :

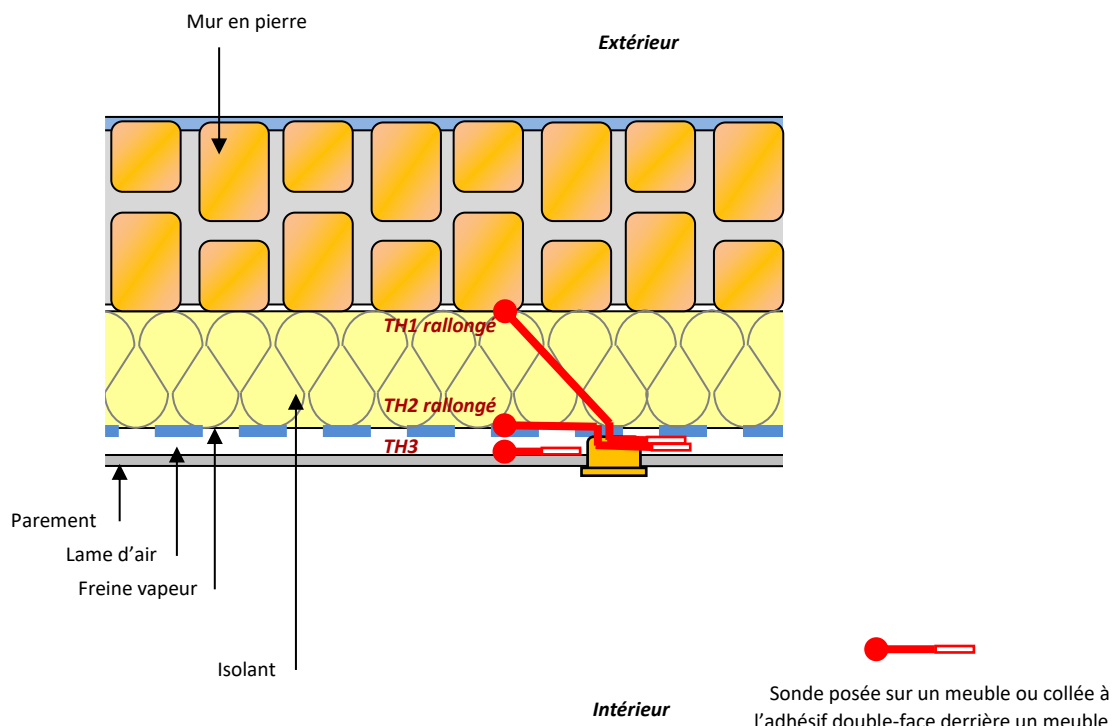
- Au moins une partie des murs est peu ensoleillé ;
- Le mur exposé aux pluies dominantes a été instrumenté si cela était possible.

Voir le détail des orientations maison par maison par la suite.

1.2 Instrumentation in situ

Position des sondes (cas général) :

Le schéma ci-dessous décrit la position des sondes TH1, TH2 et TH3 sur une coupe de principe du complexe de mur. En complément une sonde d'ambiance intérieure est posée dans la pièce.



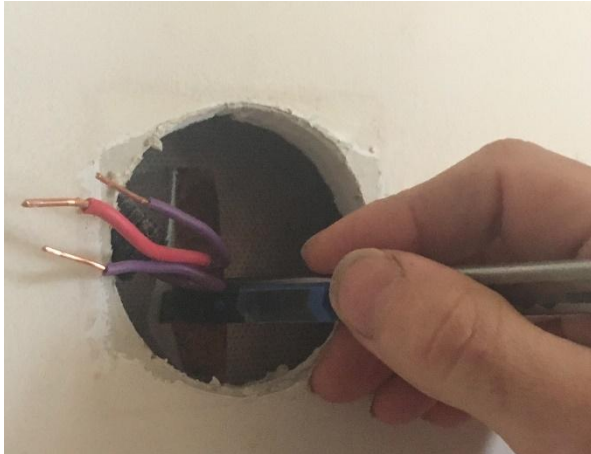
Le reportage photo ci-dessous décrit la mise en œuvre concrète des sondes TH1 à TH3 :



Sonde thermo-hygromètre utilisée (version normale)



Démontage d'une prise ou d'un interrupteur



Découpage du freine-vapeur au cutter



Outil « persuadeur » pour créer un passage dans les isolants denses



Création d'un passage dans l'isolant



Outil « fourre-sonde » pour positionner le capteur contre le mur pierre



Positionnement de la sonde TH1 rallongée contre le mur



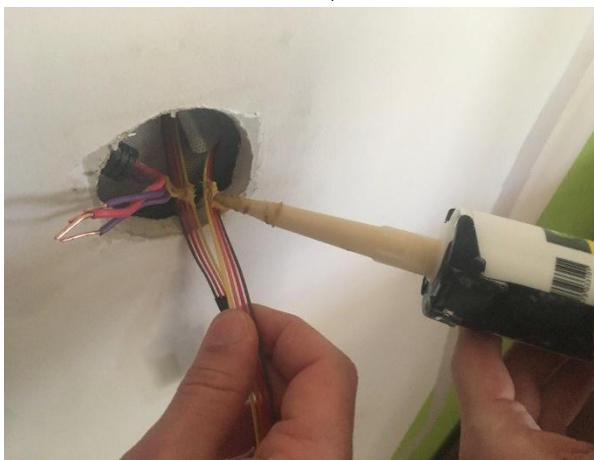
Libération de la tête de la sonde. On s'assure que la sonde reste en place et que l'isolant reprend sa place au retrait du fourre-sonde



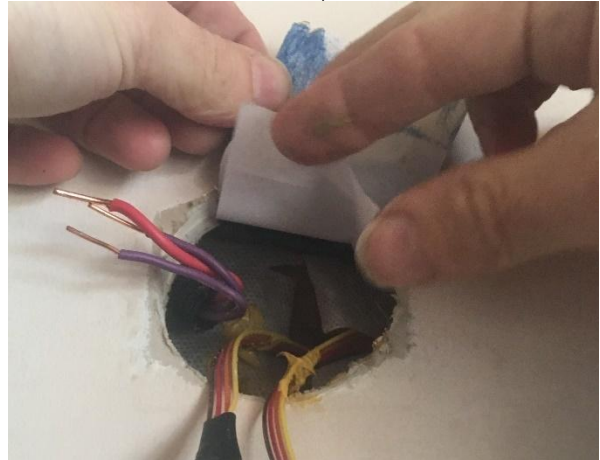
Fourre-sonde coudé pour passer entre l'isolant et le freine-vapeur



Positionnement et libération de TH2 derrière le freine-vapeur



Encollage autour des fils pour rétablir l'étanchéité à l'air



Mise en place d'un adhésif d'étanchéité à l'air pour rétablir la continuité du freine-vapeur

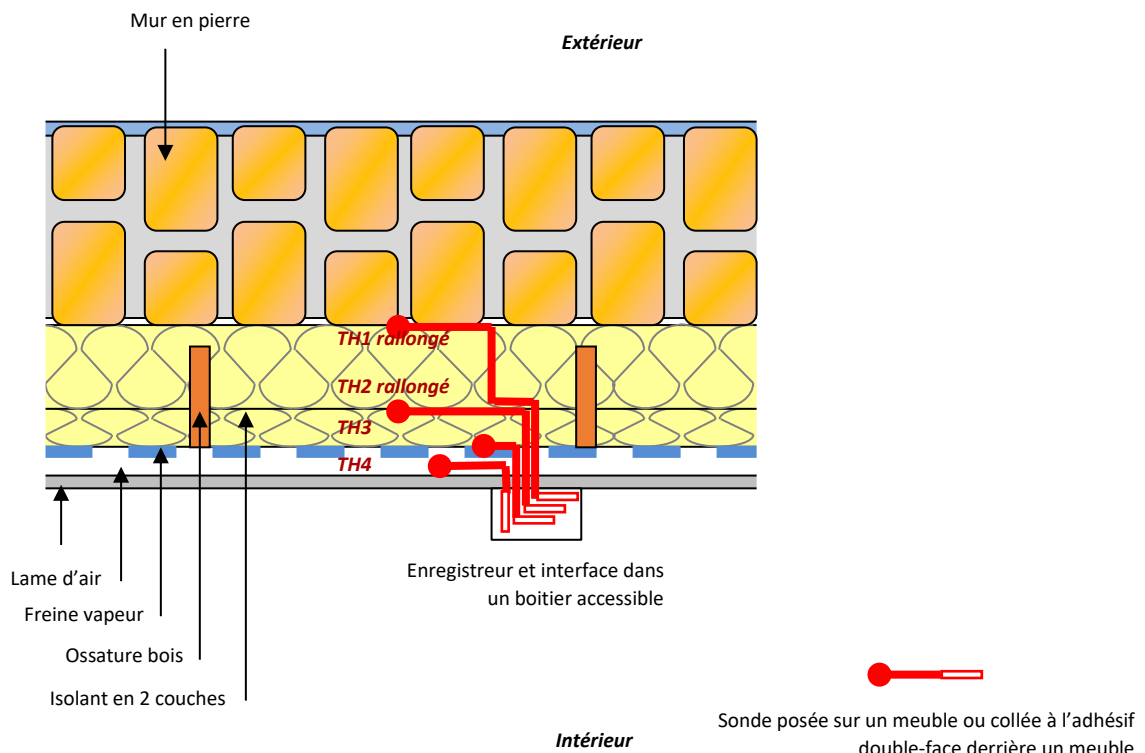


La sonde TH3 est collée à l'adhésif double-face dans la lame d'air



Remise en place du boîtier électrique et de l'appareillage

Par exception au protocole ci-dessus, les deux appartements à Brest ont été instrumentés en déposant l'isolant :



Les interfaces pour récupérer les données et changer les piles ont été positionnées dans un boîtier accessible, afin de permettre une instrumentation sur plusieurs années avec récolte des données tous les ans.

Précision des sondes utilisées :

0,5 °C pour la température et 5% en HR

1.3 Critères d'analyse

Pour les besoins de la présente étude, nous proposons de nous référer au guide PACTE SimHuBat de 2021 : Détermination des hypothèses pour les simulations de transferts couplés température / humidité dans les parois de bâtiment³, qui dans son paragraphe 8 « Exploitation des résultats des simulations » rappelle quels critères et seuils utiliser pour exploiter les résultats.

a. Vérifier que la teneur en eau de la paroi n'augmente pas et se stabilise :

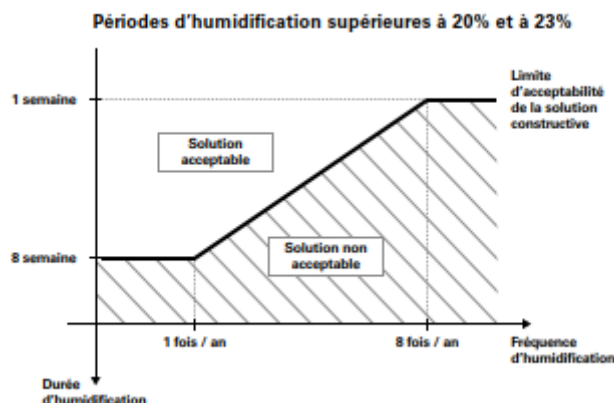
On peut considérer que la stabilisation est atteinte si l'augmentation annuelle de la teneur en eau totale ne dépasse pas 2 % entre les deux dernières années de simulation. (Ce critère n'a pas pu être mesuré in-situ, mais nous le rappelons car nous l'utiliserons pour analyser le résultat des simulations WUFI).

b. Pas de condensation dans la masse :

Une paroi ne pourra pas contenir de point où l'humidité relative HR est supérieure à 98 %.

c. Pour la pérennité de l'isolant biosourcé, on retient les critères suivants :

- **Pour l'absence de développement fongique :** la teneur en eau ne pourra être qu'occasionnellement (moins de 8 semaines par an) supérieure à 23 % en masse dans cet élément. Pour l'analyse de ce critère on investiguera une zone de **5mm d'épaisseur et de 20 mm** de longueur. Une précision : les périodes au-delà de 23 % de durée inférieure à une semaine ne seront pas comptabilisées, n'étant pas suffisamment longues pour provoquer le développement fongique.



Représentation des limites d'humidification des matériaux (issu du guide Pacte SimHuBat)

- A noter qu'il est bien précisé dans le guide que « Ces critères utilisés à l'heure actuelle pour évaluer le risque de développement fongique dans les matériaux biosourcés ne donnent pas entière satisfaction, c'est la raison pour laquelle des actions de recherche sont en cours pour améliorer leur fiabilité. ». Voir aussi à ce sujet la revue de littérature scientifique réalisée par ARCANNE, objet du livrable 5.1 de Perf in Mind 2. Ainsi ce seuil à 23% en masse copié sur le bois semble sévère ; parce que les IBS sèchent plus vite que le bois, et parce que cette limite est liée à la perte de résistance mécanique. (Les isolants n'étant pas porteurs, pour une même sensibilité, les limites demandées devraient donc être moins sévères)
- Absence d'eau libre dans les matériaux à base de bois :

³ Rapport issu du projet SimHuBat, 56 pages, Octobre 2021, disponible notamment sur le [site de ProRéno](#).

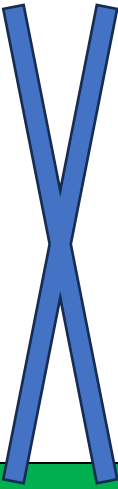
Les matériaux à base de bois ont la capacité de contenir de l'eau libre ou de l'eau liée. Comme précisé dans le paragraphe 8.7 du guide SimHubat de 2021 :

« L'eau est dite liée ou hygroscopique quand elle est « retenue » chimiquement (liaisons hydrogènes) par les fibres de bois. Les molécules d'eau sont alors fixées dans le matériau lui-même.

L'eau libre ou capillaire, donc liquide, apparaît dans le bois lorsque son taux d'humidité (en % en masse) dépasse le point de saturation des fibres. Pour les principales essences résineuses utilisées en structure, le point de saturation des fibres est atteint lorsque l'humidité du bois **dépasse 30 % en masse**.

Concernant tous les produits à base de bois, l'humidité en masse ne doit pas dépasser 30 % même ponctuellement sur l'année investiguée. »

Ainsi pour chaque cas d'étude, nous pouvons synthétiser ces critères sous forme d'un tableau avec des couleurs. Critère 1 à 4 dans le cas d'une simulation numérique et critères 2 à 4 dans le cas de mesures in situ :

Critères	Description	Mur dans sa globalité	Position 1 : mur / isolant	Position 2 : Isolant / FV	Position 3 : FV / lame d'air / parement
1 (simulation)	Teneur en eau (en masse) de la paroi	Stabilisé ou en diminution			
2	Pas de condensation dans la masse (HR > 98%)				
3	Teneur en eau (en masse) en tout point <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)				
4	Absence d'eau libre en tout point, à aucun moment : teneur en eau en masse < 30%				
Criticité globale (synthèse)	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait				

Légende :

Vert : critère satisfait **Rouge** : critère non satisfait

En synthèse des critères de SimHuBat, nous proposons un indicateur baptisé « Criticité globale » : si au moins un des critères n'est pas respecté, alors la composition du mur présente un risque du point de vue hygrothermique.

Zoom méthodologique :

Comment déterminer la masse d'eau dans le matériau à partir de la mesure d'humidité relative ?

A quels seuils correspond la teneur de 23% en masse d'eau pour les différents isolants ?

Les mesures in situ que nous avons faites sont des mesures d'humidité relative et de température. Pour apprécier le critère sur la teneur en eau du matériau, nous devons utiliser la courbe de sorption du matériau :

Courbe de sorption

Les courbe de sorption et désorption peuvent être obtenues pour tout matériau, mais elles sont particulièrement intéressantes pour les matériaux dits hygroscopiques, qui sont susceptibles de capter et de stocker de la vapeur, en eau, de l'ambiance avec laquelle ils sont en contact.

Il s'agit de la caractéristique des matériaux à retenir/contenir de l'eau dans leur structure. La teneur en eau en masse dépend de l'humidité relative ambiante et bien sûr de la structure des matériaux étudiés.

On mesure ces courbes de teneur en eau en fonction de l'humidité relative en laboratoire ; en mettant le matériau dans une enceinte à une température constante (23°C) dans laquelle on fait varier l'humidité relative d'environ 10 % à presque 100%, et en pesant le matériau durant le test. Pour chaque matériau on obtient ainsi une courbe appelée isotherme d'adsorption et on peut aussi obtenir la courbe d'isotherme de désorption (mesure de la teneur en eau du matériau lorsque l'on passe de 100% d'humidité relative à 0%).

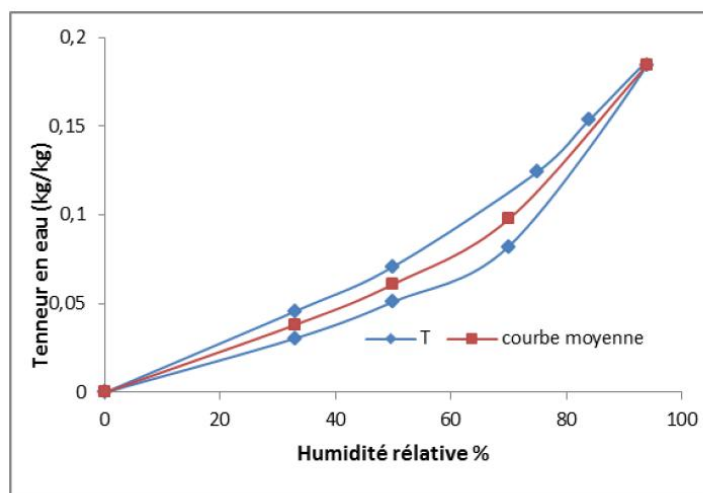


Figure 3 : Isotherme d'adsorption et de désorption du béton de chanvre amidon à 23°C ainsi que la courbe moyenne utilisé pour la simulation.

Source : Umurigirwa, Benitha Sandrine, Maalouf Chadi, Halouani Ali et Ton Hoang Mai. 2014 « Etude numérique et expérimentale du comportement hygrothermique d'un agro-composite à base de fibres de chanvre et d'amidon de blé. ». Conférence IBPSA France-Arras-2014

Grace à cette courbe de sorption (en général il s'agit comme ci-dessus de la moyenne des courbes isotherme d'adsorption et désorption) et à la masse volumique du matériau sec, on en déduit la teneur en eau en % sur masse sèche ou en kg d'eau par m³ de matériau (kg/m³).

Par exemple pour la ouate de cellulose que nous retrouverons dans de nombreux sites instrumentés, nous partons de la courbe de sorption trouvée dans la base de données matériaux de WUFI 6.5 à notre disposition :

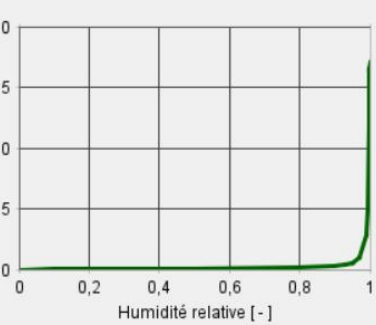
Fibre de cellulose		50	0,95	2000	0,034	1,8
--------------------	---	----	------	------	-------	-----

Fonction de stockage d'humidité (sorption)
 Coefficient de Transport Liquide, Succion
 Coefficient de Transport Liquide, Redistribution
 Facteur de résistance à la diffusion de vapeur, fonction
 Conductivité thermique, fonction de l'humidité
 Conductivité thermique, fonction de la température
 Enthalpie, fonction de la température

☐ Approximer

N°	HR [-]	Teneur en e... [kg/m³]
1	0	0
2	0,1	0,25
3	0,5	0,89
4	0,8	3
5	0,9	6,6
6	0,93	9,7
7	0,95	14
8	0,97	24,4
9	0,99	69
10	0,995	123
11	0,999	296
12	0,9999	411
13	1	426

% en masse
0
1
2
3
6
13
19
28
49
138
246
592
822
852



Courbe de sorption d'une référence de Ouate de Cellulose – Source : WUFI 6.5

Nous constatons ici que la teneur en eau est exprimée en kg d'eau / m³ de matériau. Connaissant la masse volumique de la ouate décrite dans la base de données du WUFI, qui est de 50 kg/m³, nous revenons à une valeur de teneur en eau en % sur masse sèche. Nous avons ajouté en orange la teneur en eau en %.

Nous avons ainsi à quelle humidité relative correspond les teneurs en eau des critères 3 et 4 pour la ouate de cellulose insufflée :

- **La ouate** atteint 23% de teneur en eau pour une humidité relative de **93,5%** environ,
- La ouate atteint 30% de teneur en eau en masse pour une Humidité Relative de **95%** environ.

Attention toutefois, il est difficile d'être précis dans cette zone d'humidité relative, donc ces valeurs sont à prendre comme des valeurs approximatives.

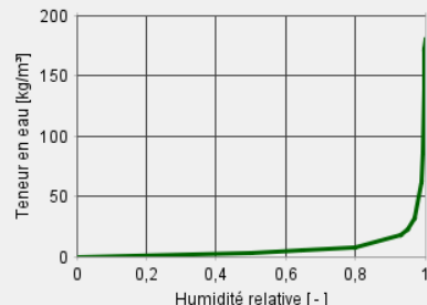
Pour la fibre de bois : la courbe de sorption est différente de celle de la ouate de cellulose.

Dans la base WUFI on dispose de la courbe de sorption de la fibre de bois Pavaflex® de densité 50 kg/m³ :

Fonction de stockage d'humidité (sorption)
 Coefficient de Transport Liquide, Succion
 Coefficient de Transport Liquide, Redistribution
 Facteur de résistance à la diffusion de vapeur, fonction
 Conductivité thermique, fonction de l'humidité
 Conductivité thermique, fonction de la température
 Enthalpie, fonction de la température

☐ Approximer

N°	HR [-]	Teneur en e... [kg/m³]
1	0	0
2	0,5	3,1
3	0,65	4,9
4	0,8	7
5	0,93	17,3
6	0,95	22,2
7	0,97	31,7
8	0,99	61,6
9	0,995	85,8
10	0,999	138
11	0,9995	153
12	0,9999	172
13	1	180



Courbe de sorption de la Fibre de bois Pavaflex 50 kg/m³ – Source : WUFI 6.5

Pour les critères 3 et 4 on retiendra :

- **La fibre de bois** atteint 23% de teneur en eau pour une humidité relative de **86,6%** environ,
- Elle atteint 30% de teneur en eau en masse pour une humidité Relative de **91 %** environ.

2. Analyse des mesures in situ

2.1 Maison Jura A

2.1.1 Présentation de la maison

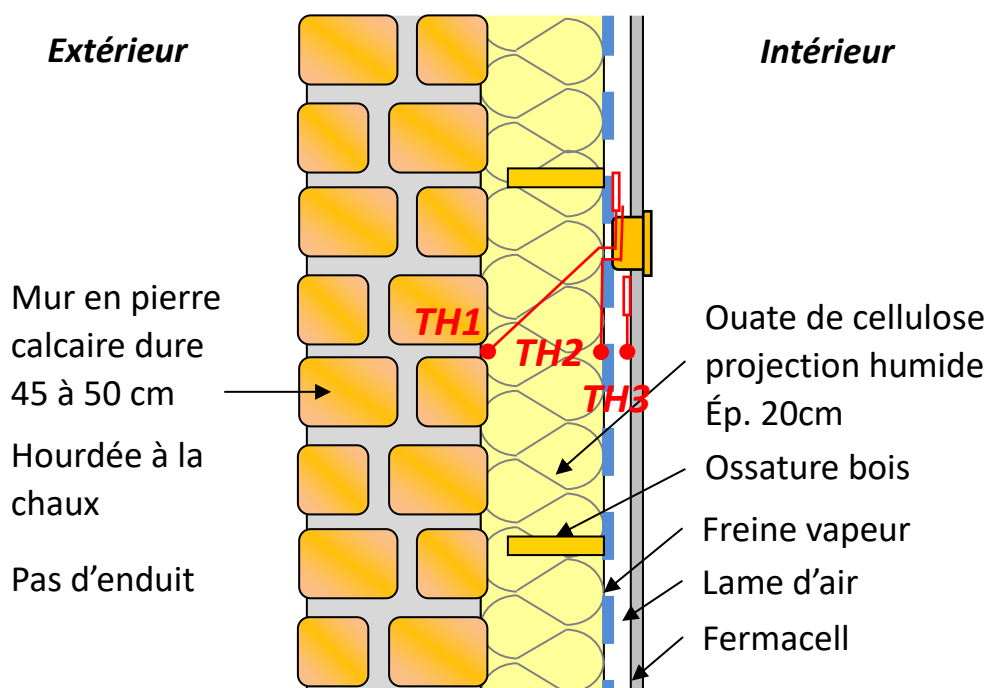
Département : Jura (39)

Altitude : 235 m

Description du mur : Pierre calcaire dure jaune (3 sur 4 au niveau dureté), épaisseur 45 à 50cm, hourdée à la chaux, pas d'enduit, joint de pierre creux façades E et O, Pignon joints remplis

Isolation intérieure en ouate de cellulose projetée humide 20cm entre ossature bois, FV Intello Plus, lame d'air, Fermacell.

Isolation réalisée 1 an avant l'instrumentation.



Ventilation : VMC Double flux

Pièces instrumentées et orientation :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre	Mur Nord	R+1	40° N-E	Interrupteur
Salon	Mur Est	R+1	130° Est	Prise basse
Salle de bain	Mur Nord	R+1	40° N-E	Haut de mur

Le mur Ouest n'a pas été instrumenté car il est protégé de la pluie par une grande avancée de toit. De même que le mur Sud qui donne sur un espace tampon non chauffé.

2.1.2 Visualisation des mesures – maison Jura A

Période de mesure

Historique :

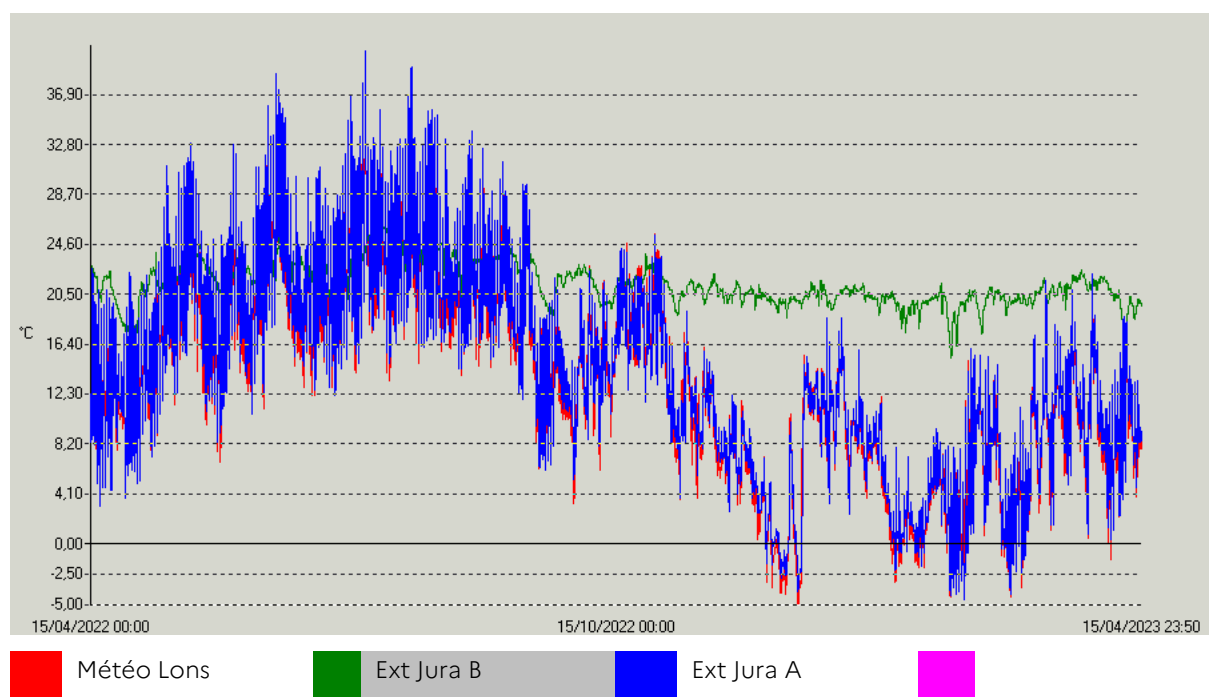
- Programmation des sondes la semaine du 7 mars 2022
- Instrumentation le 24/03/2022
- Renvoi de sondes suite au pb de piles le 06/04/2022
- Relance de l'enregistrement le 10/04 ou 11/04
- Dépose des sondes : 18/04/2023
- Mise en base des données le 27/04/2023
- Mise en base

⇒ On retient l'année de mesure du 15/04/2022 au 15/04/2023

Analyse du Climat extérieur

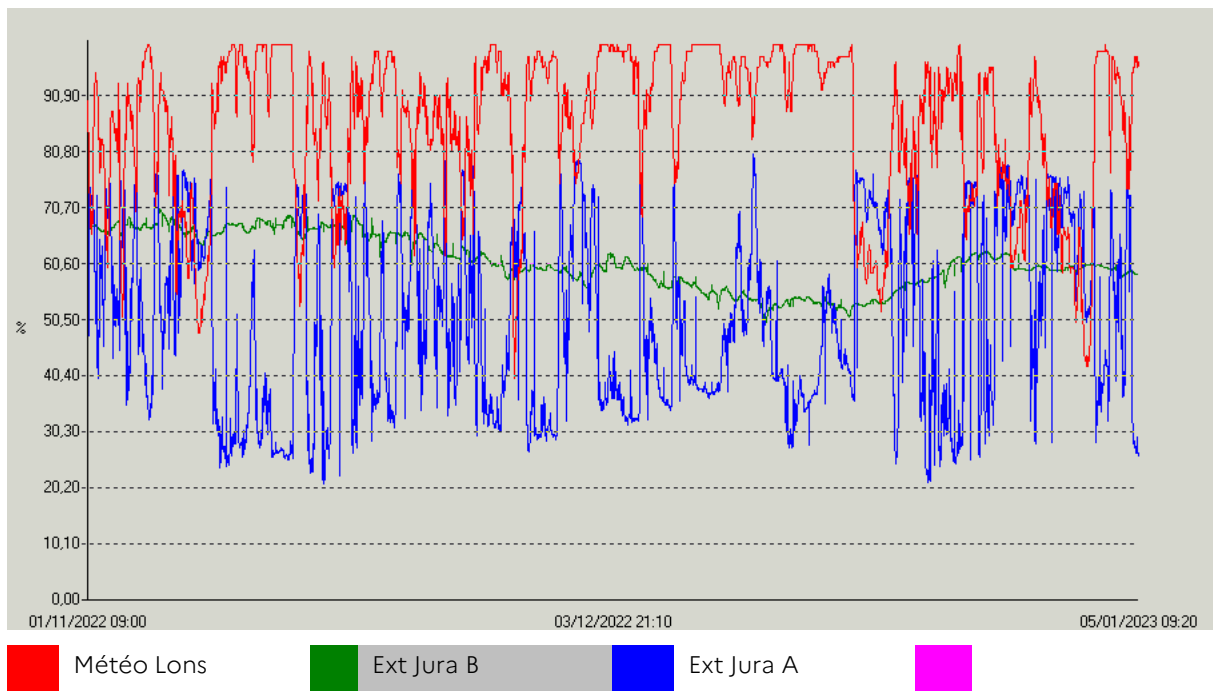
La maison est située à Frébuans (39), altitude 235m, à moins de 10 km de Lons-le-Saunier, station à 298 m d'altitude (voir la [fiche Météo-France](#)).

Comparaison entre la température mesurée et le fichier météo de Lons-le-Saunier sur la même période d'un an :



- ⇒ La météo de Lons est proche de celle mesurée sur la maison Jura A en température.
⇒ On verra par la suite que pour la maison Jura B la mesure (en vert) n'est pas cohérente.

Comparaison en humidité relative : zoom sur la période de Novembre et Décembre :



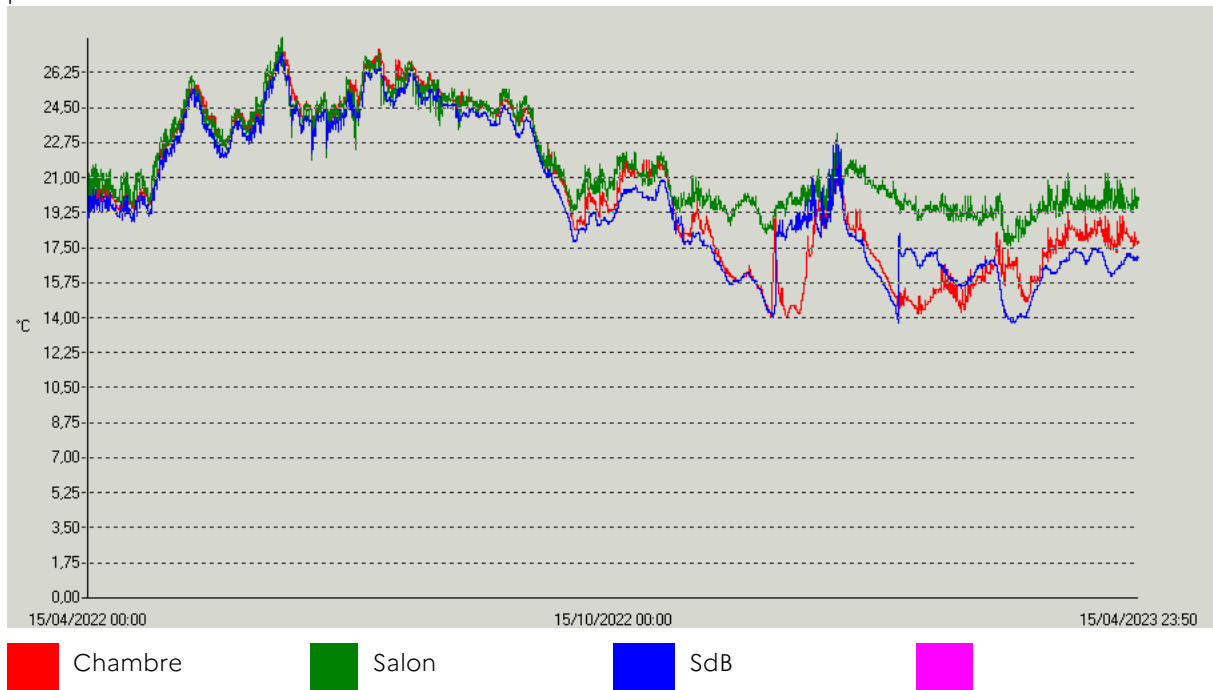
- ⇒ Il y a des écarts notables en humidité Relative en revanche.
- ⇒ Une partie de l'année, les variations sont similaires, mais à d'autres moments les variations sont inversées (le schéma ci-dessus est un zoom sur novembre et décembre 2022, où cette inversion se produit).

La mesure du climat extérieur est ici fiable en température mais pas en HR. En température, les données de Météo-France à Lons-le-Saunier sont très proches de la mesure.

C'est pourquoi pour la comparaison entre calcul WUFI et mesure (voir [§Erreur ! Source du renvoi introuvable.](#)), on utilisera dans le calcul WUFI non pas le climat extérieur mesuré mais **le climat Météo-France de Lons-le-Saunier**.

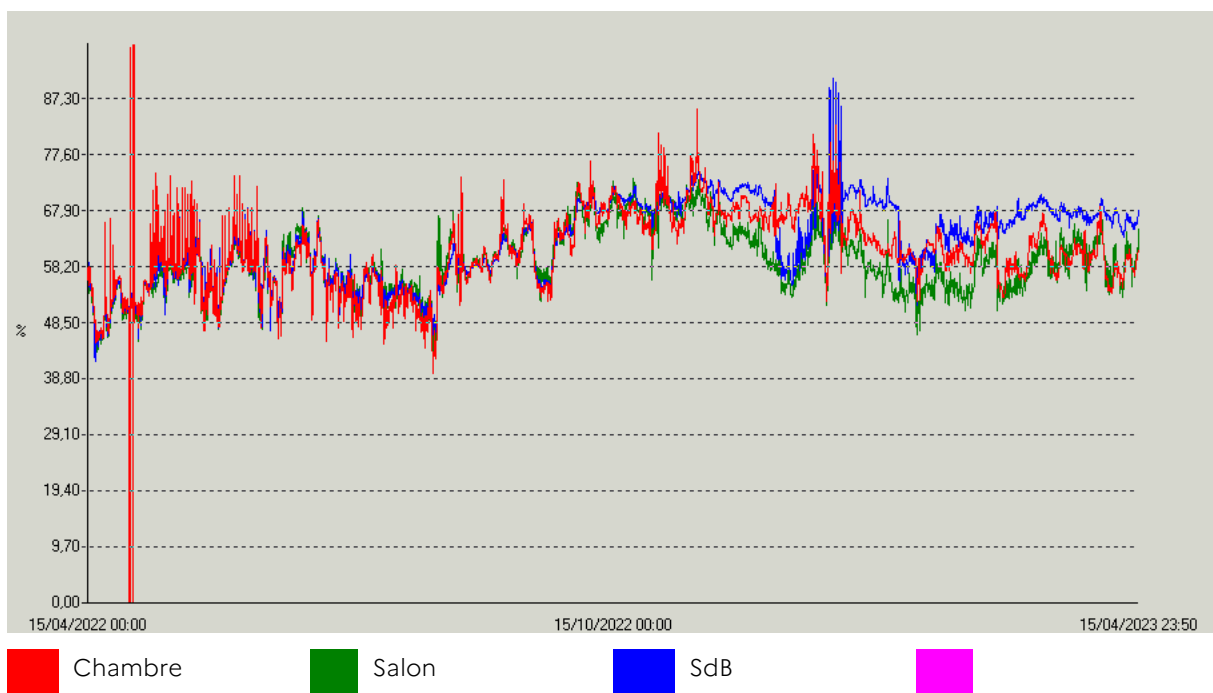
Analyse du Climat intérieur

Le graphique suivant présente les mesures de **température** dans les 3 pièces instrumentées, sur une période d'un an.



Les profils de température semblent cohérents. On note que le Salon reste bien chauffé en hiver (température minimale de l'ordre de 19°C) mais qu'en revanche la Chambre et la Salle de bain sont plus froides et peuvent descendre à 14°C.

Si l'on s'intéresse à présent à l'**humidité relative** (HR) :



Sauf quelques « trous de mesure » en début de période sur la sonde Chambre, les données semblent cohérentes. On note :

- Une humidité plutôt élevée, particulièrement dans la Salle de Bain (en bleu).
- Des pics à >80% HR fin décembre / début novembre : cela peut s'expliquer par la présence d'invités pendant les périodes de fêtes. La salle de bain est en fait celle des invités, et connaît également des pics d'humidité sur la même période.

Pour cette maison disposant d'une ventilation mécanique, l'humidité intérieure est globalement comprise entre 50 et 705% HR.

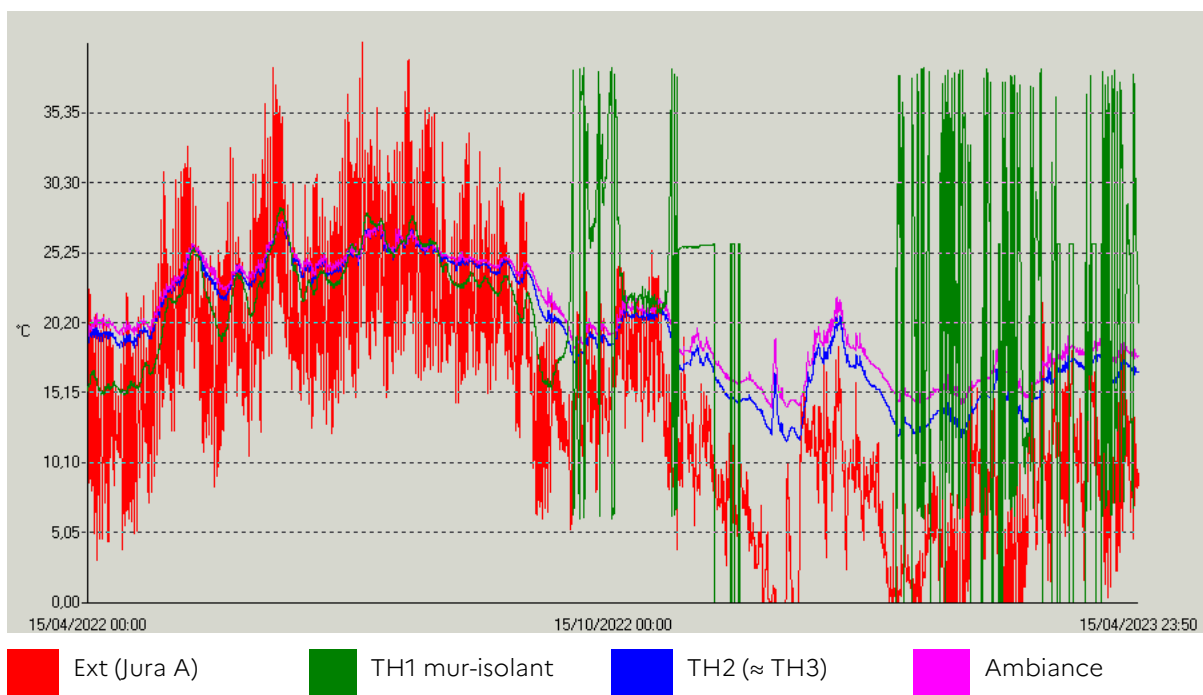
Analyse des mesures mur par mur

- Chambre

Rappel des informations :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre	Mur Nord	R+1	40° N-E	Interrupteur

Visualisation sur 1 an des **températures** extérieure (mesurée), TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et freine-vapeur et l'ambiance intérieure :

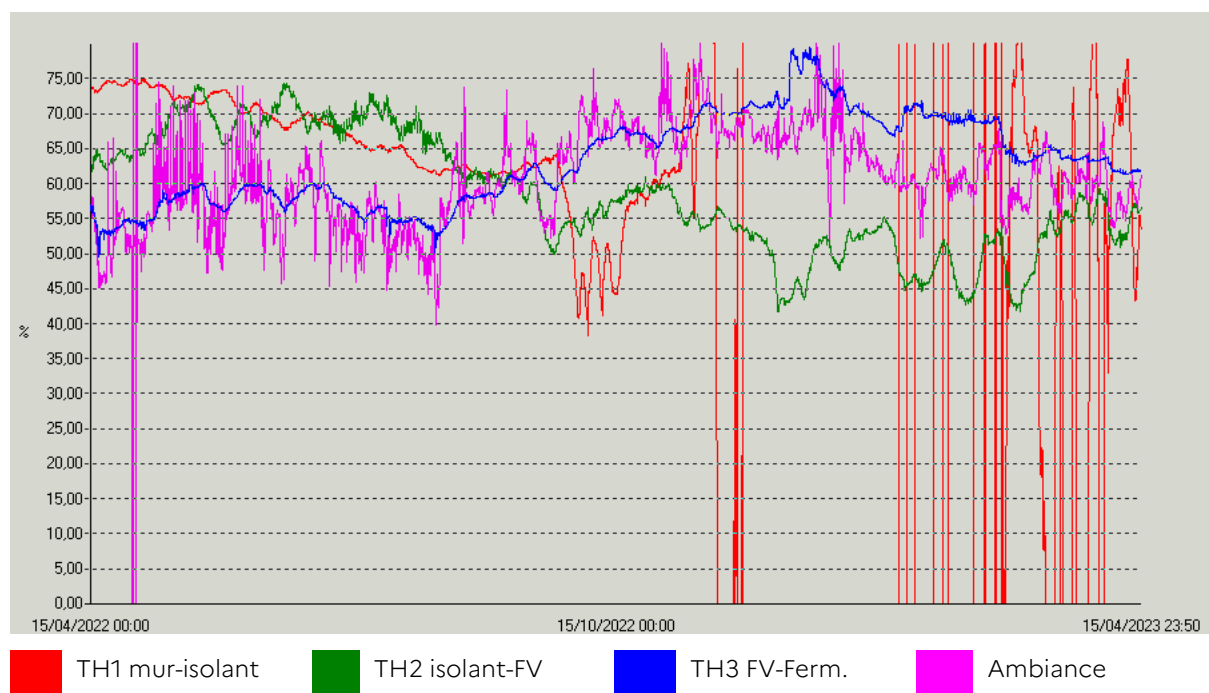


La sonde TH1 semble avoir rencontré des problèmes techniques, car la mesure diverge en milieu et en fin d'année de mesure. Nous verrons cependant ci-après que la mesure d'humidité est restée basse jusqu'à la première anomalie, ce qui nous permet de conclure que ce n'est pas une humidité excessive qui a endommagé la sonde, mais un problème technique.

On retient qu'on ne pourra interpréter TH1 que sur la première moitié de l'année.

Sur la période où toutes les mesures sont fiables, on note que la hiérarchie des températures est cohérente : lorsqu'il fait froid, la température extérieure est inférieure à TH1, elle-même inférieure à TH2 (et proche de TH3, non affichée ici), elle-même inférieure à l'ambiance. Ceci permet de confirmer que l'identification des sondes est correcte.

Visualisation sur 1 an des **humidités relatives** de TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et freine-vapeur, TH3 entre freine-vapeur et parement et l'ambiance intérieure :



De même, TH1 a eu un problème technique en milieu et en fin d'année. L'humidité juste avant la première divergence est inférieure à 75%, et la divergence est une chute vers des HR faibles. Ceci nous indique que ce n'est pas une humidité excessive qui a endommagé la sonde.

La hiérarchie des HR sur les périodes de mesure fiable semble cohérente :

- L'humidité relative dans la lame d'air (TH3) est un peu supérieure à l'ambiance en hiver car il y fait un peu plus froid.
- L'humidité relative en TH2 (entre freine-vapeur et isolant) est plus faible que dans la lame d'air (TH3) : ceci montre que **le freine-vapeur est efficace** et permet d'abaisser l'humidité au niveau de l'isolant.
- Sur les périodes fiables, **HR ne dépasse pas 75% en tout point.**

Les critères de SimHuBat (voir le [§1.3](#)) sont donc respectés :

Critères	Description	Mur au global	TH1 : mur / isolant	TH2 : Isolant / FV	TH3 : FV / parement
1	Teneur en eau stable ou diminue	(Simulation uniquement)			
2	Pas de condensation (HR > 98%)	(Période de mesure trop courte)			
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)				
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment				
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait				

- Salon

Rappel des informations :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Salon	Mur Est	R+1	130° Est	Prise basse

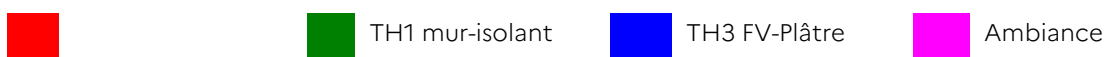
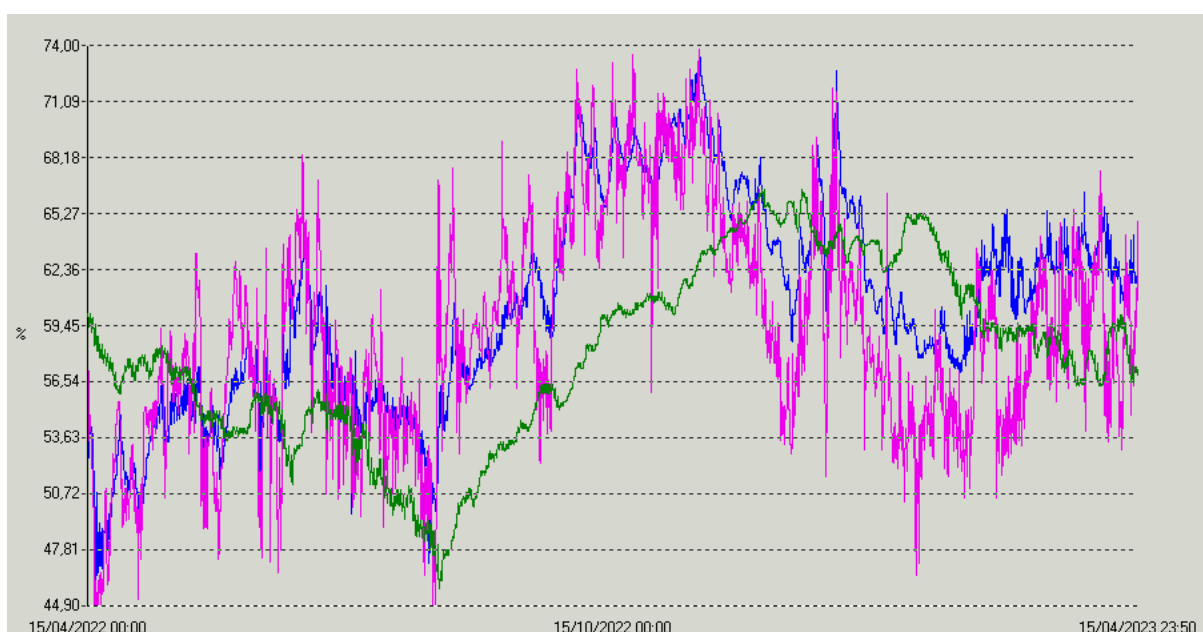
Pour les **températures** :

La sonde TH2 n'est pas fiable : sa mémoire ne présentait plus de données sur la 2^e moitié de période.

La hiérarchie des températures est correcte : $T^{\circ} \text{ ext} < TH1 < TH2 \approx TH3 < T^{\circ} \text{ ambiance}$ en hiver.

Pour mémoire, sur la période où TH2 est disponible, TH2 et TH3 oscillent entre elles à +/- 0,5°C environ, ce qui est la précision de la mesure.

Visualisation sur 1 an des **humidités relatives** de TH1 entre mur et isolant, TH3 entre freine-vapeur et parement et l'ambiance intérieure :



La hiérarchie des HR semble cohérente. HR ne dépasse pas 75% en tout point.

Les critères de SimHuBat sont donc respectés :

Critères	Description	Mur au global	TH1 : mur / isolant	TH2 : Isolant / FV	TH3 : FV / parement
1	Teneur en eau stable ou diminue	(Simulation uniquement)			
2	Pas de condensation (HR > 98%)	(Période de mesure trop courte)			
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)				
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment				
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait				

- Salle de Bain

Rappel des informations :

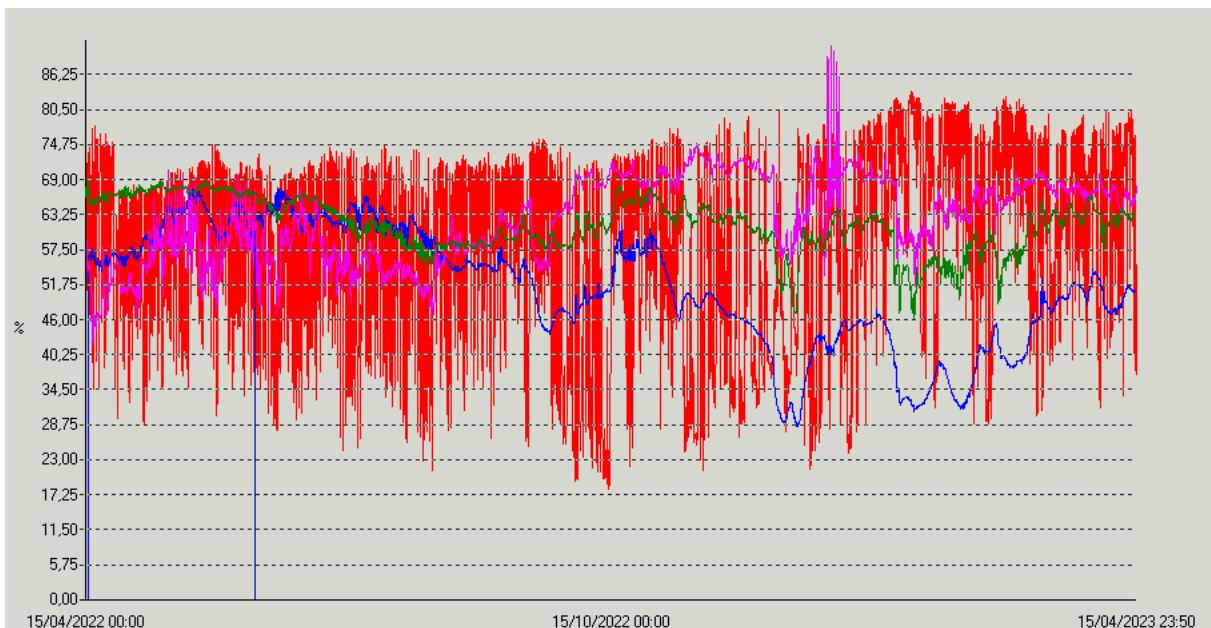
Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Salle de bain	Mur Nord	R+1	40° N-E	Haut de mur

Pour les **températures** :

La sonde TH3 n'a pas fonctionné.

La hiérarchie des températures est correcte : $T^{\circ} \text{ ext} < TH1 < TH2 \approx TH3 < T^{\circ} \text{ ambiance}$ en hiver.

Visualisation sur 1 an des **humidités relatives** de TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et freine-vapeur, et l'ambiance intérieure :



■ Ext (Jura A) ■ TH1 mur-isolant ■ TH2 isolant-FV ■ Ambiance

La hiérarchie des HR semble cohérente. HR ne dépasse pas 70% en tout point du mur, et ce malgré le pic d'humidité intérieure autour des fêtes de fin d'année. Le mur est capable de se réguler.

Les critères de SimHuBat sont donc respectés :

Critères	Description	Mur au global	TH1 : mur / isolant	TH2 : Isolant / FV	TH3 : FV / parement
1	Teneur en eau stable ou diminue	(Simulation uniquement)			
2	Pas de condensation (HR > 98%)	(Période de mesure trop courte)			
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)				
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment				
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait				

2.1.3 Conclusions sur la maison Jura A

Pour les 3 murs instrumentés sur cette maison, tous les critères de SimHuBat sont respectés du point de vue de la mesure in-situ.

A l'interface entre le mur et l'isolant (TH1), l'humidité ne dépasse pas 70% sauf pour la chambre où elle atteint 75%.

Le complexe d'isolation avec ouate projetée humide et freine-vapeur hygrovariable, et en présence d'une ventilation mécanique, ne présente pas de problème hygrothermique, et ce malgré un pic d'humidité intérieur au moment des fêtes de fin d'année, et malgré le fait que la Chambre et la Salle de bain ne sont pas continuellement chauffées (descente jusqu'à 14°C).

Voir aussi la comparaison entre mesure et simulation pour cette maison au [§Erreur ! Source du renvoi introuvable.](#)

2.2 Maison Jura B

2.2.1 Présentation de la maison

Département : Jura (39)

Altitude : 270 m

Description du mur : Pierre calcaire dure (3 sur 4 au niveau dureté) jaune hourdée à la chaux, pas d'enduit, joint de pierre creux façades E et O, Pignon joints remplis.

Isolation intérieure en ouate de cellulose projetée humide de 6 à 12cm, FV Intello Plus, lame d'air, plaque de plâtre – Ossature bois 6*4

Isolation réalisée 10 ans avant l'instrumentation.

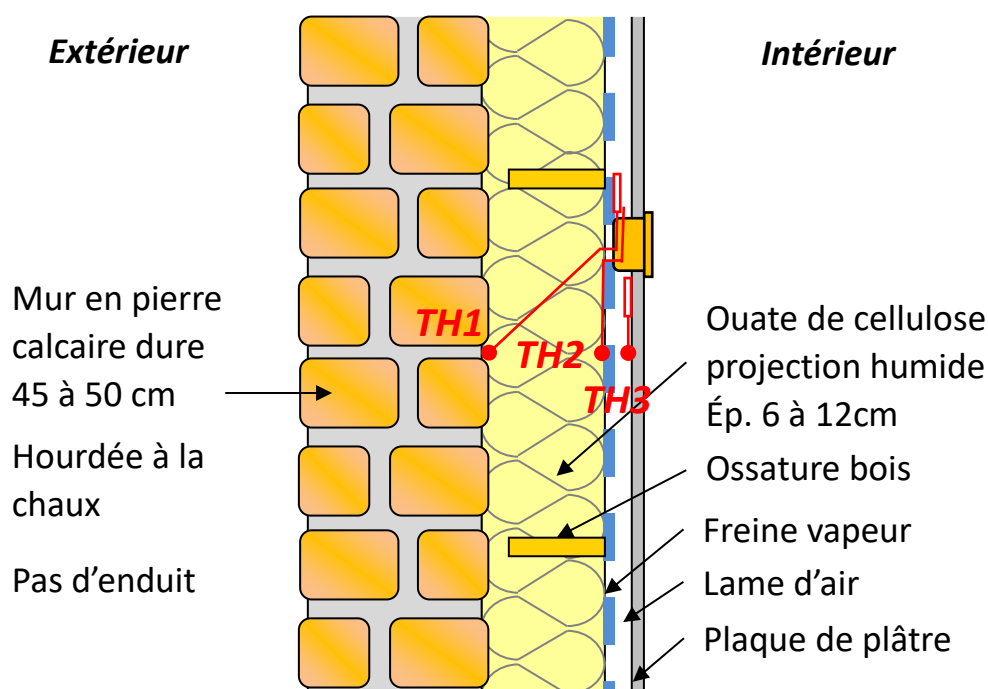


Photo prise pendant les travaux d'isolation

Ventilation : VMC Simple flux hygro A

Pièces instrumentées et orientation :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre Sud	Mur Sud – prise côté SO	R+1	158° S-E	Prise basse (+1,5 m par rapport au sol extérieur)
	Mur Sud – prise côté SE	R+1	158° S-E	Prise basse (+1,5 m par rapport au sol extérieur)
Chambre Est	Mur Est	R+1	57 ° N-E	Prise basse (+2,5 m par rapport au sol extérieur)
Bureau	Mur Sud-Est	R+1	27° S-E	Prise basse (+2,5 m par rapport au sol extérieur)

2.2.2 Visualisation des mesures – maison Jura B

Période de mesure

Historique :

- Programmation des sondes la semaine du 7 mars 2022
- Instrumentation le 24/03/2022
- Renvoi de sondes suite au pb de piles le 06/04/2022
- Relance de l'enregistrement le 10/04 ou 11/04
- Dépose des sondes : 18/04/2023
- Mise en base des données le 27/04/2023
- Mise en base

⇒ On retient l'année de mesure du 15/04/2022 au 15/04/2023

Analyse du Climat extérieur

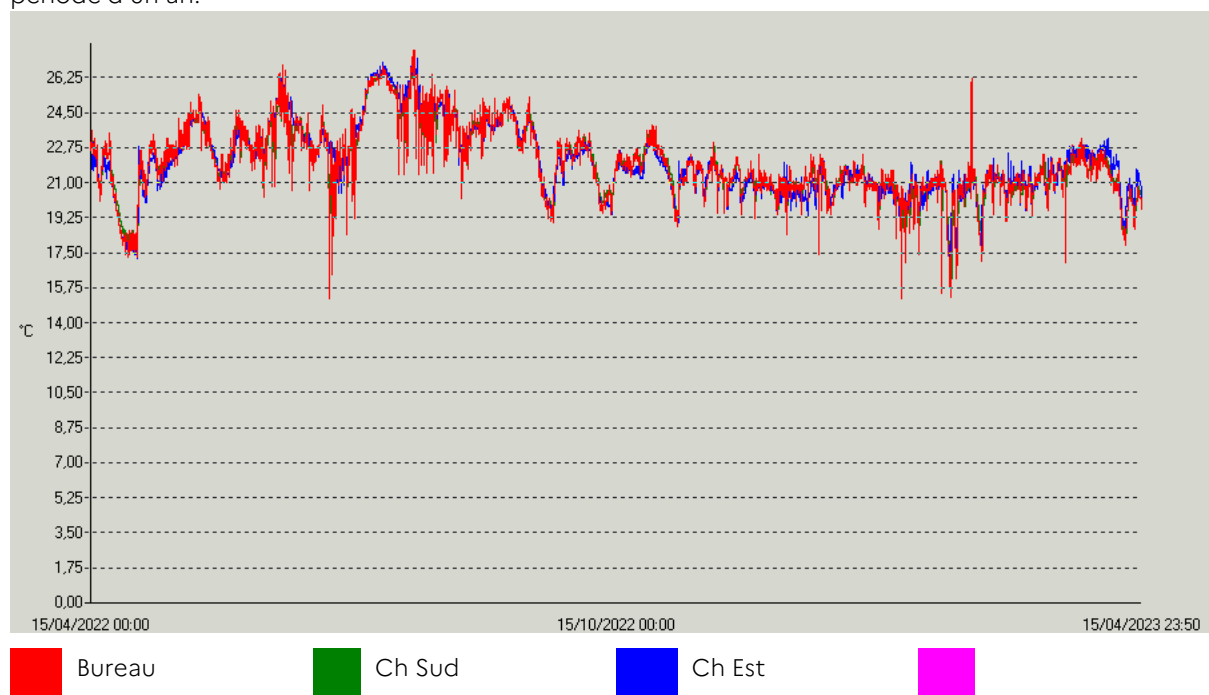
La maison est située à Grusse (39190 Val-Sonnette), altitude 270m, à une dizaine de km de Lons-le-Saunier, station à 298 m d'altitude (voir la [fiche Météo-France](#)).

La température extérieure mesurée n'est pas cohérente. Après analyse il se trouve qu'elle a été positionnée dans un espace trop abrité qui s'est quasiment comporté comme un volume tampon.

C'est pourquoi pour ce qui suit, on utilisera les données extérieures de la maison Jura A pour la visualisation.

Analyse du Climat intérieur

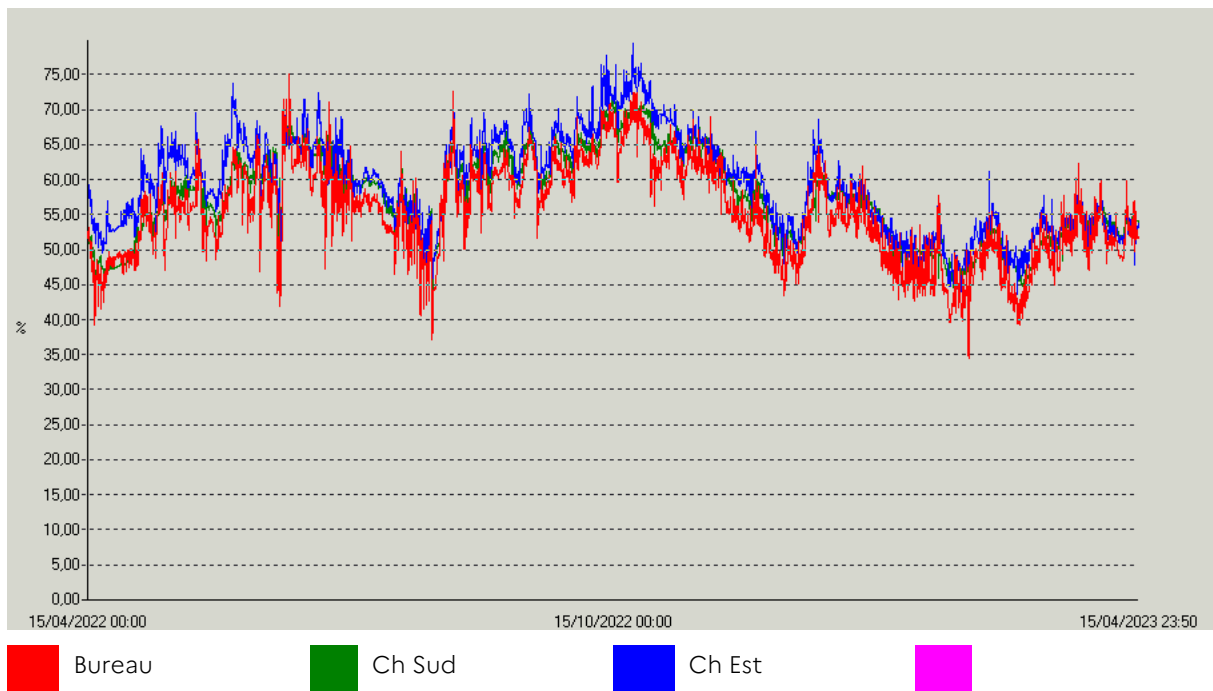
Le graphique suivant présente les mesures de **température** dans les 3 pièces instrumentées, sur une période d'un an.



Les températures mesurées sont très homogènes entre les pièces (les 2 chambres et le bureau).

Chacune des pièces est chauffée à plus de 19°C.

Pour ce qui est de l'humidité relative :



Les mesures d'HR sont assez proches entre les trois pièces, les tendances sont similaires.

On peut noter que le Bureau est plus sec et que la Chambre Est est plus humide.

L'humidité relative est comprise entre 34 et 79%, majoritairement entre 45 et 70%.

Analyse des mesures mur par mur

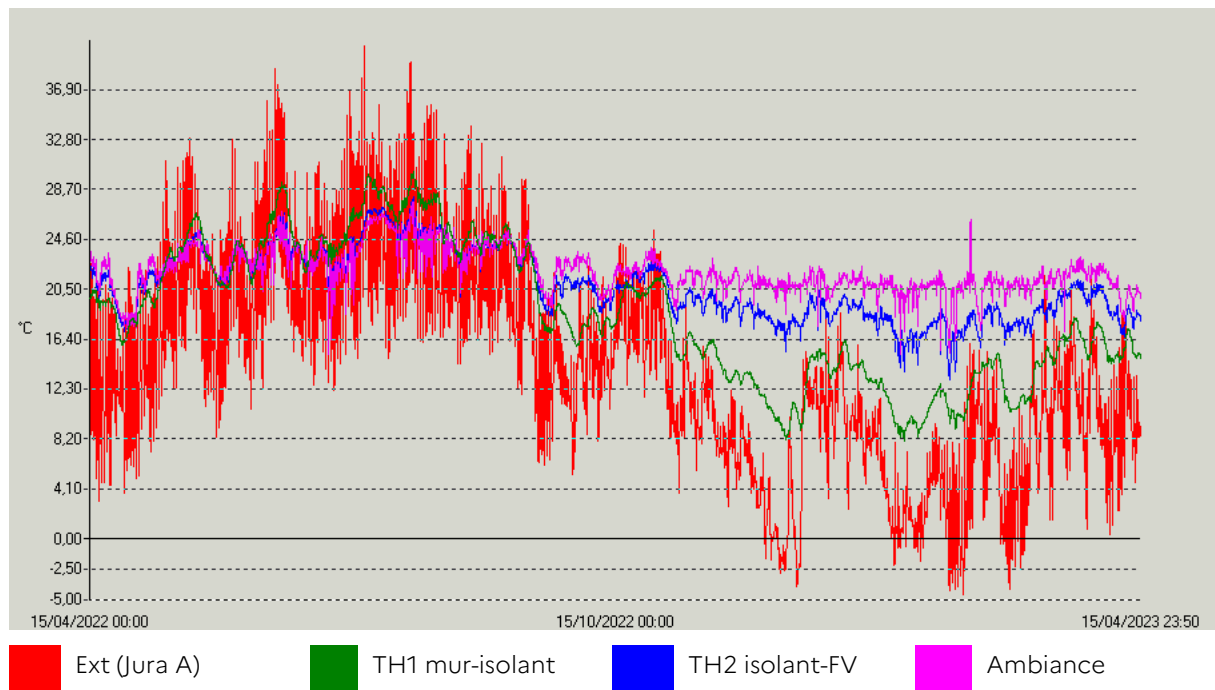
- Bureau

Rappel des informations :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Bureau	Mur Sud-Est	R+1	27° S-E	Prise basse (+2,5 m par rapport au sol extérieur)

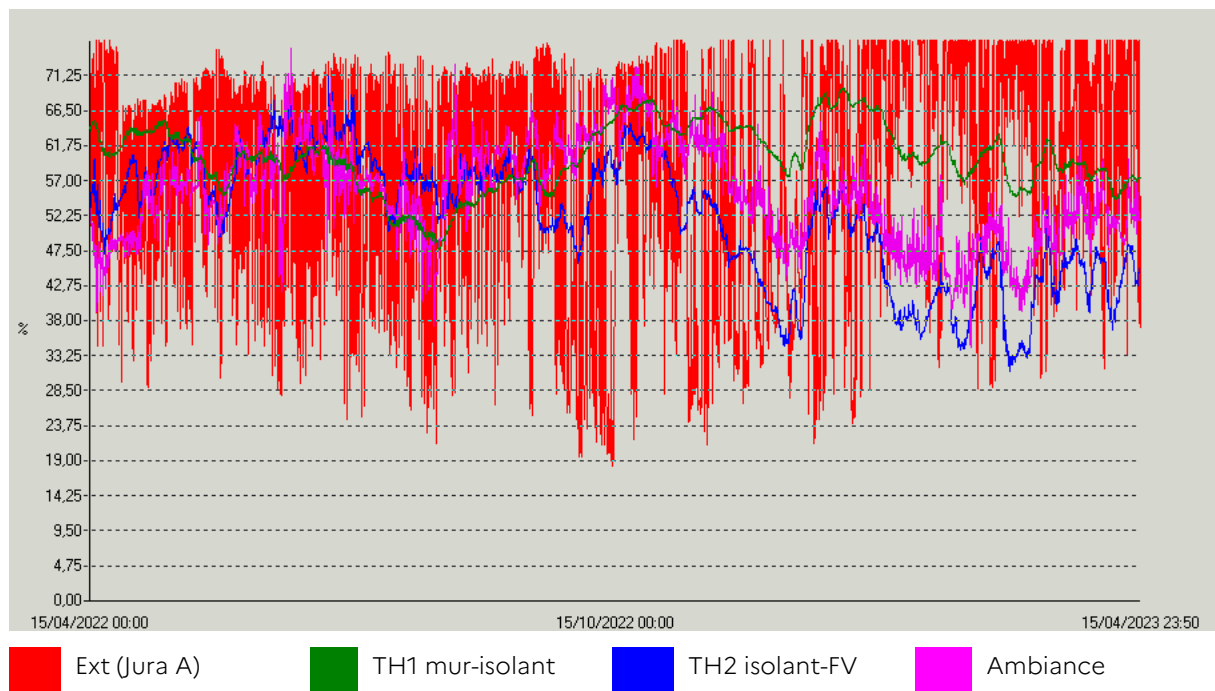
La sonde TH3 n'a pas fonctionné.

Visualisation sur 1 an des **températures** extérieure (Jura A), TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et freine-vapeur et l'ambiance intérieure :



La hiérarchie des températures est correcte : $T^{\circ} \text{ ext} < \text{TH1} < \text{TH2} \approx \text{TH3} < T^{\circ} \text{ ambiance}$ en hiver.

Visualisation sur 1 an des **humidités relatives** de TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et freine-vapeur, et l'ambiance intérieure :



La hiérarchie des HR semble cohérente.

HR ne dépasse pas 70% en tout point.

Les critères de SimHuBat sont respectés :

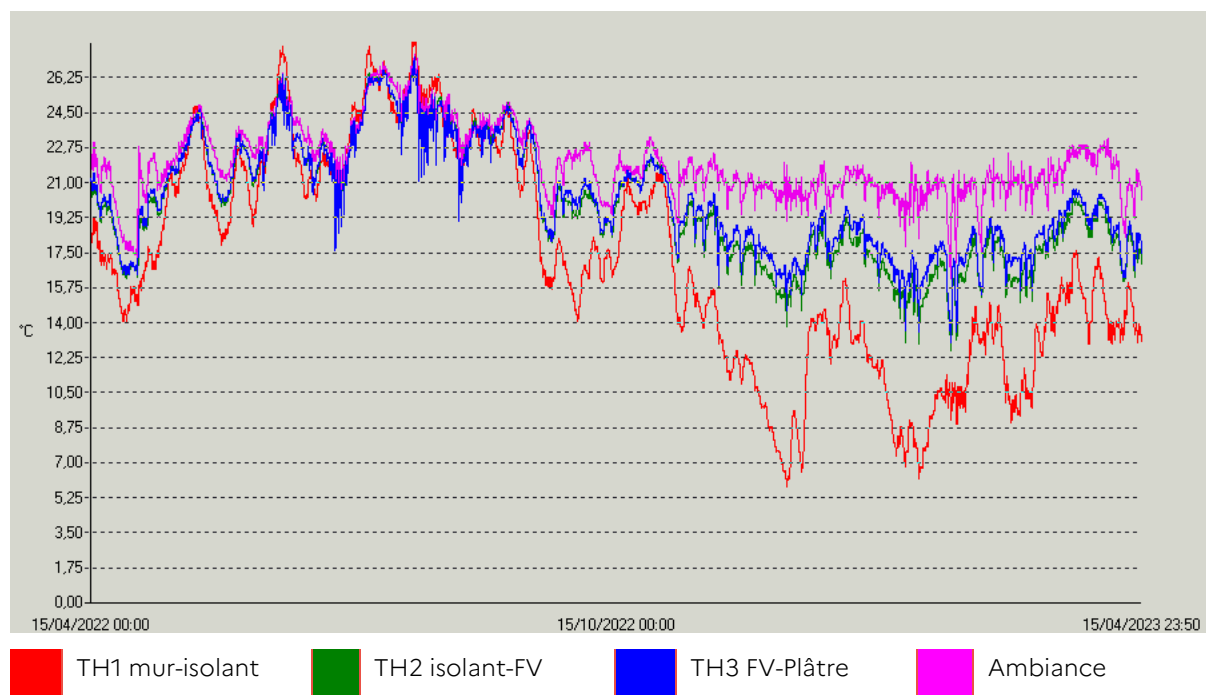
Critères	Description	Mur au global	TH1 : mur / isolant	TH2 : Isolant / FV	TH3 : FV / parement
1	Teneur en eau stable ou diminue	(Simulation uniquement)			
2	Pas de condensation (HR > 98%)	(Période de mesure trop courte)			
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)				
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment				
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait				

- **Chambre Sud - Mur Sud côté Ouest**

Rappel des informations :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre Sud	Mur Sud – prise côté SO	R+1	158° S-E	Prise basse (+1,5 m par rapport au sol extérieur)

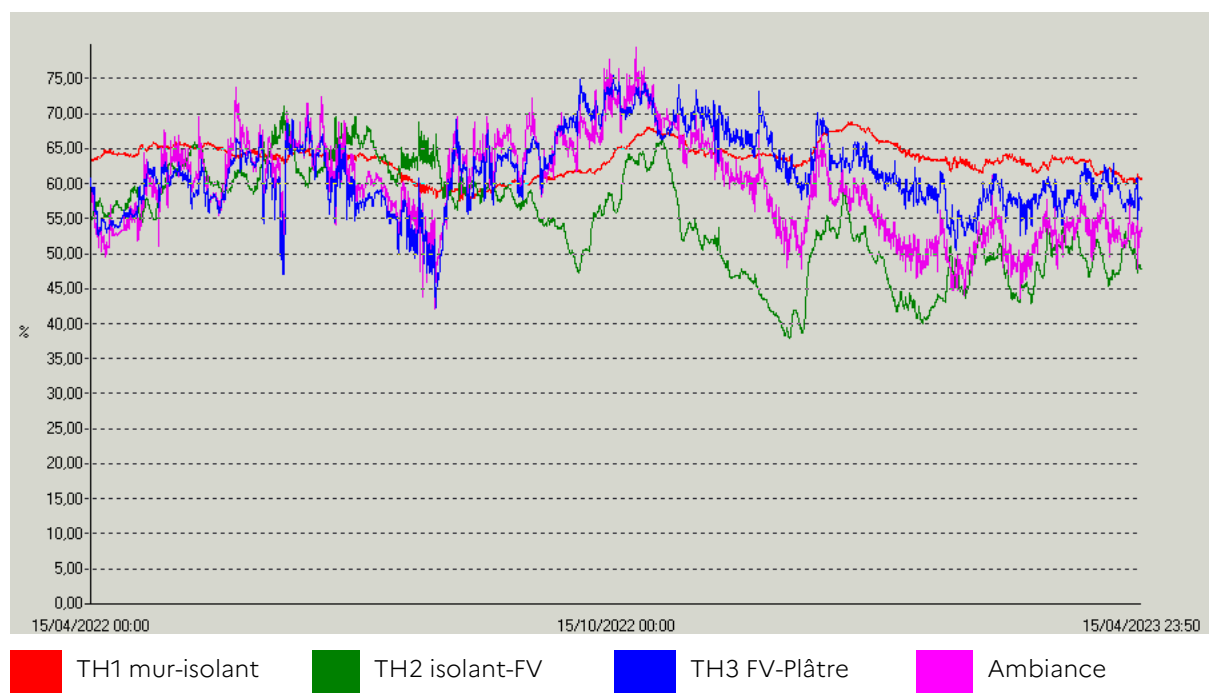
Visualisation sur 1 an des **températures** TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et freine-vapeur, TH3 entre freine-vapeur et parement, et l'ambiance intérieure :



La hiérarchie des températures est correcte : $T^{\circ} \text{ ext} < TH1 < TH2 \approx TH3 < T^{\circ} \text{ ambiance}$ en hiver.

La seule exception est un écart ponctuel où la température en TH2 est supérieure à celle en TH3 d'un demi-degré environ en hiver seulement. Cette incohérence est de l'ordre de grandeur de la précision de la mesure, elle ne nous semble donc pas significative.

Visualisation sur 1 an des **humidités relatives** de TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et freine-vapeur, TH3 entre freine-vapeur et parement, et l'ambiance intérieure :



La hiérarchie des HR semble cohérente.

L'HR ne dépasse pas 75% en tout point, et en TH1 on ne dépasse pas 70% (malgré une HR relativement élevée dans la chambre en hiver).

On note la grande stabilité de l'humidité du mur lui-même (illustré par la mesure TH1) : il reste relativement humide de façon stable toute l'année. Ceci illustre la grande inertie hydrique de ce mur, et peut-être une légère remontée capillaire d'humidité (la mesure est située à 1,5 m du sol extérieur).

Les critères de SimHuBat sont respectés :

Critères	Description	Mur au global	TH1 : mur / isolant	TH2 : Isolant / FV	TH3 : FV / parement
1	Teneur en eau stable ou diminue	(Simulation uniquement)			
2	Pas de condensation (HR > 98%)	(Période de mesure trop courte)			
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)				
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment				
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait				

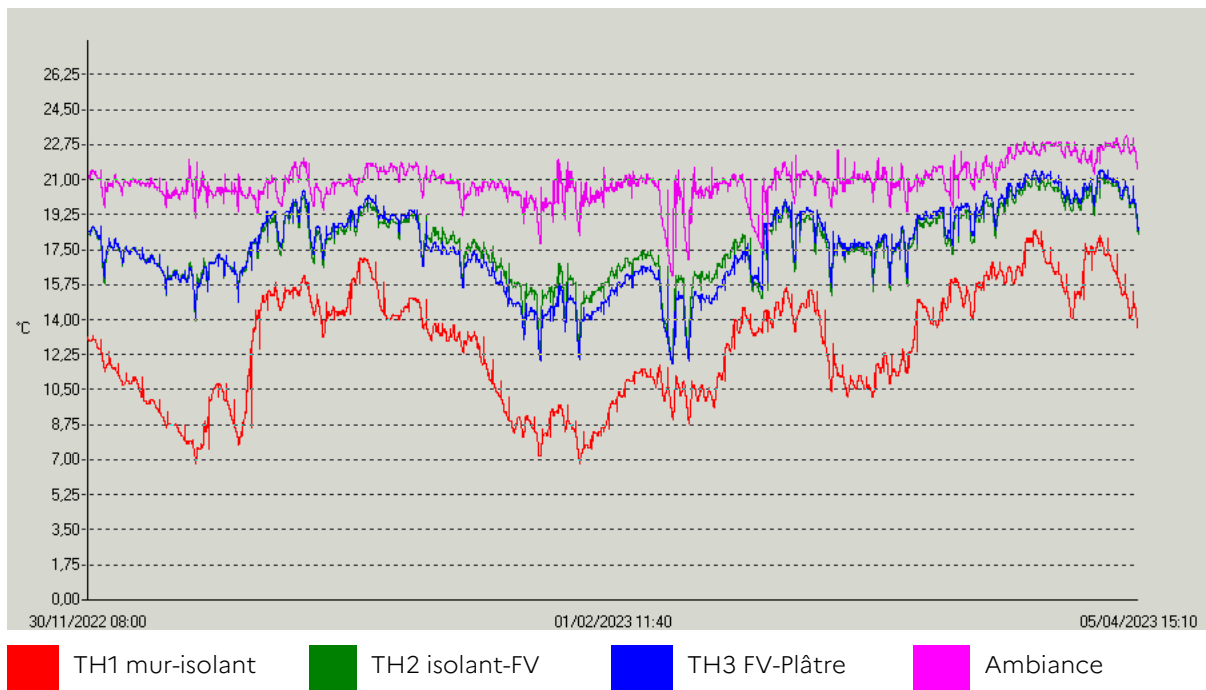
- Chambre Sud - Mur Sud côté Est

Rappel des informations :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
-------	-----	-------	-------------	----------------

Chambre Sud	Mur Sud – prise côté SE	R+1	158° S-E	Prise basse (+1,5 m par rapport au sol extérieur)
-------------	-------------------------	-----	----------	---

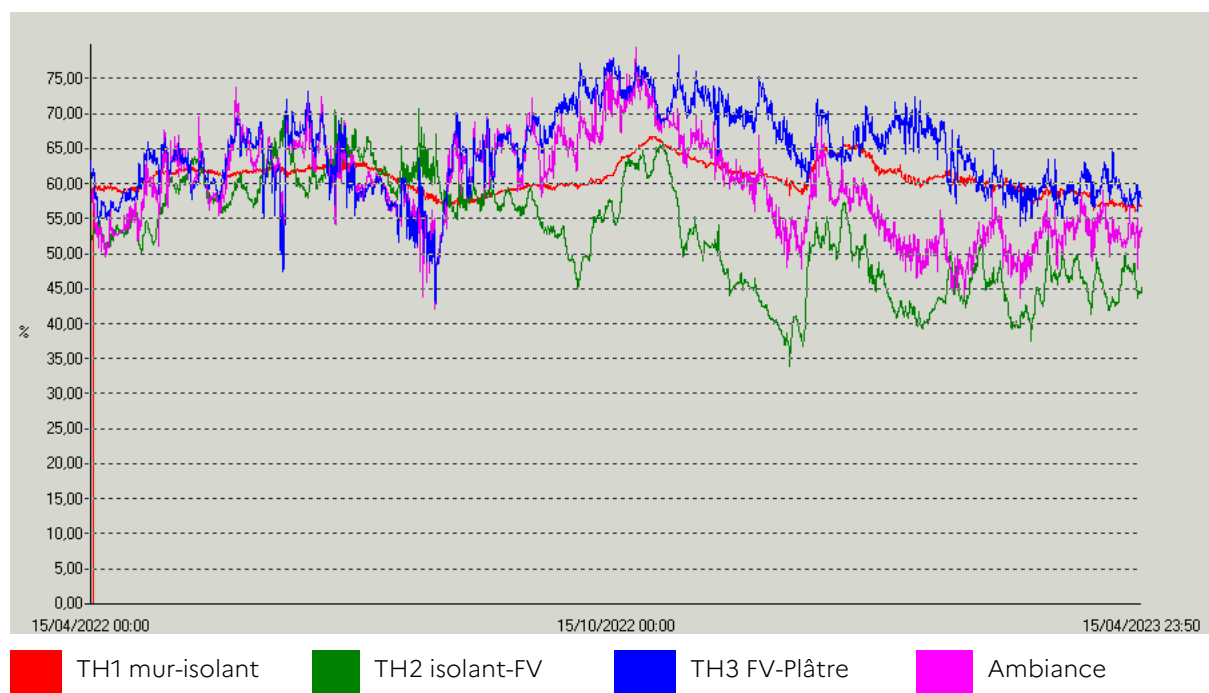
Visualisation **sur 5 mois** des **températures** en TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et freine-vapeur, TH3 entre freine-vapeur et parement, et l'ambiance intérieure :



La hiérarchie des températures est correcte globalement : $T^{\circ} \text{ ext} < \text{TH1} < \text{TH2} \approx \text{TH3} < T^{\circ} \text{ ambiance}$ en hiver, sauf en janvier février (c'est pourquoi nous avons zoomé sur la période de décembre 2022 à mars 2023) où la température en TH2 est supérieure à celle en TH3 de presque 1°C.

Pourtant les données en HR sont cohérentes, il ne s'agit pas d'une inversion entre les sondes. L'écart entre les mesures reste dans l'intervalle de précision des sondes.

Visualisation sur 1 an des **humidités relatives** de TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et freine-vapeur, TH3 entre freine-vapeur et parement, et l'ambiance intérieure :



La hiérarchie des HR semble cohérente.

L'HR ne dépasse pas 75% en tout point, et en TH1 on ne dépasse pas 70% (malgré une HR relativement élevée dans la chambre en hiver).

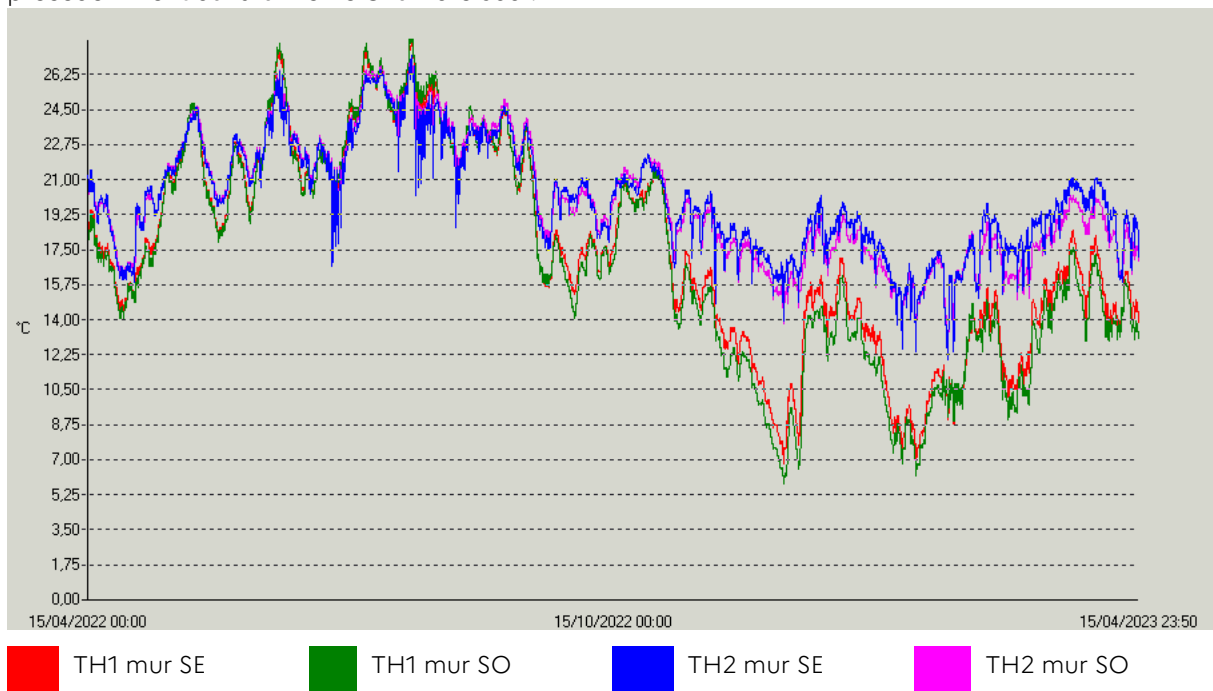
On note ici également la grande inertie hydrique de ce mur, et peut-être une légère remontée capillaire d'humidité (la mesure est située à 1,5 m du sol extérieur).

Les critères de SimHuBat sont respectés :

Critères	Description	Mur au global	TH1 : mur / isolant	TH2 : Isolant / FV	TH3 : FV / parement
1	Teneur en eau stable ou diminue	(Simulation uniquement)			
2	Pas de condensation (HR > 98%)	(Période de mesure trop courte)			
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)				
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment				
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait				

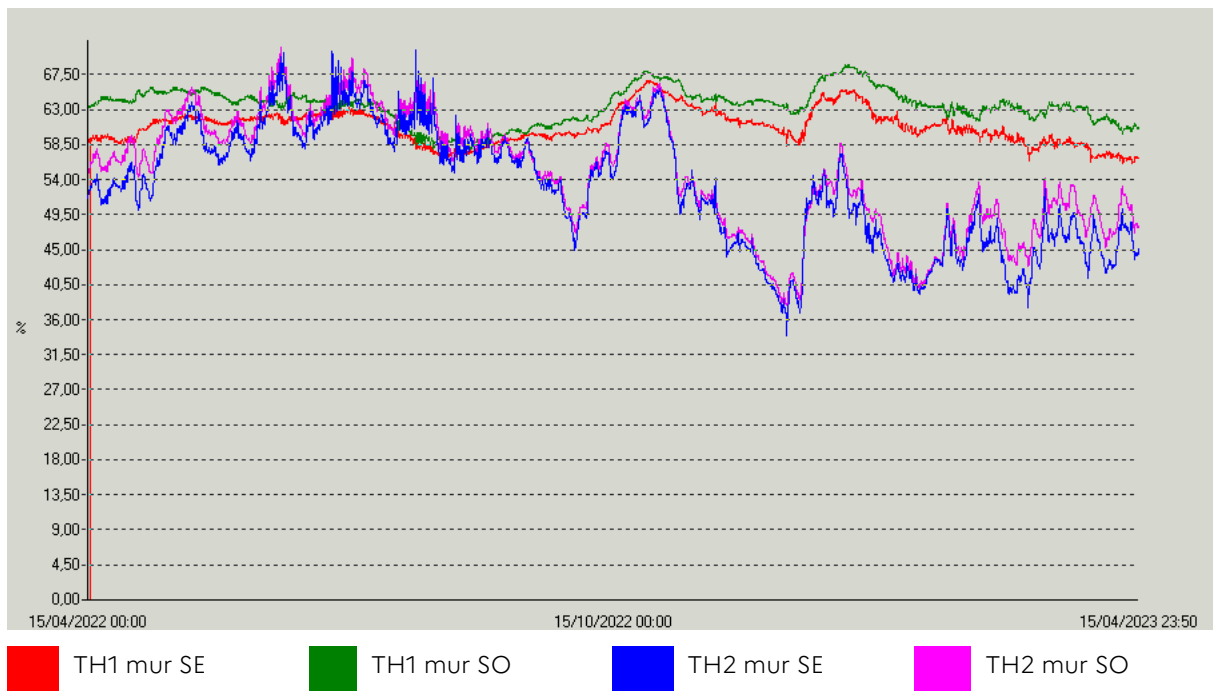
- Comparaison des 2 points de mesure de la même chambre

Le graphique suivant présente les mesures en TH1 et TH2 des 2 points de mesure présentés précédemment dans la même Chambre Sud :



Les tendances sont identiques mais on note un décalage de près de 1°C en hiver.

Ce résultat est intéressant car il montre que malgré la précision de 0,5°C de chacune des sondes, **un écart entre les mesures de 1°C reste possible et ne doit pas être considéré comme incohérent.**



En HR, les tendances sont identiques également.

On note un décalage de près de 5% en hiver pour TH1, dans la précision de mesure pour TH2.

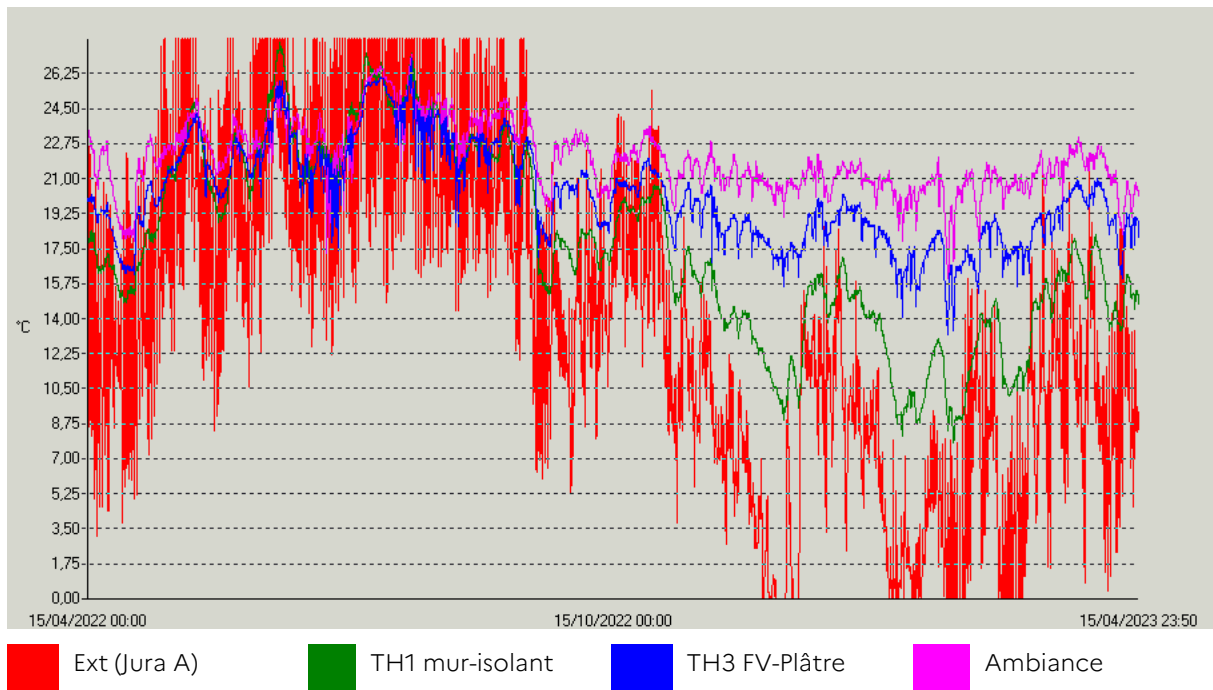
- Chambre Est - Mur SE

Rappel des informations :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre Est	Mur Est	R+1	57 ° N-E	Prise basse (+2,5 m par rapport au sol extérieur)

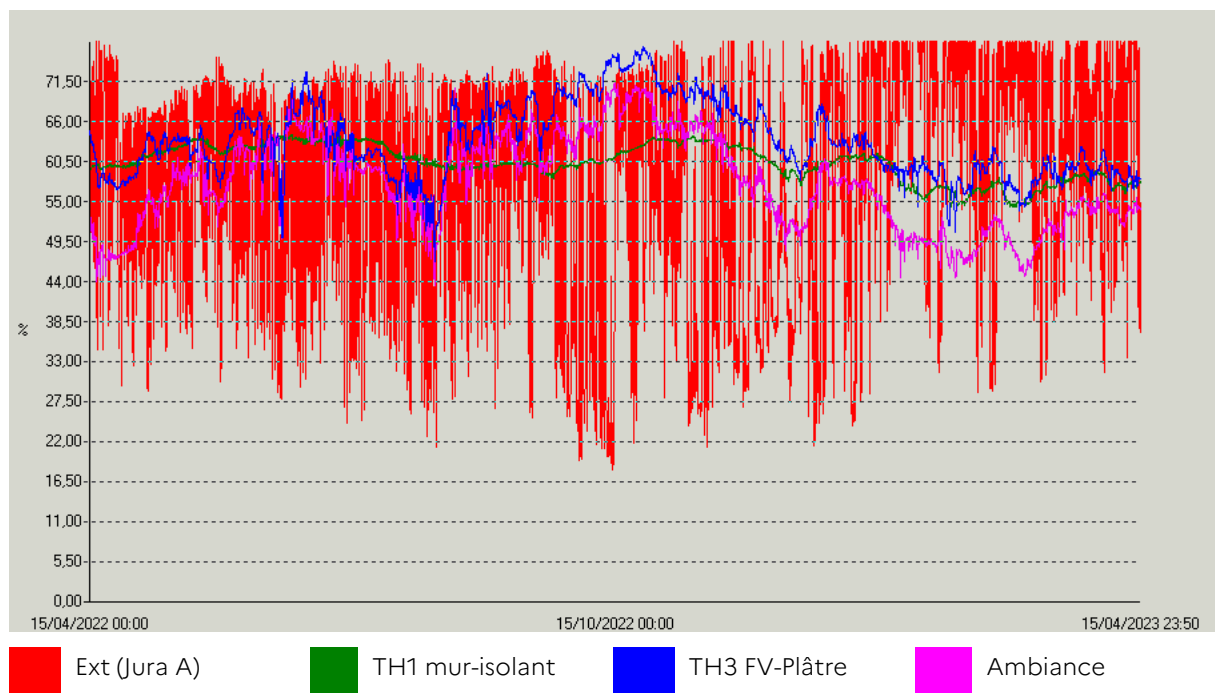
La sonde TH2 diverge en début de période et ne présente pas de données sur la 2^e moitié de l'année. Ces données ne sont pas exploitables.

Visualisation sur 1 an des températures extérieure (Jura A), TH1 entre mur et isolant, TH3 entre freine-vapeur et parement, et l'ambiance intérieure :



La hiérarchie des températures est correcte : $T^{\circ} \text{ ext} < \text{TH1} < \text{TH2} \approx \text{TH3} < T^{\circ} \text{ ambiance}$ en hiver.

Visualisation sur 1 an des **humidités relatives** de TH1 entre mur et isolant, TH3 entre freine-vapeur et parement, et l'ambiance intérieure :



La hiérarchie des HR semble cohérente.

L'HR ne dépasse pas 75% en tout point, et en TH1 on ne dépasse pas 70% (malgré une HR relativement élevée dans la chambre en hiver).

Les critères de SimHuBat sont respectés :

Critères	Description	Mur au global	TH1 : mur / isolant	TH2 : Isolant / FV	TH3 : FV / parement
1	Teneur en eau stable ou diminuée	(Simulation uniquement)			
2	Pas de condensation (HR > 98%)	(Période de mesure trop courte)			
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)				
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment				
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait				

2.2.3 Conclusions sur la maison Jura B

Pour les 4 murs instrumentés sur cette maison, tous les critères de SimHuBat sont respectés du point de vue de la mesure in-situ.

On note même qu'à l'interface entre le mur et l'isolant, l'humidité ne dépasse pas 70%.

Le complexe d'isolation avec ouate projetée humide et freine-vapeur hygrovariable en présence d'une ventilation mécanique et avec un chauffage continu tout l'hiver ne présente pas de problème hygrothermique.

2.3 Maison Jura C

2.3.1 Présentation de la maison

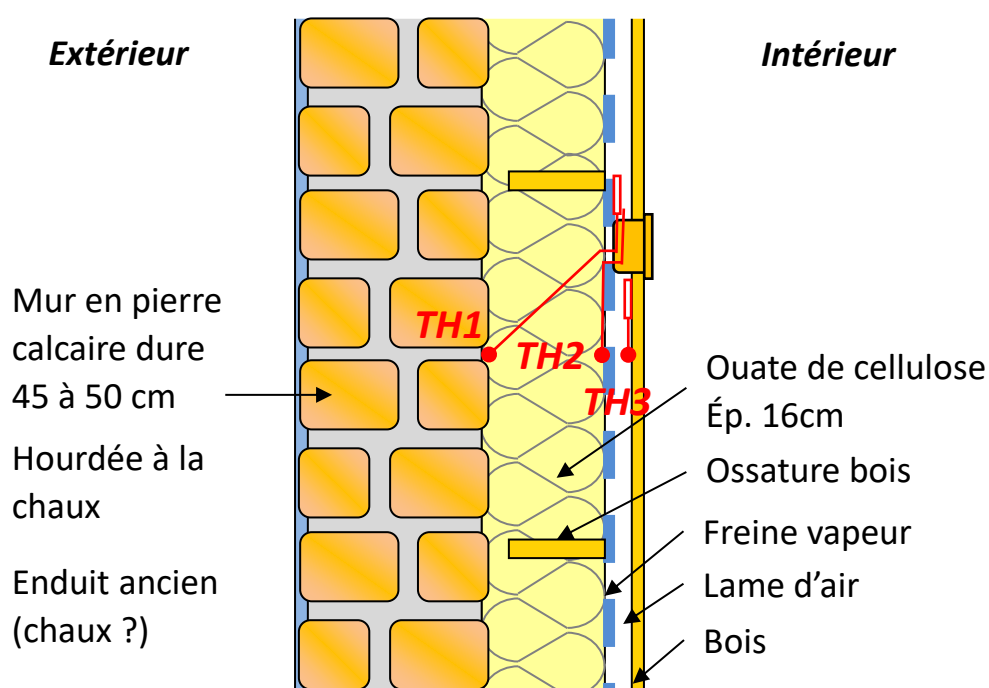
Département : Jura (39)

Altitude : 1240 m

Description du mur : Mur moellons (50cm d'épaisseur) de pierres calcaires dures hourdées à la chaux. Enduit extérieur ancien à la chaux, dégradé. Côté intérieur : enduit chaux et/ou plâtre.

ITI en Ouate de cellulose 12 et 16 cm pour les chambres, 9 cm pour le bureau), Freine-vapeur SALOLA AéroVap SD 18+ pour les chambres, indéterminé pour le bureau, 2,5cm de vide d'air pour les chambres, pas de lame d'air pour le bureau, parement bois (non encore posé pour la chambre NO).

Isolation réalisée 15 ans avant l'instrumentation pour le bureau, 1 an avant pour les chambres.



Ci-contre : photo de l'enduit extérieur.

Pour mémoire la façade Sud, exposée à la pluie battante, dispose d'un bardage bois

et d'une ITE sur une grande partie de sa surface. Ce mur n'a pas été instrumenté car non représentatif du cas général visé.

Ventilation : pas de VMC, ouverture des fenêtres.

Pièces instrumentées et orientation :

Le choix des lieux de pose des sondes a été assez complexe car plusieurs murs ont été isolés avec de la fibre de bois (par soucis d'homogénéité nous n'avons instrumenté sur cette maison que des murs en ITI ouate de cellulose), le mur sud est majoritairement isolé par l'extérieur (donc non instrumenté) ...

De plus la majorité des prises a été posée sur les cloisons et refends, donc très peu sur les murs extérieurs. Pour poser les sondes sans endommager le parement, nous avons sélectionné les prises et interrupteurs disponibles.

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre Nord-Ouest	Mur Nord (parement pas encore posé)	R+1	N-E	Interrupteur
Chambre « woofing »	Mur Ouest	R+1	N-O	Prise basse
Bureau	Mur Ouest (pas de vide technique, seulement 9cm de ouate)	R+1	N-O	Prise basse

2.3.2 Visualisation des mesures – maison Jura C

Période de mesure

Historique de l'instrumentations des maisons Jura C et D

- Programmation des sondes
- Instrumentation le 27/04/2023
- Dépose des sondes : 10/06/2024
- Relève des données le 17/06/2024
- Mise en base

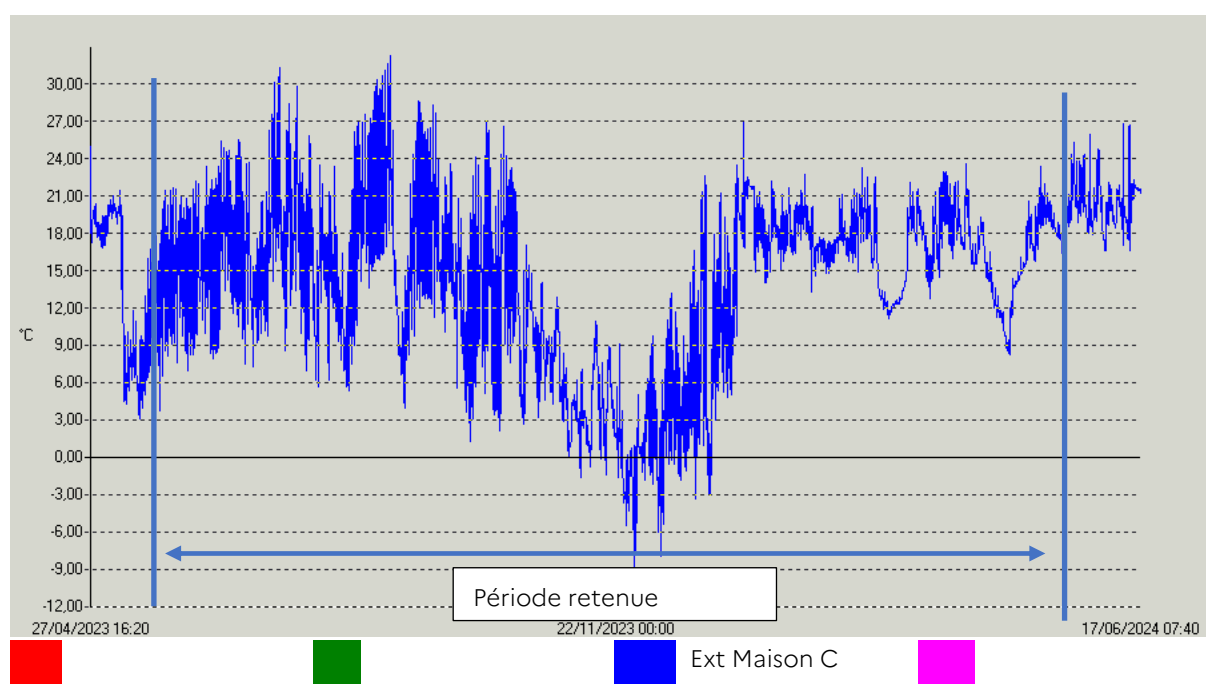
⇒ On retient l'année de mesure du 18/05/2023 au 18/05/2024

Analyse du Climat extérieur

Projet à Bellecombe (39), altitude 1240m.

A 50 km de Lons-le-Saunier, station à 298 m d'altitude (voir la [fiche Météo-France](#)) et à 5km de La Pesse, station à 1133 m d'altitude (voir la [fiche Météo-France](#)). Nous verrons pour les calculs (voir [§Erreur ! Source du renvoi introuvable.](#)) que les données de la station de La Pesse ne sont pas complètes pour les besoins de WUFI, nous avons donc composé un climat principalement basé sur La Pesse, mais complété du rayonnement solaire de Lons.

Visualisation de la température mesurée sur la période de mesure retenue :



L'évolution de la température est cohérente en début de mesure jusqu'à décembre 2023 puis la température remonte en janvier pour rester entre 15 et 22°C jusqu'à la fin de la mesure, avec deux points à 9 et 12 °C. Ce qui est étrange dans le Jura à une altitude de 1240m.



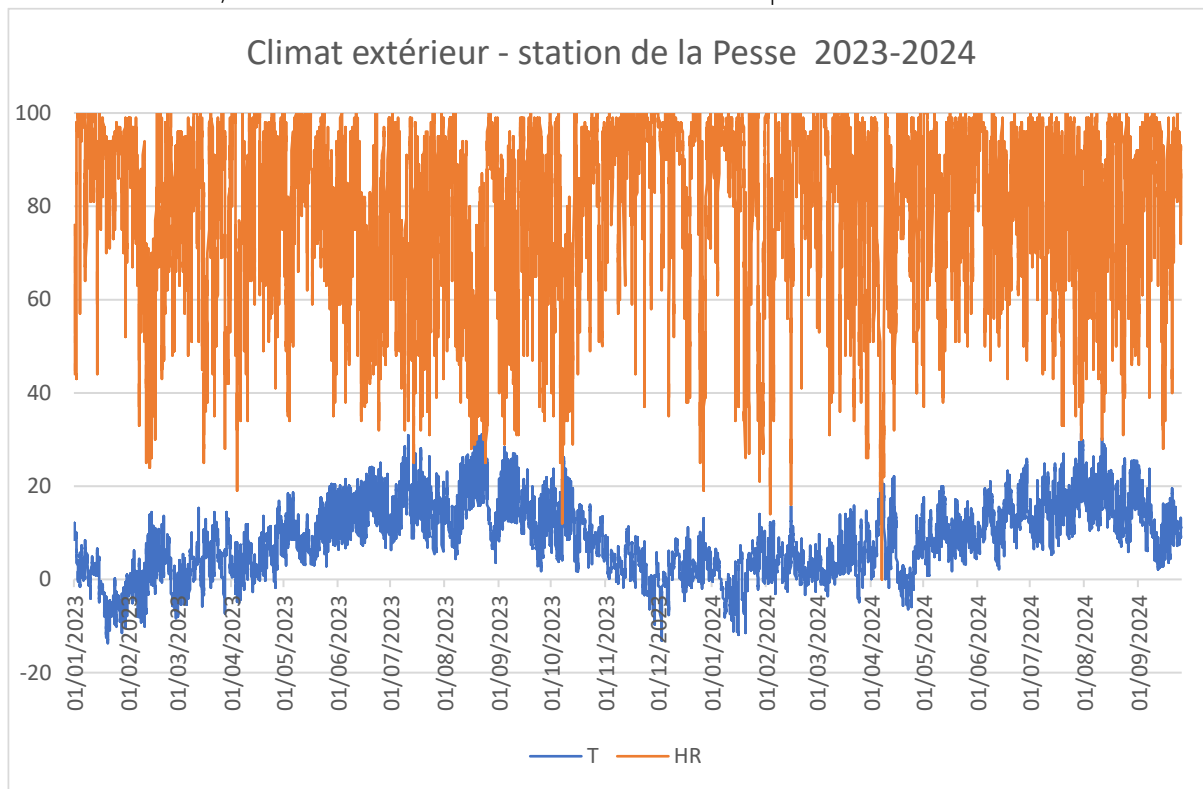
Le capteur ayant été posé sous un abri extérieur avec un toit en tôle, il est probable que le rayonnement du soleil réémis par la tôle a perturbé la mesure.

Ci-contre : photo de la position de la sonde de température extérieure

Les mesures d'humidité relative sont également incohérentes. Il semble que la sonde ait même été endommagée, peut-être par le rayonnement réémis par la tôle.

Nous ne pourrions donc pas utiliser les données issues de cette sonde de température.

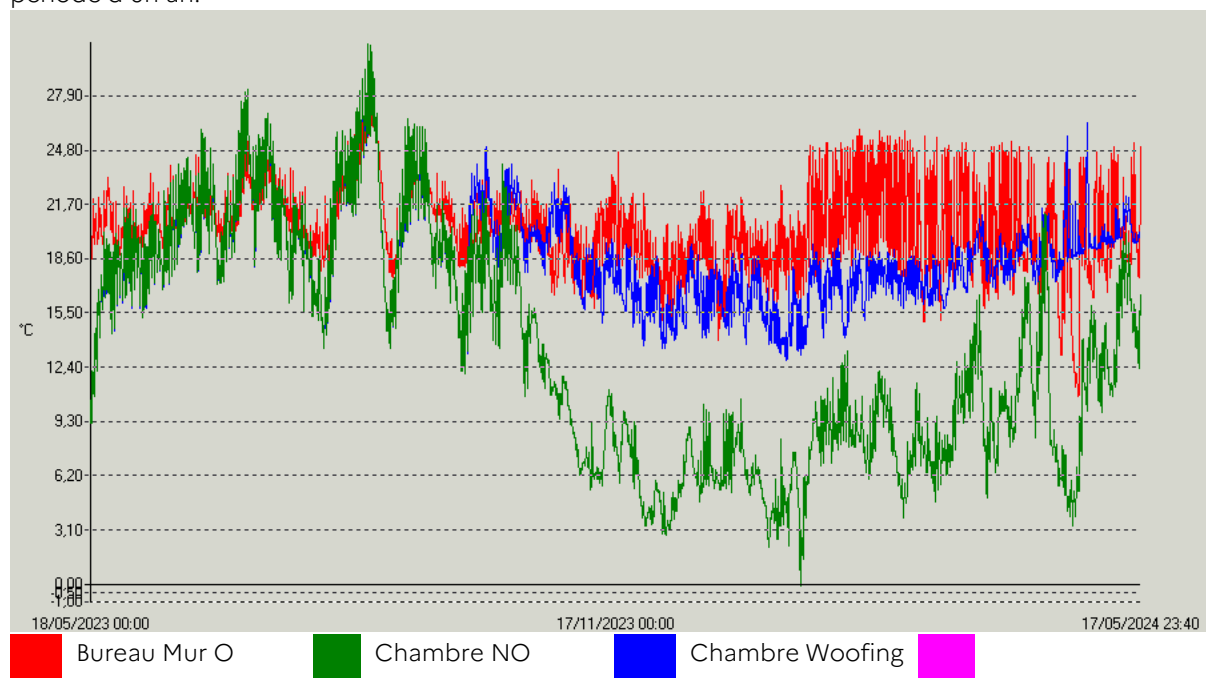
Comme référence, voici le climat extérieur de l'API Météo-France pour la station de La Pesse :



On note une température extérieure comprise entre -14°C et +32°C et de fortes fluctuations de l'humidité relative extérieure.

Analyse du Climat intérieur

Le graphique suivant présente les mesures de **température** dans les 3 pièces instrumentées, sur une période d'un an.

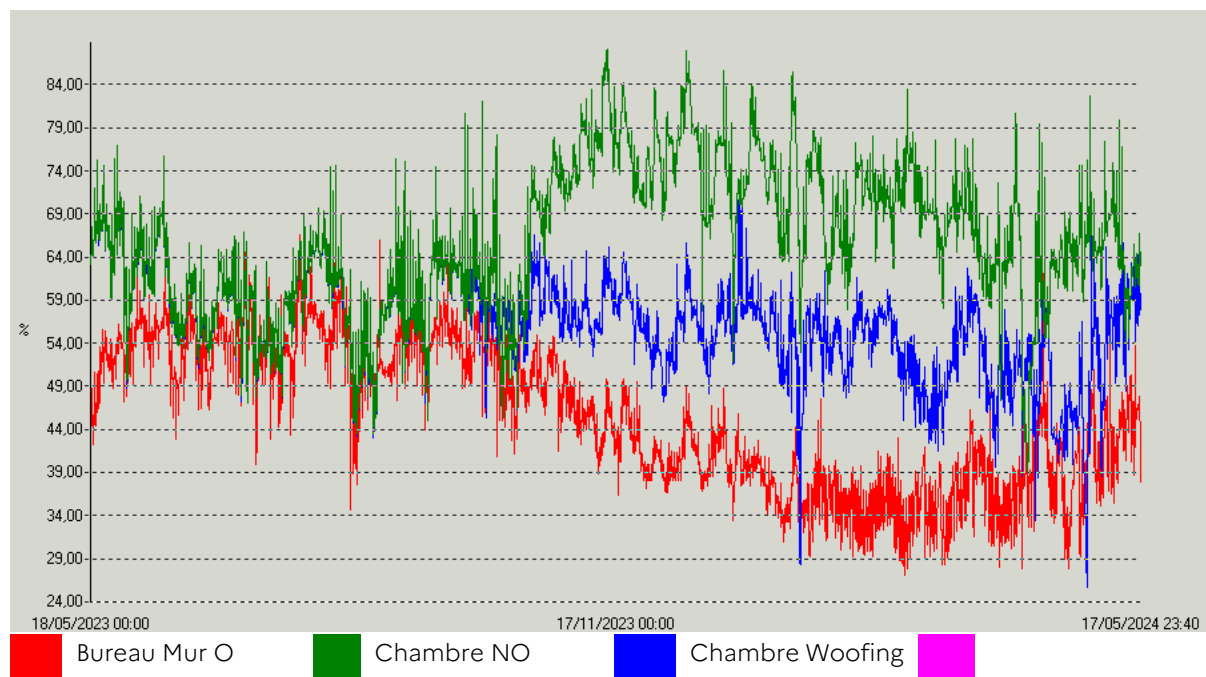


Le bureau et la chambre woofing ont des évolutions de températures similaires, alors que la chambre NO descend plus bas en température en hiver, semblant indiquer qu'elle n'est pas chauffée. C'est en effet une chambre qui n'a pas été utilisée sur la période de mesure. La température y est descendue jusqu'à frôler les 0°C.

Le bureau semble chauffé de manière peu régulière, car sa température peut monter à plus de 22°C en plein hiver, mais descend aussi régulièrement sous 18°C.

Sur la période de mesure, la chambre woofing semble assez peu chauffée. Utilisée en « dépannage », elle reste la plupart du temps sous 19°C.

Pour ce qui est de l'humidité relative :



On constate des différences d'HR entre les 3 pièces, différences qui s'accroissent à partir d'octobre 2023. On constate que la HR est plus élevée pour la chambre NO, non chauffée en hiver. Le bureau quant à lui a une HR très basse en hiver, qui peut s'expliquer par le grand volume de cette pièce avec sans doute de fortes inétanchéités à l'air, ce qui fait rentrer de l'air froid et sec.

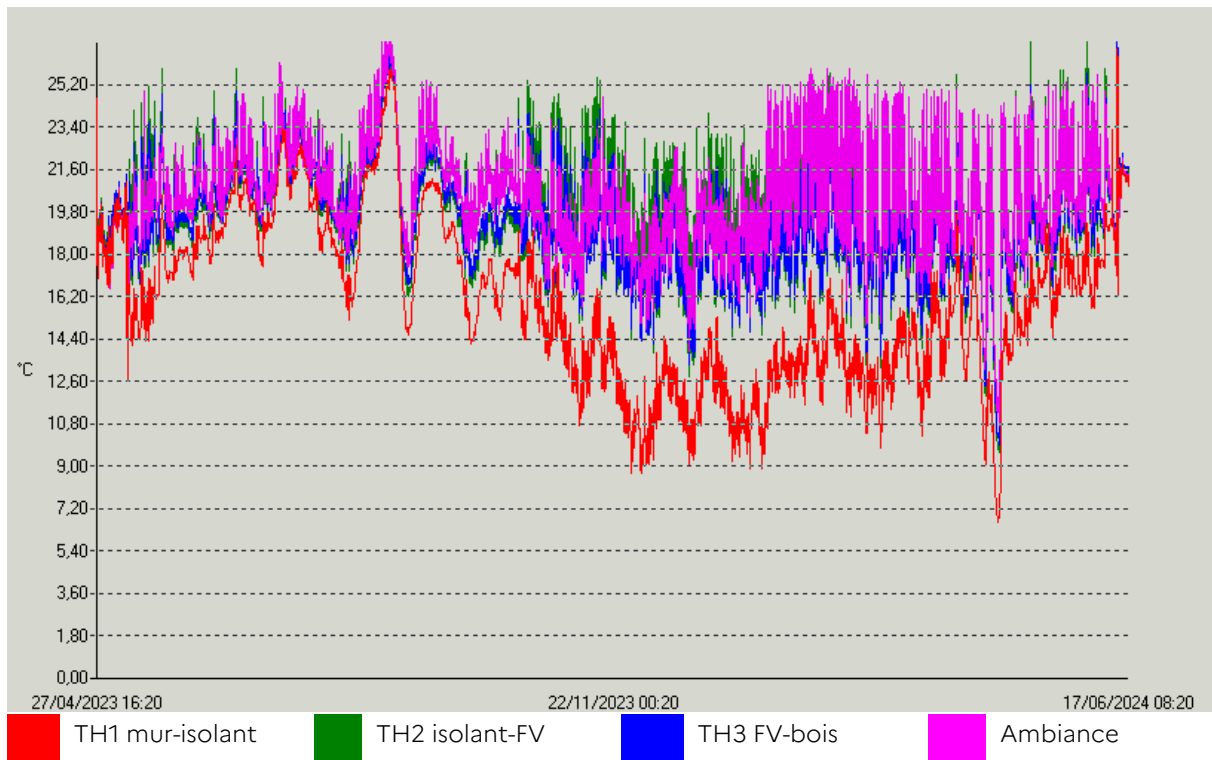
Analyse des mesures mur par mur

- Bureau étage mur Ouest

Rappel des informations :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Bureau	Mur Nord-Ouest (pas de vide technique, seulement 9cm de ouate)	R+1	N-O	Prise basse

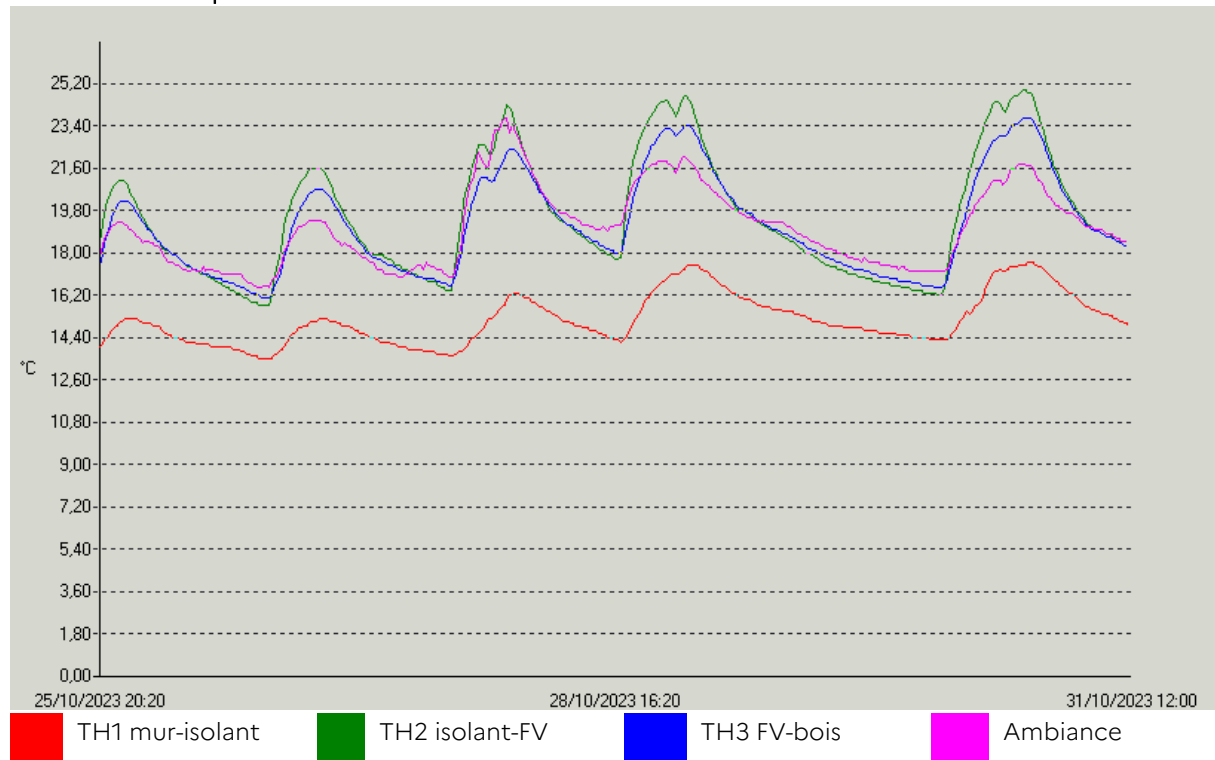
Visualisation des **températures** en TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et freine-vapeur, TH3 entre freine-vapeur et parement, et l'ambiance intérieure. Zoom sur la période de mai à juin 2023 :



En hiver nous avons bien $TH1 < TH2 < TH3$. Mais comme pour la maison A nous constatons en zoomant (graphique ci-dessous) que $TH2 > TH3$ de 1 °C environ sur une période allant du 14/10/2023 jusqu'à la fin des mesures, alors que nous attendions le contraire. Cette différence ne peut pas s'expliquer par une interversion de sondes car sur le début de mesure jusqu'au 14/10/2023 on a bien $TH3 > TH2$: l'explication semble être le fait que ce point de mesure est au-dessus d'un RdC peu chauffé et avec interface en système bois qui n'est pas étanche à l'air.

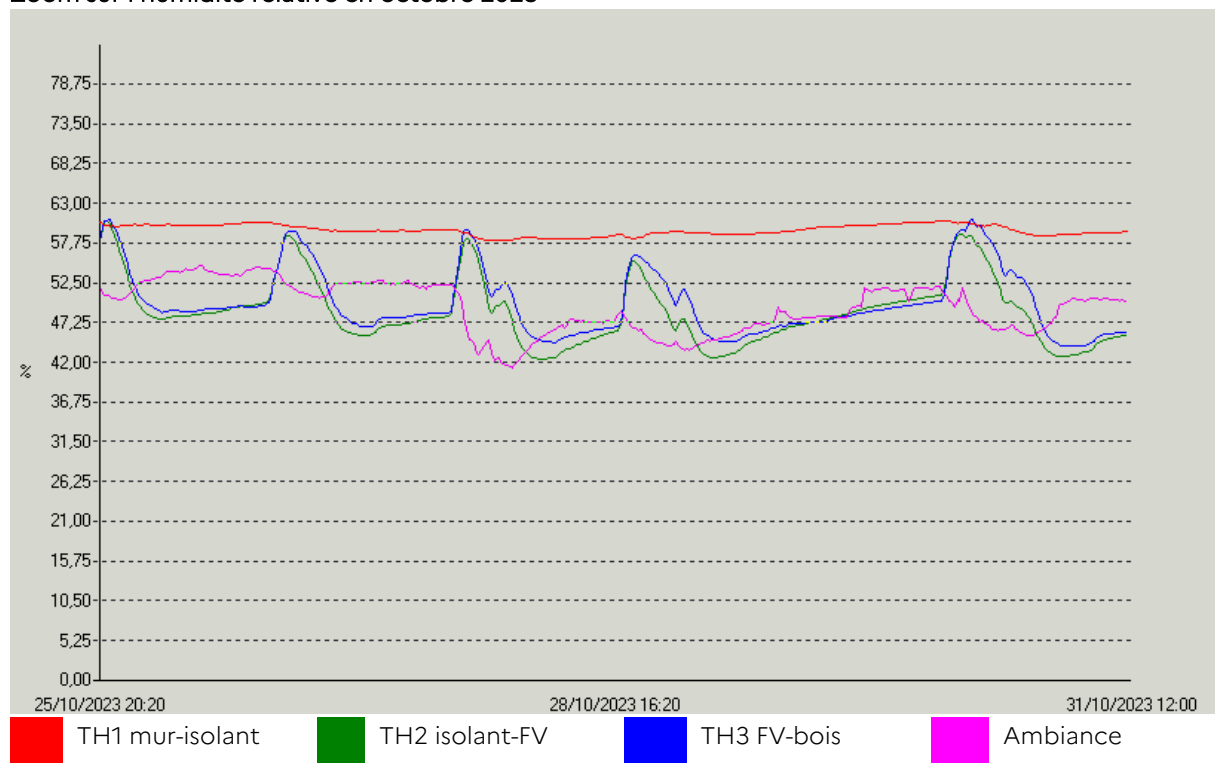
D'autre part la température ambiante TH3 et TH2 suivent les mêmes variations, mais on remarque que les températures sont inversées d'octobre au 21 janvier 2024 : $T^{\circ} \text{ ambiante} < TH3 < TH2$. On peut dire que l'écart de température entre TH3 et $T^{\circ} \text{ ambiante}$ est dans l'incertitude de mesure (de l'ordre de 1°C)

Zoom sur les températures en Octobre 2023 :



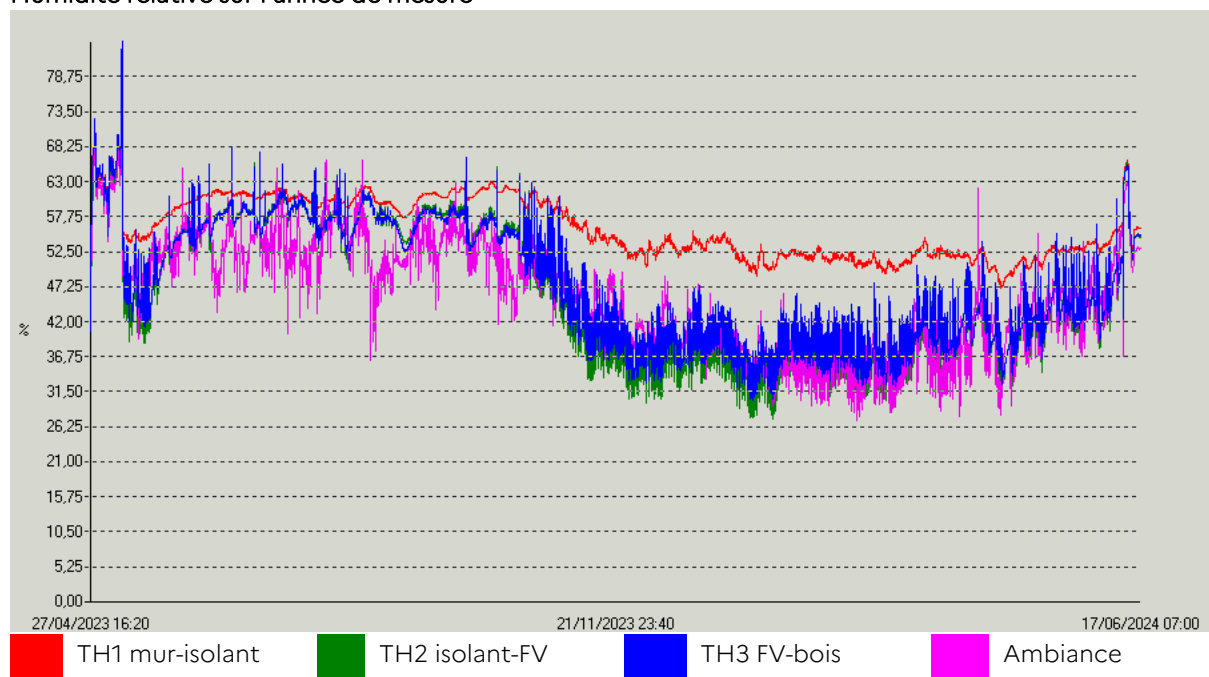
Ces profils de température avec TH2 et TH3 supérieurs à l'ambiance nous ont étonné. Après investigation, il a été indiqué par le propriétaire que **sous la prise, la plinthe cache une canalisation de chauffage**, ce qui explique pourquoi la température dans la lame d'air TH 3 et en TH2 sont plus élevées que la température ambiante.

Zoom sur l'humidité relative en octobre 2023



Contrairement aux mesures des maisons Jura A et B, le niveau d'humidité ne chute pas beaucoup entre TH3 et TH2. Ceci s'explique par les discontinuités constatées dans la mise en œuvre du freine-vapeur, notamment au niveau du passage de gaine électriques à proximité des sondes.

Humidité relative sur l'année de mesure



Malgré les défauts d'étanchéité du freine-vapeur, et malgré un chauffage discontinu de ce bureau, les niveaux d'humidité mesurés dans le mur restent dans un intervalle très maîtrisé de 28 à 67%.

Au niveau de l'interface entre mur et isolant (TH1), l'humidité reste inférieure à 63% toute l'année.

Les critères de SimHuBat sont respectés :

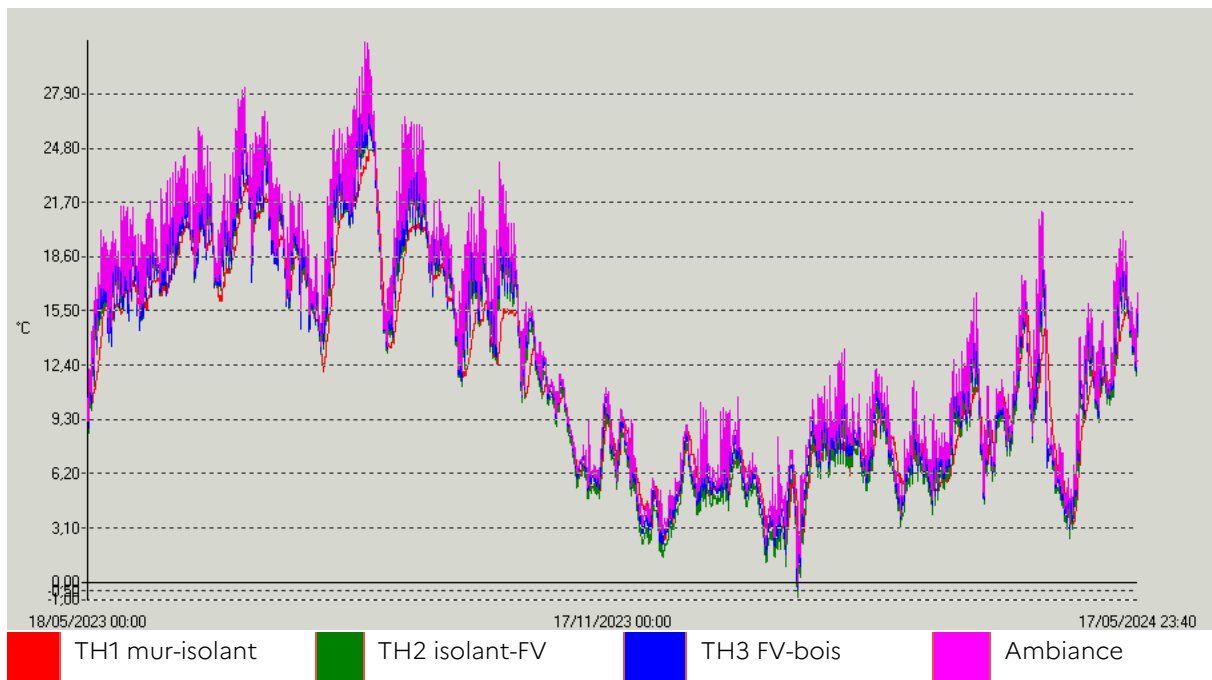
Critères	Description	Mur au global	TH1 : mur / isolant	TH2 : Isolant / FV	TH3 : FV / parement
1	Teneur en eau stable ou diminue	(Simulation uniquement)			
2	Pas de condensation (HR > 98%)	(Période de mesure trop courte)			
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)				
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment				
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait				

- Chambre NO mur Nord

Rappel des informations :

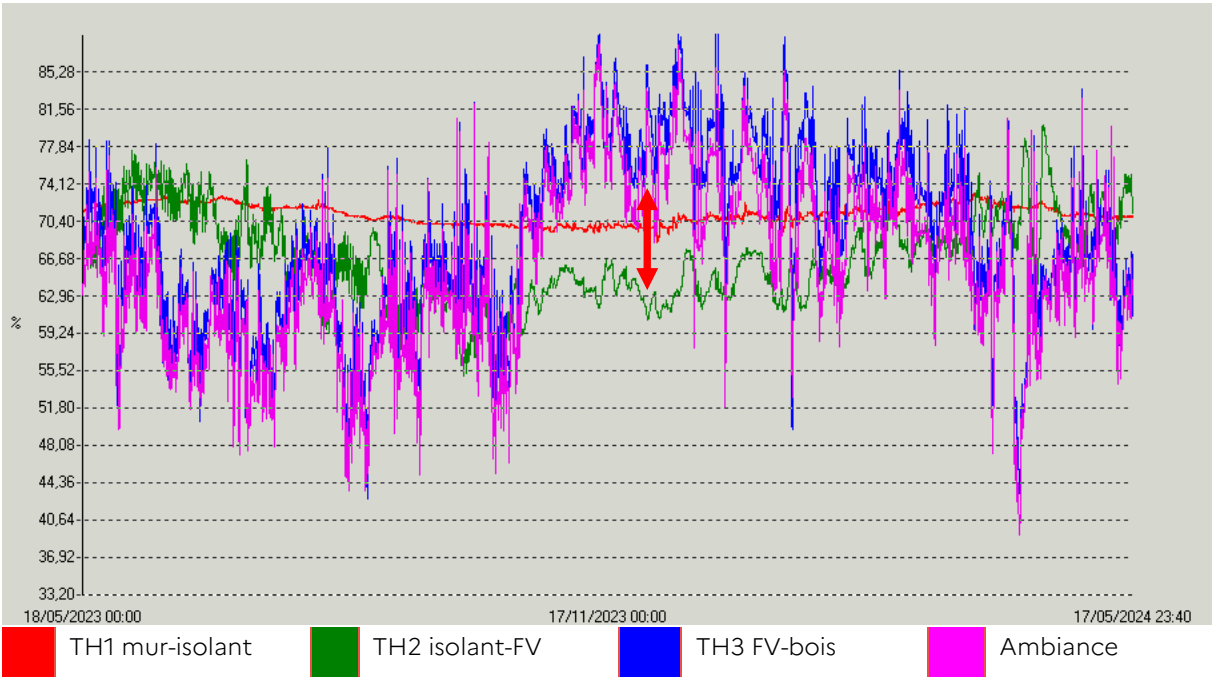
Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre Ouest	Nord-	R+1	N-E	Interrupteur
				Mur Nord-Est (parement pas encore posé)

Visualisation sur 1 an des **températures** en TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et freine-vapeur, TH3 entre freine-vapeur et parement, et l'ambiance intérieure :



A toutes les saisons les évolutions de températures sont similaires, les écarts de températures entre les 4 sondes sont faibles. Ce résultat surprenant de premier abord s'explique par le fait que **cette chambre est non chauffée**, et sa fenêtre ne reçoit pas les apports du soleil. **L'ensemble se comporte comme un espace tampon avec un faible gradient de température au niveau de l'isolant.**

Visualisation sur 1 an des **humidités relatives** de TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et freine-vapeur, TH3 entre freine-vapeur et parement, et l'ambiance intérieure :



L'humidité de l'ambiance en hiver est identique à celle de la lame d'air (TH3), ce qui paraît cohérent. Au cours de l'hiver, on voit bien l'effet du freine-vapeur (flèche rouge sur le graphe ci-dessus) avec l'humidité derrière le freine-vapeur coté froid (sonde TH2) qui est plus faible que pour la sonde TH3.

Globalement, dans l'isolant et à l'interface avec le mur (TH1 et TH3), l'humidité reste inférieure à 75% toute l'année à l'exception de TH2 au printemps et en été, qui reste toutefois sous 80%. TH1 reste stable et inférieure à 75% toute l'année.

Malgré le fait que cette chambre est non chauffée, l'humidité dans l'isolant reste très inférieure à la valeur de 93,5% qui correspond à une masse d'eau de 23% pour la ouate de cellulose (voir [l'encadré méthodologique à ce sujet](#)).

Ainsi, les critères de SimHuBat sont respectés :

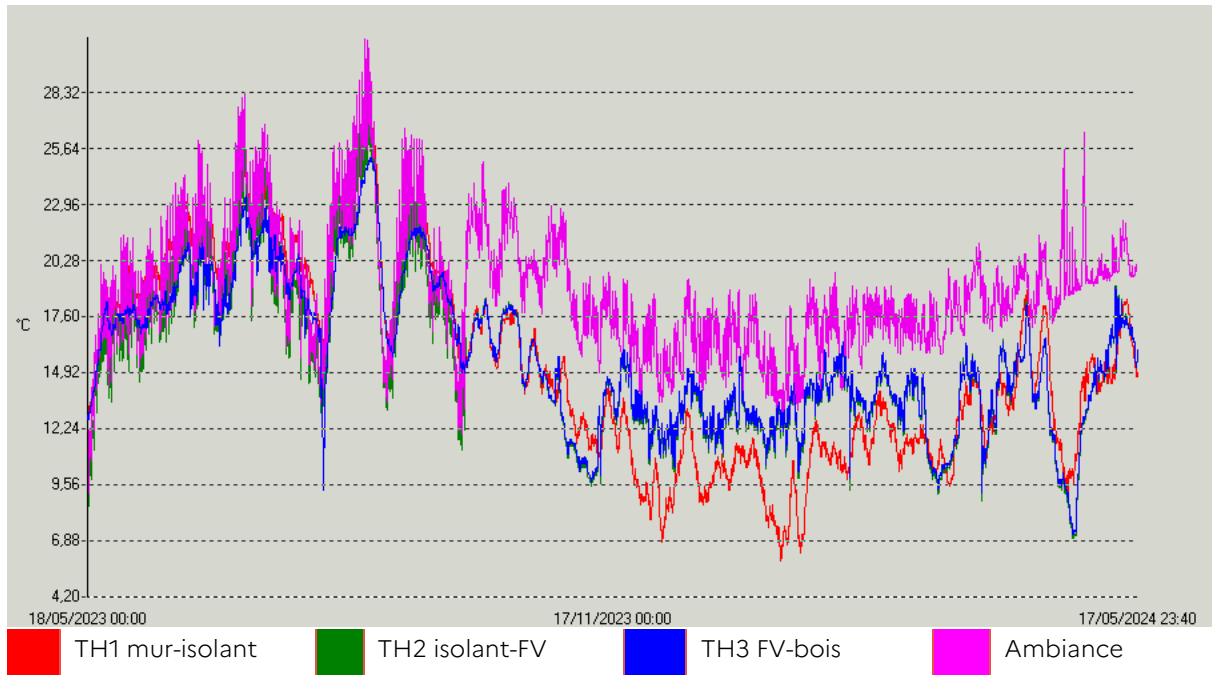
Critères	Description	Mur au global	TH1 : mur / isolant	TH2 : Isolant / FV	TH3 : FV / parement
1	Teneur en eau stable ou diminue	(Simulation uniquement)			
2	Pas de condensation (HR > 98%)	(Période de mesure trop courte)			
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)				
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment				
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait				

- Chambre Woofing mur Ouest

Rappel des informations :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre « woofing »	Mur Nord-Ouest	R+1	N-O	Prise basse

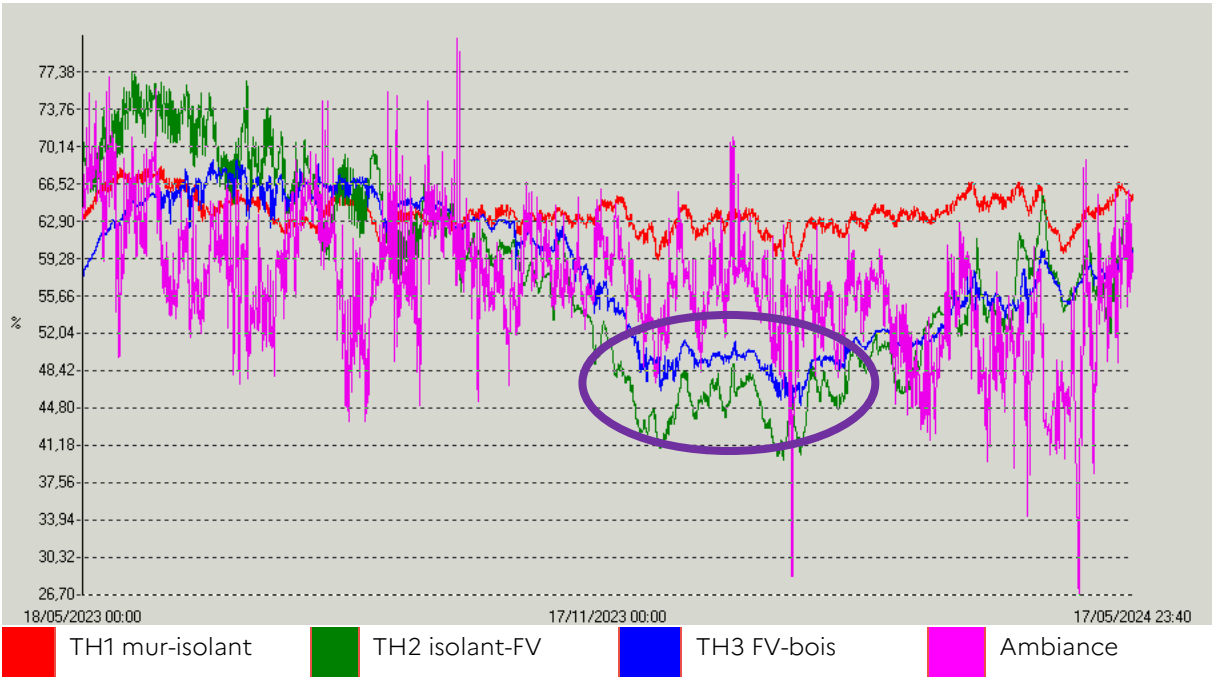
Visualisation sur 1 an des **températures** en TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et freine-vapeur, TH3 entre freine-vapeur et parement, et l'ambiance intérieure :



L'évolution des températures semble pertinente du point de vue des saisons.

Et en hiver la hiérarchie des températures est respectée : TH1 < TH2 ≈ TH3 < T° ambiante

Visualisation sur 1 an des **humidités relatives** de TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et freine-vapeur, TH3 entre freine-vapeur et parement, et l’ambiance intérieure :



L’humidité relative de l’ambiance varie de 27 à 80%.
La hiérarchie des HR est respectée.

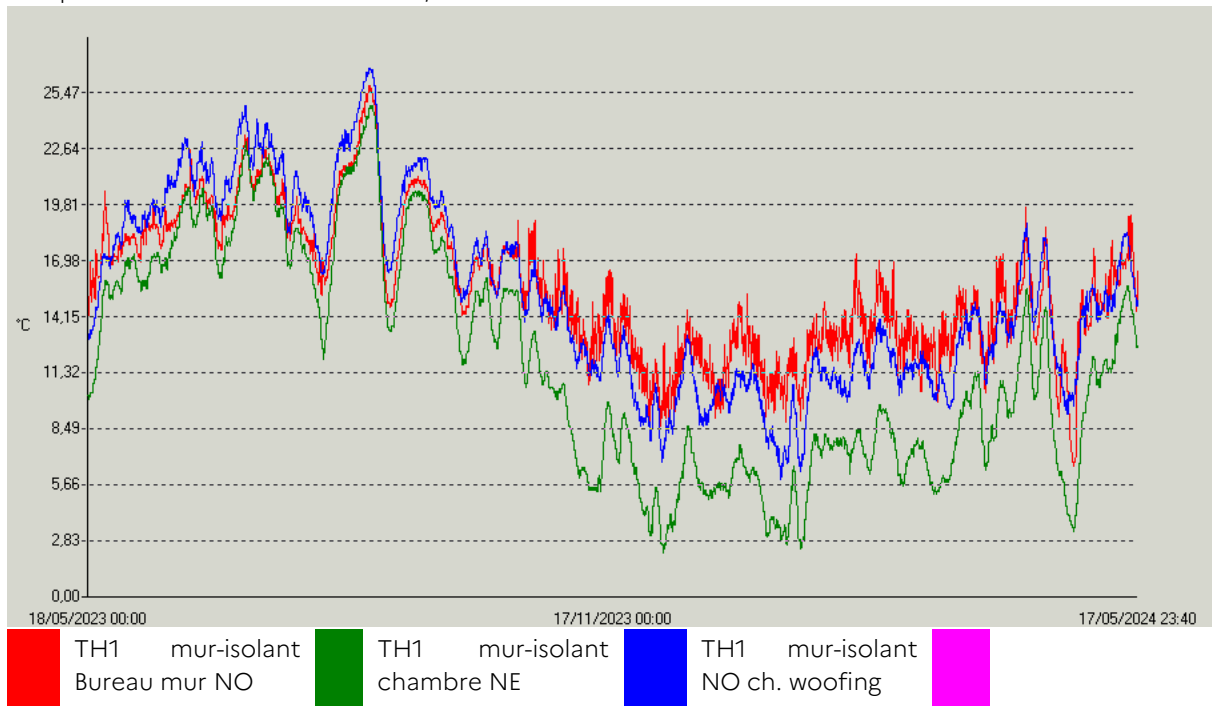
Au niveau du contact mur/isolant (TH1) l’humidité varie peu : entre 68 et 73%. Cette valeur maximale reste faible (<75%).
En hiver, en on le voit particulièrement sur la séquence entourée en violet, l’humidité TH3 est inférieure à celle de TH2, ce qui illustre bien l’efficacité du freine-vapeur qui fait chuter l’humidité relative pour protéger l’isolant.

Ainsi, les critères de SimHuBat sont respectés :

Critères	Description	Mur au global	TH1 : mur / isolant	TH2 : Isolant / FV	TH3 : FV / parement
1	Teneur en eau stable ou diminue	(Simulation uniquement)			
2	Pas de condensation (HR > 98%)	(Période de mesure trop courte)			
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)				
4	Absence d’eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment				
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait				

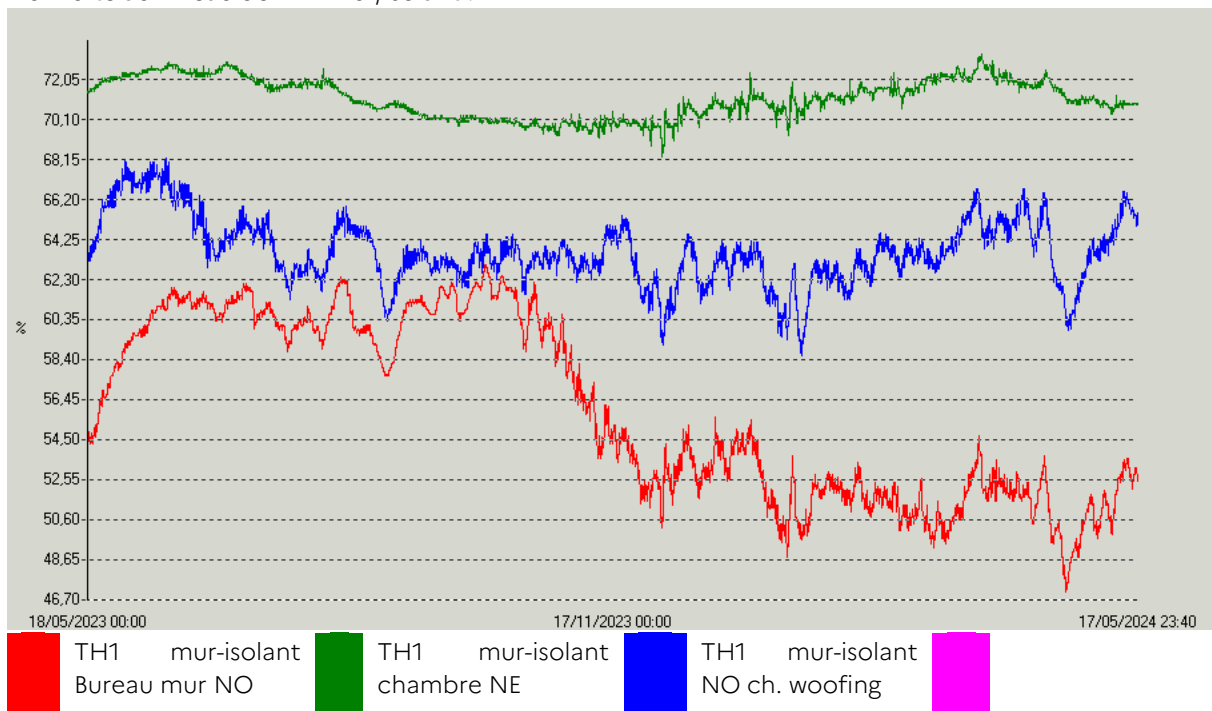
- Analyse comparée des 3 pièces

Température au niveau de TH1 mur/isolant :



Les températures suivent les mêmes variations. Le fait que la chambre NO soit non chauffée provoque un écart pouvant aller jusqu'à 10°C en hiver.

Humidité au niveau de TH1 mur/isolant :



Pour les variations d'humidité, celle de la chambre NO est logiquement plus élevée : si l'humidité absolue pour les 3 murs est identique (du fait du Freine vapeur qui limite le passage de vapeur d'eau), alors plus la température est basse plus l'humidité relative est haute.

A noter que l'humidité relative pour les 3 murs reste inférieure à 73% à l'interface entre mur et isolant, ce qui est tout à fait satisfaisant.

2.3.3 Conclusions sur la maison Jura C

Pour les 3 murs instrumentés sur cette maison, tous les critères de SimHuBat sont respectés du point de vue de la mesure in-situ.

On note même qu'à l'interface entre le mur et l'isolant, l'humidité ne dépasse pas 70% pour le bureau comme pour la chambre woofing. La chambre NO, non chauffée, est pénalisée mais pour autant l'humidité ne dépasse pas 75%. La présence de défaut d'étanchéité à l'air au niveau du Freine-vapeur dans le bureau ne semble pas impacter le taux d'humidité dans l'isolant.

Le complexe d'isolation avec ouate et freine-vapeur, même en l'absence d'une ventilation mécanique, et avec un chauffage partiel voire absent pour l'une des chambres, et en présence de défaut de continuité du freine-vapeur, voire de pare-vapeur non hygro-réglable, ne présente pas sur ce projet de problème hygrothermique.

2.4 Maison Jura D

2.4.1 Présentation de la maison

Département : Jura (39)

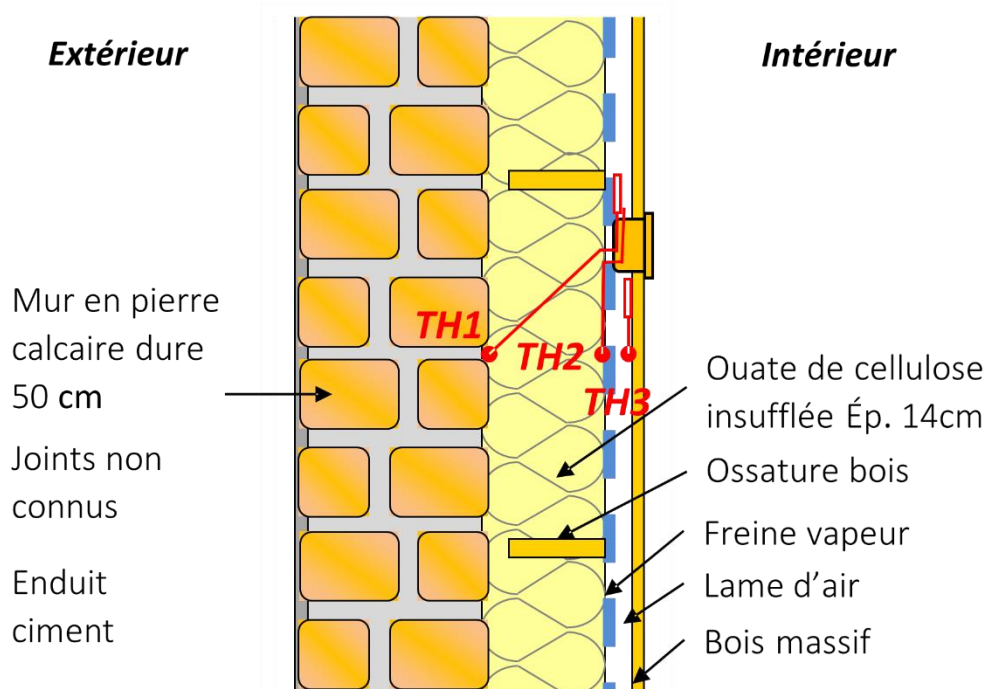
Altitude : 905 m

Maison mitoyenne sur ses façades Nord-Est et Sud-Ouest.

Description du mur : Mur pierre calcaire de 50cm, avec enduit extérieur très peu capillaire (enduit ciment réalisé dans les années 50/60). Côté intérieur revêtement plâtre ou/et vieille peinture.

Seule la façade sur rue est isolée, c'est donc la seule qui est instrumentée. Isolation par 14 cm de Ouate insufflée, Freine-vapeur certainement hygrovariable de marque inconnue, 3cm de lame d'air, parement en planches rabotées en bois massif (2.5cm).

Isolation réalisée 15 ans avant l'instrumentation.



Ventilation : pas de VMC, ouverture des fenêtres.

Pièces instrumentées et orientation :

Seule la façade sur rue est isolée, c'est donc la seule qui est instrumentée. La pluie battante est Sud-Ouest, mais aucune façade ne donne vers cette orientation (mur mitoyen).

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Cuisine-Séjour	Façade sur rue	R+1	N-O (à droite)	Prise basse
	Façade sur rue	R+1	N-O (à gauche)	Interrupteur (1,2m du plancher)
Chambre	Façade sur rue	R+1	N-O	Boîtier haut (2m du plancher)

2.4.2 Visualisation des mesures – maison Jura D

Période de mesure

Historique de l'instrumentations des maisons Jura C et D

- Programmation des sondes
- Instrumentation le 27/04/2023
- Dépose des sondes : 10/06/2024
- Relève des données le 17/06/2024
- Mise en base

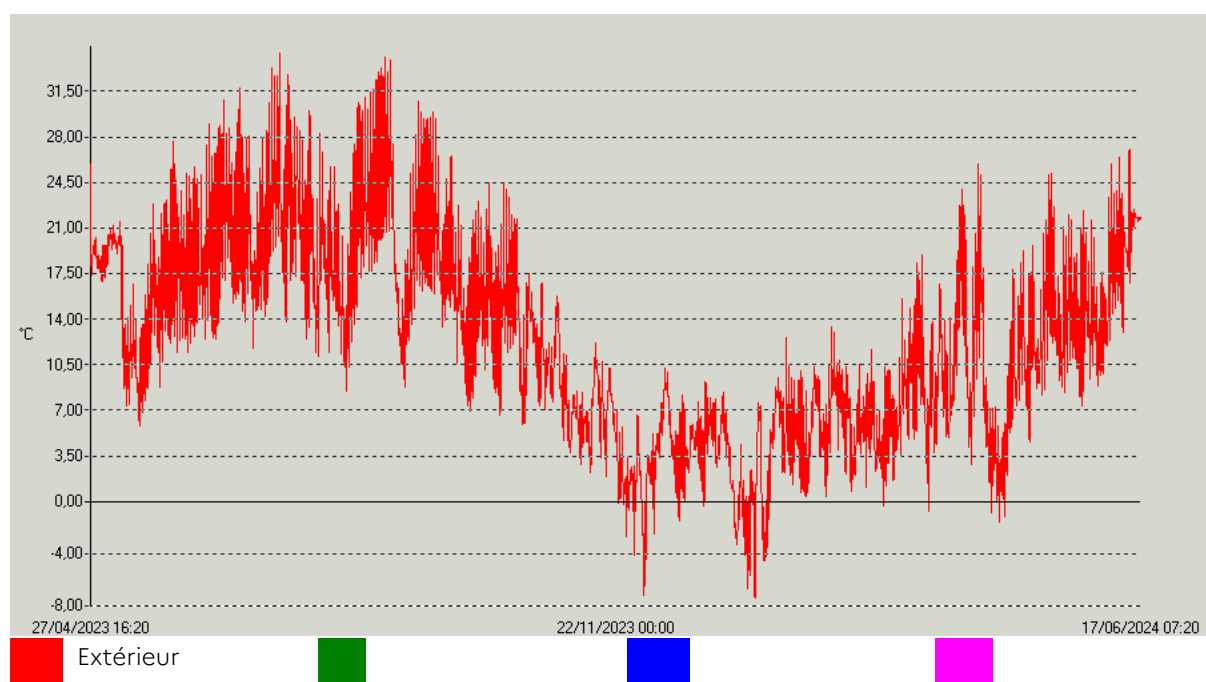
⇒ On retient l'année de mesure du 18/05/2023 au 18/05/2024

Analyse du Climat extérieur

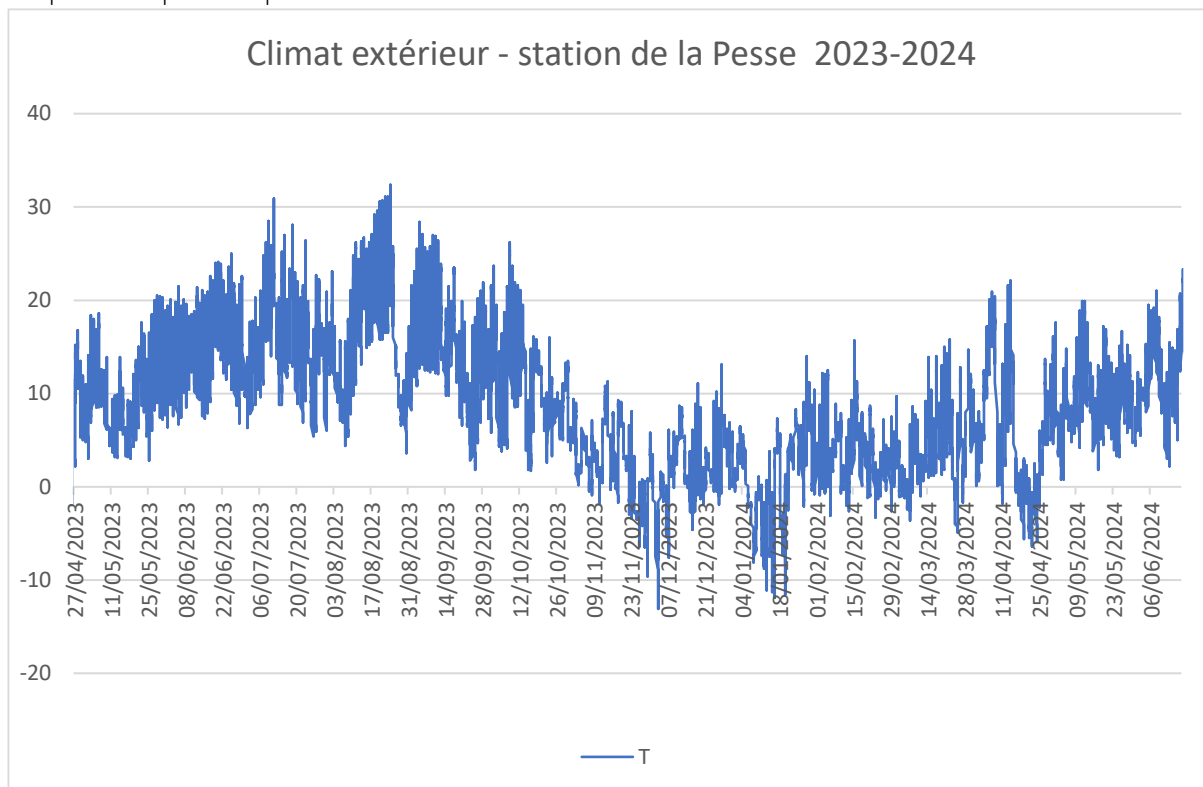
Projet à Longchaumois (39), altitude 905m.

A 35 km de Lons-le-Saunier, station à 298 m d'altitude (voir la [fiche Météo-France](#)), à 13km de la station Suisse de La Dole (altitude 1675m) ou encore à 30km de la station de La Pesse (altitude 1133 m- voir la [fiche Météo-France](#)).

Visualisation de la température mesurée sur la période de mesure retenue :

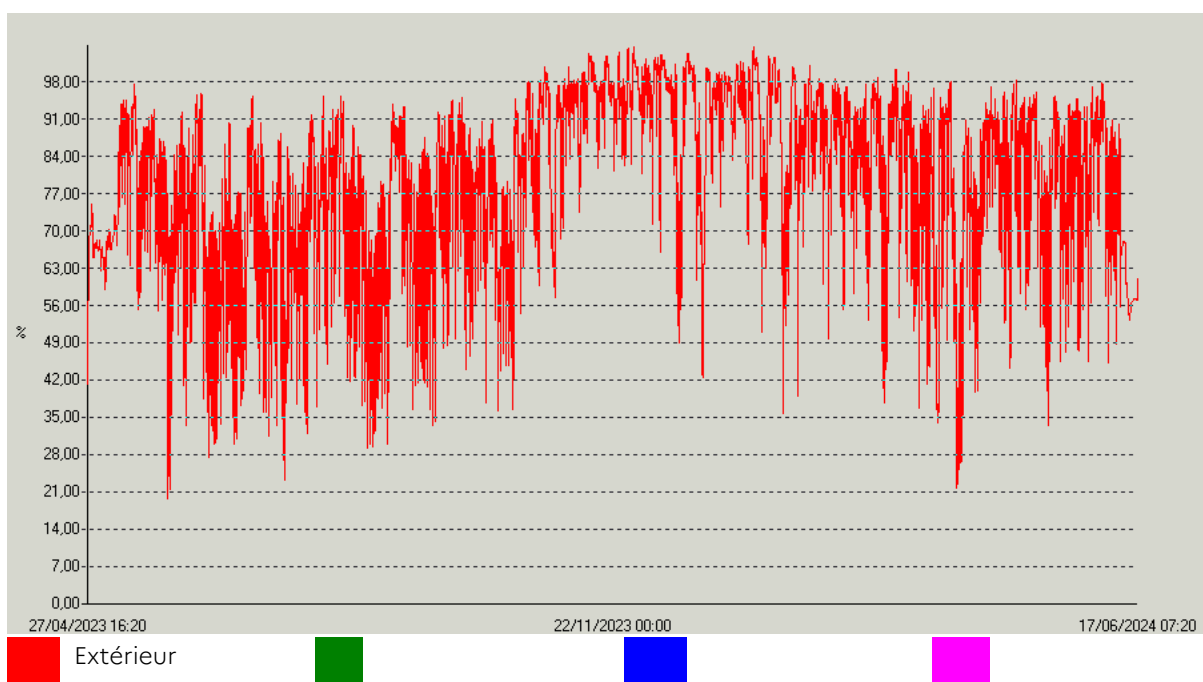


On peut comparer ce profil aux données Météo-France de La Pesse :



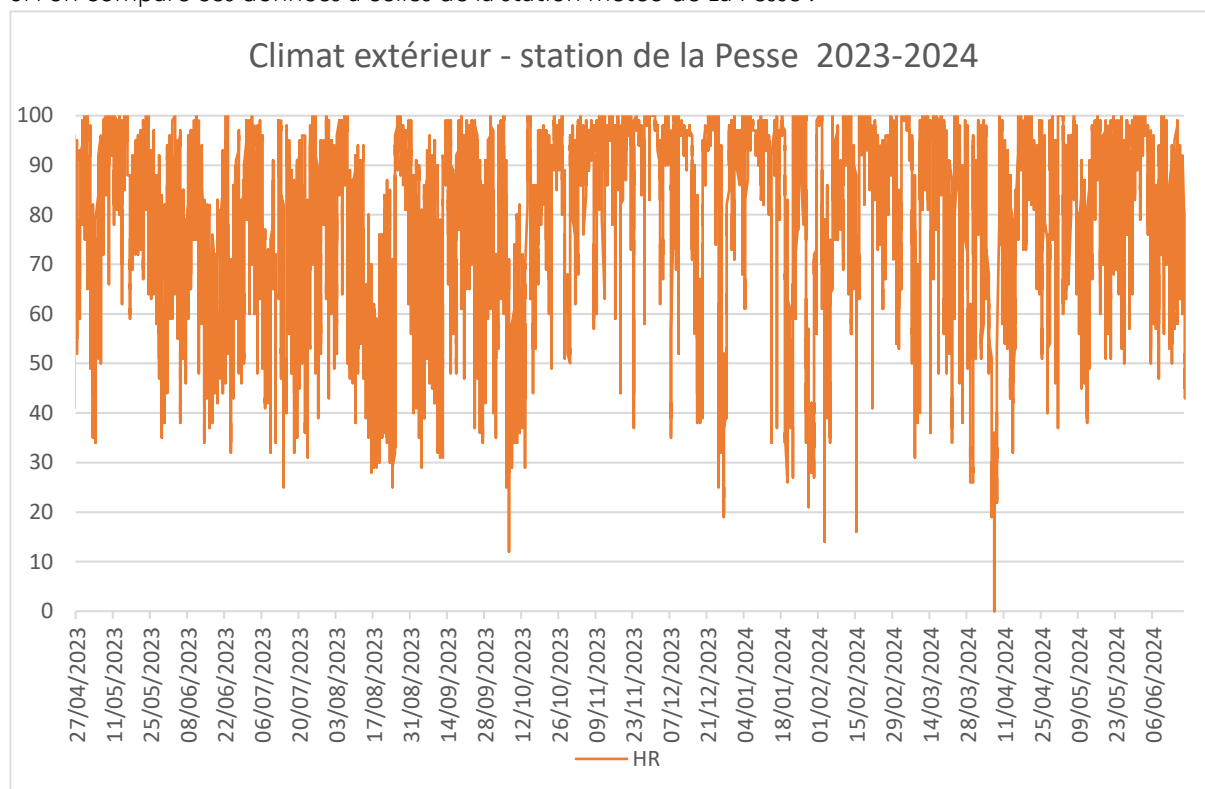
Le profil de température mesuré est proche du climat de La Pesse récupéré sur l'API Météo-France (ci-dessus le graphique est zoomé sur la même période que la mesure).

Pour ce qui est de l'humidité relative :



L'humidité semble très élevée toute l'année, avec une proximité à 100% d'HR de façon régulière en hiver.

Si l'on compare ces données à celles de la station météo de La Pesse :



Le fait d'atteindre des humidités élevées est confirmé par les données de Météo-France à La Pesse. Cependant le profil d'humidité relative est assez différent

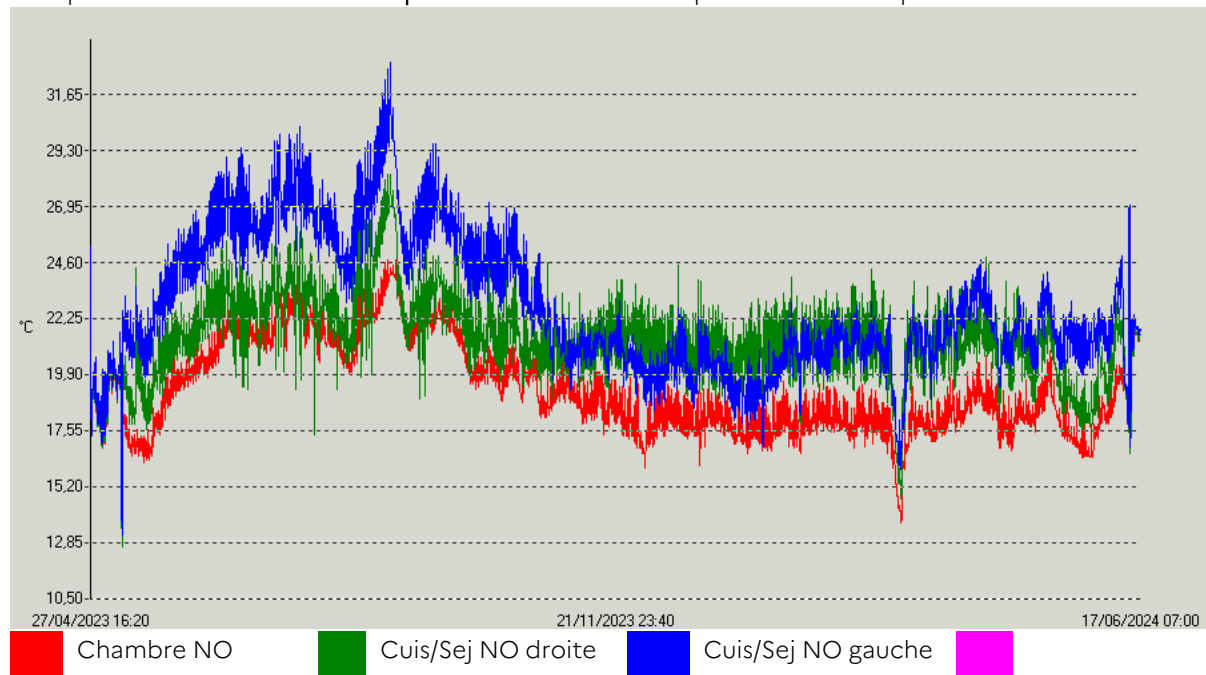
Il est possible que la position de la sonde, sous un linteau, ait perturbé la mesure. Ces données ne nous semblent pas suffisamment fiable pour l'utiliser dans les simulations WUFI. C'est pourquoi dans la partie 3 nous utiliserons plutôt un climat extérieur issu des données météo de La Pesse.



Ci-contre : photo de la position de la sonde extérieure. (Sous linteau porte de garage, façade Nord)

Analyse du Climat intérieur

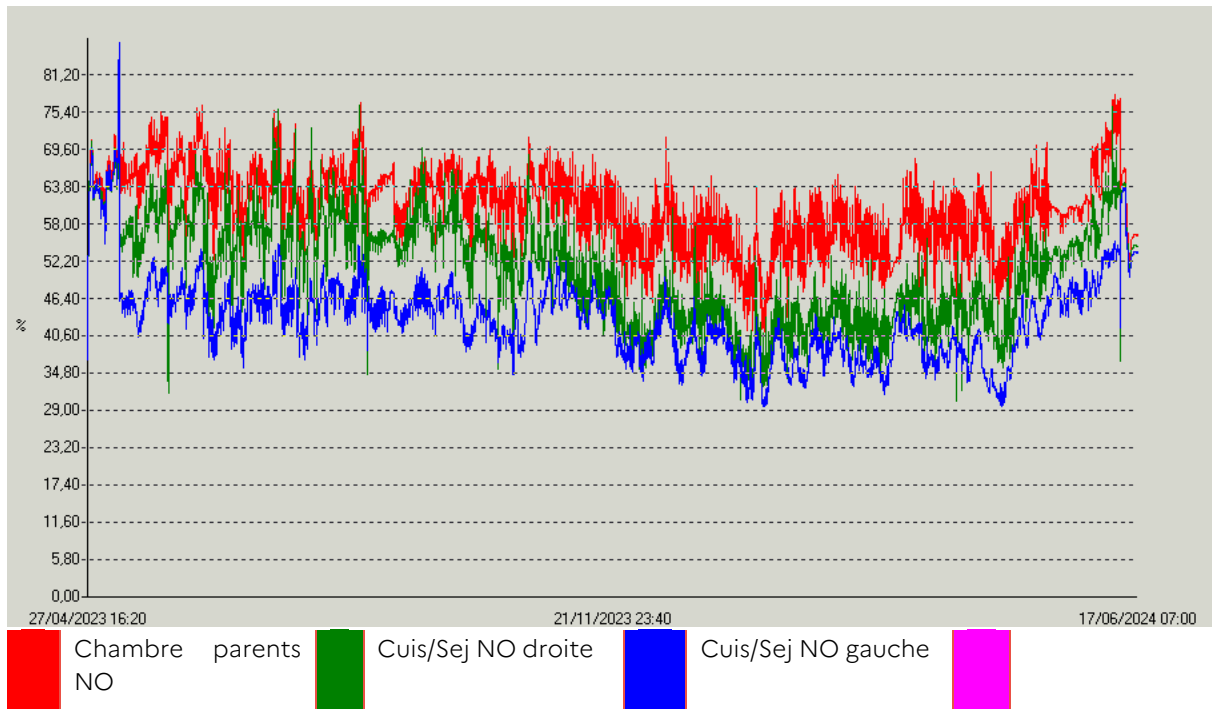
Comparaison des mesures de **température** au niveau des 3 points de mesure pour l'ambiance intérieure :



Pour la cuisine séjour, on constate un écart de température de 2 à 3 °C entre les 2 températures d'ambiance, certainement du fait que la sonde d'ambiance pour Cuis/sej NO Haut se trouve dans l'encoffrement du chauffe-eau et a donc une température plus élevée hors saisons de chauffe. En revanche la sonde d'ambiance « basse » se trouve à proximité du radiateur ce qui explique la température plus élevée en hiver.

La chambre a sa température plus basse que celle de la cuisine. Elle semble chauffée car la température est assez stable, même si elle oscille principalement entre 17 et 19°C.

Humidité relative de l'ambiance intérieure :



L'humidité relative intérieure varie entre 30 et 77%.

Analyse des mesures mur par mur

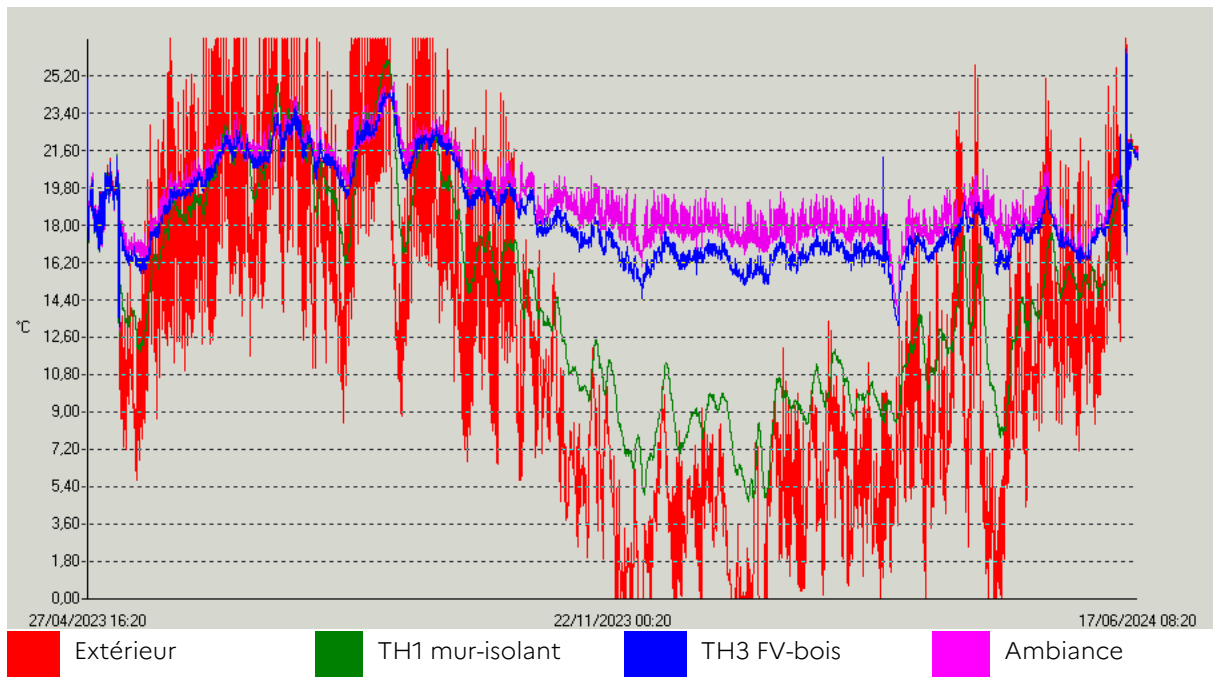
- Chambre parents Nord-Ouest

Rappel des informations :

Pièce	Mur	Étage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre	Façade sur rue	R+1	N-O	Boitier haut (2m du plancher)

Nous avons éliminé la sonde TH2 qui donne des résultats incohérents : cette sonde est certainement tombée en panne.

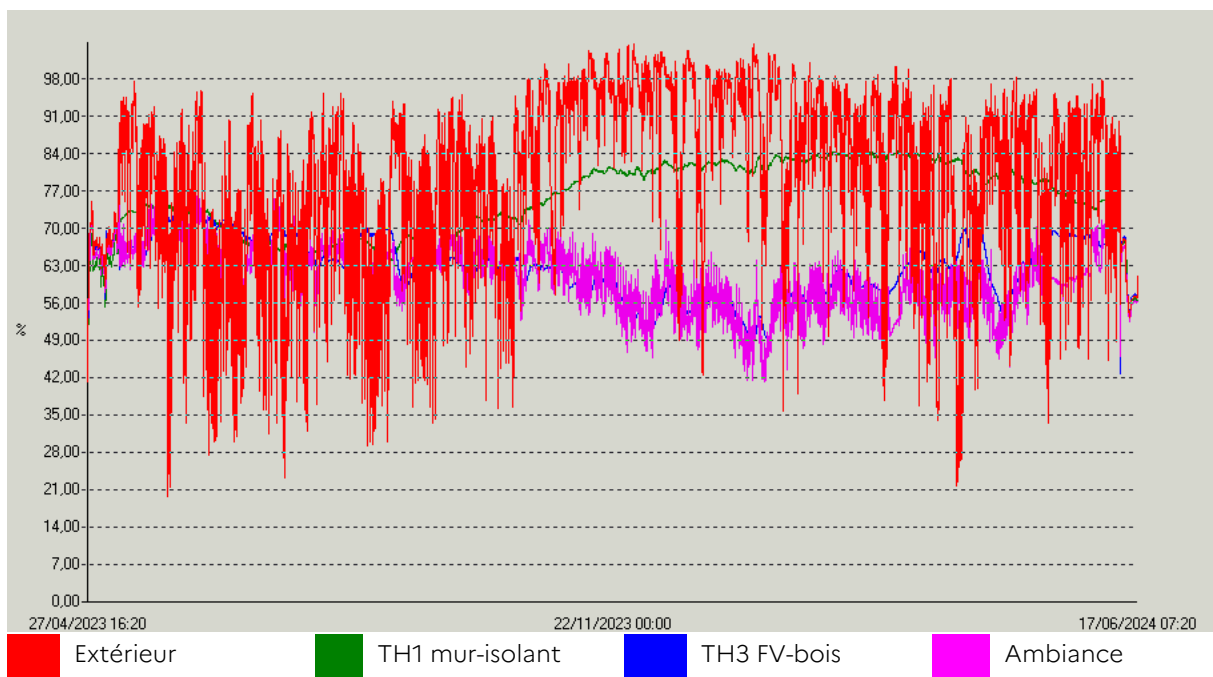
Visualisation sur 1 an des **températures** extérieure (mesurée), TH1 entre mur et isolant, TH3 entre freine-vapeur et parement, et l'ambiance intérieure :



Les hiérarchies de température sont respectées $TH1 < TH3 < T_{\text{ambiance}}$

Les évolutions de température sont cohérentes : la température de contact mur-isolant suit bien l'évolution de la température extérieure, TH3 et T ambiance ont la même évolution. On constate bien que la chambre est chauffée à partir d'octobre et a une température comprise entre 17 et 20 °C.

Visualisation sur 1 an des **humidités relatives** extérieure (mesurée), TH1 entre mur et isolant, TH3 entre freine-vapeur et parement, et l'ambiance intérieure :



Malgré une humidité intérieure assez basse en hiver, l'HR monte jusqu'à 84 % au niveau du contact mur-isolant (TH1), ce qui est assez élevé, sans toutefois s'approcher du seuil de 93,5% qui correspond à une

masse d'eau de 23% pour la ouate de cellulose (voir [l'encadré méthodologique à ce sujet](#)). Cette humidité assez élevée semble liée à une humidité extérieure importante.

Ainsi, les critères de SimHuBat sont respectés :

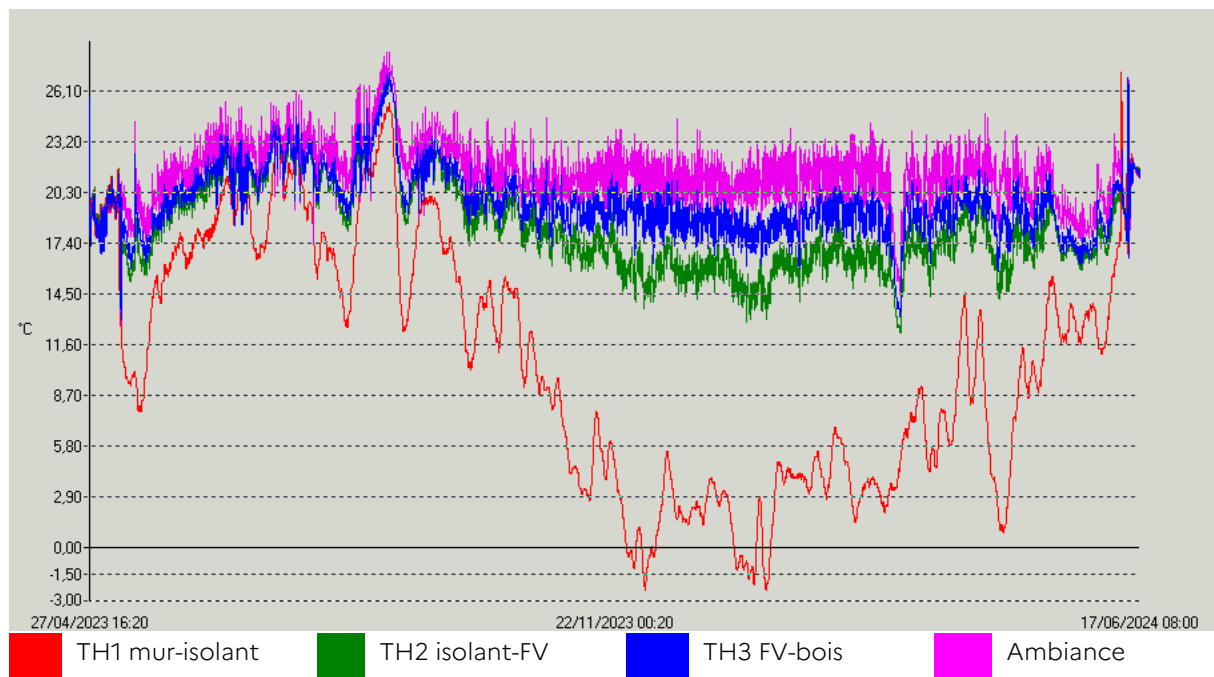
Critères	Description	Mur au global	TH1 : mur / isolant	TH2 : Isolant / FV	TH3 : FV / parement
1	Teneur en eau stable ou diminue	(Simulation uniquement)			
2	Pas de condensation (HR > 98%)	(Période de mesure trop courte)			
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)				
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment				
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait				

- Cuisine/séjour Nord-Ouest droite

Rappel des informations :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Cuisine-Séjour	Façade sur rue	R+1	N-O (à droite)	Prise basse

Visualisation sur 1 an des **températures** en TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et freine-vapeur, TH3 entre freine-vapeur et parement, et l'ambiance intérieure :

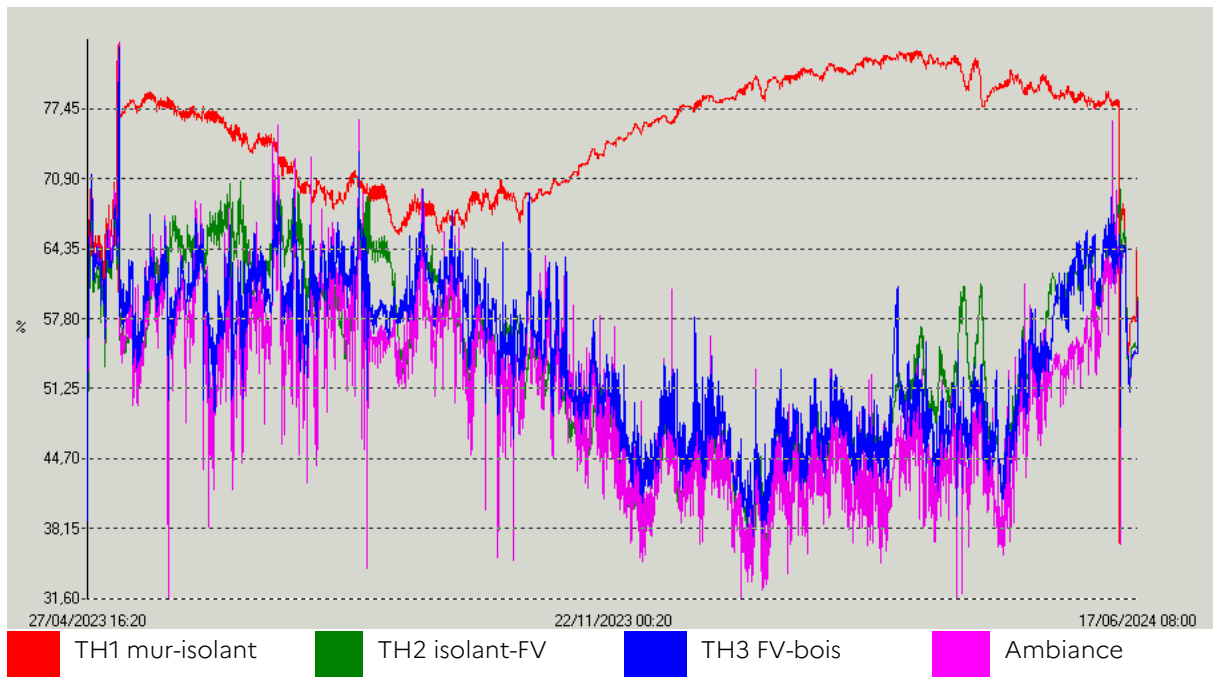


En hiver la hiérarchie des températures est respectée : $TH1 < TH2 \approx TH3 < T^{\circ} \text{ ambiante}$.

La température ambiante illustre bien le fait que cette pièce est chauffée à plus de 19°C la plupart du temps.

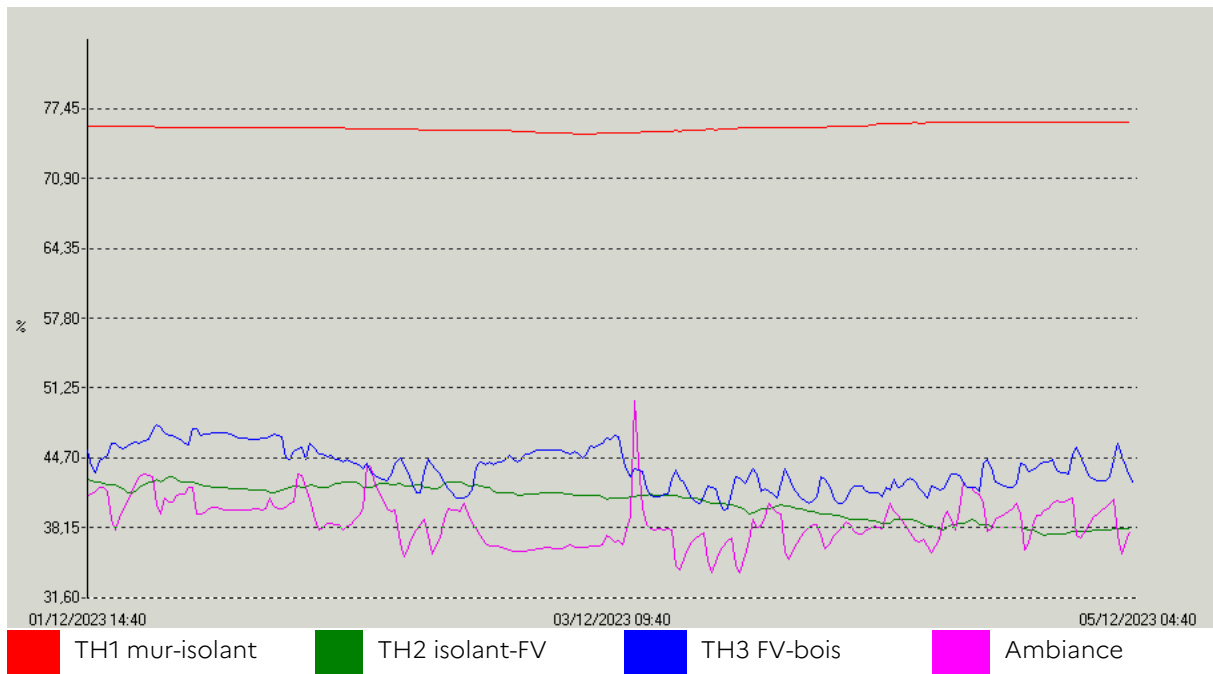
La température TH1 contact mur /isolant arrive même à être négative en hiver.

Visualisation sur 1 an de l'**humidité relative** en TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et freine-vapeur, TH3 entre freine-vapeur et parement, et l'ambiance intérieure :



L'humidité relative au niveau du contact mur/isolant monte jusqu'à 85,5%, ce qui est élevé tout en restant loin du seuil correspondant à 23% d'humidité en masse (comme pour la Chambre des parents).

De plus les courbes d'humidité relative pour l'ambiance, TH2 et TH3 sont très proches au niveau de leur valeur. Ci-dessous zoom sur une semaine en hiver ..



Les courbes d'HR de la sonde TH2 et de la sonde TH3 ne sont distantes que de quelques points d'HR. **Cela signifierait que le freine-vapeur est percé ou discontinu**, ou encore que le type de freine-vapeur est très ouvert à la vapeur (Sd très faible).

Malgré cela, les critères de SimHuBat sont respectés :

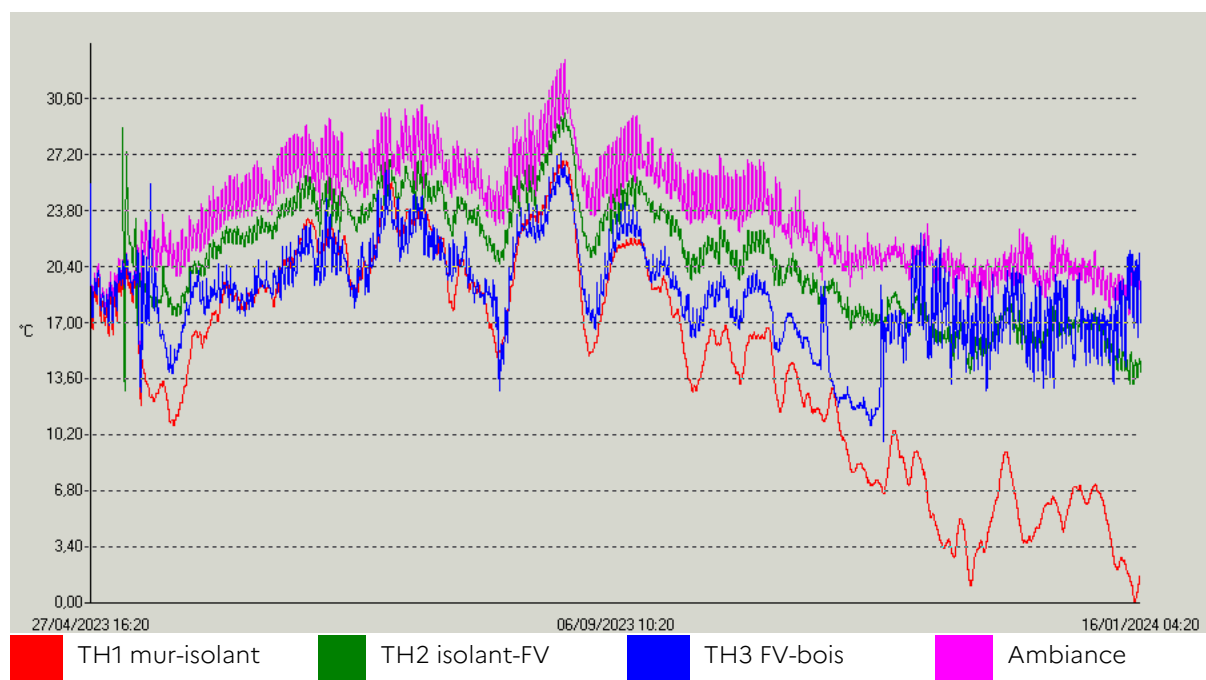
Critères	Description	Mur au global	TH1 : mur / isolant	TH2 : Isolant / FV	TH3 : FV / parement
1	Teneur en eau stable ou diminue	(Simulation uniquement)			
2	Pas de condensation (HR > 98%)	(Période de mesure trop courte)			
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)				
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment				
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait				

- Cuisine/séjour Nord-Ouest gauche

Rappel des informations :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Cuisine-Séjour	Façade sur rue	R+1	N-O (à gauche)	Interrupteur (1,2m du plancher)

Visualisation des **températures** en TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et freine-vapeur, TH3 entre freine-vapeur et parement, et l'ambiance intérieure. Période d'avril 2023 à mi-janvier 2024 :



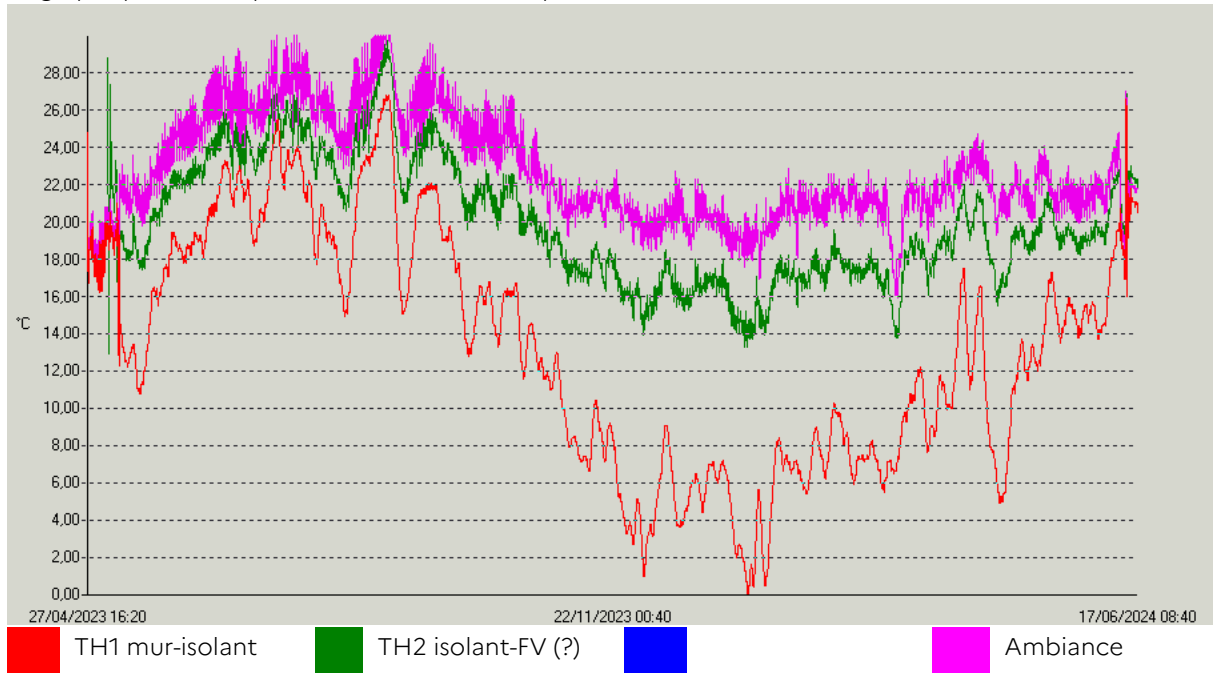
On se souvient que la température d'ambiance mesurée est plus chaude que « Cuisine/séjour Bas » en raison de la proximité du ballon d'eau chaude.

Les mesures ne sont plus disponibles pour TH3 à partir de mi-janvier, et par ailleurs la température de TH3, initialement inférieure à celle de TH2 (ce qui n'est pas logique, inversion entre les sondes ?) repasse au-dessus de TH2 à partir de mi-novembre. Cela semble tard pour un effet lié à la mise en route du chauffage.

Il nous semble donc que la sonde TH3 ne soit pas fiable.

Il y a peut-être une inversion entre TH2 et TH3.

Le graphique suivant présente une année complète, sans la sonde TH3 :



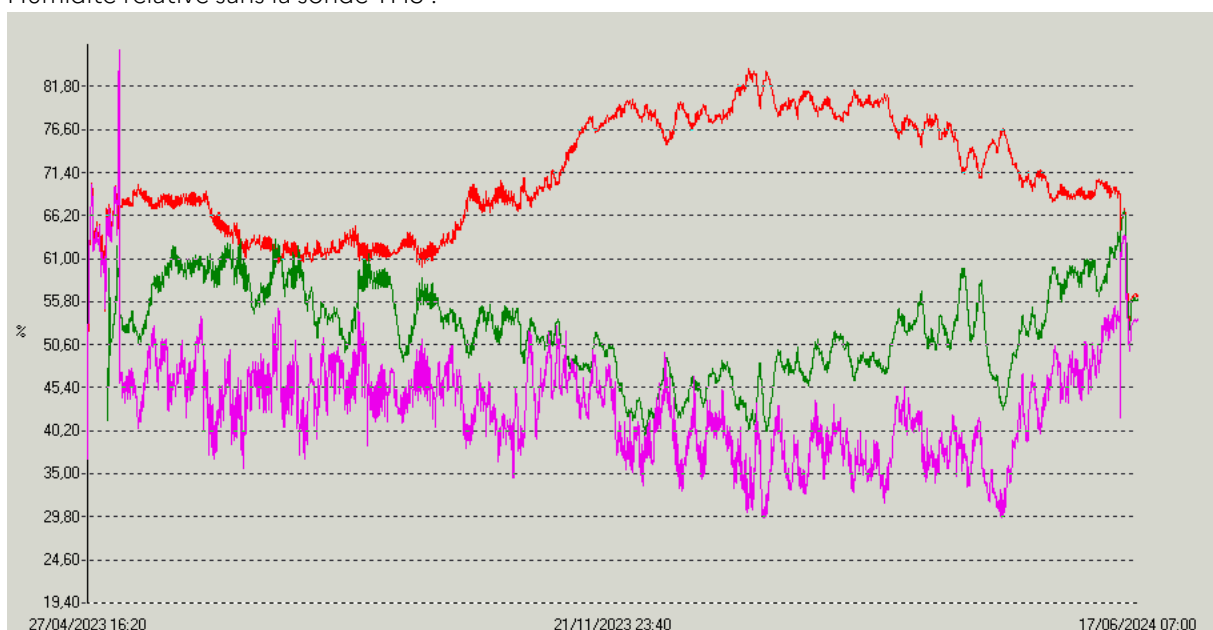
Sans TH3, la hiérarchie des températures est respectée : en hiver $T_{\text{ambiance}} > TH2 > TH1$.

La pièce est bien chauffée aux alentours de 19 à 22°C.

TH1 n'atteint pas de température négative mais frôle 0°C. Dans l'épaisseur du mur, la température doit donc être négative à ce moment-là.

De même en humidité relative, la sonde TH3 présente une évolution étrange et une perte de donnée à partir de mi-janvier. Nous présentons donc les résultats sans cette sonde.

Humidité relative sans la sonde TH3 :



 TH1 mur-isolant
  TH2 isolant-FV
 
 Ambiance

La sonde TH1 au niveau du contact mur-isolant voit son HR monter à plus de 81 % mi-janvier 2024 puis le HR diminue pour atteindre 70% aux alentours de mi-juin 2024.

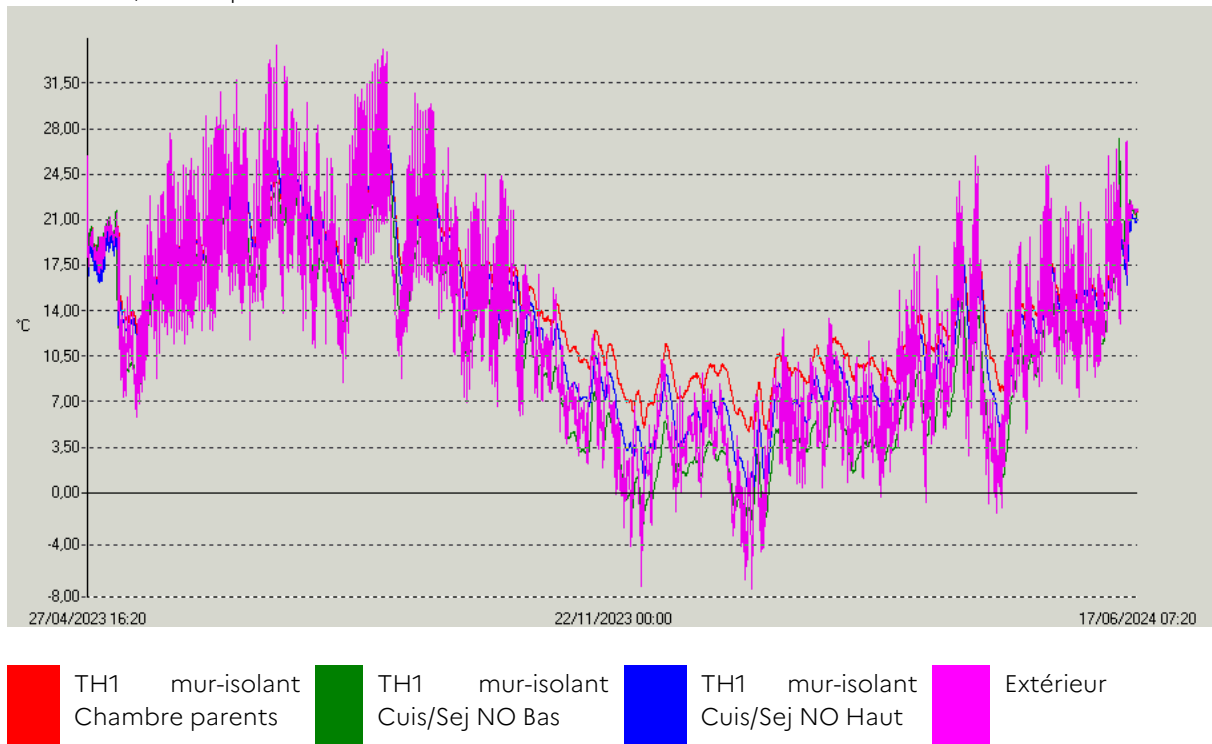
La valeur maximale d'HR en TH1 est donc élevée tout en restant loin du seuil correspondant à 23% d'humidité en masse (comme pour la Chambre des parents et l'autre point de mesure Cuisine-séjour Bas).

Ainsi, les critères de SimHuBat sont respectés :

Critères	Description	Mur au global	TH1 : mur / isolant	TH2 : Isolant / FV	TH3 : FV / parement
1	Teneur en eau stable ou diminue	(Simulation uniquement)			
2	Pas de condensation (HR > 98%)	(Période de mesure trop courte)			
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)				
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment				
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait				

- Analyse comparée des 3 jeux de sondes

Sonde TH1, en température :



Les évolutions de température sont cohérentes : la température de contact mur-isolant suit bien l'évolution de la température extérieure, et les trois températures TH1 suivent les mêmes évolutions.

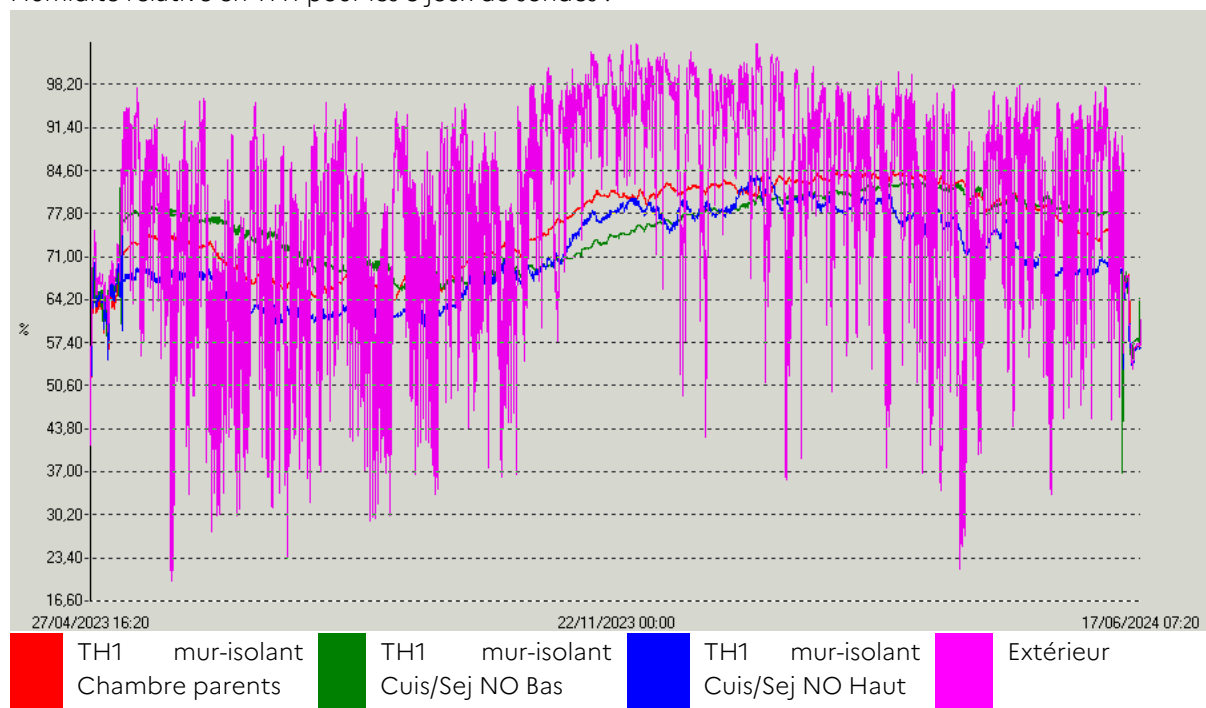
Cependant, le fait que TH1 pour la Chambre ait une température plus élevée que les autres en hiver nous interpelle, car la température d'ambiance mesurée dans cette chambre est plutôt plus basse que dans la Cuisine/Séjour.

Cette incohérence peut s'expliquer par deux hypothèses :

- Les températures d'ambiances de la Cuisine/Séjour sont perturbées respectivement par la proximité du ballon d'eau chaude sanitaire et par le radiateur. La température d'ambiance effective pourrait être significativement plus basse, voire inférieure à celle de la chambre. Cela est cependant peu probable d'après l'usage constaté.
- Les ponts thermiques semblent importants et proches pour certains points de mesure :
 - o Cuisine/Séjour droite : 40cm du pont thermique de la dalle, 50 cm d'un refend. Les joues des fenêtres isolées par 3 à 4cm d'isolant
 - o Cuisine/Séjour gauche : peu de pont thermique proche : la température en TH1 devrait être plus froide (le mur n'est pas réchauffé via les ponts thermiques) – ce qui n'est pas ce qu'on mesure.
 - o Chambre : 60 cm d'un refend, joues des fenêtres non isolées.

En l'état de nos réflexions, ces hypothèses ne semblent pas suffire à expliquer les écarts de température en TH1 pour les 3 jeux de sonde.

Humidité relative en TH1 pour les 3 jeux de sondes :



Les évolutions d'humidité relative au niveau du contact mur-isolant sont similaires, et suivent l'évolution de l'humidité extérieure.

2.4.3 Conclusions sur la maison Jura D

Pour les 3 murs instrumentés sur cette maison, tous les critères de SimHuBat sont respectés du point de vue de la mesure in-situ.

On note cependant qu'à l'interface entre le mur et l'isolant, l'humidité atteint des niveaux plus élevés que pour les maisons Jura A, B et C. En effet elle atteint jusqu'à 85%.

La cause de cette valeur plus élevée nous semble principalement liée au climat. En effet, l'absence de VMC, le chauffage intermittent ou à une consigne inférieure à 19°C, ou encore un soupçon de discontinuité du freine-vapeur, tous ces paramètres nuisibles au bon fonctionnement hygrothermique du mur sont déjà présents sur les autres maisons. **Ce qui est différent en revanche, c'est d'une part que l'interface mur-isolant passe sous 0°C dans la cuisine, et d'autre part la présence d'un enduit extérieur en ciment, de plus totalement couvrant.**

Toutefois, les critères étant tous respectés malgré tout, on peut retenir que le complexe d'isolation avec ouate et freine-vapeur, même avec un climat très froid et très humide en hiver, en l'absence d'une ventilation mécanique, avec un enduit extérieur non capillaire et un chauffage inférieur à 19°C dans la chambre, et en présence d'un soupçon de défaut de continuité du freine-vapeur ne présente pas de problème hygrothermique.

2.5 Appartement Brest 1

2.5.1 Présentation du logement

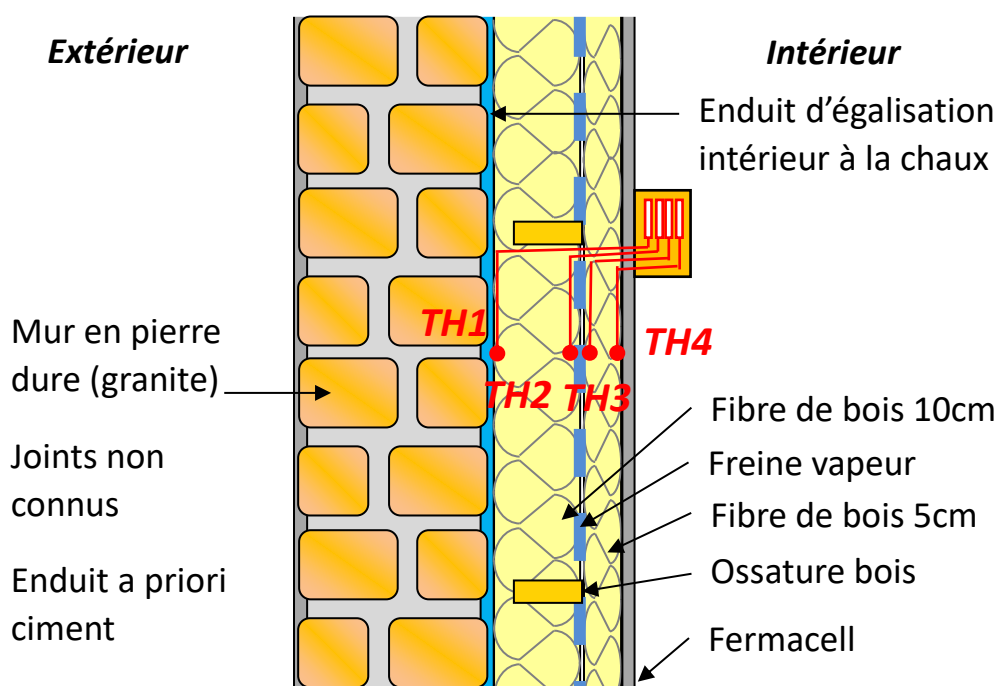
Département : Finistère (29)

Altitude : 69 m

Description du mur : Mur pierre dure (a priori granite), avec enduit extérieur a priori en ciment, enduit d'égalisation intérieur chaux - sable.

ITI en fibre de bois en 2 couches respectant la règle dite des 1/3 – 2/3 : 10cm puis freine-vapeur hygrovariable (Intello) et 5cm. L'ensemble est réalisé entre ossature bois, et avec un parement Fermacell.

Isolation finie juste avant l'instrumentation. L'isolant a été déposé pour faciliter la pose des capteurs.



Ventilation : VMC simple flux – bon fonctionnement.

Pièces instrumentées et orientation :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre	Nord	R+3	Nord	Pied droit sous rampant

2.5.2 Visualisation des mesures – appartement Brest 1

Période de mesure

Historique :

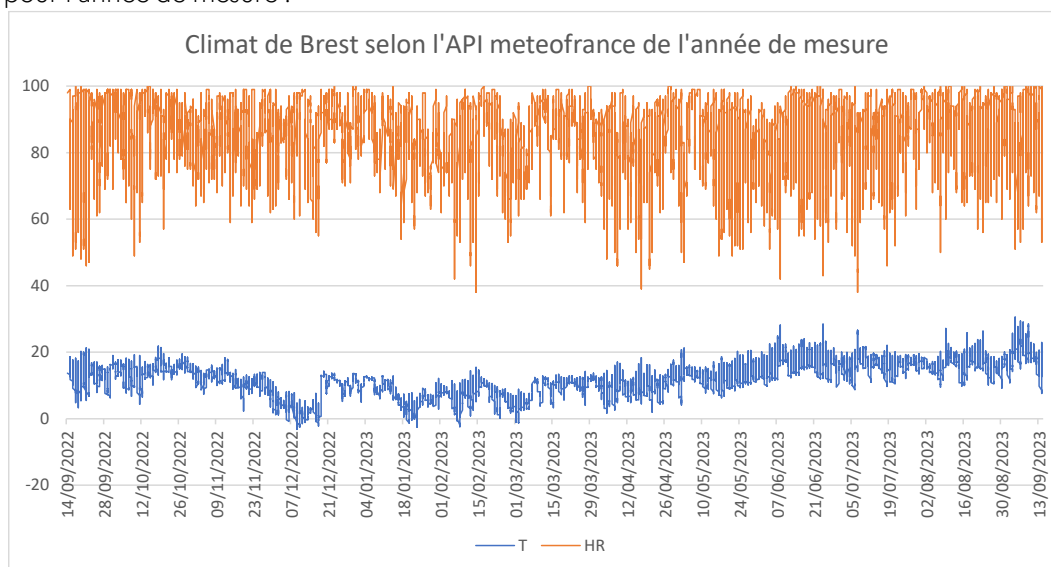
- Programmation et envoi des sondes le 10/03/2022
- Mise en place des sondes – mais problème de piles.
- Remplacement des piles le 24/08/2022 – début des mesures.
- Relève intermédiaire des données le 1/12/2023 (l'instrumentation reste en place pour une autre année de mesure, hors projet Perf in Mind 2).
- Mise en base

⇒ [On retient l'année de mesure du 15/09/2022 au 15/09/2023](#)

Analyse du Climat extérieur

Sur cette instrumentation il n'y a pas de sonde extérieure.

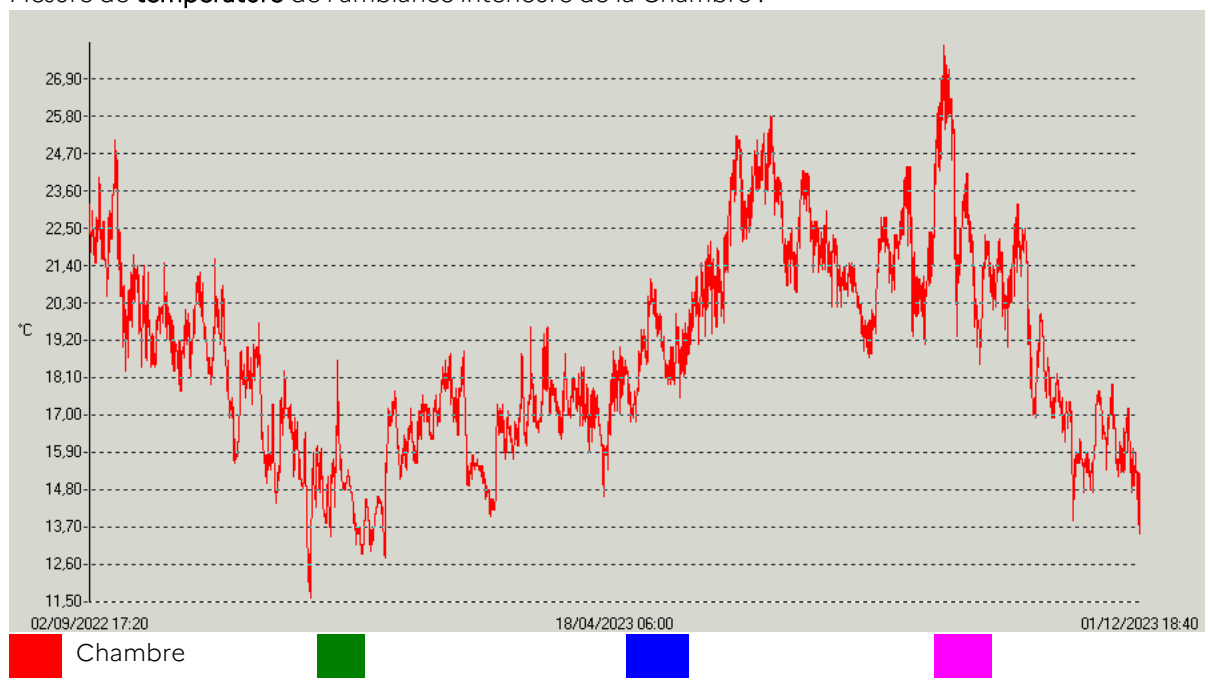
On visualise ci-dessous le climat de Brest d'après les données de l'API Météo-France pour la station de Brest, pour l'année de mesure :



On constate que les températures restent assez douces en hiver et que l'humidité relative est élevée toute l'année (moyenne journalière supérieure à 80%), Brest étant au bord de l'océan.

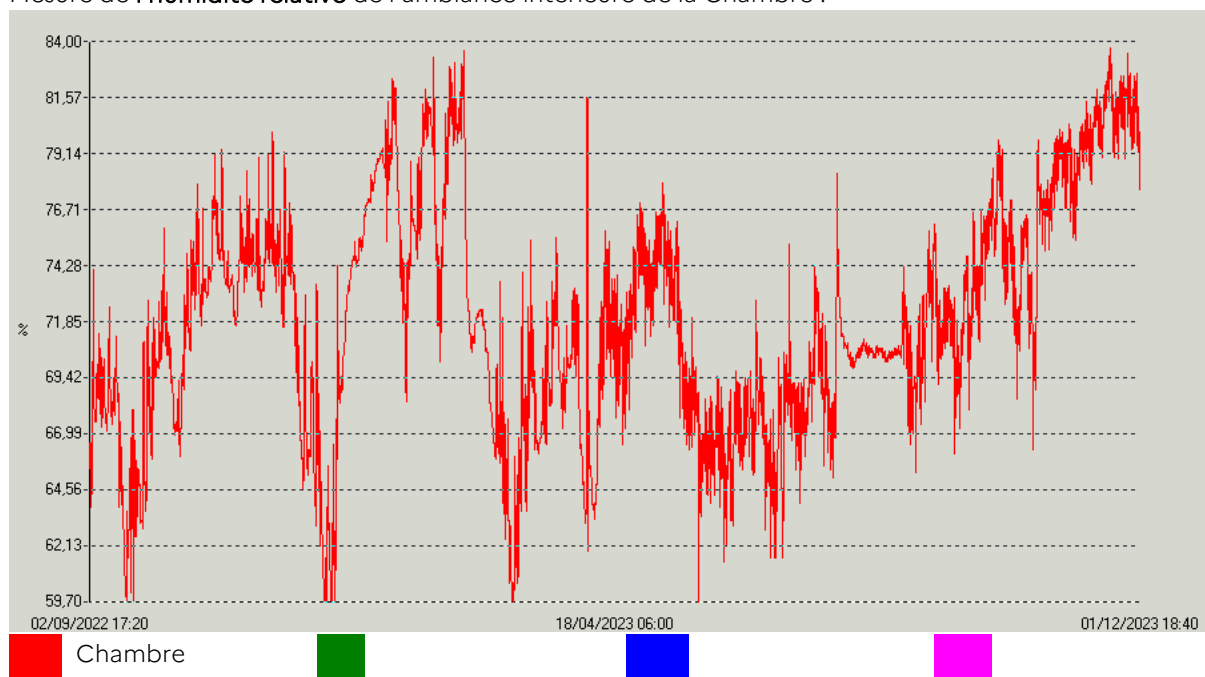
Analyse du Climat intérieur

Mesure de **température** de l'ambiance intérieure de la Chambre :



On note que la Chambre n'est pas chauffée en continu. La température est descendue aux alentours de 12°C en plein hiver.

Mesure de **l'humidité relative** de l'ambiance intérieure de la Chambre :



L'ambiance intérieure présente une **humidité relative assez élevée**, qui monte à plus de 83%, et ce malgré la présence d'une VMC. Les pics d'humidité correspondent à une période où la température est inférieure à 19°C.

Analyse des mesures mur par mur

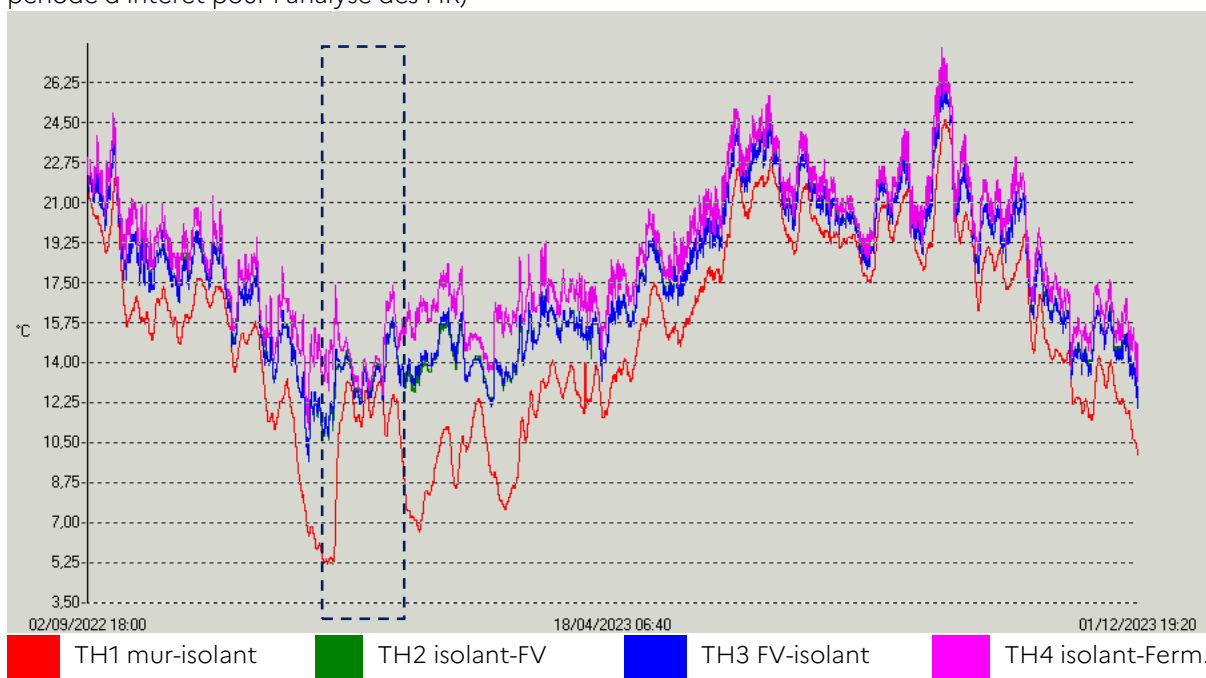
- Chambre

Rappel des informations :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre	Nord	R+3	Nord	Pied droit sous rampant

On rappelle que l'ITI est constituée de 2 couches de panneau de fibres de bois : une couche de 10cm contre le mur puis un Freine vapeur hydrovariable, une couche de 5cm de fibre de bois , puis en contact direct avec le panneau une plaque de Fermacell. 4 sondes ont été mises en place, selon le schéma présenté au [§2.5.1](#).

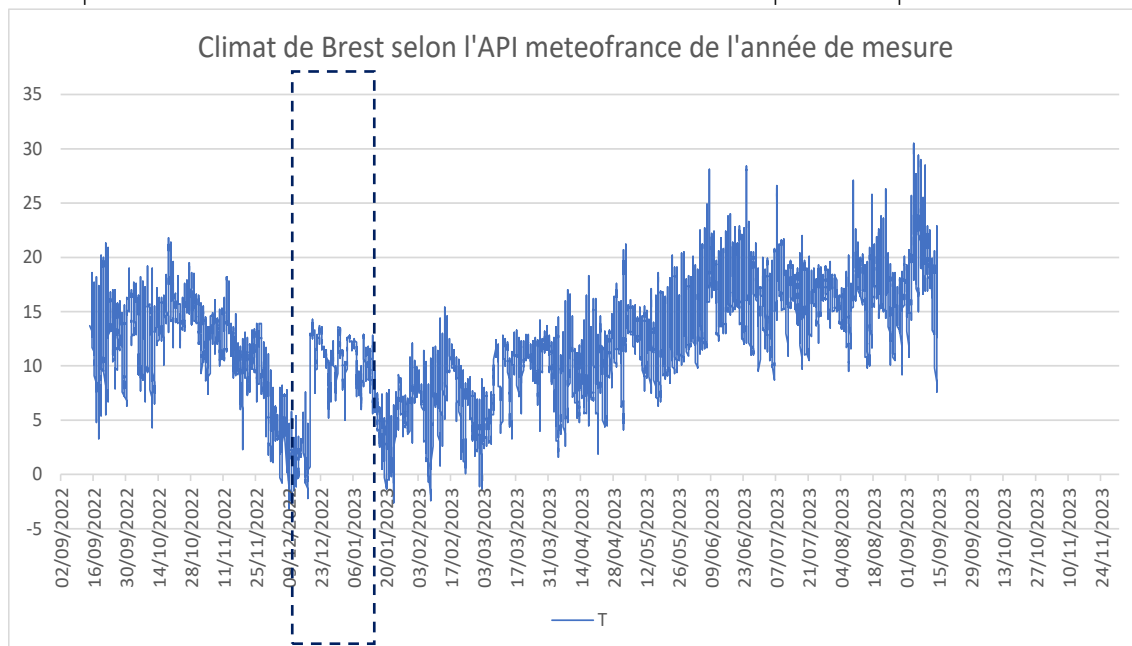
Visualisation des **températures** en TH1 entre mur et isolant, TH2 côté extérieur du Freine-vapeur, TH3 côté intérieur du freine-vapeur, et TH4 sous le parement : (L'encadré en pointillé noir identifie une période d'intérêt pour l'analyse des HR)



La hiérarchie des températures est bien respectée : $TH4 > TH3 \approx TH2 > TH1$

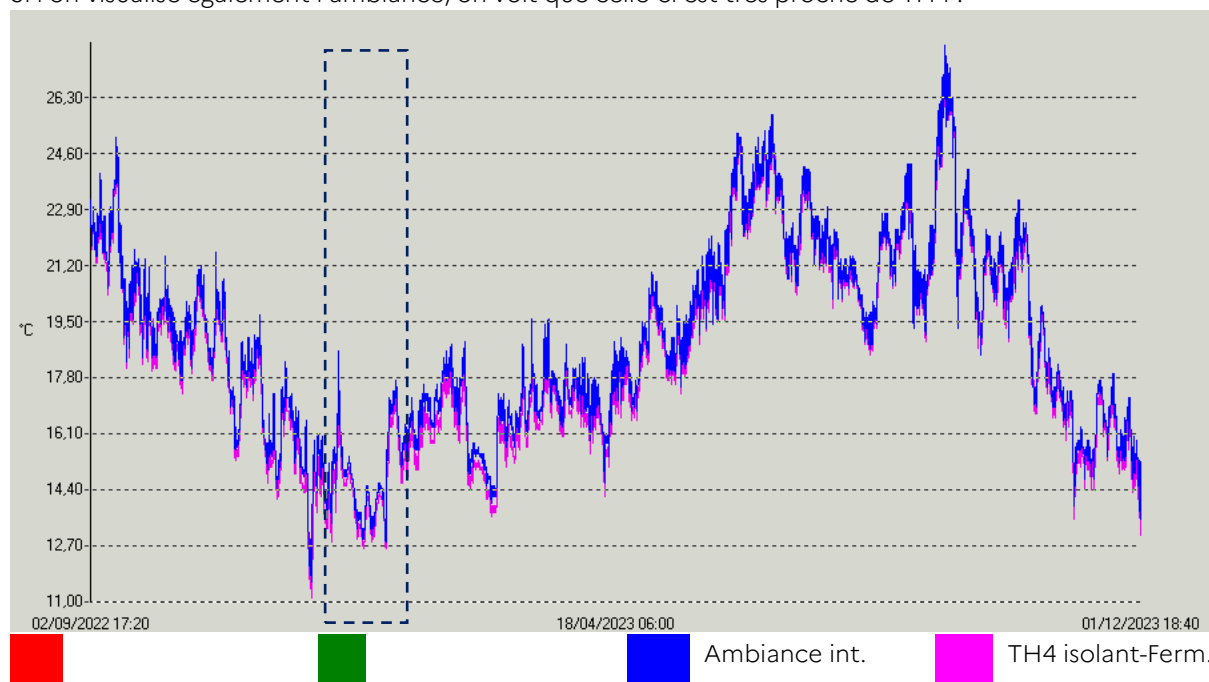
Sur la période encadrée en noir, TH1 augmente. Cela ne peut s'expliquer que par une période de redoux : la température extérieure augmente. Ceci est confirmé par le fait que le même phénomène est observé pour les 3 murs de Brest (voir [§2.6.2](#))

La même période est identifiée sur les données de l'API Météo-France pour Brest pour l'année de mesure :



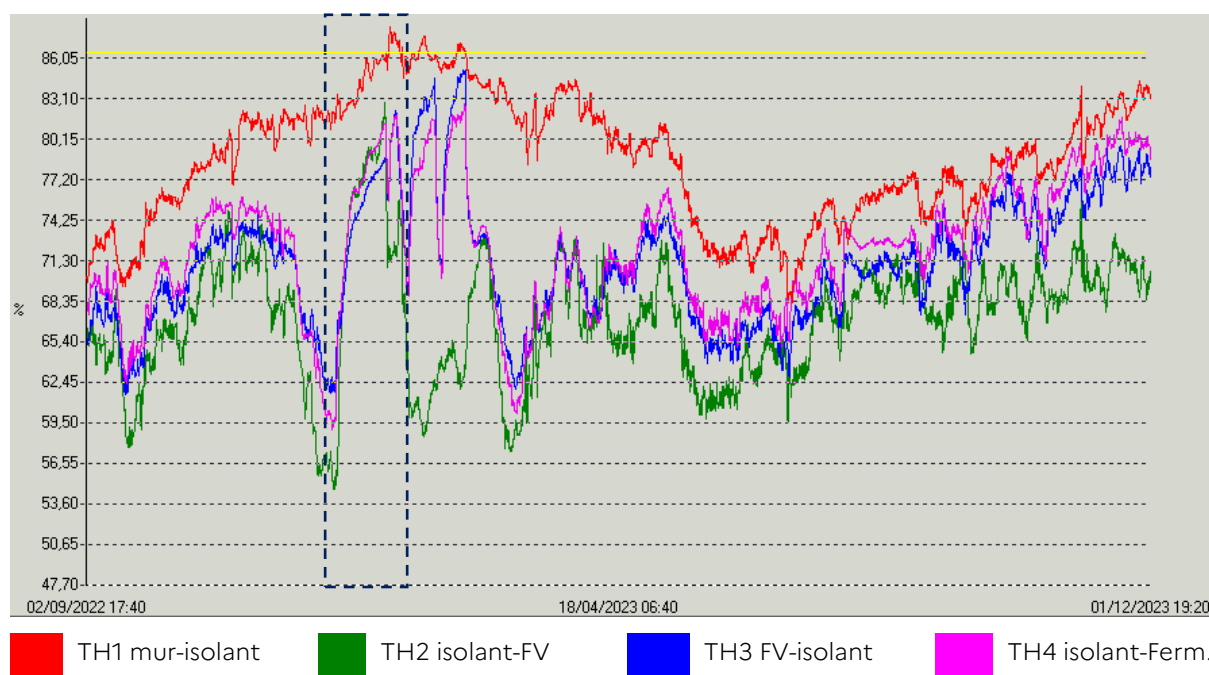
La période identifiée par un encadré en pointillé noir correspond bien à une période de redoux sur le mois de décembre et début janvier. Les températures y sont remontées principalement au-dessus de 10°C avec des minima à 5°C.

Si l'on visualise également l'ambiance, on voit que celle-ci est très proche de TH4 :



L'évolution de la température juste derrière le Fermacell coté isolant est similaire à celle de la température ambiante.

Visualisation sur 1 an de l'**humidité relative** en TH1 entre mur et isolant, TH2 côté extérieur du Freine-vapeur, TH3 côté intérieur du freine-vapeur, et TH4 sous le parement :



En hiver, la hiérarchie des valeurs est intéressante :

- On s'attend à ce que l'HR en TH3 soit supérieure à celle en TH4, car la température diminue. C'est le cas sur la fin de l'hiver, mais au début de l'hiver l'HR en TH4 est supérieure. Cela peut illustrer une **absence de chauffage** à ce moment.
- En principe l'HR en TH2 est inférieure à celle en TH3, car le freine-vapeur régule le passage de l'humidité. Là aussi, c'est bien le cas sur la fin de l'hiver, mais pas sur une période d'un peu plus d'un mois en plein hiver, encadrée en pointillés noirs, où toutes les humidités grimpent assez rapidement, et TH2, TH3 et TH4 se retrouvent très proches en HR. Cette augmentation brusque de l'HR s'explique par une période de redoux : la température extérieure a été plus élevée. Les températures dans le mur deviennent homogènes, il n'y a plus de « moteur » à la migration de vapeur, donc les humidités relatives s'homogénéisent également. Ce phénomène s'observe aussi dans les mesures de Brest 2 (voir [§2.6.2](#)).

Pour l'évaluation du critère 2 de SimHuBat, la ligne jaune représente la **limite des 86,6% d'humidité relative correspondant à une teneur en eau en masse de 23% dans la fibre de bois** (voir [l'encadré méthodologie](#)).

Cette limite de 86,6% en HR dans la fibre de bois est atteinte et dépassée :

- Pour la sonde TH1 au contact mur / isolant du 10 janvier au 15 janvier 2023 (soit moins d'une semaine) puis du 23 janvier au 26 janvier (soit également moins d'une semaine), et encore du 8 février au 11 février (encore moins d'une semaine). **On ne cumule donc aucune semaine complète au-dessus de 86,6%.**

Pour le critère 3 (présence d'eau libre), le deuxième seuil à ne pas dépasser est 30% de teneur en eau, c'est-à-dire pour la fibre de bois une humidité relative de 91%. Cette valeur n'est jamais atteinte. L'humidité maximale mesurée est de 88%, ce qui est élevé mais respecte les critères définis.

Tous les critères de SimHuBat sont donc respectés, bien que l'on s'en approche :

Critères	Description	Mur au global	TH1 : mur / isolant	TH2 : FV côté ext	TH3 : FV côté int	TH4 : sous parement
1	Teneur en eau stable ou diminue	(Simulation uniquement)				
2	Pas de condensation (HR > 98%)	(Période de mesure trop courte)				
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)		Atteint mais 0 semaine complète			
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment		Max 88% HR			
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait					

2.5.3 Conclusions sur l'appartement Brest 1

Pour le mur instrumenté de ce logement, tous les critères de SimHuBat sont respectés du point de vue de la mesure in-situ.

Cette configuration est pénalisée par le climat de Brest qui est très humide toute l'année. De plus l'humidité intérieure est également élevée, car le chauffage est partiel (moins de 19°C une bonne partie de l'hiver).

La zone de contact entre le mur et l'isolant atteint des humidités élevées, jusqu'à 88% HR. Le critère de 23% en masse est atteint, mais la durée en semaines complètes cumulées est inférieure au critère de 8 semaines.

Cette configuration reste sensible du point de vue de la migration de vapeur. Des investigations complémentaires seraient intéressantes, comme pour le cas suivant Brest 2.

2.6 Appartement Brest 2

2.6.1 Présentation du logement

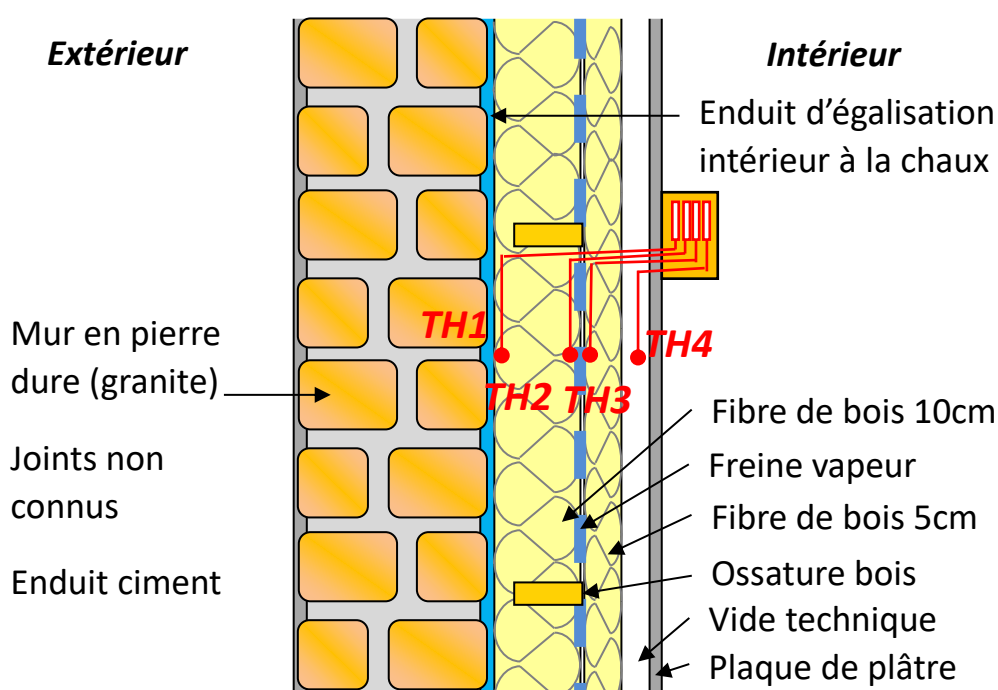
Département : Finistère (29)

Altitude : 69 m

Description du mur : Mur pierre dure (a priori granite), avec enduit extérieur certainement en ciment, enduit d'égalisation intérieur à la chaux.

ITI en fibre de bois en 2 couches respectant la règle dite des 1/3 – 2/3 : 10cm puis freine-vapeur hygrovariable (Intello) et 5cm. L'ensemble est réalisé entre ossature bois, et avec un vide technique de 3cm et un parement plaque de plâtre.

Isolation finie juste avant l'instrumentation. L'isolant a été déposé pour faciliter la pose des capteurs.



Ventilation : VMC simple flux – souvent arrêtée et à débit faible.

Pièces instrumentées et orientation :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre	Nord	Non connu (pas RdC)	Nord	Pied droit sous rampant
Séjour/Cuisine	Ouest	Non connu (pas RdC)	Ouest	Bas de mur

A noter que le vent dominant, en provenance de l'océan, arrive sur le mur Ouest.

2.6.2 Visualisation des mesures – appartement Brest 2

Période de mesure

Historique :

- Programmation et envoi des sondes le 10/03/2022
- Mise en place des sondes – mais problème de piles.
- Remplacement des piles le 24/08/2022 – début des mesures.
- Relève intermédiaire des données le 1/12/2023 (l'instrumentation reste en place pour une autre année de mesure, hors projet Perf in Mind 2).
- Mise en base

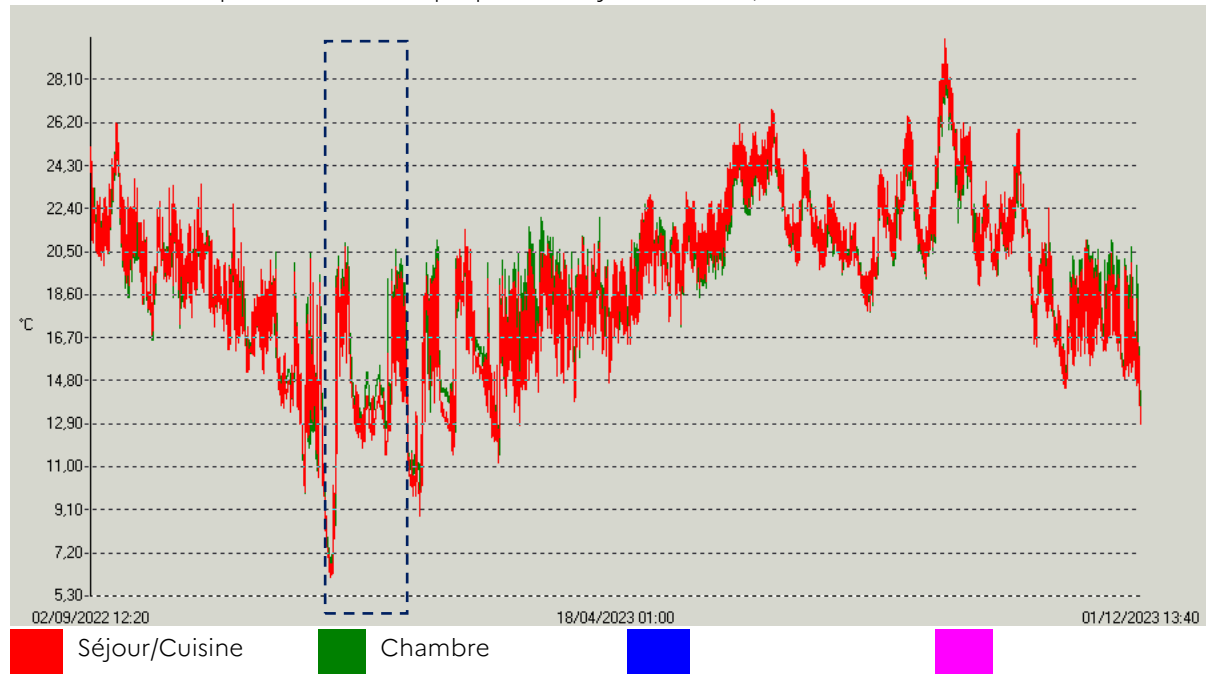
⇒ On retient l'année de mesure du 15/09/2022 au 15/09/2023

Analyse du Climat extérieur

Il n'y a pas eu de mesures de température et humidité effectuées en extérieur au niveau de ces logements. Voir l'analyse du climat de Brest [pour l'appartement Brest 1](#).

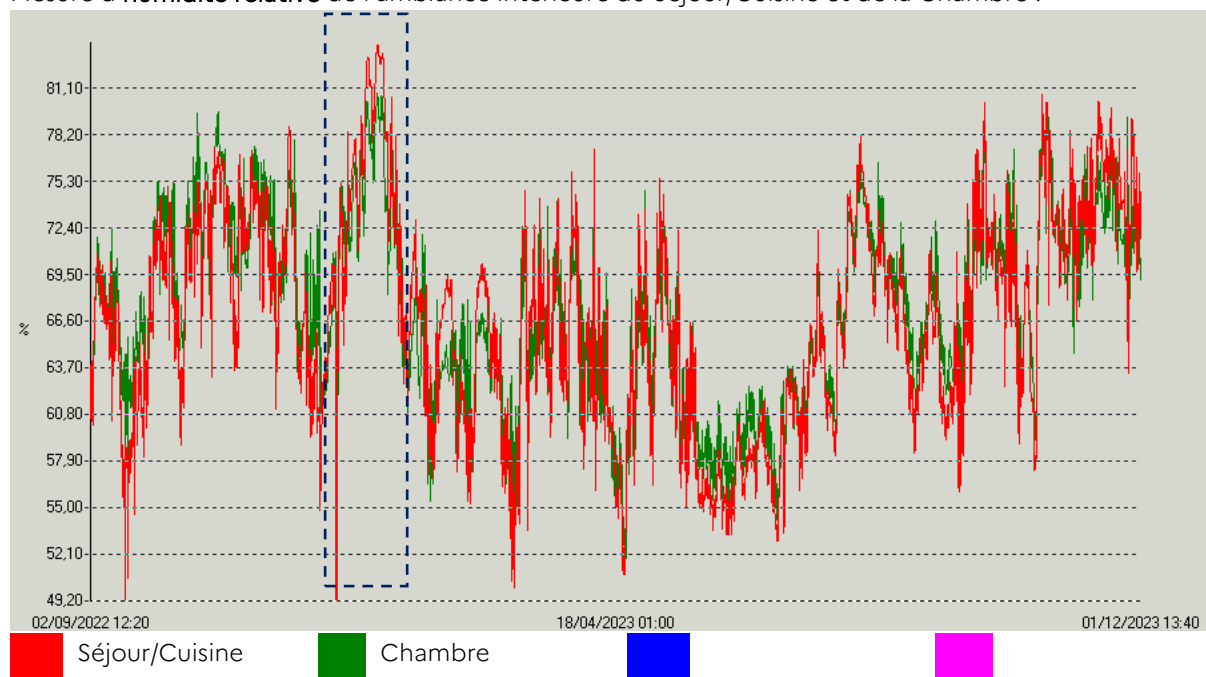
Analyse du Climat intérieur

Mesure de **température** de l'ambiance intérieure du Séjour/Cuisine et de la Chambre (l'encadré noir identifie la même période d'intérêt que pour l'analyse de Brest 1) :



On constate une évolution très similaire des températures ambiantes dans les 2 zones. Les températures sont inférieures à 19°C une bonne partie de l'hiver. Elles descendent même à 7°C. Ce logement n'est donc pas chauffé au moins une partie de l'hiver.

Mesure d'**humidité relative** de l'ambiance intérieure du Séjour/Cuisine et de la Chambre :



L'humidité dans ce logement est élevée, ce qui peut s'expliquer par l'absence de chauffage une partie de l'hiver et la faible ventilation.

En effet, l'habitant a l'habitude de couper la VMC en son absence voire pendant l'occupation. De plus le débit extrait semble faible. **Globalement, on peut considérer la VMC comme peu fonctionnelle sur ce logement**, ce qui explique un niveau d'humidité élevé.

Au niveau de l'encadré noir, on observe cependant un pic à plus de 82% d'HR dans la zone Séjour-Cuisine, qui correspond à la période de redoux de la température extérieure déjà constatée pour le logement Brest 1 (voir §2.5.2), et qui se traduit par l'augmentation de la température en TH1 sur cette période. A ce moment, il n'y a pas ou peu de différence entre température intérieur et température extérieure. L'air qui d'habitude s'assèche en rentrant dans le logement, grâce au chauffage, conserve ici son humidité relative proche de l'extérieur. Ceci nous semble expliquer l'augmentation de l'humidité relative intérieure.

Analyse des mesures mur par mur

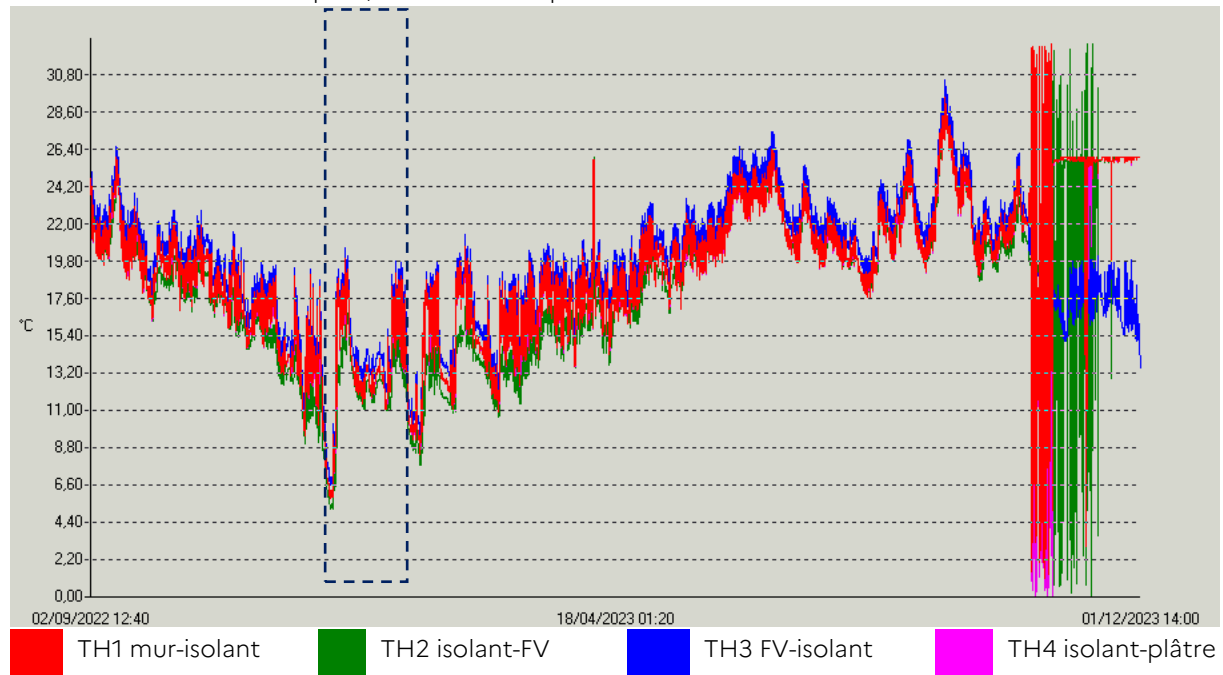
- Séjour/Cuisine

Rappel des informations :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Séjour/Cuisine	Ouest	Non connu (pas RdC)	Ouest	Bas de mur

On rappelle que l'ITI est constituée de 2 couches de panneau de fibres de bois : une couche de 10cm contre le mur puis un Freine vapeur hygrovariable, une couche de 5cm de fibre de bois , puis une lame d'air et une plaque de plâtre. 4 sondes ont été mises en place, selon le schéma présenté au §2.6.1.

Visualisation des **températures** en TH1 entre mur et isolant, TH2 côté extérieur du Freine-vapeur, TH3 côté intérieur du freine-vapeur, et TH4 sous le parement :

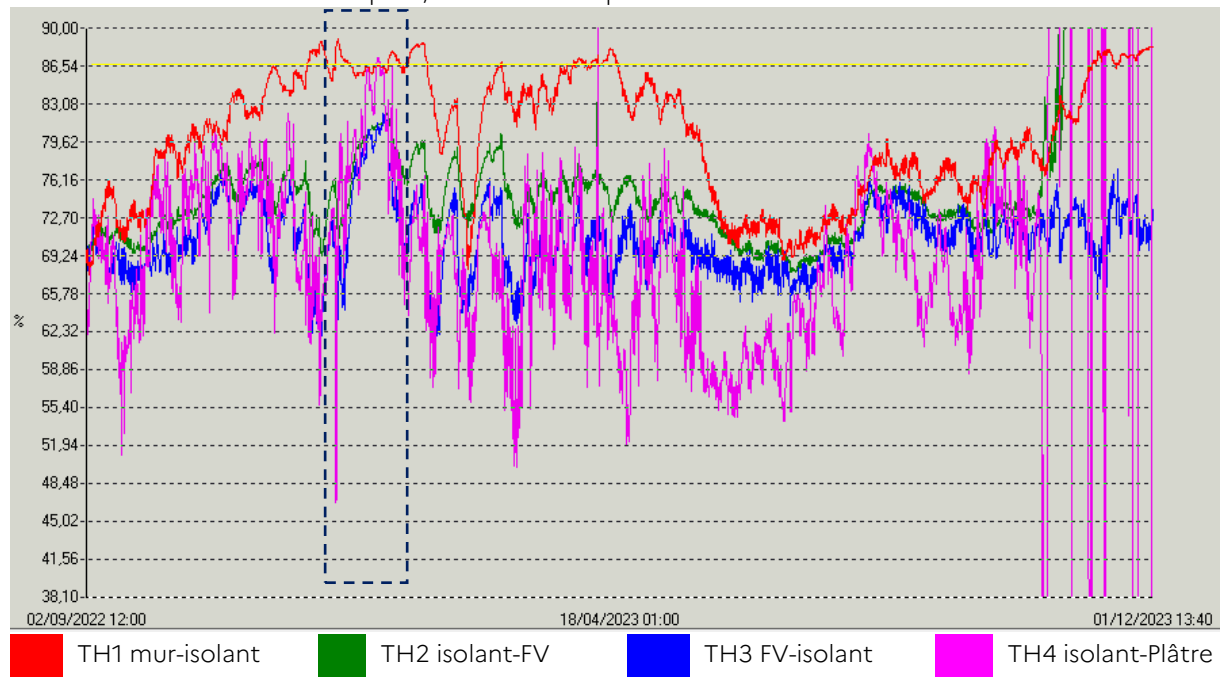


Les sondes TH1, TH2 et TH4 ne fonctionnent plus à partir du 15/10/2023.

Comme remarqué précédemment, le chauffage est très partiel sur l'hiver. De ce fait, toutes les mesures sont très proches les unes des autres. L'incertitude de mesure ne permet pas d'identifier une éventuelle interversion entre les sondes.

On observe le même phénomène de redoux que pour Brest 1 au niveau de l'encadré noir : TH1 augmente brusquement pour tous les murs de Brest : la température extérieure a remonté à cette période de l'hiver.

Visualisation des **humidités relatives** en TH1 entre mur et isolant, TH2 côté extérieur du Freine-vapeur, TH3 côté intérieur du freine-vapeur, et TH4 sous le parement :



Cette mesure confirme que la sonde TH4 ne fonctionne plus à partir du 15/10/2023 et que TH2 semble dériver. Ces points de mesures ne sont pas fiables à partir de cette date.

Au niveau de l'encadré, de même que pour Brest 1, les températures dans le mur deviennent homogènes, il n'y a plus de « moteur » à la migration de vapeur, donc les humidités relatives s'homogénéisent également.

Pour l'évaluation du critère 2 de SimHuBat, la ligne jaune représente la **limite des 86,6% d'humidité relative correspondant à une teneur en eau en masse de 23% dans la fibre de bois** (voir [l'encadré méthodologie](#)). Cette valeur est dépassée :

- Pour la sonde TH1 au contact mur / isolant pendant 2 périodes au cours de l'hiver, du 5 décembre au 14 décembre 2022 (soit plus d'1 semaine complète, 9 jours pour être précis), puis du 17 décembre au 24 décembre (soit 1 nouvelle semaine complète), et encore du 9 janvier au 14 janvier 2023 (soit moins d'une semaine) et du 16 janvier au 25 janvier (soit plus d'une semaine complète, 9 jours précisément). **Au total le cumul de semaines complètes au-dessus de 23% e masse est de 2 semaines (18 jours), ce qui reste inférieur au critère de 8 semaines complètes.**

Pour le critère 3 (présence d'eau libre), le deuxième seuil à ne pas dépasser est 30% de teneur en eau, c'est-à-dire pour la fibre de bois une humidité relative de l'ordre de 91%. Cette valeur n'est jamais atteinte. L'humidité maximale mesurée est de 89%, ce qui est élevé mais respecte les critères définis.

Tous les critères de SimHuBat sont donc respectés, bien que l'on s'en approche :

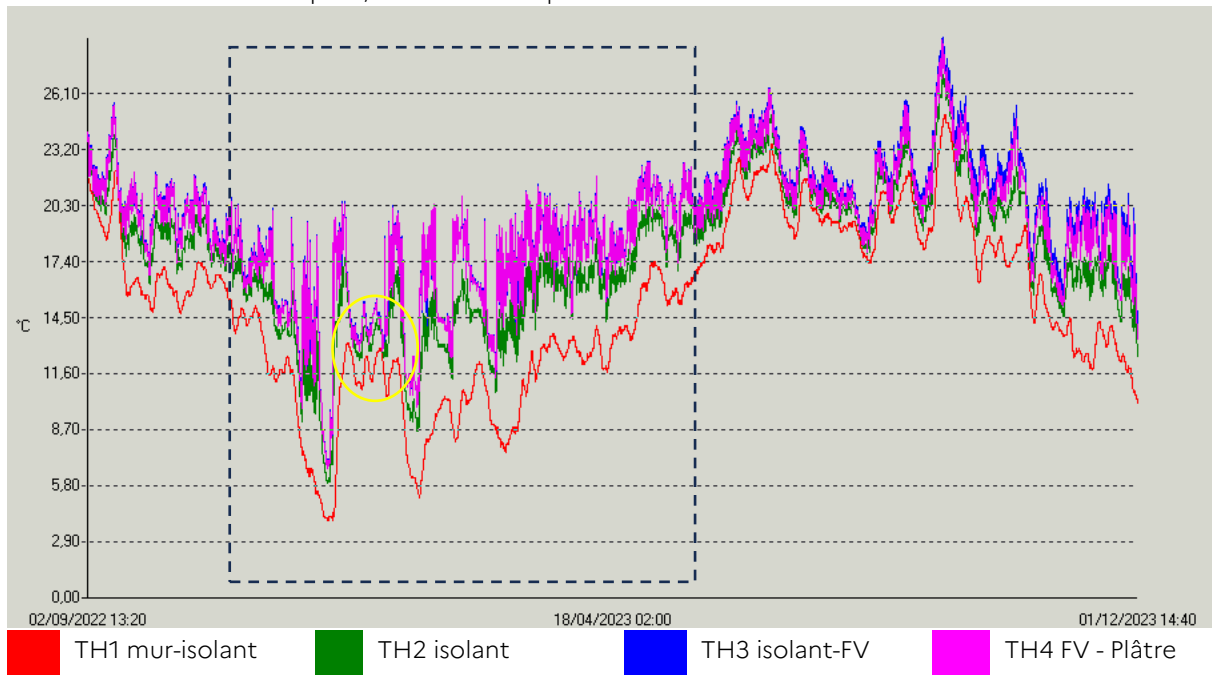
Critères	Description	Mur au global	TH1 : mur / isolant	TH2 : FV côté ext	TH3 : FV côté int	TH4 : sous parement
1	Teneur en eau stable ou diminue	(Simulation uniquement)				
2	Pas de condensation (HR > 98%)	(Période de mesure trop courte)				
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)		Atteinte 2 semaines complètes (18 jours)			
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment		Max 89% HR			
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait					

- Chambre

Rappel des informations :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre	Nord	Non connu (pas RdC)	Nord	Pied droit sous rampant

Visualisation des **températures** en TH1 entre mur et isolant, TH2 côté extérieur du Freine-vapeur, TH3 côté intérieur du freine-vapeur, et TH4 sous le parement :



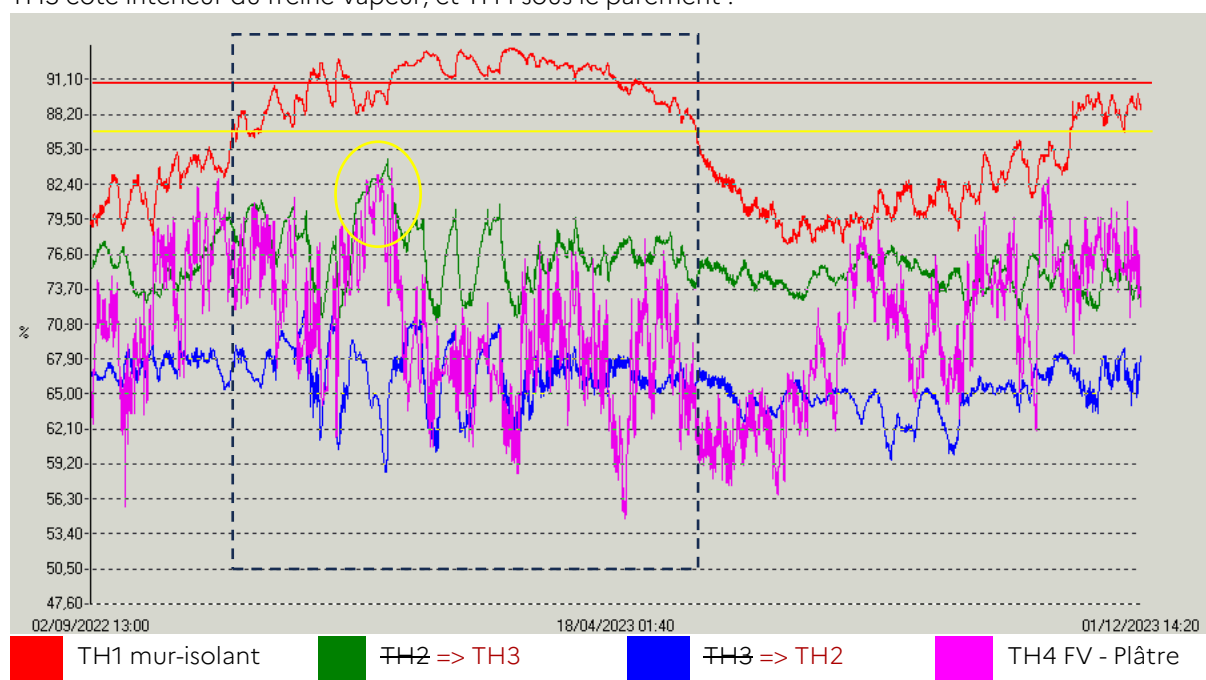
Comme pour le Séjour/Cuisine, les températures d'ambiance mesurées sont basses, et inférieures à 19°C une bonne partie de l'hiver. Elles descendent même à moins de 7°C.

Par conséquent les températures en TH2, TH3 et TH4 sont assez proches. Toutefois la hiérarchie des températures est bien respectée : $TH1 < TH2 < TH4$. TH3 et TH4 sont proches et parfois TH4 est inférieure à TH3, mais l'écart reste dans l'incertitude de mesure.

On retrouve au niveau du cercle jaune la période de redoux de la température extérieure, qui conduit à une homogénéisation des températures du mur.

L'encadré noir permet d'identifier la période où l'humidité dépasse 23% en masse en TH1. On note que la température est inférieure à 15°C sur l'essentiel de cette période.

Visualisation des **humidités relatives** en TH1 entre mur et isolant, TH2 côté extérieur du Freine-vapeur, TH3 côté intérieur du freine-vapeur, et TH4 sous le parement :



La hiérarchie des HR fait apparaître une incohérence : l'humidité relative en TH3 est inférieure à celle en TH2, alors que c'est l'inverse qui est attendu (le freine-vapeur protège l'isolant). **C'est pourquoi nous pensons qu'il y a eu une inversion entre ces 2 sondes.** Le fait que la courbe verte (sonde TH3, donc) soit supérieure à celle de TH4 est alors logique, puisque la température y est plus basse.

Pour l'évaluation du critère 2 de SimHuBat, la ligne jaune représente la **limite des 86,6% d'humidité relative correspondant à une teneur en eau en masse de 23% dans la fibre de bois** (voir [l'encadré méthodologie](#)). Cette valeur est atteinte et même dépassée pour la sonde TH1 au contact mur / isolant du 5 novembre 2022 au 23 mai 2023 soit un peu plus de 28 semaines en continu (encadré en pointillé noir). **Le critère de 8 semaines complètes est donc dépassé.**

Pour le critère 3 (présence d'eau libre), le deuxième seuil à ne pas dépasser est 30% de teneur en eau, c'est-à-dire pour la fibre de bois une humidité relative de l'ordre de 91% (ligne rouge) :
Pour la sonde TH1, ce seuil est dépassé pendant une partie de l'hiver. L'humidité relative maximale est de 94%.

Certains critères de SimHuBat ne sont donc pas respectés :

Critères	Description	Mur au global	TH1 : mur / isolant	TH2 : FV côté ext	TH3 : FV côté int	TH4 : sous parement
1	Teneur en eau stable ou diminue	(Simulation uniquement)				
2	Pas de condensation (HR > 98%)	(Période de mesure trop courte)				
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)		28 semaines			
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment		Max 94% HR			
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait					

2.6.3 Conclusions sur l'appartement Brest 2

Pour l'un des deux murs instrumentés de ce logement, certains critères de SimHuBat ne sont pas respectés du point de vue de la mesure in-situ.

Comme pour Brest 1, cette configuration est pénalisée par le climat de Brest qui est très humide toute l'année. De plus l'humidité relative intérieure est également élevée, car le chauffage est partiel (moins de 19°C une bonne partie de l'hiver) et la ventilation régulièrement arrêtée, en particulier en l'absence d'occupation.

La zone concernée par le non-respect des critères de SimHuBat est l'interface entre le mur et l'isolant. L'interface entre le second lit d'isolant et le côté intérieur du freine-vapeur respecte tous les critères. Aussi l'application de la règle dite des 1/3 – 2/3 ne semble pas avoir généré de risque particulier.

A noter que cette année de mesure est la première année de vie du complexe isolant. Il sera intéressant de poursuivre les mesures sur une période plus longue (ce qui est prévu hors projet Perf in Mind 2), et ce d'autant plus qu'un enduit à la chaux a été réalisé sur le mur avant isolation. Il est possible que cet enduit soit encore en période de séchage et apporte une humidité supplémentaire à l'interface. Un suivi sur plusieurs années permettrait d'observer le séchage de cet enduit le cas échéant.

D'un point de vue méthodologique, ce mur est pénalisé dans l'analyse par le fait que les critères 3 et 4 de SimHuBat sont exprimés en humidité en masse sur masse sèche, et que la conversion en seuil d'HR pour la fibre de bois aboutit à un seuil plus bas que pour la ouate de cellulose. **Si l'on avait appliqué le même seuil en HR que la ouate de cellulose, soit environ 93% HR pour 23% en masse, tous les critères de SimHuBat auraient été considérés comme respectés.** Ceci nous interroge sur la pertinence du choix de l'indicateur en masse sur masse sèche dans la comparaison entre les différents matériaux notamment biosourcés.

Enfin, la revue de littérature scientifique réalisée par ARCANNE (voir livrable 5.1 du projet) indique qu'au niveau Européen le critère d'humidité en masse sur masse sèche est parfois assorti d'un critère en température. **En effet, les champignons de moisissure ou pourriture ne se développent qu'en présence à la fois d'humidité et d'une certaine température minimale.** En l'occurrence la zone de contact entre mur et isolant (TH1) ne dépasse 23% en masse que sur une période où la température en ce point est la plupart du temps inférieure à 15°C. Pour de nombreux acteurs donc, cette situation ne pose donc pas de risques particuliers.

Plus globalement, l'identification d'une criticité « théorique » de ce mur nous donne l'envie de **poursuivre les investigations**. Idéalement, la dépose locale de l'isolant et une analyse en laboratoire permettrait de savoir si cette criticité « théorique » reflète une présence réelle de moisissure voire de pourriture, ou non. Ces investigations, si le propriétaire en était d'accord, pourraient faire l'objet d'un complément d'étude (hors projet Perf in Mind 2).

2.7 Maison Ardèche

2.7.1 Présentation de la maison

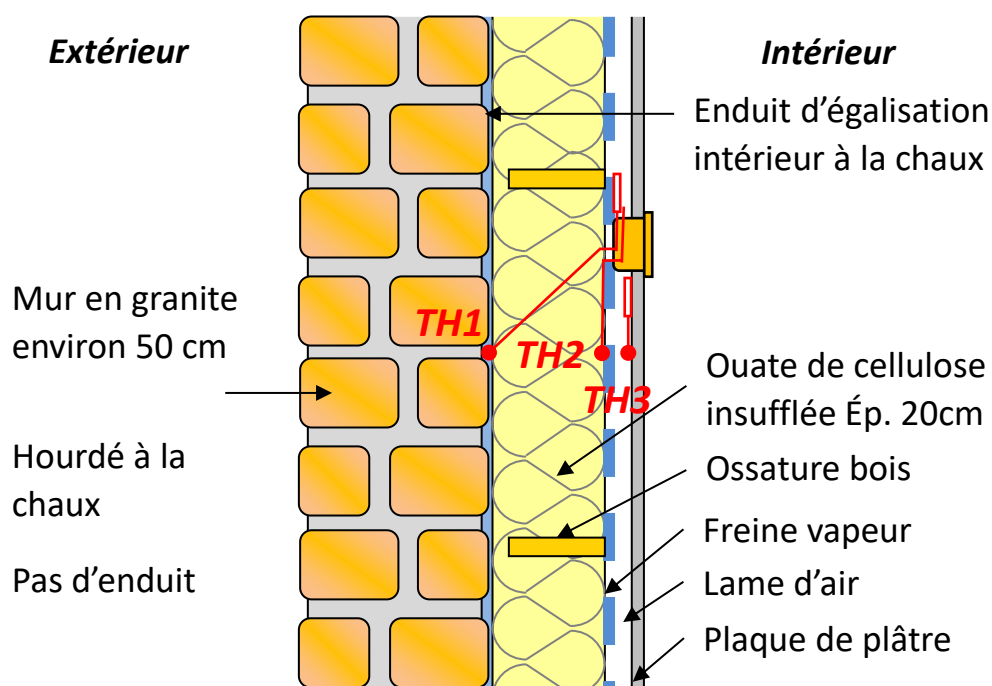
Département : Ardèche (07)

Altitude : 486 m

Description du mur : Pierre granite d'Ardèche hourdée à la chaux, enduit intérieur chaux. Pas d'enduit extérieur.

Isolation intérieure en ouate de cellulose 20cm insufflée, freine vapeur hygrovariable (Intello), lame d'air et plaque de plâtre.

Isolation finie 8 ans environ avant l'instrumentation.



Ci-contre : Photo prise pendant les travaux

Ventilation : VMC double flux.

Pièces instrumentées et orientation :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
-------	-----	-------	-------------	----------------

Chambre 1	Nord-Est	RdC	N-E	Prise basse, sous le niveau du sol extérieur
Chambre 2	Nord-Est	R+1	N-E	Prise basse
Chambre 3	Nord	R+1	Nord	Prise basse



Nous avons choisi d'instrumenter les chambres 1 et 2 car elles ont la même exposition mais se différencient par le caractère semi-enterré du pied de mur au RdC :

Ci-contre : photo de la façade nord, avec repérage des sondes des chambres 1 (RdC) et 2 (R+1)

2.7.2 Visualisation des mesures – maison Ardèche

Période de mesure

- Préparation des sondes
- Instrumentation le 29/09/2023
- Dépose des sondes le 16/10/2024
- Relève des données le 16/10/2024

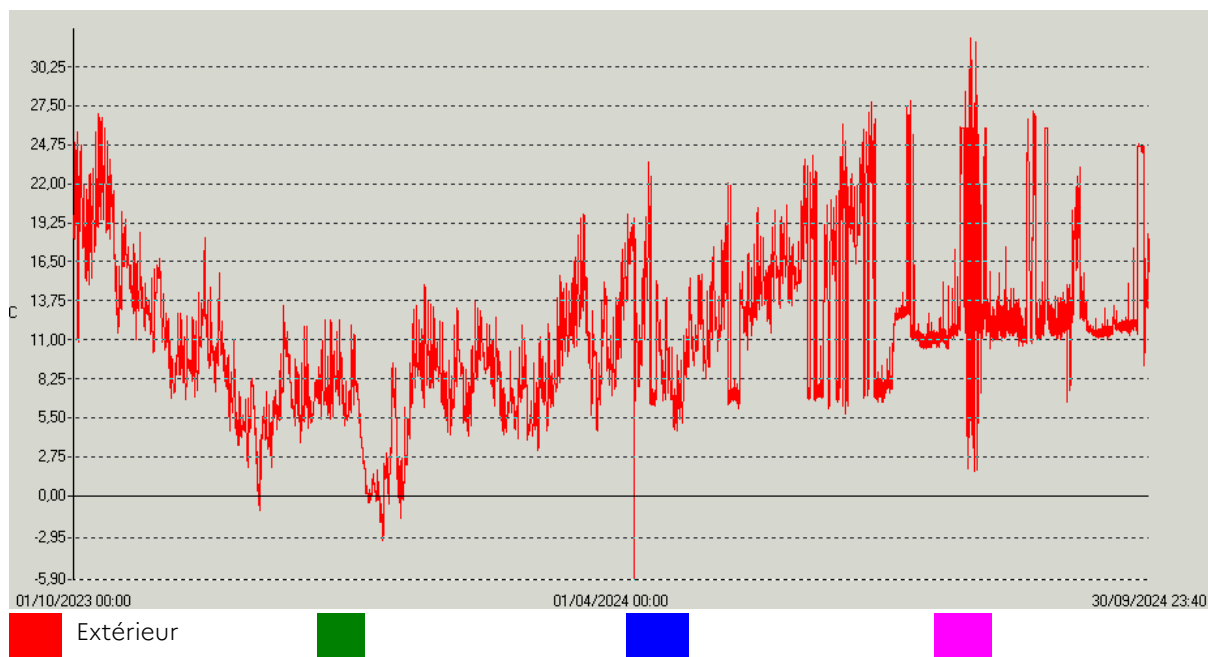
⇒ On retient l'année de mesure du 01/10/2023 au 30/09/2024

Analyse du Climat extérieur

Projet à Saint-Marcel-lès-Annonay (07), altitude 486m.

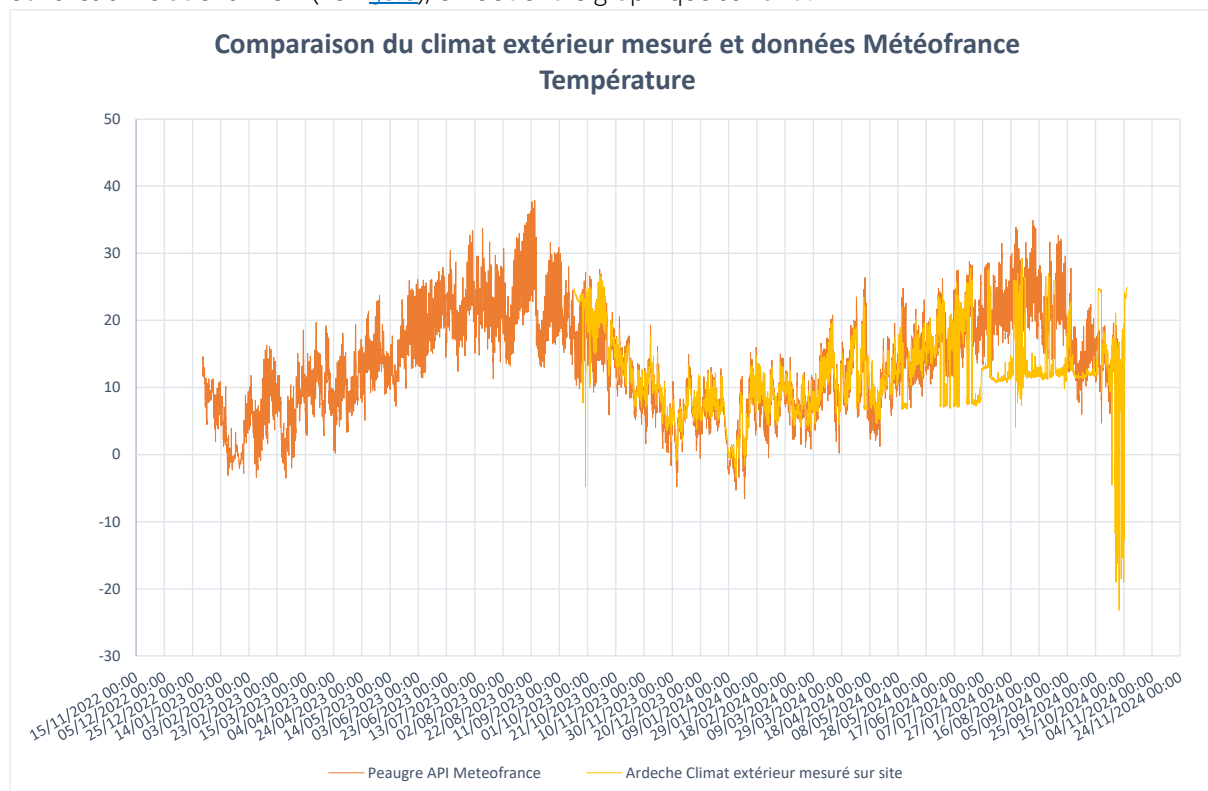
A 6 km de Peaugres, station à 460 m d'altitude (voir la [fiche InfoClimat](#)).

Visualisation de la température mesurée sur la période de mesure retenue :



Ces données présentent des valeurs étonnantes en fin de période, à l'été 2024. En revanche les données pour l'hiver semblent assez cohérentes.

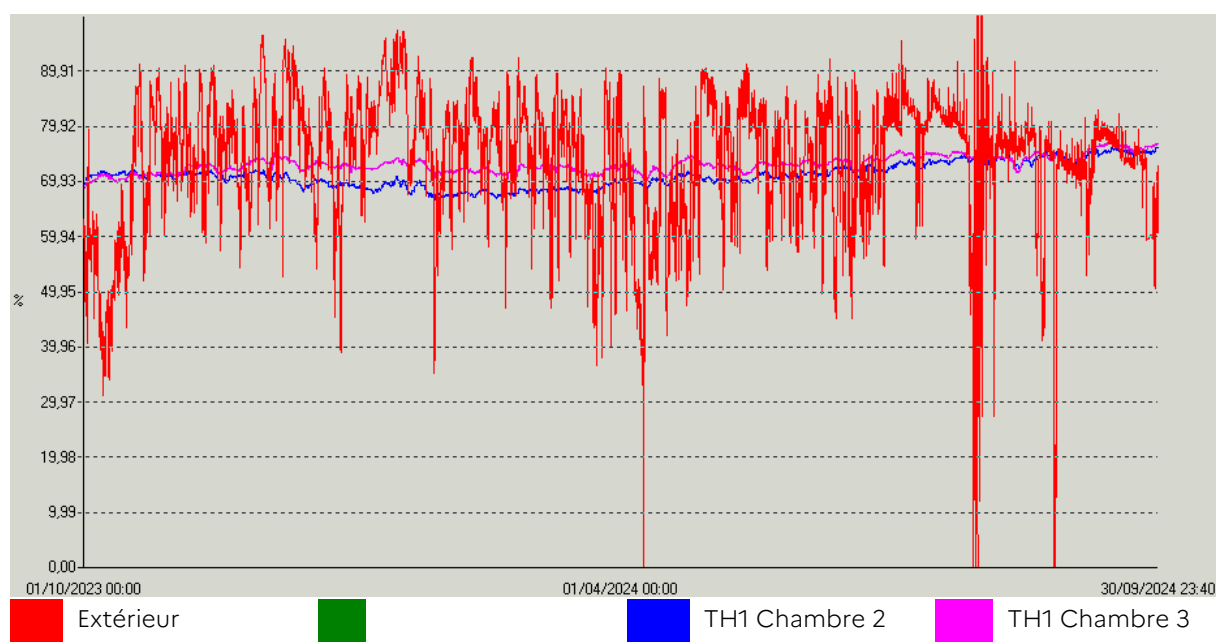
Si l'on compare les données mesurées avec celles de la station météo de Peaugres, qui seront utilisées dans les simulations WUFI (voir §3.5), on obtient le graphique suivant :



Les températures sont assez proches au début, mais en été 2024 la mesure diverge des données météo.

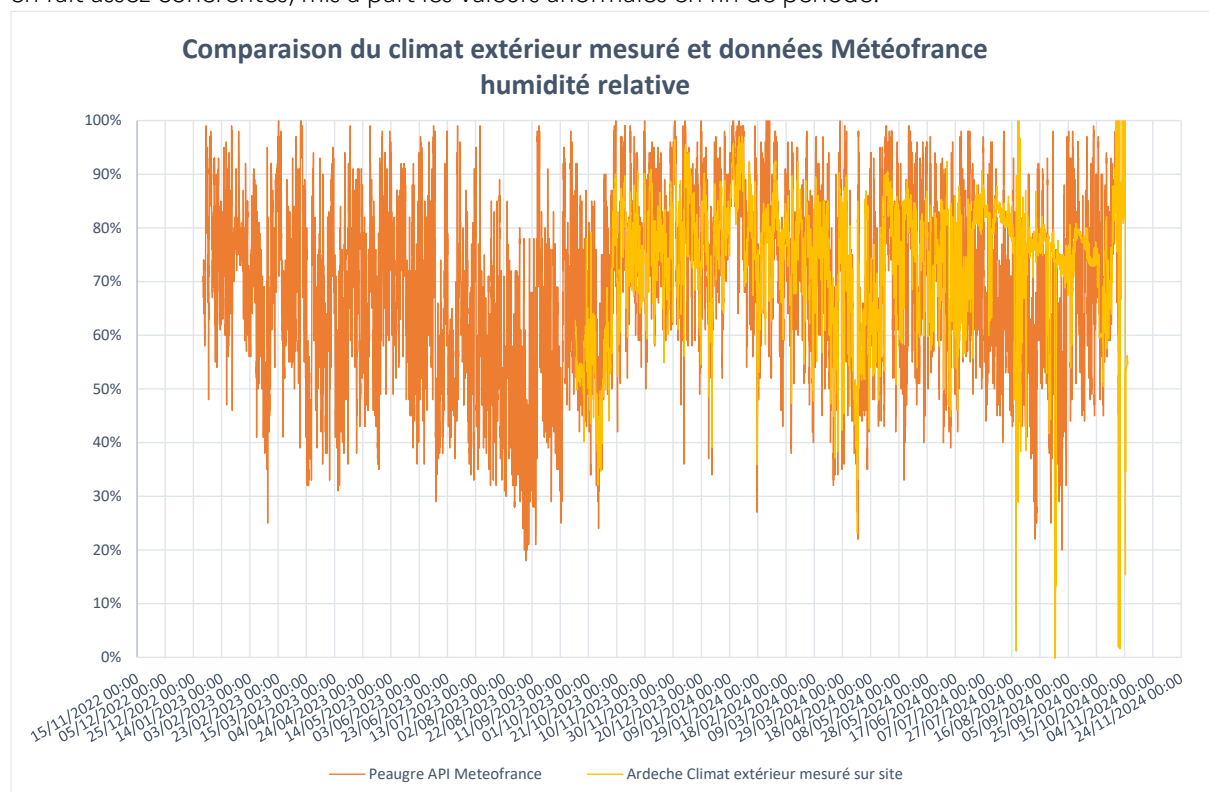
On retiendra que pour les simulations WUFI, on se basera sur un fichier météo plutôt que sur la mesure.

Pour ce qui est de l'humidité relative, on peut la comparer à celle mesurée à l'interface mur-isolant des chambres 2 et 3 (la chambre 1 est à part car le mur est semi-enterré) :



L'humidité extérieure est élevée toute l'année. Il est possible que la position de la sonde abritée sous une terrasse ait augmenté l'humidité perçue. Pour autant la comparaison avec les mesures à l'interface entre mur et isolant (TH1) des chambres 2 et 3 ne montre pas une incohérence majeure.

La comparaison avec les données de la station météo de Peaugres montre que les données mesurées sont en fait assez cohérentes, mis à part les valeurs anormales en fin de période.



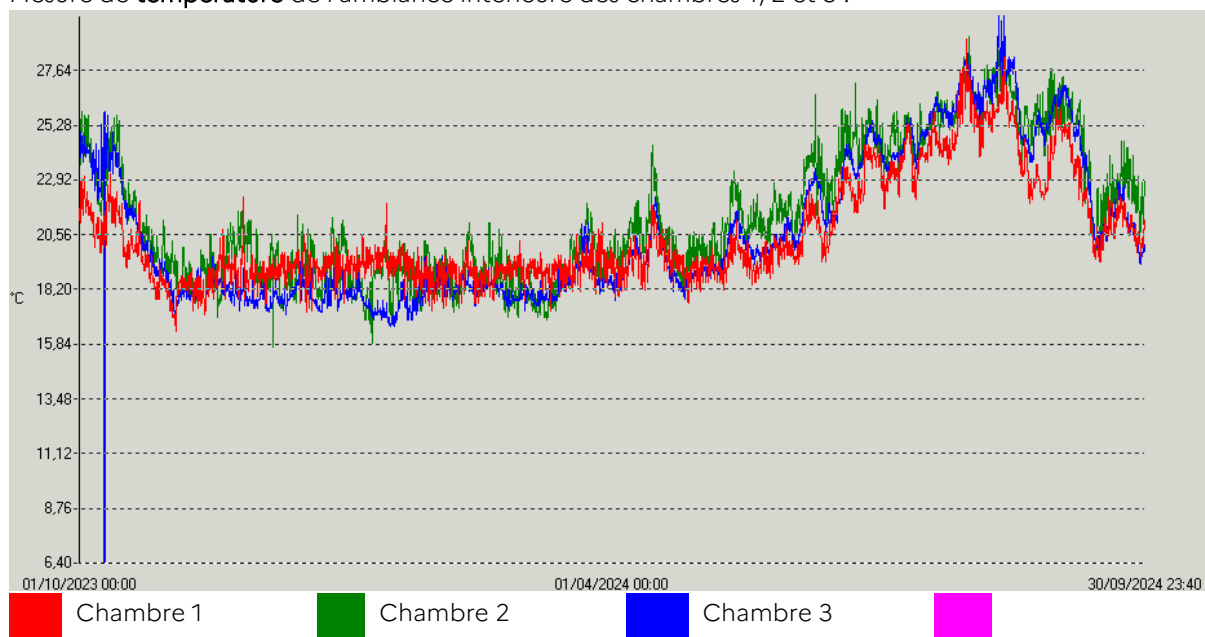


Ci-contre : photo de repérage de la sonde extérieure de la maison Ardèche.

En tout état de cause, ces analyses nous incitent à ne pas utiliser les données mesurées du climat extérieur pour la simulation WUFI (voir [§3.5](#)).

Analyse du Climat intérieur

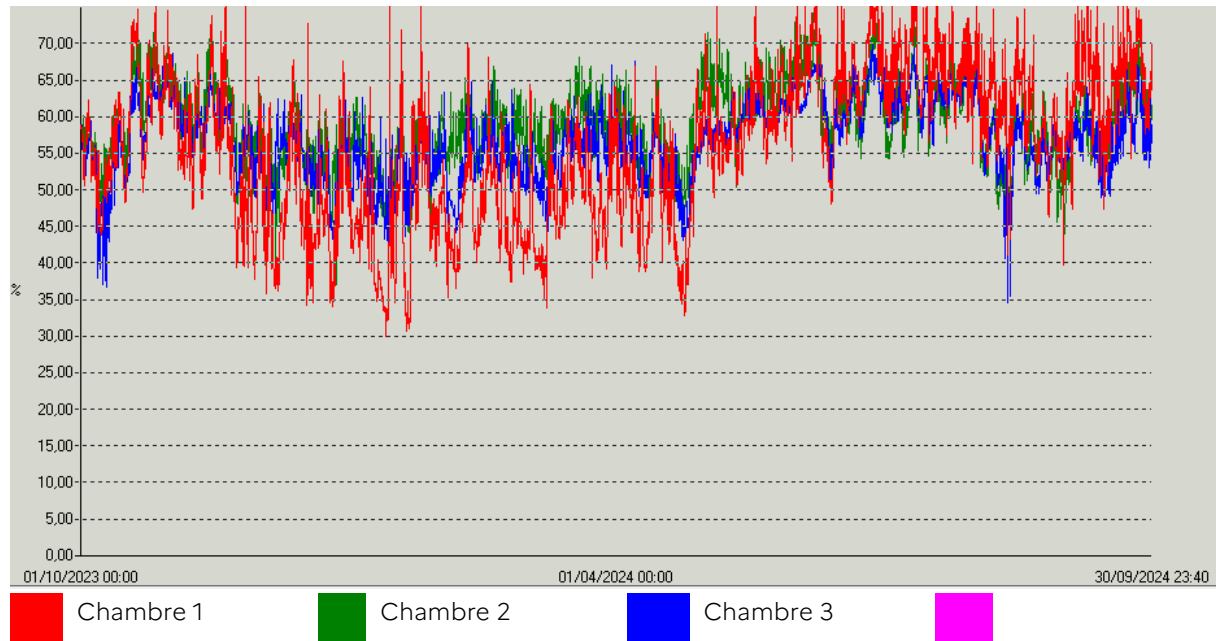
Mesure de **température** de l'ambiance intérieure des chambres 1, 2 et 3 :



Les 3 chambres présentent une évolution de températures similaire.

Les températures en hiver varient entre 17 et 21°C. On peut donc considérer ces pièces comme chauffées durant toute la période froide.

Mesure d'**humidité relative** de l'ambiance intérieure des trois Chambres suivies :



L'humidité dans les chambres suit une évolution annuelle similaire.

Pour les chambres 2 et 3, l'HR varie principalement entre 45 et 70%.

Pour la chambre 1, l'HR est souvent plus faible et descend sous 35%. A priori il s'agit d'une chambre d'amis qui est moins utilisée que les autres.

On peut conclure de ces mesures que la VMC est fonctionnelle pour l'ensemble des 3 chambres.

Analyse des mesures mur par mur

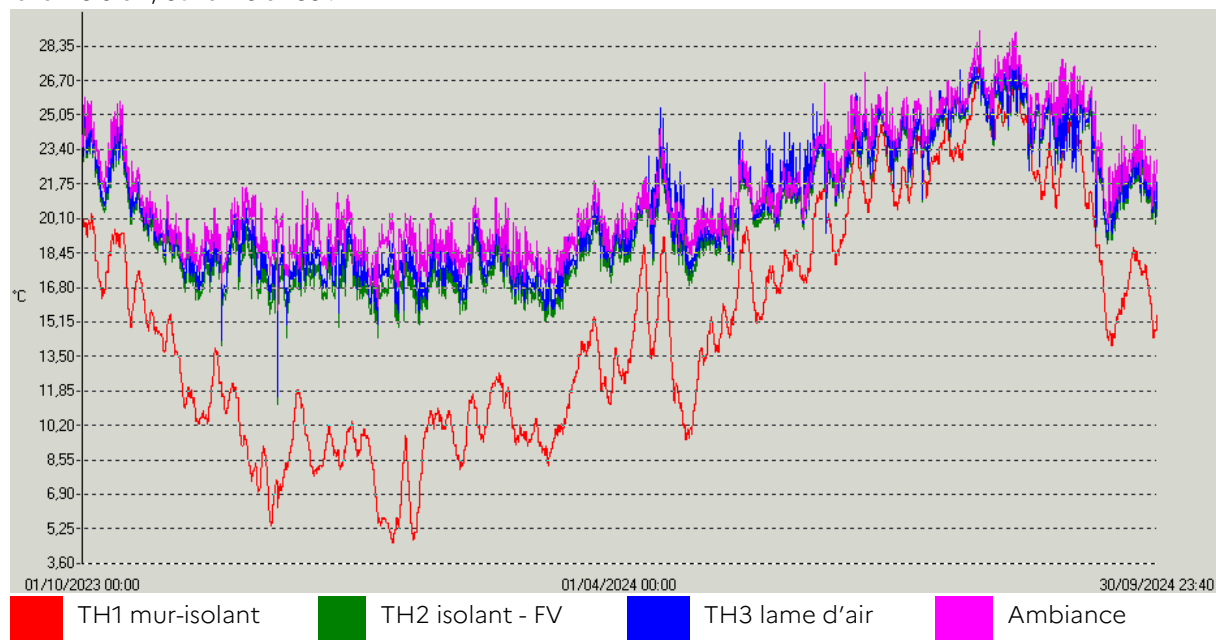
- Chambre 2

Rappel des informations :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre 2	Nord-Est	R+1	N-E	Prise basse

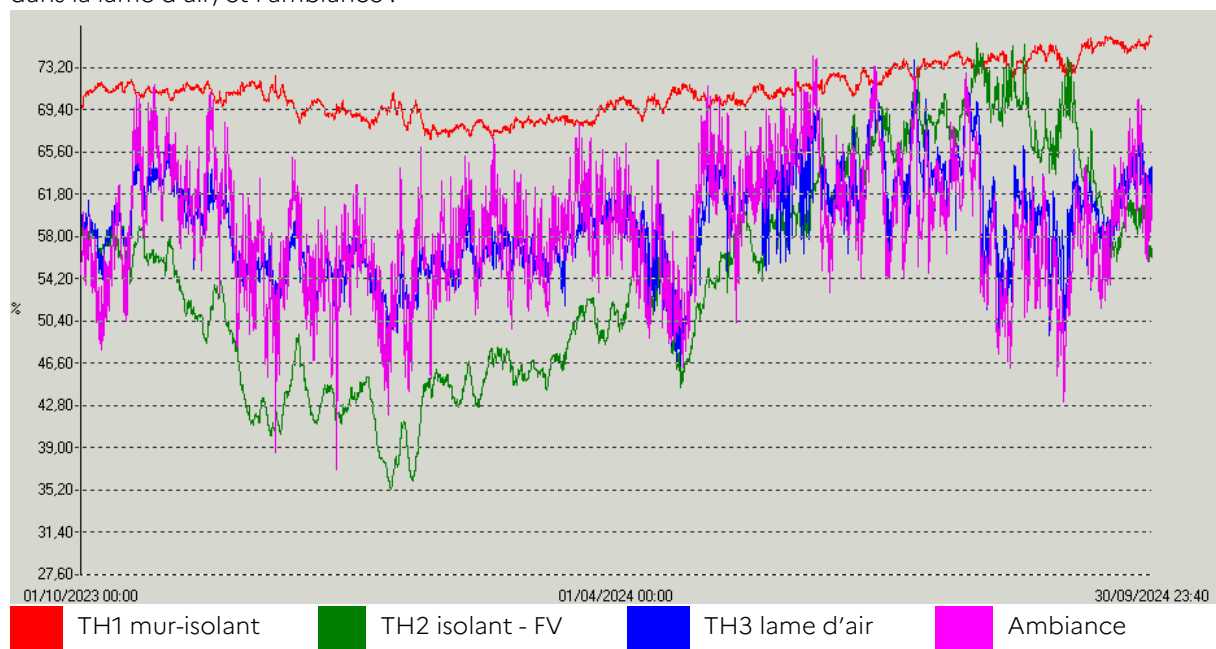
NB : Nous traitons les chambres dans le désordre car la chambre 1 présente la particularité d'un mur semi-enterré. Il nous semble préférable de commencer par un mur classique pour comprendre le fonctionnement nominal de la paroi.

Visualisation des **températures** en TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et Freine-vapeur, TH3 dans la lame d'air, et l'ambiance :



La hiérarchie des températures est bien cohérente : $TH1 < TH2 \approx TH3 < T^{\circ} \text{ambiance}$ en hiver
On retrouve le fait que la Chambre 2 est chauffée sur toute la période froide.

Visualisation de l'**humidité relative** en TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et Freine-vapeur, TH3 dans la lame d'air, et l'ambiance :



La hiérarchie des humidités relative est cohérente :

- TH3 est proche de l'Ambiance, avec un effet « tampon » dû au passage de la plaque de plâtre.
- HR chute entre TH2 et TH3 en hiver, ce qui témoigne de l'efficacité du freine-vapeur.

En ce qui concerne TH1 (interface mur-isolant), l'humidité relative est stable sur l'année (forte inertie hydrique) et HR ne dépasse pas 75%. Cette valeur est atteinte en septembre 2024.

NB : le fait que la courbe TH1 monte globalement sur l'année peut sembler problématique. Cependant ceci s'explique selon nous par une période assez exceptionnelle de mois humides consécutifs. Par ailleurs le mur a été isolé 8 ans avant instrumentation. S'il avait eu tendance à se charger en eau, l'humidité atteinte dès le début des mesures aurait été problématique.

Les critères de SimHuBat sont respectés :

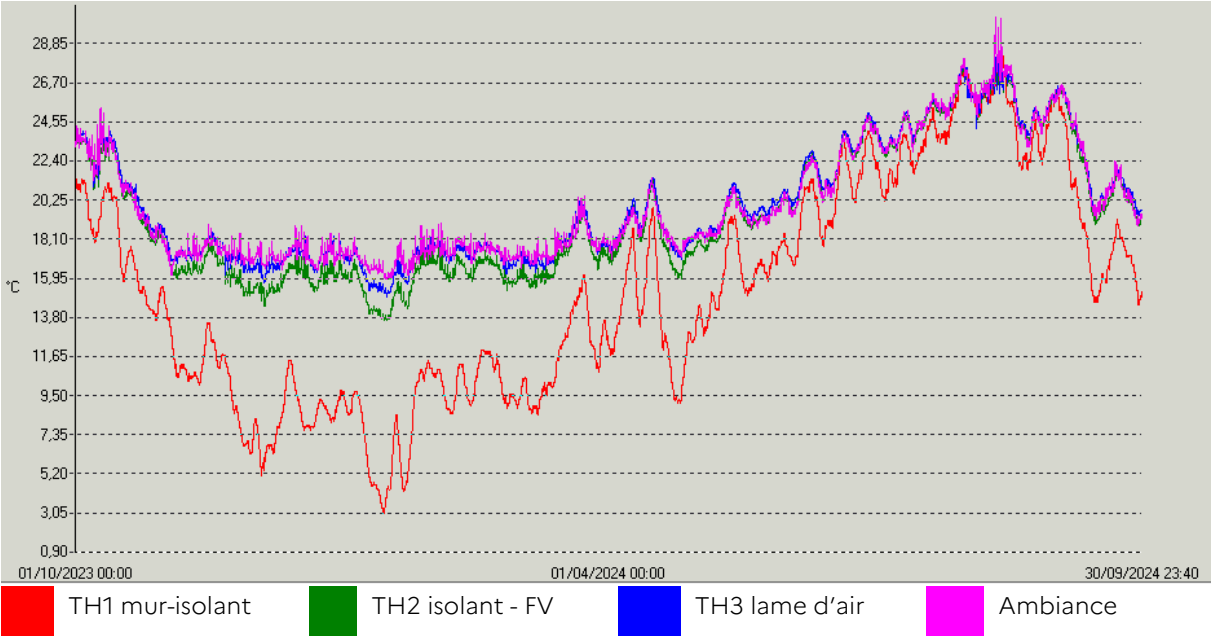
Critères	Description	Mur au global	TH1 : mur / isolant	TH2 : Isolant / FV	TH3 : FV / parement
1	Teneur en eau stable ou diminue	(Simulation uniquement)			
2	Pas de condensation (HR > 98%)	(Période de mesure trop courte)			
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)				
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment				
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait				

• **Chambre 3**

Rappel des informations :

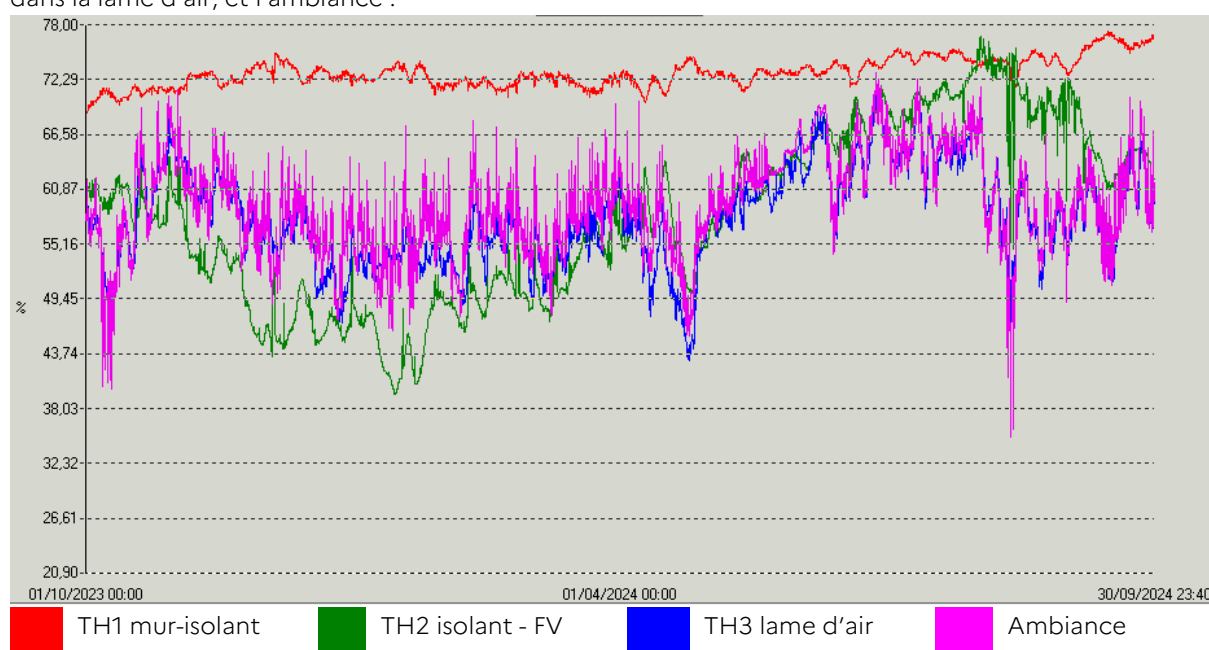
Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre 3	Nord	R+1	Nord	Prise basse

Visualisation des **températures** en TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et Freine-vapeur, TH3 dans la lame d'air, et l'ambiance :



La hiérarchie des températures est bien cohérente : TH1 < TH2 ≈ TH3 < T° ambiance en hiver
On retrouve le fait que la Chambre 3 est chauffée sur toute la période froide.

Visualisation de l'**humidité relative** en TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et Freine-vapeur, TH3 dans la lame d'air, et l'ambiance :



La hiérarchie des humidités relative est cohérente :

- TH3 est proche de l'Ambiance, avec un effet « tampon » dû au passage de la plaque de plâtre.
- HR chute entre TH2 et TH3 en hiver, ce qui témoigne de l'efficacité du freine-vapeur.

En ce qui concerne TH1 (interface mur-isolant), l'humidité relative est stable sur l'année (forte inertie hydrique) et HR ne dépasse pas 77%. Cette valeur est atteinte en septembre 2024.

L'ensemble des observations est tout à fait similaire à la Chambre 2.

Les critères de SimHuBat sont respectés :

Critères	Description	Mur au global	TH1 : mur / isolant	TH2 : Isolant / FV	TH3 : FV / parement
1	Teneur en eau stable ou diminuée	(Simulation uniquement)			
2	Pas de condensation (HR > 98%)	(Période de mesure trop courte)			
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)				
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment				
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait				

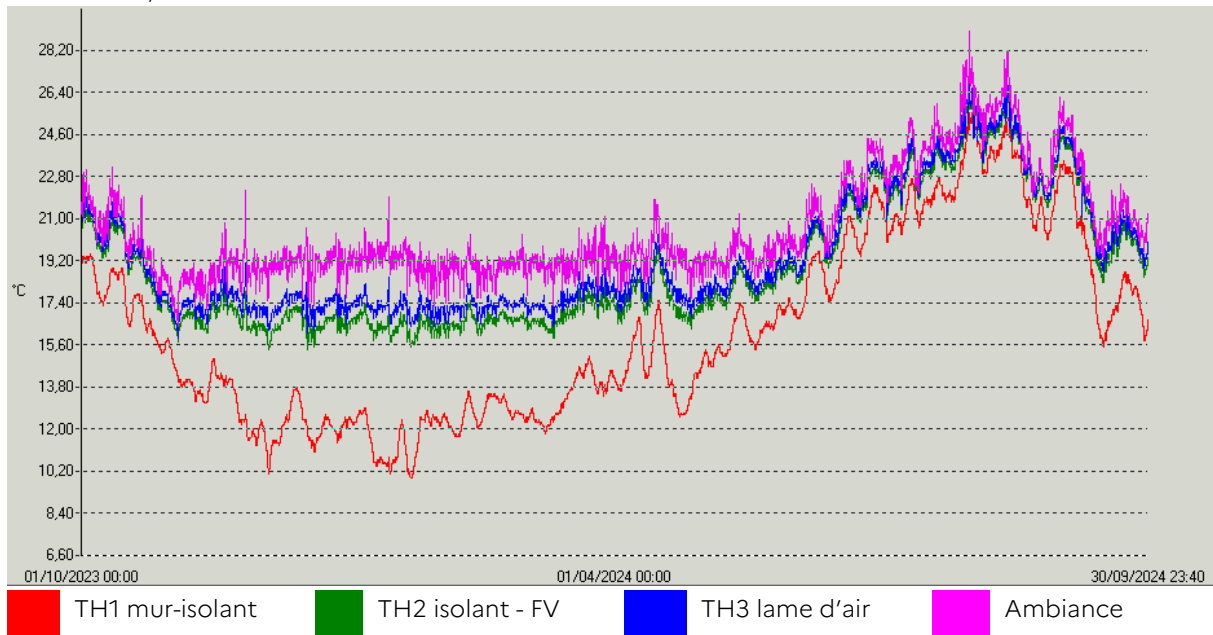
• Chambre 1

Rappel des informations :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre 1	Nord-Est	RdC	N-E	Prise basse, sous le niveau du sol extérieur

On souligne que cette mesure est effectuée en un point situé sous le niveau du sol naturel extérieur.

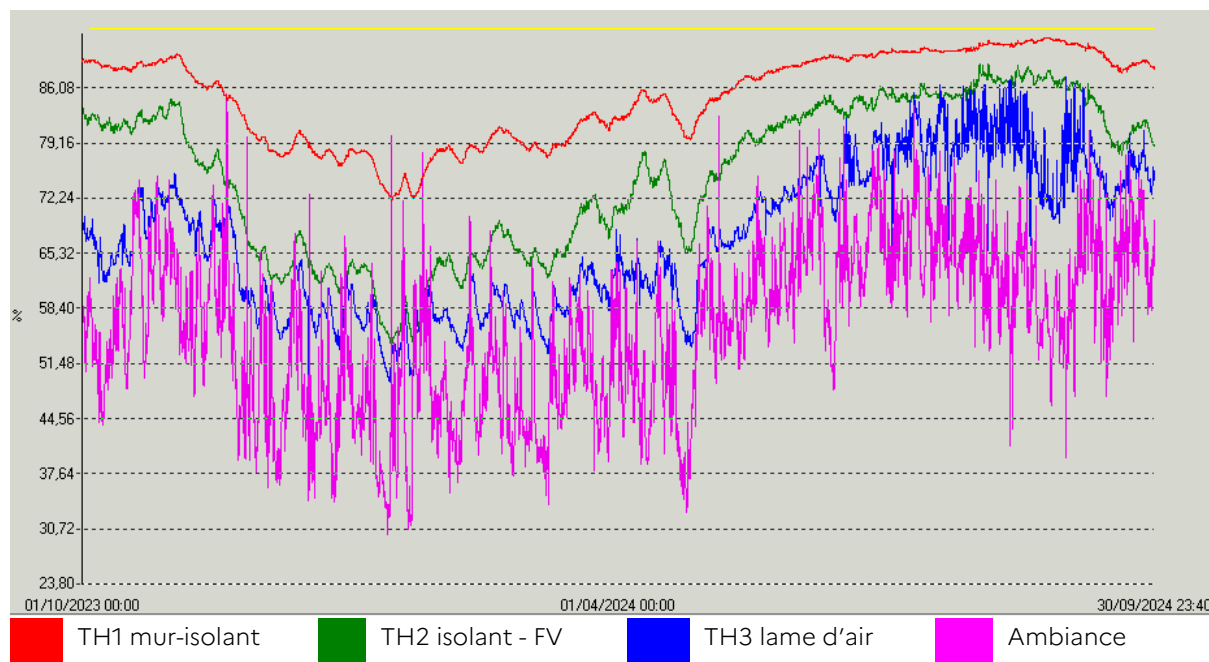
Visualisation des **températures** en TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et Freine-vapeur, TH3 dans la lame d'air, et l'ambiance :



La hiérarchie des températures est bien cohérente : $TH1 < TH2 \approx TH3 < T^{\circ} \text{ambiance}$ en hiver. On retrouve le fait que la Chambre 1 est chauffée sur toute la période froide.

On note que TH1 descend à une température moins basse que dans les chambres 2 et 3 en hiver (10°C contre respectivement 5°C et 3°C). **Le sol a un effet d'inertie thermique qui limite la chute de température.**

Visualisation de l'humidité relative en TH1 entre mur et isolant, TH2 entre isolant et Freine-vapeur, TH3 dans la lame d'air, et l'ambiance :



La hiérarchie des humidités relative est un peu inhabituelle :

- L'humidité en TH3 est toute l'année supérieure à l'ambiance ;
- De même HR en TH2 est supérieure à celle en TH3 toute l'année.

Plutôt que le schéma classique où l'humidité provient du logement en hiver et doit migrer vers l'extérieur, **on observe ici une migration du mur (humidifié par le sol toute l'année) vers le logement.**

Le Freine-vapeur provoque une chute de l'humidité entre TH2 et TH3 : l'humidité provenant du mur est freinée au passage de cette membrane. Cette barrière au passage de l'humidité ne provoque pas pour autant une humidité importante du côté de l'isolant (TH2) en période hivernale, ce qui semble montrer l'efficacité de la **propriété hygrovariable du freine-vapeur : celui-ci n'empêche pas le mur de sécher en cas de migration « inverse » du mur vers le logement.**

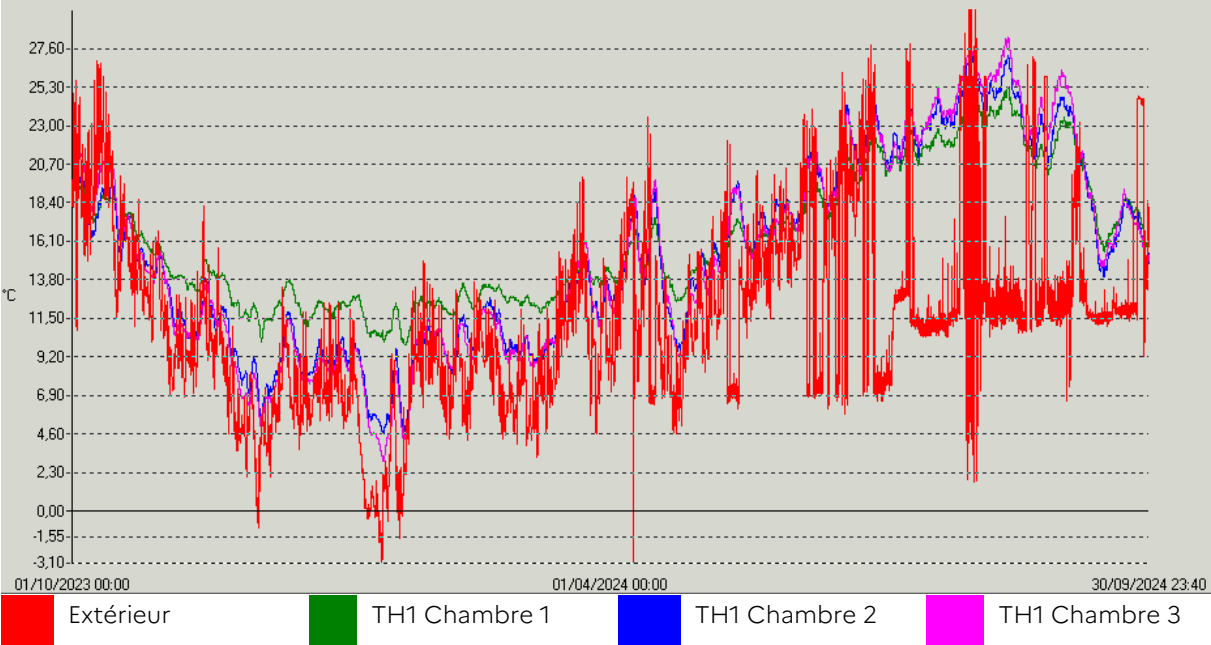
Les valeurs maximales d'HR sont relativement élevées :

- On atteint 89% d'HR au point TH2 en été : à ce moment-là l'humidité dans le logement est autour de 65%, et celle dans la lame d'air (TH3) oscille autour de 80%. Cette HR élevée en TH2 est donc plus le fait du passage du parement que du passage du freine-vapeur. Autrement dit, il nous semble que le Sd (voir le [glossaire](#)) du complexe plaque de plâtre + peinture est sans doute assez élevé. **Si l'on veut favoriser le séchage du mur, il faut donc en priorité réduire le Sd du complexe plaque de plâtre (a priori de l'ordre de 10cm, sauf s'il s'agit de plaque pour pièce humide) et peinture.**
- A l'interface entre le mur et l'isolant (TH1), HR atteint 92,5% à la fin de l'été. On frôle donc, sans l'atteindre, et encore moins sans l'atteindre une semaine complète, le seuil de 93,5% (droite jaune) qui correspond à 23% d'humidité en masse pour la ouate de cellulose (voir [l'encadré méthodologie](#)).

Ainsi, malgré le caractère semi-enterré de ce mur, les critères de SimHuBat sont respectés :

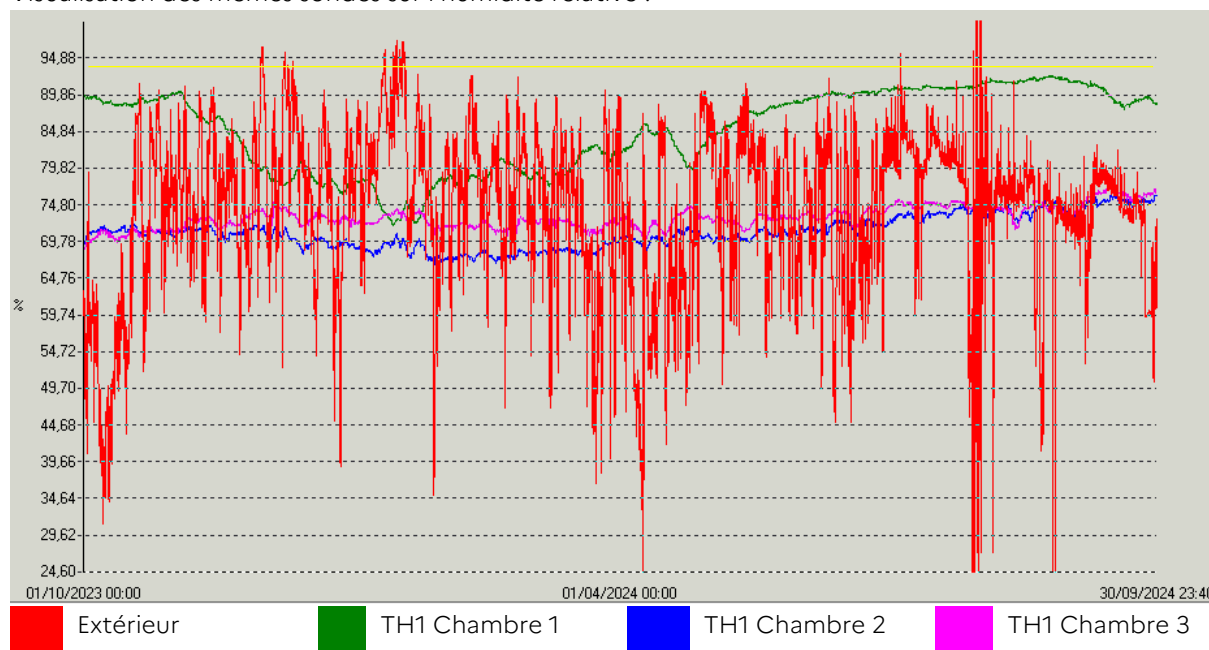
Critères	Description	Mur au global	TH1 : mur / isolant	TH2 : Isolant / FV	TH3 : FV / parement
1	Teneur en eau stable ou diminuée	(Simulation uniquement)			
2	Pas de condensation (HR > 98%)	(Période de mesure trop courte)			
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)				
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment				
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait				

• Comparaisons entre les 3 chambres
 Pour bien visualiser la particularité du mur semi-enterré de la chambre 1, on visualise ici les mesures de température de la sonde extérieur (malgré ses imperfections) avec les sondes en TH1 des 3 chambres :



On retrouve le fait que l’inertie de la terre limite la chute de température en hiver pour le mur semi-enterré de la chambre 1.

Visualisation des mêmes sondes sur l'humidité relative :



On retrouve ici l'humidité plus importante à l'interface entre mur et isolant du mur semi-enterré de la chambre 1.

On note que l'HR est même plus élevée en été au niveau de la sonde TH1 que l'humidité extérieure de l'air. Le sol a un rôle de stock d'eau important qui ne s'assèche pas de toute l'année.

2.7.3 Conclusions sur la maison Ardèche

Pour les 3 murs instrumentés sur cette maison, tous les critères de SimHuBat sont respectés du point de vue de la mesure in-situ.

Cette maison présente une configuration nominale : présence d'une ventilation mécanique efficace, ambiance chauffée tout l'hiver, pas de défaut identifié de mise en œuvre du freine-vapeur.

Le cas de la Chambre 1 est cependant intéressant car la mesure se fait au niveau d'un **mur semi-enterré**, sous le niveau du sol fini extérieur. On observe pour ce mur une migration de l'humidité inverse, du mur vers le logement, et ce sur toute l'année. L'humidité dans l'isolant y est logiquement plus élevée que dans les autres murs. Elle atteint jusqu'à 92,5 % (à la fin de l'été), ce qui est une humidité importante.

Toutefois cette valeur reste inférieure au seuil de 93,5% qui correspond au critère de 23% en masse pour la ouate de cellulose. Cette configuration semi-enterrée est donc défavorable, mais fonctionne d'un point de vue hygrothermique selon les critères de SimHuBat.

2.8 Conclusions sur la visualisation des mesures

Récapitulatif des résultats des mesures pour chaque maison

- [Jura A](#) (3 murs) : chauffé partiellement, pic d'humidité aux fêtes de fin d'année. Malgré cela le complexe arrive à réguler l'humidité, les critères de SimHuBat sont respectés largement (TH1 reste sous 75% HR dans la Chambre, sous 70% HR pour le Salon et la Salle de bain).
- [Jura B](#) (4 murs) : cas nominal : ventilé, chauffé tout l'hiver. Les critères de SimHuBat sont respectés largement (TH1 reste sous 70% HR).
- [Jura C](#) (3 murs) : pas de VMC, une chambre non chauffée. Pour autant, TH1 reste sous 70% d'humidité relative pour les 2 pièces partiellement chauffées et sous 75% pour la chambre non chauffée. Lors de l'instrumentation un défaut de continuité du FV a été constaté dans le bureau. Cependant il ne semble pas impacter significativement les niveaux d'humidité dans l'isolant (TH1 reste sous 65% HR). Les critères de SimHuBat sont bien respectés.
- [Jura D](#) (3 murs) : pas de VMC, une chambre peu chauffée, un enduit extérieur peu capillaire (ciment), et un climat extérieur très froid et humide en hiver. Également un soupçon de discontinuité du FV pour l'un des murs. L'HR en TH1 monte jusqu'à 85% ce qui est élevé mais reste assez largement en deçà des seuils des 23% d'eau en masse. Les critères de SimHuBat sont bien respectés.
- [Brest 1](#) (1 mur) : VMC présente et fonctionnelle. Chauffage partiel (le logement descend à 12°C). Le climat extérieur est très humide. L'HR en TH1 monte à 88% environ. Les critères de SimHuBat sont toutefois respectés.
- [Brest 2](#) (2 murs) : VMC présente mais souvent à l'arrêt et de débit faible. Chauffage très partiel (le logement descend à 7°C). Comme pour Brest 1, le climat extérieur est très humide. **Certains critères de SimHuBat, appliqués à la fibre de bois, ne sont pas respectés.**
- [Ardèche](#) (2 murs à l'étage) : cas nominal : ventilé, chauffé tout l'hiver. Les critères de SimHuBat sont respectés largement (TH1 reste sous 77% HR).
- [Ardèche](#) (1 mur semi-enterré) : cas de migration inversée, le mur sèche vers le logement toute l'année. L'humidité atteinte en TH1 est élevée (92,5% à la fin de l'été), mais reste sous le critère des 23% en masse pour la ouate.

Maison	Paramètre défavorable constaté ou supposé					Résultat
	Pas de VMC	Chauffage partiel / <19°C	Défaut de continuité du freine-vapeur	Pic d'humidité intérieure	Climat très froid et/ou très humide	HR max en TH1
Jura A		(X)		X		70% / 75%
Jura B						70%
Jura C	X	(X)	(X)		X	70% / 75%
Jura D	X	(X)	(X)		X	85%
Brest 1		X			X	88%
Brest 2	X	X			X	93,5%
Ardèche						77%
Ardèche				Mur semi-enterré		93%

Tableau de synthèse des mesures et des paramètres explicatifs principaux. La couleur en colonne « résultat » est rouge si l'un des critères de SimHuBat n'est pas respecté. Pour Brest 1 et le mur semi-enterré en Ardèche, le critère de SimHuBat est respecté, mais l'HR max en TH1 est élevée.

Synthèse des enseignements techniques

Globalement, 18 murs sur les 19 instrumentés ne présentent pas de risque pathologique.

Malgré le risque que présente a priori l'isolation par l'intérieur sur un **mur en pierres dures** (ici calcaire dur et granite), les complexes **avec freine-vapeur** (ici tous hygrovariables, sauf 2 parois de [Jura C](#) dont le pare-vapeur présente un Sd fixe de 20m) **répondent aux critères de SimHuBat**, y compris pour les climats de montagne à plus de 900m ([Jura C](#) et [Jura D](#)), et même en l'absence d'une ventilation mécanique pour ces deux mêmes logements.

On note au passage l'efficacité des freine-vapeurs pour diminuer l'humidité dans l'isolant.

Seul un des murs du logement [Brest 2](#) ne respecte pas 2 des critères de SimHuBat à l'interface entre le mur et l'isolant. Le cas de ce logement se distingue pour 5 raisons :

- Le climat est particulièrement humide toute l'année, du fait de la **proximité immédiate de l'océan** (climat de bord de mer).
- Le **chauffage n'est pas continu tout l'hiver**. Pour le logement Brest 2, la température descend même à 7°C (valeur de température ambiante la plus basse de l'échantillon). L'humidité dans ces logements est relativement élevée. Pour Brest 2 elle évolue principalement entre 55% et 80% HR.
- **La VMC du logement Brest 2 a été souvent à l'arrêt et son débit est faible**. Ceci expliquerait, en plus des températures basses relevées, l'humidité intérieure importante, ce qui est évidemment un facteur très défavorable.
- Un **enduit intérieur** a été réalisé avant isolation. Or la mesure a été réalisée sur la 1^e année après isolation. Il est possible que cet enduit, pas encore sec, ait apporté de l'humidité à l'interface mur-isolant. Si c'est le cas, l'humidité va baisser sur les années à venir.
- Ces murs ont été isolés en **fibres de bois**. Or la conversion du critère de SimHuBat de 23% d'humidité en masse correspond à une humidité relative de 93,5% pour la ouate de cellulose contre 86,6 % HR pour la fibre de bois (voir [l'encadré méthodologie](#)). **Ce critère est donc bien plus exigeant a priori**. On peut s'interroger sur la robustesse de ce critère appliqué à des isolants biosourcés dans leur grande diversité. On peut s'interroger également sur l'absence de prise en compte de la température en combinaison avec l'humidité, comme cela se fait ailleurs en Europe (voir à ce sujet la revue de littérature scientifique réalisée par ARCANNE, objet du livrable 5.1 du projet Perf in Mind 2).

Le complexe d'isolation en 1/3 – 2/3 ne semble pas problématique a priori, vu les mesures côté intérieur du freine vapeur dans le second lit d'isolant (TH2), qui respecte assez largement les critères.

Enfin, la maison [Ardèche](#) a permis d'instrumenter un **mur semi-enterré**. On y observe une migration inversée du mur vers le logement toute l'année. Le caractère hygrovariable du freine-vapeur semble bien aider à permettre le séchage du mur. L'humidité à l'interface entre mur et isolant atteint des valeurs élevées (HR maximale de 93% en TH1) sans toutefois dépasser les critères de SimHuBat.

Enseignements sur la technique d'instrumentation de murs pour l'analyse hygrothermique

Sur le plan de la technique d'instrumentation, on note que plusieurs sondes ont présenté des dysfonctionnements. Ce type d'instrumentation in-situ dans un mur semble particulièrement « traumatisant » pour les sondes.

Si ce type de mesure était à refaire, nous ferions un **doublon systématique des sondes les plus importantes** pour l'analyse, notamment TH1.

Par ailleurs la qualité des données des sondes extérieures a été particulièrement problématique : les sondes peuvent être perturbées par la proximité du bâtiment (quasi-local tampon) ou par le rayonnement d'un toit en tôle, ou encore possiblement par une accumulation locale d'eau de pluie. Si cette mesure était à refaire, il faudrait prendre grand soin au choix de placement de la sonde extérieure, voire, dans l'idéal, prévoir impérativement un **abri météo anti-rayonnement**.

On retient également que les sondes peuvent être influencées par de nombreux **phénomènes « parasites »**. Il faut donc bien s'assurer que les sondes ne sont pas à proximité de canalisation de chauffage, ou encore identifier la présence de défauts d'étanchéité à l'air. Une vérification de la cohérence des données mesurées par leur visualisation graphique comparée nous semble une bonne pratique à généraliser.

Malgré la précision de 0,5°C de chacune des sondes, un écart entre les mesures de 1°C et de 5% en HR reste possible (voir les [mesures comparées en 2 points de la même chambre](#) dans la maison Jura B) et ne doit pas être considéré comme incohérent.

3. Comparaison entre mesure et modélisation

3.1 Modélisations sous WUFI

3.1.1 Choix des cas d'étude à simuler

Nous n'avons pas pu dans la temporalité du projet simuler chacune des maisons instrumentées.

Afin de choisir les 4 maisons à simuler, nos critères ont été les suivants :

- Variété de climats extérieurs : simulation de Brest, du Jura A à 235m d'altitude et Jura C à 1240 m d'altitude et Ardèche.
- Matériaux différents : ouate de cellulose (Jura A, Jura C et Ardèche) et laine de bois (Brest).
- Pour les climats intérieurs, nous avons testé plusieurs variantes selon les données disponibles dans WUFI.

NB : la composition des murs de Brest 1 et Brest 2 étant similaire, les simulations WUFI avec un climat normé s'appliquent aussi bien à un cas d'étude ou à l'autre. Brest 1 et Brest 2 ne se différencient que par le climat intérieur réel.

3.1.2 Logiciel utilisé

Nous utiliserons le logiciel WUFI en 2D afin de simuler directement la géométrie de mur en pierre naturelles avec joints.

Nous avons constaté, lors des simulations précédemment effectuées, l'importance de simuler en 2D les murs en petits éléments de maçonnerie (ici à base de pierres naturelles) du fait de la présence de joints plus ou moins épais.

Le logiciel de simulation de transferts chaleur, air, humidité (HAM) utilisé est WUFI 2D version 4.3.

Ci-dessous nous listons et analysons brièvement les paramètres d'entrée du logiciel WUFI 2D.

3.1.3 Paramètres d'entrée

Géométrie des murs



Photo d'un mur de la maison Jura B



Photo d'un mur de la maison Ardèche

Il s'agit d'un assemblage de blocs plein de pierres de 10 à 30cm de hauteur et 10 à 30cm de profondeur pour une épaisseur de mur fini de 50cm.

Les joints entre pierre ont une largeur 2cm. On considère que toutes les 2 rangées le joint n'est plus traversant de l'intérieur vers l'extérieur.

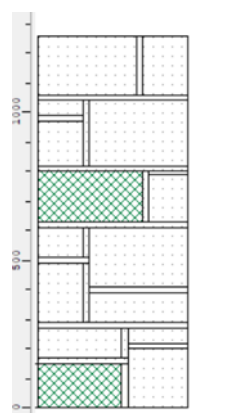


Schéma de la géométrie initiale saisie dans WUFI

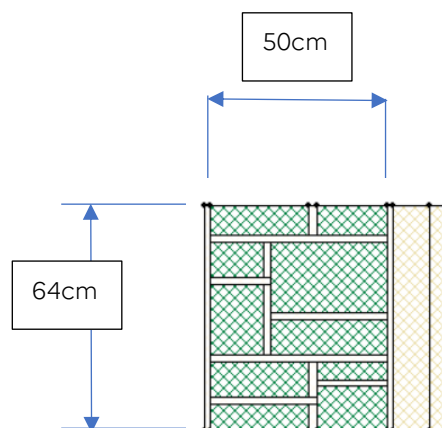
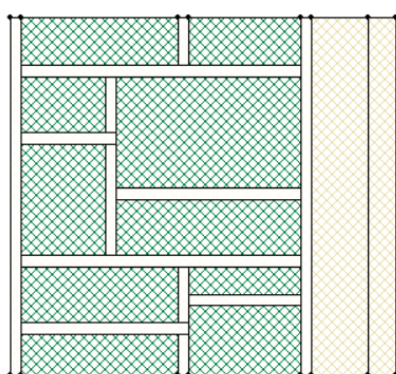


Schéma de la géométrie « simplifiée » saisie dans WUFI

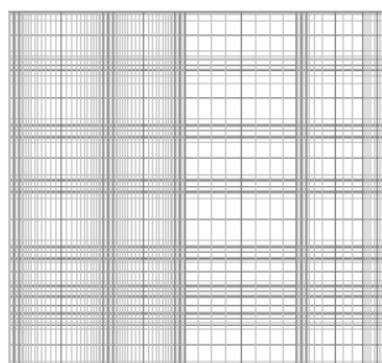
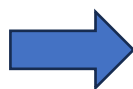
Dans un premier temps nous avons modélisé un mur sur une hauteur de 130cm pour refléter le côté pseudo-aléatoire des dimensions des pierres. Cependant, face au temps de calcul que représentait cette géométrie, nous l'avons simplifiée pour ne refléter que la présence de joints traversants ou non.

Le modèle utilisé par la suite a donc une géométrie de 64cm de hauteur pour 50cm d'épaisseur de mur (hors isolant)

Le maillage



Géométrie « simplifiée » saisie dans WUFI



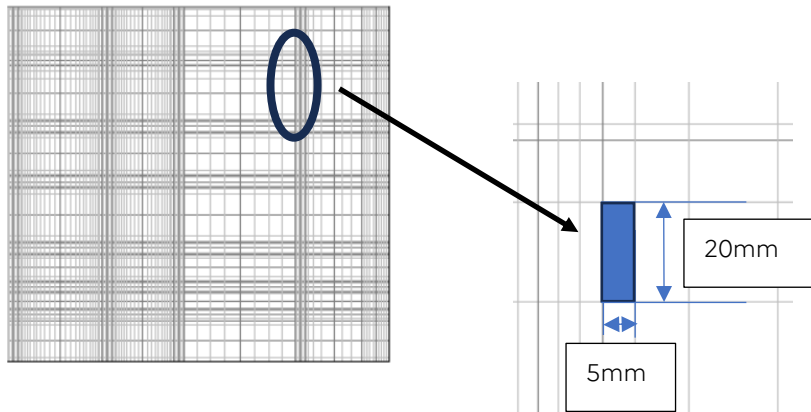
Maillage réalisé dans WUFI

Le maillage est généré directement par WUFI. Il est ensuite possible de le modifier manuellement. A chaque changement de matériau, le maillage est affiné : les mailles sont plus petites.

La zone qui nous intéresse particulièrement est celle du contact entre le mur et l'isolant, c'est à dire la zone de la sonde de mesure TH1 (voir [§1.2](#)).

Selon le guide Pacte SimHuBat d'octobre 2021 - DÉTERMINATION DES HYPOTHÈSES POUR LES SIMULATIONS DE TRANSFERTS COUPLÉS TEMPÉRATURE / HUMIDITÉ DANS LES PAROIS DE BÂTIMENT, la zone d'intérêt observé doit avoir une dimension de 5mm x 20mm.

Ainsi nous optimisons le maillage de cette zone de contact mur/isolant afin d'avoir des zones de 5mm x 20mm à analyser :



Zoom sur le maillage à l'interface entre le mur et l'isolant, pour le respect de la taille de maille préconisée par SimHuBat

Cependant afin de comparer avec ce qui a été mesuré in situ, nous agrandirons cette zone d'analyse à une zone de l'ordre de 1cm par 3cm représentant la zone occupée par la sonde de mesure.

En effet, la sonde n'est pas totalement en contact avec l'isolant et le mur : le capteur lui-même est protégé par une cage en plastique ouverte. La sonde mesure donc la température et l'humidité relative d'un petit volume d'air en contact avec environ 3cm d'isolant contre le mur.

Il y a possiblement un écart méthodologique entre une sonde en contact direct avec l'isolant et la mesure effectuée. La prise en compte d'une zone de 3cm dans WUFI nous semble de nature à limiter cet écart.

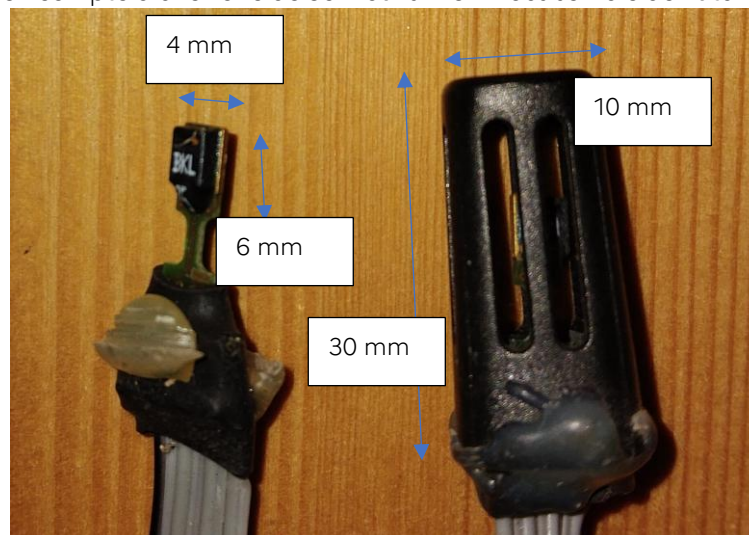


Photo du capteur seul et du capteur avec sa protection plastique

L'orientation

En général afin de simuler les pires scénarios, les parois orientées côté Nord avec le moins d'ensoleillement sont à privilégier ou/et les parois exposées au régime de pluie le plus important.

Pour les besoins de la présente étude, qui vise à comparer le calcul aux mesures in-situ, les simulations ont respecté les orientations des murs où les sondes ont été installées, soit :

- Brest 1 : Nord
- Jura A : Nord
- Jura C : Nord-Ouest
- Ardèche : Nord

Les matériaux utilisés

Toutes les maisons instrumentées sont isolées par l'intérieur. Voir la présentation générale au [§1.1](#) et le détail par maison en début de chapitre sur chaque maison instrumentée ([§2.1](#) à [2.7](#)).

			Caractéristiques issues de la base matériau Wufi				
Matériaux	Variantes	Référence base WUFI	Masse volumique	Porosité	Chaleur spécifique	Conductivité thermique	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur (μ)
			[kg/m ³]	[m ³ /m ³]	[J/kg.K]	[W/m.K]	[-]
Enduit extérieur	Enduit ciment	Enduit au ciment (valeur A : 0,51 kg/m ² h ^{0,5})	2000	0,3	850	1,2	25
	Enduit à la chaux	Enduit à la chaux (valeur A : 3 kg/m ² h ^{0,5})	1600	0,3	850	0,7	7
Pierre	Calcaire	Pierre calcaire Krensheimer shelly	2440	0,13	850	2,25	140
	Granite	Granite	2453	0,095	702	1,66	54
	Grès	Grès Zeiter	2300	0,05	850	2,3	70
Enduit d'égalisation intérieur	Chaux	Enduit à la chaux (valeur A : 3 kg/m ² h ^{0,5})	1600	0,3	850	0,7	7
Joint	Chaux	Enduit à la chaux (valeur A : 3 kg/m ² h ^{0,5})	1600	0,3	850	0,7	7
Isolant	Ouate de cellulose (en vrac / insufflée)	Fibre de cellulose	50	0,95	2000	0,034	1,8
	Fibre de bois souple	Pavaflex	53	0,96	2100	0,039	1,35
Membrane	Freine vapeur hygroréglable	Intello (till 2015)	115	0,086	2500	2,4	26000/250
	Pare-vapeur	Freine vapeur (Sd=20m)	130	0,001	2300	2,3	20000
Parement	Non intégré dans les simulations						

Tableau des matériaux utilisés pour les simulations sous WUFI

La composition du mur simulée sera présentée en début de chapitre pour chaque maison, en cohérence avec le mur réel instrumenté.

Le climat extérieur

Le climat extérieur pour réaliser une simulation WUFI peut s'appuyer sur la base de données de WUFI. Cependant, pour la France, seules les météo de 7 villes sont renseignées :



- Brest
- Trappe
- Nancy
- Lons le Saunier
- Grenoble
- Marseille
- Bordeaux

Ci-contre, carte de repérage des station météo présentes dans la base de données de WUFI 2D version 4.3 pour la France.

Les météo de villes françaises sont issues de Météo-France, et à priori à la

date de 2010. Mais peu d'indications sont données.

Elles comportent les données suivantes, au pas de temps horaire :

- Température de l'air ;
- Humidité relative ;
- Vent : direction et vitesse ;
- Rayonnement courte longueur d'onde ;
- Rayonnement grande longueur d'onde (réémission par l'atmosphérique et l'environnement terrestre) ;
- La pression atmosphérique ;
- Nébulosité.

Autres sources possibles :

La France est quadrillée par un réseau de stations météorologiques qui enregistrent tout ou partie des données ci-dessus. Depuis le 01/01/2024, ces données sont accessibles et gratuites via l'API Météo-France, (<https://donneespubliques.MétéoFrance.fr/>). Un traitement est nécessaire afin de les utiliser comme données d'entrée dans WUFI.

Nous avons ainsi la possibilité de créer des climats pour des lieux donnés et pour des dates données, à convertir au format. WAC.

Nous utiliserons à la fois la feuille de calcul Excel fournie par WUFI mais aussi le logiciel Météonorm 8 qui génère des données météo (de façon payante). En effet les données gratuites de Météo-France ne sont

pas complètes, notamment les données de rayonnement, de pluie ou de vent qui ne sont pas toujours mesurées

C'est pourquoi nous utiliserons les données Météonorm de la station la plus proche (qui a des données complètes) pour compléter le fichier météo au format .WAC.

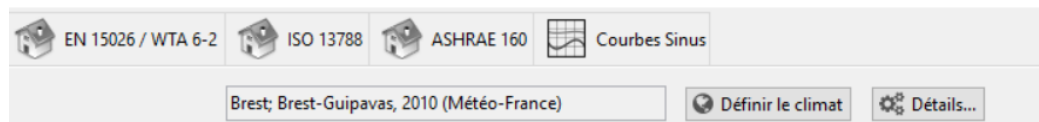
A noter que les fichiers météo au format WAC doivent commencer le 1^{er} janvier entre 00h et 1H et être sur une année complète à minima, donc 8760 lignes et ne pas comporter le 29 février (jour à supprimer si l'année souhaitée est une année bissextile).

Par la suite nous comparerons à la fois les données mesurées par nos soins et les données Météo-France. Et nous effectuerons des simulations avec ces climats et comparerons les résultats sur certaines simulations.

Les climats intérieurs

Le climat intérieur peut être de plusieurs types :

- Dans le logiciel WUFI :



- Climat intérieur dérivé du climat extérieur :
 - Selon l'EN 15016/ WTA 6-2
 - Selon l'ISO 13788
 - Selon l'ASHRAE 160 : peu réaliste pour notre étude
- Climat intérieur Sinusoïdal : peu représentatif pour notre étude
- Soit des données mesurées in situ dans notre campagne de mesure.

Nous comparerons ainsi pour certaines simulations les climats intérieurs mesurés et les climats intérieurs générés avec les normes WTA 6-2 et ISO 13788.

Les autres paramètres

Durée de simulation : nous effectuerons **5 ans** de simulation afin de bien voir l'évolution des teneurs en eau : teneur globale du mur et teneur en eau pour les couches de matériaux (critère 1 de SimHuBat, voir le [§1.3](#)).

L'**humidité relative initiale** des matériaux peut être mise à la valeur souhaitée : ici nous avons gardé la valeur par défaut de **80 % d'humidité relative**.

3.2 Simulations BREST 1

Rappel des caractéristiques du logement

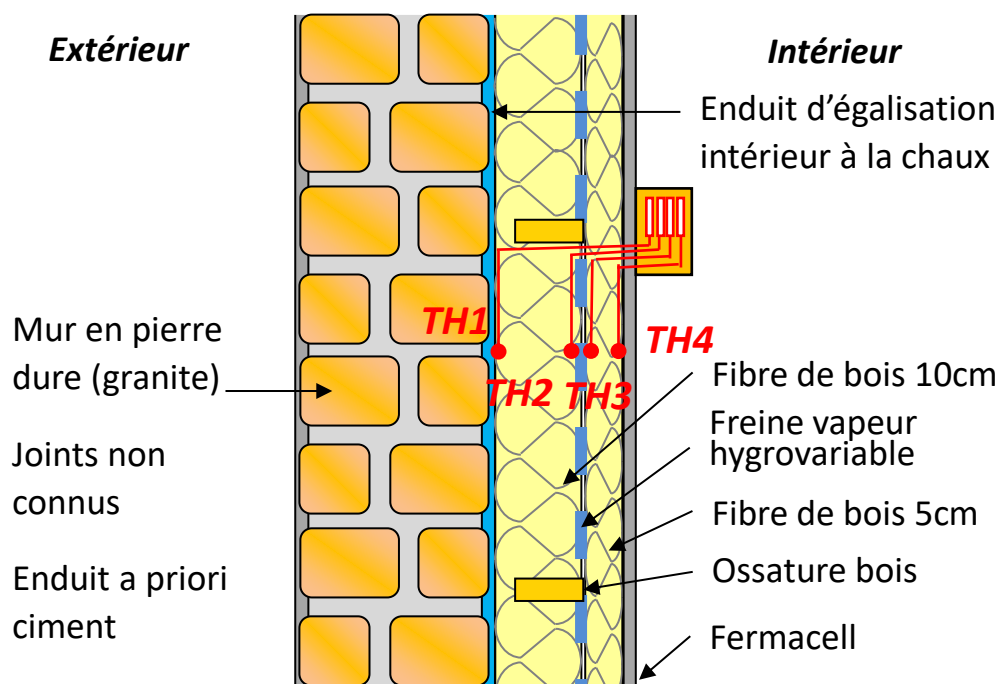
Département : Finistère (29)

Altitude : 69 m

Description du mur : Mur pierre dure (à priori granite), avec enduit extérieur à priori en ciment, enduit d'égalisation intérieur chaux - sable.

ITI en fibre de bois en 2 couches respectant la règle dite des 1/3 – 2/3 : 10cm puis freine-vapeur hygrovariable (Intello) et 5cm. L'ensemble est réalisé entre ossature bois, et avec un parement Fermacell.

Isolation finie juste avant l'instrumentation. L'isolant a été déposé pour faciliter la pose des capteurs.



Ventilation : VMC simple flux (bon fonctionnement pour Brest 1, souvent à l'arrêt et faible débit pour Brest 2).

Pièces instrumentées et orientation :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre	Nord	R+3	Nord	Pied droit sous rampant

Paramètres complémentaires de simulation WUFI :

Référence des matériaux utilisés :

Matériaux	Variantes	Référence base WUFI	Epaisseur (mm)
Enduit extérieur	Enduit ciment	Enduit au ciment (valeur A : $0,51 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$)	20
Pierre	Calcaire	Pierre calcaire Krensheimer shelly	500
Joint	Chaux	Enduit à la chaux (valeur A : $3 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$)	20
Enduit d'égalisation intérieur (entre mur et isolant)	Chaux	Enduit à la chaux (valeur A : $3 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$)	20
Isolant	Fibre de bois souple	Pavaflex (en 2 couches 10cm et 5cm, séparées par le Freine vapeur)	100 + 50
Membrane	Freine vapeur Hygrovariable	Intello (Till 2015)	1
Parement	Non intégré dans les simulations		

Les caractéristiques de ces matériaux sont indiquées au [§3.1.3](#).

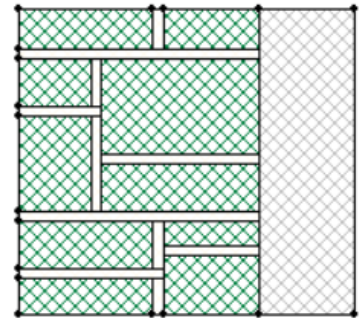
Géométrie du mur

Il s'agit d'un assemblage de blocs plein de pierre de 10 à 30cm de hauteur et 10 à 30cm de profondeur pour une épaisseur de mur fini de 50cm

Les joints entre pierres ont une largeur 2cm. On considère que toutes les 2 rangées, le joint n'est plus traversant de l'intérieur vers l'extérieur.

Ainsi la constitution du mur est la suivante :

- Mur en pierre Calcaire dur de 50cm de large
- Joint à la chaux de 2cm de largeur
- Isolant fibre de bois 10 + 5cm
- Freine vapeur Intello entre les lits d'isolant



Durée de la simulation :

Simulations effectuées sur 5 ans afin d'évaluer l'évolution des teneurs en eau dans le mur et ses couches.

Variantes simulées :

Pour Brest nous effectuerons une série de 7 simulations afin d'étudier :

- 4 variantes sur les climats intérieurs et extérieurs
- 1 variante sur la pierre utilisée
- 1 variante sur l'épaisseur de joint entre pierres

3.2.1 Variante 1 – Climat ext. WUFI / int. WTA 6-2 humidité moyenne

Paramètres

Climat extérieur : Météo WUFI de Brest : Brest -Guipava, 2010 d'après Météo-France

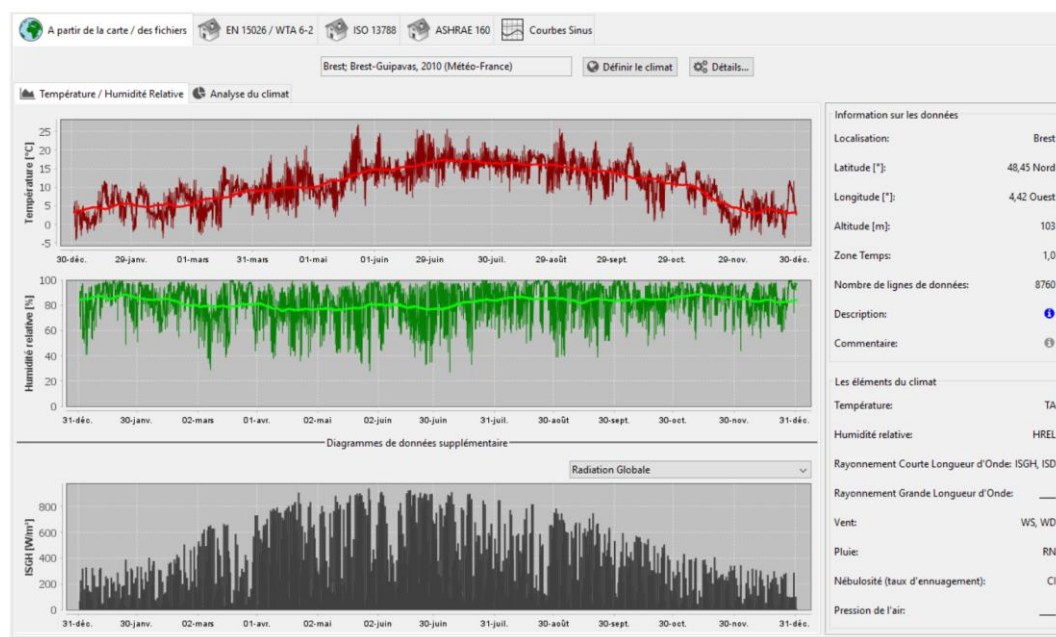


Figure 1 : graphiques en température, HR et rayonnement du climat extérieur simulé

Climat intérieur : WUFI EN15026 / WTA 6-2 humidité moyenne

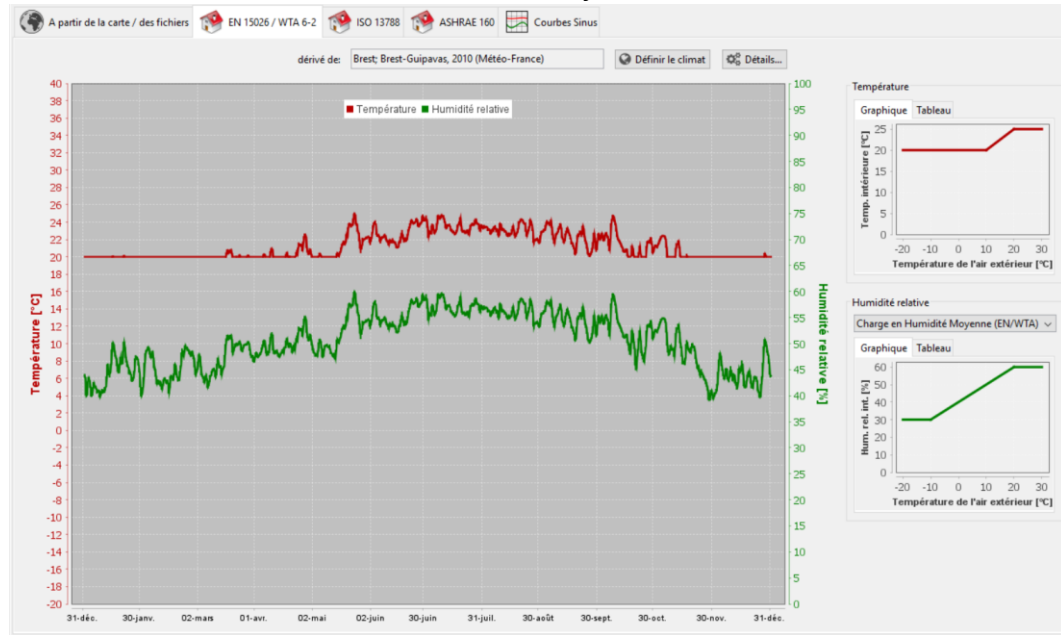


Figure 2 : graphique en température et HR du climat intérieur simulé

Résultats de simulation

Ci-dessous sont résumés les résultats de la simulation sur 5 ans sous Wufi 2D :

Teneur en eau

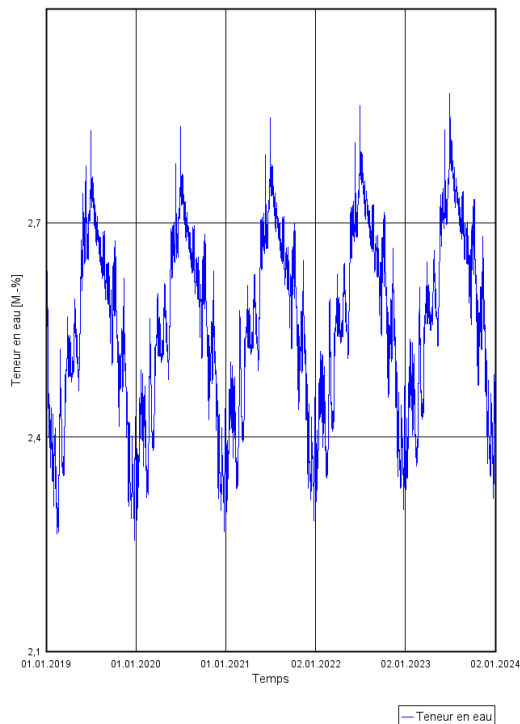


Figure 3 : Teneur en eau en masse du mur sur la période de simulation

Teneur en eau

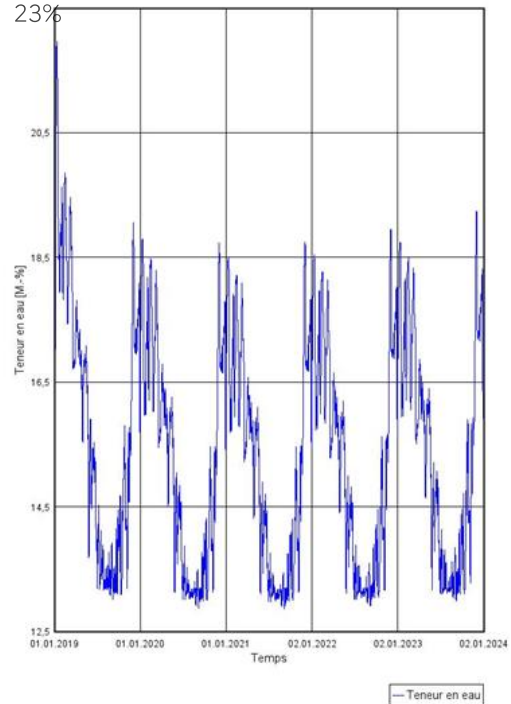


Figure 4 : Teneur en eau en masse à l'interface mur /isolant (« TH1 » en mesure in situ)

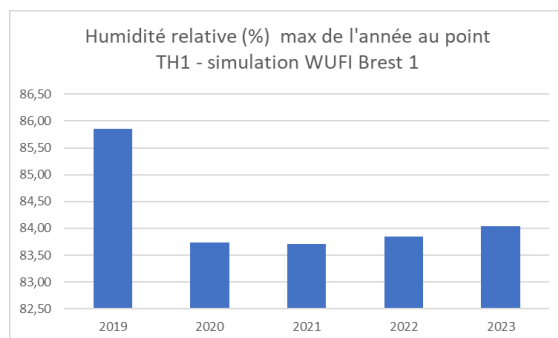


Figure 5 : Zoom sur l'humidité relative maximum calculée par année au point de contact mur/isolant (TH1)

Le critère 1 de SimHuBat n'est pas respecté : sur la Figure 3 on voit que la teneur en eau globale du mur ne se stabilise pas et augmente d'année en année.

Sur les figures 4 et 5 on observe que la teneur en eau au point critique interface mur /isolant, nommé TH1, reste sous la barre des 23 % (critère 3 respecté), mais après une phase de séchage initial, elle augmente progressivement de 18,7 % en janvier 2021 à 19,8 % en janvier 2024 (critère 1 non respecté en TH1).

Comparaison entre mesures et simulation

Le graphique suivant présente la comparaison entre les résultats du calcul WUFI sur 5 ans et la mesure réalisée sur 1 an, à l'interface entre le mur et l'isolant (TH1). Nous présentons les mesures de Brest 1 - Chambre mais aussi celles de Brest 2 - Chambre pour laquelle certains critères de SimHuBat ne sont pas respectés (renouvellement de l'air intérieur discontinu et faible, voir [§2.6.2](#)) :

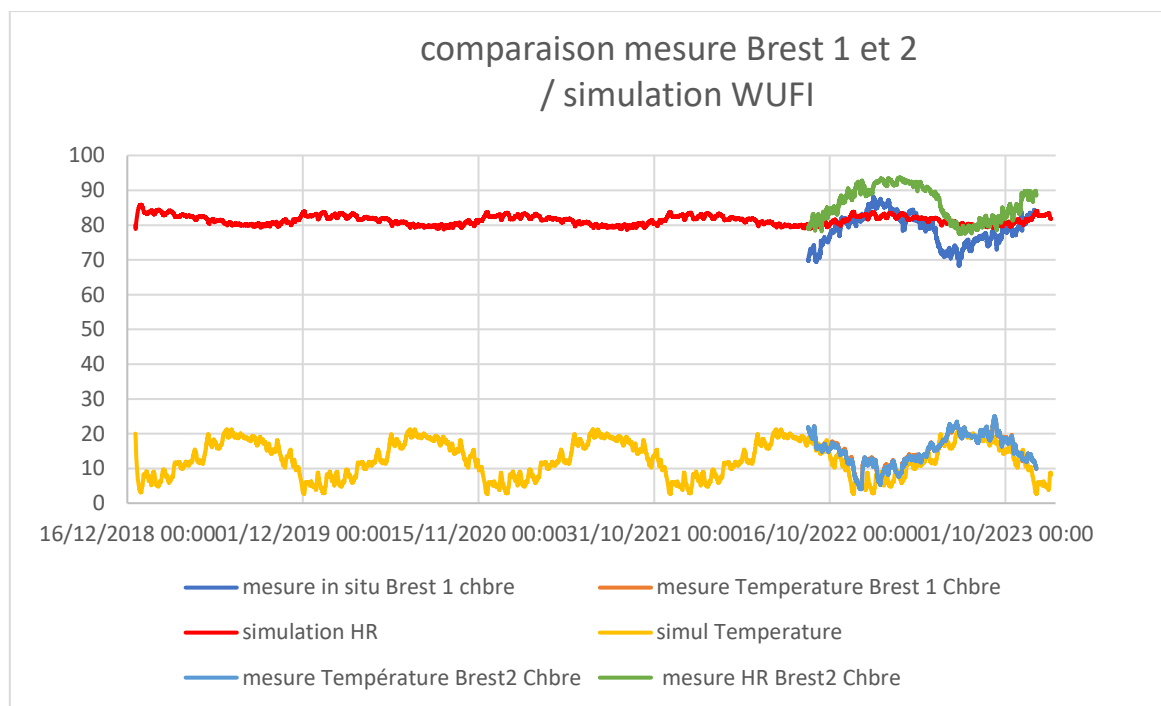


Figure 6 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative et de la température à l'interface mur/isolant nommée TH1 entre la simulation WUFI (5ans) et la mesure in situ (1 an) pour Brest 1 et 2

Si les températures calculées et mesurées sont relativement proches, on observe un écart important sur l'humidité relative en TH1.

Pour une meilleure visibilité, on zoome sur l'année de mesure (année 5 de la simulation) :

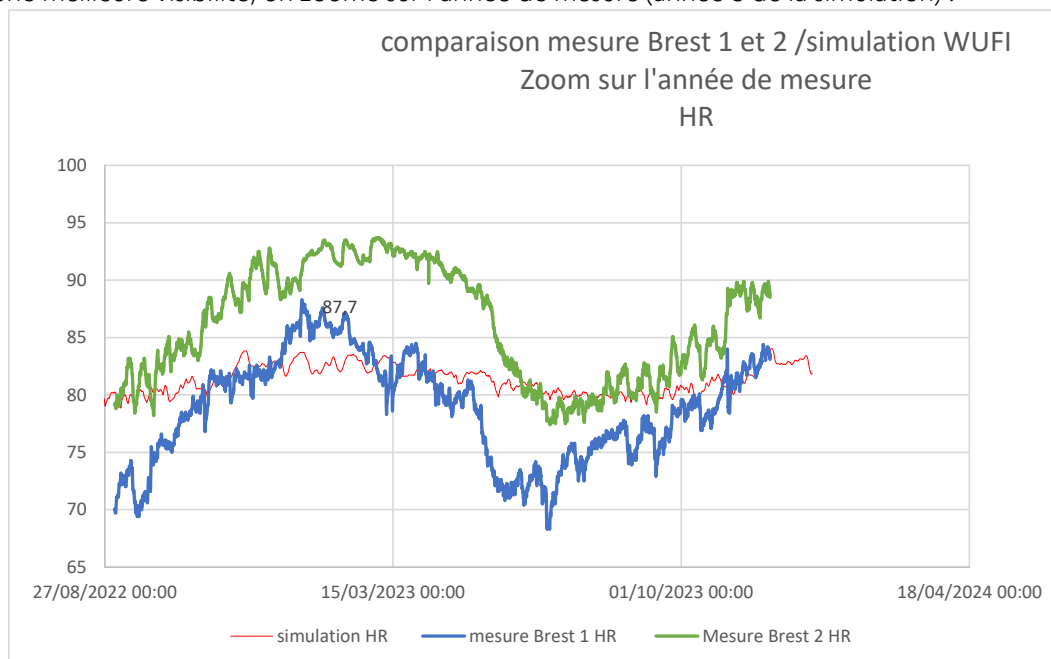


Figure 7 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative entre simulation et mesure in situ - zoom sur l'année de mesure

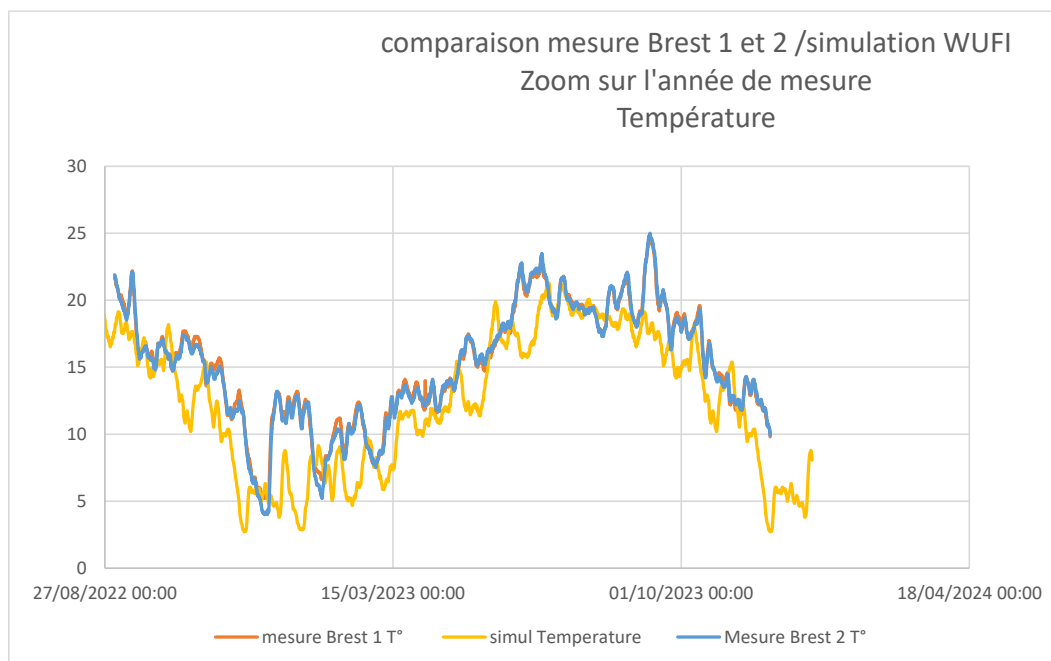


Figure 8 : comparaison de l'évolution de la température entre simulation et mesure in situ - zoom sur l'année de mesure

En prenant comme référence la cinquième année de simulation, afin de laisser s'établir les phénomènes, nous constatons que :

- Les températures simulées et mesurées sont assez proches
- L'humidité relative mesurée de Brest 1 :
 - o Présente une amplitude de variation plus importante ;
 - o Atteint des valeurs minimales de HR plus basses : de l'ordre de 69%, alors que les valeurs simulées ne descendent qu'aux alentours de 79% ;
 - o Atteint des valeurs plus hautes 87,7% au mois de janvier (période la plus froide) par rapport aux valeurs simulés (83%) ;
 - o Le seuil des 8 semaines où la teneur en eau est supérieure à 23% (soit HR supérieure à 86,6%, voir [§1.3](#)) est loin d'être atteint (critère 3).
- L'humidité relative mesurée de Brest 2 :
 - o Présente également une amplitude de variation plus importante ;
 - o Cependant l'HR est globalement plus élevée que la simulation. Le climat intérieur WTA humidité normale ne permet pas de retrouver les résultats mesurés sur le logement Brest 2.

Conclusion sur Brest 1 – Variante 1

Selon les critères de SimHuBat ce mur ne fonctionnerait pas très bien en simulation : il présente une (faible) augmentation de sa teneur en eau au fil des années (critère 1 pour le mur global).

D'autre part la teneur en eau en masse au point critique TH1 mur/isolant reste bien en-deçà de 23 % (critère 3) mais augmente progressivement au fil du temps dans la simulation.

La mesure in situ dans la Chambre de Brest 1 en TH1 (voir §2.5.2) présente des variations plus importantes que la simulation, et dépasse ponctuellement 23% d'humidité en masse. Toutefois le seuil des 8 semaines ou la teneur en eau est supérieure à 23% est loin d'être atteint.

La mesure en TH1 pour le Séjour-Cuisine de Brest 2 (voir §2.6.2) atteint aussi 23% en masse, mais pas assez longtemps pour ne pas respecter le critère 3. En revanche, dans la Chambre, TH1 dépasse 23% en masse pendant 28 semaines, le critère 3 n'est pas respecté.

Synthèse sur les critères de SimHuBat pour la simulation, et rappel des mesures en TH1 pour Brest 1 et Brest 2 :

Critères	Description	Simulation WUFI		Mesure in situ		
		Mur au global	TH1 : mur / isolant	Brest 1 Chambre - TH1	Brest 2 Séjour-cuisine TH1	Brest 2 Chambre - TH1
1	Teneur en eau stable ou diminue					
2	Pas de condensation (HR > 98%)					
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)			Atteinte mais 0 semaine complète	Atteinte 2 semaines complètes (18 jours)	Atteinte 28 semaines
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment			Max 88% HR	Max 89% HR	Max 94% HR
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait					

Nous constatons ainsi qu'avec nos hypothèses géométriques et les climats sélectionnés (intérieur WTA 6-2 humidité moyenne et extérieur climat de Brest de WUFI), la simulation arrive à la conclusion que le mur présente un risque pathologique sur le critère 1, ce que nous ne pouvons pas juger sur nos mesures in situ qui ne durent que 1 an.

Du point de vue d'un concepteur qui utilise WUFI, la présente simulation, avec un climat intérieur à humidité moyenne, devrait refléter a priori la mesure de Brest 1, qui dispose d'une VMC fonctionnelle (nous verrons au §3.2.3 que c'est plus compliqué, en raison de la faible température intérieure).

En comparant la simulation et Brest 1, nous considérons que la simulation WUFI est ici pessimiste, au sens où elle alerte sur un risque de pathologie alors que la mesure effectuée n'en montre pas.

Ces conclusions nous invitent à investiguer sur le climat intérieur. C'est pourquoi nous allons par la suite varier et comparer les climats intérieurs accessibles dans WUFI.

3.2.2 Variante 2 – Climat ext. WUFI / int. mesuré Brest 1

Paramètres

Climat extérieur : Météo WUFI de Brest : Brest -Guipava, 2010 d'après Météofrance

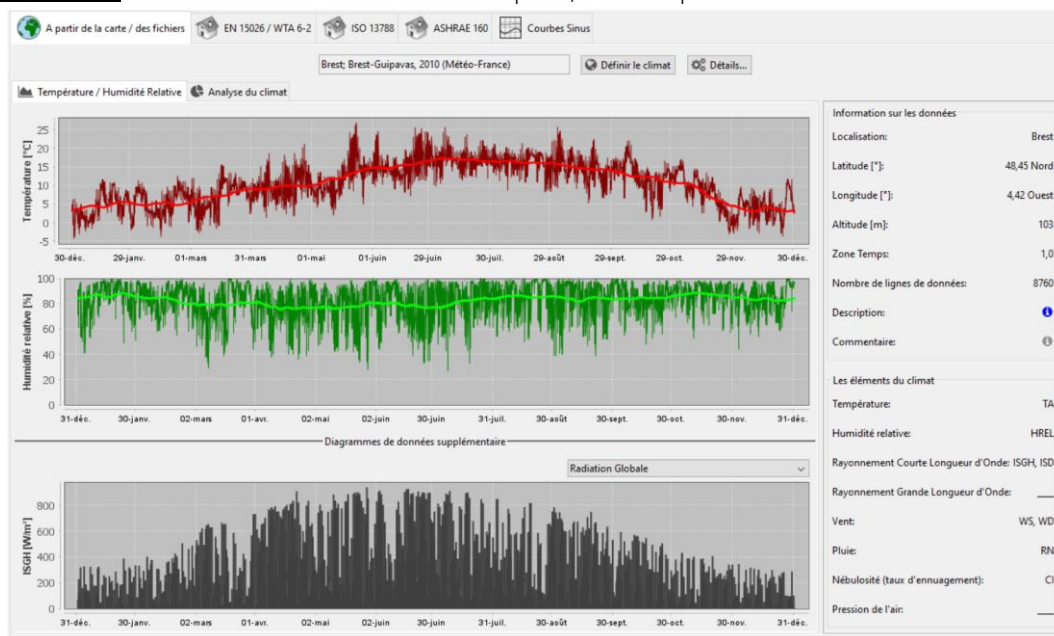


Figure 9 : graphiques en température, HR et rayonnement du climat extérieur simulé

Climat intérieur : mesures in situ du climat intérieur mesuré du 15/09/ 2022 au 16/09/2023 dans la chambre du logement Brest 1, converties au format .WAC

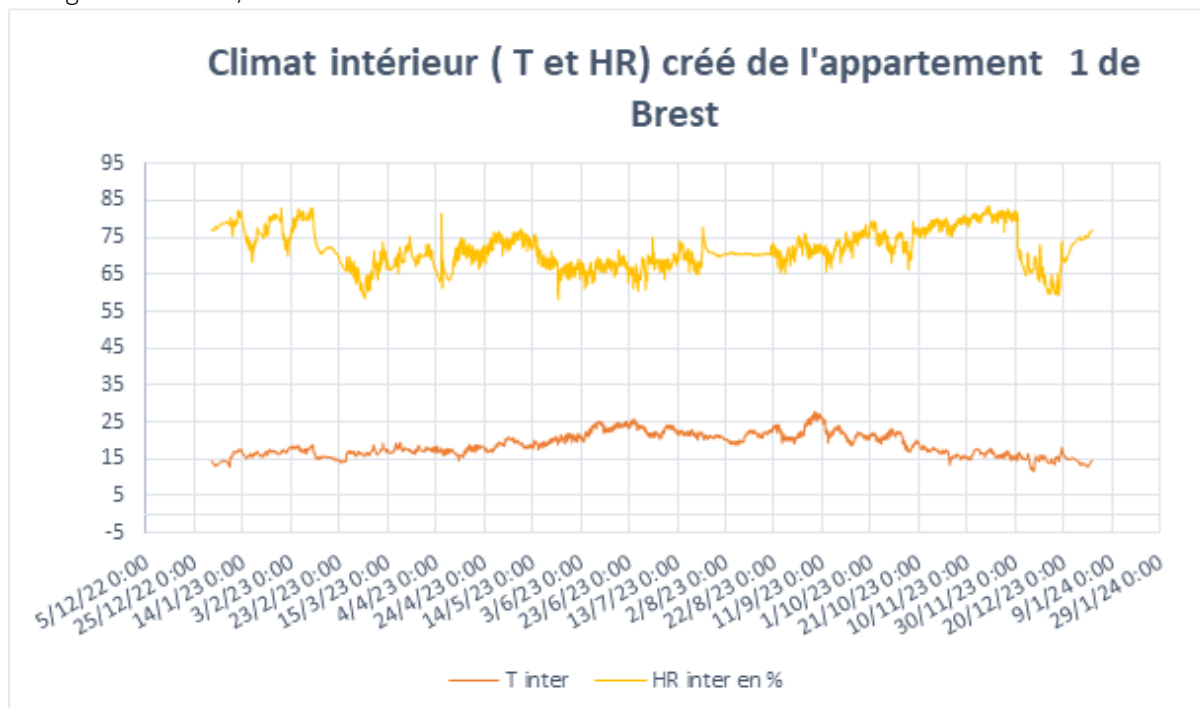


Figure 10 : graphe du climat intérieur de l'appartement 1 de Brest, servant à la création du climat intérieur au format .WAC

A noter que le pour le fichier .WAC, le fichier doit commencer au 1^{er} janvier, les données du 01/01/2022 au 15/09/2022 sont celles de 2023. Nous avons construit un fichier WAC d'une année (8760 lignes) avec les données mesurées disponibles.

Comparaison avec le climat intérieur WTA 6-2 humidité moyenne

Le climat WTA 6-2 ne peut pas être directement importé de la base WUFI.

Pour contourner cette contrainte, nous avons réalisé une simulation et extrait les résultats. Pour approximer le climat intérieur on analyse une zone dans la fibre de bois de 5cm qui est au plus près de l'intérieur (cf. schéma ci-dessous), ici zone de 5mm * 78mm de haut :

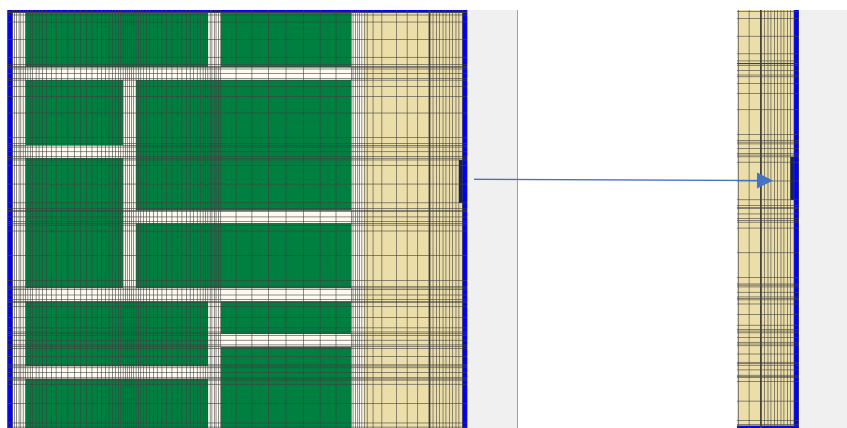


Figure 11 : géométrie du mur et zone en noir au plus proche de l'ambiance intérieure

La donnée ainsi extraite est comparée à la mesure dans le graphique suivant :

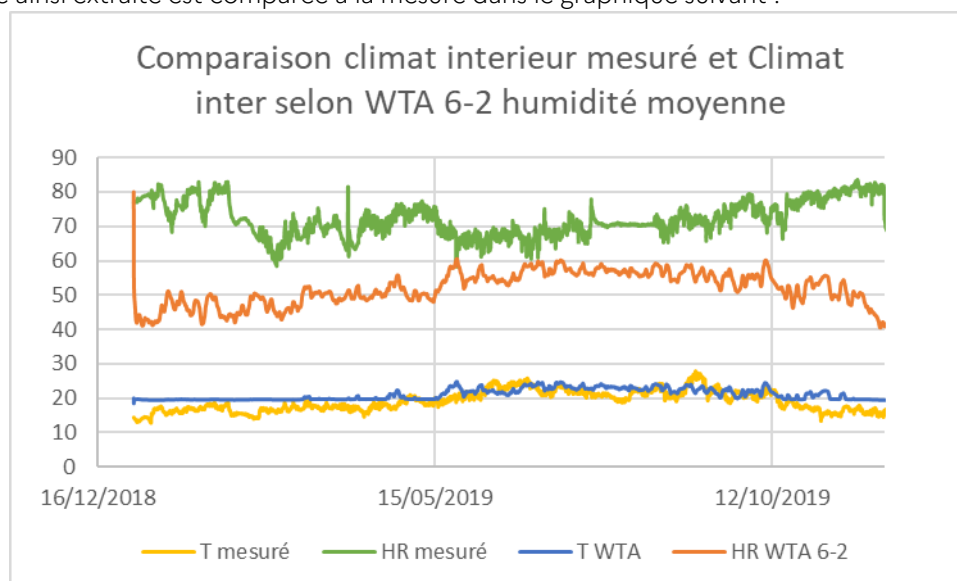


Figure 12 : comparaison T et HR entre climat mesuré intérieur de la Chambre de Brest 1 et le climat WTA 6-2 humidité moyenne

On constate que **le climat mesuré comporte une humidité relative bien plus élevée** que le climat WTA 6-2 humidité moyenne. C'est pourquoi la variante suivante mettra en œuvre un climat WTA 6-2 avec humidité relative élevée afin de se rapprocher du climat mesuré en intérieur.

Résultats de simulation

Ci-dessous sont résumés les résultats de la simulation sur 5 ans sous Wufi 2D :

Teneur en eau totale

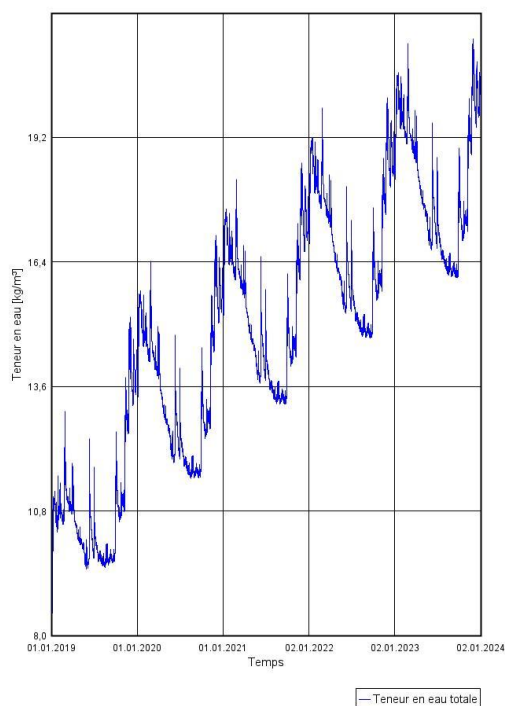


Figure 13 : Teneur en eau en masse du mur sur la période de simulation

Teneur en eau

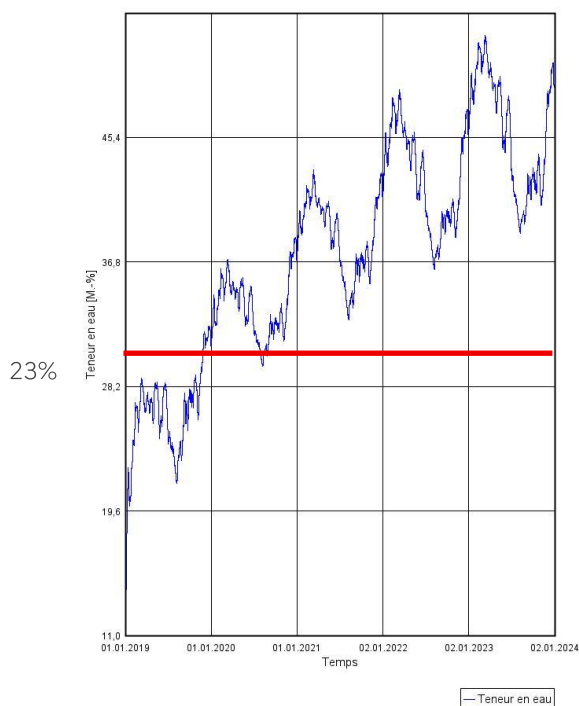


Figure 14 : Teneur en eau en masse à l'interface mur /isolant (« TH1 » en mesure in situ)

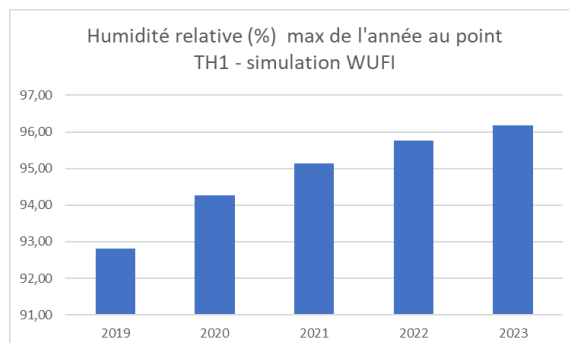


Figure 15 : Zoom sur l'humidité relative maximum calculée par année au point de contact mur/isolant (TH1)

Le critère 1 de SimHuBat n'est pas respecté : comme on le voit sur la figure 13, la teneur en eau globale du mur augmente fortement d'année en année.

De même la teneur en eau au point critique interface mur /isolant, nommé TH1, augmente fortement d'année en année et dès la deuxième année dépasse les 23 % quasiment toute l'année (figure 14 et 15). **Le critère 3 de SimHuBat n'est donc pas respecté en TH1.**

Enfin la teneur en eau de 30% en masse est dépassée dès l'année 2 de simulation au point TH1. **Le critère 4 de SimHuBat n'est pas respecté non plus en TH1.**

Comparaison entre mesure et simulation

Le graphique suivant présente la comparaison entre les résultats du calcul WUFI sur 5 ans et la mesure réalisée sur 1 an, à l'interface entre le mur et l'isolant (TH1).

On ne compare ici qu'avec les mesures de Brest 1, car le climat intérieur est celui de Brest 1.

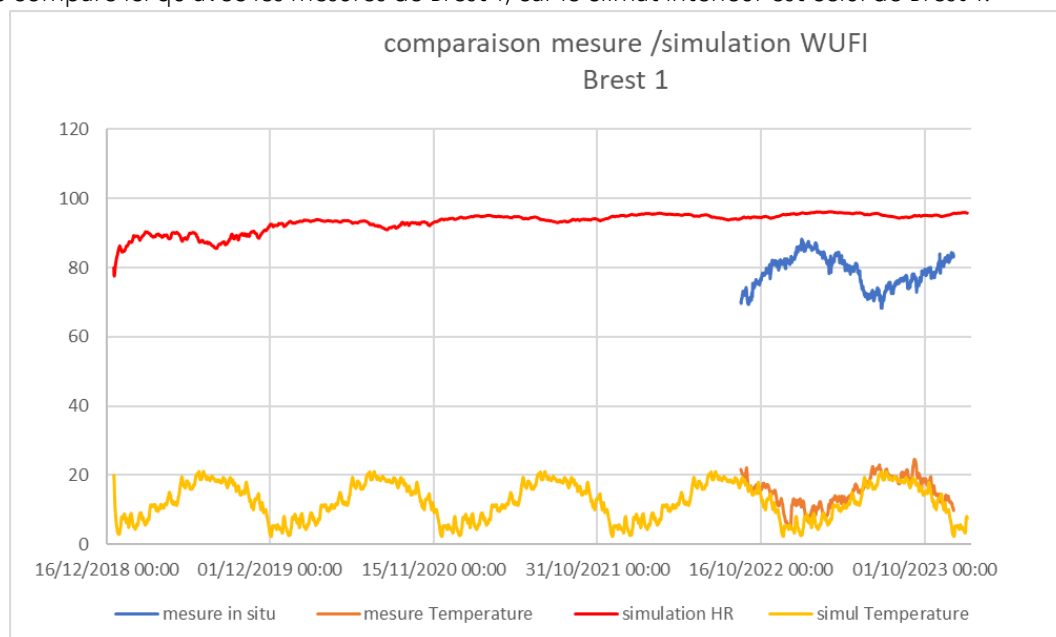


Figure 16 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative et de la température à l'interface mur/isolant nommée TH1 entre la simulation WUFI (5ans) et la mesure in situ (1 an)

Pour une meilleure visibilité, on zoome sur l'année de mesure (année 5 de la simulation) :

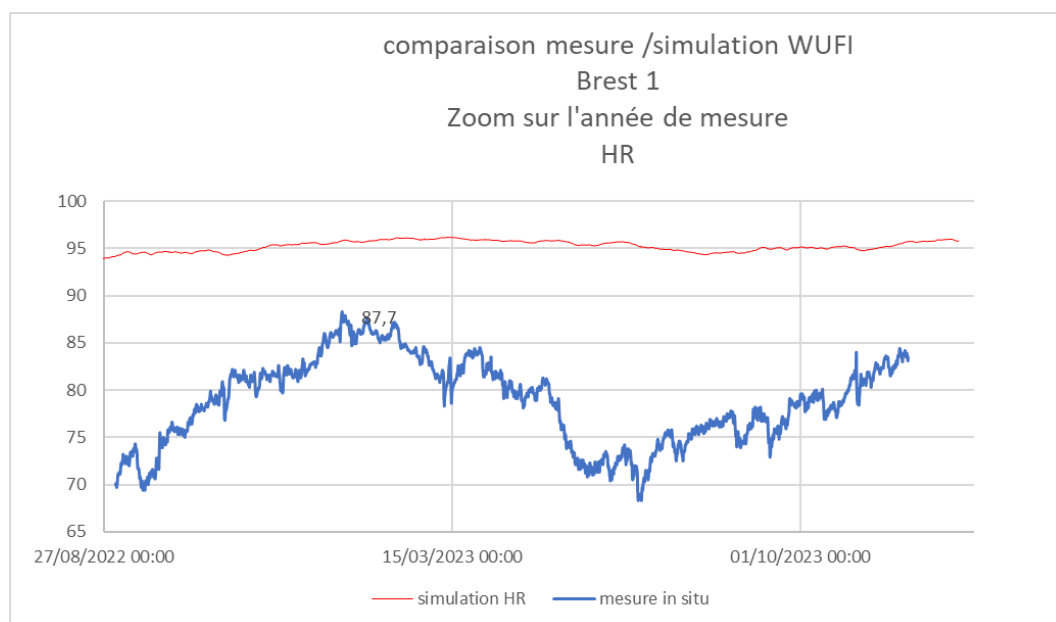


Figure 17 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative entre simulation et mesure in situ - zoom sur l'année de mesure

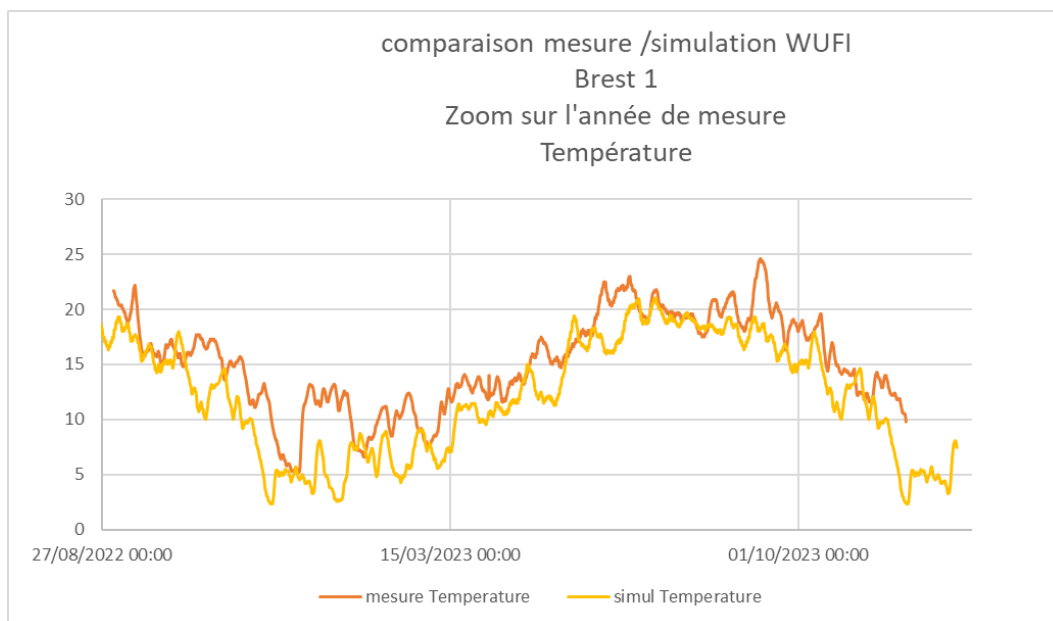


Figure 18 : comparaison de l'évolution de la température entre simulation et mesure in situ - zoom sur l'année de mesure

En prenant comme référence la cinquième année de simulation, afin de laisser s'établir les phénomènes, nous constatons au point TH1 que :

- Les températures simulées et mesurées sont assez proches ;
- L'humidité relative simulée :
 - o n'a quasiment pas de variation durant l'année, elle reste entre 94 et 96% ;
 - o est très élevée en comparaison de l'humidité relative mesurée qui est au maximum à 87,7% ;
 - o le seuil où la teneur en eau est supérieure à 23% (soit HR supérieure à 86,6%) est totalement dépassé, y compris la teneur en eau à 30 % (soit HR supérieure à 91%) dès le 25 novembre de la première année de simulation.

Conclusion sur Brest 1 – Variante 2

Selon les critères retenus ce mur ne fonctionnerait pas du tout en simulation : il présente une augmentation forte de sa teneur en eau au fil des années. D'autre part la teneur en eau en masse au point critique TH1 mur/isolant dépasse 23 % en continu sur l'année, et passe même au-dessus de 30 % dès la fin de la première année

Synthèse sur les critères de SimHuBat pour la simulation, et rappel des mesures en TH1 pour Brest 1 et Brest 2 :

Critères	Description	Simulation WUFI		Mesure in situ		
		Mur au global	TH1 : mur / isolant	Brest 1 Chambre - TH1	Brest 2 Séjour-cuisine TH1	Brest 2 Chambre - TH1
1	Teneur en eau stable ou diminue					
2	Pas de condensation (HR > 98%)					
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)			Atteinte mais 0 semaine complète	Atteinte 2 semaines complètes (18 jours)	Atteinte 28 semaines
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment			Max 88% HR	Max 89% HR	Max 94% HR
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait					

Nous constatons ainsi qu'avec nos hypothèses géométriques et les climats sélectionnés (intérieur mesuré et extérieur climat de Brest de WUFI), la simulation arrive à la conclusion que le mur présente un risque pathologique sur les critères 1, 3 et 4.

La simulation est donc plus pessimiste que la mesure in situ de Brest 1.
En revanche elle reflète le risque pathologique de l'un des murs de Brest 2.

3.2.3 Variante 3 – Climat ext. WUFI / int. WTA 6-2 humidité élevée

Paramètres

Climat extérieur : Météo WUFI de Brest : Brest -Guipava, 2010 d'après Météo-France

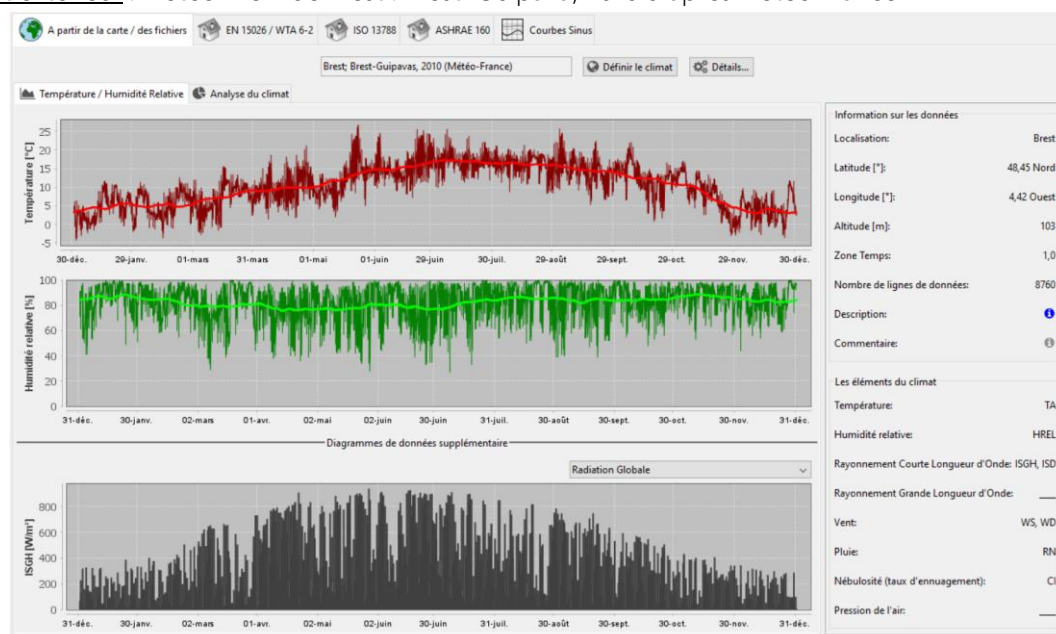


Figure 19 : graphiques en température, HR et rayonnement du climat extérieur simulé

Climat intérieur : WUFI EN15026 / WTA 6-2 humidité élevée

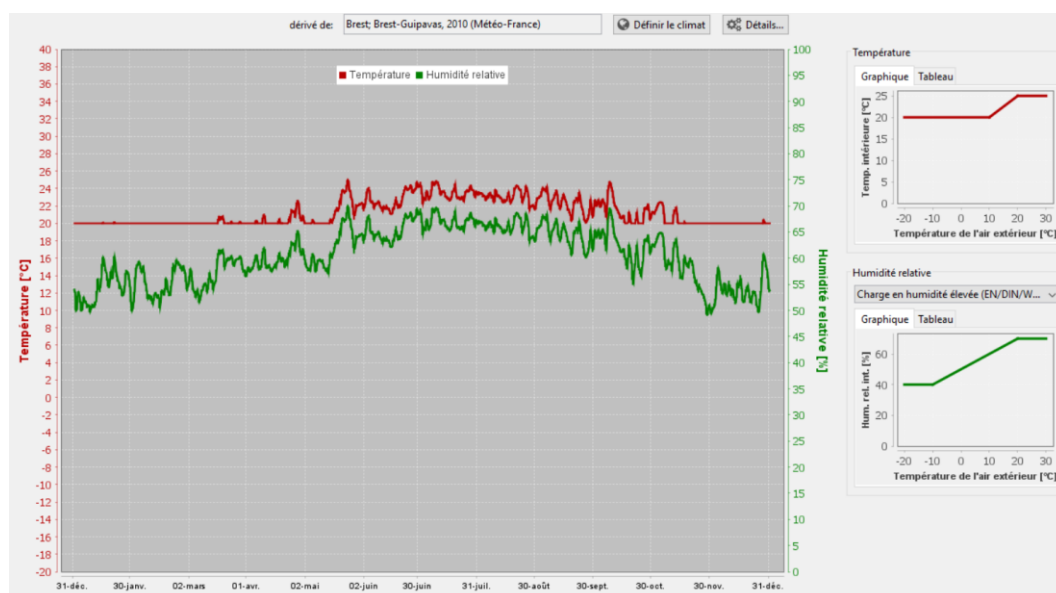
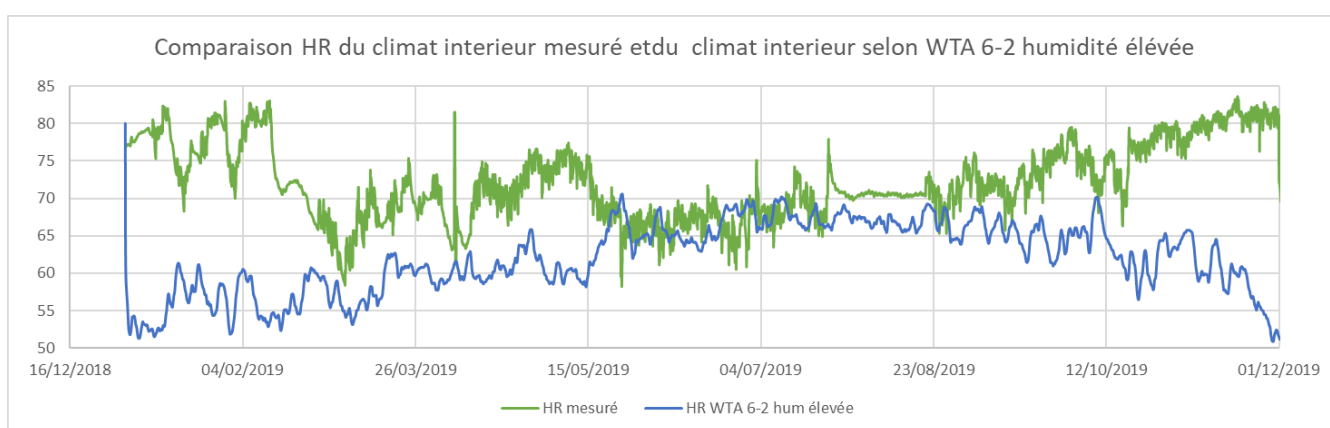
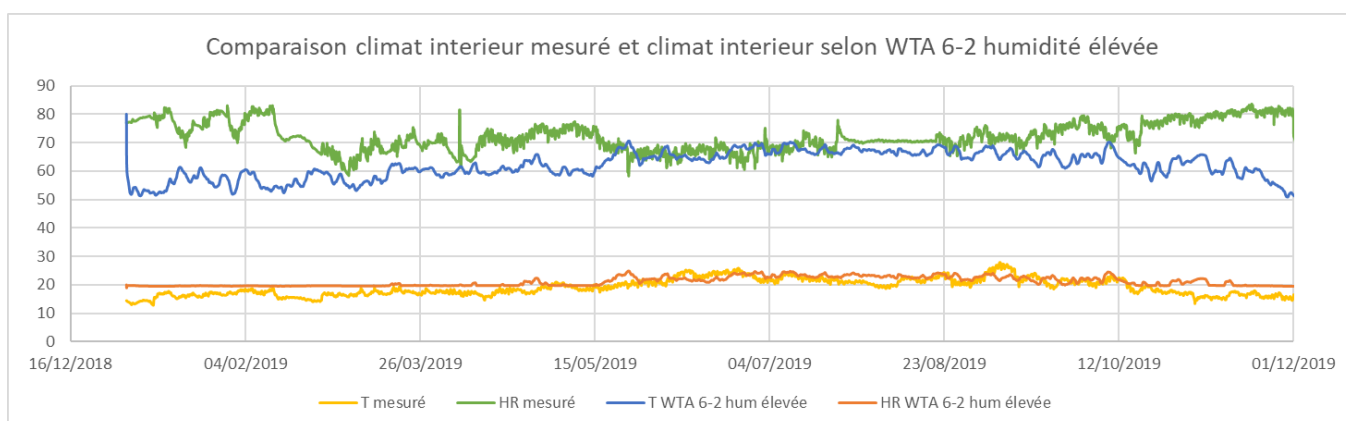


Figure 20 : graphique en température et HR du climat intérieur simulé

Comparaison avec le climat intérieur mesuré de Brest 1 :



On constate que le climat mesuré comporte une humidité relative bien plus élevée que le climat WTA 6-2 humidité élevée sur les périodes de janvier à mai et de septembre à décembre, et se rapproche du climat WTA 6-2 humidité élevée de mi-mai à fin août.

Le climat intérieur de Brest 1 présente donc une humidité relative élevée, malgré la présence d'une VMC fonctionnelle. **La raison en est la température intérieure mesurée qui est inférieure à 19° sur une bonne partie de l'hiver.** A charge hydrique équivalente en humidité absolue, la température plus basse conduit à une humidité relative plus élevée.

Résultats de simulation

Ci-dessous sont résumés les résultats de la simulation sur 5 ans sous Wufi 2D :

Teneur en eau totale

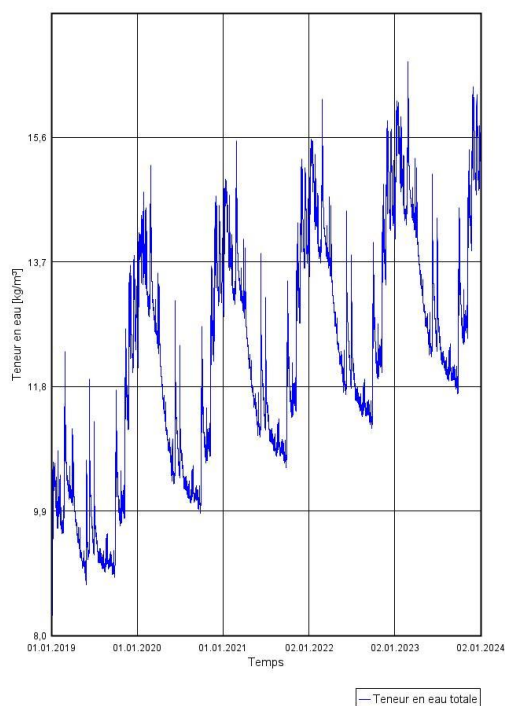


Figure 23 : Teneur en eau en masse du mur sur la période de simulation

Teneur en eau

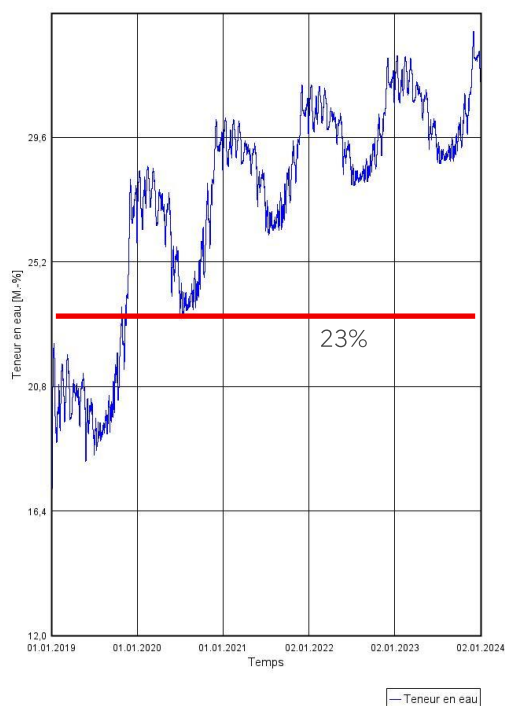


Figure 24 : Teneur en eau en masse à l'interface mur /isolant (« TH1 » en mesure in situ)

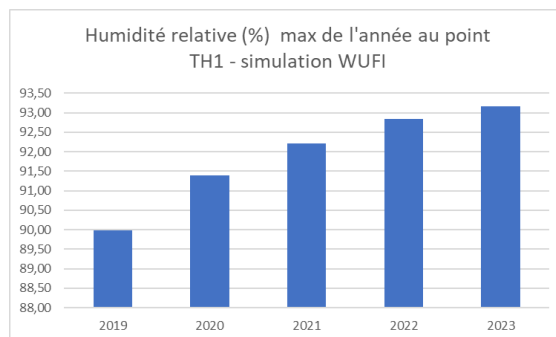


Figure 25 : Zoom sur l'humidité relative maximum calculée par année au point de contact mur/isolant (TH1)

Le critère 1 de SimHuBat n'est pas respecté : comme on le voit sur la figure 23, la teneur en eau globale du mur augmente fortement d'année en année.

De même la teneur en eau au point critique interface mur /isolant, nommé TH1, augmente fortement d'année en année et dès la première année dépasse les 23 % quasiment toute l'année (figure 24 et 25). **Le critère 3 de SimHuBat n'est donc pas respecté en TH1.**

Enfin la teneur en eau de 30% en masse est dépassée dès l'année 3 de simulation au point TH1. **Le critère 4 de SimHuBat n'est pas respecté non plus en TH1.**

Comparaison entre mesure et simulation

Le graphique suivant présente la comparaison entre les résultats du calcul WUFI sur 5 ans et la mesure réalisée sur 1 an, à l'interface entre le mur et l'isolant (TH1), pour Brest 1 et Brest 2 :

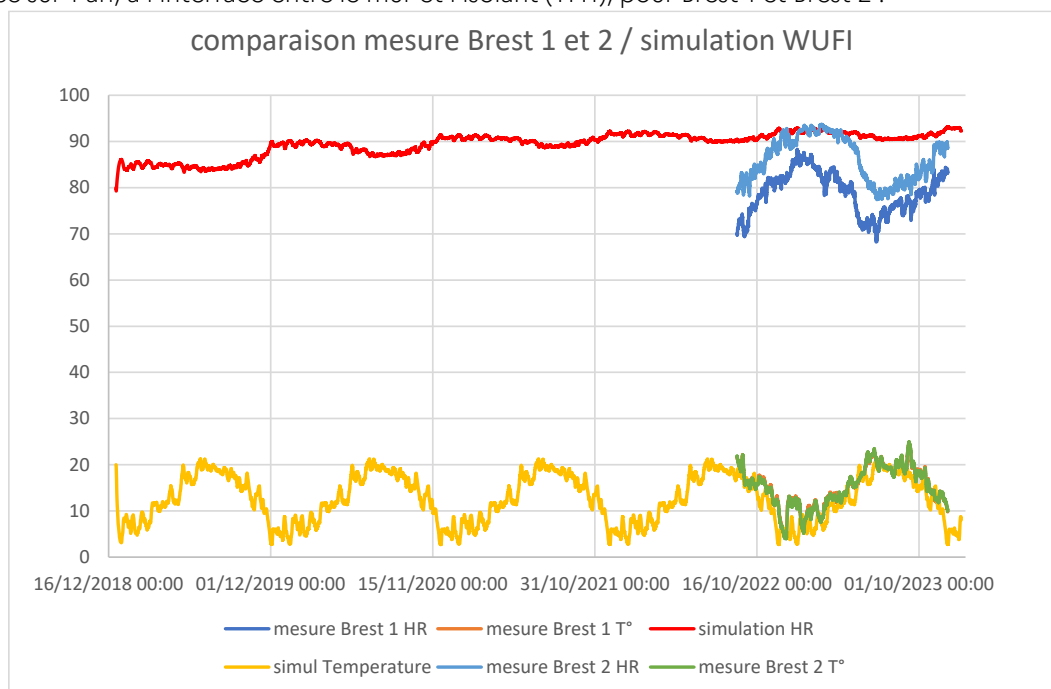


Figure 26 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative et de la température à l'interface mur/isolant nommée TH1 entre la simulation WUFI (5ans) et la mesure in situ (1 an)

Pour une meilleure visibilité, on zoome sur l'année de mesure (année 5 de la simulation) :

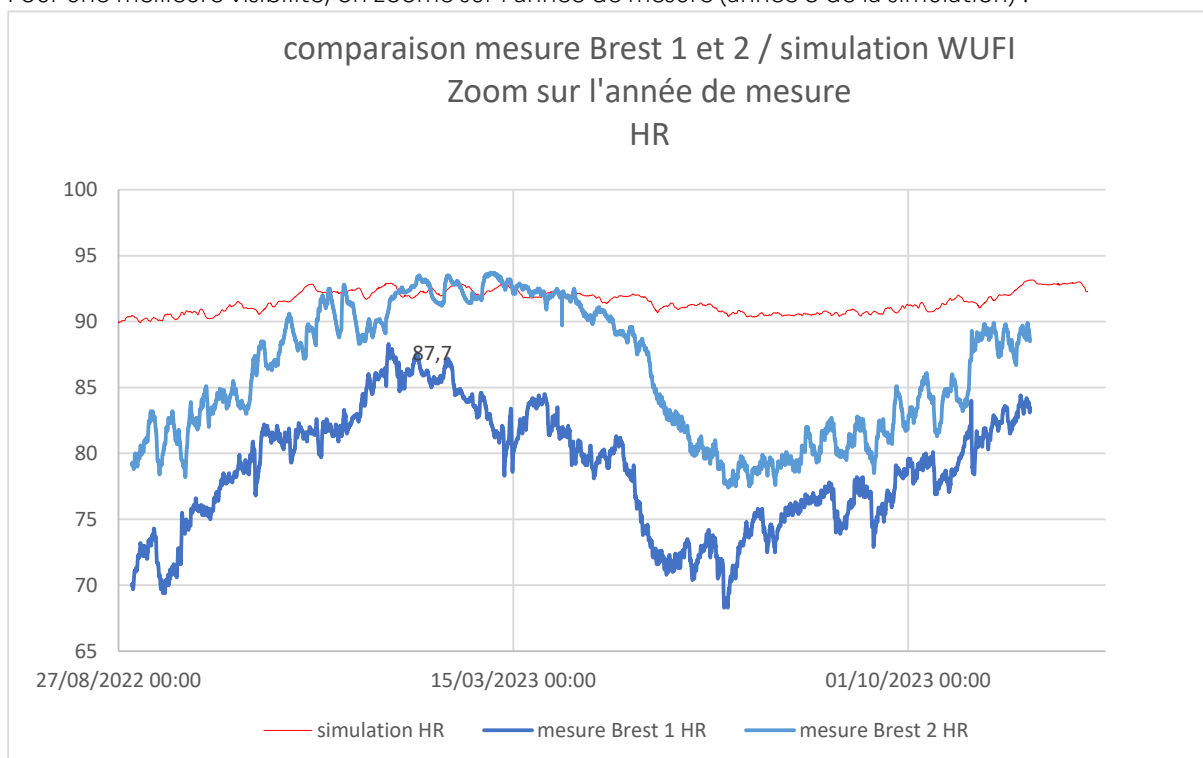


Figure 27 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative entre simulation et mesure in situ - zoom sur l'année de mesure.

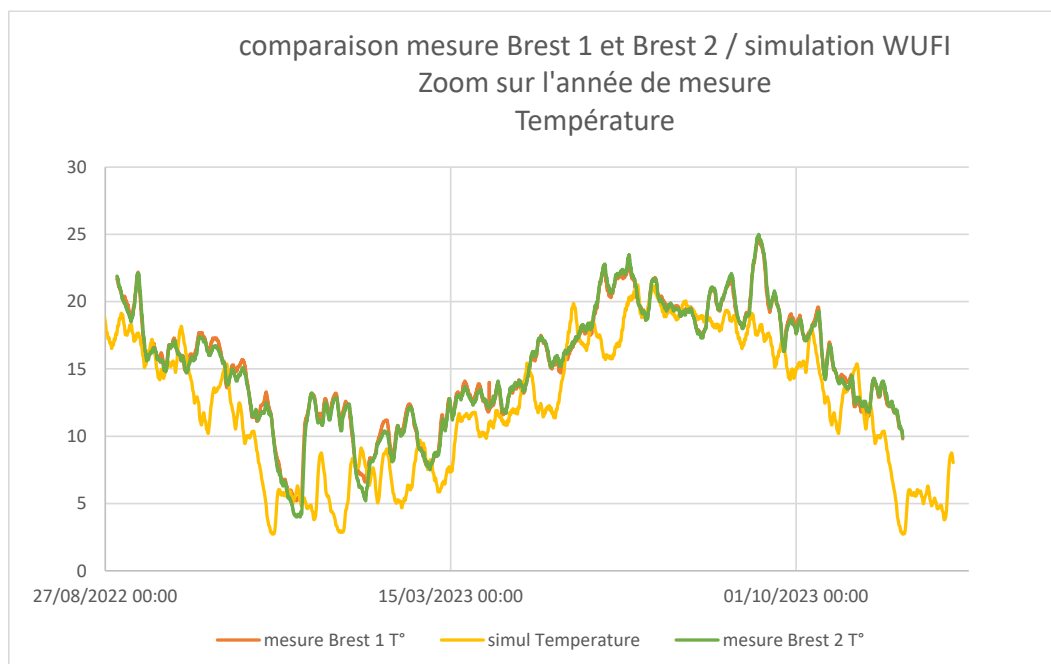


Figure 28 : comparaison de l'évolution de la température entre simulation et mesure in situ - zoom sur l'année de mesure

En prenant comme référence la cinquième année de simulation, afin de laisser s'établir les phénomènes, nous constatons au point TH1 que :

- Les températures simulées et mesurées sont assez proches ;
- L'humidité relative simulée :
 - o n'a quasiment pas de variation durant l'année, elle reste entre 90 et 94% ;
 - o est très élevée en comparaison de l'humidité relative mesurée pour Brest 1 qui est au maximum à 87,7% ;
 - o est plus élevée que l'humidité relative mesurée pour Brest 2 une partie de l'année, mais le maximum atteint est similaire (93,7% pour la mesure) ;
 - o le seuil où la teneur en eau est supérieure à 23% (soit HR supérieure à 86,6%) est totalement dépassé, dès le 15 novembre de la première année de simulation et restera au-dessus de 23% jusqu'à la fin de simulation. Quant au seuil des 30% de teneur en eau il sera atteint dès le début de la 3^e année de simulation.

Conclusion sur Brest 1 – Variante 3

Selon les critères retenus ce mur ne fonctionnerait pas du tout en simulation : il présente une augmentation forte de sa teneur en eau au fil des années. D'autre part la teneur en eau en masse au point critique TH1 mur/isolant atteint plus de 23 % en continu sur l'année, et même plus de 30 % dès la troisième année

Synthèse sur les critères de SimHuBat pour la simulation, et rappel des mesures en TH1 pour Brest 1 et Brest 2 :

Critères	Description	Simulation WUFI		Mesure in situ		
		Mur au global	TH1 : mur / isolant	Brest 1 Chambre - TH1	Brest 2 Séjour-cuisine TH1	Brest 2 Chambre - TH1
1	Teneur en eau stable ou diminue					
2	Pas de condensation (HR > 98%)					
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)			Atteinte mais 0 semaine complète	Atteinte 2 semaines complètes (18 jours)	Atteinte 28 semaines
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment			Max 88% HR	Max 89% HR	Max 94% HR
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait					

Nous constatons ainsi qu'avec nos hypothèses géométriques et les climats sélectionnés (intérieur selon WTA 6-2 humidité élevée et extérieur climat de Brest de WUFI), la simulation arrive à la conclusion que le mur présente un risque pathologique sur les critères 1, 3 et 4.

La simulation est donc plus pessimiste que la mesure in situ de Brest 1.
En revanche elle reflète le risque pathologique de l'un des murs de Brest 2.

3.2.4 Variante 4 – Climat ext. WUFI / int. ISO 13788 classe 4

Paramètres

Climat extérieur : Météo WUFI de Brest : Brest -Guipava, 2010 d'après Météo-France

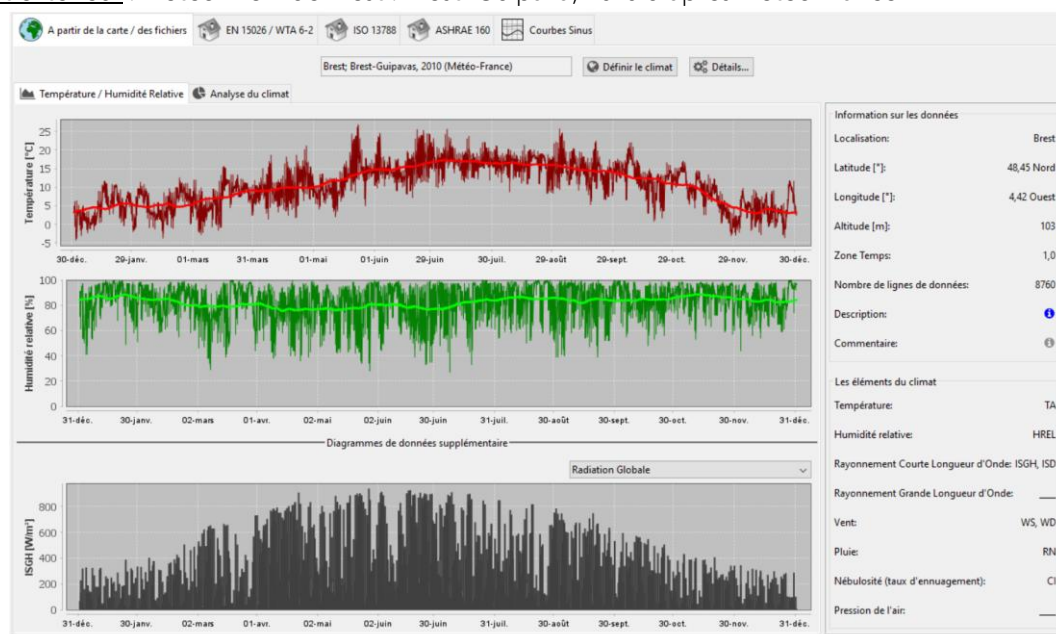


Figure 29 : graphiques en température, HR et rayonnement du climat extérieur simulé

Climat intérieur : WUFI ISO 13788 classe 4

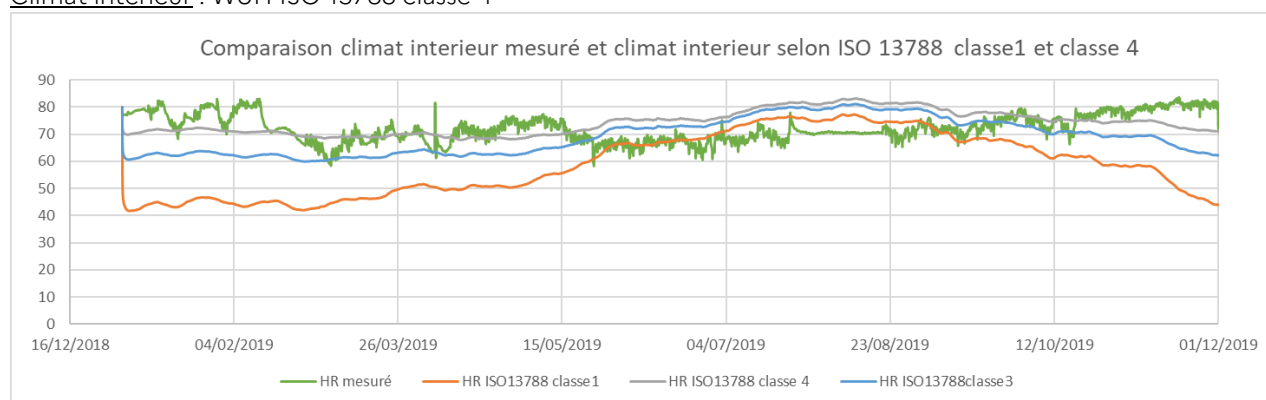


Figure 30 : Comparaison HR entre climat mesuré intérieur de Brest 1 et les climats selon ISO 13788 pour une classe d'humidité 1, 3 ou 4

On constate sur la figure 30 que :

- le climat selon l'ISO 13788 classe 4 est le plus approchant du climat intérieur mesuré de Brest 1 pour les périodes hivernales de mi-septembre à mi-mai ;
- le climat selon l'ISO 13788 classe 1 est le plus approchant du climat intérieur mesuré la période estivale allant de mi-mai à mi-septembre.

Nous testons ce climat intérieur l'ISO 13788 classe 4 car il se rapproche au niveau de son humidité relative de celle mesurée in situ sur une grande partie de l'année (printemps, automne, hiver).

A noter que dans la norme NF EN ISO 13788 , la classe 4 d'hygrométrie est celle attribuée aux gymnases et cuisines et cantines .

Résultats de simulation

Ci-dessous sont résumés les résultats de la simulation sur 5 ans sous Wufi 2D :

Teneur en eau totale

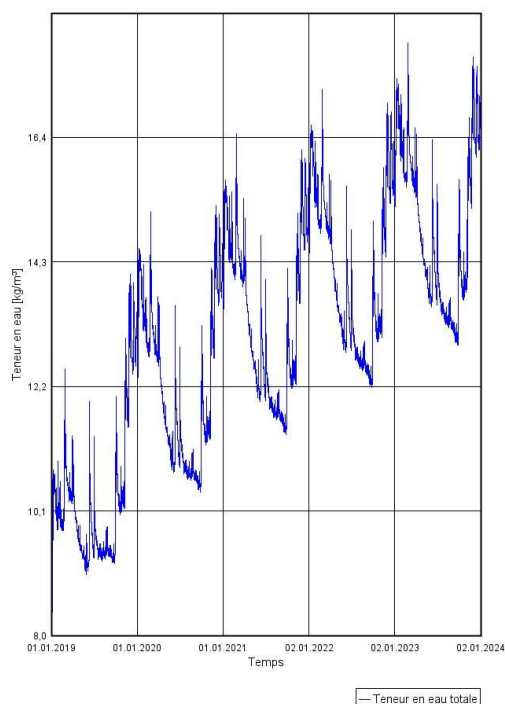


Figure 31 : Teneur en eau en masse du mur sur la période de simulation

Teneur en eau

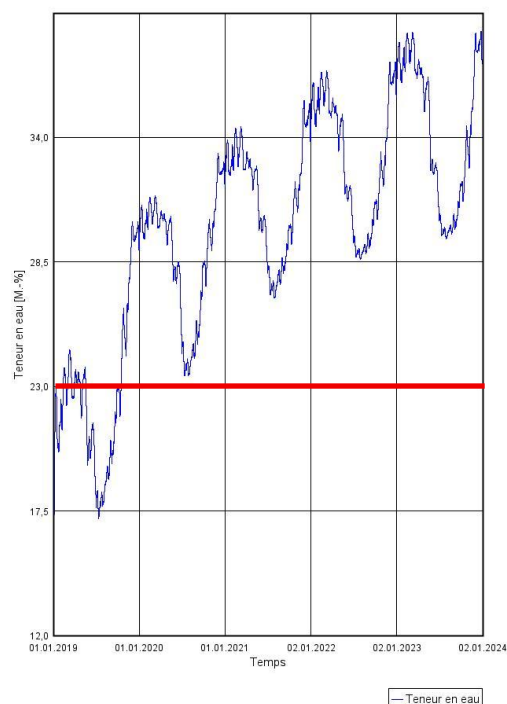


Figure 32 : Teneur en eau en masse à l'interface mur /isolant (« TH1 » en mesure in situ)

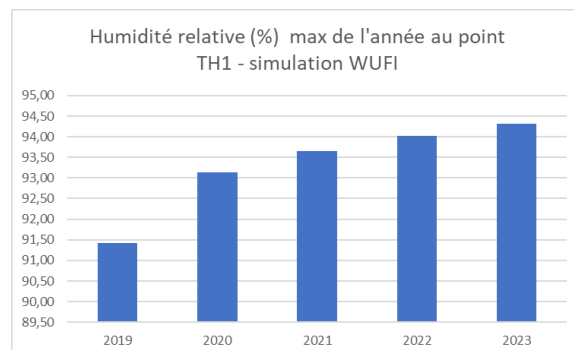


Figure 33 : Zoom sur l'humidité relative maximum calculée par année au point de contact mur/isolant (TH1)

Le critère 1 de SimHuBat n'est pas respecté : comme on le voit sur la figure 31, la teneur en eau globale du mur augmente fortement d'année en année.

De même la teneur en eau au point critique interface mur /isolant, nommé TH1, augmente fortement d'année en année et dès la première année dépasse les 23 % dès début mars de la 1^{ère} année (figures 32 et 33). **Le critère 3 de SimHuBat n'est donc pas respecté en TH1.**

Enfin la teneur en eau de 30% en masse est dépassée dès la fin de l'année 2 de simulation au point TH1. **Le critère 4 de SimHuBat n'est pas respecté non plus en TH1.**

Comparaison entre mesure et simulation

Le graphique suivant présente la comparaison entre les résultats du calcul WUFI sur 5 ans et la mesure réalisée sur 1 an, à l'interface entre le mur et l'isolant (TH1), pour Brest 1 et Brest 2 :

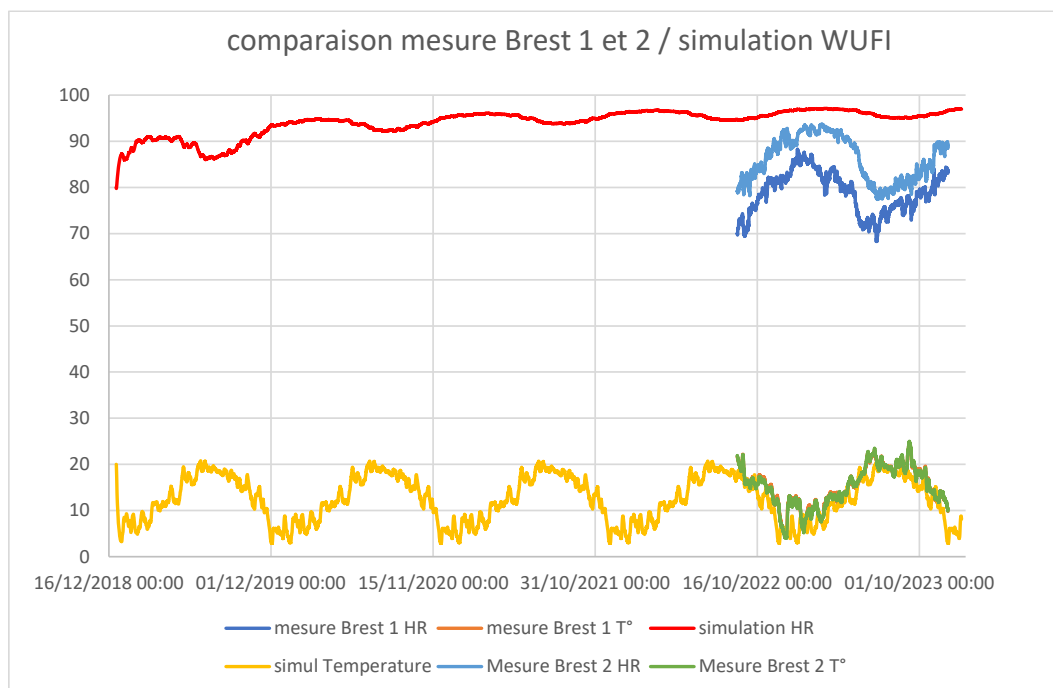


Figure 34 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative et de la température à l'interface mur/isolant nommée TH1 entre la simulation WUFI (5ans) et la mesure in situ (1 an)

Pour une meilleure visibilité, on zoome sur l'année de mesure (année 5 de la simulation) :

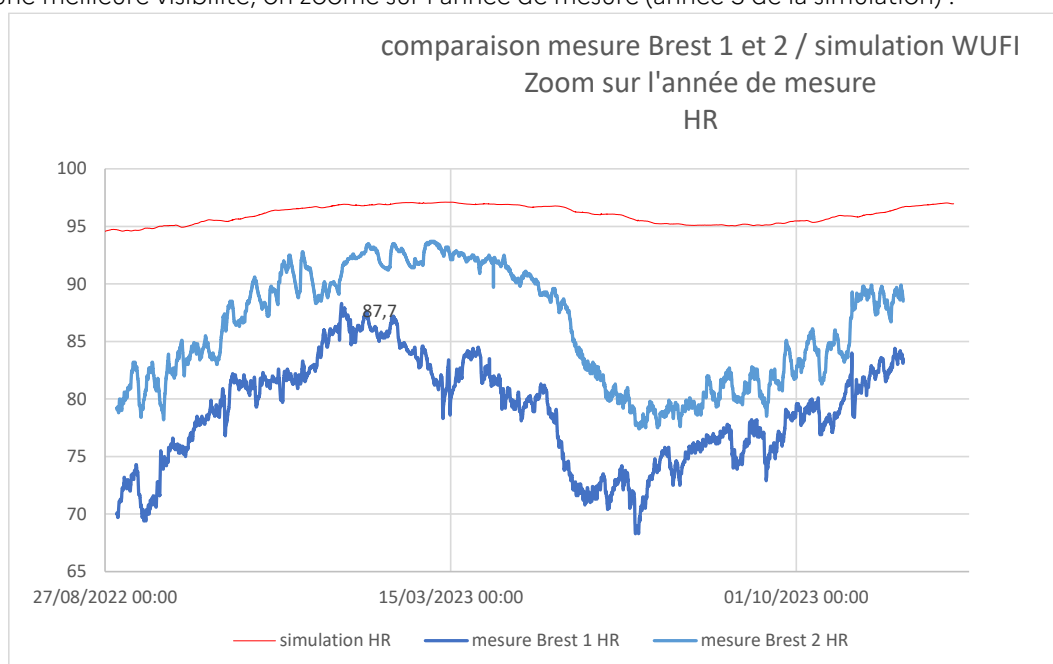


Figure 35 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative entre simulation et mesure in situ/ zoom sur l'année de mesure

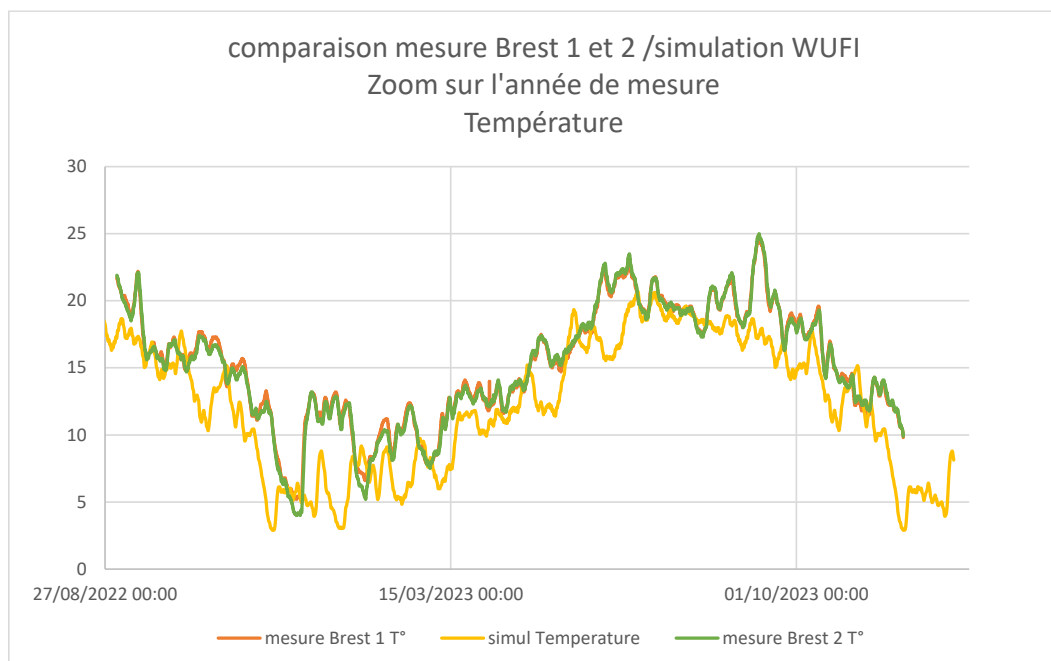


Figure 36 : comparaison de l'évolution de la température entre simulation et mesure in situ / zoom sur l'année de mesure

En prenant comme référence la cinquième année de simulation, afin de laisser s'établir les phénomènes, nous constatons au point TH1 que :

- Les températures simulées et mesurées sont assez proches ;
- L'humidité relative simulée :
 - o n'a quasiment pas de variation durant l'année, elle reste entre 95 et 97% ;
 - o est très élevée en comparaison de l'humidité relative mesurée pour Brest 1 qui est au maximum à 87,7% ;
 - o est plus élevée que l'humidité relative mesurée pour Brest 2 qui est au maximum à 93,7% ;
 - o le seuil où la teneur en eau est supérieure à 23% (soit HR supérieure à 86,6%) est totalement dépassé, dès le 15 novembre de la première année de simulation et restera au-dessus de 23% jusqu'à la fin de simulation. Quant au seuil des 30% de teneur en eau, il sera atteint dès le début de la 3^e année de simulation.

Conclusion sur Brest 1 – Variante 4

Selon les critères retenus ce mur ne fonctionnerait pas du tout en simulation : il présente une augmentation forte de sa teneur en eau au fil des années. D'autre part la teneur en eau en masse au point critique TH1 mur/isolant dépasse 23 % dès la deuxième année de simulation, et passe même au-dessus de 30 % dès la fin de la première année de simulation.

Synthèse sur les critères de SimHuBat pour la simulation, et rappel des mesures en TH1 pour Brest 1 et Brest 2 :

Critères	Description	Simulation WUFI		Mesure in situ		
		Mur au global	TH1 : mur / isolant	Brest 1 Chambre - TH1	Brest 2 Séjour-cuisine TH1	Brest 2 Chambre - TH1
1	Teneur en eau stable ou diminue					
2	Pas de condensation (HR > 98%)					
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)			Atteinte mais 0 semaine complète	Atteinte 2 semaines complètes (18 jours)	Atteinte 28 semaines
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment			Max 88% HR	Max 89% HR	Max 94% HR
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait					

Nous constatons ainsi qu'avec nos hypothèses géométriques et les climats sélectionnés (intérieur selon ISO 13788 classe d'humidité 4 et extérieur climat de Brest de WUFI), la simulation arrive à la conclusion que le mur présente un risque pathologique sur les critères 1, 3 et 4.

La simulation est donc plus pessimiste que la mesure in situ de Brest 1.
En revanche elle reflète le risque pathologique de l'un des murs de Brest 2.

3.2.5 Variante 5 – Climat ext. année réelle / int. mesuré Brest 1

Paramètres

Climat extérieur : météo au format .WAC, créée avec les données de l'API Météofrance pour Brest Guipavas pour la température et l'humidité relative pour la même période que l'année de mesure. Le reste des données (vent, rayonnement etc.) provient de Météonorm 8

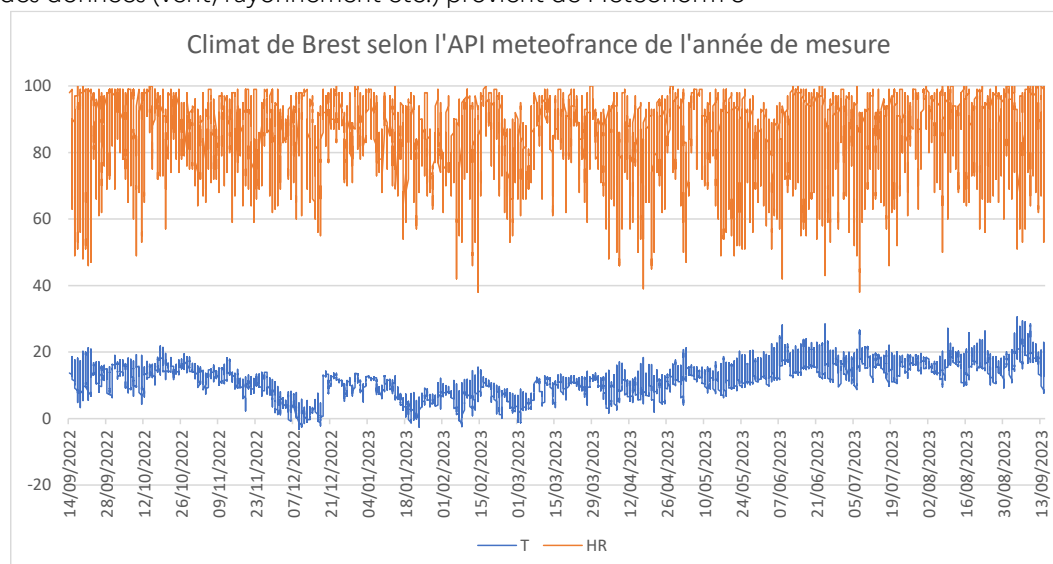


Figure 37 : Température et HR du climat extérieur de l'année de mesure selon l'API Météo-France

Climat intérieur : mesures in situ du climat intérieur mesuré du 15/09/ 2022 au 16/09/2023 dans la chambre du logement Brest 1, converties au format .wac (idem Variante 2)

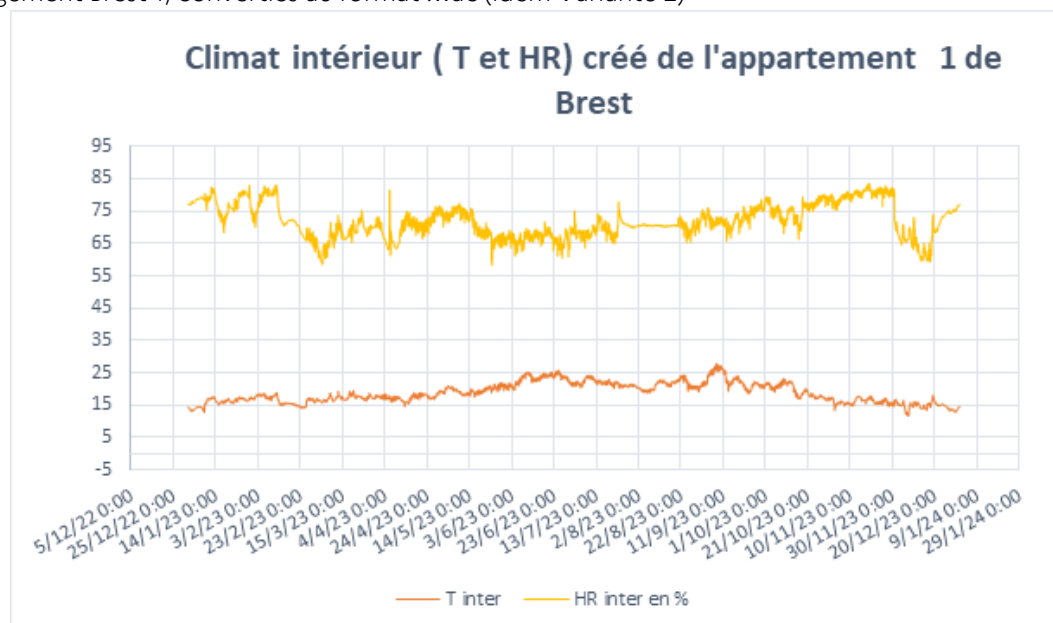


Figure 38 : graphe du climat intérieur de l'appartement 1 de Brest, servant à la création du climat intérieur au format .WAC

Résultats de simulation

Ci-dessous sont résumés les résultats de la simulation sur 5 ans sous Wufi 2D :

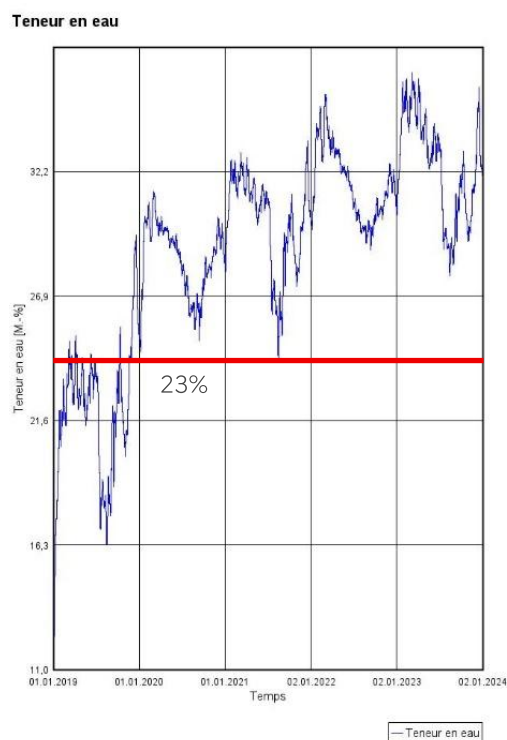
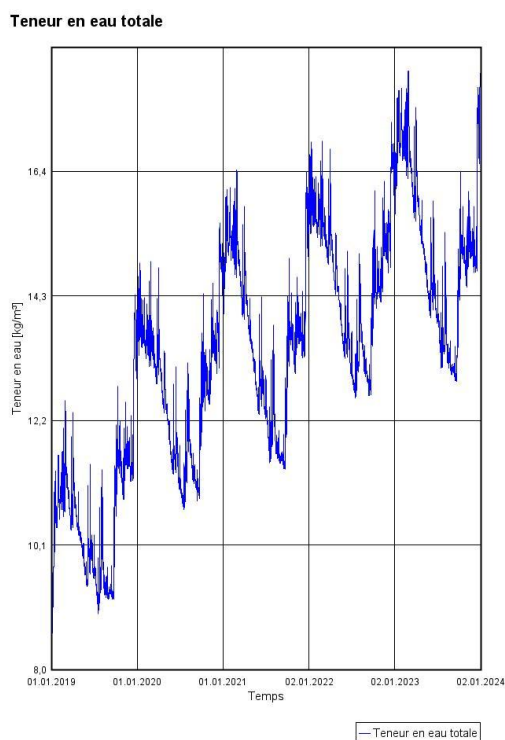
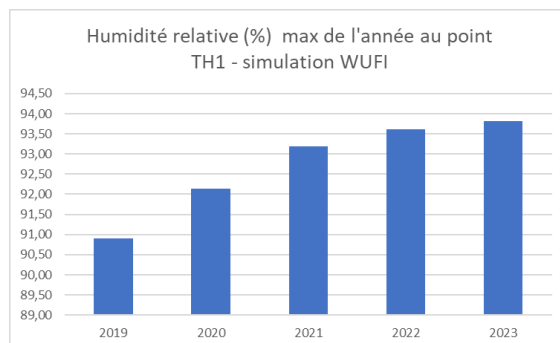


Figure 39 : Teneur en eau en masse du mur sur la période de simulation

Figure 40 : Teneur en eau en masse à l'interface mur /isolant (« TH1 » en mesure in situ)



Le critère 1 de SimHuBat n'est pas respecté : comme on le voit sur la figure 39, la teneur en eau globale du mur augmente fortement d'année en année.

De même la teneur en eau au point critique interface mur /isolant, nommé TH1, augmente fortement d'année en année et dès la première année dépasse les 23 % en continu dès la 2^e année (figures 40 et 41). **Le critère 3 de SimHuBat n'est donc pas respecté en TH1.**

Enfin la teneur en eau de 30% en masse est dépassée dès la fin de l'année 2 de simulation au point TH1. **Le critère 4 de SimHuBat n'est pas respecté non plus en TH1.**

Comparaison entre mesure et simulation

Le graphique suivant présente la comparaison entre les résultats du calcul WUFI sur 5 ans et la mesure réalisée sur 1 an, à l'interface entre le mur et l'isolant (TH1) :

On ne compare ici qu'avec les mesures de Brest 1, car le climat intérieur est celui de Brest 1.

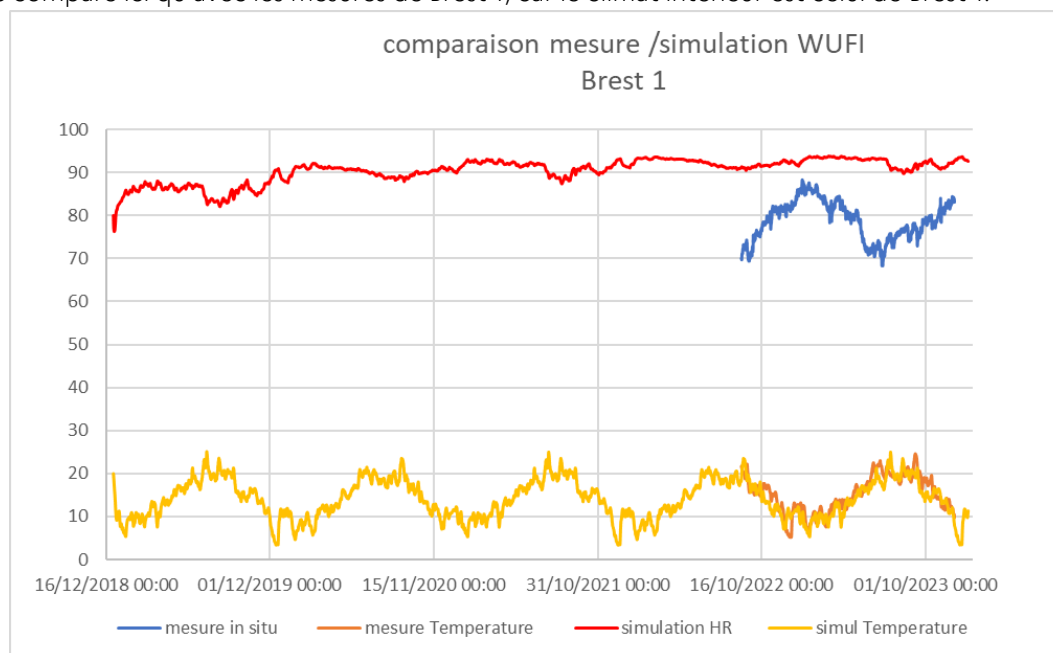


Figure 42 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative et de la température à l'interface mur/isolant nommée TH1 entre la simulation WUFI (5ans) et la mesure in situ (1 an)

Pour une meilleure visibilité, on zoome sur l'année de mesure (année 5 de la simulation) :

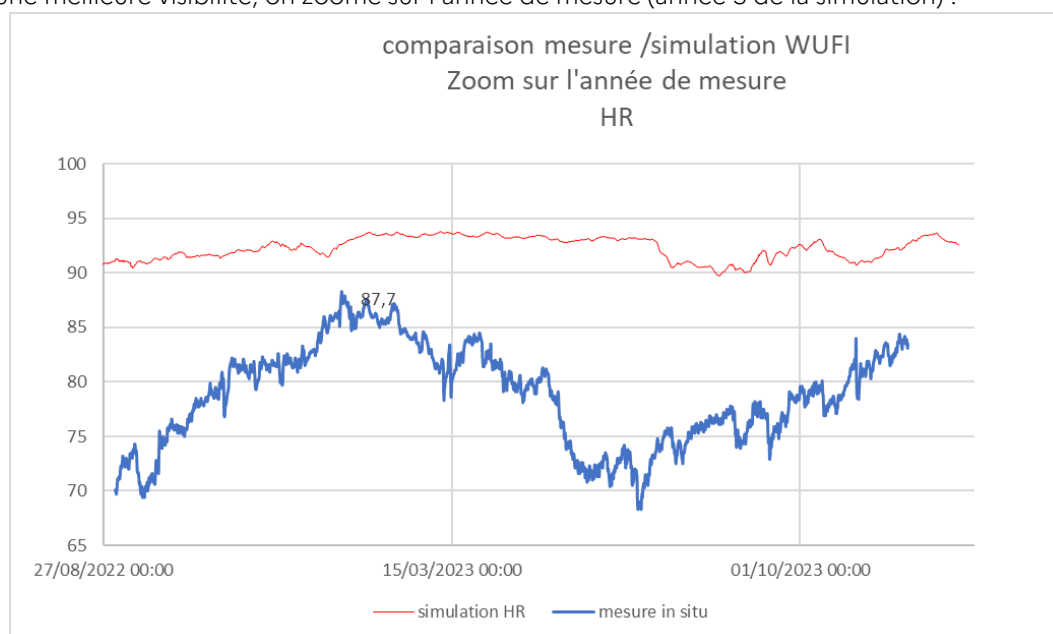


Figure 43 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative entre simulation et mesure in situ/ zoom sur l'année de mesure

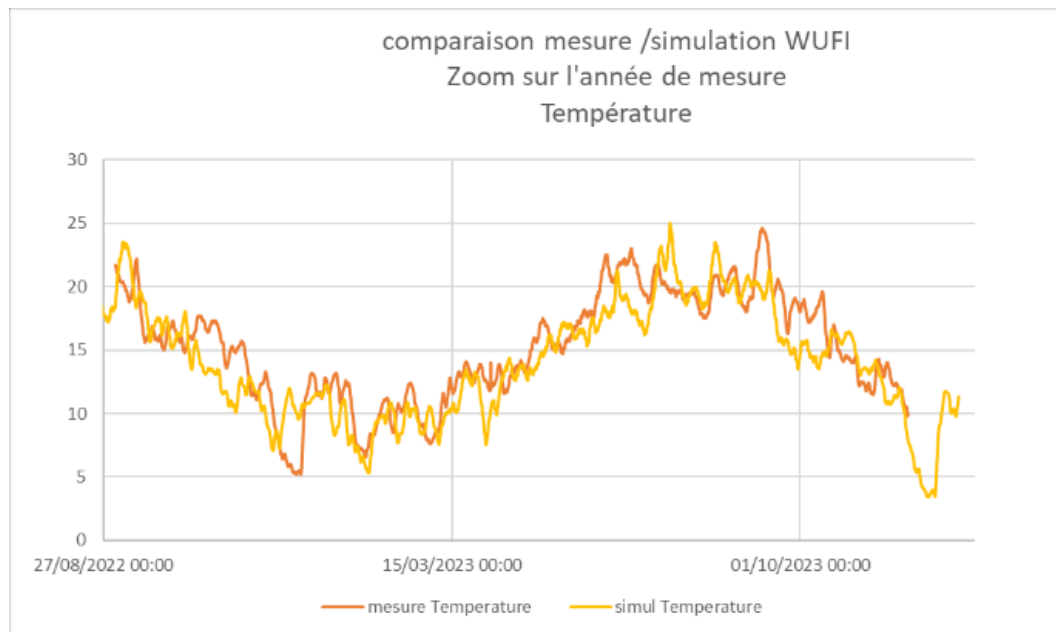


Figure 44 : comparaison de l'évolution de la température entre simulation et mesure in situ / zoom sur l'année de mesure

En prenant comme référence la cinquième année de simulation, afin de laisser s'établir les phénomènes, nous constatons au point TH1 que :

- les températures simulés et mesurée sont proches ;
- l'humidité relative simulée :
 - o n'a quasiment pas de variation durant l'année, elle reste entre 90 et 94% ;
 - o est très élevée en comparaison de l'humidité relative mesurée qui est au maximum à 87,7% ;
 - o Le seuil où la teneur en eau est supérieure à 23% (soit HR supérieure à 86,6%) est totalement dépassé dès le 29 septembre de la première année de simulation ;
 - o de même pour le seuil de la teneur en eau à 30 % (soit HR supérieure à 91%), atteint dès le 4 février de la deuxième année de simulation et durant bien plus de 8 semaines cumulées.

Conclusion sur Brest 1 – Variante 5

Selon les critères retenus ce mur ne fonctionnerait pas du tout en simulation : il présente une augmentation forte de sa teneur en eau au fil des années. D'autre part la teneur en eau en masse au point critique TH1 mur/isolant dépasse 23 % en continu dès la deuxième année de simulation, et passe même au-dessus de 30 % dès le début de la 2^e année de simulation.

Synthèse sur les critères de SimHuBat pour la simulation, et rappel des mesures en TH1 pour Brest 1 et Brest 2 :

Critères	Description	Simulation WUFI		Mesure in situ		
		Mur au global	TH1 : mur / isolant	Brest 1 Chambre - TH1	Brest 2 Séjour-cuisine TH1	Brest 2 Chambre - TH1
1	Teneur en eau stable ou diminue					
2	Pas de condensation (HR > 98%)					
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)			Atteinte mais 0 semaine complète	Atteinte 2 semaines complètes (18 jours)	Atteinte 28 semaines
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment			Max 88% HR	Max 89% HR	Max 94% HR
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait					

Nous constatons ainsi qu'avec nos hypothèses géométriques et les climats sélectionnés (intérieur mesuré et climat extérieur de Brest selon l'API Météo-France), la simulation arrive à la conclusion que le mur présente un risque pathologique sur les critères 1, 3 et 4.

La simulation est donc plus pessimiste que la mesure in situ de Brest 1.
En revanche elle reflète le risque pathologique de l'un des murs de Brest 2.

3.2.6 Variante 6 – Nature de la pierre

Paramètres

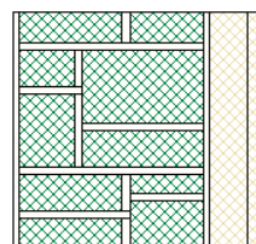
Il n'est pas toujours facile de reconnaître les pierres dans les murs anciens. Ici la pierre était recouverte d'un enduit extérieur ; nous ne l'avons pas eue en visuel directement et hésitons entre pierre calcaire dure et le traditionnel granite de Bretagne.

D'autre part la base Wufi n'étant pas exhaustive, nous avons testé 3 types de pierre se différenciant par leur perméabilité à la diffusion de vapeur, leur densité, leur capillarité et leur porosité :

- Calcaire dur : Pierre calcaire Krensheimer shelly
- Granite : Granite de la base MASEA
- Grès : Grès Zeiter

Géométrie : toujours identique aux variantes précédentes :

- o Enduit extérieur ciment
- o Mur en pierre
- o Joint à la chaux de 2cm de largeur
- o Enduit de à la chaux de 2cm
- o Isolant en fibre de bois de 10 cm
- o Freine vapeur Intello
- o Isolant en fibre de bois de 5 cm



Pour ces simulations nous partirons sur les climats identiques à la variante 5 :

- Climat extérieur : météo au format .WAC, créée avec les données de l'API Météo-France pour Brest Guipavas pour la température et l'humidité relative pour la même période que l'année de mesure. Le reste des données (vent, rayonnement etc.) provient de Météonorm 8.
- Climat intérieur : mesures in situ du climat intérieur mesuré du 15/09/ 2022 au 16/09/2023 dans la chambre du logement Brest 1, converties au format .WAC

Résultats de simulation

On se concentre sur les résultats en TH1, qui sont les plus sensibles :

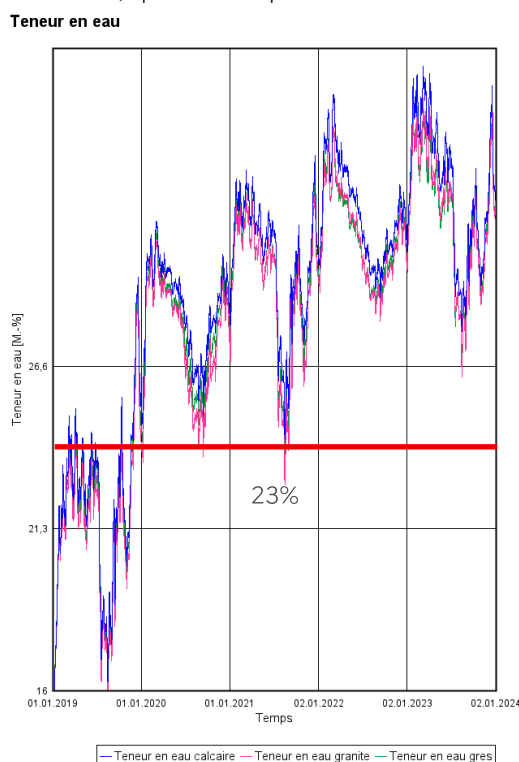


Figure 45 : Teneur en eau en masse à l'interface mur /isolant (sonde « TH1 » en mesure in situ)

Quel que soit le type de pierre utilisé :

- **Le critère 1 de SimHuBat n'est pas respecté** : la teneur en eau globale du mur augmente fortement d'année en année.
- De même la teneur en eau au point critique interface mur /isolant, nommé TH1, augmente fortement d'année en année et dès la première année dépasse les 23 % en continu dès la 2^e année (figure 45). **Le critère 3 de SimHuBat n'est donc pas respecté en TH1.**
- Enfin la teneur en eau de 30% en masse est dépassée dès l'année 3 de simulation au point TH1. **Le critère 4 de SimHuBat n'est pas respecté non plus en TH1.**

Conclusion sur Brest 1 – Variante 6

Pour cette simulation, ce n'est pas le paramètre « type de pierre » qui influence la teneur en eau en masse au point TH1. Ce fait n'est pas surprenant car, excepté avec des pierres très capillaires type calcaire très tendre, le comportement plus ou moins capillaire d'un mur n'est donné que par les joints et les enduits.

3.2.7 Variante 7 – Largeur de joint

Paramètres

Nous ferons varier les largeurs de joint de 1cm à 4cm afin de vérifier si ce paramètre est sensible dans notre simulation sur Brest.

En effet sur des murs en pierre, la largeur des joints varie, et la prise de mesure de largeur sur site n'est pas forcément aisée. Mais nous avons déjà noté dans le rapport Climaxion l'importance à la fois de la largeur de ce joint et du type de matériau utilisé pour ce joint. Sur une pierre peu perméable à la vapeur et à l'eau, (comme la pierre calcaire dure ou le granite), le passage principal de l'eau liquide s'effectue au niveau du joint.

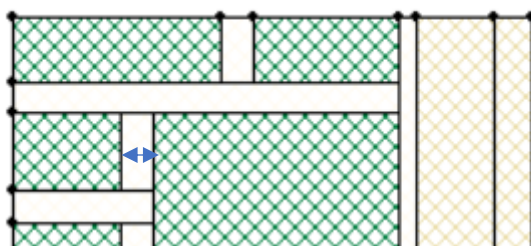


Figure 46 : visualisation de la largeur de joint entre pierres

Géométrie : variations sur l'épaisseur de joint, toutes choses égales par ailleurs :

- ~~Enduit extérieur ciment~~ ; nous l'avons retiré afin de mieux visualiser l'effet de la modification de la largeur de joint
- Mur en pierre
- **Joint à la chaux de 1 à 4 cm de largeur selon les variantes**
- Enduit de à la chaux de 2 cm
- Isolant en fibre de bois de 10 cm
- Freine vapeur Intello
- Isolant en fibre de bois de 5 cm

Pour ces simulations nous partirons sur les climats identiques à la variante 5 :

- Climat extérieur : météo au format .WAC, créée avec les données de l'API Météo-France pour Brest Guipavas pour la température et l'humidité relative pour la même période que l'année de mesure. Le reste des données (vent, rayonnement etc.) provient de Météonorm 8.
- Climat intérieur : mesures in situ du climat intérieur mesuré du 15/09/ 2022 au 16/09/2023 dans la chambre du logement Brest 1, converties au format .WAC

Résultats de simulation

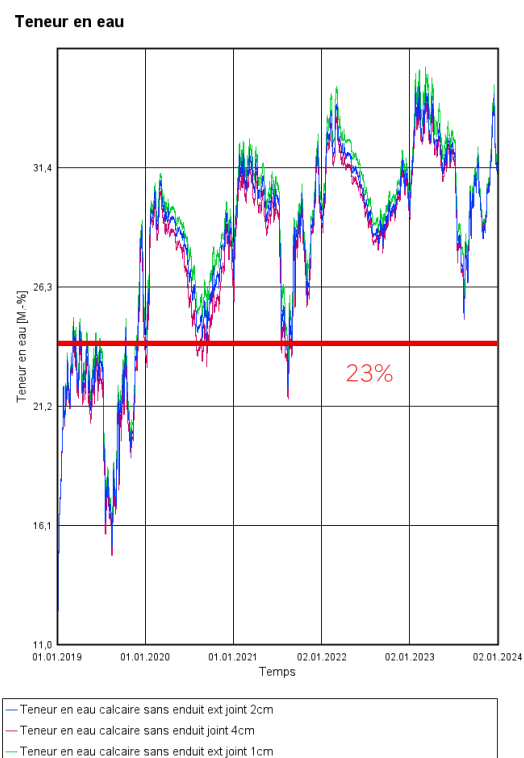


Figure 47 : comparaison HR au point TH1 avec 3 types de largeur de joint et sans enduit extérieur

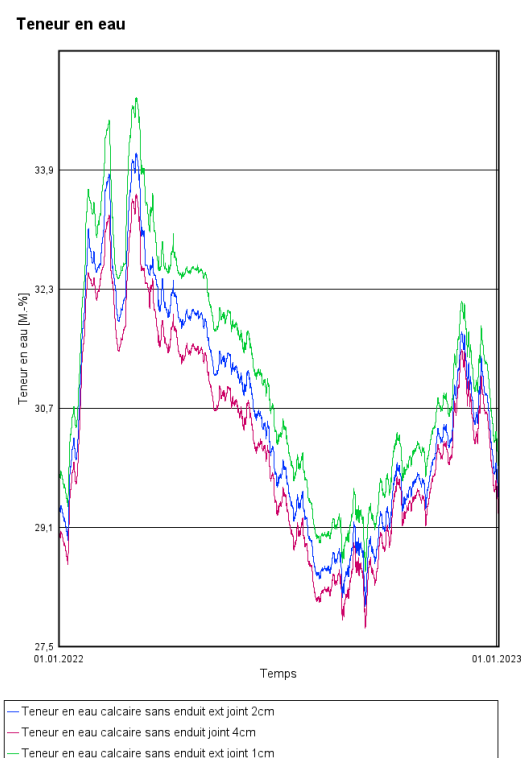


Figure 48 : comparaison HR au point TH1 avec 3 types de largeur de joint et sans enduit extérieur - zoom sur l'année

5

Conclusion sur Brest 1 – Variante 7

Augmenter la largeur du joint entre pierre diminue bien la teneur en eau en masse au point TH1 (contact mur/ isolant). Mais, pour cette simulation, l'écart de teneur en eau en masse est de l'ordre de 1 % entre une largeur de joint de 1cm et de 4cm. **Ce n'est pas ici un paramètre important, et ce malgré le fait que l'on ait enlevé l'enduit ciment.**

3.2.8 Conclusions sur les Simulations Brest 1

Le tableau suivant résume le résultat des 7 variantes simulées pour Brest 1 :

Paramètres		Simulation WUFI						
Climat extérieur		WUFI Brest Guipavas 2010				Météo de l'année de mesure		
Climat intérieur		WTA6-2 moyen	Mesuré Brest 1	WTA6-2 élevé	ISO 13788 classe4	Mesuré Brest 1		
Pierre		Granite				Granite/ Calcaire/ Grès	Calcaire dur sans enduit ext.	
Critères	Joint	2 cm						1, 2 et 4 cm
1	Teneur en eau stable ou diminue							
2	Pas de condensation (HR > 98%)							
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)							
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment							
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait							

Conclusion sur la sensibilité des paramètres

Pour cette simulation, le seul paramètre qui change réellement les conclusions des calculs est le climat intérieur. Ni les variantes sur la nature de la pierre ni celles sur l'épaisseur du joint ne changent le résultat, à savoir que les critères 1, 3 et 4 de SimHuBat ne sont pas respectés.

Conclusion du point de vue du concepteur qui utilise WUFI

Si nous avons simulé ce type de mur à Brest en tant que concepteur sans avoir les données de mesure in situ, nous aurions utilisé à priori le climat extérieur de Brest 2010 disponible dans la base WUFI, et un climat intérieur normé, comme WTA6-2 humidité moyenne pour un logement équipé d'une VMC.

Ceci correspond à la Variante 1 : le calcul WUFI nous aurait indiqué que la paroi présente un risque, bien que léger, d'accumulation d'humidité d'année en année (non-respect du critère 1).

Ce risque n'est pas confirmé dans la réalité mesurée pour Brest 1 (avec VMC fonctionnelle). Cependant on ne dispose que d'une année de mesure, l'accumulation d'humidité n'est pas mesurable.

Un risque est présent dans la réalité mesurée pour Brest 2, avec une VMC non fonctionnelle. Pour ce cas, si en tant que concepteur on anticipait l'arrêt de la VMC dans l'usage prévu pour le logement, nous aurions probablement utilisé un climat intérieur comme WTA6-2 humidité élevée.

Ceci correspond à la Variante 3 : WUFI nous aurait alors indiqué que la paroi présente un risque à la fois d'accumulation d'humidité et d'humidité excessive à l'interface mur-isolant (non-respect des critères 1, 3 et 4).

Ce risque est confirmé par la mesure dans le logement Brest 2. Néanmoins un doute subsiste sur le rôle de l'enduit intérieur à la chaux. Il a été réalisé juste avant l'isolation et n'était sans doute pas encore totalement sec lors des mesures.

Conclusion sur le caractère pessimiste ou optimiste de WUFI

La simulation qui se rapproche le plus de la réalité mesurée est la variante 5, avec la météo de l'année de la mesure et le climat intérieur mesuré.

Pour cette variante, on note que **les résultats présentés par WUFI sont bien plus pessimistes que les mesures effectuées** (voir [§3.2.5](#)). En particulier l'humidité au contact entre le mur et l'isolant est très stable et très élevée dans la simulation (entre 90 et 94% HR pour l'année 5) alors que la réalité mesurée varie entre 70% et au maximum à 87,7%.

La mesure ayant été réalisée la première année après isolation, on peut comparer aussi à l'année 1 de la simulation : là encore WUFI est très pessimiste avec des HR qui dépassent rapidement 80% et tendent vers 90%.

3.3 Simulations JURA A

Rappel des caractéristiques du logement

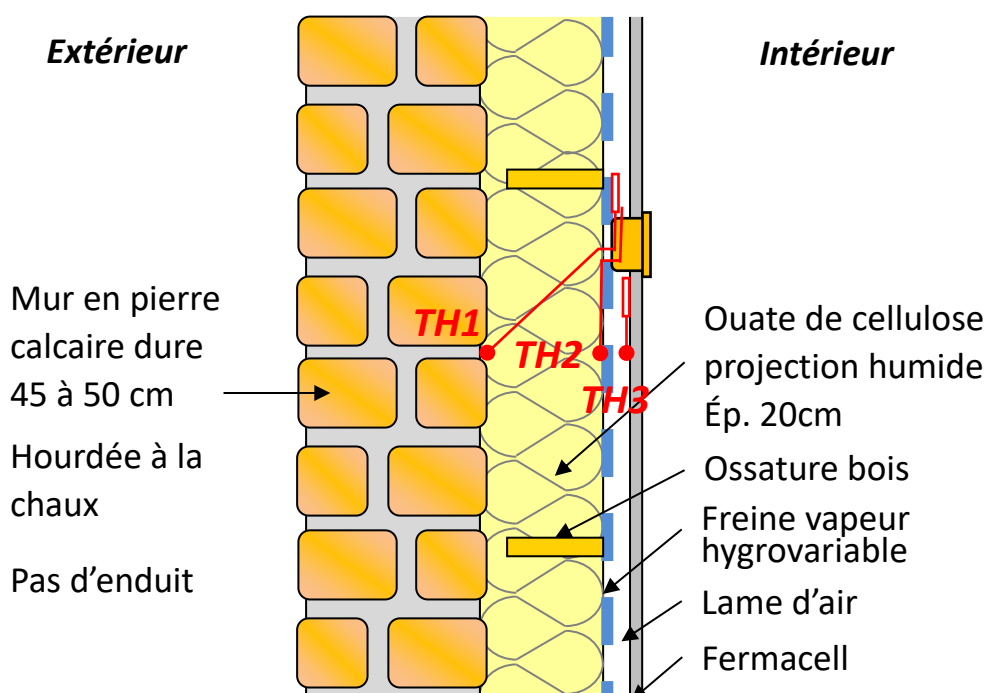
Département : Jura (39)

Altitude : 235 m

Description du mur : Pierre calcaire dure jaune (3 sur 4 au niveau dureté), épaisseur 45 à 50cm, hourdée à la chaux, pas d'enduit, joint de pierre creux façades E et O, pignon joints remplis.

Isolation intérieure en ouate de cellulose projetée humide 20cm entre ossature bois, FV Intello Plus, lame d'air, Fermacell.

Isolation réalisée 1 an avant l'instrumentation.



Ventilation : VMC Double flux

Pièces instrumentées et orientation :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre	Mur Nord	R+1	40° N-E	Interrupteur
Salon	Mur Est	R+1	130° Est	Prise basse
Salle de bain	Mur Nord	R+1	40° N-E	Haut de mur

Paramètres complémentaires de simulation WUFI :

Référence des matériaux utilisés :

Matériaux	Variantes	Référence base WUFI	Epaisseur (mm)
Enduit extérieur	Sans		
Pierre	Calcaire	Pierre calcaire Krensheimer shelly	500
Joint	Chaux	Enduit à la chaux (valeur A : $3 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0.5}$)	20
Enduit d'égalisation intérieur (entre mur et isolant)	Sans		
Isolant	Ouate de cellulose insufflée	Fibre de cellulose	200
Membrane	Freine vapeur Hygrovariable	Intello (Till 2015)	1
Parement	Non intégré dans les simulations		

Les caractéristiques de ces matériaux sont indiquées au [§3.1.3](#).

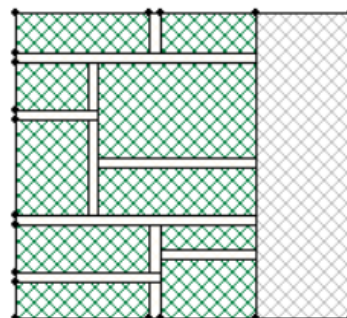
Géométrie du mur

Il s'agit d'un assemblage de blocs plein de pierre de 10 à 30cm de hauteur et 10 à 30cm de profondeur pour une épaisseur de mur fini de 50cm

Les joints entre pierres ont une largeur 2cm. On considère que toutes les 2 rangées, le joint n'est plus traversant de l'intérieur vers l'extérieur.

Ainsi la constitution du mur est la suivante :

- Mur en pierre Calcaire de 50cm de large
- Joint à la chaux de 2cm de largeur
- Isolant en ouate de cellulose projeté de 20 cm
- Freine vapeur Intello



Durée de la simulation :

Simulations effectuées sur 5 ans afin d'évaluer l'évolution des teneurs en eau dans le mur et ses couches.

Variantes simulées :

Pour Jura A nous effectuerons une série de 4 simulations afin d'étudier des variantes sur les climats intérieurs.

3.3.1 Variante 1 – Climat ext. année réelle / int. mesuré Jura A

Paramètres

Climat extérieur : météo au format .WAC, créée avec les données de l'API Météo-France pour Lons le Saunier pour la température et l'humidité relative pour la même période que l'année de mesure. Le reste des données (vent, rayonnement etc.) provient de Météonorm 8.

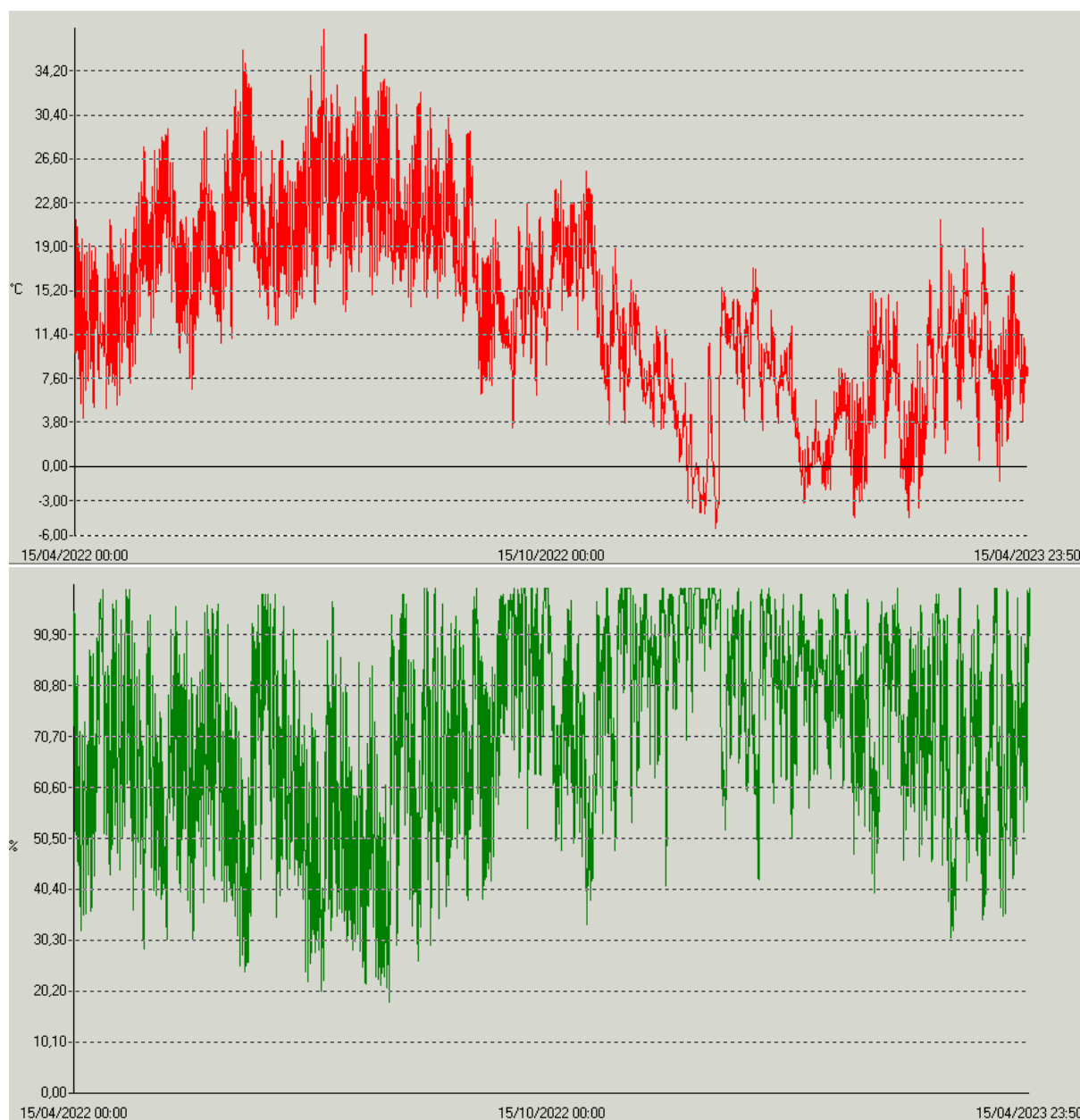


Figure 49 : graphiques en température et HR du climat extérieur de l'année de mesure selon l'API Météo-France

Climat intérieur : mesures in situ au format .WAC élaboré à partir du climat intérieur mesuré du 15/04/2022 au 15/04/2023 dans le Salon de la maison Jura A

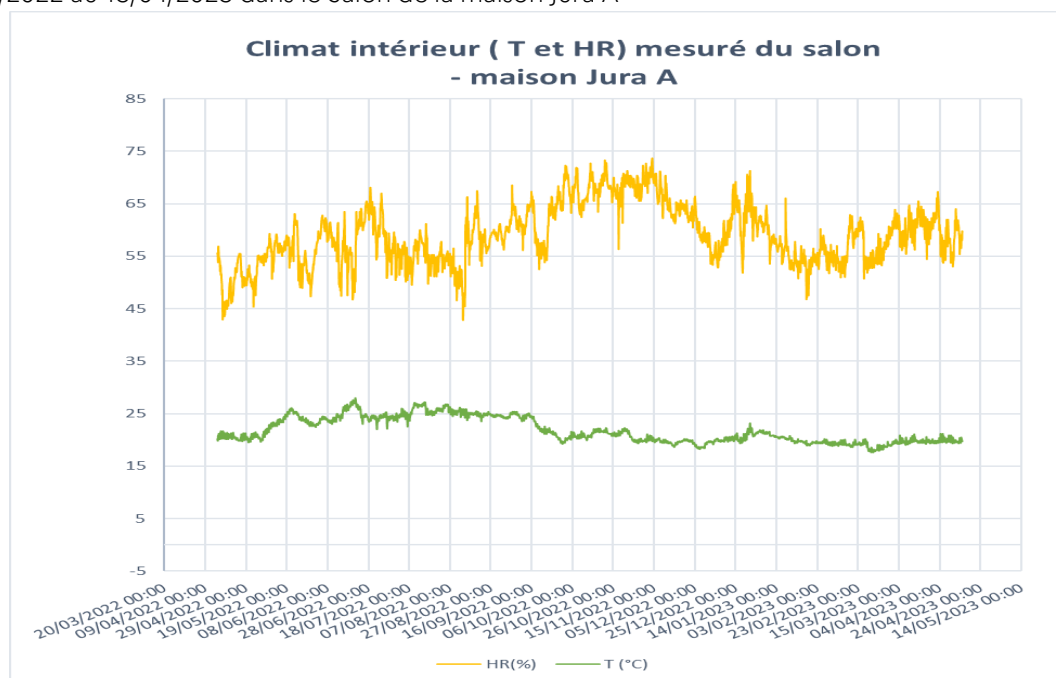


Figure 50 : graphe du climat intérieur mesuré dans le salon de Jura A, servant à la création du climat intérieur au format .WAC

Comparaison avec 3 types de climats intérieurs « normés » :

Nous comparons ici le climat mesuré dans le salon de Jura A avec 3 types de climats intérieurs normés :

- Climat intérieur WTA 6-2 humidité moyenne,
- Climat intérieur WTA 6-2 humidité moyenne+ 5%,
- Climat intérieur ISO 13788 humidité classe 1

Le graphique suivant présente cette comparaison en humidité relative :

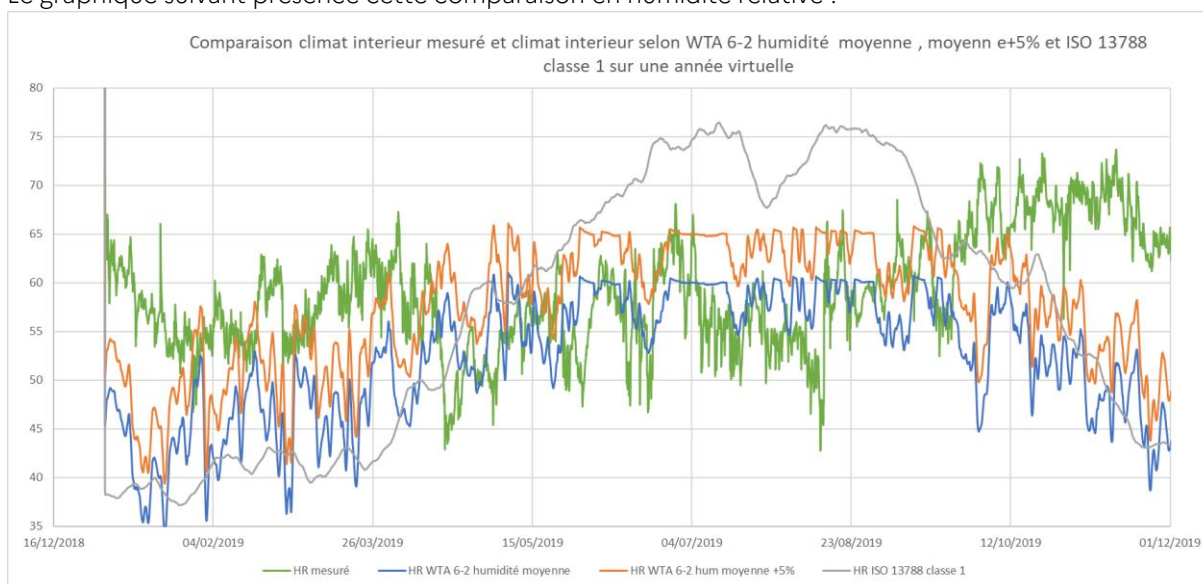


Figure 51 : Comparaison HR entre climat mesuré intérieur et 3 climats normés

On constate que l'humidité relative du climat mesuré, en vert sur la figure ci-dessus, est :

- Proche de celle du climat intérieur WTA 6-2 humidité moyenne entre mi-mai et mi-septembre ;

- Plus élevée dans les autres périodes de l'année que l'humidité relative des 3 climats normés ; L'écart peut aller jusqu'à 15 % entre l'HR mesuré et l'HR issu du climat intérieur ISO13788
- Est plus basse en été de l'ordre de 15% au maximum par rapport à la HR du climat ISO 13788 classe 1, soit de classe d'humidité faible.

Résultats de simulation

Ci-dessous sont résumés les résultats de la simulation sur 5 ans sous Wufi 2D :

Teneur en eau totale

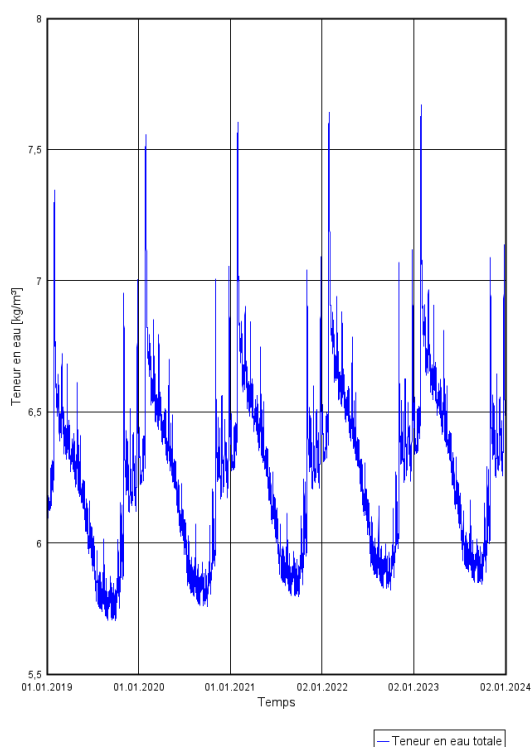


Figure 52 : Teneur en eau en masse du mur sur la période de simulation

Teneur en eau

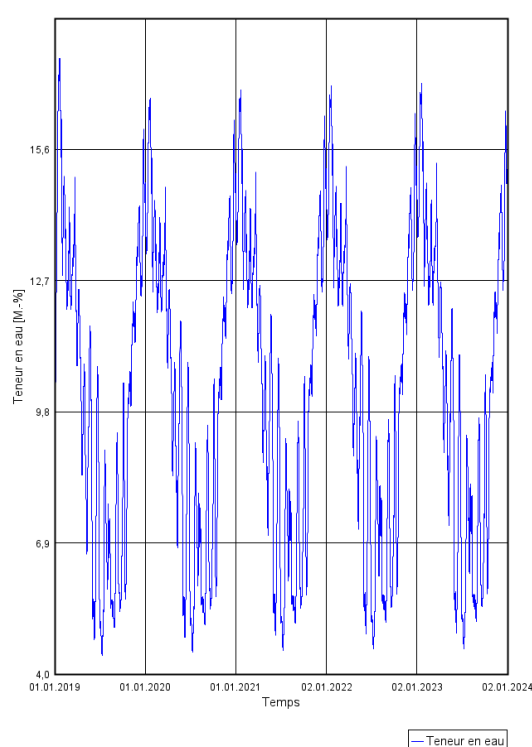


Figure 53 : Teneur en eau en masse à l'interface mur /isolant (« TH1 » en mesure in situ)

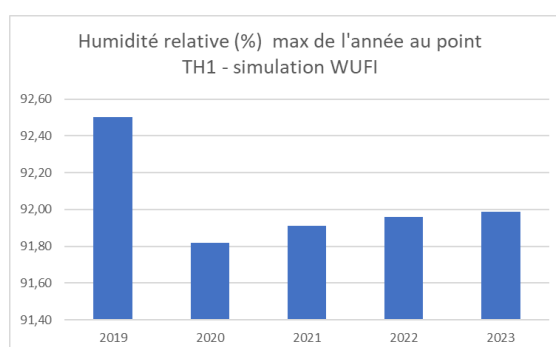


Figure 54 : Zoom sur l'humidité relative maximum calculée par année au point de contact mur/isolant (TH1)

Le critère 1 de SimHuBat n'est pas respecté : comme on le voit sur la figure 52, la teneur en eau globale du mur augmente doucement d'année en année.

De même la teneur en eau au point critique interface mur /isolant, nommé TH1, augmente aussi très doucement d'année en année.

Les autres critères de SimHuBat sont respectés, notamment la teneur en eau qui reste inférieure à 23%.

Comparaison entre mesure et simulation

Le graphique suivant présente la comparaison entre les résultats du calcul WUFI sur 5 ans et la mesure réalisée sur 1 an, à l'interface entre le mur et l'isolant (TH1) :

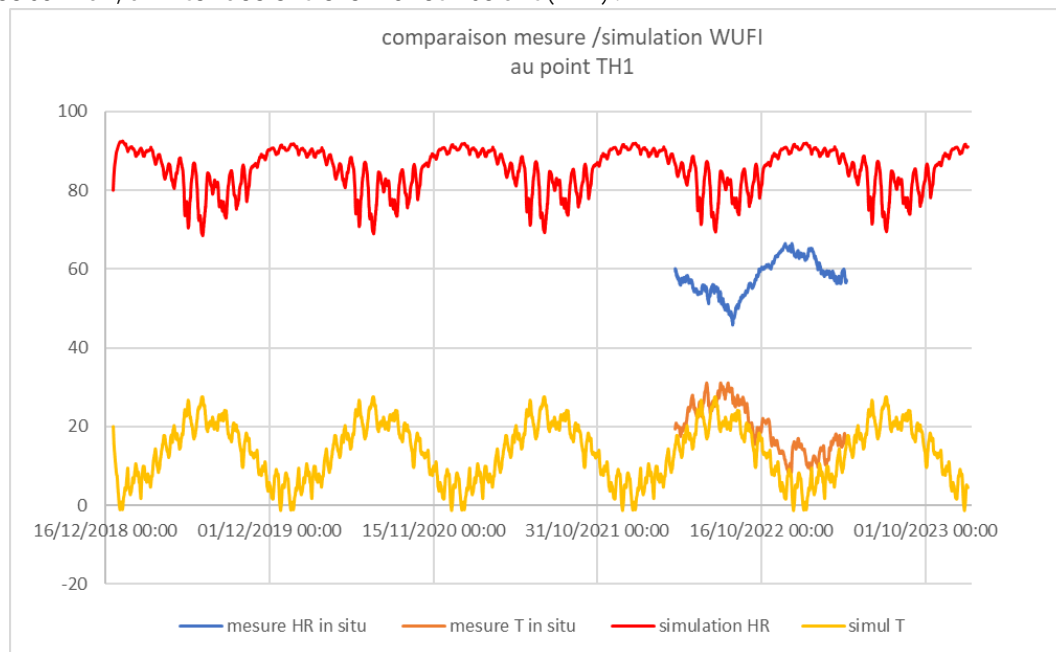


Figure 55 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative et de la température à l'interface mur/isolant nommée TH1 entre la simulation WUFI (5ans) et la mesure in situ (1 an)

Pour une meilleure visibilité, on zoome sur l'année de mesure (année 5 de la simulation) :

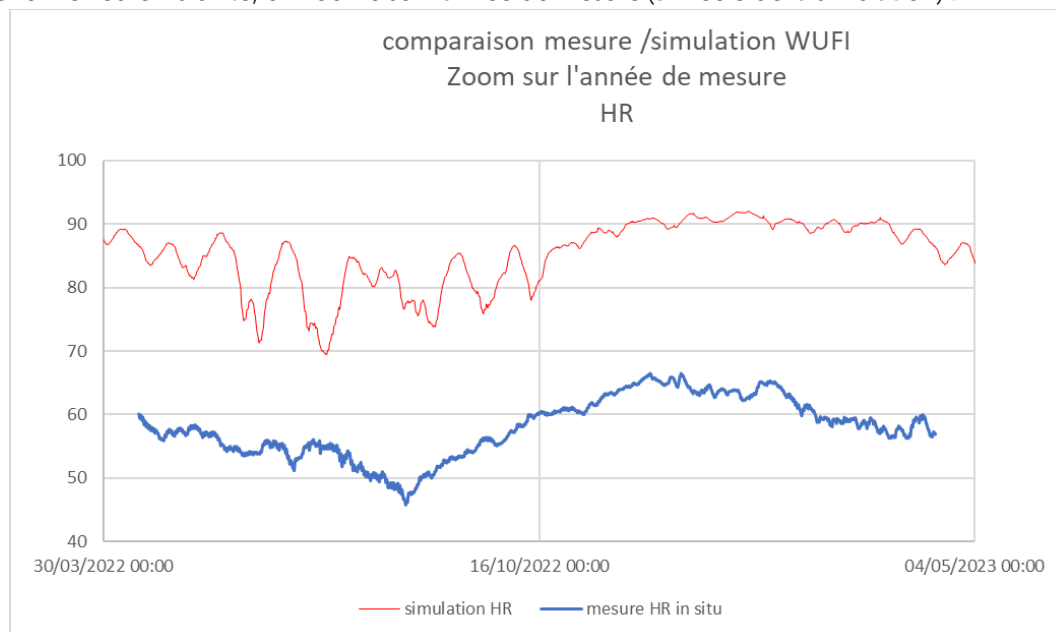


Figure 56 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative entre simulation et mesure in situ/ zoom sur l'année de mesure, au point TH1

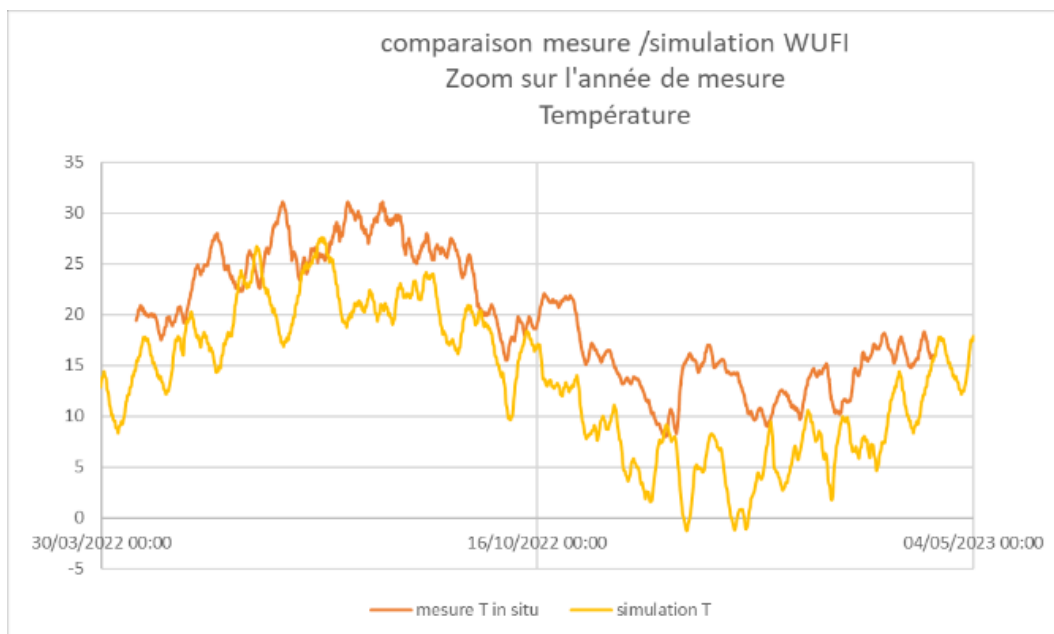


Figure 57 : comparaison de l'évolution de la température entre simulation et mesure in situ / zoom sur l'année de mesure, au point TH1

En prenant comme référence la cinquième année de simulation, afin de laisser s'établir les phénomènes, nous constatons au point TH1 que :

- les températures simulées et mesurées suivent les mêmes variations, cependant la température mesurée in situ est quasi systématiquement plus élevée que la température simulée, de l'ordre de 6 °C en moyenne, avec un écart maximum de 16,8°C ;
- l'humidité relative simulée :
 - o est très élevée en comparaison de l'humidité relative mesurée. L'écart est important : en moyenne un écart de 27 points entre l'HR simulée et l'HR mesurée. L'écart maximal constaté est de 34% ;
 - o le seuil où la teneur en eau est supérieure à 23% (soit HR supérieure à 93,8% pour la ouate, voir §1.3) n'est pas atteint.

Conclusion sur Jura A – Variante 1

Selon nos critères retenus ce mur est « limite » au niveau de son fonctionnement.

La teneur totale en eau augmente doucement d'année en année, ce qui ne respecte pas le critère 1 de SimHuBat. Cette lente augmentation se produit également au contact entre le mur et l'isolant (TH1).

Les autres critères de SimHuBat sont respectés, notamment la teneur en eau qui reste inférieure à 23%.

Synthèse sur les critères de SimHuBat pour la simulation, et rappel des mesures en TH1 pour Jura A :

Critères	Description	Simulation WUFI		Mesure in situ		
		Mur au global	TH1 : mur / isolant	Jura A Chambre - TH1	Jura A Salon - TH1	Jura A Salle de bain - TH1

1	Teneur en eau stable ou diminue					
2	Pas de condensation (HR > 98%)					
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)					
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment					
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait					

Nous constatons ainsi qu'avec nos hypothèses géométriques et les climats intérieurs mesuré in situ et extérieurs sélectionnés, **la simulation est bien plus pessimiste que la mesure in situ**, notamment au niveau des HR à l'interface entre mur et isolant.

3.3.2 Variante 2 – Climat ext. année réelle / int. WTA 6-2 humidité moyenne

Paramètres

Climats :

- Climat extérieur : météo au format .WAC, créée avec les données de l'API Météo-France pour Lons le Saunier pour la température et l'humidité relative pour la même période que l'année de mesure. Le reste des données provient de Météonorm 8
- Climat intérieur : WUFI EN15026 / WTA 6-2 humidité moyenne

Un graphique de comparaison des différents climats intérieurs a été présenté au §3.3.1.

Résultats de simulation

Ci-dessous sont résumés les résultats de la simulation sur 5 ans sous Wufi 2D :

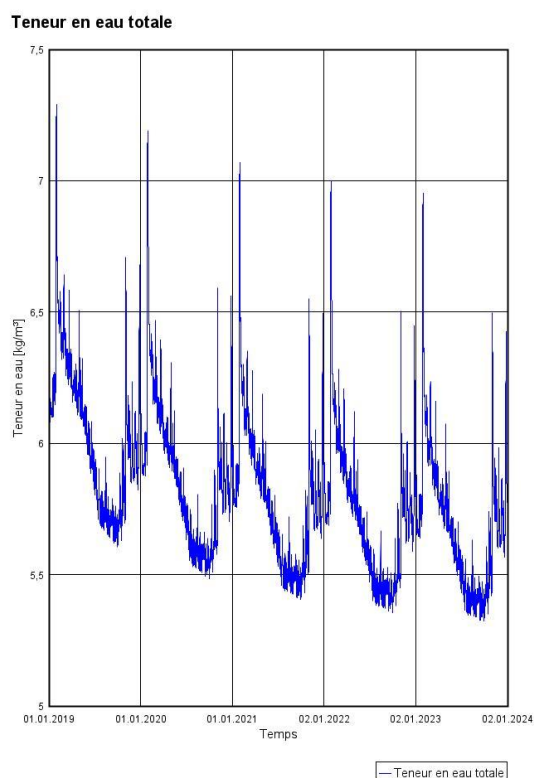


Figure 58 : Teneur en eau en masse du mur sur la période de simulation

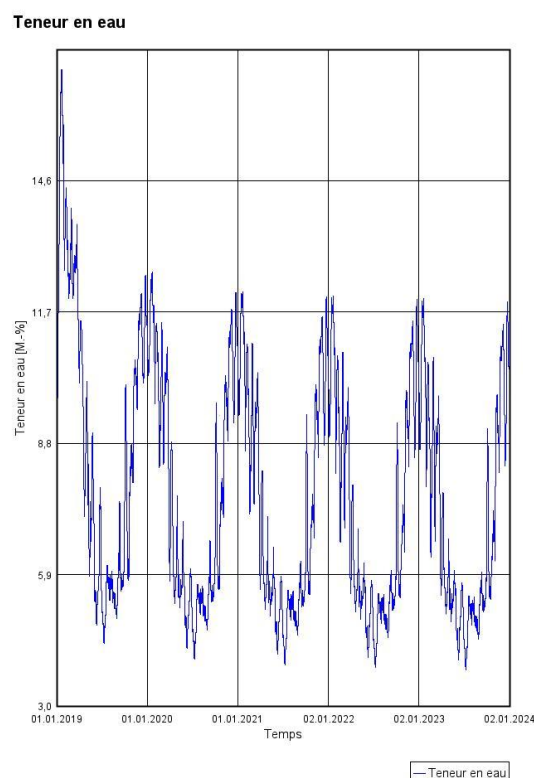


Figure 59 : Teneur en eau en masse à l'interface mur / isolant (« TH1 » en mesure in situ)

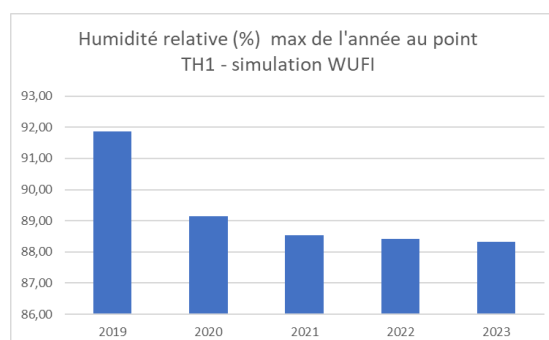


Figure 60 : Zoom sur l'humidité relative maximum calculée par année au point de contact mur/isolant (TH1)

Avec ce climat intérieur, tous les critères de SimHuBat sont respectés. La teneur en eau totale diminue et la teneur à l'interface mur-isolant (TH1) ne dépasse jamais 23%.

Comparaison entre mesure et simulation

Le graphique suivant présente la comparaison entre les résultats du calcul WUFI sur 5 ans et la mesure réalisée sur 1 an, à l'interface entre le mur et l'isolant (TH1) :

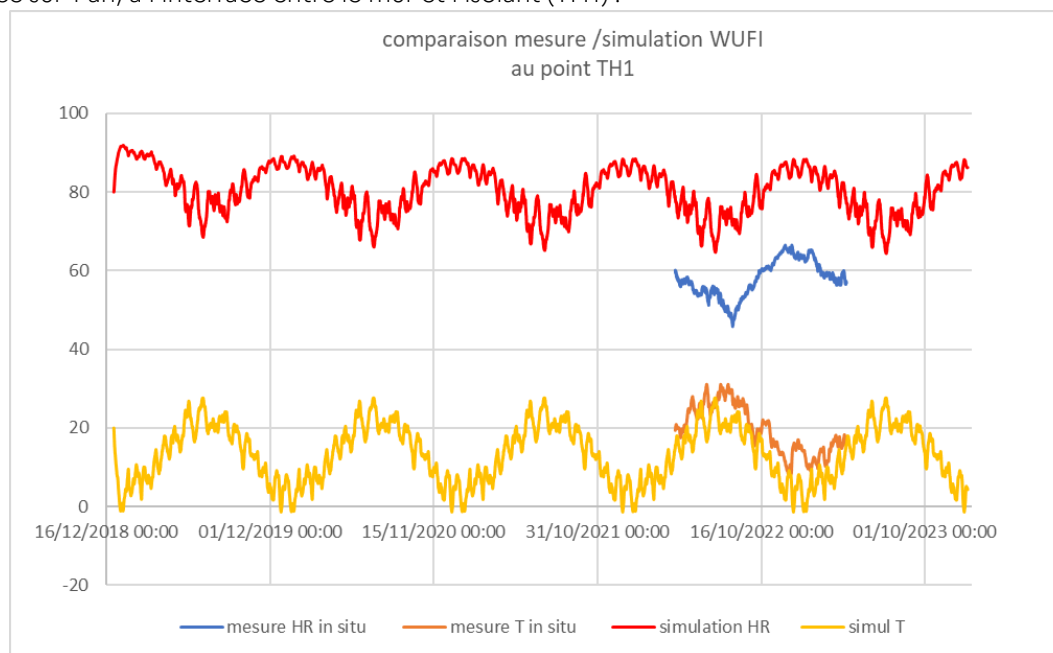


Figure 61 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative et de la température à l'interface mur/isolant nommée TH1 entre la simulation WUFI (5ans) et la mesure in situ (1 an)

Pour une meilleure visibilité, on zoome sur l'année de mesure (année 5 de la simulation) :

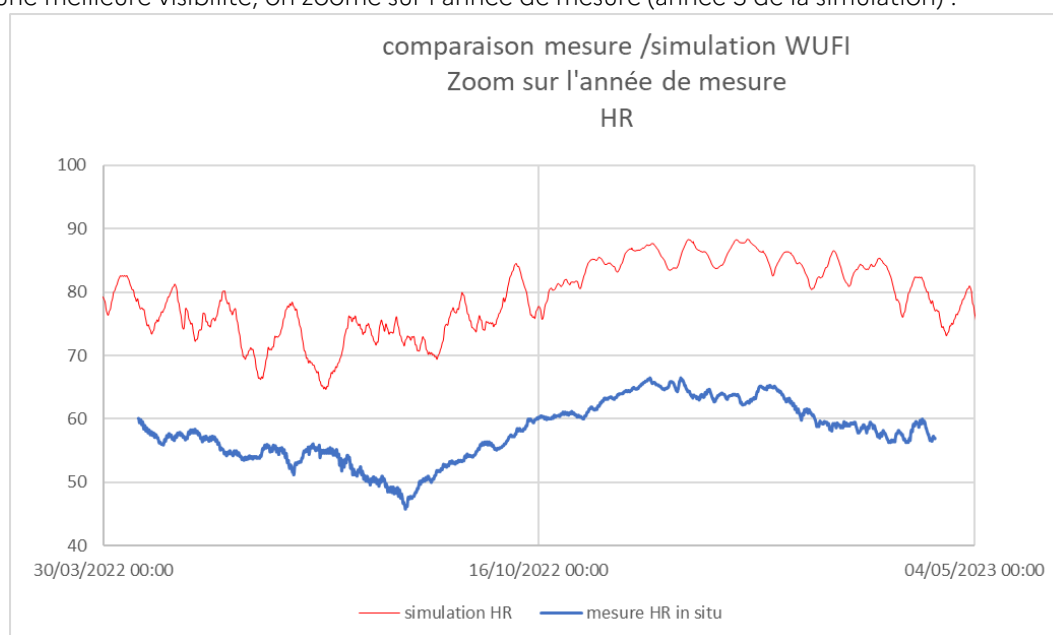


Figure 62 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative entre simulation et mesure in situ/ zoom sur l'année de mesure, au point Th1

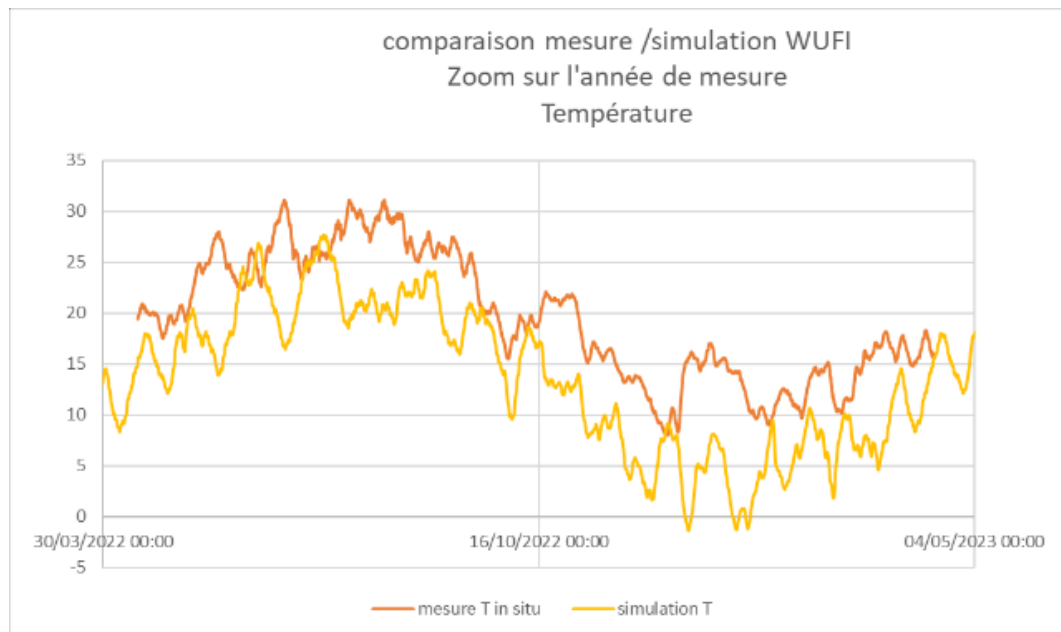


Figure 63 : comparaison de l'évolution de la température entre simulation et mesure in situ / zoom sur l'année de mesure, au point Th1

En prenant comme référence la cinquième année de simulation, afin de laisser s'établir les phénomènes, nous constatons au point TH1 que :

- les températures simulées et mesurées suivent les mêmes variations, cependant la température mesurée in situ est quasi systématiquement plus élevée que la température simulée, de l'ordre de 6 °C en moyenne, avec un écart maximum de 17°C ;
- l'humidité relative simulée :
 - o est très élevée en comparaison de l'humidité relative mesurée. L'écart est important : en moyenne un écart de 21 points entre l'HR simulée et l'HR mesurée. Un écart maximal constaté de 28% ;
 - o le seuil où la teneur en eau est supérieure à 23% (soit HR supérieure à 93,8%) n'est pas atteint.

Conclusion sur Jura A – Variante 2

Tous les critères de SimHuBat sont respectés, notamment la teneur en eau qui reste inférieure à 23%.

Synthèse sur les critères de SimHuBat pour la simulation, et rappel des mesures en TH1 pour Jura A :

Critères	Description	Simulation WUFI		Mesure in situ		
		Mur au global	TH1 : mur / isolant	Jura A Chambre - TH1	Jura A Salon - TH1	Jura A Salle de bain - TH1
1	Teneur en eau stable ou diminue					
2	Pas de condensation (HR > 98%)					
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)					
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment					
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait					

La simulation reste beaucoup plus pessimiste que la mesure in situ, notamment au niveau des HR à l'interface entre mur et isolant (21 points de HR en plus en moyenne dans la simulation par rapport à la mesure).

3.3.3 Variante 3 – Climat ext. année réelle / int. WTA 6-2 humidité moy. +5%

Paramètres

Climats :

- Climat extérieur : météo au format .WAC, créée avec les données de l'API Météo-France pour Lons le Saunier pour la température et l'humidité relative pour la même période que l'année de mesure. Le reste des données provient de Météonorm 8
- Climat intérieur : WUFI EN15026 / WTA 6-2 humidité moyenne +5%

Un graphique de comparaison des différents climats intérieurs a été présenté au §3.3.1.

Résultats de simulation

Ci-dessous sont résumés les résultats de la simulation sur 5 ans sous Wufi 2D :

Teneur en eau totale

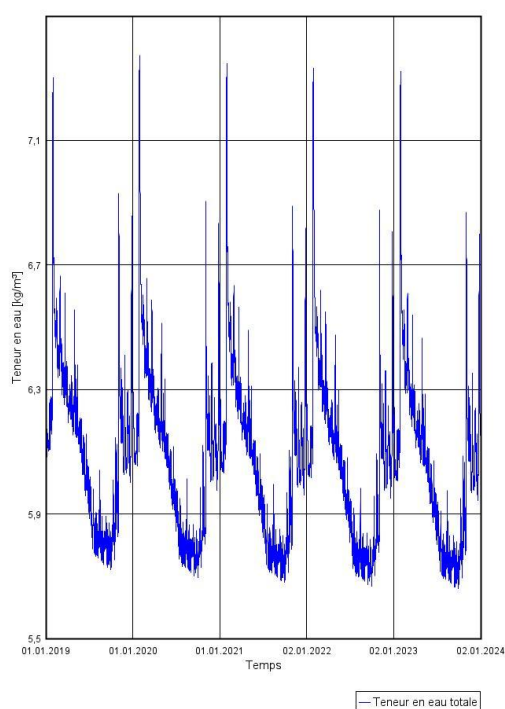


Figure 64 : Teneur en eau en masse du mur sur la période de simulation

Teneur en eau

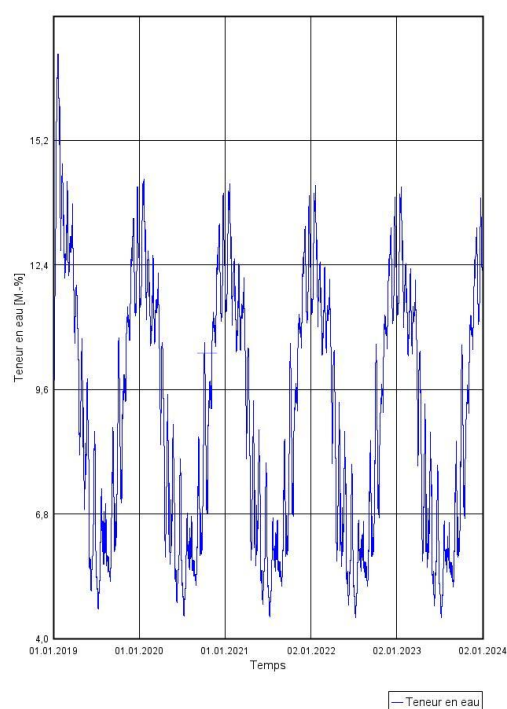


Figure 65 : Teneur en eau en masse à l'interface mur /isolant (« TH1 » en mesure in situ)

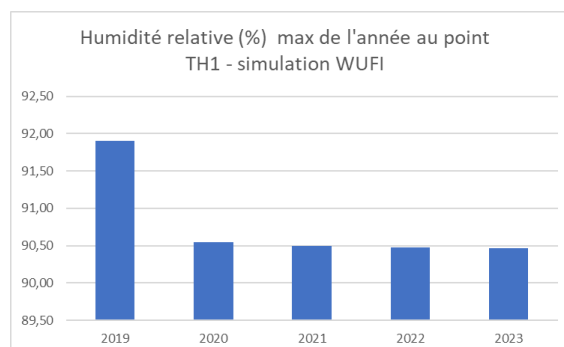


Figure 66 : Zoom sur l'humidité relative maximum calculée par année au point de contact mur/isolant (TH1)

Avec ce climat intérieur, tous les critères de SimHuBat sont respectés. La teneur en eau totale n'augmente pas d'année et année, et la teneur à l'interface mur-isolant (TH1) ne dépasse jamais 23%.

Comparaison entre mesure et simulation

Le graphique suivant présente la comparaison entre les résultats du calcul WUFI sur 5 ans et la mesure réalisée sur 1 an, à l'interface entre le mur et l'isolant (TH1) :

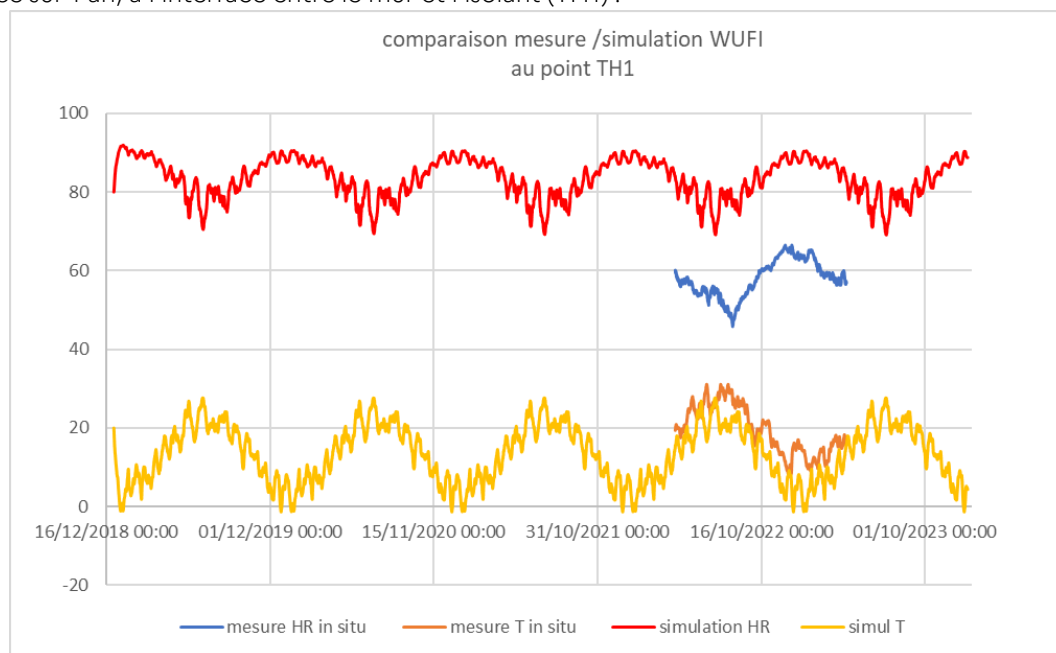


Figure 67 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative et de la température à l'interface mur/isolant nommée TH1 entre la simulation WUFI (5ans) et la mesure in situ (1 an)

Pour une meilleure visibilité, on zoome sur l'année de mesure (année 5 de la simulation) :

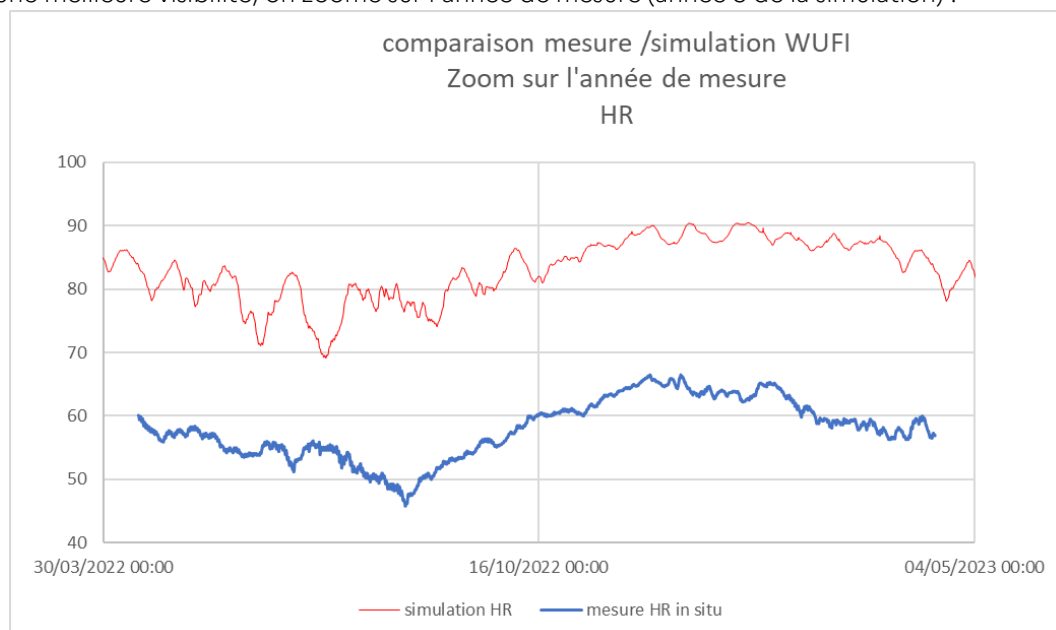


Figure 68 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative entre simulation et mesure in situ/ zoom sur l'année de mesure, au point TH1

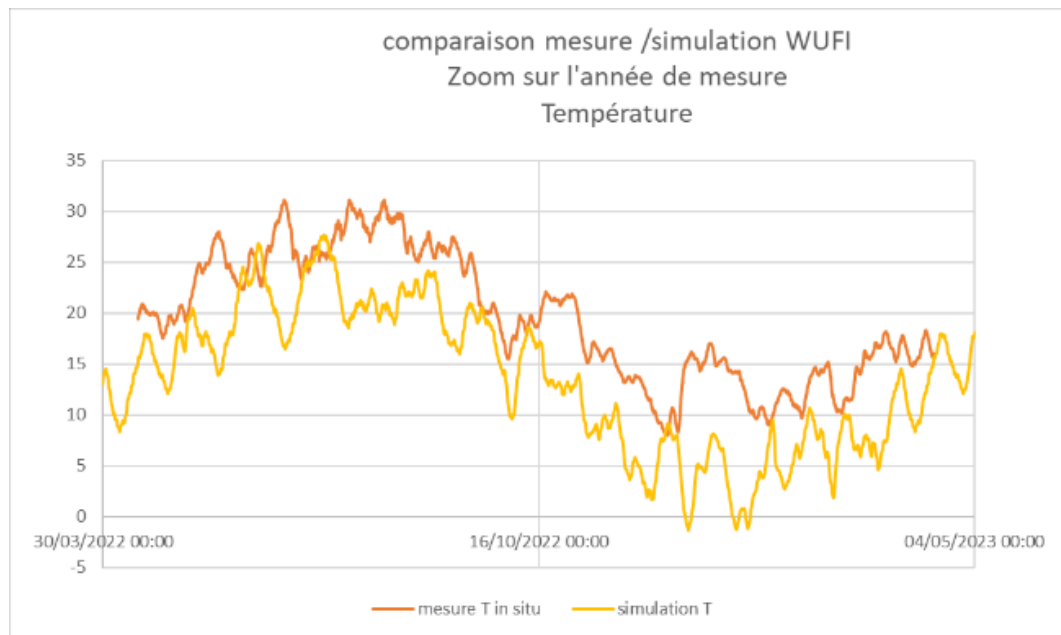


Figure 69 : comparaison de l'évolution de la température entre simulation et mesure in situ / zoom sur l'année de mesure, au point Th1

En prenant comme référence la cinquième année de simulation, afin de laisser s'établir les phénomènes, nous constatons au point TH1 que :

- les températures simulées et mesurées suivent les mêmes variations, cependant la température mesurée in situ est quasi systématiquement plus élevée que la température simulée, de l'ordre de 6 °C en moyenne, avec un écart maximum de 17°C ;
- l'humidité relative simulée
 - o est très élevée en comparaison de l'humidité relative mesurée. L'écart est important : en moyenne un écart de 25 points entre l'HR simulée et l'HR mesurée. Un écart maximal constaté de 33%
 - o le seuil où la teneur en eau est supérieure à 23% ou HR supérieure à 93,8% n'est pas atteint

Conclusion sur Jura A – Variante 3

Tous les critères de SimHuBat sont respectés, notamment la teneur en eau qui reste inférieure à 23%.

Synthèse sur les critères de SimHuBat pour la simulation, et rappel des mesures en TH1 pour Jura A :

Critères	Description	Simulation WUFI		Mesure in situ		
		Mur au global	TH1 : mur / isolant	Jura A Chambre - TH1	Jura A Salon - TH1	Jura A Salle de bain - TH1
1	Teneur en eau stable ou diminue					
2	Pas de condensation (HR > 98%)					
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)					
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment					
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait					

La simulation reste toujours beaucoup plus pessimiste que la mesure in situ, notamment au niveau des HR à l'interface entre mur et isolant (25 points de HR en plus en moyenne dans la simulation par rapport à la mesure).

3.3.4 Variante 4 – Climat ext. année réelle / int. ISO 13788 classe 1

Paramètres

Climats :

- Climat extérieur : météo au format. WAC, créée avec les données de l'API Météo-France pour Lons le Saunier pour la température et l'humidité relative pour la même période que l'année de mesure. Le reste des données provient de Météonorm 8
- Climat int. : WUFI selon la norme ISO 13788 humidité classe 1, soit de classe d'humidité faible.

Un graphique de comparaison des différents climats intérieurs a été présenté au §3.3.1.

Résultats de simulation

Ci-dessous sont résumés les résultats de la simulation sur 5 ans sous Wufi 2D :

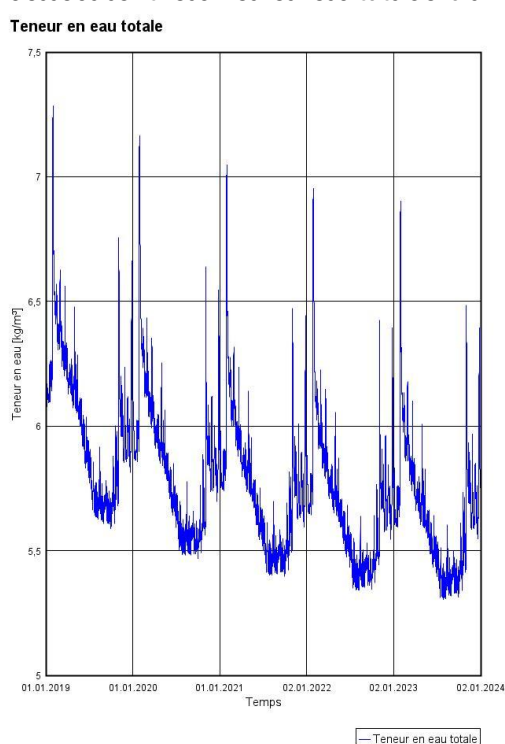


Figure 70 : Teneur en eau en masse du mur sur la période de simulation

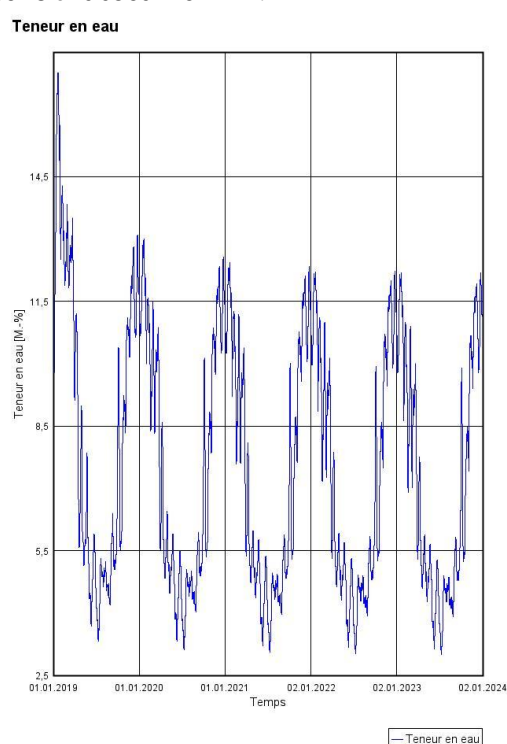


Figure 71 : Teneur en eau en masse à l'interface mur /isolant (« TH1 » en mesure in situ)

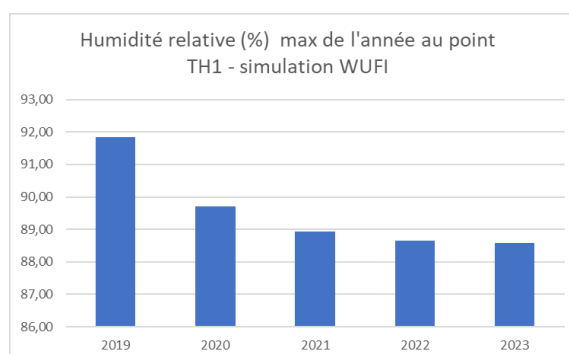


Figure 72 : Zoom sur l'humidité relative maximum calculée par année au point de contact mur/isolant (TH1)

Avec ce climat intérieur, tous les critères de SimHuBat sont respectés. La teneur en eau totale diminue et la teneur à l'interface mur-isolant (TH1) ne dépasse jamais 23%.

Comparaison entre mesure et simulation

Le graphique suivant présente la comparaison entre les résultats du calcul WUFI sur 5 ans et la mesure réalisée sur 1 an, à l'interface entre le mur et l'isolant (TH1) :

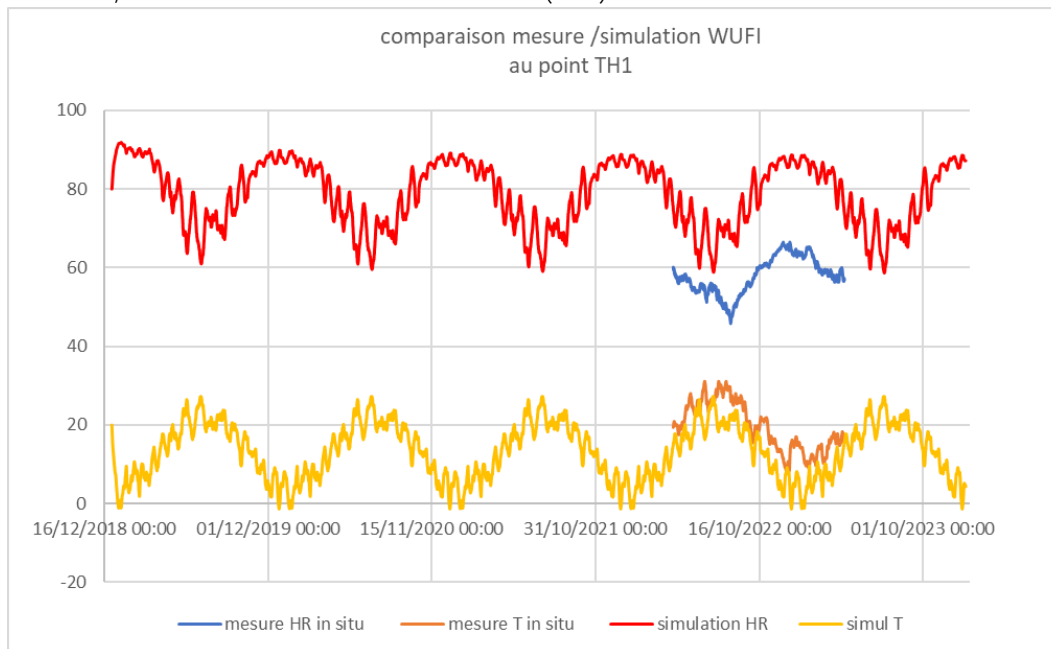


Figure 73 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative et de la température à l'interface mur/isolant nommée TH1 entre la simulation WUFI (5 ans) et la mesure in situ (1 an)

Pour une meilleure visibilité, on zoome sur l'année de mesure (année 5 de la simulation) :

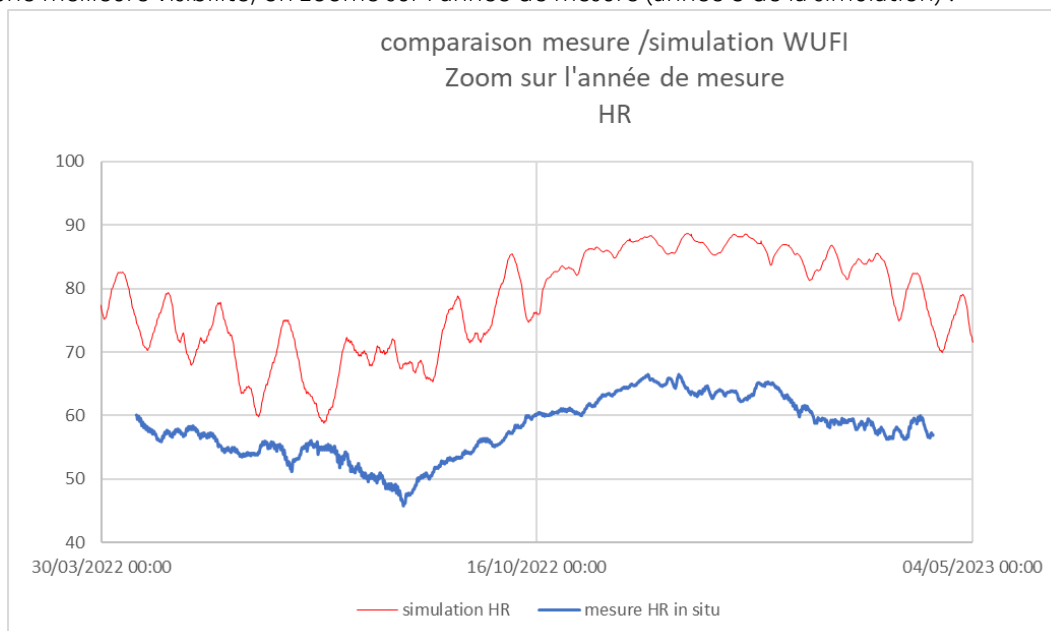


Figure 74 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative entre simulation et mesure in situ/ zoom sur l'année de mesure, au point TH1

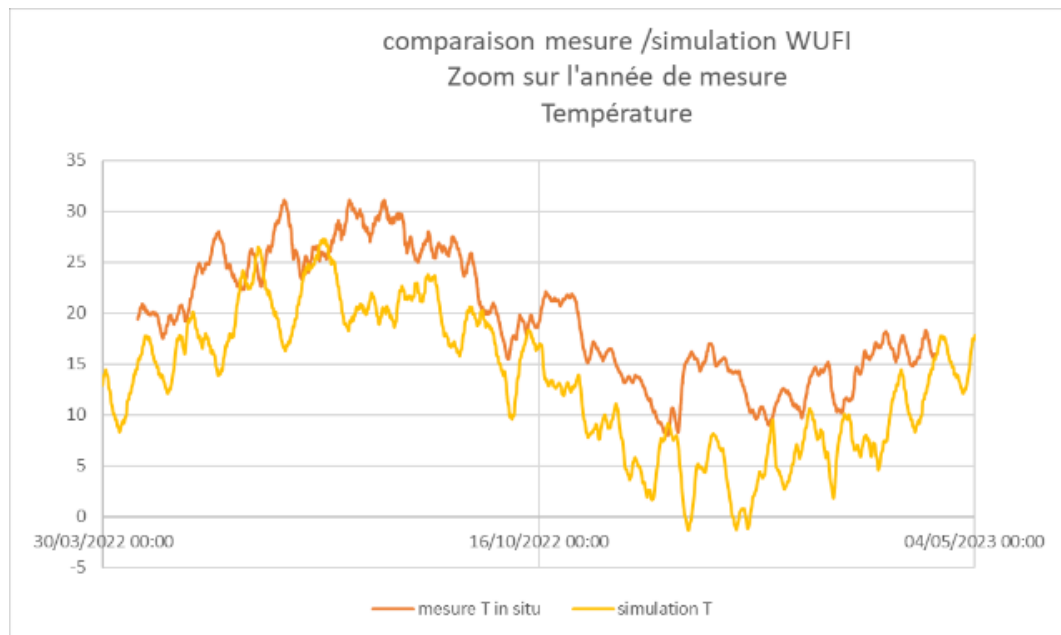


Figure 75 : comparaison de l'évolution de la température entre simulation et mesure in situ / zoom sur l'année de mesure, au point TH1

En prenant comme référence la cinquième année de simulation, afin de laisser s'établir les phénomènes, nous constatons au point TH1 que :

- les températures simulées et mesurées suivent les mêmes variations, cependant la température mesurée in situ est quasi systématiquement plus élevée que la température simulée, de l'ordre de 6,2 °C en moyenne, avec un écart maximum de 17°C ;
- l'humidité relative simulée :
 - o est très élevée en comparaison de l'humidité relative mesurée. L'écart est important : en moyenne un écart de 20 points entre l'HR simulée et l'HR mesurée. Un écart maximal constaté de 29% ;
 - o le seuil où la teneur en eau est supérieure à 23% ou HR supérieure à 93,8% n'est pas atteint.

Conclusion sur Jura A – Variante 4

Tous les critères de SimHuBat sont respectés, notamment la teneur en eau qui reste inférieure à 23%.

Synthèse sur les critères de SimHuBat pour la simulation, et rappel des mesures en TH1 pour Jura A :

Critères	Description	Simulation WUFI		Mesure in situ		
		Mur au global	TH1 : mur / isolant	Jura A Chambre - TH1	Jura A Salon - TH1	Jura A Salle de bain - TH1
1	Teneur en eau stable ou diminue					
2	Pas de condensation (HR > 98%)					
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)					
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment					
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait					

La simulation reste plus pessimiste que la mesure in situ, notamment au niveau des HR à l'interface entre mur et isolant (20 points de HR en plus en moyenne par rapport à la mesure).

3.3.5 Conclusions sur les Simulations Jura A

Le tableau suivant résume le résultat des 4 variantes simulées pour Jura A :

Paramètres		Simulation WUFI			
Climat extérieur		Météo de Lons le Saunier pour l'année de mesure			
Critères	Climat intérieur	Mesuré Jura A	WTA6-2 humidité moyenne	WTA6-2 humidité moyenne +5%	ISO 13788 classe 1
1	Teneur en eau stable ou diminue				
2	Pas de condensation (HR > 98%)				
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)				
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment				
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait				

Conclusion du point de vue du concepteur qui utilise WUFI

Si nous avons simulé ce type de mur dans le Jura en tant que concepteur sans avoir les données de mesure in situ, nous aurions pu utiliser le climat extérieur de Lons le Saunier.

En climat intérieur, pour ce logement pourvu d'une VMC, nous aurions probablement utilisé un climat intérieur normé comme WTA6-2 humidité moyenne.

Ceci correspond à la Variante 2 : le calcul WUFI nous aurait indiqué que la paroi ne présente pas de risque pathologique.

Cette absence de risque est confirmée dans la réalité mesurée pour Jura A, pour les 3 murs instrumentés.

Conclusion sur le caractère pessimiste ou optimiste de WUFI

La simulation qui se rapproche le plus de la réalité mesurée est la variante 1, avec la météo de l'année de la mesure et le climat intérieur mesuré.

Pour cette variante, on note que **les résultats présentés par WUFI sont bien plus pessimistes que les mesures effectuées** (voir [§3.3.1](#)). En particulier l'humidité au contact entre le mur et l'isolant est très élevée dans la simulation (entre 70 et plus de 90% HR pour l'année 5) alors que la réalité mesurée varie entre 45% et moins de 70% à 75% selon les murs instrumentés (voir [§2.1.2](#)).

3.4 Simulations JURA C

Rappel des caractéristiques du logement

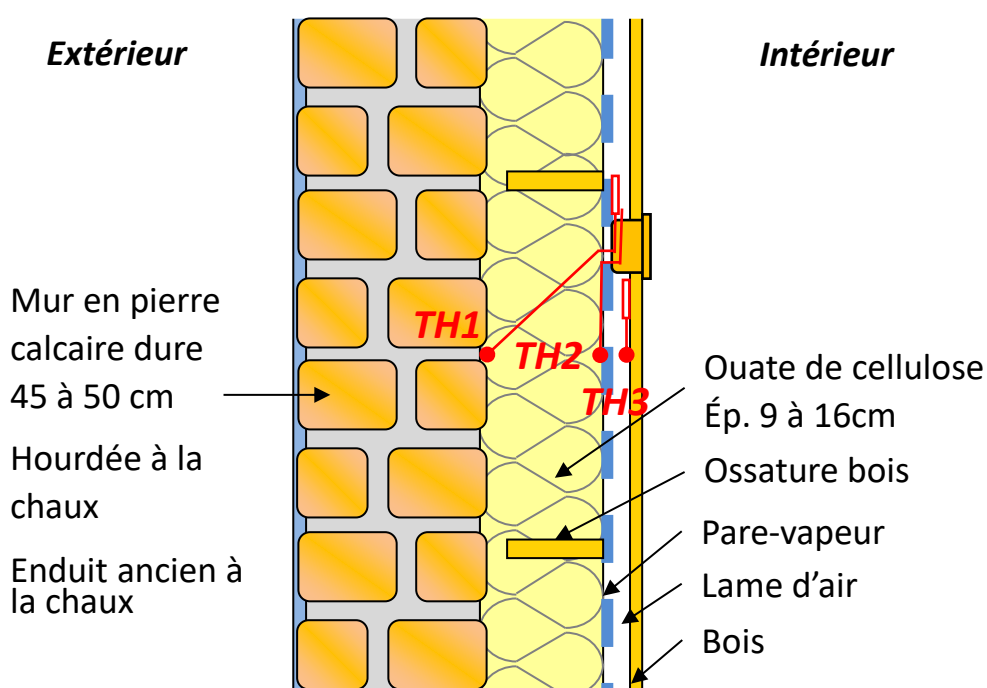
Département : Jura (39)

Altitude : 1240 m

Description du mur : Mur moellons (50cm d'épaisseur) de pierres calcaires dures hourdées à la chaux. Enduit extérieur ancien à la chaux, dégradé. Côté intérieur : enduit chaux et/ou plâtre.

ITI en Ouate de cellulose 12 et 16 cm pour les chambres, 9 cm pour le bureau), Pare-vapeur SALOLA AéroVap SD 18+ pour les chambres, indéterminé pour le bureau, 2,5cm de vide d'air pour les chambres, pas de lame d'air pour le bureau, parement bois (non encore posé pour la chambre NO).

Isolation réalisée 15 ans avant l'instrumentation pour le bureau, 1 an avant pour les chambres.



Ventilation : pas de VMC, ouverture des fenêtres.

Pièces instrumentées et orientation :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre Nord-Ouest	Mur Nord (parement pas encore posé)	R+1	N-E	Interrupteur
Chambre « woofing »	Mur Ouest	R+1	N-O	Prise basse
Bureau	Mur Ouest (pas de vide technique, seulement 9cm de ouate)	R+1	N-O	Prise basse

Paramètres complémentaires de simulation WUFI :

Référence des matériaux utilisés :

Matériaux	Variantes	Référence base WUFI	Epaisseur (mm)
Enduit extérieur	Sans		
Pierre	Calcaire	Pierre calcaire Krensheimer shelly	500
Joint	Chaux	Enduit à la chaux (valeur A : 3 kg/m ² h ^{0.5})	20
Enduit d'égalisation intérieur (entre mur et isolant)	Sans		
Isolant	Ouate de cellulose insufflée	Fibre de cellulose	160
Membrane	Pare-vapeur	Pare-vapeur (Sd=20m)	1
Parement	Non intégré dans les simulations		

Les caractéristiques de ces matériaux sont indiquées au [§3.1.3](#).

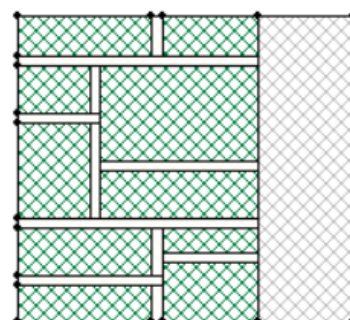
Géométrie du mur

Il s'agit d'un assemblage de blocs plein de pierre de 10 à 30cm de hauteur et 10 à 30cm de profondeur pour une épaisseur de mur fini de 50cm.

Les joints entre pierres ont une largeur 2cm. On considère que toutes les 2 rangées, le joint n'est plus traversant de l'intérieur vers l'extérieur.

Ainsi la constitution du mur est la suivante :

- Mur en pierre Calcaire de 50cm de large
- Joint à la chaux de 2cm de largeur
- Isolant en ouate de cellulose de 16 cm
- Pare-vapeur (Sd=20m)



Climat extérieur :

La station la plus proche de cette maison est la station de La Pesse mais elle ne possède pas toutes les données nécessaires pour le calcul WUFI.

Nous allons tester deux types de climat extérieur :

- A : Le climat de Lons le Saunier qui est sur la base WUFI : climat issu de Météo-France pour l'année 2010.

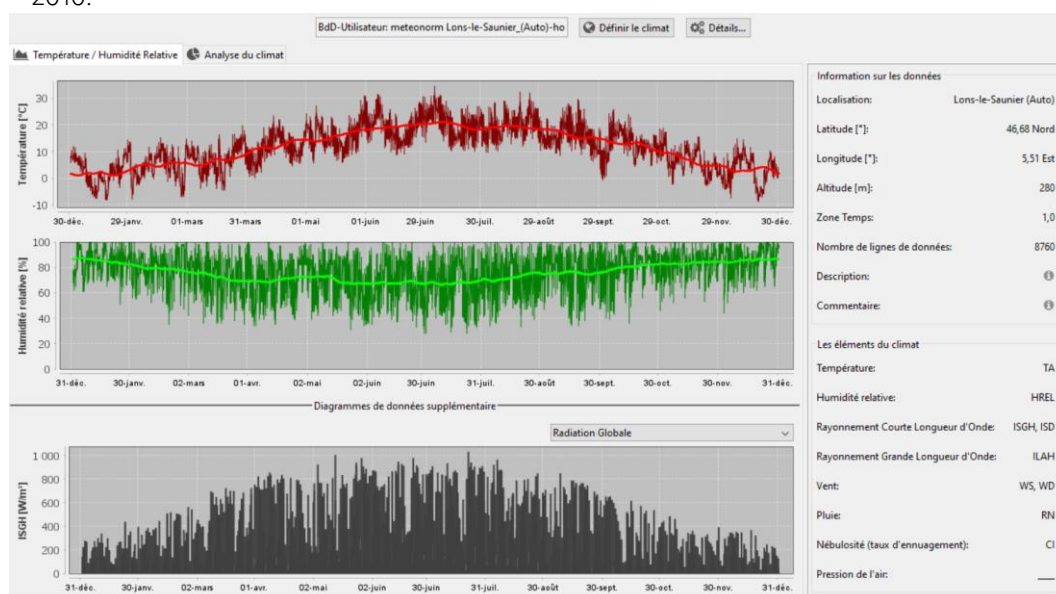


Figure 76 : météo de Lons le Saunier sur 1 an , issue de la base WUFI

- B : un climat créé à base :
 - o des données publiques de l'API Météo-France de la station de La Pesse pour les paramètres Température de l'air, HR, direction et vitesse de vent, et pluie ;
 - o des données de Météonorm pour la station de Lons le Saunier pour les paramètres de rayonnement car la station de La Pesse ne possède que les données de radiation globale.

NB : pour ce climat les données réelles des 5 ans de simulation ont été prises (plutôt que de répéter la même année 5 fois).

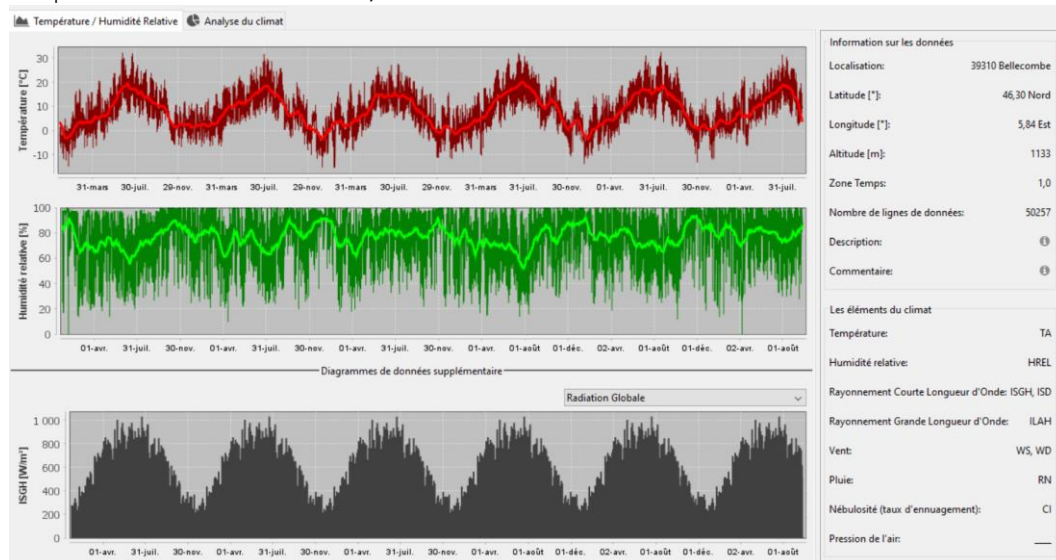


Figure 77 : météo créée sur 5 ans à partir des données (T° , HR, vent, pluie) de la station de La Pesse, et de Lons le Saunier (Météonorm) pour le rayonnement

Durée de la simulation :

Simulations effectuées sur 5 ans afin d'évaluer l'évolution des teneurs en eau dans le mur et ses couches.

Variantes simulées :

Pour Jura C nous effectuerons une série de 3 simulations afin d'étudier des variantes sur les climats intérieurs et extérieurs.

3.4.1 Variante 1 – Climat ext. année réelle / int. mesuré Jura C

Paramètres

Climats :

- Climat extérieur « B » : météo au format .WAC, créée avec les données de l'API Météo-France pour La Pesse pour T° , HR, vent, pluie sur 5 ans + Météonorm 8 de Lons le Saunier pour le rayonnement.
- Climat int. : mesures in situ au format .WAC élaboré à partir du climat intérieur mesuré du 18/05/2023 au 18/05/2024, soit dans la chambre NO, soit dans le bureau de la maison Jura C.

Un graphique de comparaison des 2 climats extérieurs a été effectué au [§3.4](#).

Résultats de simulation

Ci-dessous sont résumés les résultats de la simulation sur 5 ans sous Wufi 2D. Nous comparerons les résultats pour les deux climats intérieurs mesurés intégrés dans la simulation : soit celui de la chambre NO, soit celui du bureau :

Climat intérieur Chambre

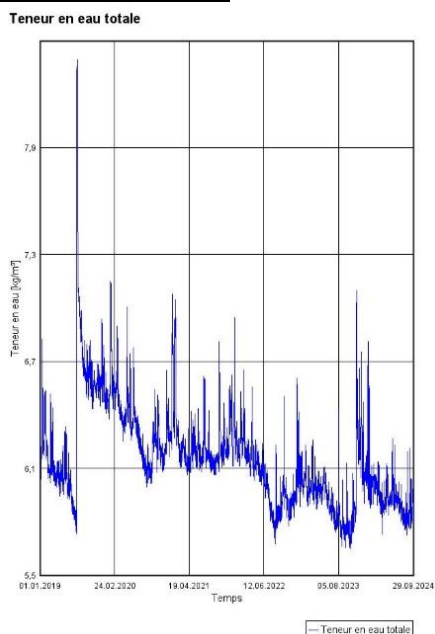


Figure 78 : Teneur en eau en masse du mur sur la période de simulation - Chambre

Climat intérieur Bureau

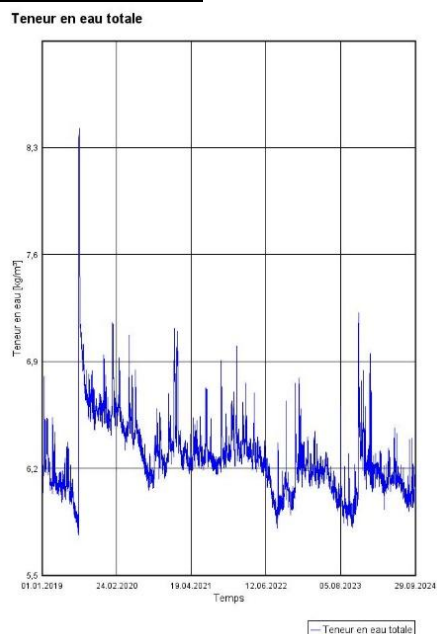


Figure 79 : Teneur en eau en masse du mur sur la période de simulation - Bureau

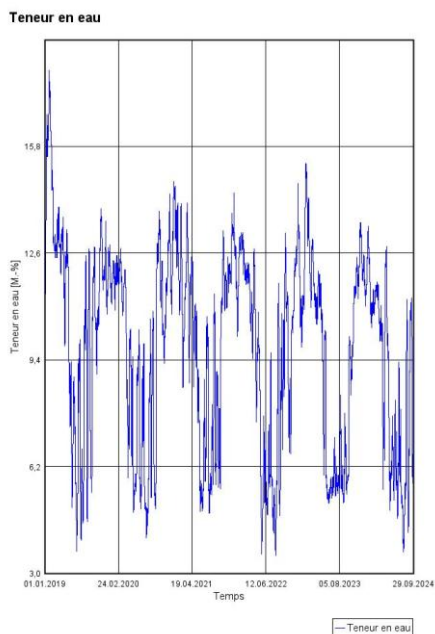


Figure 80 : Teneur en eau en masse à l'interface mur /isolant (« TH1 ») - Chambre

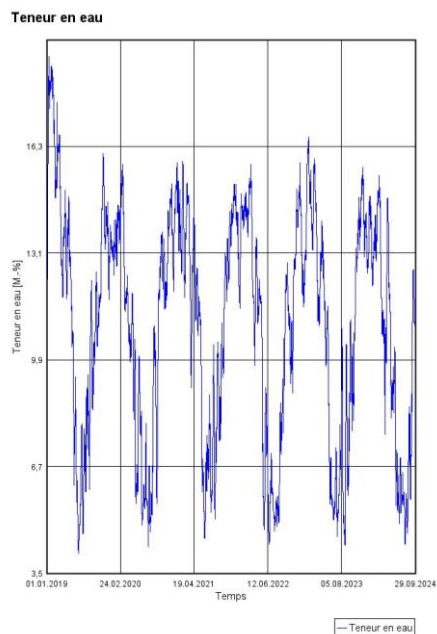


Figure 81 : Teneur en eau en masse à l'interface mur /isolant (« TH1 ») - Bureau

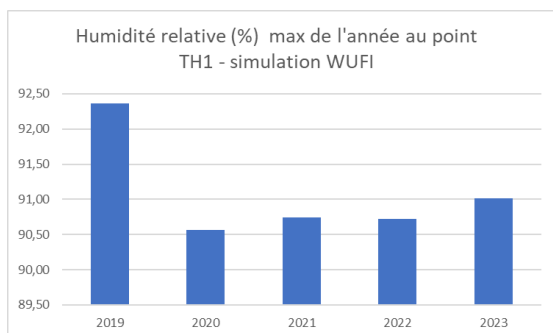


Figure 82 : Zoom sur l'humidité relative maximum observée par année au point de contact mur/isolant TH1 - Chambre

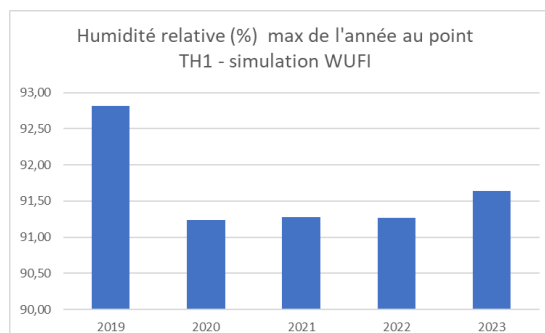


Figure 83 : Zoom sur l'humidité relative maximum observée par année au point de contact mur/isolant TH1 - Bureau

Pour le critère 1 de SimHuBat, comme visualisé sur les Figures 78 et 79, la teneur en eau globale du mur est plutôt en diminution sur 5 ans.

La teneur en eau à l'interface entre mur et isolant (TH1) est plutôt stable, et en diminution par rapport à l'année 1.

Toutefois les valeurs maximales au global en TH1 fluctuent d'une année sur l'autre, ce qui est probablement dû au fichier météo utilisé qui est composé de 5 années consécutives plutôt que la même année qui se répète 5 fois.

Vue la dynamique globale de séchage, nous considérons que cette fluctuation du point maximum n'est pas significative et que le critère 1 de SimHuBat est respecté.

Une variante a été effectuée sur 10 ans en réinjectant dans la simulation le climat extérieur de 2019 à 2024 une seconde fois pour la période 2024 – 2029. Cette variante montre que l'HR en TH1 reste stable, mais assez haute effectivement – sans toutefois approcher le seuil de 23% en masse du critère 3.

Cette variante confirme selon nous que le mur respecte les critères de SimHuBat.

Comparaison entre mesure et simulation

Le graphique suivant présente la comparaison entre les résultats du calcul WUFI sur 5 ans et la mesure réalisée sur 1 an, à l'interface entre le mur et l'isolant (TH1) pour la chambre NO et le bureau

Avec climat intérieur Chambre

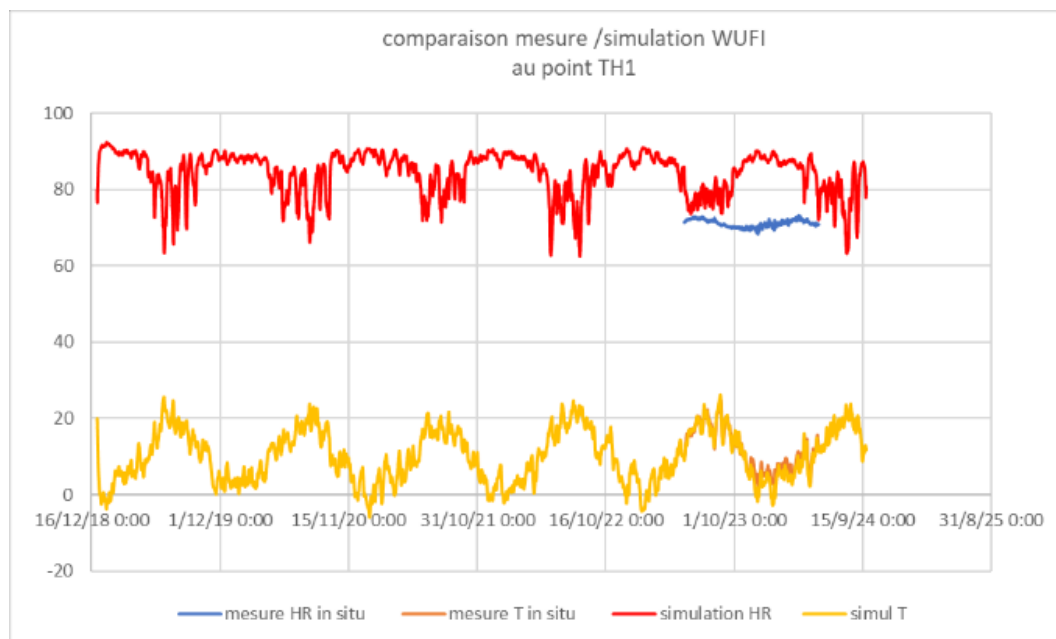


Figure 84 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative et de la température à l'interface mur/isolant nommée TH1 entre la simulation WUFI (5 ans) et la mesure in situ (1 an)

Avec climat intérieur Bureau

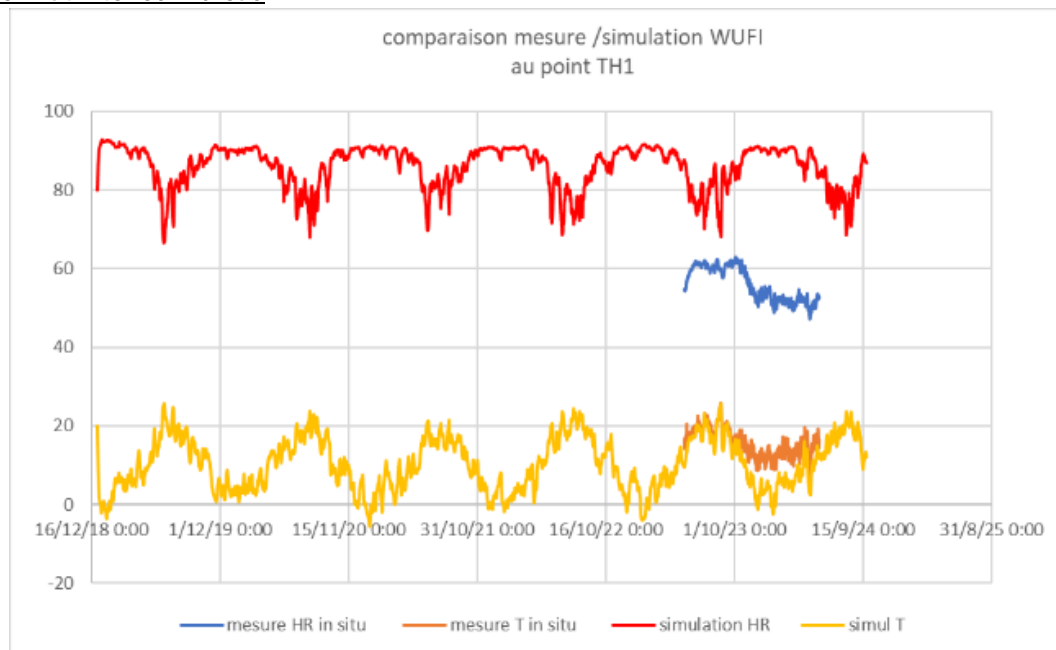


Figure 85 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative et de la température à l'interface mur/isolant nommée TH1 entre la simulation WUFI (5 ans) et la mesure in situ (1 an)

Pour une meilleure visibilité, on zoome sur l'année de mesure (année 5 de la simulation) :

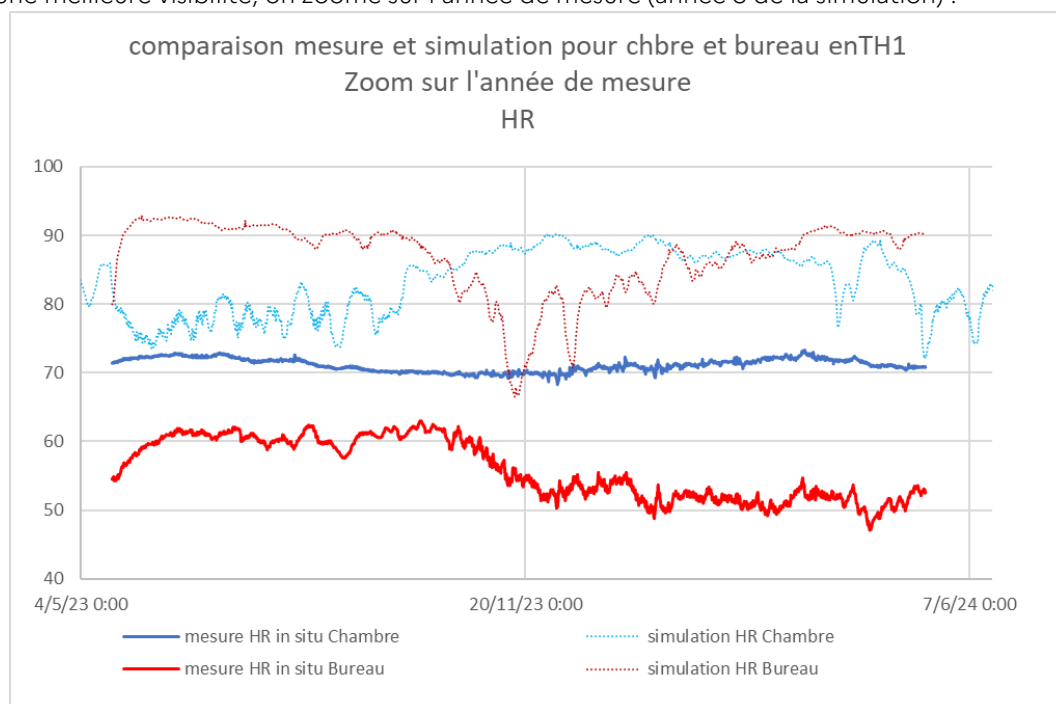


Figure 86 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative entre simulation et mesure in situ - zoom sur l'année de mesure, au point TH1

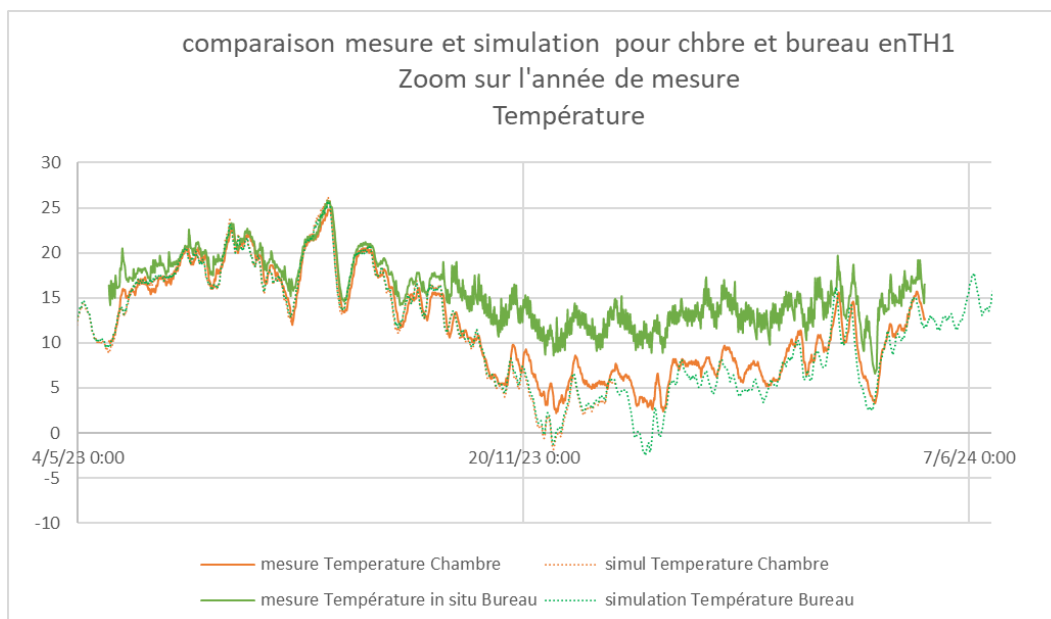


Figure 87 : comparaison de l'évolution de la température entre simulation et mesure in situ - zoom sur l'année de mesure, au point TH1

En prenant comme référence la cinquième année de simulation, afin de laisser s'établir les phénomènes, nous constatons au point TH1 que :

- les températures simulées et mesurées suivent les mêmes variations et sont quasi identiques de mai à novembre. Cependant la température mesurée in situ est quasi systématiquement plus élevée que la température simulée, de l'ordre de 1°C en moyenne pour la chambre et de 4°C en moyenne pour le bureau, avec un écart maximum de 4°C pour la chambre et de 14°C pour le bureau. On peut noter que pour le bureau le pare-vapeur n'est pas continu et que la sonde de température est proche d'un tuyau de chauffage, ce qui pourrait expliquer en partie cet écart de Température entre la mesure et la simulation.
- l'humidité relative simulée :
 - o est élevée en comparaison de l'humidité relative mesurée. L'écart est important : en moyenne un écart de 12 points pour la chambre et de 29 points pour le bureau. L'écart maximal constaté est de 21 points pour la chambre et de 41 points pour le bureau ;
 - o globalement l'amplitude des variations d'HR dans la simulation est supérieure à la mesure. L'inertie hygrothermique du complexe mur/isolant n'est pas bien retranscrite par la simulation.
 - o le seuil où la teneur en eau est supérieure à 23% (soit HR supérieure à 93,8%) n'est pas atteint, ni pour la chambre, ni pour le bureau.

Conclusion sur Jura C – Variante 1

Tous les critères de SimHuBat sont respectés, notamment la teneur en eau qui reste inférieure à 23%.

Synthèse sur les critères de SimHuBat pour la simulation, et rappel des mesures en TH1 pour Jura C :

Critères	Description	Simulation WUFI		Mesure in situ		
		Mur au global	TH1 : mur / isolant	Jura C Bureau - TH1	Jura C Chambre NO - TH1	Jura A Ch. woofing - TH1

1	Teneur en eau stable ou diminue					
2	Pas de condensation (HR > 98%)					
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)					
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment					
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait					

La simulation reste plus à beaucoup plus pessimiste que la mesure in situ, notamment au niveau des HR à l'interface entre mur et isolant (12% de HR en plus dans la simulation par rapport à la mesure pour la chambre 29% pour le bureau).

La simulation ne reflète pas bien l'inertie hygrothermique du complexe mur/isolant, avec une amplitude de variation de l'humidité relative à l'interface entre le mur et l'isolant bien supérieure à la mesure. Cette conclusion peut être modérée en se rappelant que la mesure in situ dans le bureau n'est pas exacte du fait de la présence d'un tuyau de chauffage assez proche et d'une discontinuité du pare-vapeur.

Nous allons par la suite varier avec des climats intérieurs normés selon l'EN 15026/WTa 6-2 et selon l'ISO 13788.

3.4.2 Variante 2 – Climat ext. année réelle / int. normé WTA et ISO

Paramètres

Climats :

- Climat extérieur « B » : météo au format .WAC, créée avec les données de l'API Météo-France pour La Pesse pour T°, HR, vent, pluie sur 5 ans + Meteonorm 8 de Lons le Saunier pour le rayonnement.
- Climat intérieur : soit selon la norme EN 15026 : WTA 6-2 humidité moyenne, soit selon l'ISO 13788 classe 1 d'humidité.

Un graphique de comparaison des 2 climats extérieur a été présenté au [§3.4](#).

Résultats de simulation

Ci-dessous sont résumés les résultats de la simulation sur 5 ans sous Wufi 2D. Nous comparerons les résultats pour les deux climats intérieurs normés :

Climat intérieur selon EN 15026 / WTA 6 2 humidité moyenne

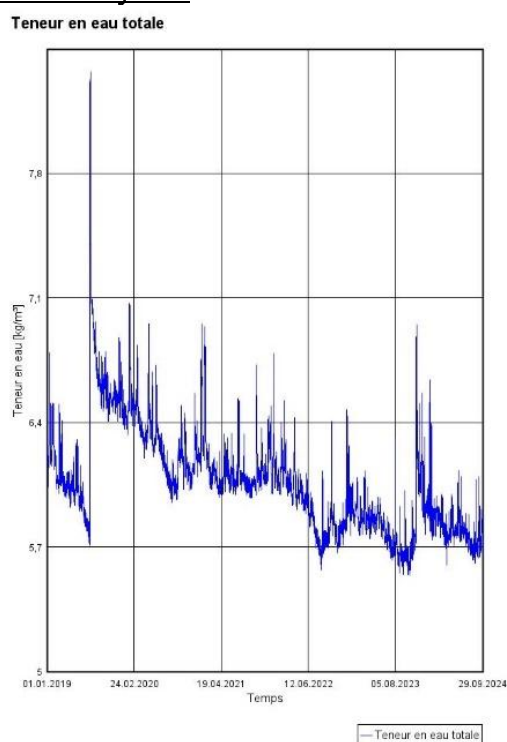


Figure 88 : Teneur en eau en masse du mur sur la période de simulation – climat int. WTA

Climat intérieur selon l'ISO 13788 classe 1 d'humidité

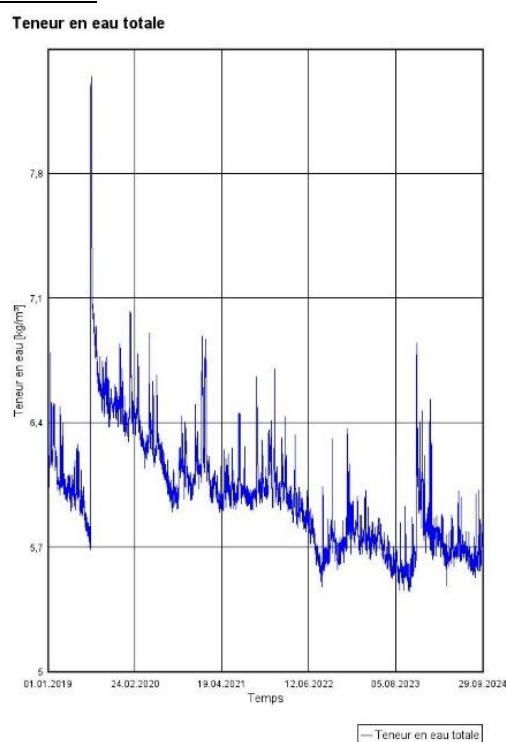


Figure 89 : Teneur en eau en masse du mur sur la période de simulation - climat int. ISO

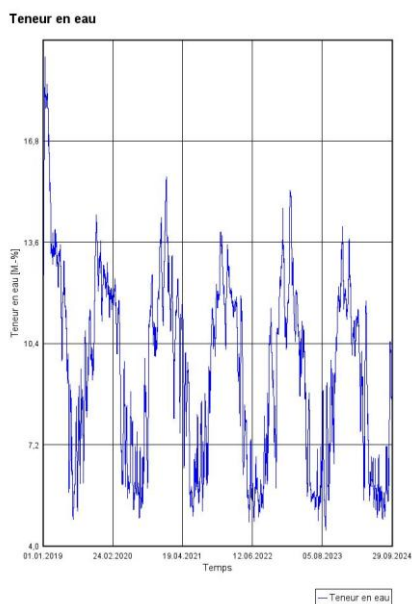


Figure 90 : Teneur en eau en masse à l'interface mur /isolant (« TH1 ») – climat int. WTA

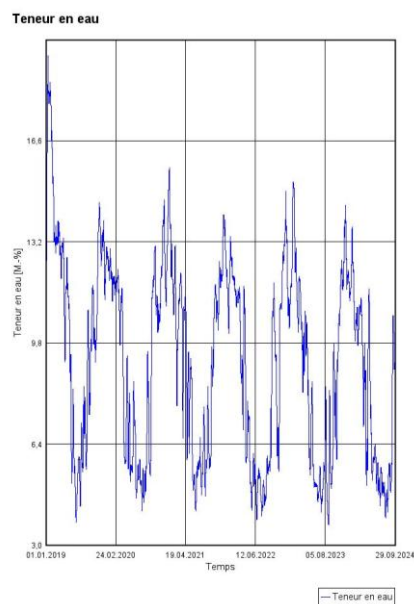


Figure 91 : Teneur en eau en masse à l'interface mur /isolant (« TH1 ») - climat int. ISO

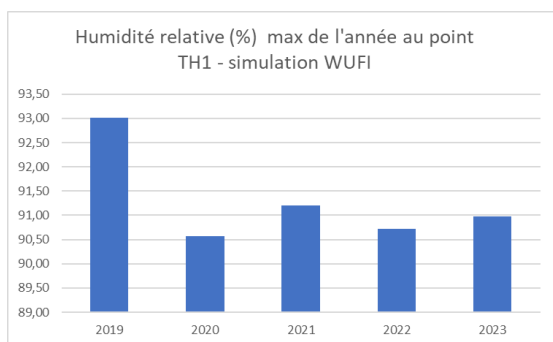


Figure 92 : Zoom sur l'humidité relative maximum observée par année au point de contact mur/isolant TH1 – climat int. WTA

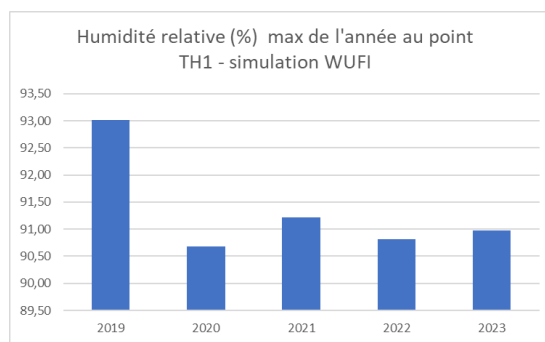


Figure 93 : Zoom sur l'humidité relative maximum observée par année au point de contact mur/isolant TH1 - climat int. ISO

Les résultats des 2 simulations avec les deux climats normés sont très proches.

Le critère 1, comme visualisé sur la Figure 88 et 89, la teneur en eau globale du mur est plutôt stable. Toutefois les valeurs maximales au global et en TH1 semblent osciller sur les dernières années.

Pour s'assurer que le critère 1 est bien respecté, nous prolongeons le calcul sur 10 ans :

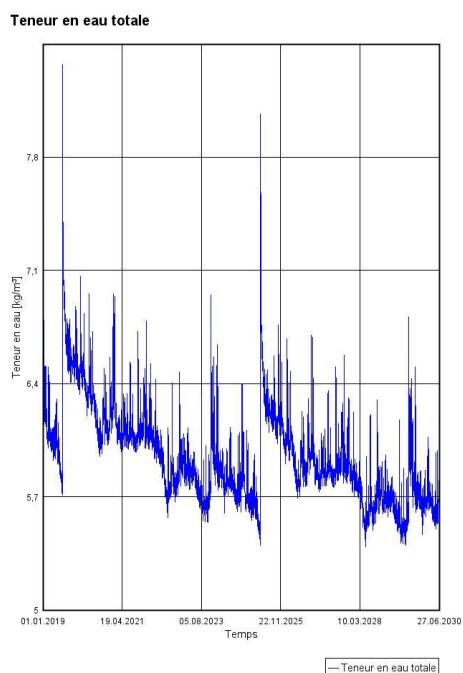


Figure 94 : Teneur en eau en masse du mur sur la période de simulation

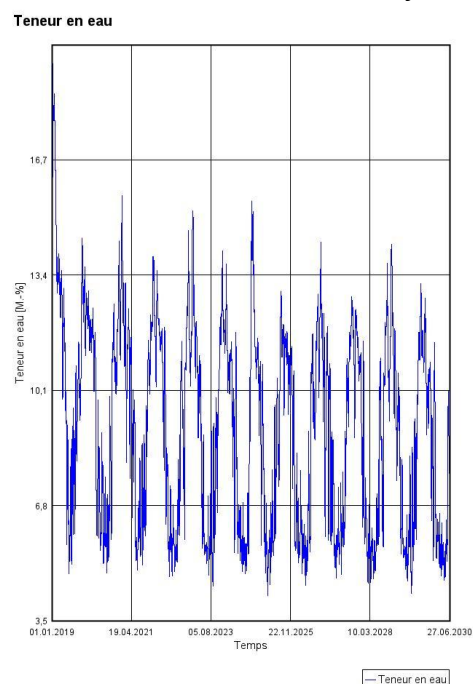


Figure 95 : Teneur en eau en masse à l'interface mur /isolant (« TH1 ») en mesure in situ

Cette simulation sur 10 ans prouve qu'il y a bien une dynamique globale de séchage. **Le critère 1 de SimHuBat est bien respecté.**

Pour le critère 3, la teneur en eau en masse au point critique interface mur /isolant (TH1), visualisé sur les figures 90 et 91 reste sous les 20%, soit une valeur inférieure aux 23% du critère 3.

Comparaison entre mesure et simulation

Le graphique suivant présente la comparaison entre les résultats du calcul WUFI sur 5 ans et la mesure réalisée sur 1 an de la chambre NO, à l'interface entre le mur et l'isolant (TH1) :

Avec climat intérieur selon EN 15026/WTa -6-2

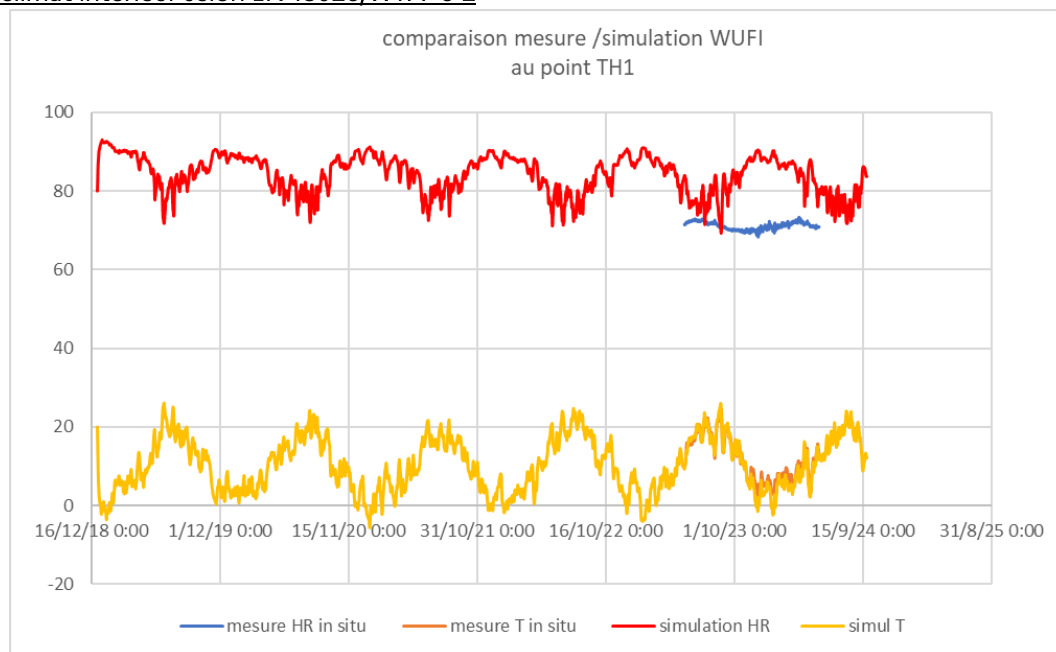


Figure 96 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative et de la température à l'interface mur/isolant nommée TH1 entre la simulation WUFI (5ans) et la mesure in situ (1 an) chambre NO

Avec climat intérieur selon ISO 13788 classe 1 d'humidité

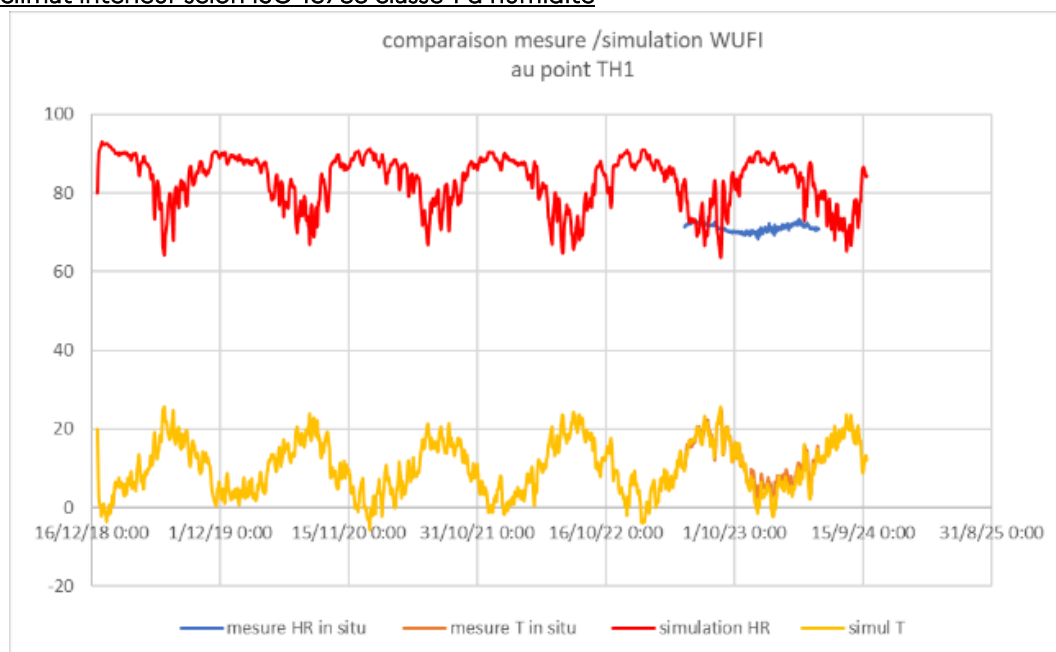


Figure 97 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative et de la température à l'interface mur/isolant nommée TH1 entre la simulation WUFI (5ans) et la mesure in situ (1 an) chambre NO

Pour une meilleure visibilité, on zoome sur l'année de mesure (année 5 de la simulation) :

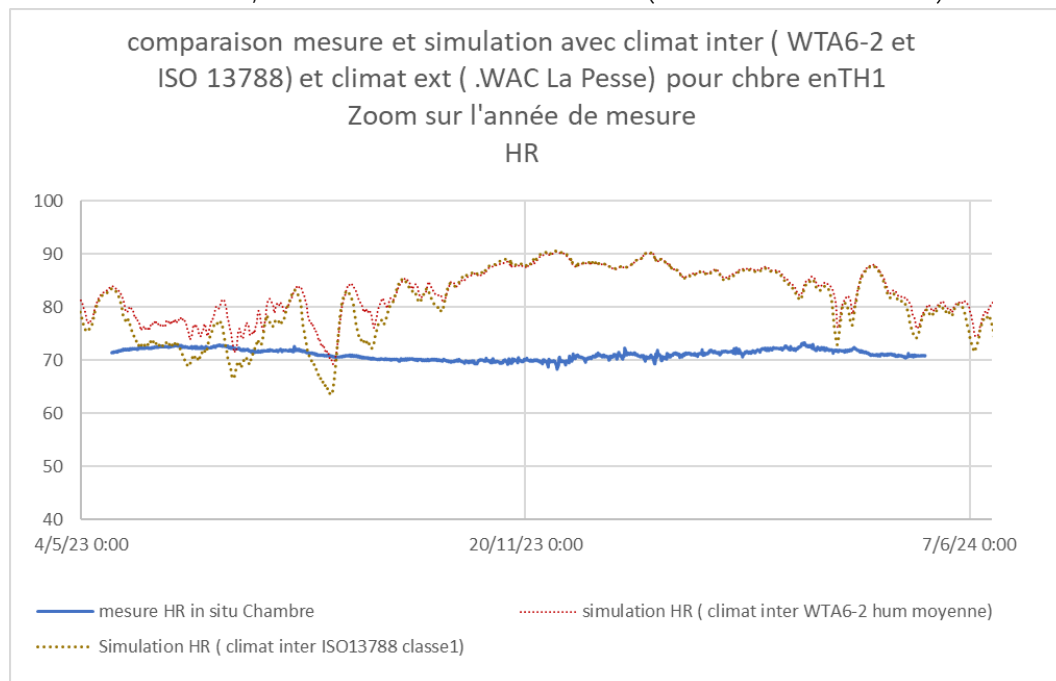


Figure 98 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative entre simulation et mesure in situ chambre NO - zoom sur l'année de mesure, au point TH1

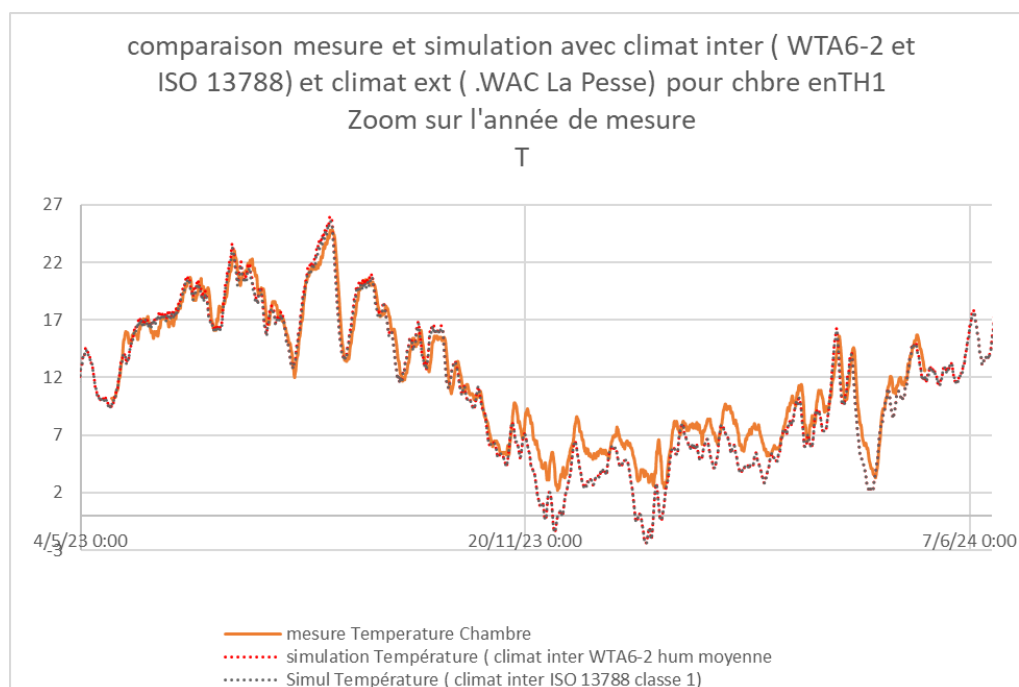


Figure 99 : comparaison de l'évolution de la température entre simulation et mesure in situ - zoom sur l'année de mesure, au point Th1 chambre NO

En prenant comme référence la cinquième année de simulation, afin de laisser s'établir les phénomènes, nous constatons au point TH1 que :

- Les températures simulées et mesurées suivent les mêmes variations et sont quasi identiques toute l'année, sauf un léger décalage en hiver, où la simulation indique une température plus basse que la mesure.
- L'humidité relative simulée :

- Est élevée en comparaison de l'humidité relative mesurée. L'écart atteint 20 points d'HR.
- Globalement l'amplitude des variations de HR dans la simulation est supérieure à la mesure. L'inertie hygrothermique du complexe mur/isolant n'est pas bien retranscrite par la simulation.
- Le seuil où la teneur en eau est supérieure à 23% (soit HR supérieure à 93,8%) n'est pas atteint, ni pour le climat WTA ni pour le climat ISO.

Conclusion sur Jura C – Variante 2

Tous les critères de SimHuBat sont respectés, notamment la teneur en eau qui reste inférieure à 23%.

Synthèse sur les critères de SimHuBat pour la simulation, et rappel des mesures en TH1 pour Jura C :

Critères	Description	Simulation WUFI		Mesure in situ		
		Mur au global	TH1 : mur / isolant	Jura C Bureau - TH1	Jura C Chambre NO - TH1	Jura A Ch. woofing - TH1
1	Teneur en eau stable ou diminue					
2	Pas de condensation (HR > 98%)					
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)					
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment					
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait					

La simulation reste plus pessimiste que la mesure in situ, avec une HR à l'interface entre mur et isolant plus élevée dans la simulation que dans la mesure. La simulation ne reflète pas bien l'inertie hygrothermique du complexe mur/isolant, avec une amplitude de variation de l'humidité relative à l'interface entre le mur et l'isolant bien supérieure à la mesure.

Nous allons par la suite varier le climat extérieur avec le climat « A » (base de données WUFI de Lons le Saunier 2010).

3.4.3 Variante 3 – Climat ext. WUFI / int. normé WTA et ISO

Paramètres

Climats :

- Climat extérieur « A » : météo de la base de données WUFI pour Lons le Saunier (2010).
- Climat intérieur : soit selon la norme EN 15026 : WTA 6-2 humidité moyenne soit selon l'ISO 13788 classe 1 d'humidité.

Un graphique de comparaison des 2 climats extérieur a été présenté au [§3.4](#).

Résultats de simulation

Ci-dessous sont résumés les résultats de la simulation sur 5 ans sous Wufi 2D. Nous comparerons les résultats pour les deux climats intérieurs normés :

Climat intérieur selon EN 15026 / WTA 6 2 humidité moyenne

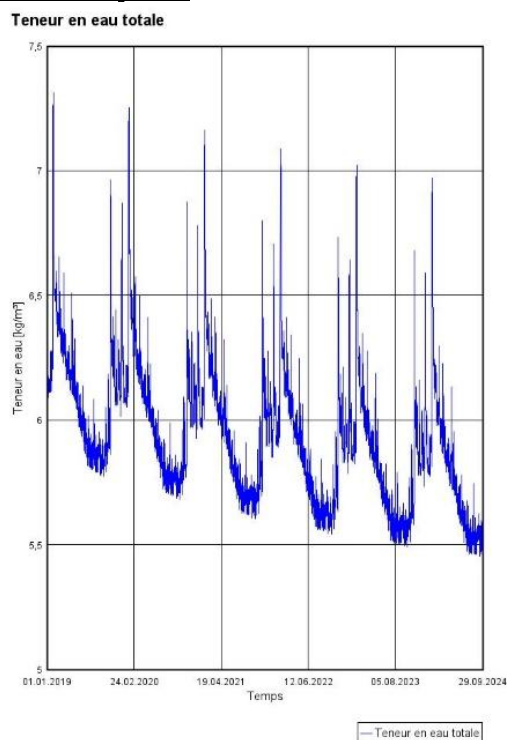


Figure 100 : Teneur en eau en masse du mur sur la période de simulation – climat int. WTA

Climat intérieur selon l'ISO 13788 classe 1 d'humidité

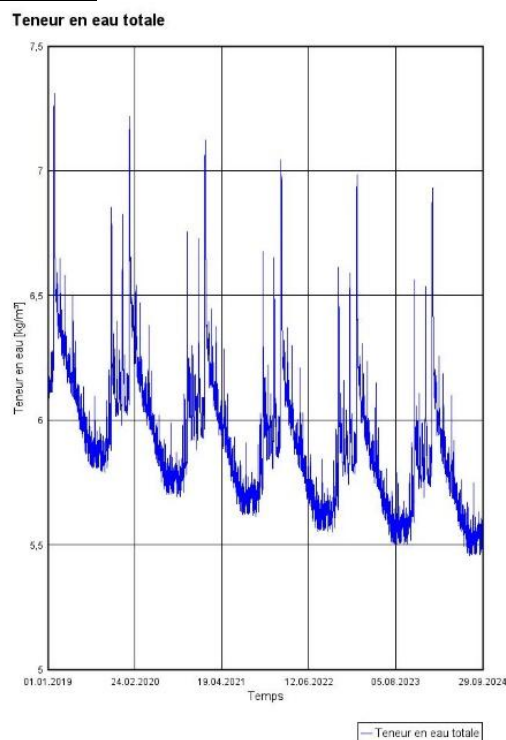


Figure 101 : Teneur en eau en masse du mur sur la période de simulation – climat int. ISO

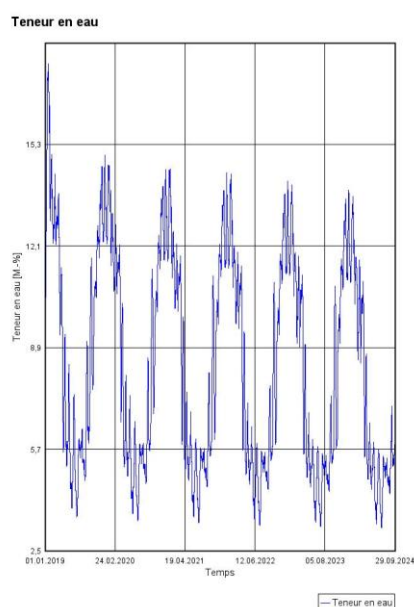
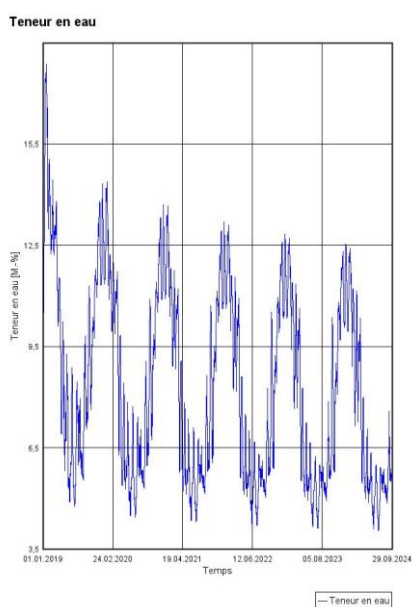


Figure 102 : Teneur en eau en masse à l'interface mur /isolant (« TH1 ») – climat int. WTA

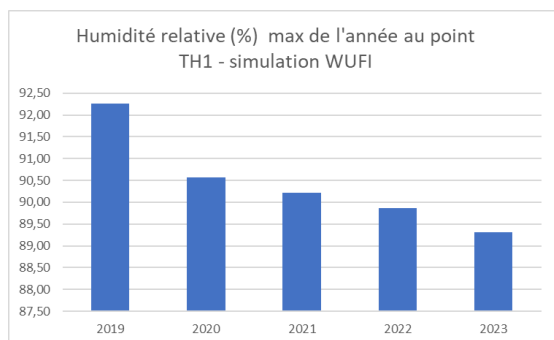


Figure 104 : Zoom sur l'humidité relative maximum observée par année au point de contact mur/isolant TH1 – climat int. WTA

Figure 103 : Teneur en eau en masse à l'interface mur /isolant (« TH1 ») - climat int. ISO

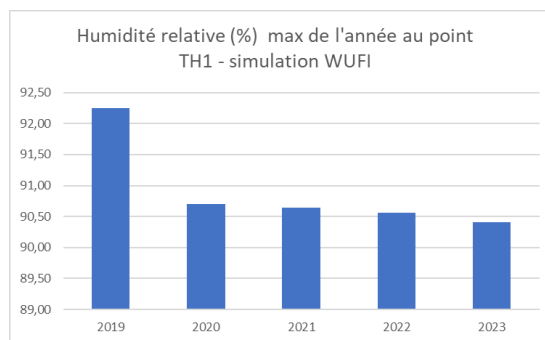


Figure 105 : Zoom sur l'humidité relative maximum observée par année au point de contact mur/isolant TH1 - climat int. ISO

Les résultats des 2 simulations avec les deux climats normés sont très proches.

Pour le critère 1, comme visualisé sur la Figure 100 et 101, la teneur en eau globale du mur diminue chaque année.

Pour le critère 3, la teneur en eau en masse au point critique interface mur /isolant (TH1), visualisé sur les figures 102 et 103 diminue chaque année et reste largement sous le seuil des 23%. On le constate aussi sur le graphe du max atteint pour l'HR au point TH1, l'HR atteint 90.5% au maximum puis baisse chaque année.

On note que la tendance d'assèchement du mur est plus claire pour ces deux simulations que dans les variantes 1 et 2 précédentes. Cela est dû en premier lieu au climat extérieur A qui est plus un climat de plaine (HR moyenne à peu près identique mais température mini plus faible et température maximum plus élevée) et en second temps au fait que le climat A extérieur qui est un climat sur 1 an répété chaque année contrairement au climat « B » qui est une séquence réelle de 5 années.

Comparaison entre mesure et simulation

Le graphique suivant présente la comparaison entre les résultats du calcul WUFI sur 5 ans et la mesure réalisée sur 1 an au niveau de la chambre NO, à l'interface entre le mur et l'isolant (TH1) :

Avec climat intérieur selon EN 15026/WTa -6-2

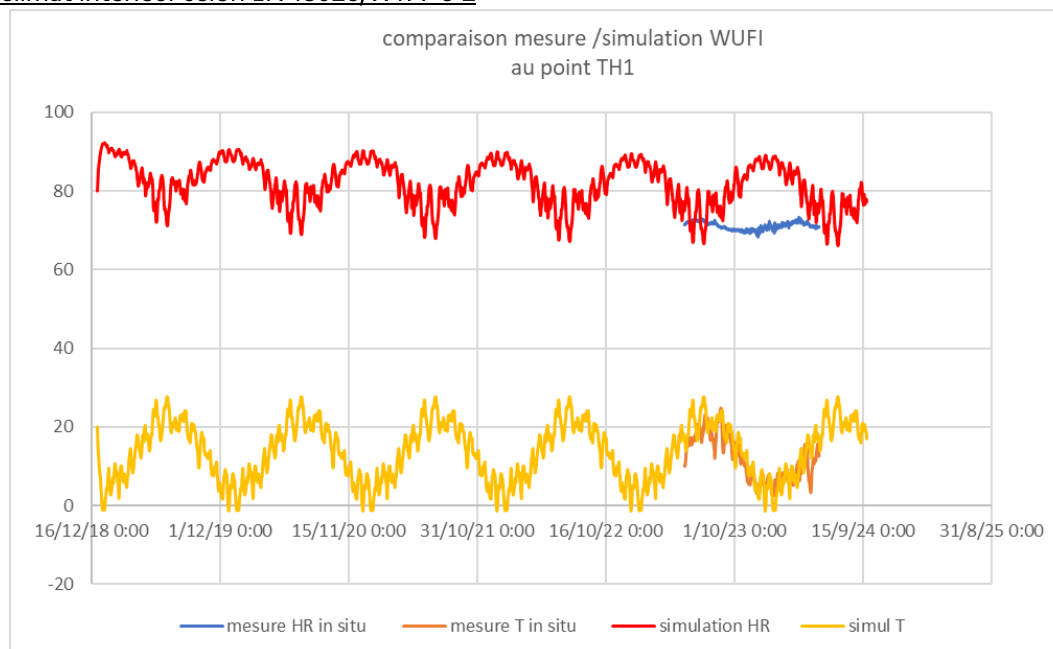


Figure 106 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative et de la température à l'interface mur/isolant nommée TH1 entre la simulation WUFI (5ans) et la mesure in situ (1 an) chambre NO

Avec climat intérieur selon ISO 13788 classe 1 d'humidité

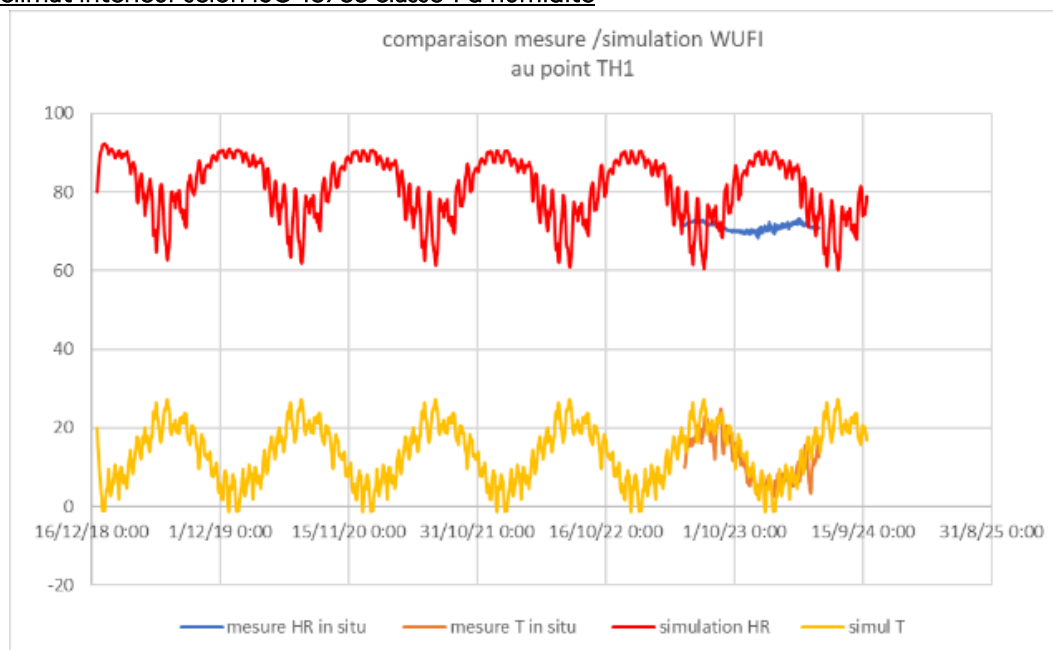


Figure 107 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative et de la température à l'interface mur/isolant nommée TH1 entre la simulation WUFI (5ans) et la mesure in situ (1 an) chambre NO

Pour une meilleure visibilité, on zoome sur l'année de mesure (année 5 de la simulation) :

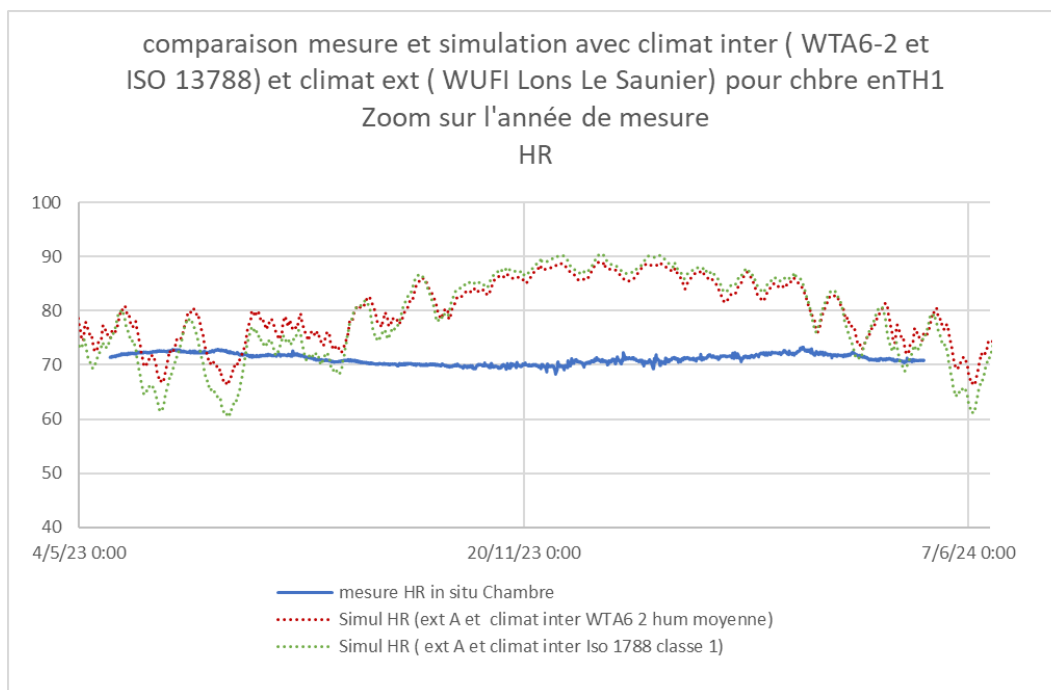


Figure 108 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative entre simulation et mesure in situ/ zoom sur l'année de mesure, au point TH1 Chambre NO

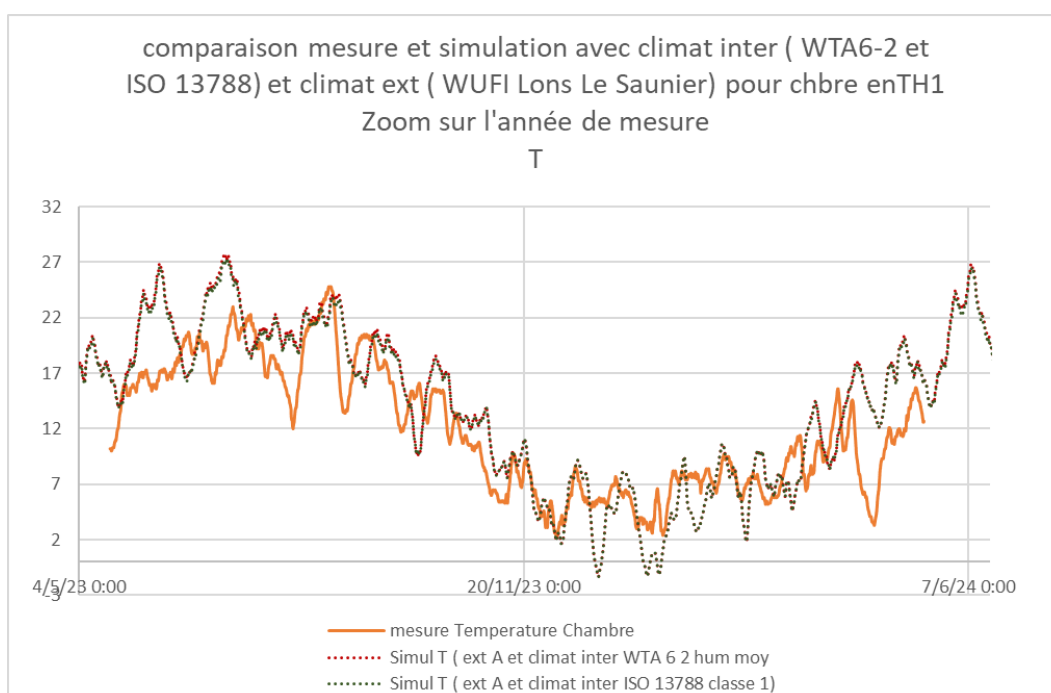


Figure 109 : comparaison de l'évolution de la température entre simulation et mesure in situ / zoom sur l'année de mesure, au point TH1, chambre NO

En prenant comme référence la cinquième année de simulation, afin de laisser s'établir les phénomènes, nous constatons au point TH1 que :

- les températures simulées et mesurées en TH1 suivent des variations assez similaires de juillet 2023 à mai 2024 :

- La température mesurée est en moyenne 1.5°C plus basse que la température simulée avec l'un ou l'autre des climats normés, avec une température mesurée pouvant varier de -10 °C à +7°C par rapport à la température simulée.
- L'humidité relative simulée :
 - est élevée en comparaison de l'humidité relative mesurée. L'écart est important : en moyenne un écart de 9 points entre l'HR simulée et l'HR mesurée. Un écart maximal constaté de 21 points ;
 - globalement l'amplitude des variations de HR dans la simulation est supérieure à la mesure. L'inertie hygrothermique du complexe mur/isolant n'est pas bien retranscrite par la simulation ;
 - le seuil où la teneur en eau est supérieure à 23% (soit HR supérieure à 93,8%) n'est pas atteint.

Conclusion sur Jura C – Variante 3

Tous les critères de SimHuBat sont respectés, notamment la teneur en eau qui reste inférieure à 23%.

Synthèse sur les critères de SimHuBat pour la simulation, et rappel des mesures en TH1 pour Jura C :

Critères	Description	Simulation WUFI		Mesure in situ		
		Mur au global	TH1 : mur / isolant	Jura C Bureau - TH1	Jura C Chambre NO - TH1	Jura A Chambre woofing - TH1
1	Teneur en eau stable ou diminue					
2	Pas de condensation (HR > 98%)					
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)					
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment					
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait					

La simulation reste plus pessimiste que la mesure in situ, avec une HR à l'interface entre mur et isolant plus élevée dans la simulation que dans la mesure. La simulation ne reflète pas bien l'inertie hygrothermique du mur, avec une amplitude de variation de l'humidité relative à l'interface entre le mur et l'isolant bien supérieure à la mesure.

Cette conclusion peut être modérée en mettant un bémol sur le fait que le pare-vapeur dans la chambre NO n'est peut-être pas continu comme pour le cas du bureau

3.4.4 Conclusions sur les Simulations Jura C

Le tableau suivant résume le résultat des 3 variantes simulées pour Jura C :

Paramètres	Simulation WUFI
------------	-----------------

	Climat extérieur	Météo de La Pesse pour l'année de mesure		Météo WUFI Lons le Saunier
Critères	Climat intérieur	Mesuré Jura C	WTA6-2 humidité moyenne ISO 13788 classe 1	
1	Teneur en eau stable ou diminue			
2	Pas de condensation (HR > 98%)			
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)			
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment			
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait			

Conclusion du point de vue du concepteur qui utilise WUFI

Si nous avons simulé ce type de mur dans le Jura en tant que concepteur sans avoir les données de mesure in situ, nous aurions pu utiliser le climat extérieur de La Pesse pour être au plus proche du projet, ou bien de Lons le Saunier.

En climat intérieur, pour ce logement pourvu d'une VMC, nous aurions probablement utilisé un climat intérieur normé comme WTA6-2 humidité moyenne ou ISO 13788 classe 1.

Ceci correspond à l'ensemble des variantes 2 et 3 : le calcul WUFI nous aurait indiqué que la paroi ne présente pas de risque pathologique.

Cette absence de risque est confirmée dans la réalité mesurée pour Jura C, pour les 3 murs instrumentés.

Conclusion sur le caractère pessimiste ou optimiste de WUFI

La simulation qui se rapproche le plus de la réalité mesurée est la variante 1, avec la météo de l'année de la mesure et le climat intérieur mesuré.

Pour cette variante, on note que **les résultats présentés par WUFI sont bien plus pessimistes que les mesures effectuées** (voir §3.4.1). En particulier l'humidité au contact entre le mur et l'isolant est très élevée dans la simulation (entre 70 à 90% HR pour l'année 5) alors que la réalité mesurée varie autour de 70% pour la chambre NE et entre 45% et 70% pour les autres murs instrumentés (voir §2.3.2).

De plus, la simulation ne reflète pas bien l'inertie hygrothermique du complexe mur/isolant, avec une amplitude de variation de l'humidité relative à l'interface entre le mur et l'isolant bien supérieure à la mesure.

3.5 Simulations Ardèche

Rappel des caractéristiques du logement

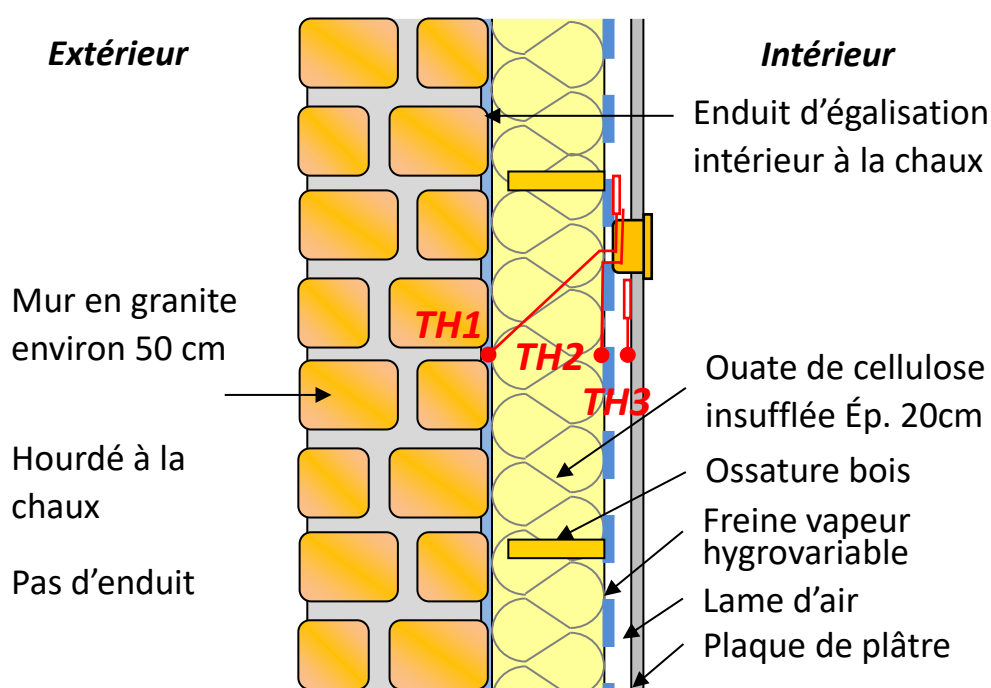
Département : Ardèche (07)

Altitude : 486 m

Description du mur : Pierre granite d'Ardèche hourdé à la chaux, enduit intérieur chaux. Pas d'enduit extérieur.

Isolation intérieure en ouate de cellulose 20cm insufflée, freine vapeur hygrovariable (Intello), lame d'air et plaque de plâtre.

Isolation finie 8 ans environ avant l'instrumentation.



Ventilation : VMC double flux.

Pièces instrumentées et orientation :

Pièce	Mur	Etage	Orientation	Hauteur sondes
Chambre 1	Nord-Est	RdC	N-E	Prise basse, sous le niveau du sol extérieur
Chambre 2	Nord-Est	R+1	N-E	Prise basse
Chambre 3	Nord	R+1	Nord	Prise basse

Paramètres complémentaires de simulation WUFI :

Référence des matériaux utilisés :

Matériaux	Type	Référence base WUFI	Epaisseur (mm)
Enduit extérieur	Sans		
Pierre	Granite	Granite	500
Joint	Chaux	Enduit à la chaux (valeur A : $3 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0.5}$)	20
Enduit d'égalisation intérieur (entre mur et isolant)	Chaux	Enduit à la chaux (valeur A : $3 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0.5}$)	20
Isolant	Ouate de cellulose insufflée	Fibre de cellulose	200
Membrane	Freine vapeur hygrov- ariable	Intello (Till 2015)	1
Parement	Non intégré dans les si- mulations		

Les caractéristiques de ces matériaux sont indiquées au [§3.1.3](#).

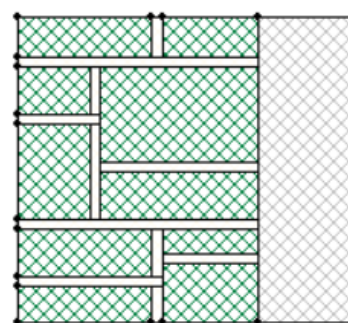
Géométrie du mur :

Il s'agit d'un assemblage de blocs plein de pierre de 10 à 30cm de hauteur et 10 à 30cm de profondeur pour une épaisseur de mur fini de 50cm.

Les joints entre pierres ont une largeur 2cm. On considère que toutes les 2 rangées, le joint n'est plus traversant de l'intérieur vers l'extérieur.

Ainsi la constitution du mur est la suivante :

- Mur en pierre GRANITE de 50cm de large
- Joint à la chaux de 2cm de largeur
- Isolant en ouate de cellulose de 20 cm
- Freine vapeur Intello



Climat extérieur :

La station la plus proche de cette maison est la station de Peaugres (à moins de 10 km de la maison, altitude 460m, voir la [fiche de la station](#)) mais elle ne possède pas toutes les données nécessaires pour le calcul WUFI. Température et HR seront issues des données de Peaugres, et les autres données seront issues des données avec Météonorm pour la station de MONTELMAR Ancône pour 2001-2019.

Durée de la simulation :

Simulation effectuée sur 5 ans afin d'évaluer l'évolution des teneurs en eau dans le mur et ses couches.

Variantes simulées :

Nous effectuerons deux variantes en simulation : une avec le climat intérieur mesuré, et une avec le climat normé selon l'EN 15026 / WTA 6-2 humidité moyenne.

3.5.1 Variante 1 – Climat ext. année réelle / int. mesuré vs. WTA

Paramètres

Climats :

- Climat extérieur : météo créé avec les données de l'API Météo-France, T et HR selon la station de Peaugres aux dates de mesures in situ. Les autres données sont issues de Météonorm pour la station de MONTELMAR Ancône pour 2001-2019.

Des graphiques comparant ce climat extérieur avec les mesures sont présentés au [§2.7.2](#)

- Climat intérieur : soit le climat intérieur mesuré dans la Chambre 2, soit le climat intérieur selon la norme EN 15026 : WTA 6-2 humidité moyenne.

Résultats de simulation

Ci-dessous sont résumés les résultats de la simulation sur 5 ans sous Wufi 2D. Nous comparerons les résultats pour le climat mesuré et pour le climat simulé selon WTA 6-2 humidité moyenne :

Climat intérieur mesuré (Ardèche Chambre 2)

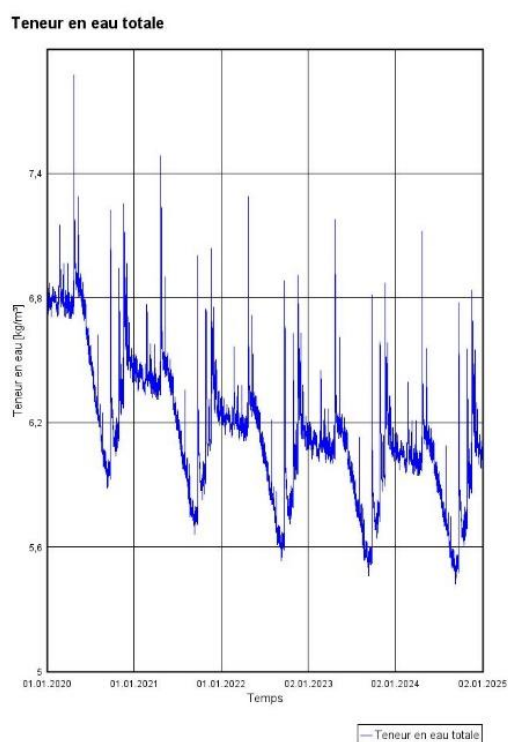


Figure 110 : Teneur en eau en masse du mur sur la période de simulation – climat int. mesuré

Climat intérieur selon EN 15026 / WTA 6 2 humidité moyenne

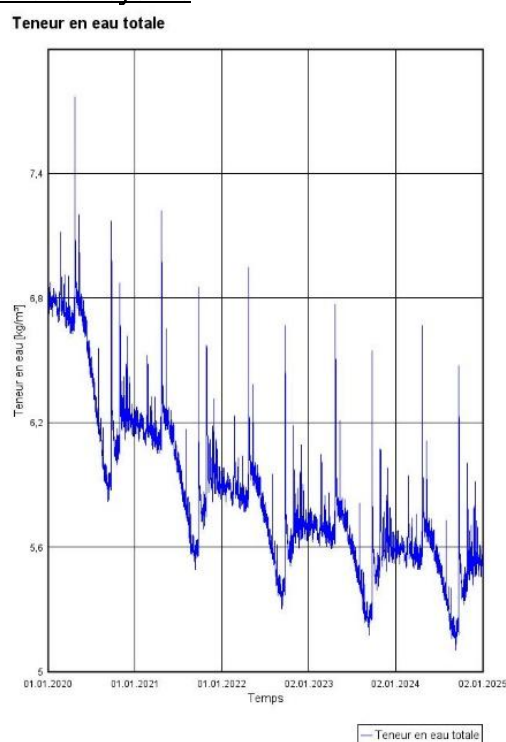


Figure 111 : Teneur en eau en masse du mur sur la période de simulation - climat int. WTA

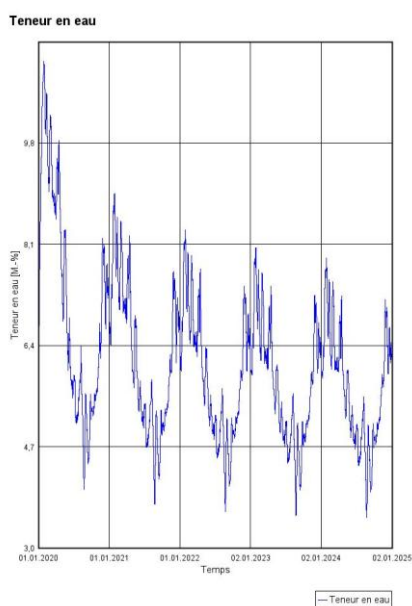


Figure 112 : Teneur en eau en masse à l'interface mur /isolant (« TH1 ») – climat int. mesuré

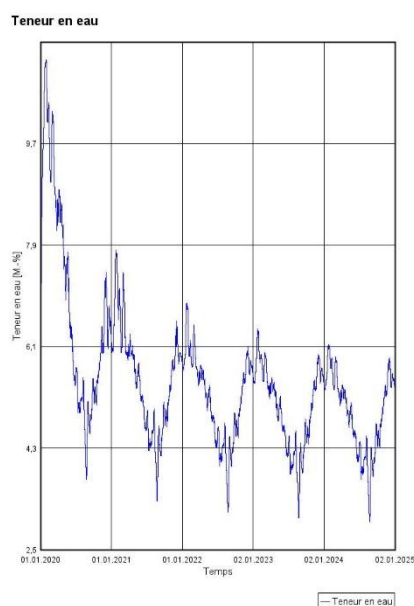


Figure 113 : Teneur en eau en masse à l'interface mur /isolant (« TH1 ») - climat int. WTA

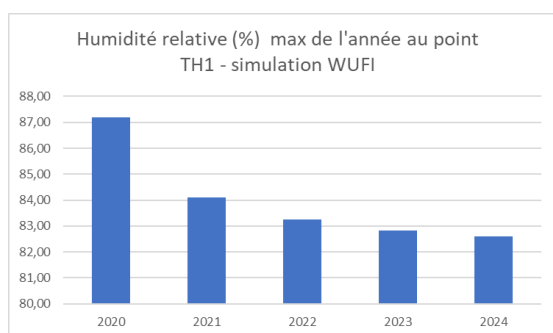


Figure 114 : Zoom sur l'humidité relative maximum observée par année au point de contact mur/isolant TH1 – climat int. mesuré

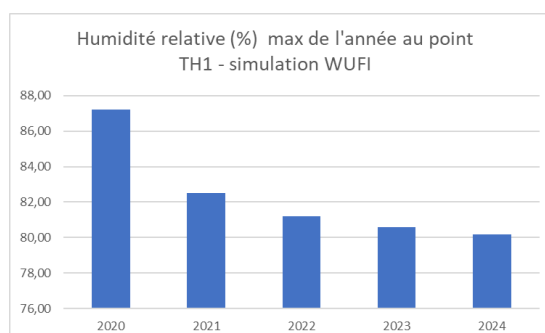


Figure 115 : Zoom sur l'humidité relative maximum observée par année au point de contact mur/isolant TH1 - climat int. WTA

Les résultats des 2 simulations avec les deux climats, mesuré et normé, sont très proches.

Le critère 1 de SimHuBat est respecté : comme visualisé sur la Figure 110 et 111, la teneur en eau globale du mur diminue chaque année.

De même pour le critère 3, la teneur en eau en masse au point critique interface mur /isolant, nommé TH1, visualisé sur les figures 112 et 113 diminue chaque année et reste largement sous le seuil des 23%.

On le constate aussi sur le graphe du max atteint pour l'HR au point TH1, l'HR atteint 87% au maximum puis baisse chaque année.

Selon nos critères, le mur fonctionne.

Comparaison entre mesure et simulation

Les graphiques suivants présentent la comparaison entre les résultats du calcul WUFI sur 5 ans et la mesure réalisée sur 1 an, à l'interface entre le mur et l'isolant (TH1) Chambre 2, pour le climat intérieur mesuré et le climat intérieur normé :

Avec climat intérieur mesuré dans la chambre 2

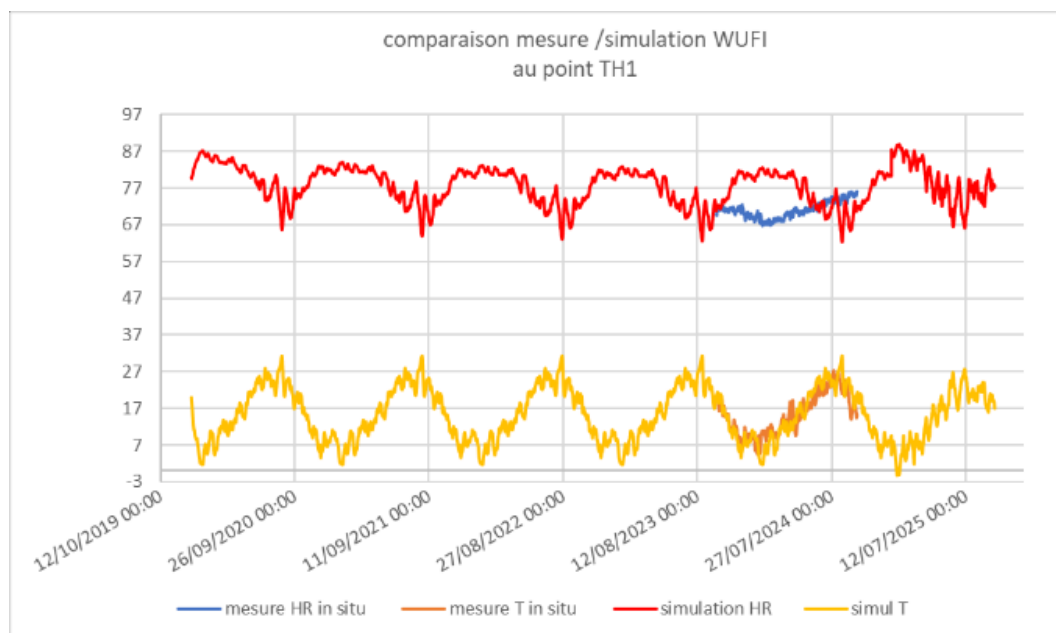


Figure 116 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative et de la température à l'interface mur/isolant nommée TH1 entre la simulation WUFI (5ans) et la mesure in situ (1 an) Chambre 2

Avec climat intérieur selon EN 15026/WTa -6-2 humidité moyenne

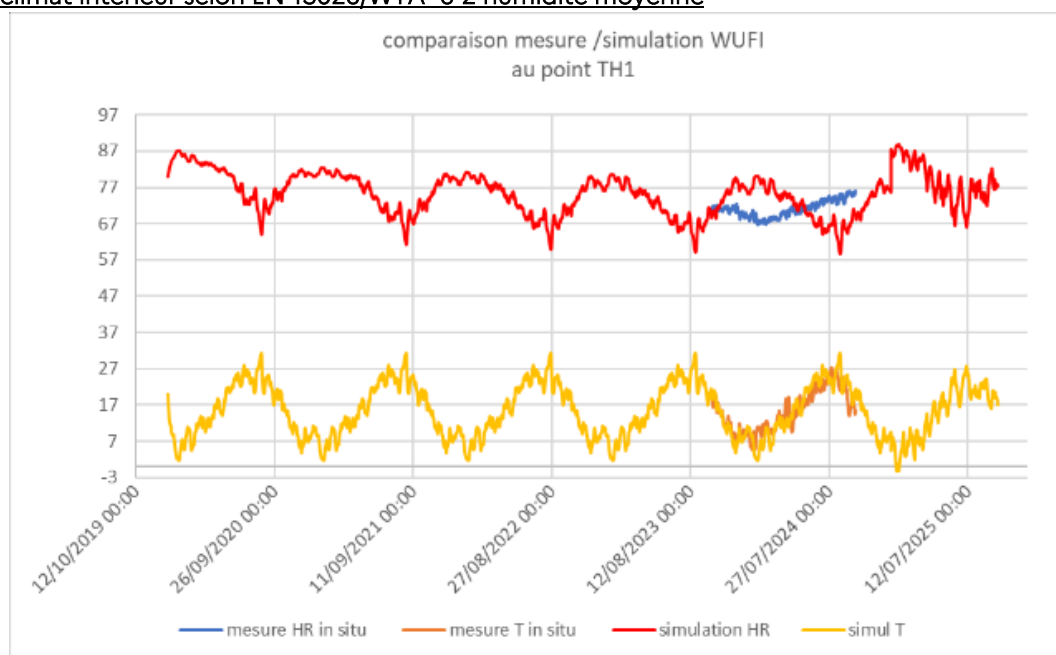


Figure 117 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative et de la température à l'interface mur/isolant nommée TH1 entre la simulation WUFI (5ans) et la mesure in situ (1 an) Chambre 2

Si l'on se concentre sur la 5^e année de simulation, et qu'on compare les résultats des 2 simulations et de la mesure, on obtient le graphique suivant :

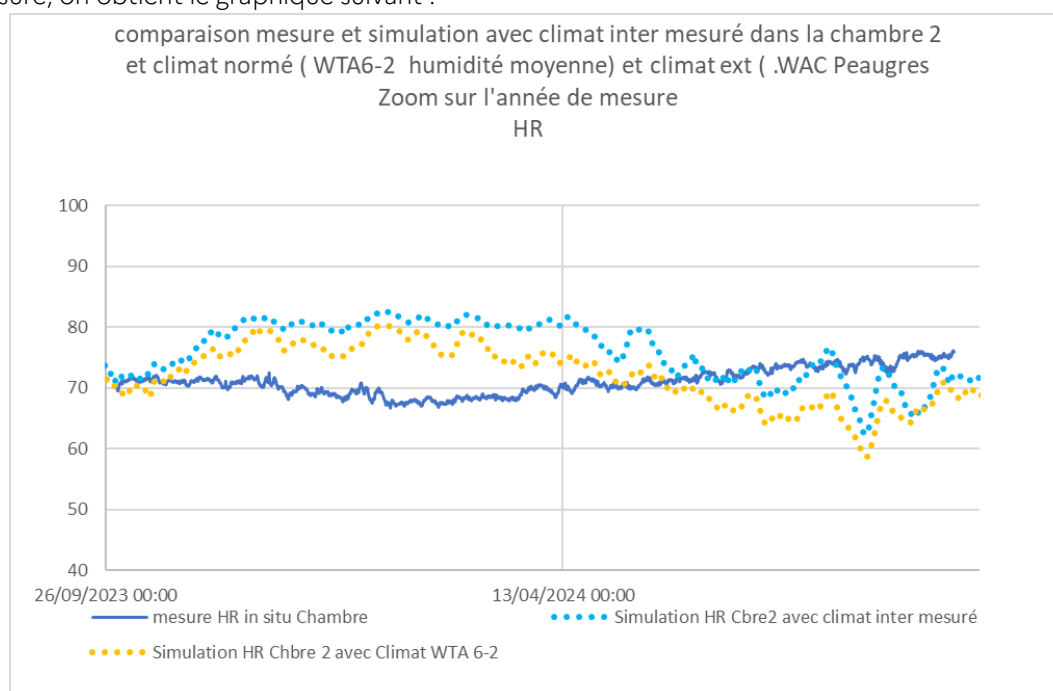


Figure 118 : comparaison de l'évolution de l'humidité relative entre simulation et mesure in situ - zoom sur l'année de mesure, au point TH1 Chambre 2

Même chose en température :

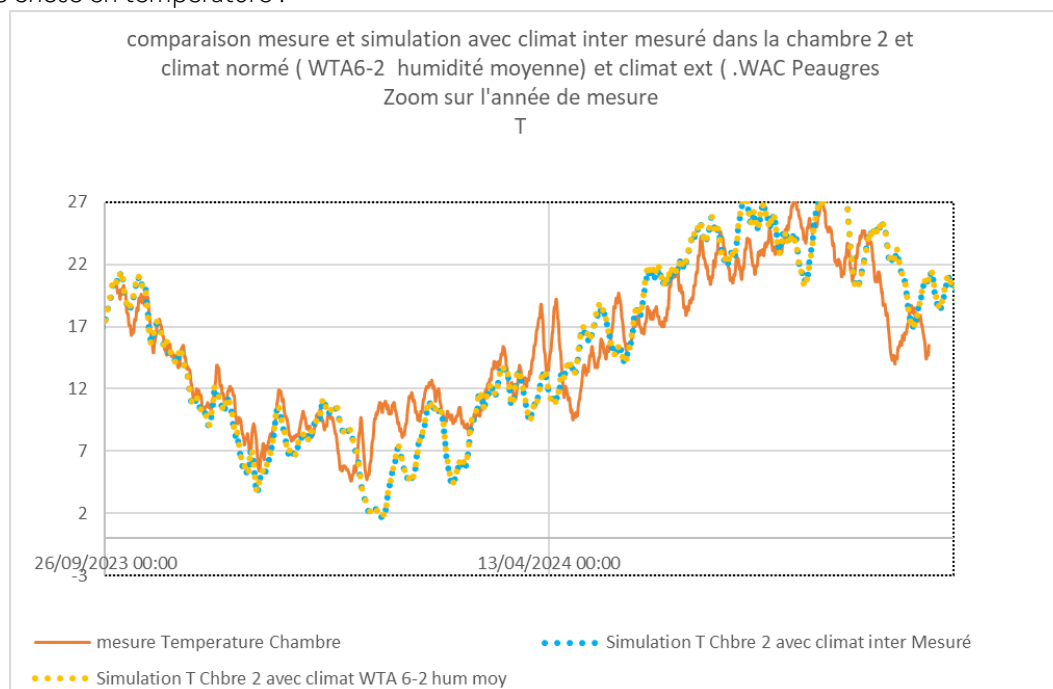


Figure 119 : comparaison de l'évolution de la température entre simulation et mesure in situ - zoom sur l'année de mesure, au point TH1 Chambre 2

En prenant comme référence la cinquième année de simulation, afin de laisser s'établir les phénomènes, nous constatons au point TH1 que :

- les températures simulées et mesurées en TH1 suivent des variations assez similaires. Cependant la température descend plus bas dans la simulation en hiver et suit des oscillations en déphasage par rapport à la mesure sur plusieurs périodes ;
- l'humidité relative simulée :
 - o a une variation plus importante que la mesure. Il semble que la mesure ne reflète pas bien l'inertie hydrique du mur ;
 - o est plus élevée que l'humidité relative mesurée en hiver et au printemps, puis moins élevée que la mesure en été.

Conclusion sur Ardèche – Variante 1

Tous les critères de SimHuBat sont respectés, notamment la teneur en eau qui reste inférieure à 23%.

Synthèse sur les critères de SimHuBat pour la simulation, et rappel des mesures en TH1 pour la maison Ardèche :

Critères	Description	Simulation WUFI		Mesure in situ		
		Mur au global	TH1 : mur / isolant	Ardèche Chambre 1 - TH1	Ardèche Chambre 2 - TH1	Ardèche Chambre 3 - TH1
1	Teneur en eau stable ou diminue					
2	Pas de condensation (HR > 98%)					
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)					
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment					
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait					

La simulation ne reflète pas bien l'inertie hygrothermique du complexe mur/isolant, avec une amplitude de variation de l'humidité relative à l'interface entre le mur et l'isolant bien supérieure à la mesure.

En ce sens, la simulation est plus pessimiste que la mesure en hiver et au printemps, légèrement moins en été, car l'humidité maximale atteinte en TH1 est supérieure à la mesure.

3.6 Conclusion Comparaison entre mesure et modélisation

Pour l'ensemble des simulations effectuées dans ce dossier pour des murs anciens isolés par l'intérieur avec de la ouate de cellulose ou de la fibre de bois, les simulations sont de plus à beaucoup plus pessimistes que la mesure in situ.

On entend par plus pessimiste que l'humidité relative au point de contact isolant mur est systématiquement plus élevée que ce que l'on trouve en mesure.

Ce résultat vaut même si le climat extérieur réel de l'année de mesure et le climat intérieur mesuré in situ sont intégrés comme hypothèses d'entrée de la simulation.

Il apparaît d'ailleurs que le paramètre le plus important dans les cas étudiés soit le climat intérieur. Les simulations faisant varier ce dernier montrent en effet une grande variation des résultats, plus importante que des ajustements de climats extérieurs, ou des changements du type de pierres ou d'épaisseur de joints.

A la lecture de ces résultats il semblerait que la simulation ne prenne en compte de façon suffisante ou fine le caractère hygroscopique et capillaire des matériaux biosourcés et leur interaction avec leur environnement. En tout cas dans la majorité des situations la fluctuation des HR mesurées est moindre que celle calculée. C'est peut-être dû à des paramètres d'entrée peu ou pas assez documentés au niveau des caractéristiques intrinsèques des matériaux biosourcés, notamment en ce qui concerne le transport d'eau en leur sein via les courbes de succion/ redistribution qui ne sont pas toujours mesurés mais seulement approximées. Mais ce constat de simulations HAM n'intégrant pas à leur juste mesure les comportements hygroscopique et capillaire a également été remarqué dans la revue de littérature (lot 5.1), où là ce serait également du fait des simplifications retenues pour les calculs.

Cependant comparer mesures et simulations n'est pas toujours simple et des biais de mesures peuvent aussi amener à des comparaisons biaisées. Nous avons eu le cas avec une sonde posée près d'une canalisation de chauffage, ou d'une sonde extérieure non protégée du rayonnement solaire.

D'autre part la simulation ne prend pas forcément en compte les malfaçons : tassement ou oubli d'isolant, manque de continuité de membrane..., éléments qui peuvent avoir des incidences sur les mesures et donc amener un biais lors de la comparaison mesures / simulations. Néanmoins on peut penser que ce type de malfaçons devrait générer des mesures moins bonnes, alors que dans tous les cas, c'est-à-dire même avec malfaçons, les simulations restent plus pessimistes que les mesures.

Enfin la simulation HAM (avec WUFI ici) pour le concepteur a pour but premier de sécuriser les systèmes constructifs qui seront mis en œuvre, en apportant un avis sur le risque ou non du point de vue hygrothermique de la solution envisagée. Dans ce cadre SimHuBat pour le concepteur est une bonne base et propose des seuils sur 4 critères résumés ci-dessous sous forme de tableau.

Cependant nous interrogeons :

- le seuil de 23 % en masse pour la teneur en eau qui nous paraît sévère, et à l'origine adaptée au bois de structure plus qu'aux isolants. De plus il nous paraîtrait adapté que ce seuil soit ajusté à la sensibilité à l'eau, diverse, des isolants biosourcés ;
- la méthode très aléatoire de calcul des humidités relatives correspondant au taux d'humidité en masse de 23 et 30% tant, en plus de l'aspect peu précis des courbes de sorption, de leur physiologie dans les zones de saturation capillaire et de sursaturation.

Critères	Description
1	Teneur en eau stable ou diminuée
2	Pas de condensation (HR > 98%)
3	Teneur en eau <23% (avec 8 semaines consécutives max ou teneur > 23%)
4	Absence d'eau libre : teneur en eau en masse < 30% à tout moment
Criticité globale	Si au moins un des critères est rouge : critère non satisfait

L'ADEME EN BREF

Au cœur des missions qui lui sont confiées par le ministère de la Transition écologique, le ministère en charge de l'Energie et le ministère en charge de la Recherche, l'ADEME - l'Agence de la transition écologique - partage ses expertises, coordonne le financement et la mise en œuvre de projets de transformation dans plusieurs domaines : énergie, économie circulaire, décarbonation, industrie, mobilité, alimentation, adaptation et sols.

Elle mobilise les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, et leur donne les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse. Résolument engagée dans la lutte contre le changement climatique et la dégradation des ressources, l'ADEME conseille, facilite et aide au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions. Elle met ses capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un Établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC).

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



EXPERTISES

MIGRATION DE VAPEUR EN ITI BIOSOURCÉE - MESURE IN-SITU ET COMPARAISON AU CALCUL WUFI

Ce rapport, réalisé dans le cadre du projet Perf in Mind 2, analyse le comportement hygrothermique de murs anciens en pierre isolés par l'intérieur avec des matériaux biosourcés. L'étude repose sur l'instrumentation in situ de 19 parois réparties dans 7 logements aux climats variés (Jura, Brest, Ardèche) et sur leur comparaison avec des simulations numériques WUFI.

Les résultats sont positifs : 18 murs sur 19 ne présentent pas de risque pathologique selon les critères SimHuBat, validant l'efficacité des freine-vapeurs hygrovariables, même en altitude ou sans VMC. L'unique cas critique (Brest) résulte d'un cumul de facteurs défavorables : climat océanique, absence de chauffage continu et ventilation défaillante. L'étude révèle par ailleurs que les modélisations WUFI s'avèrent systématiquement plus pessimistes, dans les échantillons testés, que les mesures réelles, interrogeant certains seuils normatifs actuels pour le biosourcé.

L'isolation intérieure biosourcée sur murs en pierre est pérenne avec un freine-vapeur hygrovariable : 95% des parois testées sont conformes, sauf en cas de défauts cumulés (chauffage et ventilation). Les simulations numériques surestiment, dans les échantillons analysés, l'humidité par rapport à la réalité terrain.