

# Perméabilité à la vapeur d'eau du CLT

Marion LEMERCIER, Julien LAMOULIE (FCBA)  
Claude POMPEO (CSTB)

**Décembre 2018**

Modifié en juillet 2019

## Siège social

10, rue Galilée  
77420 Champs-sur-Marne  
Tél +33 (0)1 72 84 97 84  
[www.fcba.fr](http://www.fcba.fr)

Siret 775 680 903 00132  
APE 7219Z  
Code TVA CEE : FR 14 775 680 903

**Institut technologique FCBA :**  
Forêt, Cellulose, Bois – Construction,  
Ameublement

---

## Partenaires

**CSTB**  
*le futur en construction*

## Avec le soutien

**CODIFAB**  
comité professionnel de développement  
des industries françaises de l'ameublement et du bois

# SOMMAIRE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>ETAT DES LIEUX DES CARACTERISATIONS EXISTANTES .....</b>	<b>4</b>
<b>3.</b>	<b>ETUDE DE SENSIBILITE .....</b>	<b>5</b>
	3.1 Paramètres à étudier .....	5
	3.2 Modélisations réalisées .....	5
	3.3 Résultats des modélisations .....	11
	3.4 Interprétation des résultats .....	12
<b>4.</b>	<b>ESSAIS EN LABORATOIRE.....</b>	<b>13</b>
	4.1 Choix des échantillons.....	13
	4.1.1 Type de CLT soumis aux essais .....	13
	4.1.2 Préparation des éprouvettes de CLT .....	13
	4.1.3 Réalisation des essais .....	13
	4.1.4 Résultats des essais.....	15
<b>5.</b>	<b>INTERPRETATION DES ESSAIS ET CREATION DE DONNEES GENERIQUES .....</b>	<b>16</b>
	5.1 Interprétation des résultats .....	16
	5.2 Des données CLT « génériques » .....	19
<b>6.</b>	<b>MODELISATION DE PAROIS REPRESENTATIVES .....</b>	<b>21</b>
	6.1 Objet de l'Étude.....	21
	6.2 Présentation des moyens de calculs .....	21
	6.3 Hypothèses .....	21
	6.4 Cahier des charges .....	21
	6.4.1 Présentation des parois et points singuliers à modéliser .....	21
	6.4.2 Caractéristiques des produits composant les parois.....	30
	6.4.3 Climats extérieurs.....	31
	6.4.4 Ambiances intérieures .....	33
	6.5 Résultats des modélisations .....	35
	6.5.1 Format des résultats.....	35
	6.5.2 Cas n°1 .....	36
	6.5.3 Cas n°2 .....	37
	6.5.4 Cas n°3.....	38
	6.5.5 Cas n°4.....	39
	6.5.6 Cas n°5.....	40
	6.5.7 Cas n°6.....	41
	6.5.8 Cas n°7 .....	42
	6.5.9 Cas n°8 .....	43
	6.5.10 Cas n°9 .....	44
	6.5.11 Cas n°10 .....	45
	6.5.12 Cas n°11 .....	46
	6.5.13 Cas N°12.....	47

6.5.14	Cas n°13 .....	48
6.5.15	Cas n°14 .....	49
6.5.16	Cas n°15 .....	50
6.5.17	Cas n°16 .....	51
6.5.18	Cas n°17 .....	52
6.5.19	Cas n°18 .....	53
6.5.20	Cas n°19 .....	54
6.5.21	Cas n°20 .....	55
6.5.22	Cas n°21 .....	57
6.5.23	Cas n°22 .....	58
6.5.24	Cas n°23 .....	59
6.5.25	Cas n°24 .....	60
6.5.26	Cas n°25 .....	61
6.5.27	Cas n°26 .....	62
6.5.28	Cas n°27 .....	63
6.5.29	Cas n°28 .....	64
6.5.30	Cas n°29 .....	65
<b>7.</b>	<b>DEFINITION D'UN « DOMAINE D'APPLICATION HYGROTHERMIQUE » POUR LES PAROIS COMPORTANT UN PANNEAU CLT .....</b>	<b>66</b>
7.1	Interprétation des résultats des modélisations .....	66
7.1.1	Parois en partie courantes .....	66
7.1.2	Points singuliers .....	67
7.2	Proposition de règles de conception hygrothermique pour les parois verticales et les planchers bas à base de CLT .....	69
7.2.1	Préambule et prescriptions générales .....	69
7.2.2	Cas des parois verticales avec revêtement extérieur ventilé .....	69
7.2.3	Cas des parois verticales avec systèmes ETICS .....	70
7.2.4	Cas des planchers bas sur vide sanitaire ou local non chauffé .....	70
7.2.5	Cas particulier des isolants à base de fibres végétales intégrés aux parois CLT .....	71
<b>8.</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>73</b>
	<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>73</b>

## 1. INTRODUCTION

Les professionnels de CLT France sont souvent confrontés à une problématique sur les transferts de vapeur et sur la nécessité ou non de mettre en œuvre une barrière à la diffusion de vapeur d'eau.

Afin de mieux appréhender le comportement hygrothermique des panneaux CLT utilisés en parois verticales et en plancher bas sur vide sanitaire et maîtriser les risques liés aux transferts de vapeur d'eau dans les parois, une étude a été proposée par FCBA, avec l'appui du CSTB.

Cette étude est composée de cinq étapes principales :

- 1- Etat des lieux des caractérisations existantes.
- 2- Etude de sensibilité en fonction des données disponibles : modélisations pour analyser l'impact des principaux paramètres sur les résultats pour des parois types (CLT collé ou cloué, type de colle, bois résineux ou feuillus, nombre de plis, collage ou non des chants des lamelles,...)
- 3- Réalisation d'essais en laboratoire pour mesurer la résistance à la diffusion de vapeur d'eau de panneaux CLT et caractériser le comportement hygrothermique de panneaux CLT représentatifs de la production française
- 4- Création des données génériques sur la base de l'analyse et de l'interprétation des essais permettant aux concepteurs d'ouvrages de réaliser des simulations numériques
- 5- Simulations numériques sur des parois types représentatives (parois verticales CLT isolées par l'intérieur, par l'extérieur, planchers bas sur vide sanitaires isolés par le dessus ou par le dessous, ...)

Par ailleurs, ces travaux ont été menés conjointement à ceux d'une autre étude cofinancée par le CODIFAB, le SIPEV et le SNMI concernant la mise en œuvre de systèmes d'enduit sur isolant par l'extérieur (ETICS) sur support bois. Le comportement hygrothermique des CLT en tant que support d'ETICS est lui-même peu développé dans les Règles de l'Art existantes. Le présent rapport intègre donc une partie dédiée aux CLT revêtus de systèmes ETICS.

## 2. ETAT DES LIEUX DES CARACTERISATIONS EXISTANTES

L'objet de cette première étape du projet était de récolter des données auprès des membres de CLT France concernant des résultats d'essais réalisés sur la résistance à la diffusion de vapeur d'eau des panneaux CLT dans leur ensemble ou des plis de collage.

Seulement trois industriels membres de CLT France ont fournis des données, dont une petite partie était exploitable et répondait à la question posée : disposer de données à l'échelle matériau.

Toutefois, l'étude des documents fournis a permis d'isoler la propriété de résistance à la diffusion de vapeur d'eau d'un type de colle polyuréthane (PURBOND HB S) et plus particulièrement celle d'un plan de collage de 0,1 mm d'épaisseur. Ces essais ont été menés au sein des laboratoires Holz Forschung, en Autriche et de l'École Polytechnique Fédérale de Zurich.

On obtient ainsi des valeurs moyennes pour le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau  $\mu$  située entre 3200 pour une mesure en coupelle humide (méthode C de la norme EN ISO 12572) et 7500 pour une mesure en coupelle sèche (méthode A de la norme EN ISO 12572)

Bien que matériau non hygroscopique ou peu hygroscopique, cela montre que la valeur  $\mu$  du plan de collage varie en fonction des conditions d'humidité dans lesquelles se trouve l'échantillon.

L'étude du plan de collage au microscope montre qu'au contact entre le bois et la colle sont présent des vides d'air qui vont « perturber » le comportement hygrothermique de la colle. D'où ces différences entre la coupelle sèche et la coupelle humide. Cette première conclusion aura une importance sur le choix des échantillons à soumettre aux essais : il faudra inévitablement réaliser des essais de résistance à la diffusion de vapeur d'eau non pas de la colle seule mais d'un joint de collage entre deux plis de bois, pour prendre en compte cet interface bois /colle, dont le comportement hygrothermique peut varier.

Pour également apporter une première conclusion sur l'ordre de grandeur pour la valeur  $\mu$  de la colle, en appliquant le calcul selon la formule  $S_d = \mu * e$  [m], pour une épaisseur de plan de collage de 0,1 mm on obtient une valeur  $S_d$  comprise entre 0,32 m et 0,75 m (coupelle humide et coupelle sèche, respectivement). La colle ainsi évaluée présente donc à épaisseur équivalente, un effet barrière à la diffusion de vapeur d'eau près de 60 fois supérieur à celui d'un bois résineux, type Epicéa : 0,1 mm de colle est aussi résistant à la diffusion de vapeur d'eau que 6 mm d'Epicéa.

## 3. ETUDE DE SENSIBILITE

### 3.1 Paramètres à étudier

Afin d'affiner l'échantillonnage à soumettre aux essais, une étude de sensibilité a été menée au moyen de simulations réalisées avec le logiciel WUFI 2D.

Il a été étudié l'incidence en termes de transferts de vapeur d'eau :

- Du collage ou non des plis de bois (CLT collé par rapport au CLT cloué)
- Du nombre de plan de collage
- Du collage des chants
- De la présence d'un vide d'air en bout de lames (non rempli de colle)

### 3.2 Modélisations réalisées

#### ✓ *Hypothèses générales*

Afin de pouvoir observer les différentes variantes ci-dessous, les paramètres suivants ont été figés :

- CLT en Epicéa d'épaisseur 100 mm
- Isolant par l'extérieur de 145 mm en laine de verre
- Ossature support d'isolant de 45 mm x 145 mm
- Pare-pluie souple de  $S_d = 0,1$  m
- Climat extérieur de Nancy
- Climat intérieur avec  $W/n = 5$  g/m<sup>3</sup>

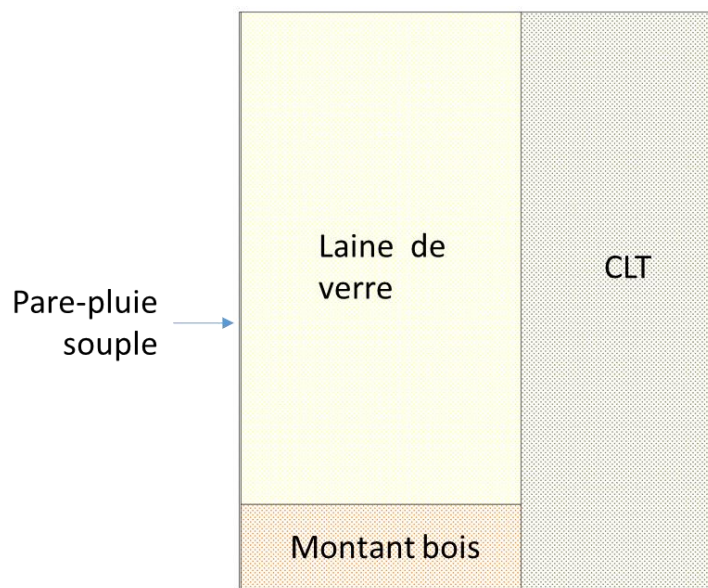


Figure 1 – Schéma de la paroi modélisée (extrait WUFI)

✓ **Caractéristique des matériaux**

Matériau	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Porosité (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Capacité thermique (J/kg/K)	Conductivité thermique sèche (W/m.K)	Fact. résist. à la diffusion de vap. d'eau (sec)
Laine minérale	50	0.98	1030	0.032	1.1
Montant bois	455	0.73	1500	0.09	130
Lame d'air	1,3	0,999	1000	0,337	0,27
Pare-pluie	130	0,001	2300	2,3	100
Colle	500	0,0001	2300	2,3	320 (ramené à 1 mm d'épaisseur)
CLT générique WUFI	454	0,56	2500	0,12	203
CLT KLH WUFI	423	0,7	1500	0,12	300
CLT Stora Enso WUFI	410	0,74	1300	0,098	500

Tableau 1 : Caractéristiques des constituants de la paroi

La valeur  $\mu$  de la colle est la valeur moyenne mesurée en coupelle sèche identifiée au chapitre 2 ci-dessus, avec une sorption prenant en compte la valeur mesurée en coupelle humide.

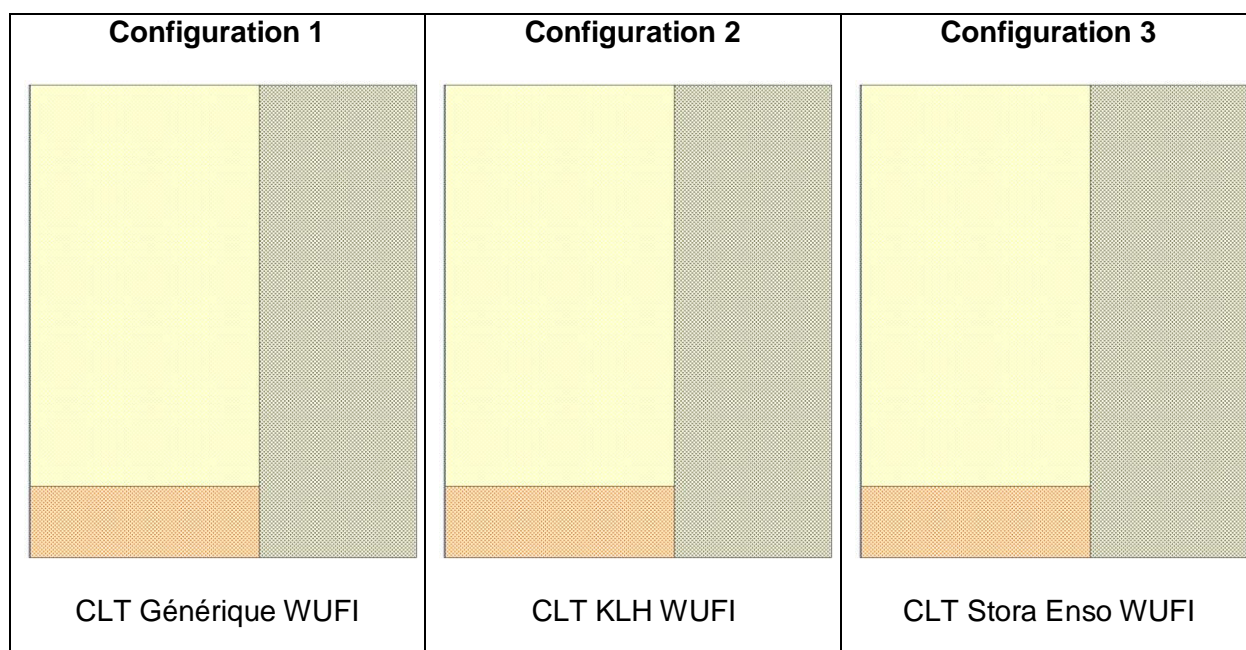
Les autres données matériaux sont celles utilisées habituellement par FCBA et le CSTB dans leurs différentes études collectives communes passées ou en cours.

✓ **Cas de figure modélisés**

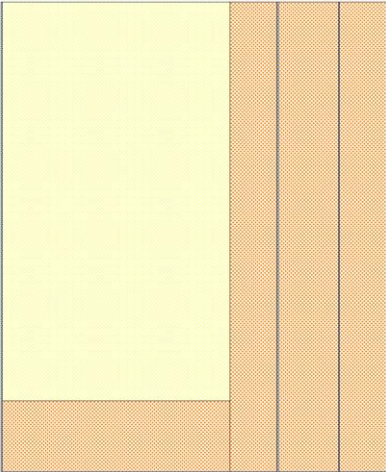
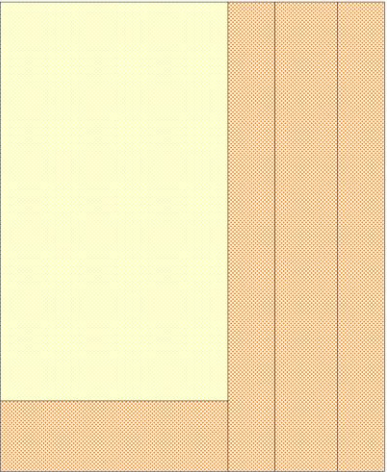
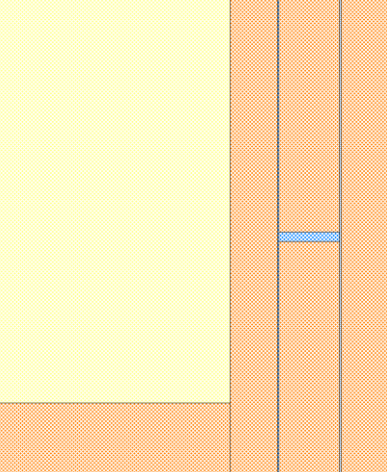
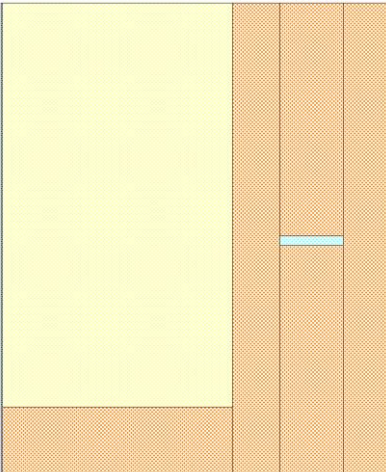
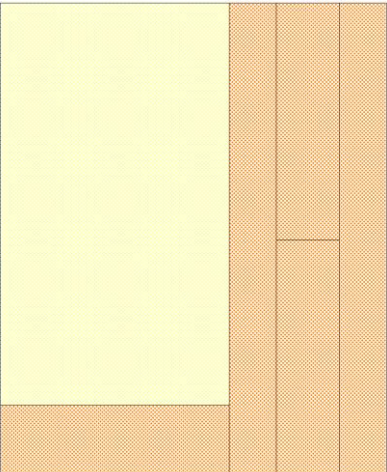
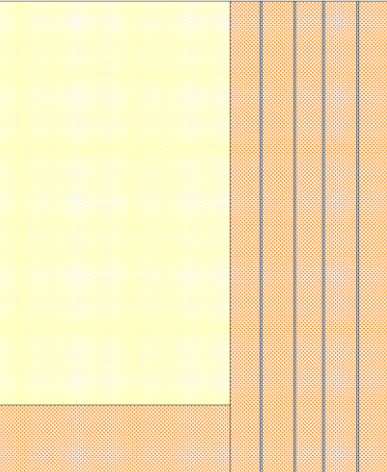
Une série de 10 modélisations a été réalisée.

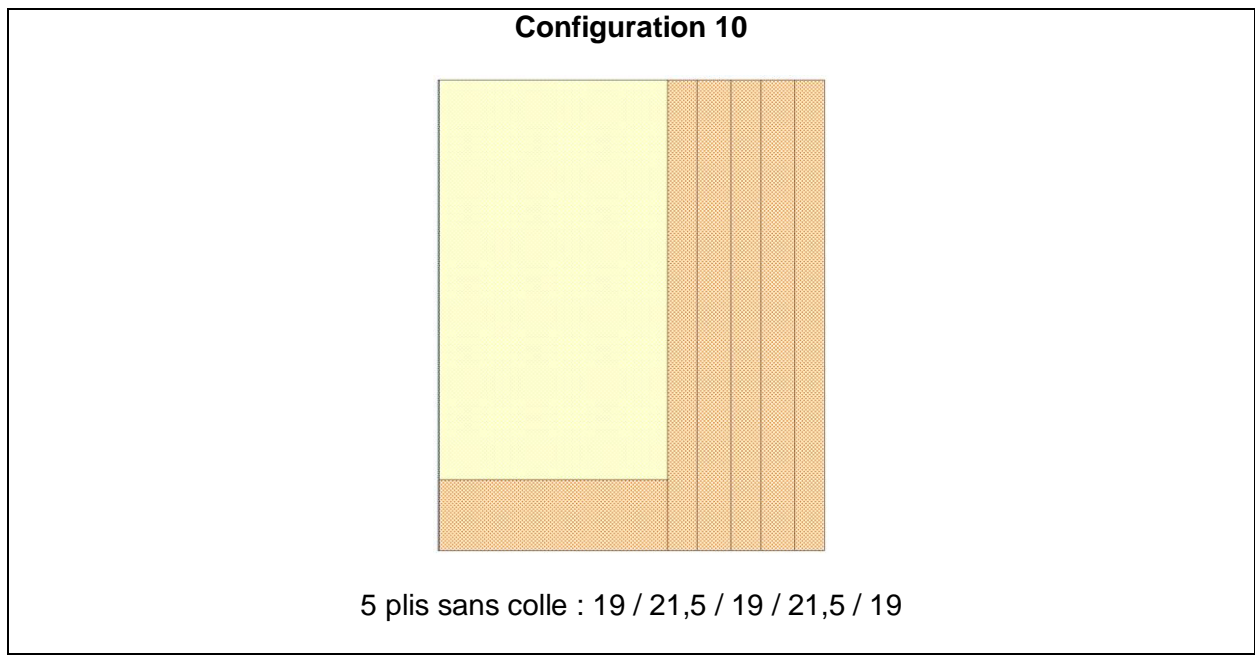
Sept paroi ont été modélisées avec un CLT paramétré pli par pli (bois et colle) et 3 autres parois ont été modélisées avec des CLT (générique, KLH, Stora Enso – voir tableau 1), déjà présents dans la base de donnée du logiciel WUFI 2D, pour faire office de témoin.

Les variantes sur le CLT sont détaillées dans le tableau suivant :





<p style="text-align: center;"><b>Configuration 4</b></p>  <p style="text-align: center;">3 plis avec colle : 30 / 1 / 38 / 1 / 30</p>	<p style="text-align: center;"><b>Configuration 5</b></p>  <p style="text-align: center;">3 plis sans colle : 30 / 40 / 30</p>	<p style="text-align: center;"><b>Configuration 6</b></p>  <p style="text-align: center;">3 plis avec colle : 30 / 1 / 38 / 1 / 30 pli central coupé garni de colle (5 mm)</p>
<p style="text-align: center;"><b>Configuration 7</b></p>  <p style="text-align: center;">3 plis sans colle 30 / 40 / 30 : pli central coupé vide de colle (5 mm)</p>	<p style="text-align: center;"><b>Configuration 8</b></p>  <p style="text-align: center;">3 plis sans colle 30 / 40 / 30 : pli central coupé serré</p>	<p style="text-align: center;"><b>Configuration 9</b></p>  <p style="text-align: center;">5 plis avec colle : 19 / 1 / 20,5 / 1 / 17 / 1 / 20,5 / 1 / 19</p>

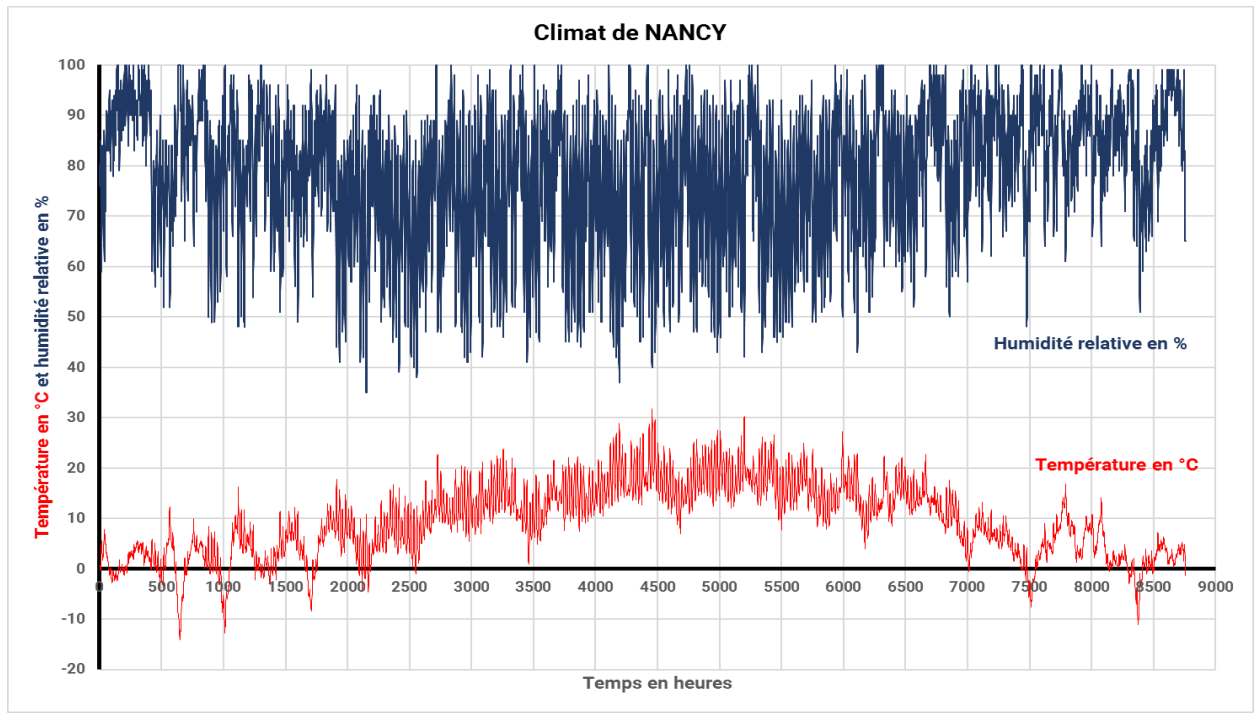


*Tableau 2 : configurations calculées*

Remarque : le logiciel WUFI ne permet pas de modéliser les épaisseurs de matériaux inférieures à 1 mm, les plans de collage ont donc été modélisés avec une épaisseur de 1 mm, et le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau initial ramené à cette épaisseur de 1 mm.

✓ **Climat extérieur**

Le climat extérieur choisi pour cette partie est celui de Nancy. La température et l'humidité relative sont présentées sur la figure ci-dessous.



*Figure 2 : Evolution de la température et de l'humidité sur une année pour le climat de Nancy*

## ✓ **Climat intérieur**

L'ambiance intérieure prise en compte est une ambiance de classe d'humidité moyenne avec un W/n maximum de 5 g/m<sup>3</sup> (locaux à moyenne hygrométrie, au sens de l'annexe D du NF DTU 31.2).

### **En hiver (1<sup>er</sup> octobre – 30 avril)**

$$T_{\text{int}} = 20^{\circ}\text{C}$$

La teneur en vapeur d'eau de l'air intérieur correspond à la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air venant de l'extérieur, à laquelle il faut rajouter la quantité de vapeur d'eau produite par cuisson et autres, soit 5 g (W/n) de vapeur d'eau par m<sup>3</sup> d'air.

Le taux d'humidité de l'air intérieur est déterminé par le calcul suivant :

$$\rho_{v\_int} = \rho_{v\_ext} + 5.10^{-3} \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$\text{D'où } HR_{\text{int}} = \frac{(HR_{\text{ext}} \times P_{\text{sat}}(T_{\text{ext}}) \times \frac{M}{RT_{\text{ext}}} + 5.10^{-3}) \times \frac{RT_{\text{int}}}{M}}{P_{\text{sat}}(T_{\text{int}})}$$

Où :

- $\rho_v$  : masse volumique de vapeur d'eau en kg/m<sup>3</sup>,
- HR : humidité relative en %,
- T : température en °K,
- P : pression en Pa,
- M : masse molaire en kg/mole,
- R : constante des gaz parfaits.
- Le suffixe *int* pour intérieur ; le suffixe *ext* pour extérieur ; le suffixe *sat* pour saturante.
- 

### **En été (1<sup>er</sup> mai – 30 septembre)**

A partir du 1<sup>er</sup> mai, la température augmente progressivement jusqu'à 25°C.

Cette température est atteinte le 1<sup>er</sup> juillet. Elle est ensuite constante jusqu'au 31 août.

Du 1<sup>er</sup> au 30 septembre, la température passe progressivement de 25 °C à 20 °C.

$$HR_{int} = \frac{(HR_{ext} \times P_{sat}(T_{ext}) \times \frac{M}{RT_{ext}}) \times \frac{RT_{int}}{M}}{P_{sat}(T_{int})}$$

Pas de production de vapeur en été ; l'air intérieur est suffisamment en équilibre avec l'extérieur (ouvertures des fenêtres et des portes) pour que la production de vapeur d'eau soit évacuée.

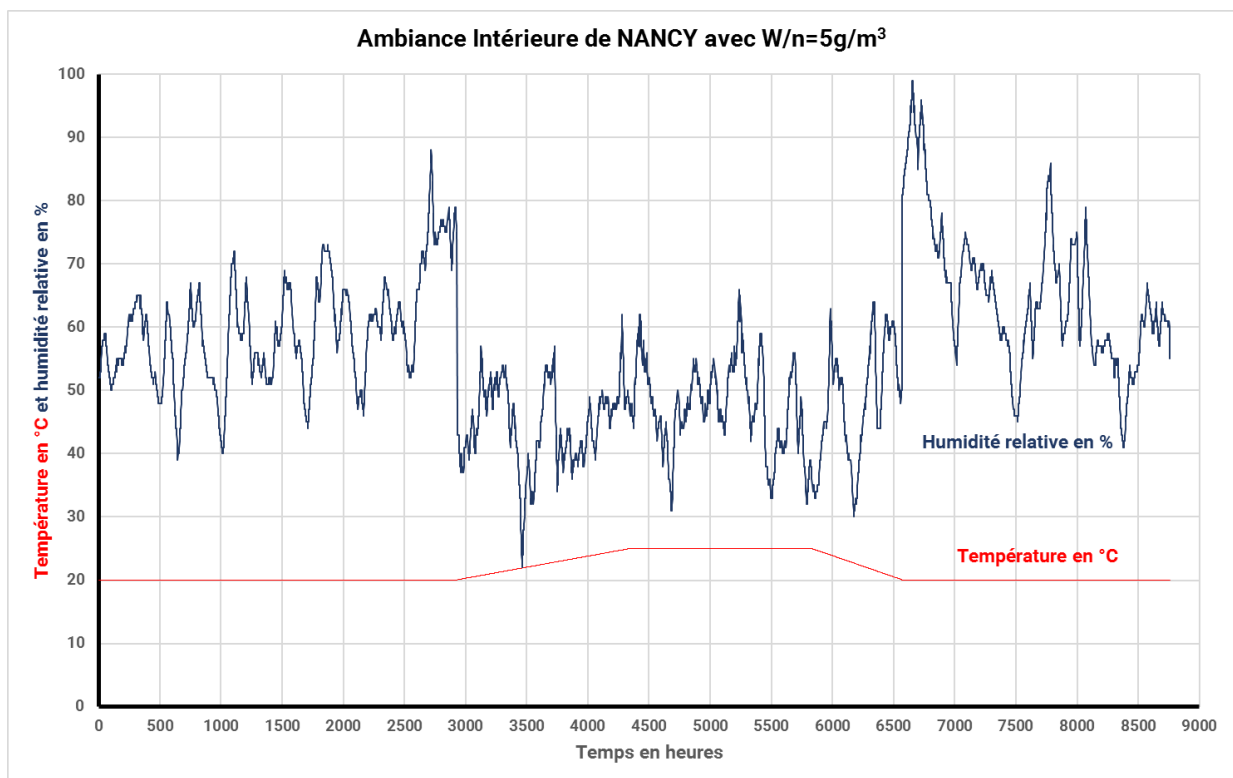


Figure 3 : Evolution de la température et de l'humidité dans l'ambiance intérieure de Nancy avec un W/n de 5g/m3

### 3.3 Résultats des modélisations

Les résultats des différentes simulations sont présentés dans le tableau suivant : l'humidité relative a été relevée à la surface de l'isolant à l'interface bois isolant, pour mesurer l'effet barrière du CLT.

Les simulations ont été réalisées sur une période de trois ans.

Les valeurs indiquées sont celles relevées au bout de la 3<sup>ème</sup> année de simulation, au cours de la période de l'année la plus défavorable (pics d'humidité).

Configuration	Type de CLT	HR% max
1	CLT générique Wufi	83,1
2	CLT KLH Wufi	81,7
3	CLT Stora Enso Wufi	82,1
4	3 plis avec colle 30 / 1 / 38 / 1 / 30	85,3
5	3 plis sans colle 30 / 40 / 30	85,7
6	3 plis avec colle 30/1/38/1/30 pli central coupé garni de colle	84,8
7	3 plis sans colle 30 / 40 / 30 pli central coupé vide de colle	85,4
8	3 plis sans colle 30 / 40 / 30 pli central coupé serré	85,4
9	5 plis avec colle 19 / 1 / 20,5 / 1 / 17 / 1 / 20,5 / 1 / 19	84,3
10	5 plis sans colle 19 / 21,5 / 19 / 21,5 / 19	85,7

*Tableau 3 : Résultats des modélisations de l'étude de sensibilité*

### 3.4 Interprétation des résultats

On constate globalement peu d'écart entre les différents cas au vu de ces 1ères modélisations.

On peut cependant constater :

- L'effet barrière du CLT modélisé pli par pli est plus faible que celui des CLT de la base de données du logiciel WUFI (configurations 1 à 3 contre les configurations 4 à 10)
- Pour les CLT sans colle, le comportement est identique quel que soit le nombre de plis (configuration 5 vs configuration 10)
- Les plans de collage apportent un léger effet barrière (configuration 4 vs configuration 5 et configuration 9 vs configuration 10) : l'effet barrière est réduit de par la faible épaisseur des plans de collage et surtout en raison de la masse hygroscopique du bois.
- On ne constate aucune différence entre un chant collé ou non collé : la colle, bien que conférant un léger effet barrière, est trop localisée pour avoir un effet visible à l'échelle paroi, car il n'y a pas de convection dans le CLT, l'air est immobile.
- De même, aucune différence n'est constatée entre les joints de bout serrés ou écartés, remplis de colle ou non.

Par rapport aux essais en laboratoire à venir, ces deux dernières conclusions permettent d'écartier du programme d'essai la réalisation d'essai spécifiques pour mesurer des « Sd équivalents » pour des CLT comportant des chants non collés ou des joints en bouts de lame écartés.

## 4. ESSAIS EN LABORATOIRE

### 4.1 Choix des échantillons

#### 4.1.1 Type de CLT soumis aux essais

La représentativité du programme d'essai a été bâtie de manière à prendre en compte les paramètres suivants :

- Process de fabrication (presse à vide ou presse hydraulique)
- Type de colle (MUF ou PU)
- Bois résineux ou feuillu (hêtre)

Ainsi, les 3 panneaux CLT soumis aux essais ont été :

- CLT résineux collage MUF / presse hydraulique (fourni par la société Belliard)
- CLT résineux collage PU / presse à vide (fourni par la société SACBA)
- CLT Hêtre (fourni par la société Lineazen)

#### 4.1.2 Préparation des éprouvettes de CLT

Le comportement hygrothermique du bois est connu.

L'objet des essais étant de déterminer la résistance à la diffusion de vapeur d'eau des plans de collage, tout en tenant compte des spécificités de la liaison bois / colle (voir chapitre 2 du présent rapport), les panneaux CLT ont été rabotés à une épaisseur minimale pour avoir le moins de bois possible de part et d'autre des plans de collage et accroître la fiabilité et la rapidité des essais.

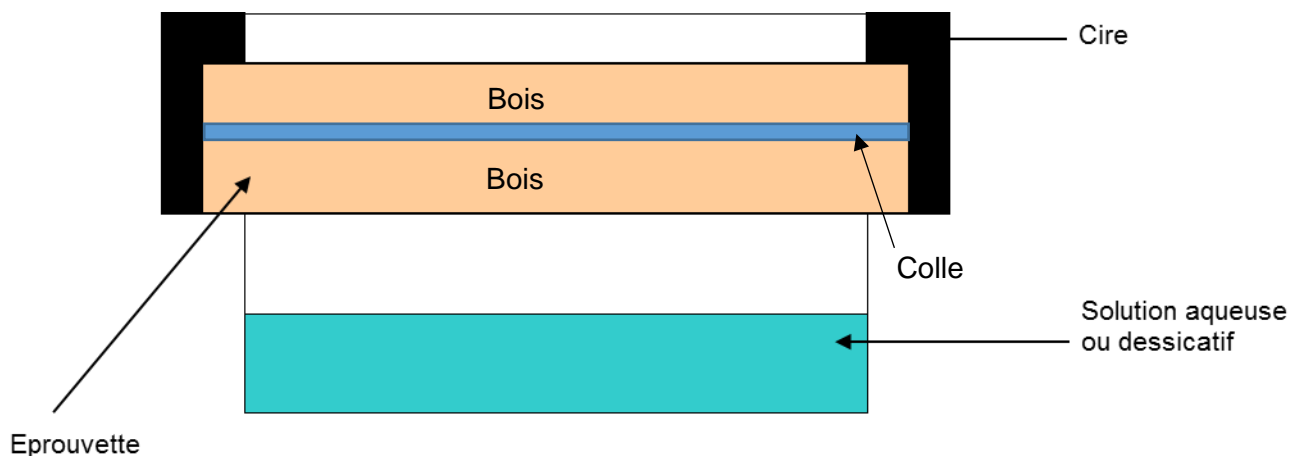
Les bandes de CLT ainsi rabotées ont été ensuite découpées en rondelles de 92 mm de diamètre (dimension des coupelles du dispositif d'essai – voir ci-dessous).

De plus, comme la résistance à la diffusion de vapeur d'eau des plans de collage est liée à l'épaisseur de colle, les 36 éprouvettes (12 par type de CLT) utilisées pour la suite des essais ont été rigoureusement sélectionnées sous une loupe binoculaire pour avoir des épaisseurs de plan de collage identiques. Ont été ainsi sélectionnées des éprouvettes avec épaisseur de plan de collage de 0,15 mm pour les résineux et 0,10 mm pour le hêtre.

#### 4.1.3 Réalisation des essais

Les essais ont été réalisés au sein du laboratoire de physique de FCBA, conformément à la norme NF EN 12572.

L'éprouvette de CLT est scellée au-dessus de la coupelle d'essai contenant soit un dessicatif, soit une solution aqueuse, comme illustré sur la figure 4 ci-dessous.



*Figure 4 : Schéma de principe de préparation des coupelles*

L'assemblage est ensuite placé dans une chambre d'essai régulée en température et en humidité relative. Du fait de la différence de pression partielle de vapeur d'eau entre la coupelle d'essai et la chambre régulée, la vapeur migre au travers des éprouvettes de CLT.



*Figure 5 : Mise en place de la coupelle dans l'appareil d'essai.*

Les essais ont été menés à la fois en coupelle dite « sèche » (humidité relative égale à 0% d'un côté et 50% de l'autre côté de l'échantillon) et en coupelle dite « humide » (humidité relative égale à 50% d'un côté et 93% de l'autre côté de l'échantillon) pour permettre de couvrir toutes les conditions d'humidité rencontrée dans le CLT en œuvre.

Pour chaque type de CLT, 12 éprouvettes ont été préparées : 6 pour une mesure en coupelle sèche et 6 pour une mesure en coupelle humide. Il a donc été réalisé 36 mesures.

#### 4.1.4 Résultats des essais

Le tableau ci-dessous regroupe les résultats bruts. La valeur Sd des 6 éprouvettes par coupelle est donnée en fonction de l'épaisseur de l'éprouvette bois /colle / bois

CLT PU résineux				CLT MUF résineux				CLT MUF Hêtre			
Coupelle sèche		Coupelle humide		Coupelle sèche		Coupelle humide		Coupelle sèche		Coupelle humide	
Mesure 1		Mesure 2		Mesure 3		Mesure 4		Mesure 5		Mesure 6	
Sd	Epaisseur (mm)	Sd	Epaisseur (mm)	Sd	Epaisseur (mm)	Sd	Epaisseur (mm)	Sd	Epaisseur (mm)	Sd	Epaisseur (mm)
2.752	7	0.854	6.8	1.721	7.5	0.295	7.4	0.799	1.7	0.247	1.8
1.964	7.2	0.619	7	2.153	7.7	0.286	7.2	0.652	2.1	0.238	2.3
2.163	6.9	0.762	6.9	1.783	7.7	0.361	7.6	0.769	2.2	0.271	2.1
1.94	7.3	0.443	6.3	1.814	7.2	0.315	7.8	0.736	1.9	0.346	1.9
2.253	6.8	0.401	6.1	1.678	7.4	0.404	7.6	0.689	2.2	0.254	1.9
2.692	6.9	0.489	6.5	1.507	7.2	0.353	7.3	0.663	1.9	0.216	1.9
<b>2.294 (moy)</b>		<b>0.595 (moy)</b>		<b>1.776 (moy)</b>		<b>0.336 (moy)</b>		<b>0.718 (moy)</b>		<b>0.262 (moy)</b>	

Tableau 4 : résultats bruts des essais de résistance à la diffusion de vapeur d'eau



## 5. INTERPRETATION DES ESSAIS ET CREATION DE DONNEES GENERIQUES

### 5.1 Interprétation des résultats

En première lecture il apparaît que la dispersion des résultats est importante. Cette dispersion varie d'une dizaine de % pour la mesure 5 jusqu'à plus de 35% pour la mesure 2.

Pour exploiter ces résultats pour déterminer la résistance à la diffusion de vapeur d'eau de la partie bois et de la partie collage il faudrait connaître parfaitement soit l'un ou l'autre des produits pour évaluer le second produit.

Des dispersions importantes subsistent sur l'épaisseur des parties bois. D'autre part de nombreuses mesures de résistance aux transferts de vapeur d'eau ont été réalisées sur du bois : Les résultats de ces différentes mesures montrent que la dispersion est importante entre les différentes natures de bois et suivant que l'on prend un bois en coupe transversale ou longitudinale suivant les fibres.

Enfin pour la plupart des bois la résistance aux transferts de vapeur d'eau est variable en fonction de l'humidité moyenne lors des mesures.

Deux éléments peuvent aider à la détermination des caractéristiques des différents produits : Normalement en modifiant les valeurs de résistance aux transferts de vapeur d'eau des bois des mesures 1 et 3, les valeurs doivent être identiques ainsi que les valeurs pour les mesures 2 et 4. De la même manière les valeurs du collage doivent être identiques pour les mesures 3 et 5 ainsi que les mesures 4 et 6.

Cette analyse permet de dresser le tableau suivant avec 6 inconnues. Cela suppose que :

- le bois qui compose les éprouvettes pour les essais 1 ; 2 ; 3 et 4 est identique,
- le collage des éprouvettes pour les essais 3 ; 4 ; 5 et 6 est identique,
- $e_{\text{bois}} = e_{\text{globale}} - e_{\text{collage}}$ .

μ collage CLT PU				μ collage CLT MUF				μ collage CLT MUF Hêtre			
e bois	e collage	μ bois	μ collage	e bois	e collage	μ bois	μ collage	e bois	e collage	μ bois	μ collage
6.87	0.15	x1	y1	7.30	0.15	x1	z1	1.90	0.10	t1	z1
6.45	0.15	x2	y2	7.33	0.15	x2	z2	1.88	0.10	t2	z2

Tableau 5 : Définition des inconnues (μ)

Les valeurs de résistance aux transferts de vapeur de l'ensemble bois + collage sont donc égales à :

$\mu_{global} \cdot e_{global} = Sd_{global}$  mais aussi couche par couche :

$$\mu_{bois} \cdot e_{bois} + \mu_{collage} \cdot e_{collage} = Sd_{global}$$

Ce qui donne les équations suivantes, en reprenant le tableau 5 :

- $x1 \cdot 0,00687 + y1 \cdot 0,00015 = 2,294$  (équation 1 : CLT résineux PU – coupelle sèche)
- $x2 \cdot 0,00645 + y2 \cdot 0,00015 = 0,595$  (équation 2 : CLT résineux PU – coupelle humide)
- $x1 \cdot 0,0073 + z1 \cdot 0,00015 = 1,776$  (équation 3 : CLT résineux MUF – coupelle sèche)
- $x2 \cdot 0,00733 + z2 \cdot 0,00015 = 0,336$  (équation 4 : CLT résineux MUF – coupelle humide)
- $t1 \cdot 0,0019 + z1 \cdot 0,0001 = 0,718$  (équation 5 : CLT Hêtre MUF – coupelle sèche)
- $t2 \cdot 0,00188 + z2 \cdot 0,0001 = 0,262$  (équation 6 : CLT Hêtre MUF – coupelle humide)

Des courbes peuvent être représentées dans une figure à partir des équations 1 et 3 et ensuite 2 et 4.

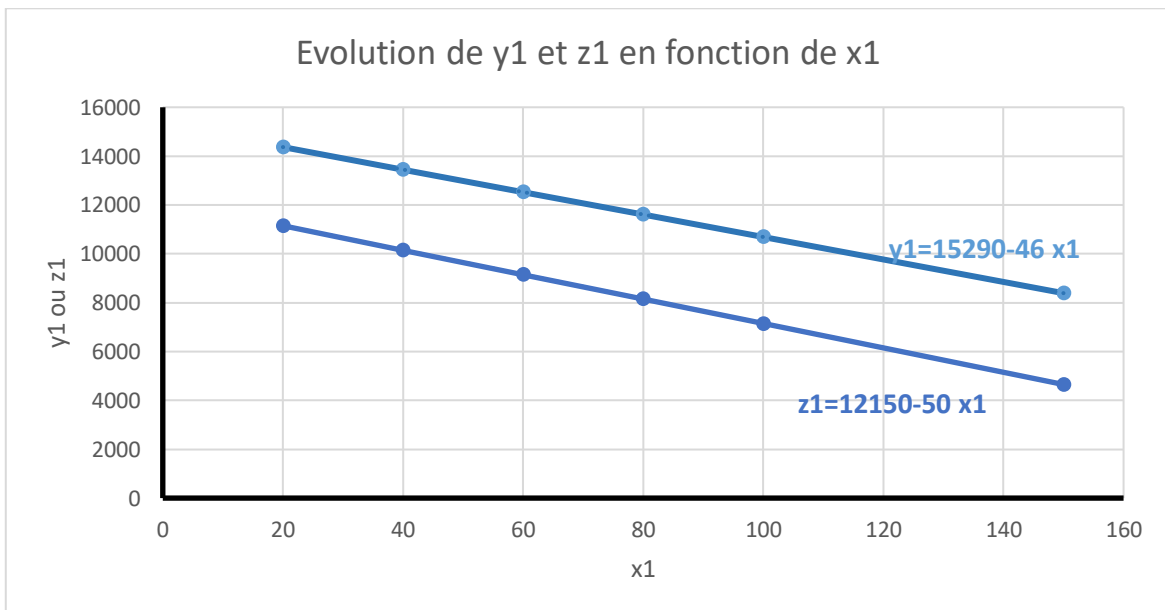


Figure 6 : Evolution de y1 et z1 en fonction de x1

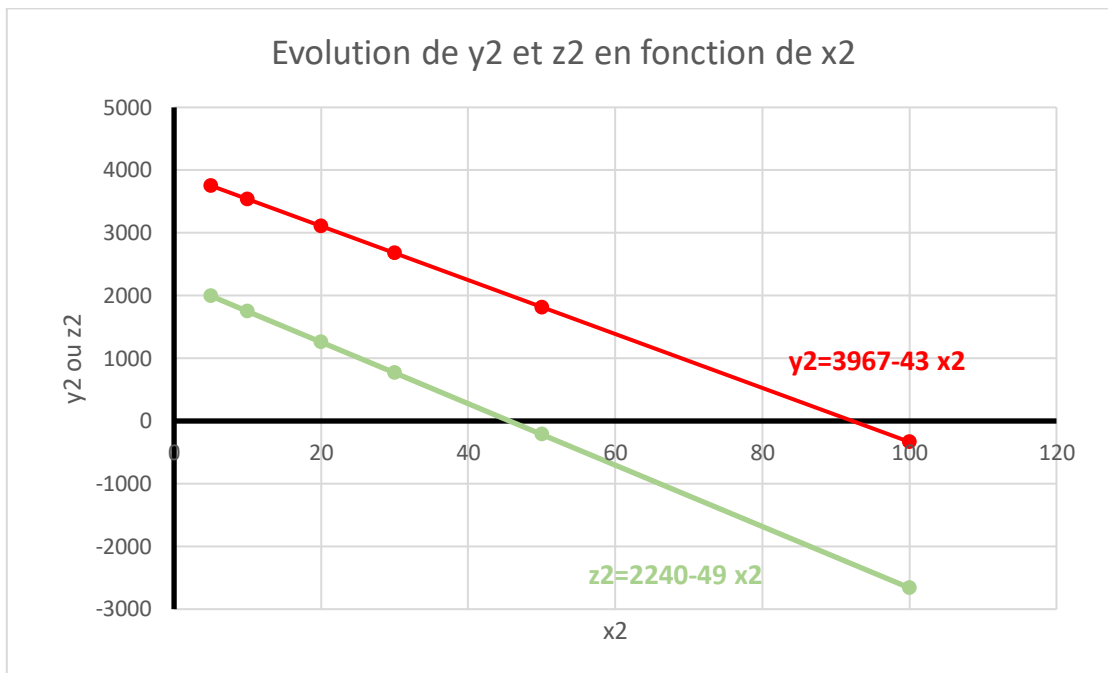


Figure 7 : Evolution de y2 et z2 en fonction de x2

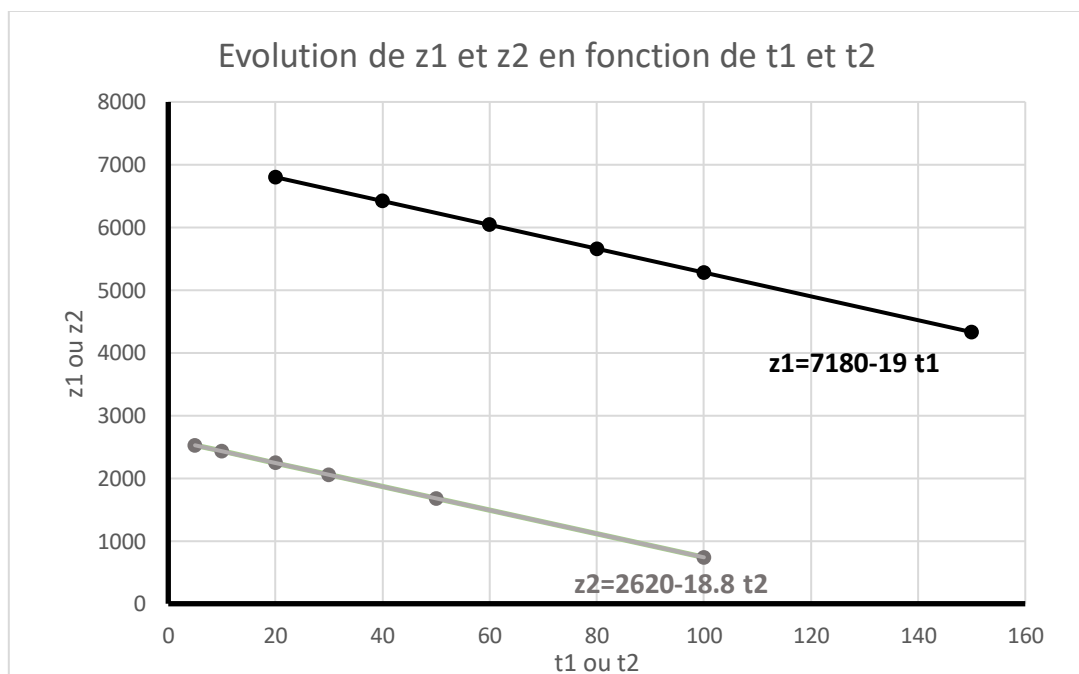


Figure 8 : Evolution de z1 et z2 en fonction de t1 et t2

Plusieurs informations peuvent être tirées de ces courbes :

- $y_1 = z_1 + 3700$ ,
- $y_2 = z_2 + 1800$ ,
- $x_1 = 129 + 0.93 x_2$
- $x_2 < 40$ ,
- classiquement  $x_1 > x_2$  ;  $y_1 > y_2$  et  $z_1 > z_2$  (les matériaux à l'état sec résistent plus à la diffusion de vapeur d'eau que les matériaux à l'état humide).

Toutes ces indications montrent que :

- le bois utilisé pour les éprouvettes 1 ; 2 ; 3 et 4 comporte un  $\mu$  à l'état sec supérieur à 130 (écart entre  $x_1$   $x_2$ ),
- à partir de cette valeur minimale de 130 pour  $x_1$  cela entraîne une valeur de  $y_1 < 9350$  et par conséquent  $y_2 < 3850$ ,
- toujours du premier constat la valeur de  $z_1$  serait inférieure à 5650 et la valeur de  $z_2$  serait donc inférieure à 1150 ce qui ramènerait la valeur  $y_2$  à une valeur inférieure à 3150 et donc la valeur  $y_1$  inférieure à 8650.

Toutes ces analyses permettent à partir d'une valeur de  $\mu$  du bois résineux en coupelle sèche de 140 (valeur fréquemment rencontrée dans la bibliographie) de déterminer les autres valeurs de :

- $\mu$  du bois résineux en coupelle humide de 12,
- $\mu$  de la colle PU en coupelle sèche de 8850,
- $\mu$  de la colle PU en coupelle humide de 3450,
- $\mu$  de la colle MUF en coupelle sèche de 5200,
- $\mu$  de la colle MUF en coupelle humide de 1650,
- $\mu$  du hêtre en coupelle sèche de 105,
- $\mu$  du hêtre en coupelle humide de 50.

## 5.2 Des données CLT « génériques »

Grâce à cette approche, il est possible, pour les colles utilisées par les industriels français du CLT, de définir les données d'entrée suivantes pour des simulations de transferts hygrothermiques dans des parois types représentatives comportant des CLT :

### ✓ **Données communes aux colles MUF et PU (après séchage) :**

- Masse volumique sèche : 500 kg/m<sup>3</sup>
- Porosité : 0,0001 m<sup>3</sup> / m<sup>3</sup>
- Capacité thermique massique : 2300 J / (kg.K)
- Conductivité thermique : 2,3 W / (m.K)

### ✓ **Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau $\mu$ d'une colle MUF**

- $\mu$  de la colle MUF en coupelle sèche de 5200,
- $\mu$  de la colle MUF en coupelle humide de 1650,

✓ **Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau  $\mu$  d'une colle PU**

- $\mu$  de la colle PU en coupelle sèche de 8850,
- $\mu$  de la colle PU en coupelle humide de 3450,

Le process de fabrication (presse à vide ou presse hydraulique ne modifie pas les caractéristiques hygrothermique d'une même colle.

A noter que pour une utilisation avec le logiciel WUFI, les matériaux insérés dans les modèles doivent avoir une épaisseur minimale de 1 mm.

Il convient donc de ramener l'épaisseur « vraie » des plans de collage à 1 mm en adaptant en conséquence le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau pour qu'il reste équivalent.

Par exemple, pour une colle PU, pour un plan de collage « réel » (mesuré sur le CLT) de 0,15 mm, on aura comme facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau à paramétrer dans WUFI  $8850 \times 0,15 = 1328$ .

On peut ainsi pour différentes épaisseurs de plan de collage pré-calculer les différentes valeurs «  $\mu$  » devant être paramétrées dans le logiciel WUFI, pour que les plans de collage puissent être insérés dans le modèle avec une épaisseur de 1 mm :

Epaisseur du plan de collage (mm)	Colle PU				Colle MUF			
	$\mu$ sec réel	$\mu$ sec WUFI	$\mu$ humide réel	$\mu$ humide WUFI	$\mu$ sec réel	$\mu$ sec WUFI	$\mu$ humide réel	$\mu$ humide WUFI
0,10	8850	<b>885</b>	3450	<b>345</b>	5200	<b>520</b>	1650	<b>165</b>
0,15	8850	<b>1328</b>	3450	<b>518</b>	5200	<b>780</b>	1650	<b>248</b>
0,20	8850	<b>1770</b>	3450	<b>690</b>	5200	<b>1040</b>	1650	<b>330</b>
0,25	8850	<b>2213</b>	3450	<b>863</b>	5200	<b>1300</b>	1650	<b>413</b>
0,30	8850	<b>2655</b>	3450	<b>1035</b>	5200	<b>1560</b>	1650	<b>495</b>
0,35					5200	<b>1820</b>	1650	<b>578</b>
0,40					5200	<b>2080</b>	1650	<b>660</b>
0,45					5200	<b>2340</b>	1650	<b>743</b>
0,50					5200	<b>2600</b>	1650	<b>825</b>
0,55					5200	<b>2860</b>	1650	<b>908</b>
0,60					5200	<b>3120</b>	1650	<b>990</b>

*Tableau 6 : Valeurs  $\mu$  à paramétrer pour un calcul WUFI, en fonction du type de colle et de l'épaisseur des plans de collage du CLT*

## 6. MODELISATION DE PAROIS REPRESENTATIVES

### 6.1 Objet de l'Étude

Suite aux essais menés sur le comportement hygrothermique du CLT, et sur la base de ces mêmes résultats, des simulations hygrothermiques ont été menées sur des parois types représentatives afin de s'assurer de leur salubrité.

### 6.2 Présentation des moyens de calculs

Le logiciel utilisé « WUFI » est un logiciel du commerce qui permet de simuler les transferts thermiques, de vapeur d'eau et d'eau liquide.

Ce logiciel permet, à partir des paramètres d'entrée, de déterminer la température et l'humidité en tous points des produits constituant la paroi.

Les calculs sont réalisés pour simuler les transferts sur une période de trois ans ou 5 ans et pour des locaux situés à Nancy, Brest et La Pesse.

### 6.3 Hypothèses

Quand une lame d'air est supposée ventilée, celle-ci est très fortement ventilée et la température ainsi que l'humidité sont considérées comme identiques à celles de l'ambiance d'où provient la ventilation.

Les transferts d'air ne sont pas pris en compte.

Les membranes et les panneaux CLT utilisés dans une paroi sont considérés comme continus, sans discontinuité ponctuelle, et correctement mises en œuvre.

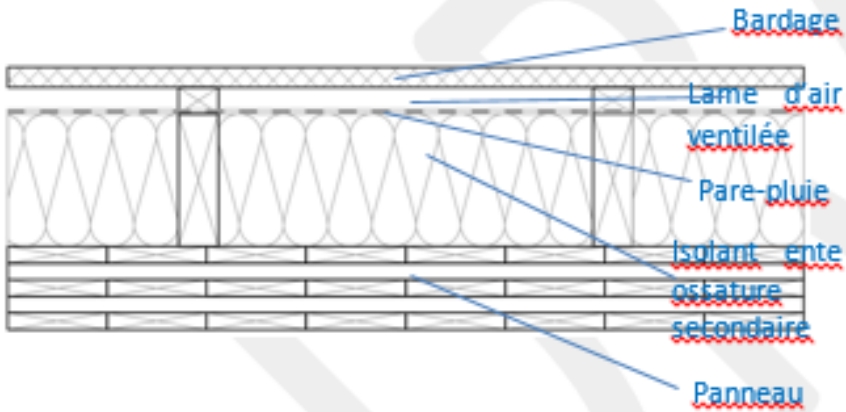
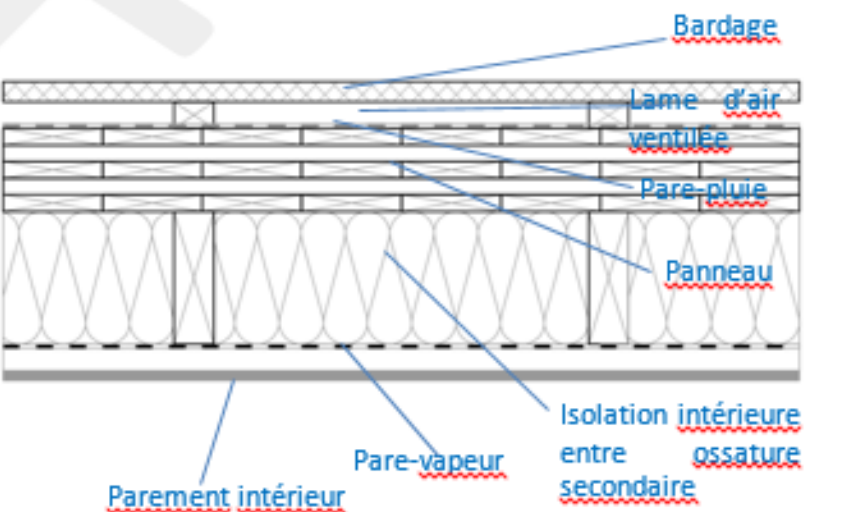
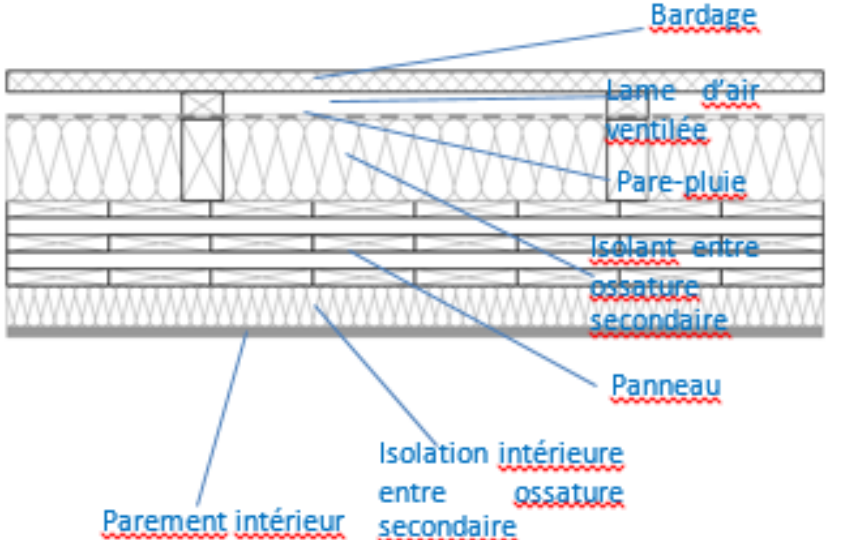
Les conditions hygrothermiques initiales dans tous les matériaux sont de 80% d'humidité relative et de 20°C.

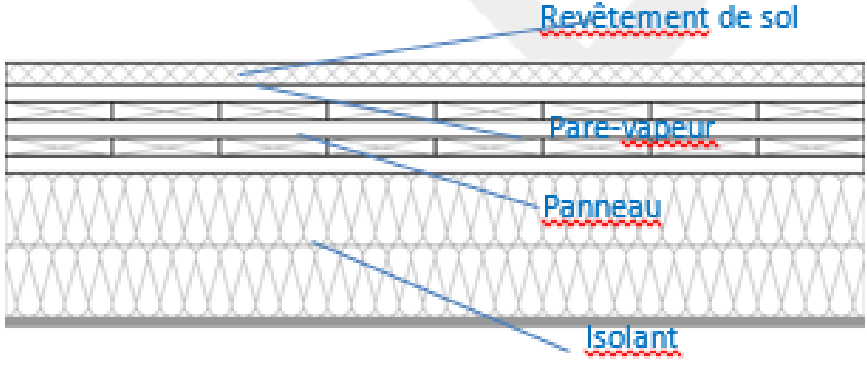
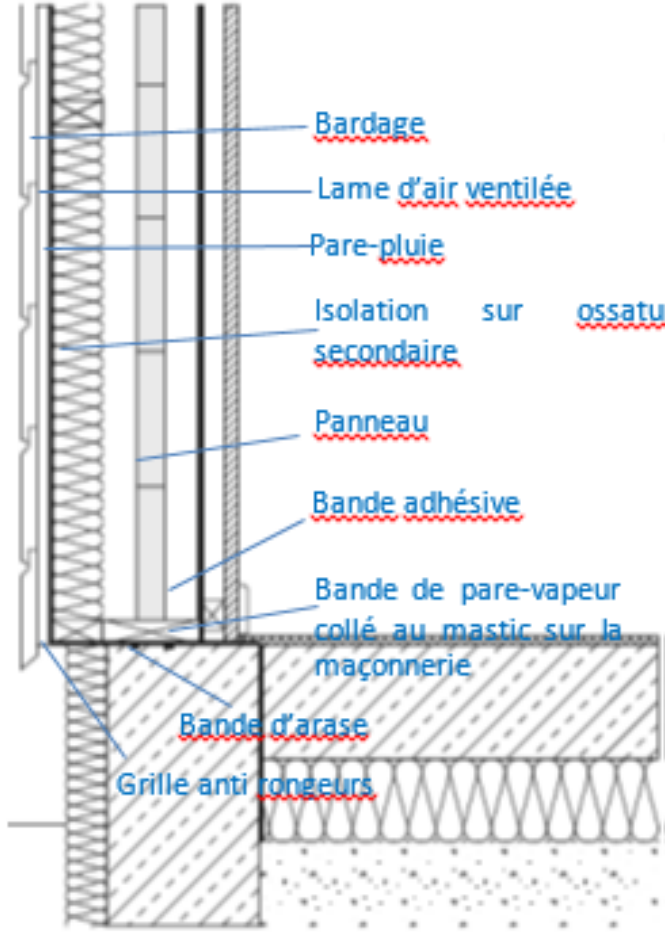
### 6.4 Cahier des charges

#### 6.4.1 *Présentation des parois et points singuliers à modéliser*

Les modélisations à réaliser ont été définies après échanges avec les membres de CLT France et les membres du groupe de travail en charge de la rédaction du Cahier de Prescriptions Techniques (CPT) CLT piloté par le CSTB.

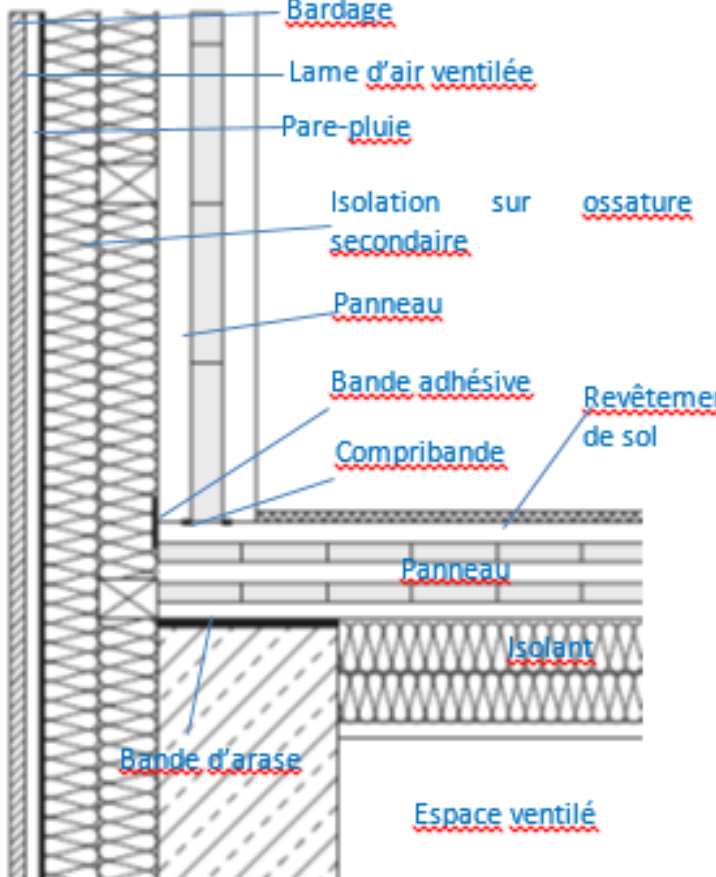
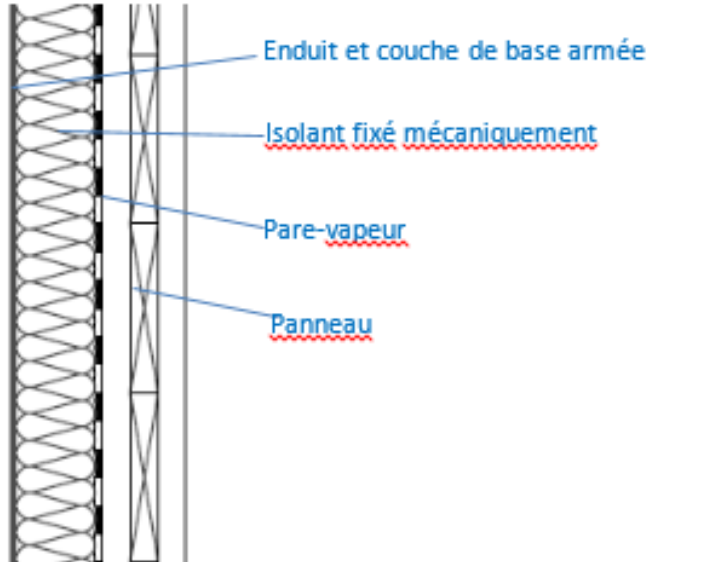
De plus, pour les parois avec côté extérieur un enduit sur isolant (ETICS) (cas à modéliser n° 21 à 26 dans le tableau 7 ci-dessous) les membres du groupe de travail du projet CODIFAB « ETICS sur ossature bois et CLT » ont été consultés.

	N° Figure CPT	Figure
Bardage ventilé	12	 <p>Labels: <u>Bardage</u>, <u>Lame d'air ventilée</u>, <u>Pare-pluie</u>, <u>Isolant entre ossature secondaire</u>, <u>Panneau</u></p>
	13	 <p>Labels: <u>Bardage</u>, <u>Lame d'air ventilée</u>, <u>Pare-pluie</u>, <u>Panneau</u>, <u>Isolation intérieure entre ossature secondaire</u>, <u>Pare-vapeur</u>, <u>Parement intérieur</u></p>
	14	 <p>Labels: <u>Bardage</u>, <u>Lame d'air ventilée</u>, <u>Pare-pluie</u>, <u>Isolant entre ossature secondaire</u>, <u>Panneau</u>, <u>Isolation intérieure entre ossature secondaire</u>, <u>Parement intérieur</u></p>

16	 <p>Revêtement de sol</p> <p>Pare-vapeur</p> <p>Panneau</p> <p>Isolant</p>
25	 <p>Bardage</p> <p>Lame d'air ventilée</p> <p>Pare-pluie</p> <p>Isolation sur ossature secondaire</p> <p>Panneau</p> <p>Bande adhésive</p> <p>Bande de pare-vapeur collé au mastic sur la maçonnerie</p> <p>Bande d'arase</p> <p>Grille anti rongeurs</p>



<p>24</p>	
<p>28</p>	

	27	 <p> <u>Bardage</u>  <u>Lame d'air ventilée</u>  <u>Pare-pluie</u>  <u>Isolation sur ossature secondaire</u>  <u>Panneau</u>  <u>Bande adhésive</u>  <u>Compriband</u>  <u>Revêtement de sol</u>  <u>Panneau</u>  <u>Isolant</u>  <u>Bande d'arase</u>  <u>Espace ventilé</u> </p>
ETICS	34	 <p> <u>Enduit et couche de base armée</u>  <u>Isolant fixé mécaniquement</u>  <u>Pare-vapeur</u>  <u>Panneau</u> </p>

	38	
Présence d'une ferrure	40	

Tableau 7 : Schéma des parois et points singuliers modélisés

Outre le type de paroi et les points singuliers, les paramètres variables de l'étude sont :

- Les climats extérieurs : Nancy, Brest, La Pesse.
- La nature du panneau CLT : type de colle (MUF ou PU), épaisseur (90 mm – 3 plis ou 150 mm – 5 plis)
- La nature de l'isolant : type d'isolant (laine minérale, polystyrène expansé, fibre de bois) et son épaisseur (100 mm, 140 mm, 200 mm)
- La présence ou non d'un doublage isolant de 50 mm côté intérieur du CLT, quand il ne s'agit pas de l'isolant principal
- La présence ou non d'une membrane pare-vapeur dans la paroi ( $S_d = 2 \text{ m}$  ou  $18 \text{ m}$ )

La combinaison de ces différentes variables est définie dans le tableau 8 ci-dessous :

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs			CLT				Isolant							Sd PV (m)		
						Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal (mm)			Ep. Doublage (mm)			
			Nancy	Brest	La Pesse	PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)	50	0 (sans)	2
1	12		X				X	X		X				X		X			
2	12				X		X	X		X				X		X			
3	12		X				X	X			X				X	X			X
4	13		X			X			X	X				X		X			X
5	13			X		X			X	X				X		X			X
6	13				X	X			X	X				X		X			X
7	13				X	X			X	X				X		X		X	
8	14			X		X			X	X			X				X		
9	16	Pl. bas sur VS, isolant sous CLT	X				X		X	X				X		X			X
10	16		X				X		X		X			X		X			X
11	16		X				X		X			X			X		X		
12	16bis	Pl. bas sur VS, isolant au-dessus du CLT		X		X			X					X		X			X
13	16 bis			X		X			X					X		X			X
14	16bis			X		X			X		X				X		X		
15	24	isolant PSE 100 mm sous chape et périphérique	X				X	X		X				X		X			X
16	25	isolant PSE 100 mm sous dalle et périphérique	X				X	X		X				X		X			X
17	27	27 = 12 + 16	X				X	X (mur)	X (plancher)	X mur		X Pl.b	X Pl.b	X mur		X			X

18	27	27 = 12 + 16			X		X	X (mur)	X (plancher)	X mur		X Pl.b	X Pl.b	X mur		X		X	
19	28	28 = 12 + 16 bis	X			X (Pl.B)	X (mur)	X (mur)	X (plancher)	X mur		X Pl.b	X			X	X (mur)	X (pl.b)	
20	28	28 = 12 + 16 bis			X	X (Pl.B)	X (mur)	X (mur)	X (plancher)	X mur		X Pl.b	X			X	X (mur)	X (pl.b)	
21	34	enduit minéral (Sd faible)	X				X	X				X		X			X		
22	34	enduit RPE (Sd plus élevé)		X			X	X				X		X			X		
23	34	enduit RPE (Sd plus élevé)			X		X	X				X		X			X		
24	34	enduit RPE (Sd plus élevé)	X				X	X		X				X			X		
25	34	enduit RPE (Sd plus élevé)	X				X	X		X				X				X	
26	34	enduit minéral (Sd faible)	X				X	X			X			X				X	
27	38	à voir après simu cas 34	X																
28	40	40 = 12 avec ferrure traversante	X				X	X		X				X		X		X	
29					X		X	X		X				X		X		X	

Tableau 8 : Combinaison de ces différentes variables étudiées

### 6.4.2 Caractéristiques des produits composant les parois

Les caractéristiques des colles MUF et PU sont celles déterminées par essai et définies au chapitre 5 ci-dessus.

Les caractéristiques générales des constituants sont données ci-dessous :

Matériau	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Porosité (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Capacité thermique massique (J/kg.K)	Conductivité thermique (W/m.K)	Facteur rés. à la diffusion de vapeur d'eau (sec)
Isolant minéral	50	0,98	1030	0,032	1,1
Isolant fibre de bois <b>rigide</b>	110	0,96	2100	0,041	5
Isolant fibre de bois <b>semi-rigide</b>	53	0,96	2100	0,039	1,35
PSE	30	0,95	1500	0,035	50
Pare-vapeur Sd 18m	130	0,001	2300	2,3	18000
Pare-vapeur Sd 2m	130	0,001	2300	2,3	2000
Membrane pare-pluie (murs)	130	0,001	2300	2,3	180
Ecran de sous-toiture HPV	130	0,001	2300	2,3	100
Bois massif (résineux)	600	0,72	1600	0,13	140
Acier	4800	0,001	450	60	1000000
Plaque de plâtre	850	0,65	1000	0,25	8,3
Béton	2200	0,18	850	1,6	92
Système d'enduit (couche de base + finition) Sd = 2 m	1650	0,5	850	0,87	2000
Système d'enduit (couche de base + finition) Sd = 0,3 m	1650	0,5	850	0,87	300
Colle MUF (0,15 mm ép.)	500	0,0001	2300	2,3	780
Colle PU (0,15 mm ép.)	500	0,0001	2300	2,3	1328

Tableau 9 : caractéristiques des matériaux utilisés dans les modélisations

Pour les caractéristiques des enduits, et notamment le Sd de ceux-ci, les valeurs hautes (2 m) et basses (0,3 m) ont été validées en comité de pilotage du projet « ETICS sur ossature bois et CLT » (Compte-rendu de la réunion du 27/11/2017), en présence de représentants du CODIFAB, du SIPEV et du SNMI, financeurs de cette étude.

### 6.4.3 Climats extérieurs

Les climats extérieurs choisis sont ceux de Nancy (climat de plaine continentale), Brest (climat océanique humide) et La Pesse (climat de montagne). Cela permet une représentation complète de la métropole.

Les températures et humidités des différents climats sont présentées dans les figures suivantes :

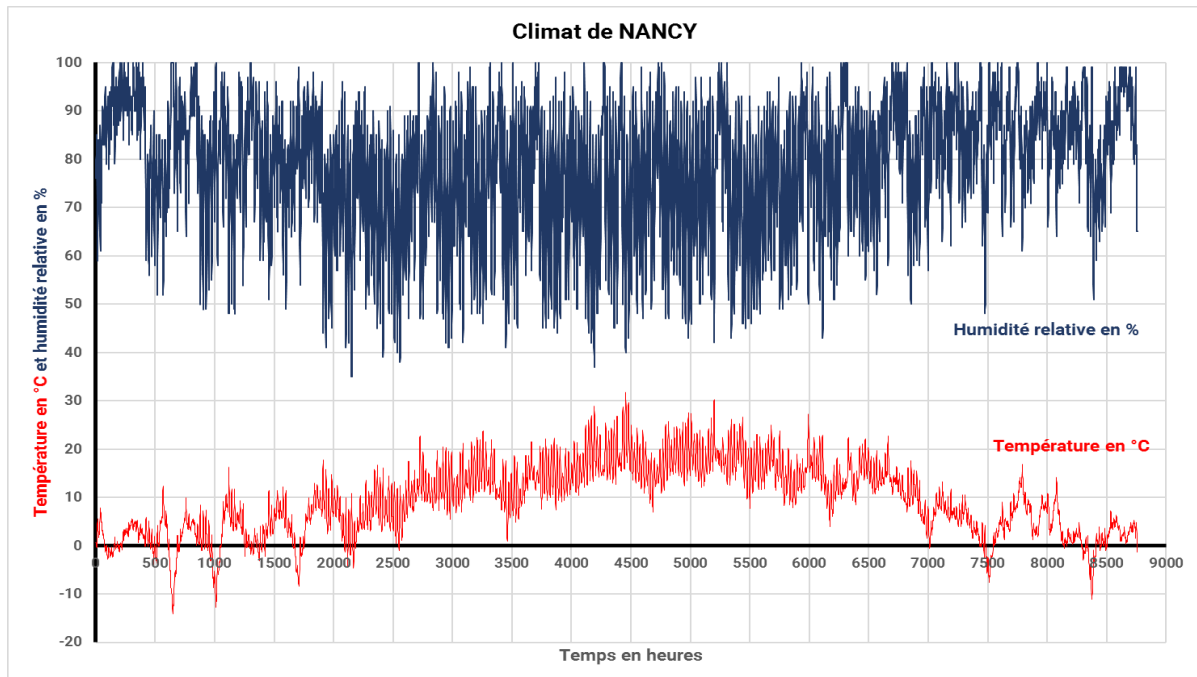


Figure 9 : Evolution de la température et de l'humidité sur une année pour le climat de Nancy

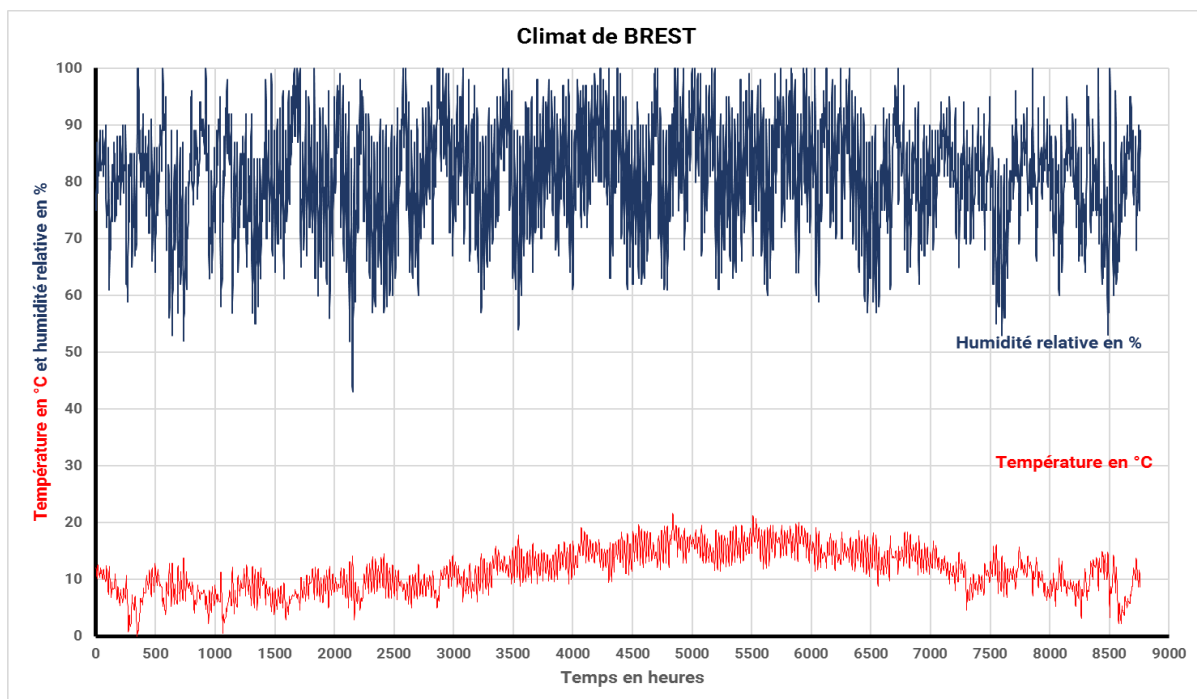


Figure 10 : Evolution de la température et de l'humidité sur une année pour le climat de Brest



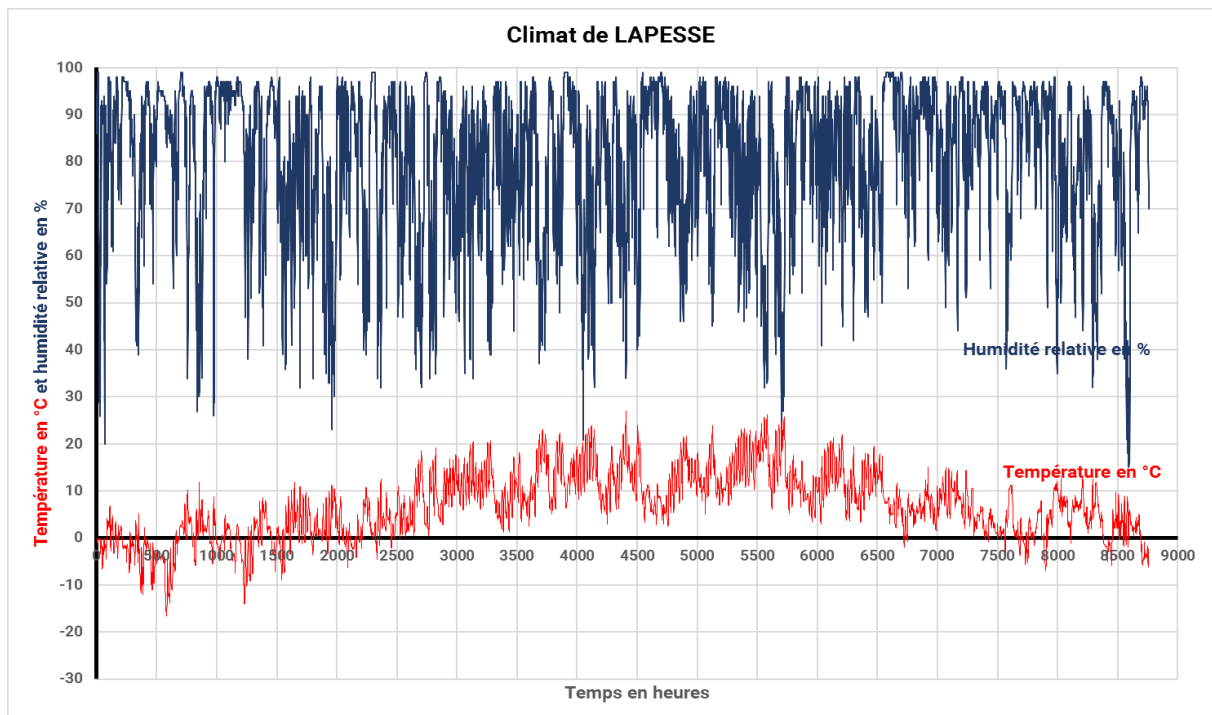


Figure 11 : Evolution de la température et de l'humidité sur une année pour le climat de La Pesse

Concernant le climat dans un vide sanitaire ou un local non chauffé, les hypothèses suivantes (sécuritaires) ont été prises :

- Surface de 100 m<sup>2</sup>,
- 40 m linéaires de périmètre,
- sol argileux,
- murs en parpaing en périphérie,
- local en milieu rural,
- Hauteur du vide sanitaire de 50 cm au-dessus du sol,
- ventilé à 1/150 de la surface,
- la température du vide sanitaire est calculée à partir des équations de la Règlementation Thermique.
- Une quantité d'eau de  $5 \times (1 - HR \text{ extérieure})$  a été ajoutée à la teneur en eau de l'air

#### 6.4.4 Ambiances intérieures

Les ambiances intérieures prises en compte sont des ambiances de classe d'humidité moyenne avec un W/n maximum de 5 g/m<sup>3</sup> (locaux en moyenne hygrométrie au sens de l'annexe D de la partie 1-1 du NF DTU 31.2).

##### ✓ **En hiver (1<sup>er</sup> octobre – 30 avril)**

$$T_{int} = 20^{\circ}\text{C}$$

La teneur en vapeur d'eau de l'air intérieur correspond à la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air venant de l'extérieur, à laquelle il faut rajouter la quantité de vapeur d'eau produite par cuisson et autres, soit 5 g (W/n) de vapeur d'eau par m<sup>3</sup> d'air.

Le taux d'humidité de l'air intérieur est déterminé par le calcul suivant :

$$\rho_{v\_int} = \rho_{v\_ext} + 5.10^{-3} \text{ kg / m}^3$$

$$\text{d'où } HR_{int} = \frac{(HR_{ext} \times P_{sat}(T_{ext}) \times \frac{M}{RT_{ext}} + 5.10^{-3}) \times \frac{RT_{int}}{M}}{P_{sat}(T_{int})}$$

Où :

- $\rho_v$  : masse volumique de vapeur d'eau en kg/m<sup>3</sup>,
- HR : humidité relative en %,
- T : température en °K,
- P : pression en Pa,
- M : masse molaire en kg/mole,
- R : constante des gaz parfaits.
- Le suffixe *int* pour intérieur ; le suffixe *ext* pour extérieur ; le suffixe *sat* pour saturante.

##### ✓ **En été (1<sup>er</sup> mai – 30 septembre)**

A partir du 1<sup>er</sup> mai, la température augmente progressivement jusqu'à 25°C.

Cette température est atteinte le 1<sup>er</sup> juillet. Elle est ensuite constante jusqu'au 31 août.

Du 1<sup>er</sup> au 30 septembre, la température passe progressivement de 25 °C à 20 °C.

$$HR_{int} = \frac{(HR_{ext} \times P_{sat}(T_{ext}) \times \frac{M}{RT_{ext}}) \times \frac{RT_{int}}{M}}{P_{sat}(T_{int})}$$

Pas de production de vapeur en été ; l'air intérieur est suffisamment en équilibre avec l'extérieur (ouvertures des fenêtres et des portes) pour que la production de vapeur d'eau soit évacuée.

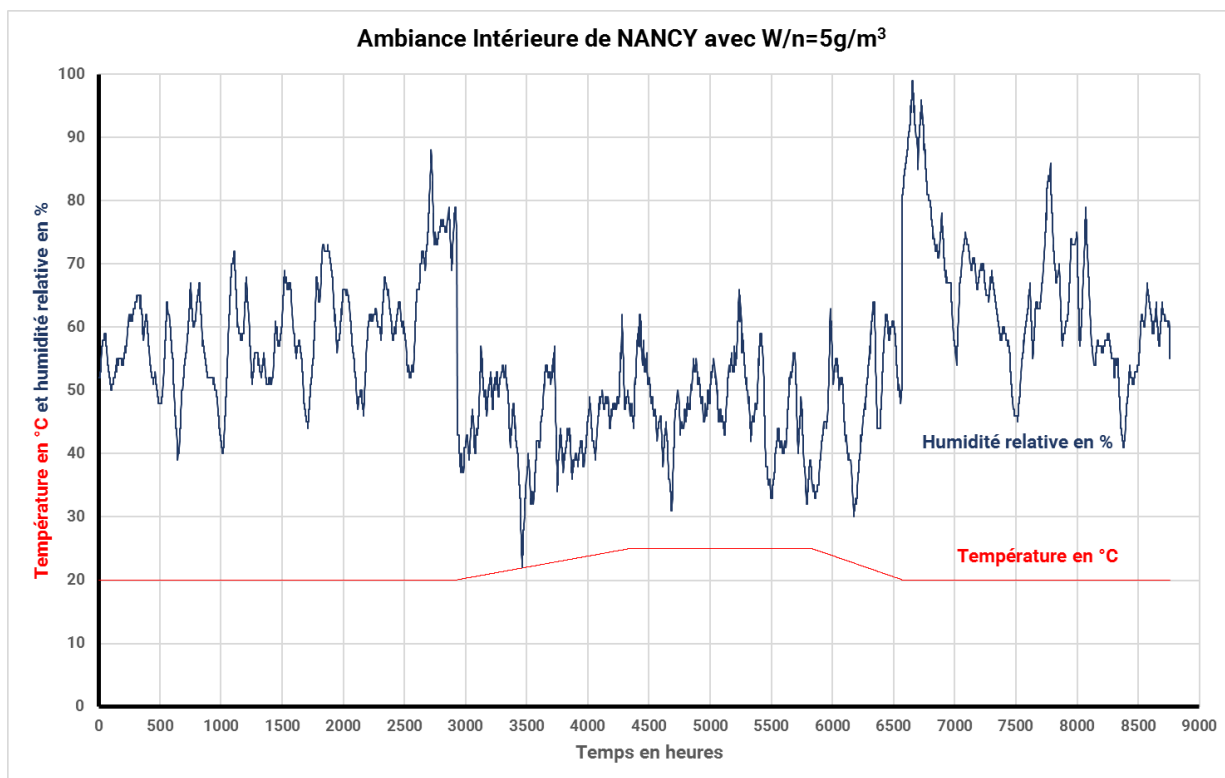


Figure 12 : Evolution de la température et de l'humidité dans l'ambiance intérieure de Nancy avec un  $W/n$  de  $5g/m^3$

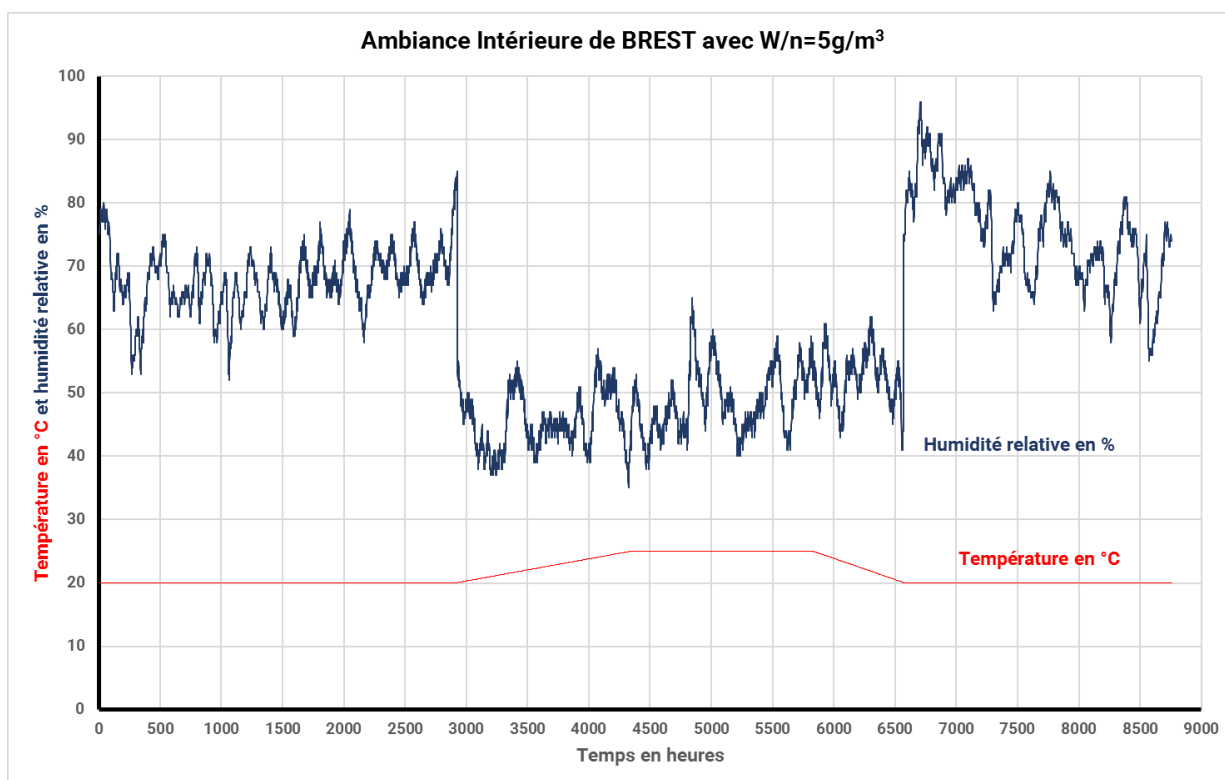


Figure 13 : Evolution de la température et de l'humidité dans l'ambiance intérieure de Brest avec un  $W/n$  de  $5g/m^3$

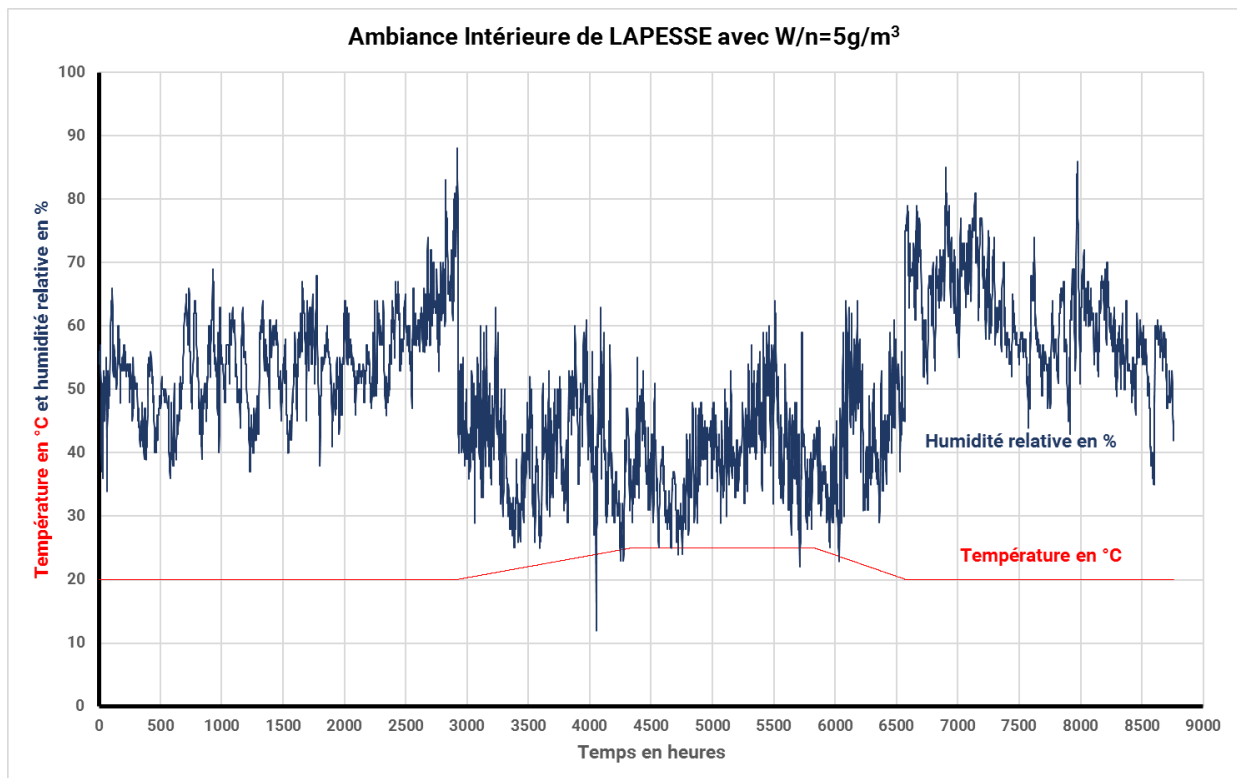


Figure 14 : Evolution de la température et de l'humidité dans l'ambiance intérieure de La Pesse avec un  $W/n$  de  $5g/m^3$

## 6.5 Résultats des modélisations

### 6.5.1 Format des résultats

Les résultats des différentes simulations qui sont présentés dans les tableaux suivants précisent les teneurs en eau, en  $kg/m^3$  et en % en masse, l'humidité relative en % et l'évolution de l'humidité au cours du temps.

Ces résultats sont extraits de graphiques tirés eux-mêmes du logiciel WUFI. Au vu du très grand nombre de résultats (plus de 170 courbes !), les graphiques montrant l'évolution de l'humidité au cours du temps dans les parois ne sont pas joints au présent rapport mais peuvent être fournis par voie électronique.

Les figures suivantes ont été nécessaires pour compléter tous les tableaux :

- rappel du schéma de la paroi,
- teneur en eau moyenne ( $kg/m^3$ ) dans la paroi globale,
- teneur en eau et humidité relative de l'isolant dans le panneau CLT,
- teneur en eau et humidité de l'isolant en laine de roche,

ainsi que des figures permettant de visualiser localement les teneurs en eau et les humidités relatives.

### 6.5.2 Cas n°1

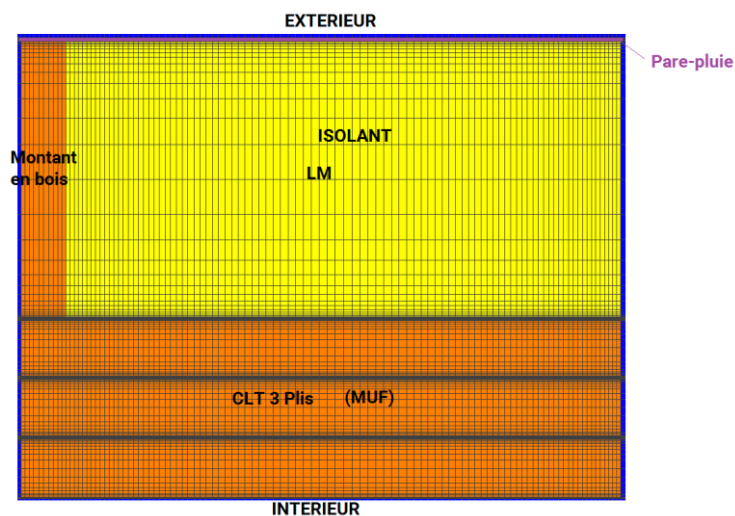


Figure 15 : schéma de la paroi type 12 (Cas 1)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)				
							Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal (mm)					Ep. Doublage (mm)	
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)	50	0 (sans)	2
1	12		X					X	X		X			X		X		X		

Valeurs maximales atteintes à la 5 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	23	–	–	→	
3 <sup>ème</sup> plis du panneau CLT	47	7,9	53	→	
Isolant	1,5	2,9	66	→	
Partie de l'isolant contre le pare-pluie	32	64,5	99,2	→	Au-dessus de 98% pendant moins de 8 jours/an

Tableau 10 : Résultats de la configuration – Cas 1

### 6.5.3 Cas n°2

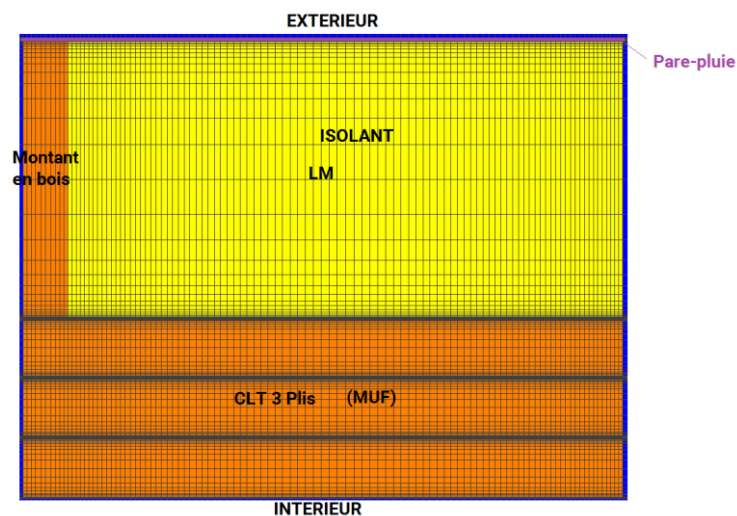


Figure 16 : schéma de la paroi type 12 (Cas 2)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)				
							Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal					Ep. Doublage	
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)	50	0 (sans)	2
2	12					X		X	X		X			X		X	X			

Valeurs maximales atteintes à la 5 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	21,5	–	–	→	
3 <sup>ème</sup> plis du panneau CLT	43,5	7,3	46	→	
Isolant	1,1	2,2	64	→	
Partie de l'isolant contre le pare-pluie	19,5	39	98,3	→	Au-dessus de 98% pendant moins de 2 jours/an

Tableau 11 : Résultats de la configuration - Cas 2

### 6.5.4 Cas n°3

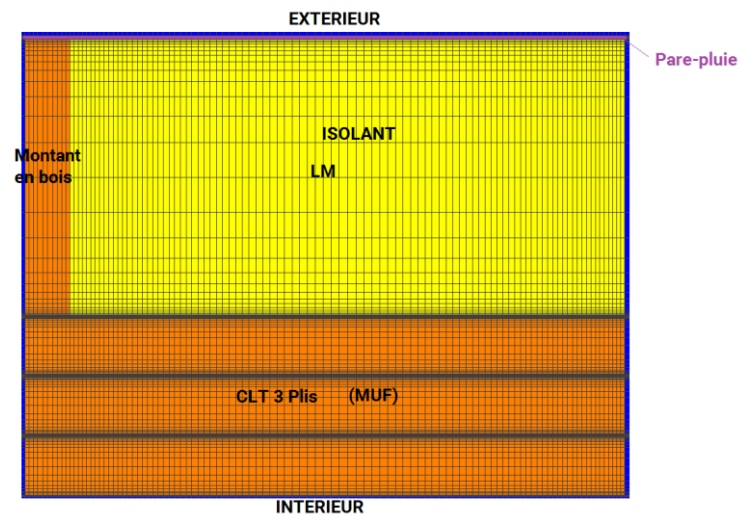


Figure 17 : schéma de la paroi type 12 (Cas 3)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)				
							Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal (mm)					Ep. Doublage (mm)	
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	PU	MUF	3 plis -	5 plis -	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)	50	0 (sans)	2
3	12		X					X	X			X			X	X		X		

Valeurs maximales atteintes à la 5 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	23	—	—	→	
3 <sup>ème</sup> plis du panneau CLT	46,8	7,8	52	→	
Isolant	1,5	3	53	→	
Partie de l'isolant contre le pare-pluie	32	64,5	99,2	→	Teneur en eau supérieure à 23% en masse pendant plus de 8 semaines

Tableau 12 : Résultats de la configuration - Cas 3

### 6.5.5 Cas n°4

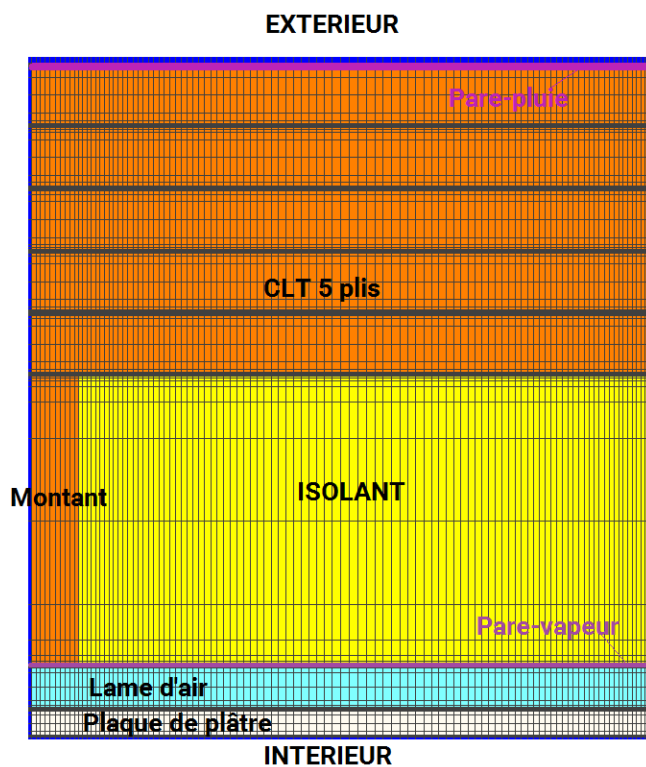


Figure 18 : schéma de la paroi type 13 (Cas 4)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)				
							Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal					Ep. Doublage	
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)	50	0 (sans)	2
4	13		X					X			X			X		X				X

Valeurs maximales atteintes à la 5 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	31,5	–	–	→	
Pli intérieur du panneau CLT	67	11	71	→	
Pli extérieur du panneau CLT	74	12,3	76	→	
Isolant	0.95	1.9	67	→	
Partie de l'isolant contre le CLT	1,3	2,6	75	→	

Tableau 13 : Résultats de la configuration - Cas 4



### 6.5.6 Cas n°5

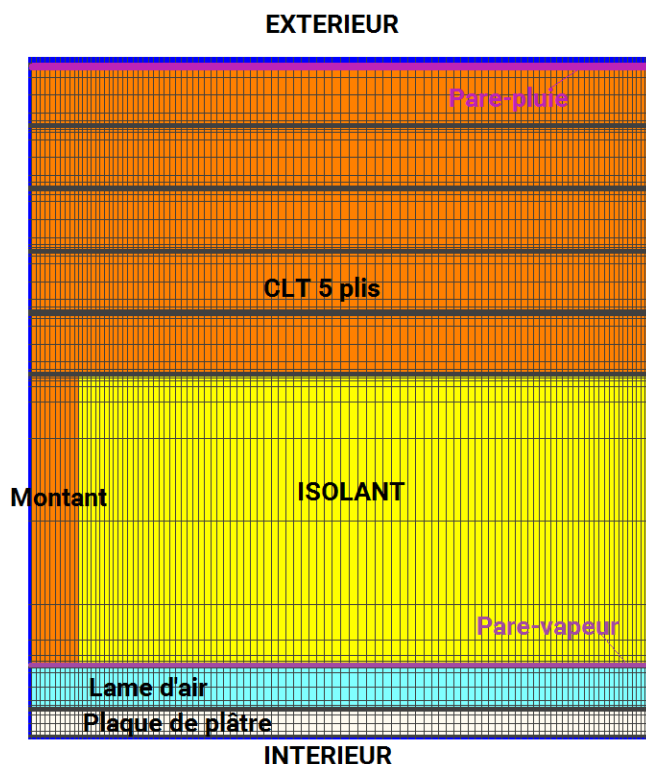


Figure 19 : schéma de la paroi type 13 (Cas 5)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)					
							Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal					Ep. Doublage		
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)	50	0 (sans)	2	18
5	13			X				X			X				X		X				X

Valeurs maximales atteintes à la 5 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	33	–	–	→	
Pli intérieur du panneau CLT	69	11,5	72,5	→	
Pli extérieur du panneau CLT	71	11,7	75	→	
Isolant	0,82	1,65	63	→	
Partie de l'isolant contre le CLT	1.4	2.7	75	→	

Tableau 14 : Résultats de la configuration - Cas 5

### 6.5.7 Cas n°6

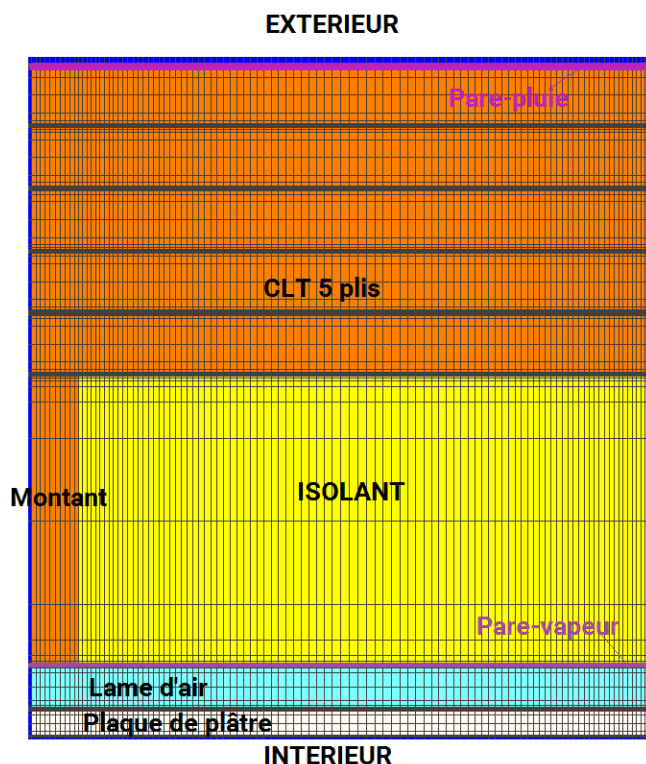


Figure 20 : schéma de la paroi type 13 (Cas 6)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)				
							Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal					Ep. Doublage	
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)	50	0 (sans)	2
6	13					X		X			X	X			X		X			X

Valeurs maximales atteintes à la 5 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	35,2	–	–	→	
Pli intérieur du panneau CLT	73	12,2	75,5	→	
Pli extérieur du panneau CLT	80	13,5	80	→	
Isolant	0,83	1,62	63	→	
Partie de l'isolant contre le CLT	1,6	3,3	78	→	

Tableau 15 : Résultats de la configuration - Cas 6

### 6.5.8 Cas n°7

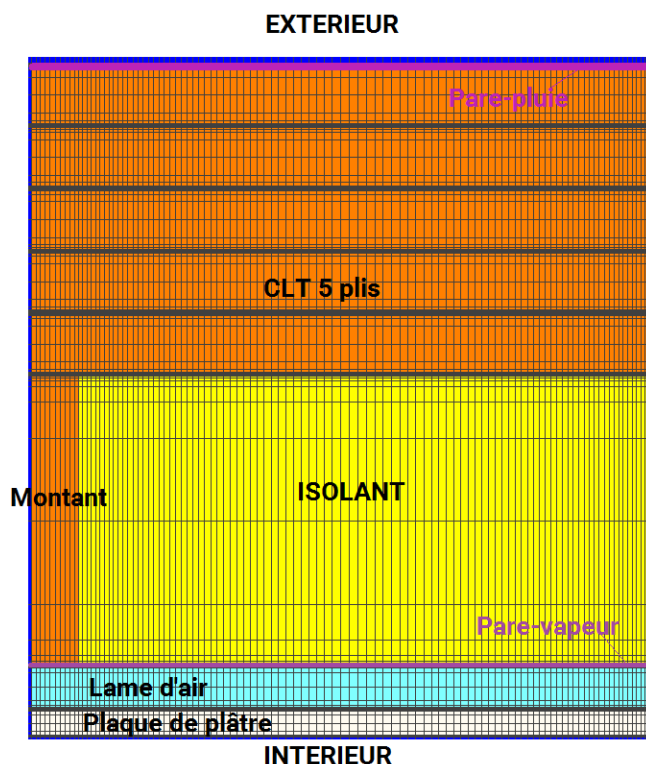


Figure 21 : schéma de la paroi type 13 (Cas 7)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)			
							Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal					Ep. Doublage
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	PU	MUF	3 plis -	5 plis -	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)	50	0 (sans)
7	13					X	X		X	X			X		X			X	

Valeurs maximales atteintes à la 5 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	47,7	–	–	→	
Pli intérieur du panneau CLT	146	24,4	95,5	→	
Pli extérieur du panneau CLT	74,7	12,5	76,5	→	
Isolant	1,4	2,8	61	→	
Partie de l'isolant contre le CLT	17	34	98,2	→	Croissance continue

Tableau 16 : Résultats de la configuration - Cas 7

6.5.9 Cas n°8

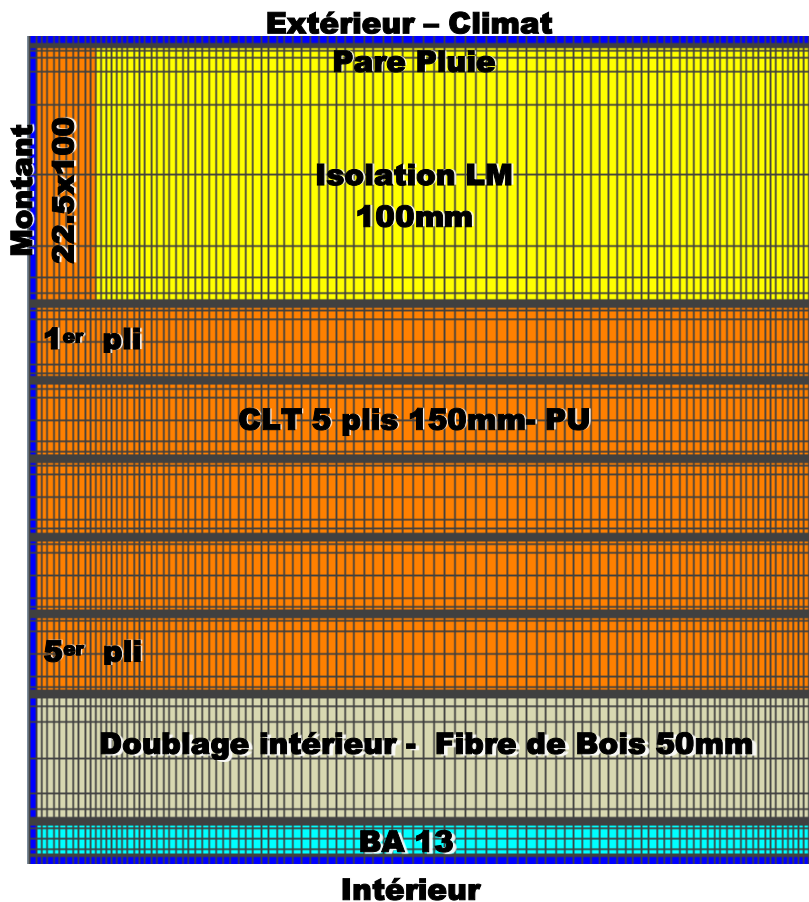


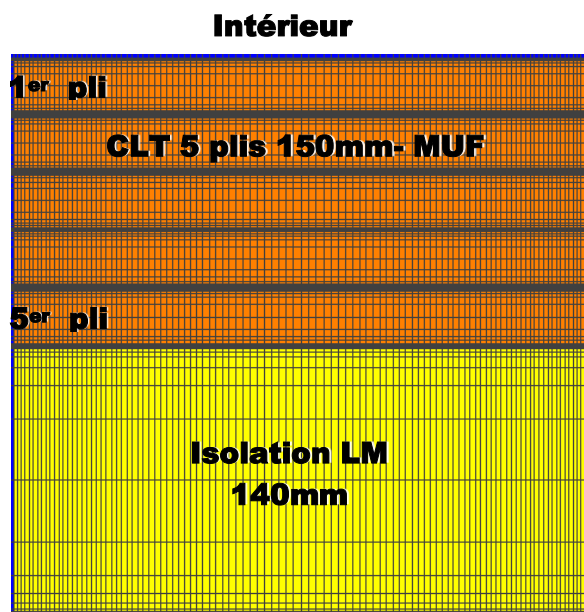
Figure 22 : schéma de la paroi type 14 (Cas 8)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant						Sd PV (m)				
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal (mm)			Ep. Doublage (mm)		0 (sans)	2	18
							PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)	50			
8	14			X			X			X			X				X	X			

Valeurs maximales atteintes à la 3 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	29	–	–	→	
1 <sup>ème</sup> plis du panneau CLT Ext.	48	8.2	54	→	
5 <sup>ème</sup> plis du panneau CLT int..	73	12	75.5	→	
Isolant LM	0.8	1.7	63	→	
Doublage Intérieur Isolant Fibre de bois	-	30.5	75	→	
Partie de l'isolant LM contre le pare-pluie	2	3.9	81	→	
Partie CLT 5 <sup>ème</sup> Pli contre doublage	-	12.5	76.7	→	

Tableau 17 : Résultats de la configuration - Cas 8

### 6.5.10 Cas n°9



### Extérieur - Vide Sanitaire – Climat NANCY

Figure 23 : schéma de la paroi type 16 (Cas 9)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)				
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal (mm)		Ep. Doublage (mm)		0 (sans)	2	18
							PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)			
9	16	Pl. bas sur VS	X					X		X			X		X		X			








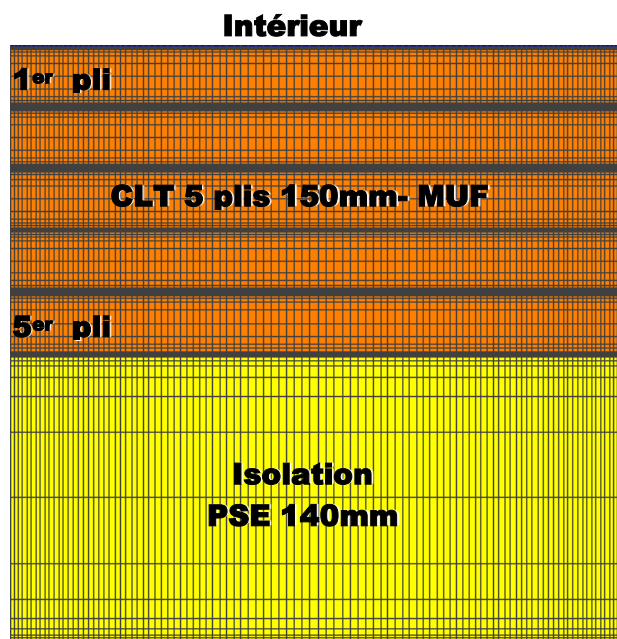
Valeurs maximales atteintes à la 3 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	26.5	–	–		
1 <sup>er</sup> Pli du panneau CLT (Int.)	66.5	11	71		
5 <sup>ème</sup> Pli du panneau CLT (Ext.)	52	8.7	58.5		
Isolant LM	1.7	3.4	74		
Partie de l'isolant LM côté extérieur	14	49	95		
Partie 1 <sup>er</sup> Pli CLT (Int.) côté intérieur	-	16.5	86.5		
Partie 5 <sup>er</sup> Pli CLT contre isolant	-	9.5	78.3		

Tableau 18 : Résultats de la configuration - Cas 9

### 6.5.11 Cas n°10



**Extérieur - Vide Sanitaire – Climat NANCY**

Figure 24 : schéma de la paroi type 16 (Cas 10)

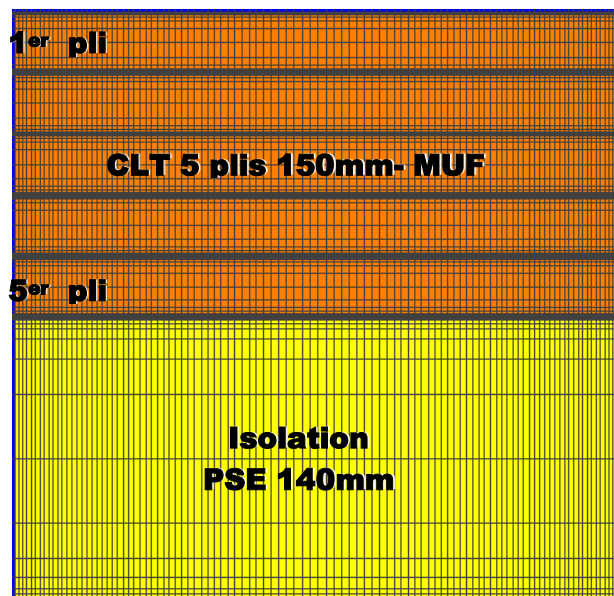
Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)					
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal (mm)		Ep. Doublage (mm)	0 (sans)				
							PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)	50	0 (sans)	2	18
10	16	Pl. bas sur VS, isolant sous CLT	X					X		X			X			X		X			

Valeurs maximales atteintes à la 3 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	28.5	–	–	↘	
CLT 1 <sup>er</sup> pli (Intérieur)	67	11.2	71.5	→	
CLT 5 <sup>ème</sup> pli (Extérieur)	58	9.6	65.6	↘	
Isolant PSE	1.7	5.8	78	↘	
Partie de l'isolant PSE contre l'extérieur	-	-	92.5	→	
Partie CLT 5 <sup>e</sup> pli contre l'isolant	-	11.3	-	↘	
Partie CLT 1 <sup>er</sup> pli côté intérieur	-	16.3	-	→	

Tableau 19 : Résultats de la configuration - Cas 10

### 6.5.12 Cas n°11

#### Intérieur PV 18m



#### Extérieur - Vide Sanitaire - Climat NANCY

Figure 25 : schéma de la paroi type 16 (Cas 11)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)			
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal (mm)		Ep. Doublage (mm)	0 (sans)	2	18
							PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200			
11	16	Isolant sous CLT	X					X		X			X	X		X			X








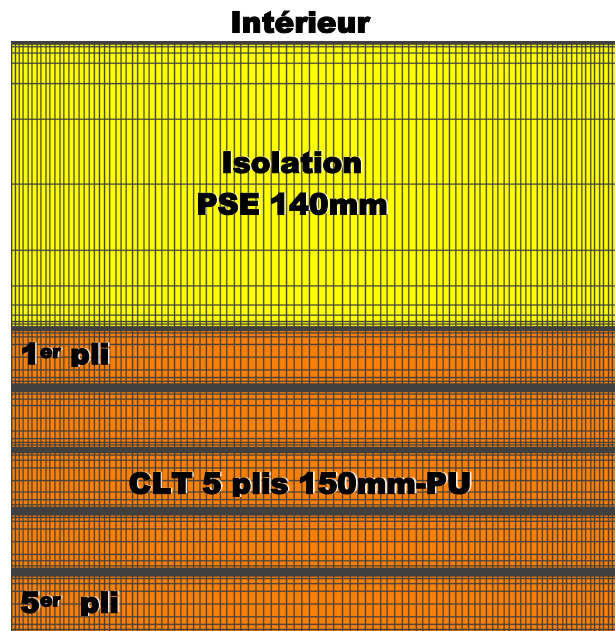
Valeurs maximales atteintes à la 3 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	34.5	—	—		
CLT 1 <sup>er</sup> pli (Intérieur)	65.6	10.9	70.5		
CLT 5 <sup>ème</sup> pli (Extérieur)	69.9	11.6	73.3		
Isolant PSE	2.1	7.2	82		
Partie de l'isolant PSE coté extérieur	5.6	19	92.5		
Partie CLT 5 <sup>e</sup> pli contre l'isolant	70.1	11.7	73.5		
Partie CLT 1 <sup>er</sup> pli côté intérieur	65	10.8	70.2		

Tableau 20 : Résultats de la configuration - Cas 11

### 6.5.13 Cas N°12



#### Extérieur - Vide Sanitaire – Climat BREST

Figure 26 : schéma de la paroi type 16 bis (Cas 12)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT					Isolant					Sd PV (m)			
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	Type de colle		Epaisseur			Type			Ep. principal (mm)		Ep. Doublage (mm)	0 (sans)	2	18
							PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)			
12	16bis	Pl. bas sur VS,		X			X			X				X		X		X		

Valeurs maximales atteintes à la 3 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	40.4	–	–	↘	
CLT 1 <sup>er</sup> pli (Intérieur)	78.2	13	78.9	↘	
CLT 5 <sup>ème</sup> pli (Extérieur)	86.5	14.1	83	→	
Isolant PSE	1.5	5.2	77.3	→	
Partie de l'isolant PSE contre intérieur	-	-	92.8	→	
Partie CLT 5 <sup>e</sup> pli contre extérieur	-	16.1	-	→	
Partie CLT 1 <sup>er</sup> pli côté intérieur	-	13	-	↘	

Tableau 21 : Résultats de la configuration - Cas 12



### 6.5.14 Cas n°13

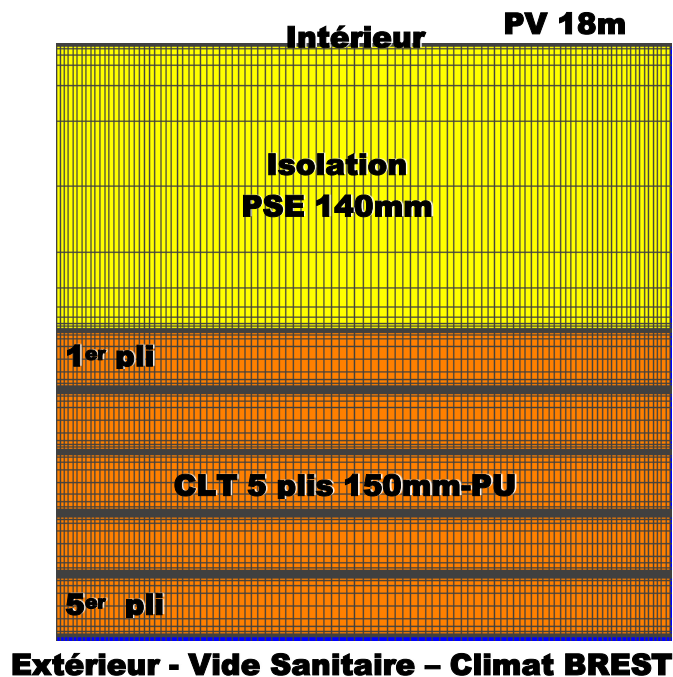


Figure 27 : schéma de la paroi type 16 bis (Cas 13)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant						Sd PV (m)					
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal (mm)			Ep. Doublage (mm)		0 (sans)	2	18	
							PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)	50				
13	16 bis	isolant au-dessus		X			X			X			X		X		X					X








Valeurs maximales atteintes à la 3 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	39.7	-	-		
CLT 1 <sup>er</sup> pli (Intérieur)	75.5	12.5	77		
CLT 5 <sup>ème</sup> pli (Extérieur)	86.5	14.4	83		
Isolant PSE	1	3.3	68.4		
Partie de l'isolant PSE contre intérieur	-	-	63.5		
Partie CLT 5 <sup>e</sup> pli contre extérieur	-	18	-		
Partie CLT 1 <sup>er</sup> pli contre isolant	-	12.4	-		

Tableau 22 : Résultats de la configuration - Cas 13

### 6.5.15 Cas n°14

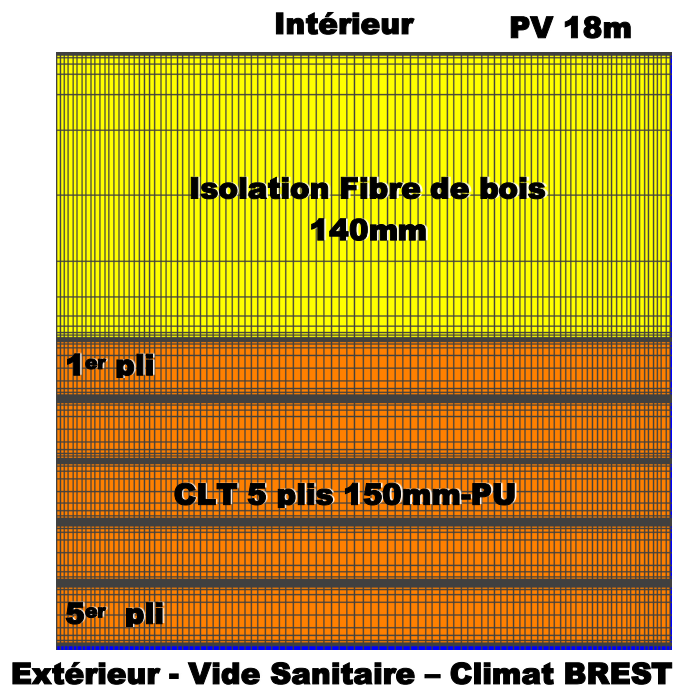


Figure 28 : schéma de la paroi type 16 bis (Cas 14)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)			
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal (mm)		Ep. Doublage (mm)	0 (sans)	2	18
							PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200			
14	16bis	du CLT		X			X		X			X		X		X			

Valeurs maximales atteintes à la 3 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	45.5	-	-	↘	
CLT 1 <sup>er</sup> pli (Intérieur)	78.6	13	79	↘	
CLT 5 <sup>ème</sup> pli (Extérieur)	86	14.2	83	→	
Isolant Fibre de bois	13.8	26	69	→	
Partie de l'isolant Fibre bois contre CLT	-	32.5	79	↘	
Partie de l'isolant Fibre bois contre PV	-	23.3	64	→	
Partie CLT 5 <sup>e</sup> pli contre extérieur	-	16.3	-	→	
Partie CLT 1 <sup>er</sup> pli contre isolant	-	13.5	-	↘	

Tableau 23 : Résultats de la configuration - Cas 14

6.5.16 Cas n°15

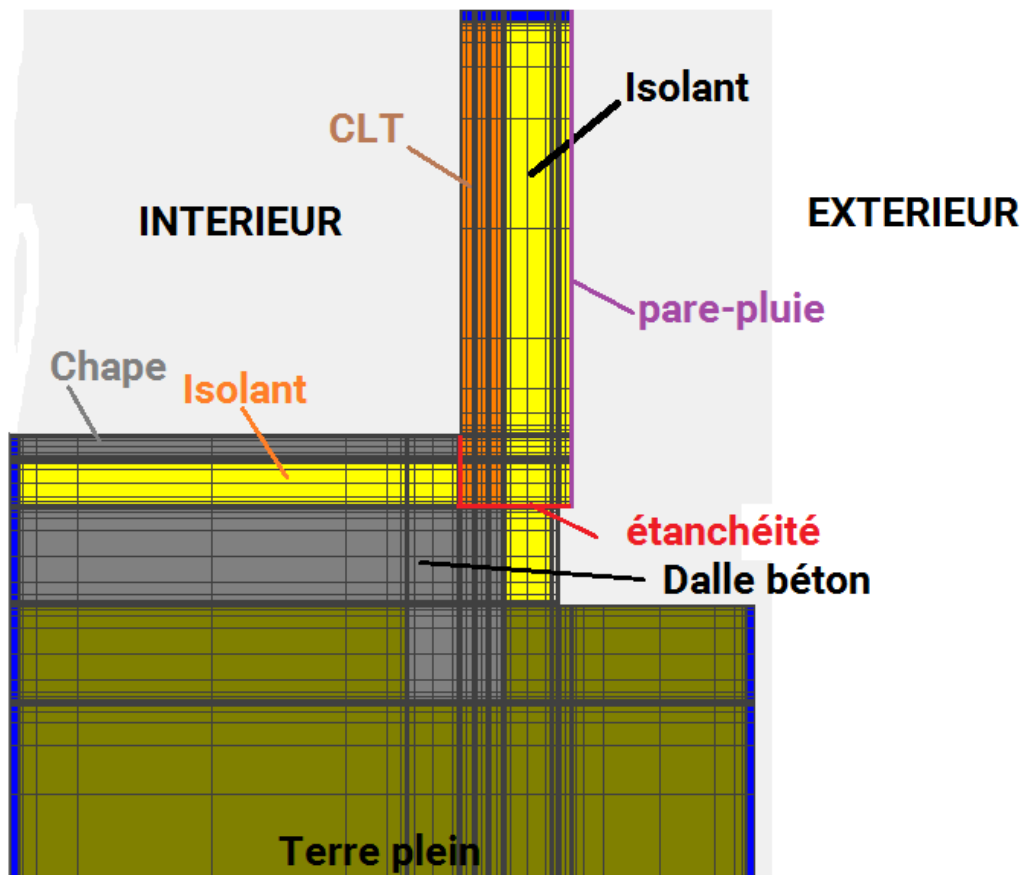


Figure 29 : schéma de la paroi type 24 (Cas 15)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)			
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal		Ep. Doublage	0 (sans)	2	18
							PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200			
15	24	isolant PSE 100 mm sous chape et périphérique	X					X	X			X			X		X		

Valeurs maximales atteintes à la 5 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	108,3	—	—	→	
Isolant LM	1,3	2,5	67	→	
Partie de l'isolant contre le CLT	11	22	96	→	
Partie du CLT contre l'isolant	46	7,8	57	→	
Partie du CLT contre l'étanchéité	53,7	9	61	→	

Tableau 24 : Résultats de la configuration - Cas 15

6.5.17 Cas n°16

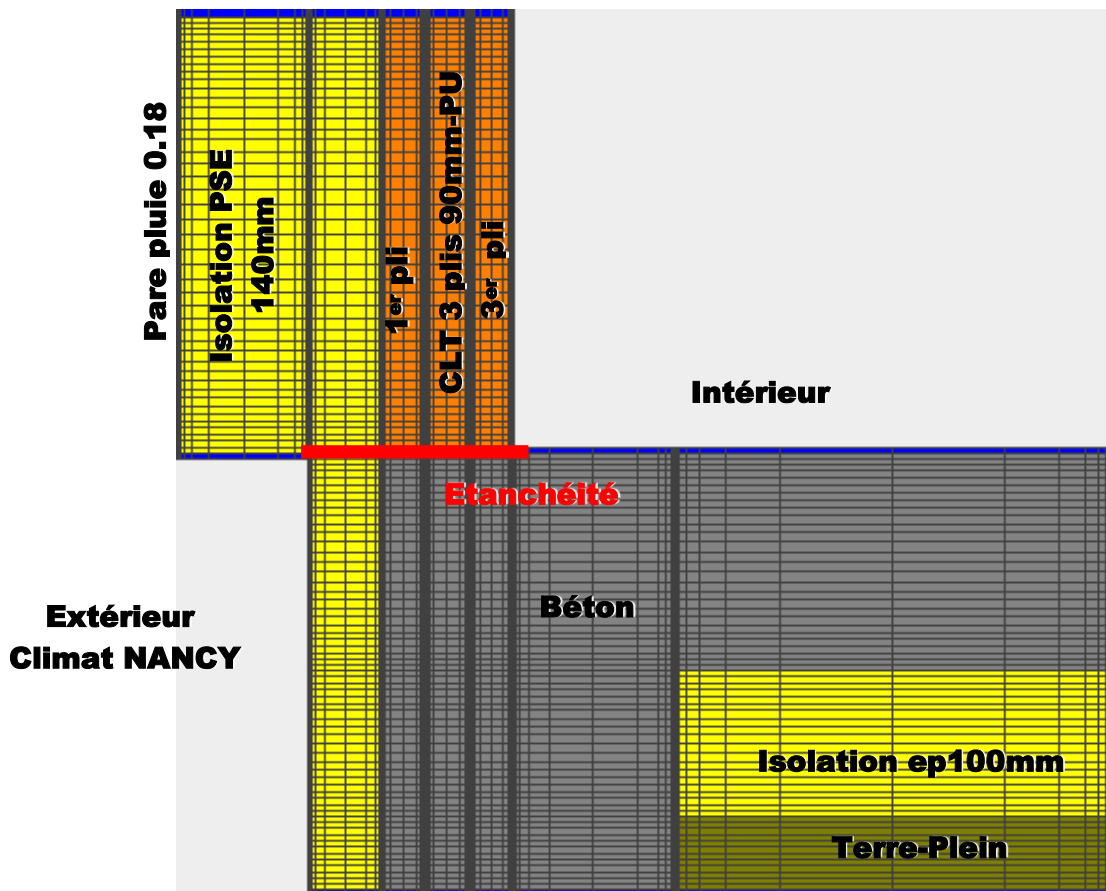


Figure 30 : schéma de la paroi type 25 (Cas 16)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT					Isolant					Sd PV (m)			
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	Type de colle		Epaisseur			Type			Ep. principal (mm)		Ep. Doublage (mm)	0 (sans)	2	18
							PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)			
16	25	isolant PSE 100 mm sous dalle et périphérique	X					X	X			X			X		X			

Valeurs maximales atteintes à la 3 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	57	—	—	→	
CLT 1 <sup>er</sup> pli	47.7	8	53.4	→	
CLT 3 <sup>ème</sup> pli (Extérieur)	67	11.2	70.7	→	
Isolant PSE 140	1	3.4	65	→	
Partie CLT 1 <sup>er</sup> Pli contre barrière étanche	-	7.6	-	→	
Partie de l'isolant PSE contre PP	-	-	81.5	→	
Partie CLT 3 <sup>e</sup> pli Angle intérieur	-	16.6	-	→	
Partie ISO PSE bas	-	-	91	→	

Tableau 25 : Résultats de la configuration - Cas 16

6.5.18 Cas n°17

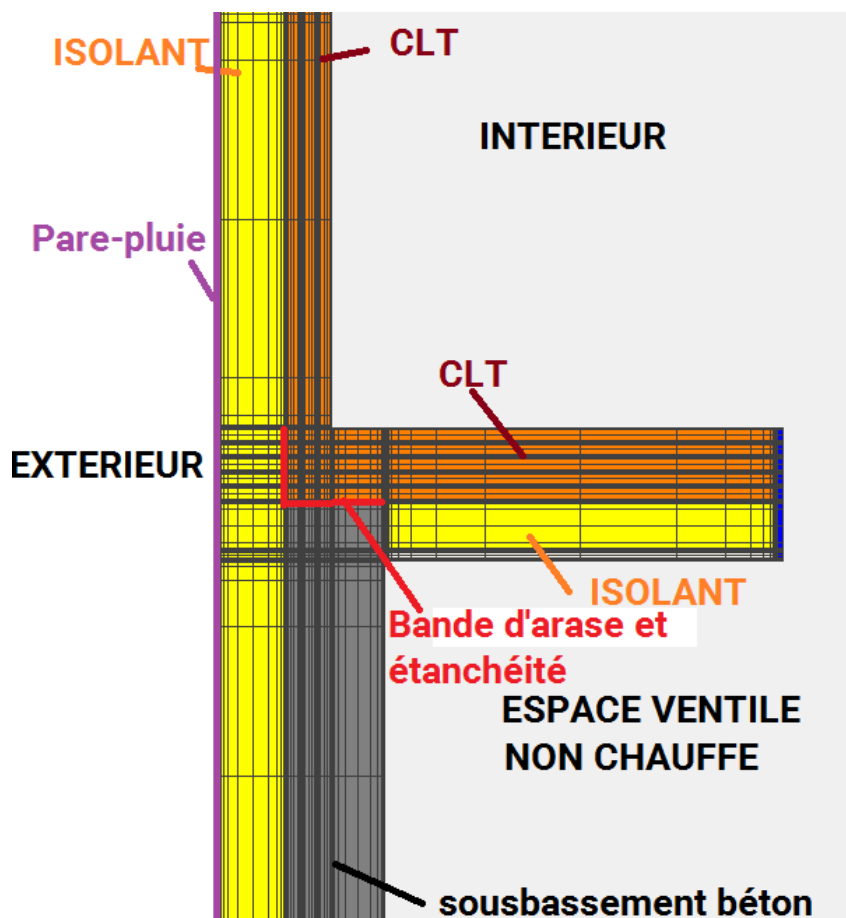


Figure 31 : schéma de la paroi type 27 (Cas 17)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)					
							Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal					Ep. Doublage		
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)	50	0 (sans)	2	18
17	27	27 = 12 + 16	X					X	X (mur)	(planche	X mur		X Pl.b	X Pl.b	X mur		X		X		

Valeurs maximales atteintes à la 5 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	29,7	—	—	→	
Isolant LM	1,6	3,3	72,5	→	
Partie de l'isolant contre PPluie	18,6	37	98	→	
Isolant PSE	1,4	4,7	74,5	→	
Partie de l'isolant PSE contre le plâtre	3	10	87,5	→	
Partie du CLT contre PSE	59,8	10	66,2	→	
Partie du CLT contre l'étanchéité	77	12,8	78	→	

Tableau 26 : Résultats de la configuration - Cas 17

6.5.19 Cas n°18

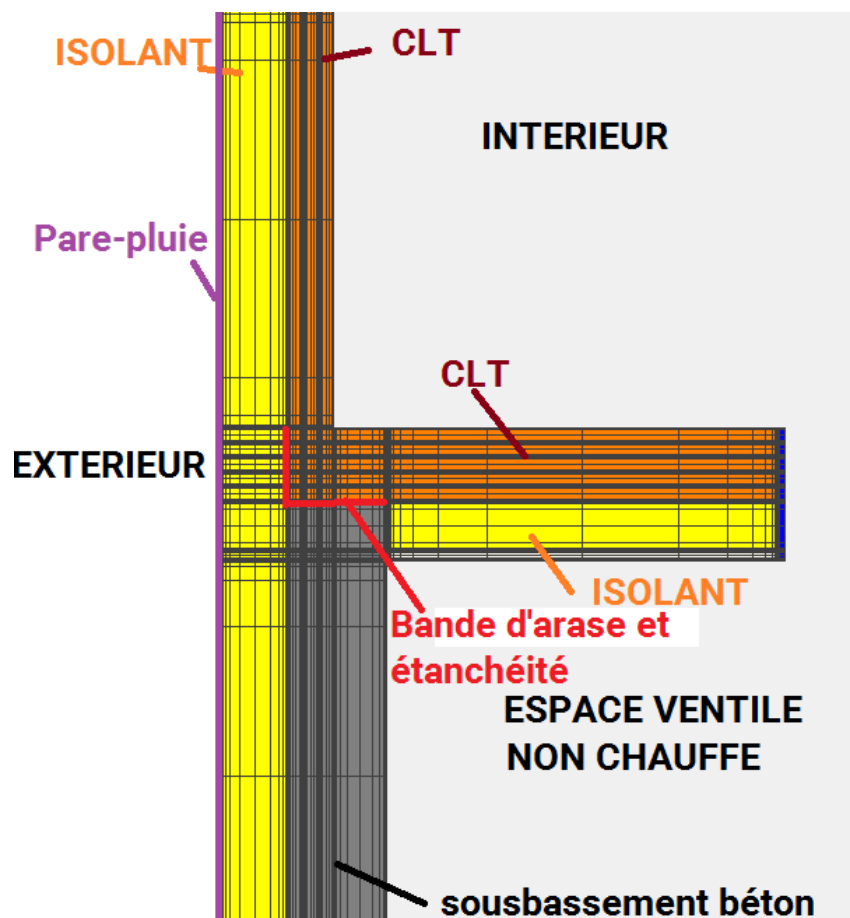


Figure 32 : schéma de la paroi type 27 (Cas 18)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)					
							Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal					Ep. Doublage		
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)	50	0 (sans)	2	18
18	27	27 = 12 + 16				X		X	X (mur)	(planche)	X mur		X Pl.b	X Pl.b	X mur		X		X		

Valeurs maximales atteintes à la 5 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	28,5	—	—	→	
Isolant LM	1,55	3,2	71,5	→	
Partie de l'isolant contre PPluie	24,1	48,3	98,6	→	3 jours au-delà de 98%
Isolant PSE	1,4	4,6	73	→	
Partie de l'isolant PSE contre le plâtre	3	10,3	87,5	→	
Partie du CLT contre PSE	56	9,3	62	→	
Partie du CLT contre l'étanchéité	79,8	13,2	79,5	→	

Tableau 27 : Résultats de la configuration - Cas 18

### 6.5.20 Cas n°19

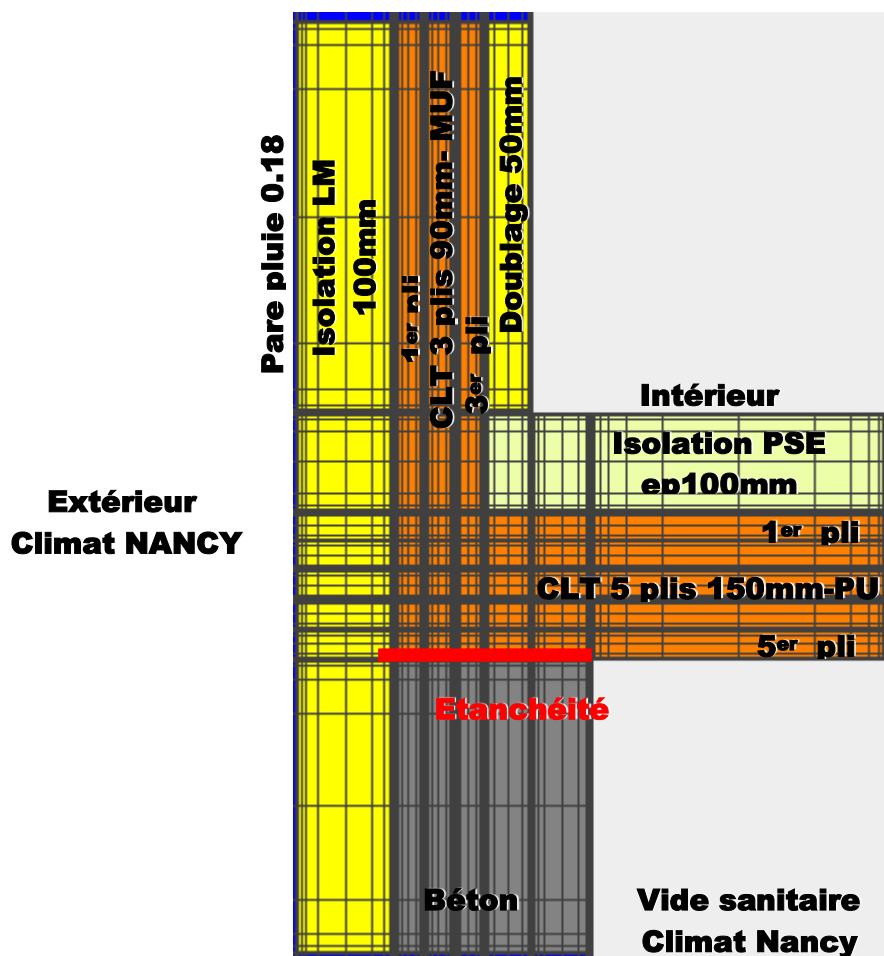


Figure 33 : schéma de la paroi type 28 (Cas 19)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant						Sd PV (m)			
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	Type de colle		Épaisseur		Type			Ep. principal (mm)			Ep. Doublage (mm)			
							PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)	50	0 (sans)	2
19	28	28 = 12 + 16 bis	X				X (Pl.B)	X (mur)	X (mur)	X (plancher)	X mur		X Pl.b	X				X	X (mur)	X (pl.b)

Valeurs maximales atteintes à la 3 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	45	—	—	↘	
CLT Total	72.4	12	74	→	
Isolant LM Extérieur	1.35	2.73	71.5	→	
Isolant PSE sur plancher	1.4	4.69	75	→	
Partie CLT Mur 3 <sup>e</sup> Pli contre plancher (bas)	-	10.8	70.1	↘	
Partie CLT Plancher 5 <sup>ème</sup> Pli côté vide Sanitaire	-	16.7	85	→	
Partie CLT Mur 3 <sup>ème</sup> Pli Contre doublage intérieur	-	15.5	81.5	→	

Tableau 28 : Résultats de la configuration - Cas 19

6.5.21 Cas n°20

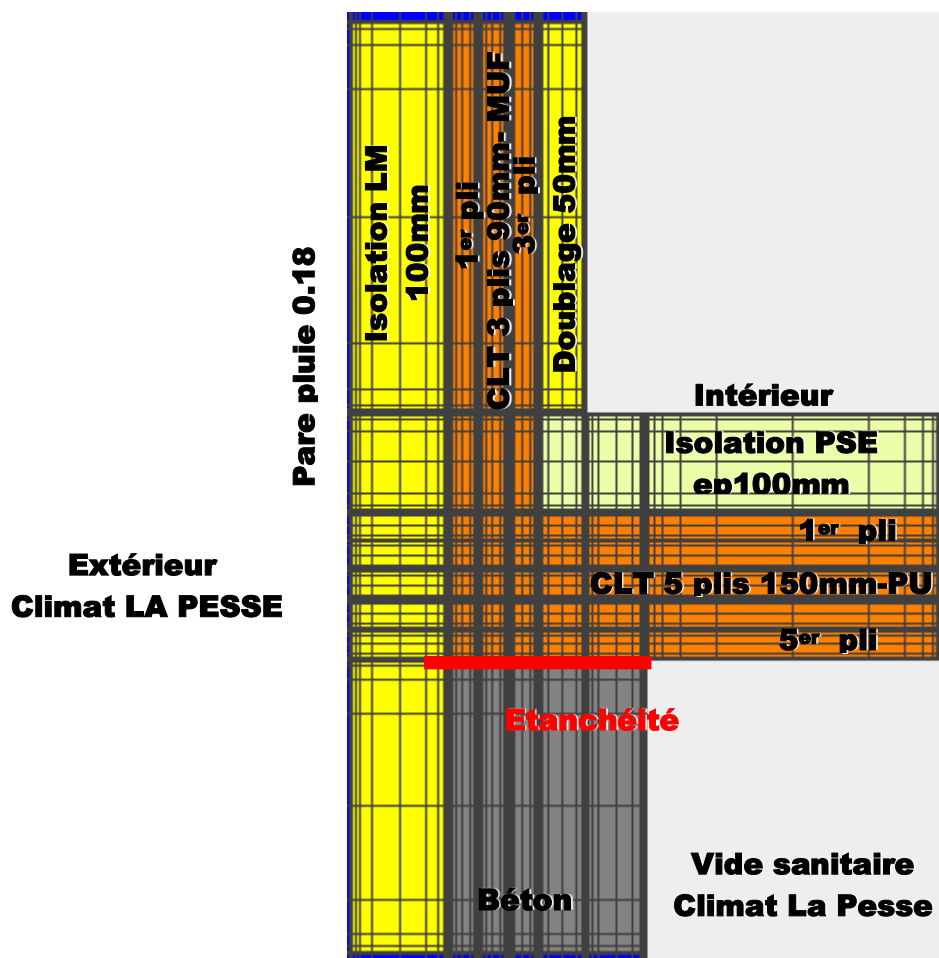


Figure 34 : schéma de la paroi type 28 (Cas 20)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant						Sd PV (m)		
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. Doublage (mm)			0 (sans)	2	18
							PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200			
20	28	28 = 12 + 16 bis				X	X (Pl.B)	X (mur)	X (mur)	X (plancher)	X mur	X Pl.b	X				X	X (mur)	X (pl.b)

Valeurs maximales atteintes à la 3 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	44.2	—	—	→	
CLT Total	71.1	11.9	—	→	
CLT (mur) 1 <sup>er</sup> pli (Extérieur)	48.1	8	54	→	
CLT (mur) 3 <sup>ème</sup> pli (Intérieur)	79.6	13.3	79.1	→	












CLT (Plancher) 1 <sup>ème</sup> pli (Intérieur)	77.3	12.9	78.2		
CLT (Plancher) 5 <sup>ème</sup> pli (Extérieur)	93	15.5	86.2		
Isolant Laine minérale extérieur	1.34	2.70	70.5		
Isolant Laine minérale Intérieur	-	6	86		
Isolant PSE dessus Plancher	1.4	4.6	75.4		
Partie CLT Mur 1 <sup>er</sup> Pli Contre iso ext.	56.3	9.3	63.5		
Partie CLT Mur 3 <sup>ème</sup> Pli contre doublage int. (Face int. bas du mur)	109	18.3	92.4		
Partie CLT Plancher 5 <sup>e</sup> pli contre extérieur (VS)	103	17	90.3		
Partie CLT Plancher 1 pli côté int.	78.4	13	79		

Tableau 29 : Résultats de la configuration - Cas 20

6.5.22 Cas n°21

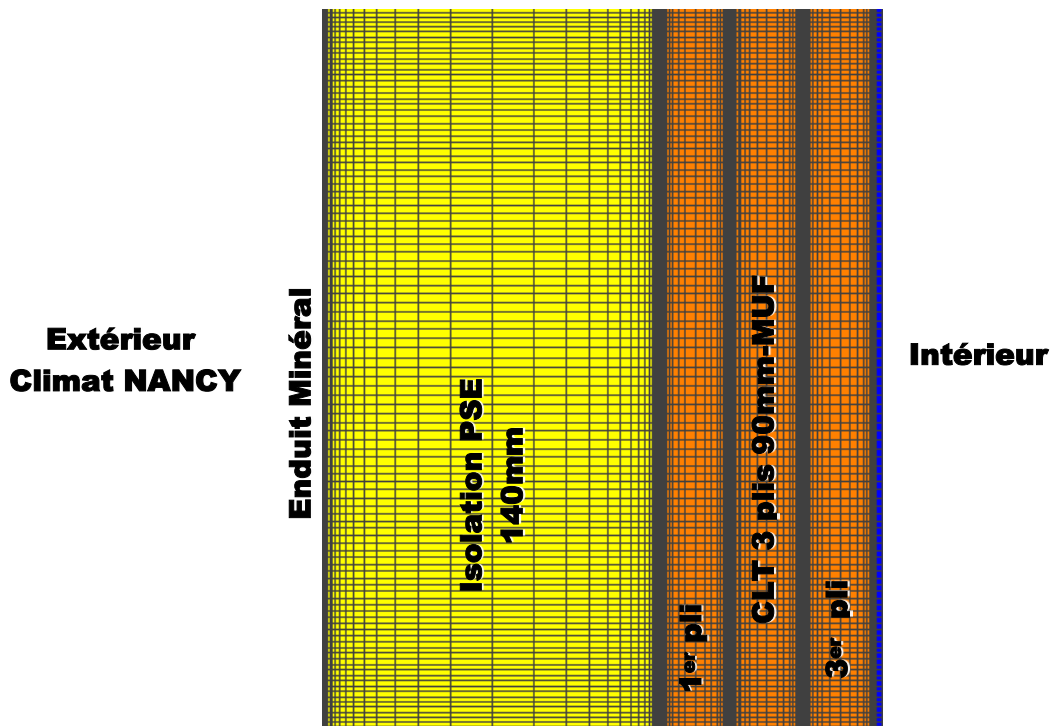


Figure 35 : schéma de la paroi type 34 (Cas 21)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant				Sd PV (m)				
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	Type de colle		Epaisseur		Type		Ep. principal (mm)		Ep. Doublage (mm)		0 (sans)	2	18
							PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200			
21	34	enduit minéral (sd faible)	X					X	X			X					X		

Valeurs maximales atteintes à la 3 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	21	—	—		
CLT 1 <sup>er</sup> pli	50.1	8.3	56.4		
CLT 3 <sup>ème</sup> pli	68	11.3	71.1		
Isolant PSE	1.03	3.16	65		
Partie de l'isolant PSE contre CLT	—	2	58.2		
Partie de l'isolant PSE contre enduit	3.06	10.3	87		
Partie CLT 1 <sup>er</sup> pli contre isolant	50	8.3	56		

Tableau 30 : Résultats de la configuration - Cas 21

### 6.5.23 Cas n°22

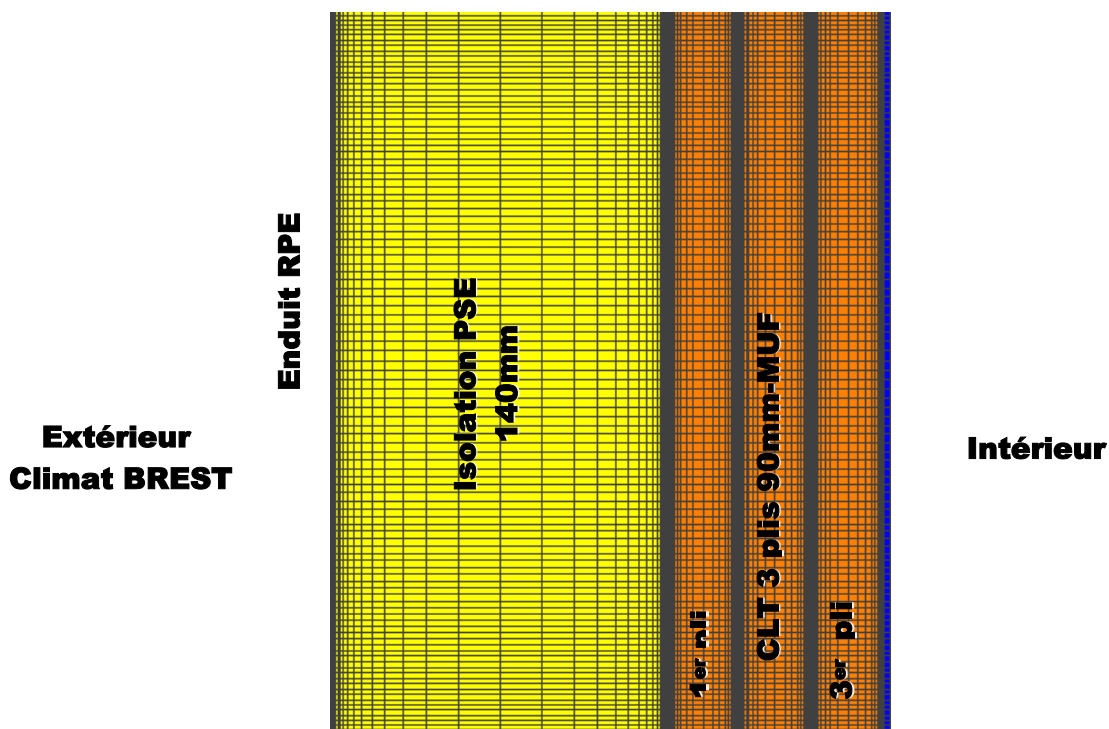


Figure 36 : schéma de la paroi type 34 (Cas 22)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)						
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	Type de colle	Epaisseur		Type	Ep. principal (mm)			Ep. Doublage (mm)		0 (sans)	2	18				
22	34	enduit RPE (sd plus élevé)		X			PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)	50	0 (sans)	X		

Valeurs maximales atteintes à la 3 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	23.7	-	-		
CLT 1 <sup>e</sup> pli	56.4	9.42	64.3		
CLT 3 <sup>ème</sup> pli	78.8	13	78.8		
Isolant PSE	1	3.2	67.5		
Partie CLT 1 <sup>er</sup> Plis contre Iso PSE	-	9.4	64		
Partie de l'isolant PSE Contre CLT	-	2.7	63.6		
Partie CLT 3 Pli côté intérieur	-	17.8	91.5		

Tableau 31 : Résultats de la configuration - Cas 22

6.5.24 Cas n°23

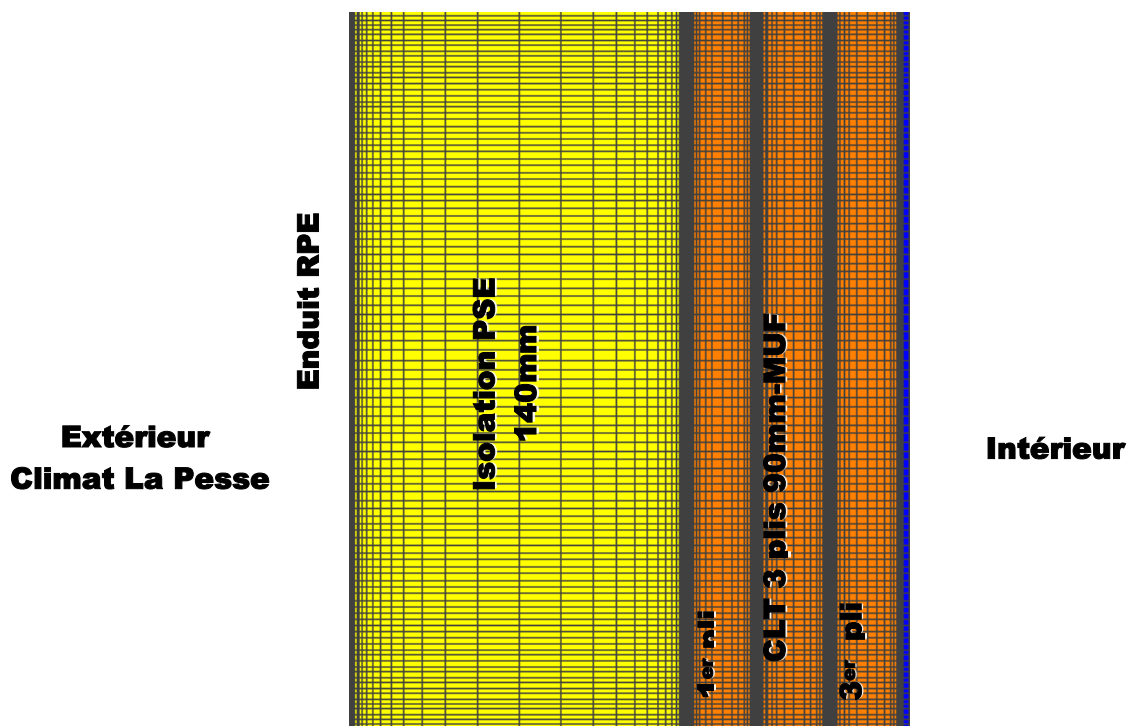


Figure 37 : schéma de la paroi type 34 (Cas 23)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)						
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	Type de colle	Epaisseur		Type			Ep. principal (mm)		Ep. Doublage (mm)	0 (sans)	2	18				
23	34	enduit RPE (sd plus élevé)				X	PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)	50	0 (sans)	X		

Valeurs maximales atteintes à la 3 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	20	—	—	↘	
CLT 1 <sup>e</sup> pli	47.8	8	53.5	↘	
CLT 3 <sup>ème</sup> pli	60.8	10.1	67.2	→	
Isolant PSE	1	3.4	65.4	↘	
Partie CLT 1 <sup>er</sup> Plis contre Iso	48	8	53.8	↘	
Partie de l'isolant PSE Contre CLT	0.5	1.8	54	↘	
Partie CLT 3 Pli côté intérieur	80.6	13.4	79.8	→	

Tableau 32 : Résultats de la configuration - Cas 23

### 6.5.25 Cas n°24

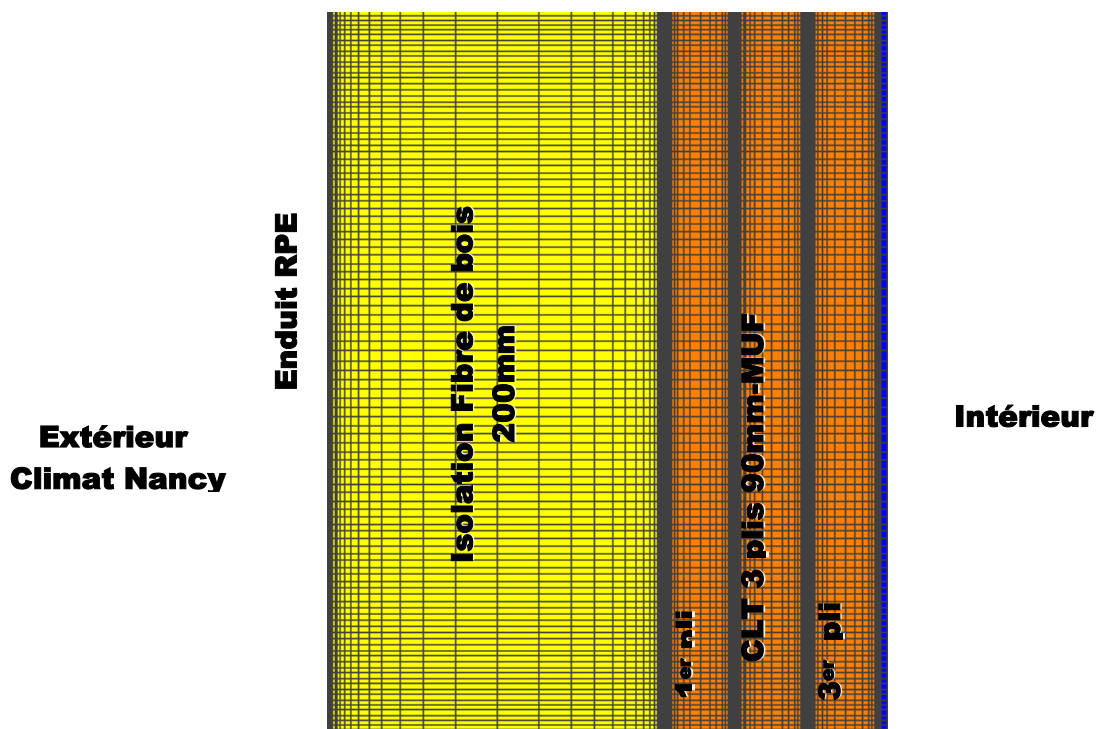


Figure 38 : schéma de la paroi type 34 (Cas 24)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)				
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal (mm)		Ep. Doublage (mm)	0 (sans)	2	18	
							PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200				0 (sans)
24	34	enduit RPE (sd plus élevé)	X					X	X			X			X			X		

Valeurs maximales atteintes à la 3 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	25.3	—	—	→	
CLT 1 <sup>er</sup> pli	56.2	9.4	63.7	→	
CLT 3 <sup>ème</sup> pli	68.4	11.4	71.8	→	
Isolant Fibre de bois	12.6	23.8	63.5	→	
Partie CLT 1 <sup>er</sup> Plis contre Iso FB	61.5	10.25	68	→	
Partie de l'isolant FB Contre CLT	14.1	26.7	70	→	
Partie CLT 3 Pli côté intérieur	93.5	15.5	86.4	→	

Tableau 33 : Résultats de la configuration - Cas 24

6.5.26 Cas n°25

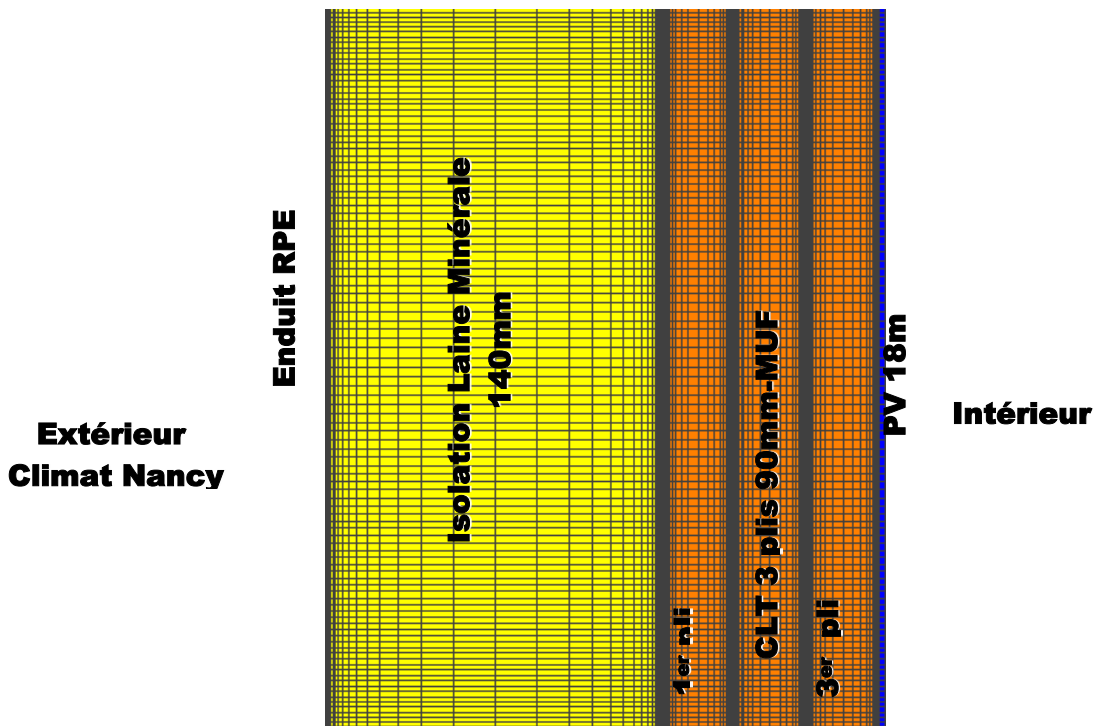


Figure 39 : schéma de la paroi type 34 (Cas 25)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT			Isolant					Sd PV (m)					
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal (mm)		Ep. Doublage (mm)		0 (sans)	2	18
							PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)			
25	34	enduit RPE (sd plus élevé)	X					X	X			X								X

Valeurs maximales atteintes à la 3 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	18.8	—	—	↘	
CLT 1 <sup>e</sup> pli	49.5	8.3	56	↘	
CLT 3 <sup>ème</sup> pli	44.3	7.4	49	↘	
Isolant Laine minérale	1.6	3.1	73.5	→	
Partie CLT 1 <sup>er</sup> Plis contre Iso	55.7	9.2	63.5	→	
Partie de l'isolant LM Contre CLT	0.9	1.74	65	→	
Partie CLT 3 Pli côté intérieur	44.4	7.4	48.6	↘	

Tableau 34 : Résultats de la configuration - Cas 25

### 6.5.27 Cas n°26

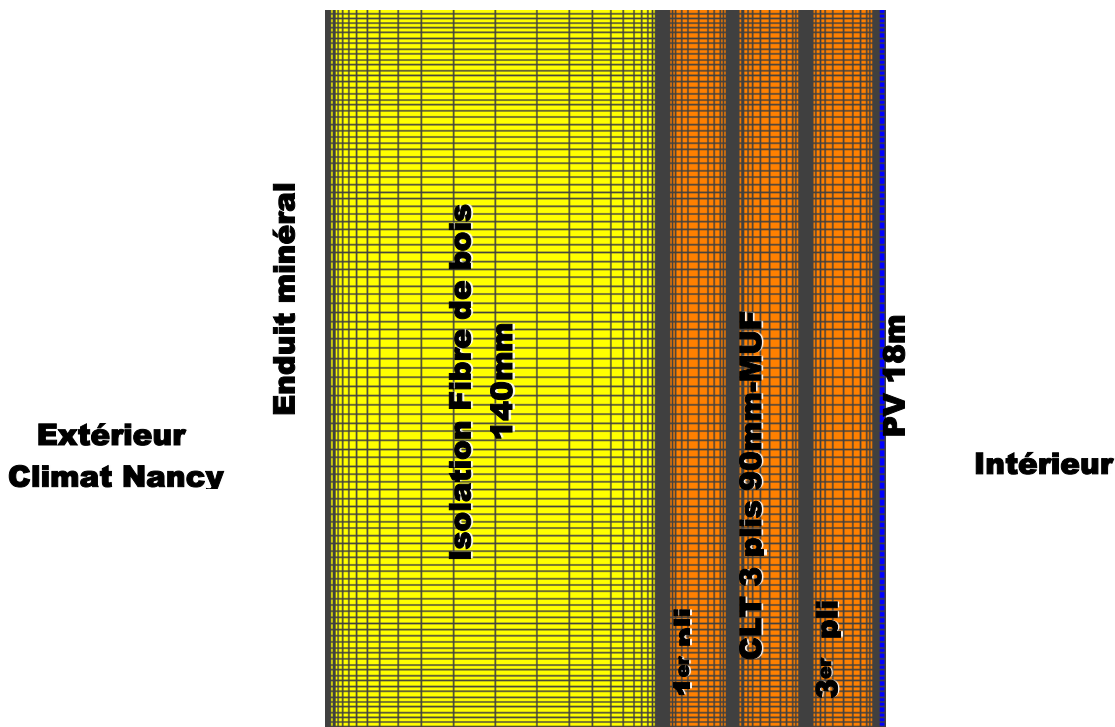


Figure 40 : schéma de la paroi type 34 (Cas 26)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)				
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal (mm)		Ep. Doublage (mm)	0 (sans)	2	18	
							PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200				0 (sans)
26	34	enduit minéral (sd faible)	X					X	X			X		X						X

Valeurs maximales atteintes à la 3 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	18.8	—	—	→	
CLT 1 <sup>e</sup> pli	49	8.1	54.8	→	
CLT 3 <sup>ème</sup> pli	44	7.3	47.5	↘	
Isolant Fibre de bois	1.7	3.40	74	→	
Partie CLT 1 <sup>er</sup> Plis contre Iso	54	9	61	→	
Partie de l'isolant FB Contre CLT	0.8	1.6	62.8	→	
Partie CLT 3 Pli côté intérieur	43.7	7.3	47.3	↘	

Tableau 35 : Résultats de la configuration - Cas 26

### 6.5.28 Cas n°27

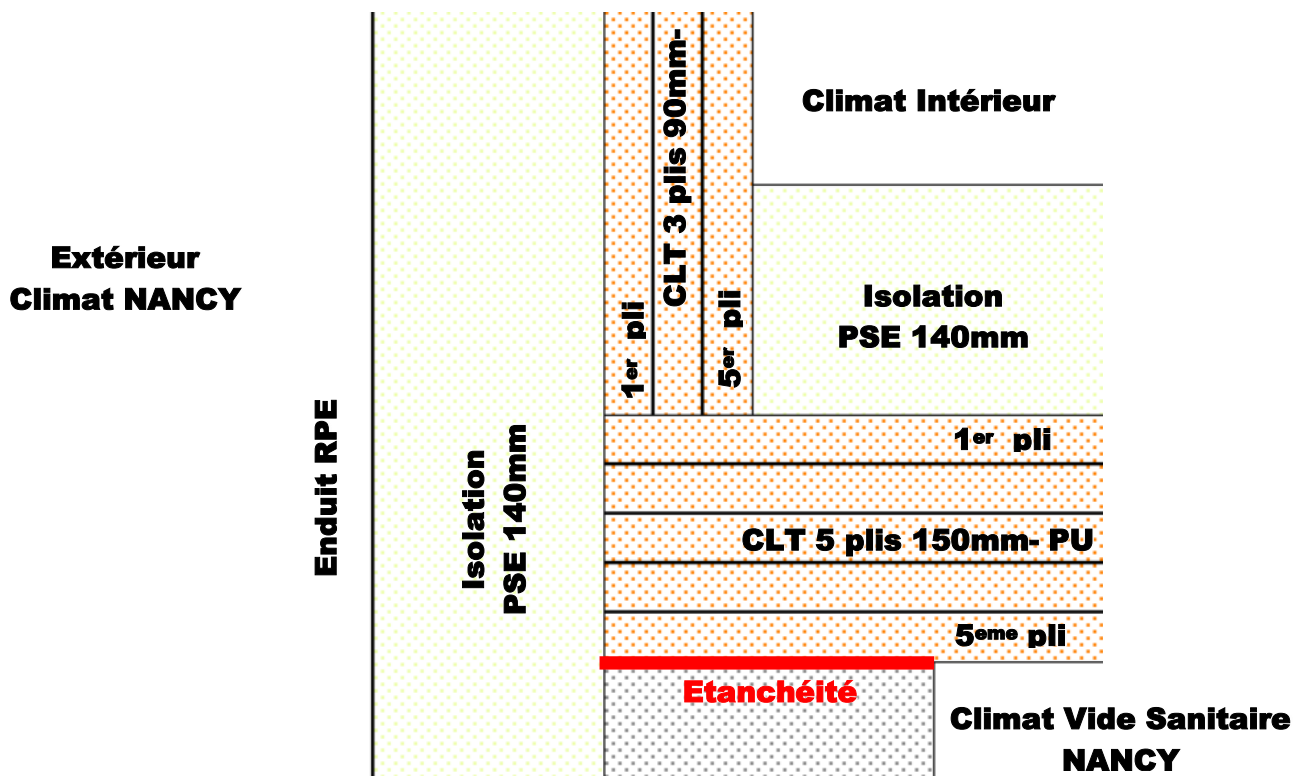


Figure 41 : schéma de la paroi type 27 (Cas 27)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)			
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal (mm)		Ep. Doublage (mm)	0 (sans)	2	18
							PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200			
27	38	Ennduit RPE (Sd = 2m)	x				X (Pl.B)	x (mur)	x (murs)	X (plancher)			x	x					

Valeurs maximales atteintes à la 3 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	42	—	—	→	
CLT Total	71.1	—	—	→	
CLT (mur) 1 <sup>er</sup> pli (Extérieur)	57	9.5	63.8	→	
CLT (mur) 3 <sup>ème</sup> pli (Intérieur)	67.2	11.2	71.4	→	
CLT (Plancher) 1 <sup>ème</sup> pli (Intérieur)	80.8	13.5	80.3	→	
CLT (Plancher) 5 <sup>ème</sup> pli (Ext.)	91.3	15.5	86	→	Augmentation de la teneur en eau au cours du temps
Isolant PSE mur	1.8	6.1	78.2	→	
Isolant PSE plancher	1.34	4.5	74.4	→	

Tableau 36 : Résultats de la configuration - Cas 27



6.5.29 Cas n°28

**Extérieur – Climat NANCY**

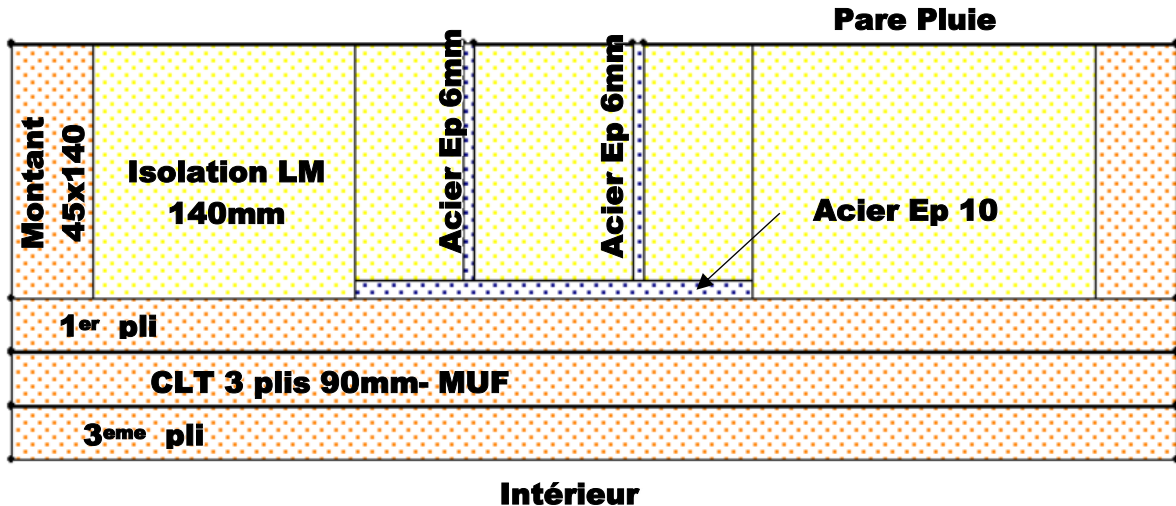


Figure 42 : schéma de la paroi type 12 avec ferrure traversant l'isolant (Cas 28)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT					Isolant					Sd PV (m)		
							Type de colle		Epaisseur			Type			Ep. principal (mm)				
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)	50	0 (sans)
28	40	40 = 12 avec	X				X	X		X			X		X		X		

Valeurs maximales atteintes à la 3 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	24.5	–	–	→	
CLT 1 <sup>er</sup> pli	47.8	8	52.6	→	
CLT 3 <sup>ème</sup> pli	66	11	70.7	→	
Isolant LM	0.79	1.59	61.8	→	
Montant bois	43.4	7.72	51	→	
Partie CLT 3 <sup>er</sup> Plis coté intérieur	90	15	85	→	
Partie CLT 1 <sup>er</sup> Plis contre ferrure	59.5	9.9	66	→	
Partie Isolant contre ferrure (intérieur ferrure)	0.9	1.82	66	→	
Partie isolant Côté extérieur	4.5	9	91	→	

Tableau 37 : Résultats de la configuration - Cas 28

6.5.30 Cas n°29

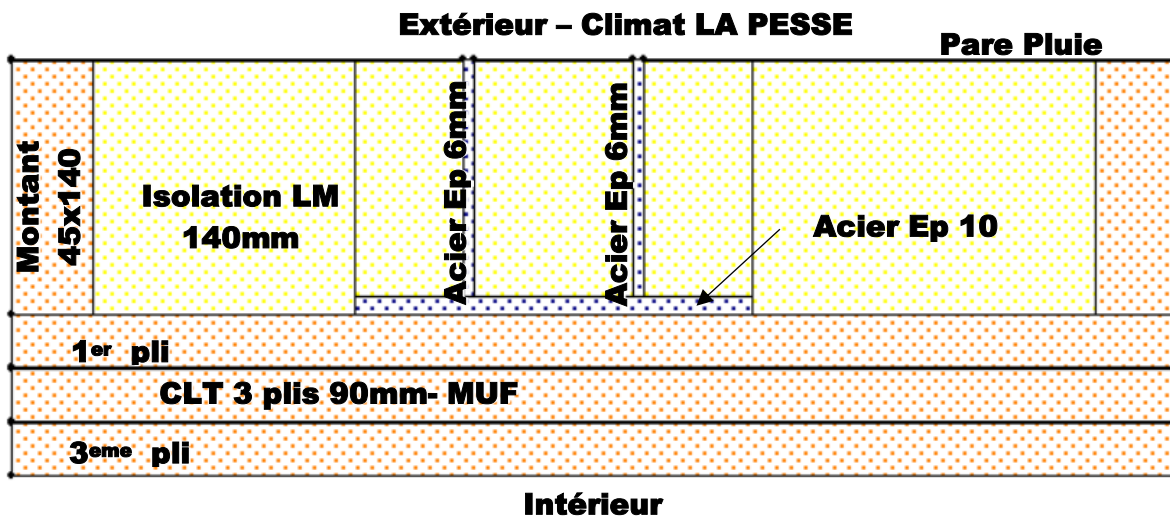


Figure 43 : schéma de la paroi type 12 avec ferrure traversant l'isolant (Cas 29)

Cas à modéliser	N° config CPT	Commentaires	Climats extérieurs				CLT				Isolant					Sd PV (m)					
			Nancy	Brest	Nice	La Pesse	Type de colle		Epaisseur		Type			Ep. principal (mm)		Ep. Doublage (mm)		0 (sans)			
							PU	MUF	3 plis - 90 mm	5 plis - 150 mm	LM	FB	PSE	100	140	200	0 (sans)	50	0 (sans)	2	18
29	40	ferrure				X				X	X				X	X		X			

Valeurs maximales atteintes à la 3 <sup>ème</sup> année pour :	Teneur en eau en kg/m <sup>3</sup>	Teneur en eau % en masse	Humidité relative en %	Evolution au cours du temps	Observations
Paroi globale	26.4	–	–	→	
CLT 1 <sup>e</sup> pli	53	8.9	58.5	→	
CLT 3 <sup>ème</sup> pli	65.8	11	71	→	
Isolant LM	1.1	2.2	68	→	
Montant bois	56.5	9.5	62.5	↘	
Partie CLT 3 <sup>er</sup> Plis coté intérieur	80.5	13.5	80	→	
Partie CLT 1 <sup>er</sup> Plis contre ferrure	76	12.6	77	↘	
Partie Isolant contre ferrure (intérieur ferrure)	1	2	67.5	→	
Partie iso Côté extérieur	5.6	10.7	92.4	→	

Tableau 38 : Résultats de la configuration - Cas 29

## 7. DEFINITION D'UN « DOMAINE D'APPLICATION HYGROTHERMIQUE » POUR LES PAROIS COMPORTANT UN PANNEAU CLT

### 7.1 Interprétation des résultats des modélisations

#### 7.1.1 Parois en partie courantes

Sur la base des résultats du chapitre 6.5 ci-dessus, les règles d'interprétation des résultats des simulations hygrotthermiques sont définies en annexe 1.

##### ✓ **Cas 1 à 3 : paroi verticale en CLT avec isolation par l'extérieur**

L'humidité dans le panneau CLT, quel que soit le pli, est faible : inférieure à 8%

Cependant, ces parois montrent une humidité relative importante de l'isolant proche du pare-pluie. Quel que soit le type d'isolant, l'humidité relative maximale atteinte par le produit peut être supérieure à 98%. Les effets combinés de très basses températures et de la barrière à la vapeur d'eau (même faible) du pare-pluie entraînent une accumulation de vapeur d'eau modérée mais suffisante pour atteindre ces niveaux d'humidité relative. Comme cette humidité est d'origine extérieure, installer une barrière à la vapeur d'eau du côté intérieur ne diminuerait pas cette accumulation. Il conviendra donc de choisir pour ces parois des isolants susceptibles de « supporter » cette humidité ponctuellement élevée.

##### ✓ **Cas 4 à 7 : paroi verticale en CLT avec isolation par l'intérieur**

Les parois comportant des panneaux CLT du côté extérieur et un pare-vapeur intérieur ayant un Sd de 18 m affichent une humidité relative satisfaisante, quel que soit le produit ou l'endroit dans les produits. Les humidités relatives maximales atteintes sont inférieures à 80%, quel que soit le climat utilisé.

Par contre, en modifiant le type de pare-vapeur et en passant d'un Sd de 18 m à un Sd de 2 m, les quantités de vapeur d'eau absorbées par les produits deviennent très importantes.

Le cas modélisé n°7 voit ses teneurs en eau augmenter d'année en année. Au bout de 5 ans, la croissance de la teneur en eau se poursuit et la cinquième année, les humidités relatives sont supérieures à 95 % pour le pli intérieur du panneau en CLT et pour la partie de l'isolant contre les panneaux de CLT. La teneur en eau du pli intérieur du CLT est supérieure à 24% en masse.

Pour ce cas n°7, les conditions de salubrité ne sont pas respectées.

##### ✓ **Cas 8 : paroi verticale en CLT avec isolation principale par l'extérieur et complément d'isolant par l'intérieur**

Le doublage isolant positionné côté intérieur par rapport au CLT fait légèrement augmenter l'humidité dans le pli intérieur du CLT (par rapport aux cas 1 à 4), mais tout en restant inférieure à 12%. Le respect de la règle des 2/3 – 1/3 (2/3 de la résistance thermique côté extérieur de la paroi par rapport au CLT, 1/3 côté intérieur) permet d'avoir des conditions hygrométriques correctes.

✓ **Cas 9 à 11 : plancher bas sur vide sanitaire avec isolant en sous-face du CLT**

Quel que soit le type d'isolant, les teneurs en eau des panneaux CLT de ces différents cas de calcul restent inférieures aux seuils pour lesquels pourraient survenir des conditions défavorables pour le panneau CLT lui-même (humidité inférieure à 17% sans pare-vapeur, inférieure à 12% avec pare-vapeur).

En l'absence de pare-vapeur au-dessus du CLT ou de revêtement de sol dont le Sd est supérieur ou égal à 18 m, l'humidité dans le pli supérieur du panneau CLT peut avoisiner le 17%, ce qui implique des justifications mécaniques en classe de service 2.

✓ **Cas 12 à 14 : plancher bas sur vide sanitaire avec isolant au-dessus du CLT**

Pour un isolant type PSE d'épaisseur 140mm, résistant à la diffusion de vapeur d'eau, même en l'absence d'un pare-vapeur au-dessus de l'isolant, les teneurs en eau des panneaux CLT restent inférieures aux seuils pour lesquels pourraient survenir des conditions défavorables pour le panneau CLT lui-même.

Pour un isolant fibreux (minéral ou végétal), la mise en œuvre d'un pare-vapeur permet également d'avoir des teneurs en eau qui restent inférieures aux seuils pour lesquels pourraient survenir des conditions défavorables dans le CLT.

L'humidité la plus élevée constatée est celle du pli extérieur, au contact du vide sanitaire, et indépendamment de la composition du reste de la paroi, son humidité est directement liée à celle du vide sanitaire, ce qui implique des justifications mécaniques en classe de service 2.

✓ **Cas 21 à 26 : Paroi verticale CLT avec système ETICS**

Les teneurs en eau des panneaux CLT de ces différents cas de calcul restent inférieurs aux seuils pour lesquels pourraient survenir des conditions défavorables pour le panneau CLT lui-même.

Cependant, lorsque le système d'enduit à un Sd élevé (Sd = 2 m), il faut signaler que quel que soit le type d'isolant, l'humidité peut avoisiner 18% dans le CLT, ce qui implique des justifications mécaniques en classe de service 2.

Avec la présence d'un pare-vapeur de Sd = 18 m côté intérieur de la paroi, quel que soit l'isolant ou la nature de l'enduit, le teneur en eau dans le CLT ne dépassent jamais 10%.

### 7.1.2 Points singuliers

✓ **Cas 15 : Liaison mur CLT isolé par l'extérieur et plancher bas en béton avec isolant sous chape**

Les teneurs en eau maximales observées dans cette liaison sont identiques à celles des murs en parties courantes. La liaison de la paroi en CLT isolée par l'extérieur avec une dalle en béton comportant une isolation continue sous chape ne modifie pas les critères d'analyse. Ainsi un mur en partie courante répondant aux différents critères répondra également à ces critères lorsque celle-ci est en liaison avec une dalle en béton, pour peu qu'il y ait une arase avec la dalle et une étanchéité avec la chape.

L'humidité dans l'isolant contre le panneau CLT en pied de mur peut être ponctuellement élevée, tout en étant trop faible pour présenter un risque de condensation, il conviendra donc de choisir pour ces parois des isolants susceptibles de « supporter » cette humidité ponctuellement élevée.

✓ **Cas 16 : Liaison mur CLT isolé par l'extérieur et plancher bas en béton avec isolant sous dalle**

Les teneurs en eau maximales observées dans cette liaison sont identiques à celles des murs en parties courantes. La liaison et le plancher bas en béton isolé en sous-face n'apportent pas d'eau supplémentaire, pour peu qu'il y ait une arase avec le béton.

✓ **Cas 17 et 18 : Liaison mur CLT isolé par l'extérieur et plancher bas CLT isolé en sous-face sur vide sanitaire**

Les teneurs en eau maximales observées dans cette liaison sont identiques à celles des murs en parties courantes. La liaison et le plancher bas CLT n'apportent pas d'eau supplémentaire, pour peu qu'il y ait une arase avec le béton.

✓ **Cas 19 et 20 : Liaison mur CLT isolé par l'extérieur et plancher bas CLT isolé par le dessus sur vide sanitaire**

Les teneurs en eau maximales observées dans cette liaison sont légèrement supérieures à celles des murs en parties courantes et notamment très localement en pied de mur, sur le pli intérieur où l'épaisseur de l'isolant au-dessus du plancher est combinée à l'absence de pare-vapeur. A cet endroit l'humidité atteint 18,3%, ce qui constitue une limite d'utilisation.

✓ **Cas 27 : Liaison mur CLT avec système ETICS et plancher bas CLT isolé par le dessus sur vide sanitaire**

La teneur en eau dans le pli inférieur du CLT du plancher augmente d'une année sur l'autre, ce qui constitue un risque pour la salubrité du bois. L'effet barrière du système ETICS combiné à la présence de l'isolant au-dessus du plancher produit ce confinement en tête de plancher.

✓ **Cas 28 et 29 : Mur CLT isolé par l'extérieur avec ferrure traversant l'isolant**

En climat de montagne (très froid) l'humidité dans le CLT au contact de la ferrure augmente de 3% par rapport à la paroi en partie courante, tout en restant dans des niveaux faibles (12,6% maximum). Le pont thermique lié à la présence d'un connecteur métallique ne perturbe donc pas significativement le comportement hygrothermique de la paroi.

## 7.2 Proposition de règles de conception hygrothermique pour les parois verticales et les planchers bas à base de CLT

### 7.2.1 Préambule et prescriptions générales

La proposition de règles de conception ci-dessous est valable uniquement :

- pour des parois à base de panneaux CLT composés au minimum de 3 plis pour les parois verticales et 5 plis pour les planchers bas sur vide sanitaire (CLT collés à chant ou non, ou CLT cloués).
- pour des constructions en climats français métropolitains (y compris climat de montagne)
- pour des locaux à faible ou moyenne hygrométrie, au sens de l'annexe D de la partie 1-1 du NF DTU 31.2 – 2011 (ou annexe B, pour la version 2019)
- pour des parois possédant un système d'étanchéité à l'air continu
- pour des parois non revêtues côté extérieur, ou revêtues côté extérieur avec un matériau (membrane pare-pluie, plaque jouant une fonction écran incendie,...) dont la valeur  $S_d$  est inférieure ou égale à 0,3 m (hors système ETICS, voir chapitre 7.2.3 ci-dessous).
- pour des parois possédant un isolant d'un côté ou de l'autre du panneau CLT (ou de part et d'autre dans le cas de parois avec doublage intérieur) de résistance thermique supérieure ou égale à 3,5 m<sup>2</sup>.K/W.
- Les vides de construction (jeux d'assemblage entre panneaux CLT par exemple) doivent être inférieurs à 10 mm, sinon, à partir de 10 mm, ils doivent être remplis d'isolant.

Les locaux visés par ces règles de conception peuvent être ponctuellement et temporairement rafraîchis en période chaude par un système d'appoint associé à la ventilation mécanique, pour autant que la température de consigne soit telle que la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur soit inférieure ou égale à 5°C.

La présence de ferrures métalliques ponctuelles (par opposition à ces ferrures filantes sur la longueur de la façade) et d'épaisseur de plaque inférieure ou égale à 6 mm et traversant l'isolant côté l'extérieur du CLT ne pose pas de problème de salubrité.

Les prescriptions ci-dessous peuvent être optimisées au cas par cas pour des projets particuliers grâce à des modélisations spécifiques prenant en compte les climats extérieurs et intérieurs particuliers du site de construction, et la composition précise des panneaux CLT du chantier (type de colle, épaisseur des plans de collage, nombre de plis, épaisseur des plis,...) avec des données matériaux conformes au chapitre 5.2 ci-dessus.

### 7.2.2 Cas des parois verticales avec revêtement extérieur ventilé

#### ✓ **Parois isolées exclusivement ou majoritairement par l'extérieur**

Quel que soit le type d'isolant, la mise en œuvre d'un pare-vapeur est facultative.

Pour des parois isolées exclusivement par l'extérieur, le dimensionnement de la structure, d'un point de vue strictement hygrothermique, pourrait être réalisé en classe de service 1.

Dans le cas de parois avec complément d'isolant côté intérieur, la règle dite des 2/3 – 1/3 peut être appliquée à la paroi : La résistance thermique de l'isolant positionné côté intérieur par rapport au CLT doit être inférieure à la moitié de la résistance thermique de l'isolant positionné côté

extérieur par rapport au CLT. De plus, dans ce cas de parois avec complément d'isolant côté intérieur, le dimensionnement de la structure doit être réalisé en classe de service 2.

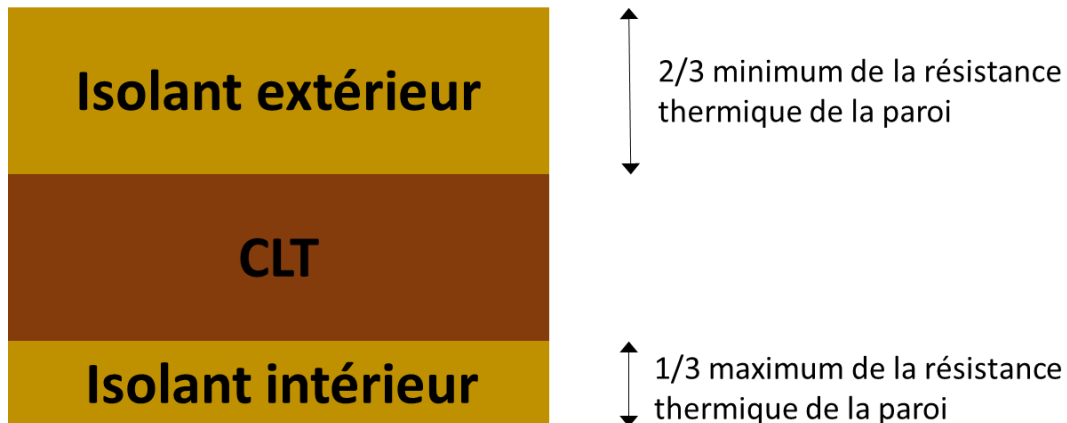


Figure 44 : Schéma de répartition de l'isolant de part-et-d'autre du CLT

#### ✓ **Parois isolées exclusivement par l'intérieur**

Dans ce cas, un pare-vapeur continu de  $S_d$  supérieur ou égal à 18 m doit être mis en œuvre côté intérieur par rapport à l'isolant.

Le dimensionnement de la structure doit être réalisé en classe de service 2.

Les vides de construction entre panneaux CLT (jeu de mise en œuvre par exemple) dès lors qu'ils sont supérieurs à 2 mm d'épaisseur, doivent être remplis d'isolant (type laine minérale compressible) ou d'un matériau de calfeutrement de résistance thermique supérieure ou égale à  $1,0 \text{ m}^2 \cdot \text{KW}$  (positionné côté extérieur de la paroi si le vide n'est pas rempli entièrement).

#### 7.2.3 Cas des parois verticales avec systèmes ETICS

Le système complet d'enduit (couche(s) de base + finition(s)) doit avoir un  $S_d$  inférieur ou à égal à 2 m, déterminé selon les exigences de l'ETAG 004.

En l'absence de pare-vapeur dont le  $S_d$  est supérieur ou égal à 18 m mis en œuvre côté intérieur par rapport au CLT, les justifications mécaniques devront être réalisées en classe de service 2.

Si un pare-vapeur dont le  $S_d$  est supérieur ou égal à 18 m est mis en œuvre, le dimensionnement de la structure, d'un point de vue strictement hygrothermique, pourrait être réalisé en classe de service 1.

#### 7.2.4 Cas des planchers bas sur vide sanitaire ou local non chauffé

##### ✓ **Règles générales**

Le vide sanitaire ou le local non chauffé doit être « bien ventilé » au sens du DTU 51.3 : la surface totale des orifices de ventilation doit être régulièrement répartie sur la périphérie du vide sanitaire ou du local non chauffé et être supérieure ou égale à  $1/150^{\text{eme}}$  de la surface totale du plancher.

Une barrière d'étanchéité vis à vis des remontées capillaires, conforme aux exigences du NF DTU 31.2 doit être mise en œuvre entre le plancher CLT et le soubassement en maçonnerie ou en béton.

✓ ***Avec isolation en sous-face du plancher CLT***

En l'absence de pare-vapeur au-dessus du CLT ou d'un revêtement de sol continu et étanche à l'air dont le  $S_d$  est supérieur ou égal à 18 m, les justifications mécaniques devront être réalisées en classe de service 2.

Si un pare-vapeur ou un revêtement de sol continu et étanche à l'air dont le  $S_d$  est supérieur ou égal à 18 m est mis en œuvre au-dessus du panneau CLT de plancher, le dimensionnement de la structure, d'un point de vue strictement hygrothermique, pourrait être réalisé en classe de service 1.

✓ ***Avec isolation au-dessus du panneau CLT***

Le dimensionnement de la structure doit être réalisé en classe de service 2.

Si l'isolant mis en œuvre de manière continue possède un facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau supérieur ou égal à 50 (par exemple certains isolants type PSE, PSX, PU), la mise en œuvre d'un pare-vapeur est facultative.

Pour tout autre type d'isolant, un pare-vapeur ou un revêtement de sol continu et étanche à l'air de  $S_d$  supérieur ou égal à 18 m doit être mis en œuvre côté intérieur par rapport à l'isolant.

Si ce plancher est mis en œuvre en association avec une paroi verticale revêtue d'un système ETICS, un pare-vapeur ou un revêtement de sol continu et étanche à l'air de  $S_d$  supérieur ou égal à 18 m doit être mis en œuvre côté intérieur par rapport à l'isolant du plancher, quel qu'il soit.

Les vides de construction dès lors qu'ils sont supérieurs à 2 mm d'épaisseur, doivent être remplis d'isolant (type laine minérale compressible) ou d'un matériau de calfeutrement de résistance thermique supérieure ou égale à 1,0 m<sup>2</sup>.KW (positionné côté extérieur de la paroi si le vide n'est pas rempli entièrement).

### ***7.2.5 Cas particulier des isolants à base de fibres végétales intégrés aux parois CLT***

En référence au cahier CSTB 3713\_V2 (Guide technique spécialisé pour la constitution d'un dossier de demande d'Avis Technique : Isolants à base de fibres végétales ou animales), l'évaluation de la résistance aux moisissures des isolants devront être réalisés :

- Selon le scénario HR95 pour :
  - Les isolants des parois isolées par l'extérieur, en une seule couche d'isolant
  - Les isolants des parois isolées par l'extérieur, pour des isolants en plusieurs couches, pour les 4 premiers centimètres côté extérieur, ou toute la couche extérieure si celle-ci à une épaisseur supérieure à 4 cm
  - Les compléments d'isolant côté intérieur par rapport au CLT
  - Les isolants des planchers bas positionnés côté extérieur par rapport au CLT
- Selon le scénario HR85 pour :
  - Les isolants des parois isolées par l'intérieur avec pare-vapeur de  $S_d$  supérieur ou égal à 18 m



- Les isolants des parois isolées par l'extérieur, en plusieurs couches, pour les couches situées plus vers l'intérieur du bâtiment (à plus de 4 cm du nu extérieur de la paroi)
- Les isolants des planchers bas sur vide sanitaire, lorsqu'ils sont positionnés au-dessus du CLT, et sous un pare-vapeur ou un revêtement de sol continu et étanche à l'air de  $S_d$  supérieur ou égal à 18 m

## 8. CONCLUSION

Ce projet d'ampleur a permis de mieux appréhender le comportement hygrothermique des panneaux CLT utilisés en parois verticales et en plancher bas sur vide sanitaire et à maîtriser les risques liés aux transferts de vapeur d'eau dans les parois.

La phase expérimentale du projet a permis de qualifier précisément l'effet « barrière » des plans de collage des panneaux CLT, selon la nature même de la colle.

Grâce à ces travaux menés en laboratoire, les principales configurations de parois et les jonctions entre parois associées ont pu être modélisées précisément afin d'établir des règles de conception hygrothermiques pour les parois verticales et les planchers bas à base de CLT et exclure les risques d'humidifications trop importantes des composants.

## REMERCIEMENTS

Merci aux membres de CLT France ayant participé au pilotage de l'étude.

Merci aux membres de CLT France ayant fourni des données (rapports d'essais, rapports d'étude) : Les sociétés Bois & Sciages de Sougy, Stora Enso, Tanguy S.A, KLH Lignatec.

Merci aux membres de CLT France ayant fourni des échantillons de panneaux : Les sociétés Belliard, SACBA et Lineazen.

Merci aux personnels FCBA ayant contribué à la réussite de cette étude : Julien Brassy, Frédéric Wielezynsky, Dominique Mangin, Stéphane Champion.

# Annexe 1

## Règles d'interprétation des résultats des simulations hygrothermiques

La signification pratique des résultats peut être interprétée suivant différentes méthodes :

- en comparant les conditions hygrothermiques obtenues avec les limites spécifiées ;
- en contrôlant le risque d'accumulation d'humidité. L'évolution de la teneur totale en eau dans la construction sera évaluée en comparant la valeur à l'initiale à celle après un cycle ;
- en évaluant la tolérance à l'humidité de la construction (potentiel de séchage) ;
- en traitant les résultats transitoires à l'aide d'un modèle de post-traitement (par exemple pour le développement des moisissures ou des algues, la pourriture, la corrosion ...).

Les risques sont évalués à partir des teneurs en eau en % des humidités relatives des produits et de leurs évolutions au cours des trois ans.

Le premier élément à vérifier est la teneur en eau de la paroi dans sa globalité. Si celle-ci augmente significativement d'une année sur l'autre, cela signifie que les transferts hygrothermiques dans la paroi ne sont pas stables. La teneur en eau de la paroi pourrait augmenter au-delà des trois ans de simulation et conduire à des condensations importantes.

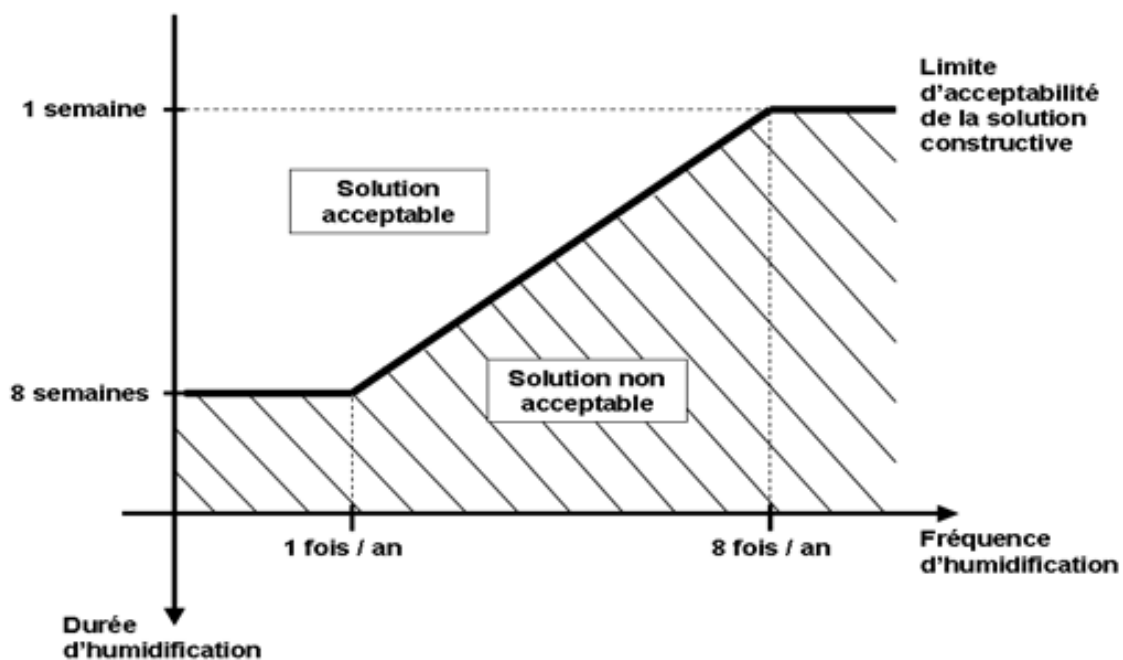
Une paroi, pour être jugée satisfaisante, ne pourra pas contenir des éléments dont l'humidité relative est supérieure à 98 %, même en des endroits particuliers de la paroi. En effet les tolérances du logiciel font qu'au-delà de 98 %, le risque de condensation peut être considéré comme très probable.

Tous les éléments en bois ou à base de bois intervenant dans la stabilité de l'ouvrage (panneaux de contreventement, montants et traverses d'ossature, ...) sont dimensionnés en classe de service 2 (pour limiter le fluage). Les teneurs en eau en masse en tout point de ces éléments ne doivent pas être supérieures à 20 % pendant plus de 8 semaines par an, en ne comptabilisant que les périodes supérieures à une semaine.

De même, la teneur en eau d'un élément de la paroi contenant des produits biosourcés n'intervenant pas dans la stabilité de l'ouvrage (tasseaux, isolants, panneaux à usage non structuraux, ...) ne pourra être qu'occasionnellement (moins de 8 semaines par an) supérieure à 23 % en masse. Cette limite de 23 % est basée sur des travaux en laboratoire et sur des expériences reconnues et réussies, prenant en compte les diverses conditions de germination des spores. Il est à noter que la durée de 8 semaines au-delà de 23 % est défavorable, même si elle est atteinte de manière discontinue. Les périodes au-delà de 23 % inférieures à une semaine ne seront pas comptabilisées, n'étant pas suffisamment longues pour provoquer le développement fongique.

Le graphique ci-après montre l'acceptabilité d'une solution constructive en fonction des éléments exposés ci-dessus.

### Périodes d'humidification supérieures à 20% et à 23%



**Figure a : Représentation des limites d'humidification des matériaux**

Une autre propriété influant le comportement du matériau biosourcé à l'humidité est sa capacité à pouvoir contenir à la fois de l'eau libre et/ou de l'eau liée.

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.

Les cas de calcul où l'humidité du bois ou des matériaux à base de bois (panneaux, isolants) dépasse 30 % sera donc également un critère rédhibitoire, l'eau liquide présente dans une paroi fermée étant très difficile à évacuer.