Direction Enveloppe du Bâtiment
Division Recherche & Expertise de l'Enveloppe du Bâtiment

N° affaires : 23-041 - 23-065 - 23-079
Date : 21/11/2023
Réf. : DEB/R2EB-2023-179- RG/NP/EH
N° SAP : 70091899 – 70092063 - 70092890

Recherche par simulation hygrothermique des risques de condensation et de développement fongique dans des complexes comportant un isolant en paille hachée insufflé dans le cadre d'un ATEx de cas A

Version 1

Demandeur de l'étude :

IELO COOP
2 lieu-dit La Forêt
86210 BONNEUIL-MATOURS

Auteurs[1]	Approbateur
N. PLACE & R. GAUTIER	F.LEGUILLON





1. Tél. : 04.56.14.72.59

La reproduction de ce rapport d'étude n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral, sauf accord particulier du CSTB.
Ce rapport d'étude comporte **53** pages dont **10** pages d'annexes.

CONTENU

1. OBJECTIF DE L'ETUDE 3
2. PRESENTATION DES MOYENS DE CALCULS 3
3. HYPOTHESES 3
4. DONNEES NECESSAIRES AUX MODELES 4
5. CAHIER DES CHARGES 4
5.1. Présentation des parois objet des modélisations 4
5.2. Caractéristiques des produits composant les parois 5
5.3. Ambiances extérieures et intérieures 9
6. SYNTHESE DES CONFIGURATIONS CALCULEES 10
7. RESULTATS DES CALCULS 23
8. CONCLUSION 38
Annexe 1 : REGLES D'INTERPRETATION DES RESULTATS 44
Annexe 2 : PRESENTATION DES CONDITIONS AUX LIMITES EXTERIEURES ET INTERIEURES ... 46

1. OBJECTIF DE L'ETUDE

L'étude consiste à effectuer des calculs de transferts couplés chaleur-humidité à travers les matériaux constituant différentes parois verticales comprenant un isolant en paille hachée soufflée.

Les conditions d'humidité et de température ainsi que l'évaluation des transferts de vapeur d'eau et d'eau liquide des différents matériaux sont obtenues à partir de calculs effectués avec le logiciel WUFI® *(Wärme Und Feuchte Instationär)* édité par l'IBP Fraunhofer dans sa déclinaison monodimensionnelle (WUFI® Pro) ou bidimensionnelle (WUFI® 2D).

Les différents paramètres d'entrée sont préalablement définis avec le demandeur lors de l'offre commerciale. Un avis critique sur les résultats des simulations est formulé en fin de rapport.

2. PRESENTATION DES MOYENS DE CALCULS

A partir des paramètres d'entrée fournis par le client, le logiciel WUFI® permet de déterminer les champs de température, d'humidité relative et de teneur en eau, en tous points des composants de la paroi.

Les simulations seront réalisées sur une période de 10 ans pour un local situé à Nancy (plaine continentale sévère, H1), Brest (climat océanique à forte pluviométrie, H2), Nice (climat méditerranéen, H3) et La Chaux-de-Fonds (climat de montagne, jusqu'à 1100 m).

3. HYPOTHESES

Les hypothèses prises en compte dans le cadre de cette étude émanent du guide technique *SimHuBat* – *Détermination des hypothèses pour les simulations de transferts couplés température / humidité dans les parois de bâtiments*.

- Les modélisations seront réalisées en monodimensionnel (1D) représentant la partie courante et en bidimensionnel (2D) pour les points singuliers ;
- Les effets du rayonnement courtes longueurs d'ondes (solaire) sont pris en compte avec ombrage. On considère un coefficient d'absorption solaire α_e=0,21 (cas défavorable) ;
- Pour les cas disposants d'un bardage ventilé, un taux de renouvellement d'air de 20 vol.h^{-1} est appliqué à la lame d'air ;
- Les propriétés hygrothermiques de l'enduit extérieur ainsi que le panneau OSB proviennent de l'étude CODIFAB sur le Village des athlètes des Jeux olympiques et paralympiques 2024 (lien des guides) ;
- Les propriétés hygrothermiques génériques de l'isolant en fibre de bois support d'enduit ainsi que le panneau OSB Sd = 3 m (suivant les cas) utilisé dans les calculs complémentaires proviennent

du projet financé par l'AiF (Arbeitsgemeinschaften industrieller Forschungsvereinigungen) nommé *Generierung hygrothermischer Kennwerte von Holzwerkstoffen zur numerischen Simulation des Bauteilverhaltens*.

- Les propriétés de l'isolant en paille hachée ont été communiquées par le demandeur. L'isotherme de sorption réalisé par DVS n'était pas l'objet d'un rapport indépendant mais de mesures internes IELO. La capillarité (coef. A_w selon NF EN ISO 15148) a été prise comme générique.

4. DONNEES NECESSAIRES AUX MODELES

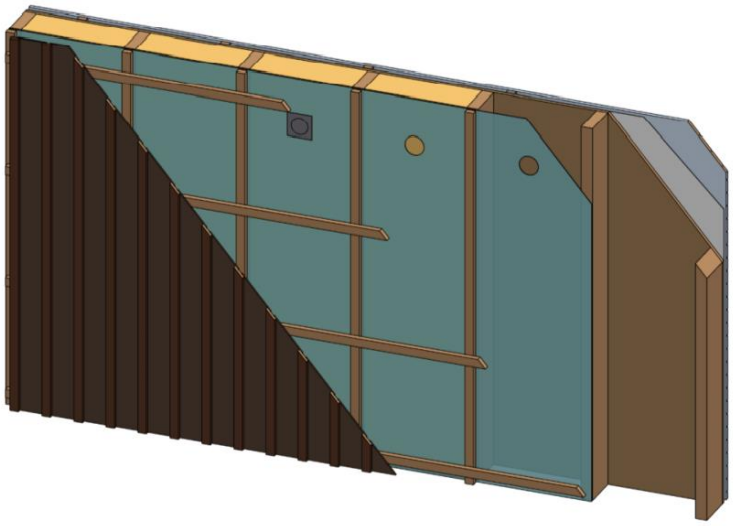
Les paramètres d'entrée nécessaires pour chaque constituant sont les suivants :

- La résistance à la diffusion de vapeur d'eau, notée $\mu = Sd/e[-]$;
- L'isotherme de sorption (variation de la teneur en eau d'un produit en équilibre dans une ambiance à différents taux d'humidité), tel que $w\ [kg.m^{-3}] = f(HR)$;
- La conductivité thermique, notée $\lambda\ [W.m^{-1}.K^{-1}]$;
- La chaleur spécifique, notée $Cp\ [J.kg^{-1}.K^{-1}]$;
- La porosité, notée $\varepsilon\ [-]$;
- La masse volumique, notée $\rho\ [kg.m^{-3}]$.

5. CAHIER DES CHARGES

5.1. Présentation des parois objet des modélisations

Figure 1 : Schéma du procédé (exemple d'insufflation derrière un parement)



5.2. Caractéristiques des produits composant les parois

Les parois définies dans le Tableau 2 ci-après comportent les produits suivants (partie modélisée uniquement, de l'interface extérieure vers l'interface intérieure) :

COB bardage ventilé avec panneau bois côté intérieur & extérieur :

- Bardage bois tendre de 20 mm ;
- Lame d'air ventilée de 20 mm ;
- Panneau pare-pluie rigide en fibre de bois de 20 mm ;
- Ossature bois de 45 x 145 mm ;
- Remplissage en paille hachée de 145 mm ;
- Panneau OSB 3 de 12 mm ;
- Surisolation intérieure (respectant les 2/3 – 1/3 ou 3/4 – 1/4, voir tableau « cas à simuler »).

COB bardage ventilé avec PV intérieur et panneau extérieur :

- Bardage bois tendre de 20 mm ;
- Lame d'air ventilée de 20 mm ;
- Membrane pare-pluie souple Sd=0.18 m ;
- Panneau OSB 3 de 12 mm ;
- Ossature bois de 45 x 145 mm ;
- Remplissage en paille hachée de 145 mm ;
- Membrane pare-vapeur Sd=18 m ;
- Surisolation intérieure (respectant les 2/3 – 1/3 ou 3/4 – 1/4, voir tableau « cas à simuler »).

COB enduit extérieur sur isolant support :

- Enduit extérieur dit « étanche » de 18 mm (type guide SOLIDEO) ;
- Isolant laine de bois support d'enduit de 120 mm ;
- Panneau OSB 3 de 18 mm ;
- Ossature bois de 45 x 145 mm ;
- Remplissage en paille hachée de 145 mm ;
- Membrane pare-vapeur Sd=90m ;
- Surisolation intérieure (respectant les 2/3 – 1/3 ou 3/4 – 1/4, voir tableau « cas à simuler »).

COB bardage ventilé avec PV hygrovariable côté intérieur et panneau extérieur :

- Bardage bois tendre de 20 mm ;
- Lame d'air ventilée de 20 mm ;
- Membrane pare-pluie souple Sd=0.18 m ;
- Panneau OSB 3 de 12 mm ;

- Ossature bois de 45 x 145 mm ;
- Remplissage en paille hachée de 145 mm ;
- Membrane pare-vapeur hygrovariable Sd_{max}=34 m ;
- Surisolation intérieure (respectant les 2/3 – 1/3 ou 3/4 – 1/4, voir tableau « cas à simuler ».

ITE bardage ventilé sur béton banché

- Bardage bois tendre de 20 mm ;
- Lame d'air ventilée de 20 mm ;
- Membrane pare-pluie souple Sd=0.18 m ;
- Panneau OSB 3 de 12 mm ;
- Ossature bois de 45 x 145 mm ;
- Remplissage en paille hachée de 145 mm ;
- Béton banché de 200 mm ;
- Surisolation intérieure (respectant les 2/3 – 1/3 ou 3/4 – 1/4, voir tableau « cas à simuler »).

ITE bardage ventilé sur brique pleine

- Bardage bois tendre de 20 mm ;
- Lame d'air ventilée de 20 mm ;
- Membrane pare-pluie souple Sd=0.18 m ;
- Panneau OSB 3 de 12 mm ;
- Ossature bois de 45 x 145 mm ;
- Remplissage en paille hachée de 145 mm ;
- Brique pleine de 220 mm ;
- Surisolation intérieure (respectant les 2/3 – 1/3 ou 3/4 – 1/4, voir tableau « cas à simuler »).

ETICS sur béton banché

- Enduit extérieur dit « étanche » de 18 mm (type guide SOLIDEO) ;
- Isolant laine de bois support d'enduit de 120 mm ;
- Panneau OSB 3 de 18 mm ;
- Ossature bois de 45 x 145 mm ;
- Remplissage en paille hachée de 145 mm ;
- Béton banché de 200 mm ;
- Surisolation intérieure (respectant les 2/3 – 1/3 ou 3/4 – 1/4, voir tableau « cas à simuler »).

ETICS sur brique pleine

- Enduit extérieur dit « étanche » de 18 mm (type guide SOLIDEO) ;
- Isolant laine de bois support d'enduit de 120 mm ;
- Panneau OSB 3 de 18 mm ;
- Ossature bois de 45 x 145 mm ;
- Remplissage en paille hachée de 145 mm ;
- Brique pleine de 220 mm ;
- Surisolation intérieure (respectant les 2/3 – 1/3 ou 3/4 – 1/4, voir tableau « cas à simuler »).

Les caractéristiques générales des constituants ont été validées par le demandeur lors de l'offre commerciale. Le tableau ci-après reprend les caractéristiques générales de ces matériaux :

Tableau 1 : Caractéristiques des constituants de la paroi

Matériau	Masse volumique	Porosité	Chaleur spécifique	Conductivité thermique **sèche**	Facteur de rés. à la diff. de vap. d'eau μ OU Sd **sec**
	[kg/m³]	[-]	[j/(kg.K)]	[W/(m.K)]	[-] OU [m]
Bois tendre	440	0.74	1600	0.12	μ = 106
Pare-pluie rigide fibre de bois	260	0.83	1400	0.048	μ = 5
Pare-pluie souple	130	0.001	2300	2.3	Sd = 0.18m
Paille hachée	105	0.9	1512	0.045[1] (23°C / 50%)	μ = 2.8
Panneau OSB 3 « fermé »	630	0.72	1600	0.13	μ = 650
Panneau OSB 3 AiF « ouvert »	600	0.6	1400	0.1	μ = 250
Enduit extérieur « étanche » (type SOLIDEO)	2000	0.3	850	1.2	μ = 50
Béton banché	2300	0.18	850	1.7	μ = 180
Brique pleine	1745	0.33	1000	0.7	μ = 13
Laine de bois support enduit	140	0.91	1400	0.039	μ = 3
Membrane pare-vapeur	130	0.001	2300	2.3	Sd = 90m
Membrane hygrovariable	130	0.001	2300	2.3	Sd = f(HR) de 34 à 0.3m
Laine minérale (surisolation int)	30	0.95	850	0.035	μ = 1.5
PSE (surisolation int)	20	0.99	1500	0.038	μ = 40

Valeur générique
Valeur provenant des études SOLIDEO (JOP)
Valeur fournie par le demandeur

[1] La conductivité thermique utilisée dans la modélisation correspond à l'évolution de cette dernière en fonction de la teneur en eau (cf. rapports RE0722FB-001, RE0722FB-002 & RE0722FB-003).

5.3. Ambiances extérieures et intérieures

Les conditions aux limites des températures et humidités des différentes simulations correspondent à une zone climatique de plaine continentale (Nancy), une zone de climat océanique (Brest), une zone de climat méditerranéen (Nice) et une zone de climat de montagne (La Chaux-de-Fonds).

Les climats de Nancy et Brest sont respectivement froid et pluvieux et représentent des conditions sévères pour des climats de plaine.

Le climat extérieur de Nice étant chaud, il est courant de retrouver un système de conditionnement d'air en intérieur. Ce système va alors modifier le sens du flux de vapeur d'eau, ce qui peut potentiellement entrainer des pathologies.

Le climat de La Chaux-de-Fonds présente un climat montagnard sévère, allant jusqu'à 1100m.

Les règles d'interprétation des résultats obtenus sont précisées en annexe 1.

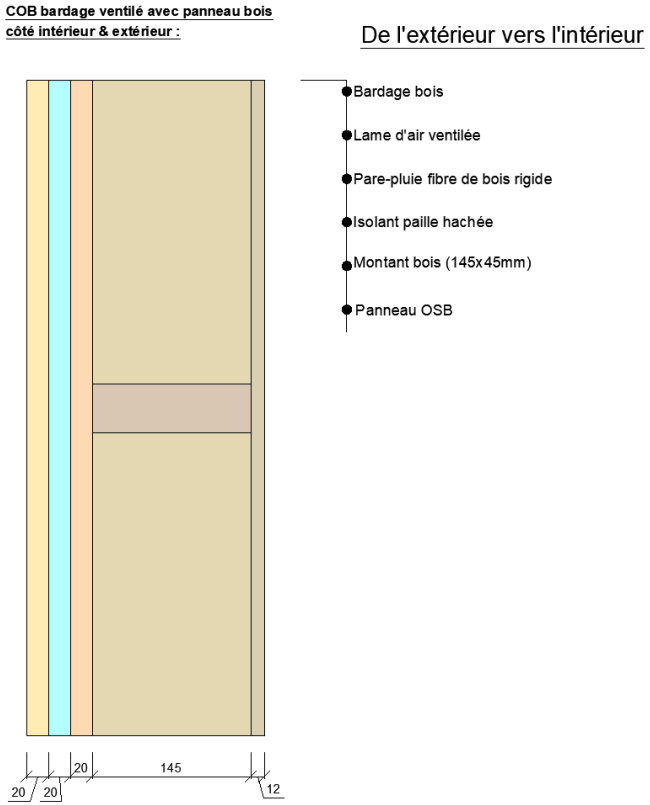
Toutes les modélisations sont effectuées avec un climat intérieur à hygrométrie moyenne, W/n_{max} = 5 g/m3.

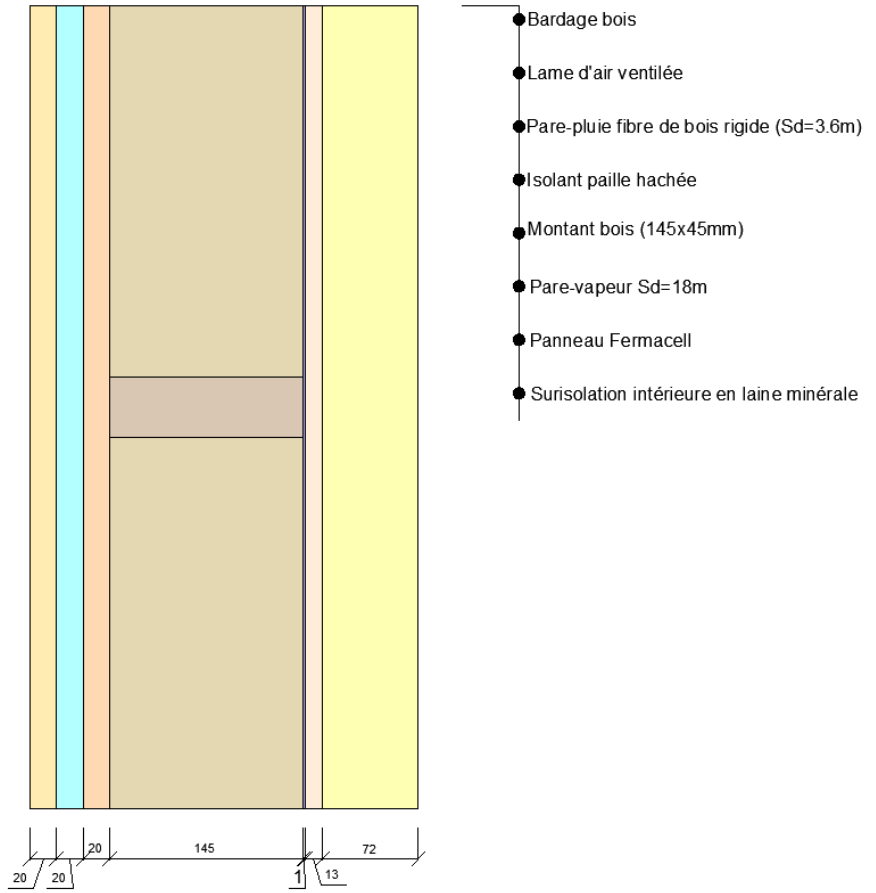
La méthode de détermination des ambiances intérieures ainsi que les figures montrant l'évolution des températures et humidités intérieures et extérieures au cours d'une année sont présentées dans l'annexe 2 à ce rapport.

6. SYNTHESE DES CONFIGURATIONS CALCULEES

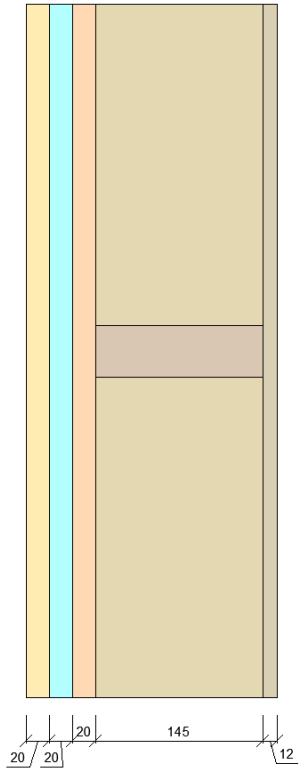
Le tableau ci-après présente la synthèse des différentes configurations simulées.

Tableau 2 : Synthèse des cas de figure calculés

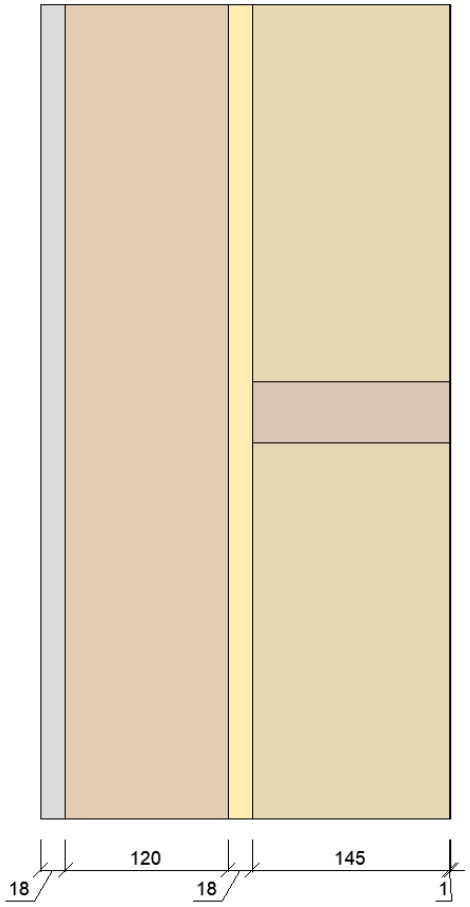
N°	Schéma	Surisolation intérieure	Climat extérieur	Dimension	Spécificité
1			H1	1D	
2			Montagne	1D	
3		PSE	Le plus défavorable	1D	
4		Laine minérale	Le plus défavorable	1D	
5		Le plus défavorable	Le plus défavorable	**2D**	

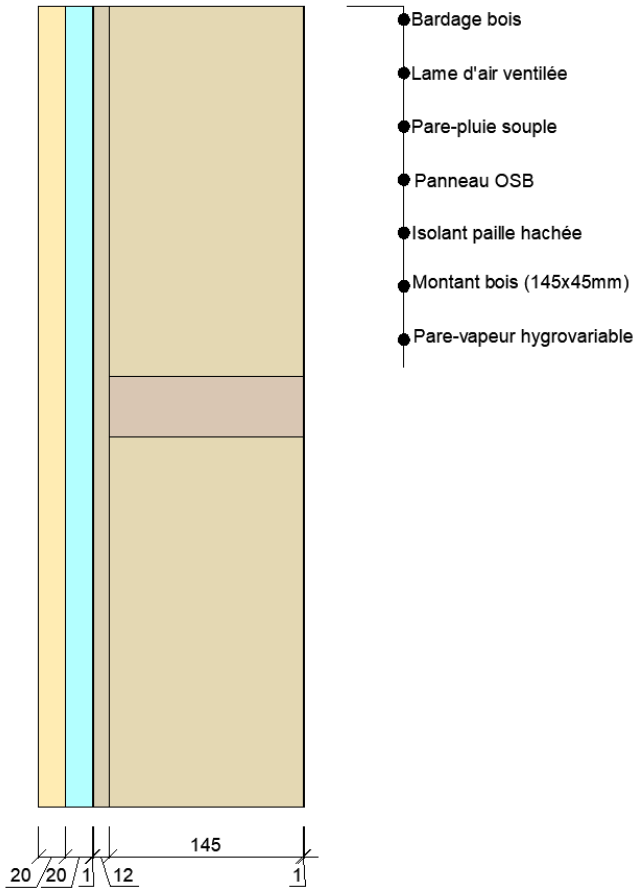
N°	Schéma	Surisolation intérieure	Climat extérieur	Dimension	Spécificité
4 bis	**COB bardage ventilé avec pare-vapeur intérieur & pare-pluie rigide extérieur :** 	Laine minérale	H1	1D	Hausse du Sd du panneau extérieur à 3.6m (règle facteur 5) Remplacement panneau OSB par membrane PV Sd=18m + panneau *Fermacell*

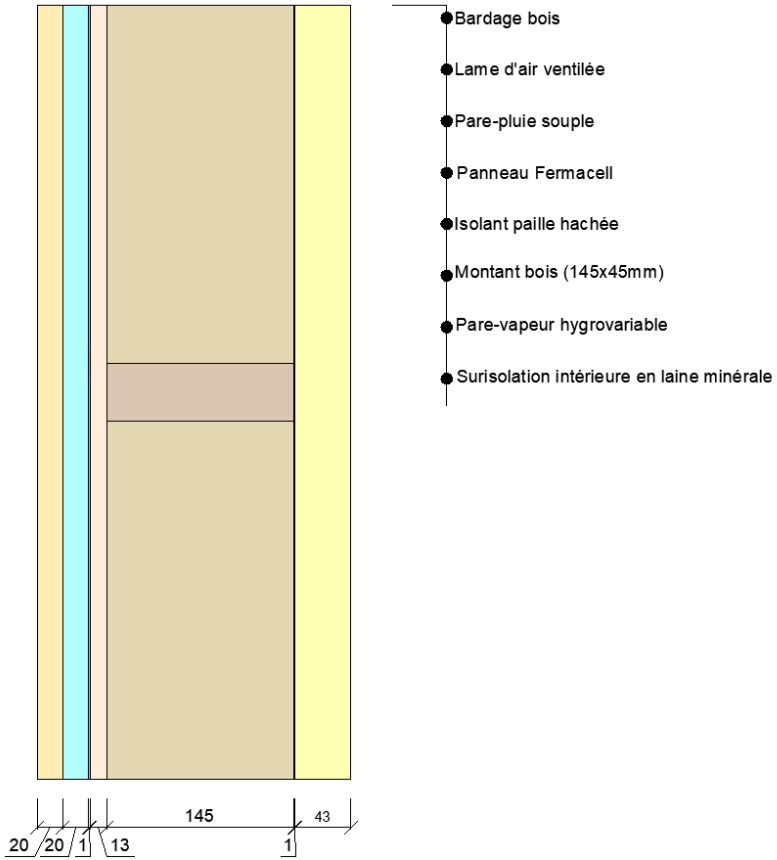
RAPPORT D'EXPERTISE

N°	Schéma	Surisolation intérieure	Climat extérieur	Dimension	Spécificité
1 ter	**COB bardage ventilé avec panneau bois côté intérieur & extérieur :** De l'extérieur vers l'intérieur ● Bardage bois ● Lame d'air ventilée ● Pare-pluie fibre de bois rigide ● Isolant paille hachée ● Montant bois (145x45mm) ● Panneau OSB 		H1	1D	Panneau OSB avec Sd = 3 m
2 ter			Montagne	1D	
3 ter		PSE	H1	1D	
4 ter		Laine minérale	H1	1D	
5 ter		Laine minérale	H1	**2D**	

N°	Schéma	Surisolation intérieure	Climat extérieur	Dimension	Spécificité
6	COB bardage ventilé avec PV intérieur et panneau extérieur : De l'extérieur vers l'intérieur Bardage bois Lame d'air ventilée Pare-pluie souple Panneau OSB Isolant paille hachée Montant bois (145x45mm) Pare-vapeur Sd=18m 145 20 20 1 12 1		H1	1D	
7			Montagne	1D	
8		Le plus défavorable	Le plus défavorable	**2D**	

N°	Schéma	Surisolation intérieure	Climat extérieur	Dimension	Spécificité
9	**COB enduit extérieur sur isolant support :** De l'extérieur vers l'intérieur ● Enduit extérieur "étanche" type SOLIDEO ● Isolant laine de bois support d'enduit ● Panneau OSB ● Isolant paille hachée ● Montant bois (145x45mm) ● Pare-vapeur Sd=90m 		H1	1D	
10			H2	1D	
11			H3	1D	
12			Montagne	1D	
13		Laine minérale	Le plus défavorable	1D	
14		Le plus défavorable	Le plus défavorable	**2D**	

N°	Schéma	Surisolation intérieure	Climat extérieur	Dimension	Spécificité
15	**COB bardage ventilé avec PV hygrovariable côté intérieur et panneau extérieur :** De l'extérieur vers l'intérieur  		H1	1D	
16			H3	1D	
17			Montagne	1D	
18		Laine minérale	Le plus défavorable	1D	
19		Le plus défavorable	Le plus défavorable	**2D**	

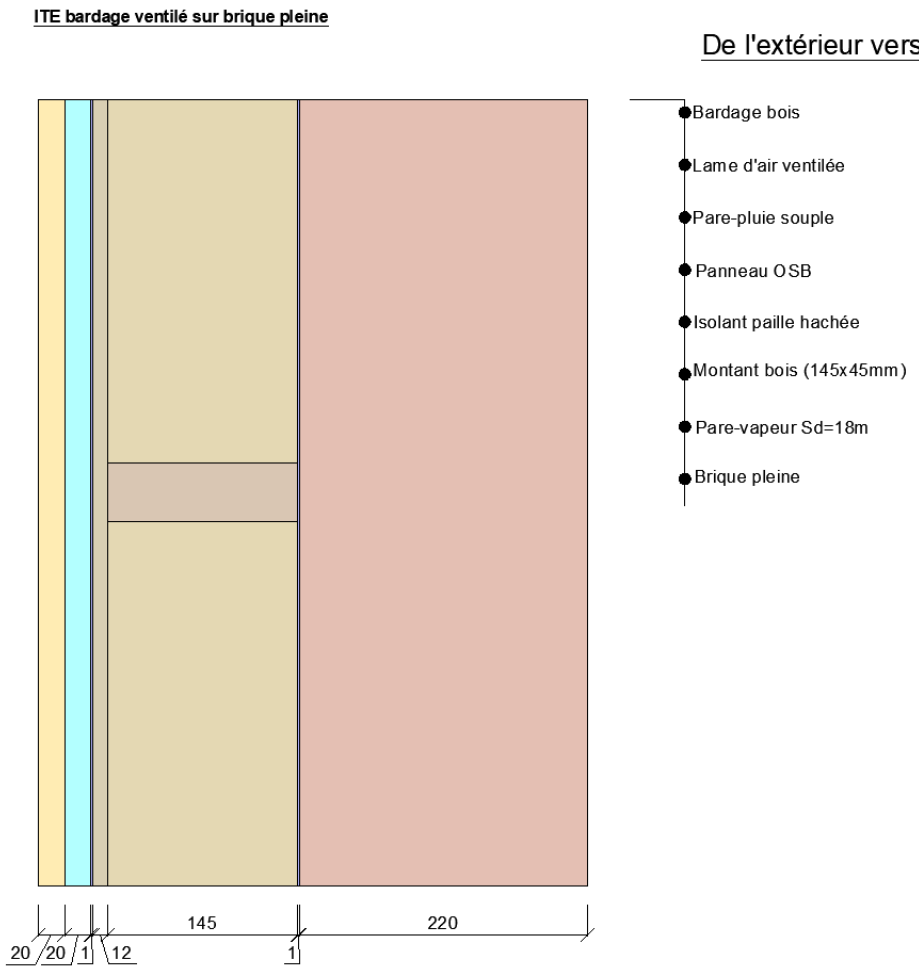
N°	Schéma	Surisolation intérieure	Climat extérieur	Dimension	Spécificité
18 bis	**COB bardage ventilé avec PV hygrovariable côté intérieur et Fermacell extérieur :** De l'extérieur vers l'intérieur 	Laine minérale	Montagne	1D	Remplacement panneau extérieur par un *Fermacell*

N°	Schéma	Surisolation intérieure	Climat extérieur	Dimension	Spécificité
20	**ITE bardage ventilé sur béton banché** De l'extérieur vers l'intérieur Bardage bois Lame d'air ventilée Pare-pluie souple Panneau OSB Isolant paille hachée Montant bois (145x45mm) Béton banché 20 20 1 12 145 200		H1	1D	
21			H3	1D	
22			Montagne	1D	
23		Le plus défavorable	Le plus défavorable	**2D**	

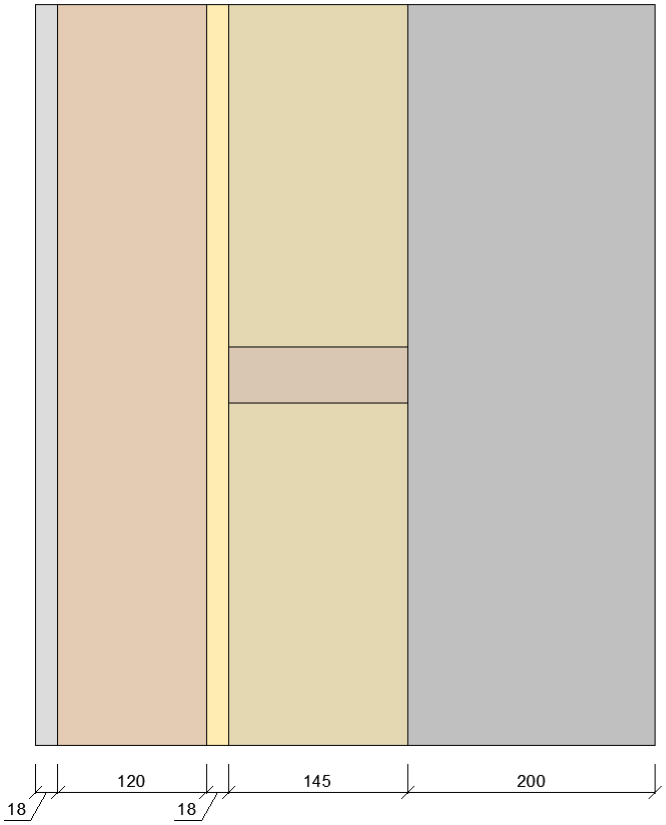
RAPPORT D'EXPERTISE

N°	Schéma	Surisolation intérieure	Climat extérieur	Dimension	Spécificité
24	**ITE bardage ventilé sur brique pleine** De l'extérieur vers l'intérieur Bardage bois Lame d'air ventilée Pare-pluie souple Panneau OSB Isolant paille hachée Montant bois (145x45mm) Brique pleine 20 20 1 145 220 12		H1	1D	
25			Montagne	1D	
26		Le plus défavorable	Le plus défavorable	**2D**	

RAPPORT D'EXPERTISE

N°	Schéma	Surisolation intérieure	Climat extérieur	Dimension	Spécificité
24 bis			H1	1D	Ajout d'une membrane pare-vapeur Sd=18m entre la paille et la structure

RAPPORT D'EXPERTISE

N°	Schéma	Surisolation intérieure	Climat extérieur	Dimension	Spécificité
27	**ETICS sur béton banché** De l'extérieur vers l'intérieur Enduit extérieur "étanche" type SOLIDEO Isolant laine de bois support d'enduit Panneau OSB Isolant paille hachée Montant bois (145x45mm) Béton banché 		H1	1D	
28			H2	1D	
29			H3	1D	
30			Montagne	1D	
31		Le plus défavorable	Le plus défavorable	**2D**	

N°	Schéma	Surisolation intérieure	Climat extérieur	Dimension	Spécificité
32	**ETICS sur béton banché** De l'extérieur vers l'intérieur Enduit extérieur "étanche" type SOLIDEO Isolant laine de bois support d'enduit Panneau OSB Isolant paille hachée Montant bois (145x45mm) Brique pleine 18 / 120 / 18 / 145 / 220		H1	1D	
33			H2	1D	
34			Montagne	1D	
35		Le plus défavorable	Le plus défavorable	**2D**	
36	Menuiserie / Bardage bois ventilé / Souple / OSB 3 - 12 mm / Sd = 18m	Le plus défavorable	Le plus défavorable	**2D**	

N°	Schéma					Surisolation intérieure	Climat extérieur	Dimension	Spécificité
37	Acrotère	Le plus défavorable	Le plus défavorable	Le plus défavorable	Le plus défavorable	Le plus défavorable		**2D**	
38	Pied de façade							**2D**	

7. RESULTATS DES CALCULS

Le tableau ci-après regroupe l'ensemble des résultats obtenus pour la teneur en eau et l'humidité relative de la paroi globale, mais aussi des constituants principaux de cette paroi lors de la dernière année de calcul (valeur maximale).

La colonne « tendance » indique l'évolution de la teneur en eau entre les deux dernières années de modélisation. Cette dernière peut être en hausse, en baisse ou stable.

Tableau 3 : Synthèse des résultats des simulations suivant les cas de figure la dernière année de calcul

N°	Matériau ou interface sensible observée	Teneur en eau		Hum. relative	Tendance
		[kg.m^{-3}]	[%.-M]	[%]	[-]
1	Paroi globale	5.0	-	-	Stable
	Panneau OSB	61.6	9.8	57.7	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	53.1	8.4	52.1	Stable
	Paille	11.6	11.0	57.8	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	10.0	9.7	52.2	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-pluie rigide	16.9	16.0	76.1	Stable
	Pare-pluie rigide	38.6	14.9	79.5	Stable
1 ter	Paroi globale	5.1	-	-	Stable
	Panneau OSB	58.6	9.8	60.5	Stable
	Paille	11.9	11.3	59.1	Stable
	Paille à l'interface avec l'OSB	10.3	9.8	53.3	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau pare-pluie rigide	17.9	17.0	77.7	Stable
	Panneau pare-pluie rigide	39.9	15.4	80.8	Stable
	Panneau pare-pluie rigide à l'interface avec la paille	38.3	14.8	79.2	Stable
2	Paroi globale	4.8	-	-	Stable
	Pare-pluie rigide	36.8	14.2	77.4	Stable
	Panneau OSB	59.4	9.5	56.1	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	51.7	8.2	51.1	Stable
	Paille	11.4	10.8	57.0	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	9.4	9.0	50.1	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-pluie rigide	15.8	15.0	73.7	Stable
	Paroi globale	4.8	-	-	Stable

N°	Matériau ou interface sensible observée	Teneur en eau		Hum. relative	Tendance
		[kg.m^{-3}]	[%.-M]	[%]	[-]
2 ter	Panneau OSB	50.6	9.4	58.8	Stable
	Paille	11.8	11.2	58.7	Stable
	Paille à l'interface avec l'OSB	9.9	9.4	51 .7	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau pare-pluie rigide	16.8	16.0	76.0	Stable
	Panneau pare-pluie rigide	38.5	14.8	79.4	Stable
	Panneau pare-pluie rigide à l'interface avec la paille	37.0	14.3	77.7	Stable
3	Paroi globale	5.5	-	-	Stable
	Panneau OSB	60.4	9.6	57.0	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le PSE	66.2	10.5	60.8	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	58.8	9.4	55.9	Stable
	Paille	12.5	11.9	61.4	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	11.2	10.7	56.7	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-pluie rigide	17.3	16.5	76.9	Stable
	Pare-pluie rigide	38.5	14.8	79.4	Stable
3 ter	Paroi globale	5.4	-	-	Stable
	Panneau OSB	53.3	8.9	56.7	Stable
	Paille	12.7	12.1	62.0	Stable
	Paille à l'interface avec l'OSB	11.3	10.8	57.1	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau pare-pluie rigide	17.7	16.8	77.4	Stable
	Panneau pare-pluie rigide	38.9	15.0	79.8	Stable
	Panneau pare-pluie rigide à l'interface avec la paille	37.7	14.5	78.5	Stable
	PSE à l'interface avec l'OSB	0.8	3.9	62.0	Stable
4	Paroi globale	5.8	-	-	Stable
	Panneau OSB	75.6	12.0	66.6	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la laine minérale	89.1	14.2	75.1	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	64.2	10.2	59.5	Stable
	Paille	12.9	12.3	63.0	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	11.9	11.3	59.0	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-pluie rigide	18.2	17.3	78.3	Stable
	Pare-pluie rigide	39.6	15.3	80.6	Stable

N°	Matériau ou interface sensible observée	Teneur en eau		Hum. relative	Tendance
		[kg.m^{-3}]	[%.-M]	[%]	[-]
4 bis	Paroi globale	5.1	-	-	Stable
	Paille	13.3	12.6	64.4	Stable
	Paille à l'interface avec la membrane pare-vapeur	12.5	11.9	61.7	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-pluie rigide	21	20	82.8	Stable
	Pare-pluie rigide	37.5	14.4	78.3	Stable
4 ter	Paroi globale	5.7	-	-	Stable
	Panneau OSB	59.1	10.9	64.9	Stable
	Paille	14.1	13.1	65.7	Stable
	Paille à l'interface avec l'OSB	12.1	11.6	60.1	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau pare-pluie rigide	29.1	16.9	80.3	Stable
	Panneau pare-pluie rigide	40.8	15.7	81.8	Stable
	Panneau pare-pluie rigide à l'interface avec la paille	40.0	15.4	81.0	Stable
	Laine minérale à l'interface avec l'OSB	0.6	1.9	86.3	Stable
5	Paroi globale	20.3	-	-	Stable
	Panneau OSB	77.2	12.3	67.3	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la laine minérale	92.9	14.8	76.8	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	64.0	10.2	59.3	Stable
	Paille	12.9	12.3	63.0	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	11.9	11.3	59.1	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-pluie rigide	17.7	16.9	77.4	Stable
	Pare-pluie rigide	38.0	15.1	79.7	Stable
	Montant bois inter paille pare-pluie	66.0	15.0	71.0	Stable
5 ter	Paroi globale	20.3	-	-	Stable
	Panneau OSB	68.6	11.5	67.4	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la laine minérale	95.6	16.0	82.3	Stable
	Montant bois à l'interface avec l'OSB	61.1	13.9	67.5	Stable
	Montant bois à l'interface avec le panneau PP rigide	67.4	15.4	71.8	Stable
	Paille	13.6	12.9	65.3	Stable
	Paille à l'interface avec l'OSB et le montant bois	12.5	11.9	61.3	Stable
	Paille à l'interface avec le montant et le PP rigide	16.6	15.8	75.5	Stable

N°	Matériau ou interface sensible observée	Teneur en eau		Hum. relative	Tendance
		[kg.m^{-3}]	[%.-M]	[%]	[-]
	Panneau pare-pluie rigide	40.1	15.4	81.0	Stable
6	Paroi globale	5.0	-	-	Stable
	Panneau OSB	95.2	15.1	79.1	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	90.9	14.5	77.3	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	101.3	16.1	81.4	Stable
	Paille	11.9	11.3	59.2	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	23.6	22.5	86.1	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	11.0	10.3	55.7	Stable
7	Paroi globale	4.9	-	-	Stable
	Panneau OSB	97.9	15.6	79.1	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	87.9	14.0	75.3	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	111.2	17.7	83.6	Stable
	Paille	11.6	11.1	58.2	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	27.3	26.0 < 2 semaines	89.2	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	9.9	9.5	51.8	Stable
8	Paroi globale	21.3	-	-	Stable
	Panneau OSB	93.4	14.9	77.9	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la pare-pluie	87.9	14.0	75.3	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	99.2	15.8	80.4	Stable
	Paille	12.3	11.7	60.6	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	22.7	21.7	85.1	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	10.8	10.3	55.2	Stable
	Montant bois inter paille pare-pluie	78.8	16.1	74.0	Stable
9	Paroi globale	7.1	-	-	Baisse
	Panneau OSB	71.2	11.3	64.2	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec la laine de bois	75.7	12.1	67.2	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	76.4	12.2	67.6	Baisse
	Paille	11.2	10.6	56.5	Baisse
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	15.5	14.8	72.5	Baisse
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	10.5	10.0	54.2	Baisse

N°	Matériau ou interface sensible observée	Teneur en eau		Hum. relative	Tendance
		[kg.m^{-3}]	[%.-M]	[%]	[-]
	Laine de bois support	19.1	13.7	75.7	Baisse
10	Paroi globale	8.9	-	-	Stable
	Panneau OSB	85.0	13.5	73.4	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la laine de bois	88.0	14.0	75.4	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	88.5	14.1	75.7	Stable
	Paille	13.3	12.7	64.3	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	18.2	17.3	78.3	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	12.0	11.4	59.5	Stable
	Laine de bois support	23.2	16.6	84.0	Stable
11	Paroi globale	7.9	-	-	Stable
	Panneau OSB	79.0	12.6	69.3	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la laine de bois	84.2	13.4	72.8	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	82.6	13.2	71.8	Stable
	Paille	13.6	13.0	65.5	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	16.2	15.4	75.0	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	14.1	13.5	67.5	Stable
	Laine de bois support	19.9	14.2	77.4	Stable
12	Paroi globale	6.9	-	-	Stable
	Panneau OSB	67.3	10.7	61.5	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la laine de bois	71.0	11.3	64.0	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	73.8	11.8	65.8	Stable
	Paille	10.1	9.6	52.5	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	15.0	14.3	70.6	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	9.2	8.8	48.9	Stable
	Laine de bois support	17.8	12.7	73.0	Baisse
13	Paroi globale	9.9	-	-	Baisse
	Panneau OSB	96.9	15.4	80.3	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec la laine de bois	101.2	16.1	91.4	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	100.5	16.0	81.3	Baisse
	Paille	16.1	15.4	74.0	Baisse

N°	Matériau ou interface sensible observée	Teneur en eau		Hum. relative	Tendance
		[kg.m^{-3}]	[%.-M]	[%]	[-]
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	21.1	20.1	82.9	Baisse
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	14.9	14.2	70.2	Baisse
	Laine de bois support à l'interface avec l'enduit	34.3	24.5 < 5 semaines	96.5	Stable
14	Paroi globale	23.1	-	-	Baisse
	Panneau OSB	93.8	14.9	79.0	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec la laine de bois	97.4	15.5	80.5	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	96.9	15.4	80.3	Baisse
	Paille	15.7	15.0	72.9	Baisse
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	20.3	19.3	81.7	Baisse
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	14.6	13.9	69.2	Baisse
	Laine de bois support	24.4	17.5	86.3	Baisse
	Montant bois inter paille pare-pluie	76.2	17.3	77.5	Baisse
15	Paroi globale	5.2	-	-	Stable
	Panneau OSB	101.8	16.2	90.9	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	92.4	14.7	78.2	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	114.0	18.2	84.2	Stable
	Paille	12.8	12.2	62.6	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	27.5	26.2 < 2 semaines	89.4	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	11.8	11.2	58.7	Stable
16	Paroi globale	4.7	-	-	Stable
	Panneau OSB	82.4	13.1	71.7	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	77.8	12.4	68.6	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	88.7	14.1	75.8	Stable
	Paille	13.0	12.3	63.1	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	19.0	18.1	79.5	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	14.2	13.5	67.8	Stable
17	Paroi globale	5.1	-	-	Stable
	Panneau OSB	105.7	16.9	81.3	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	90.0	14.3	76.7	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	125.6	20.0	86.8	Stable

N°	Matériau ou interface sensible observée	Teneur en eau		Hum. relative	Tendance
		[kg.m^{-3}]	[%.-M]	[%]	[-]
	Paille	12.7	12.1	62.2	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	31.7	30.3	92.8	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	10.9	10.4	55.3	Stable
18	Paroi globale	5.9	-	-	Stable
	Panneau OSB	118.3	18.8	84.6	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	97.3	15.5	79.8	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	140.3	22.3 >17s.en continu	89.8	Stable
	Paille	16.1	15.3	73.2	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	37.8	36.0	95.6	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	13.9	13.2	66.4	Stable
	Laine minérale	0.5	1.4	79.4	Stable
18 bis	Paroi globale	4.2	-	-	Stable
	Panneau *Fermacell*	19.2	1.7	86.5	Stable
	Panneau *Fermacell* à l'interface avec le pare-pluie	18.7	1.6	85.6	Stable
	Panneau *Fermacell* à l'interface avec la paille	19.8	1.7	87.7	Stable
	Paille	13.1	12.5	63.7	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau *Fermacell*	25.3	24.1 Traces	87.5	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	10.8	10.3	55.4	Stable
	Laine minérale	0.4	1.4	79.1	Stable
19	Paroi globale	24.4	-	-	Stable
	Panneau OSB	113.1	18.0	83.4	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la pare-pluie	94.4	15.0	78.7	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	131.3	21.9 >9s.en continu	87.9	Stable
	Paille	15.7	14.9	72.0	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	33.5	31.9	94.0	Stable
	Paille à l'interface avec le pare-vapeur	13.6	12.9	65.4	Stable
	Montant bois inter paille pare-pluie	88.0	20.0	84.0	Stable
20	Paroi globale	14.7	-	-	Baisse
	Panneau OSB	96.9	15.4	79.5	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	91.1	14.5	77.4	Baisse

N°	Matériau ou interface sensible observée	Teneur en eau		Hum. relative	Tendance
		[kg.m^{-3}]	[%.-M]	[%]	[-]
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	105	16.7	82.2	Baisse
	Paille	11.9	11.3	59.2	Baisse
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	23.8	22.8	86.2	Baisse
	Paille à l'interface avec la structure	10.9	10.4	55.6	Baisse
	Structure	49.3	-	-	Baisse
21	Paroi globale	14.8	-	-	Baisse
	Panneau OSB	81.8	13	71.2	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	76.5	12.1	67.6	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	87.9	14	75.3	Baisse
	Paille	12	11.4	59.5	Baisse
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	18.7	17.8	79.1	Baisse
	Paille à l'interface avec la structure	13	12.3	63.4	Baisse
	Structure	53.1	-	-	Baisse
22	Paroi globale	13.7	-	-	Baisse
	Panneau OSB	98.2	15.6	79.1	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	87.9	14	75.3	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	111.3	17.7	83.6	Baisse
	Paille	11.3	10.7	56.9	Baisse
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	26.3	24.9 1s en continu	88.3	Baisse
	Paille à l'interface avec la structure	9.6	9.1	50.7	Baisse
	Structure	46.5	-	-	Baisse
23	Paroi globale	38.2	-	-	Baisse
	Panneau OSB	96.2	15.3	78.6	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	89.5	14.2	76.4	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	109	17.3	83.1	Baisse
	Paille	12.6	12	62	Baisse
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	25.7	24.5 Traces	87.8	Baisse
	Paille à l'interface avec la structure et le montant bois	11.4	10.9	57.5	Baisse
	Montant bois	54.5	12.4	61.1	Baisse
	Montant bois à l'interface avec le panneau OSB	72	16.4	74.8	Baisse

N°	Matériau ou interface sensible observée	Teneur en eau		Hum. relative	Tendance
		[kg.m^{-3}]	[%.-M]	[%]	[-]
	Structure	56.5	-	-	Baisse
24	Paroi globale	6.2	-	-	Stable
	Panneau OSB	107.3	17.4	82.2	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	93.3	14.8	78.8	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	122.8	19.5	86.2	Stable
	Paille	14	13.3	66.8	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	29.2	28 >10s en continu	90.8	Stable
	Paille à l'interface avec la structure	12.7	12.1	62.4	Stable
	Structure	4.8	-	-	Stable
24 bis	Paroi globale	5.9	-	-	Stable
	Panneau OSB	92.6	14.7	78.2	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	90.4	14.4	76.9	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	96.6	15.3	79.9	Stable
	Paille	11.8	11.2	58.9	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	21.2	20.2	83.1	Stable
	Paille à l'interface avec la membrane pare-vapeur	11.2	10.7	56.9	Stable
	Structure	4.9	-	-	Stable
25	Paroi globale	6.2	-	-	Stable
	Panneau OSB	117.2	18.6	84.1	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	94.1	15	78.7	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	142.9	22.7 >14s en continu	90.3	Stable
	Paille	14.4	13.8	68.4	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	37.5	35.9	95.2	Stable
	Paille à l'interface avec la structure	12.5	11.9	61.4	Stable
	Structure	4.8	-	-	Stable
26	Paroi globale	15.9	-	-	Stable
	Panneau OSB	113.3	18	83.4	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie	95.3	15.1	79.1	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	139.4	22.1	89.6	Stable
	Paille	16.2	15.5	73.8	Stable

N°	Matériau ou interface sensible observée	Teneur en eau		Hum. relative	Tendance
		[kg.m^{-3}]	[%.-M]	[%]	[-]
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	35.6	33.9	95	Stable
	Paille à l'interface avec la structure et le montant bois	14.2	13.5	67.8	Stable
	Montant bois	67	15.2	71.5	Stable
	Montant bois à l'interface avec le panneau OSB	86.5	19.7	83.3	Stable
	Structure	5.2	-	-	Stable
27	Paroi globale	17.7	-	-	Baisse
	Fibre de bois support d'enduit	19.3	13.8	76.2	Baisse
	Fibre de bois à l'interface avec l'enduit	27.7	19.9	92.2	Baisse
	Fibre de bois à l'interface avec le panneau OSB	17.5	12.5	72.4	Baisse
	Panneau OSB	76.3	12.1	67.5	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec la fibre de bois	79.7	12.6	69.8	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	87.2	13.8	74.8	Baisse
	Paille	12.2	11.6	60.3	Baisse
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	18.5	17.6	78.7	Baisse
	Paille à l'interface avec la structure	11.3	10.8	57.1	Baisse
	Structure	52	-	-	Baisse
28	Paroi globale	19.6	-	-	Baisse
	Fibre de bois support d'enduit	22.8	16.3	83.3	Stable
	Fibre de bois à l'interface avec l'enduit	33.4	23.9 Traces	96.1	Stable
	Fibre de bois à l'interface avec le panneau OSB	19.9	14.2	77.5	Stable
	Panneau OSB	85.8	13.6	73.9	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec la fibre de bois	87.6	13.9	75.1	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	91.9	14.6	77.9	Baisse
	Paille	13.6	12.9	65.6	Baisse
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	19.2	18.4	80	Baisse
	Paille à l'interface avec la structure	12	11.4	59.4	Baisse
	Structure	53.7	-	-	Baisse
29	Paroi globale	19	-	-	Baisse
	Fibre de bois support d'enduit	19.7	14.1	77.1	Baisse
	Fibre de bois à l'interface avec l'enduit	26.8	19.2	90.8	Stable

N°	Matériau ou interface sensible observée	Teneur en eau		Hum. relative	Tendance
		[kg.m^{-3}]	[%.-M]	[%]	[-]
	Fibre de bois à l'interface avec le panneau OSB	19.4	13.8	76.5	Stable
	Panneau OSB	81.4	12.9	70.9	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec la fibre de bois	86.2	13.7	74.1	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	88	14	75.4	Baisse
	Paille	13.7	13.1	66.1	Baisse
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	17.9	17.1	77.8	Baisse
	Paille à l'interface avec la structure	14.3	13.6	67.9	Baisse
	Structure	56.8	-	-	Baisse
30	Paroi globale	16.9	-	-	Baisse
	Fibre de bois support d'enduit	18.1	12.9	73.8	Baisse
	Fibre de bois à l'interface avec l'enduit	28.2	20.2	92.7	Baisse
	Fibre de bois à l'interface avec le panneau OSB	16.2	11.6	69.6	Baisse
	Panneau OSB	73.2	11.6	65.5	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec la fibre de bois	75.4	12	66.9	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	86.7	13.8	74.4	Baisse
	Paille	11.4	10.8	57.1	Baisse
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	18.3	17.4	78.4	Baisse
	Paille à l'interface avec la structure	10	9.5	52.2	Baisse
	Structure	49.1	-	-	Baisse
31	Paroi globale	38.7	-	-	Baisse
	Isolant fibre de bois	24.6	17.6	86.8	Stable
	Fibre de bois à l'interface avec l'enduit	32.6	23.3 Traces	95.6	Stable
	Panneau OSB	98	15.6	80.5	Baisse
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	110.3	17.5	83.4	Baisse
	Paille	16.8	16	75.5	Baisse
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	22.8	21.7	85.4	Baisse
	Montant bois	71.9	16.3	74.7	Baisse
	Montant bois à l'interface avec le panneau OSB	80	18.2	79.9	Baisse
	Structure	68.8	-	-	Baisse
32	Paroi globale	8.4	-	-	Stable

N°	Matériau ou interface sensible observée	Teneur en eau		Hum. relative	Tendance
		[kg.m^{-3}]	[%.-M]	[%]	[-]
	Fibre de bois support d'enduit	19.5	13.9	76.6	Stable
	Fibre de bois à l'interface avec l'enduit	27.7	19.8	92.3	Stable
	Fibre de bois à l'interface avec le panneau OSB	17.8	12.7	73.2	Stable
	Panneau OSB	78.5	12.5	69	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la fibre de bois	81.1	12.9	70.7	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	89.4	14.2	76.3	Stable
	Paille	12.8	12.1	62.4	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	19.4	18.7	90.3	Stable
	Paille à l'interface avec la structure	11.8	11.2	58.8	Stable
	Structure	4.9	-	-	Stable
33	Paroi globale	9.9	-	-	Stable
	Fibre de bois support d'enduit	22.9	16.4	83.5	Stable
	Fibre de bois à l'interface avec l'enduit	33.3	23.8 Traces	96	Stable
	Fibre de bois à l'interface avec le panneau OSB	20	14.3	77.9	Stable
	Panneau OSB	85.7	13.6	73.8	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la fibre de bois	88	14	75.3	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	91.3	14.5	77.5	Stable
	Paille	13.6	12.9	65.4	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	19	18.2	79.5	Stable
	Paille à l'interface avec la structure	11.9	11.3	59.1	Stable
	Structure	4.9	-	-	Stable
34	Paroi globale	8.4	-	-	Stable
	Fibre de bois support d'enduit	18.6	13.3	74.9	Stable
	Fibre de bois à l'interface avec l'enduit	28.6	20.4	93.1	Stable
	Fibre de bois à l'interface avec le panneau OSB	16.9	12.1	71.2	Stable
	Panneau OSB	78.8	12.5	69	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la fibre de bois	78.5	12.5	69	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	94.5	15	78.8	Stable
	Paille	12.8	12.2	62.5	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	21	20	82.8	Stable

N°	Matériau ou interface sensible observée	Teneur en eau		Hum. relative	Tendance
		[kg.m^{-3}]	[%.-M]	[%]	[-]
	Paille à l'interface avec la structure	11.4	10.8	57.3	Stable
	Structure	4.8	-	-	Stable
35	Paroi globale	16.1	-	-	Stable
	Fibre de bois support d'enduit	19.4	13.6	76.6	Stable
	Fibre de bois à l'interface avec l'enduit	27.7	19.6	92.2	Stable
	Panneau OSB	85.1	13.5	73.4	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec la paille	102.9	16.3	81.5	Stable
	Paille	15	14.3	70.5	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB	22.9	21.8	85.4	Stable
	Montant bois	66.3	14.4	69.1	Stable
	Montant bois à l'interface avec le panneau OSB	72.9	16.6	75.3	Stable
	Structure	5.3	-	-	Stable
36	Paroi globale	29.1	-	-	Baisse
	Panneau OSB extérieur	89.7	14.2	76.3	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie, le montant et la bavette	88.6	14.1	75.7	Stable
	Montant bois	71.8	16.3	74.6	Baisse
	Montant bois à l'interface avec l'isolant	79.7	18.1	79.7	Baisse
	Montant bois à l'interface avec la bavette et l'OSB	70.7	16.1	74	Baisse
	Paille	12.6	12	61.7	Baisse
	Paille à l'interface avec le panneau OSB et montant bois	21.4	20.4	83.5	Baisse
	OSB à l'interface avec la bavette	86	13.7	74	Baisse
37	Paroi globale	51.3	-	-	Hausse
	Panneau OSB extérieur	106.9	17	82	Stable
	Panneau OSB extérieur (partie basse)	93.3	14.8	78.6	Stable
	Linteau bois	68.6	15.6	72.6	Baisse
	Linteau à l'interface avec le panneau OSB extérieur et la barrière d'étanchéité	70.2	16	73.6	Baisse
	Linteau à l'interface avec le panneau OSB intérieur et la barrière d'étanchéité	72.2	16.4	74.9	Baisse
	Paille	12.1	11.6	60.2	Stable
	Paille à l'interface avec le panneau OSB extérieur et le linteau	20.9	19.9	82.6	Stable
38	Paroi globale	28.8	-	-	Baisse

N°	Matériau ou interface sensible observée	Teneur en eau		Hum. relative	Tendance
		[kg.m^{-3}]	[%.-M]	[%]	[-]
	Paille (zone acrotère)	15.2	14.5	71.5	Stable
	Paille à l'interface avec le montant bois et le panneau OSB (zone acrotère)	15.9	15.2	74.2	Stable
	Panneau OSB à l'interface avec le pare-pluie et la couvertine métallique	80.2	12.7	70.1	Stable
	Paille à l'interface avec la dalle béton	12.6	12	61.7	Stable
	Paille à l'interface avec l'isolant toiture plate	15	14.3	70.7	Stable

Typologie	**COB – Sans PV / pare-pluie rigide**						**COB – Contreventement ext / PV18m**		
Cas	1	2	3	4	4 bis	5	6	7	8
Scénario	HR85	HR85	HR85	HR85	HR85	HR85	HR85	**HR95**	HR85

Typologie	**COB – Contreventement ext / PV90m / ETICS**					
Cas	9	10	11	12	13	14
Scénario	HR85	HR85	HR85	HR85	HR85	HR85

Typologie	**COB – Contreventement ext / PV90m / ETICS**					
Cas	15	16	17	18	18 bis	19
Scénario	**HR95**	HR85	**HR95**	**HR95**	**HR95**	**HR95**

Typologie	**Béton banché - ITE**				**Brique pleine - ITE**			
Cas	20	21	22	23	24	24 bis	25	26
Scénario	HR85	HR85	**HR95**	**HR95**	**HR95**	HR85	**HR95**	**HR95**

Typologie	**Béton banché - ETICS**					**Brique pleine - ETICS**			
Cas	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Scénario	HR85	HR85	HR85	HR85	HR85	HR85	HR85	HR85	HR85

8. CONCLUSION

Pour rappel, cette étude vise à apprécier le comportement d'un isolant en paille hachée disposé en ITE en France métropolitaine dans le cadre d'une demande d'ATEx de cas A. Pour ce faire, les typologies suivantes ont été retenues :

- Cas 1 à 5 : Construction à Ossature Bois (COB) **sans pare-vapeur** avec contreventement intérieur, pare-pluie rigide et bardage ventilé ;
- Cas 4 bis : reprise du cas 4 avec contreventement intérieur ***Fermacell*** et pare-vapeur Sd=18m. Augmentation artificielle du **Sd du pare-pluie rigide à 3.6 m** (en adéquation avec la règle du Facteur 5) ;
- Cas 1 ter à 5 ter : reprise des cas 1 à 5 avec un remplacement du panneau OSB (Sd_{sec}=8m) par un autre panneau OSB moins résistant à la diffusion de vapeur d'eau (Sd_{sec}=3m).
- Cas 6 à 8 : COB avec **pare-vapeur Sd=18 m**, contreventement extérieur, pare-pluie souple et bardage ventilé ;
- Cas 9 à 14 : COB avec **pare-vapeur Sd=90 m**, contreventement extérieur et ETICS enduit étanche sur fibre de bois ;
- Cas 15 à 19 : COB avec **membrane hygrovariable**, contreventement extérieur, pare-pluie souple et bardage ventilé ;
- Cas 18 bis : reprise du cas 18 avec remplacement du panneau OSB extérieur par un **panneau *Fermacell*** ;
- Cas 20 à 23 : structure en béton banché **sans pare-vapeur** avec ITE paille hachée dans caisson fermé avec un panneau OSB extérieur, bardage ventilé ;
- Cas 24 à 26 : structure en brique pleine **sans pare-vapeur** avec ITE paille hachée dans caisson fermé avec un panneau OSB extérieur, bardage ventilé ;
- Cas 24 bis : reprise du cas 24 avec ajout d'une membrane **pare-vapeur Sd=18 m** entre la structure et l'isolant en paille hachée ;
- Cas 27 à 31 : structure en béton banché **sans pare-vapeur** avec ITE paille hachée dans caisson fermé avec un panneau OSB extérieur, surisolation ETICS enduit étanche sur fibre de bois ;
- Cas 32 à 35 : structure en brique pleine **sans pare-vapeur** avec ITE paille hachée dans caisson fermé avec un panneau OSB extérieur, surisolation ETICS enduit étanche sur fibre de bois ;
- Les cas 36, 37 et 38 correspondent aux détails de menuiserie, FOB sur relevé béton et acrotère.

A cela s'ajoute une variation des climats extérieurs afin de représenter le climat de France métropolitaine dans sa globalité, à savoir Nancy (plaine continentale sévère, H1), Brest (climat océanique à forte pluviométrie, H2), Nice (climat méditerranéen, H3) et La Chaux-de-Fonds (climat de montagne, jusqu'à 1100m).

Concernant le climat intérieur, le choix s'est porté sur un climat d'habitation classique avec une classe d'hygrométrie moyenne ($2.5 < W/n \leq 5$ g/m³) avec l'ajout d'une climatisation avec $T_{consigne\ max}$ = 24°C pour le climat de Nice afin d'accentuer l'inversion des transferts de vapeur durant la période estivale.

Enfin toutes les modélisations effectuées avec un complément d'isolation intérieure respectent la règle des 2/3 – 1/3 en climat de plaine et de 3/4 – 1/4 en climat de montagne.

Les propriétés hygrothermiques de l'isolant en paille hachée ont été fournies par le demandeur. Il est à noter que l'isotherme de sorption a été réalisé via la méthode DVS (*Dynamic Vapor Sorption*) par le demandeur et que le coefficient de capillarité par immersion partielle A_w (cf. NF EN ISO 15148) a été approximé pour cette étude hygrothermique.

Concernant les autres matériaux, des hypothèses défavorables ont été aussi formulées afin d'englober un maximum de configuration.

Dans le cas des structures COB, le contreventement OSB a été délibérément positionné du côté le plus défavorable (côté extérieur), faisant alors une barrière à la vapeur d'eau non au point froid de la paroi. Toujours concernant le panneau OSB, ce dernier a été pris sciemment très résistant à la diffusion de vapeur d'eau (μ_{sec} = 650 & μ_{hum} = 172). Des configurations complémentaires avec un panneau OSB plus perméable à la vapeur d'eau (μ_{sec} = 267 & μ_{hum} = 127) ont été étudiées (cas 1ter à 5 ter).

À propos des typologies lourdes, le choix s'est porté sur le béton banché (mélange E/C=0.5) et une brique pleine, ancienne et capillaire. Ce choix se veut le plus diamétralement opposé et permet d'englober un maximum de typologies lourdes.

Les caractéristiques du béton font que ce dernier est très résistant à la diffusion de vapeur d'eau (μ = 180), il est très conducteur thermiquement parlant, il est massif et hygroscopique. De ce fait, il désorbe beaucoup d'humidité en début de modélisation.

Les propriétés de la brique sont différentes. Le matériau est bien plus perméable à la vapeur d'eau (μ_{sec} = 13), elle est moins conductrice thermiquement parlant que le béton banché, elle est moins massive et plus hygroscopique. De ce fait, le matériau laisse très fortement passer la vapeur d'eau.

Pour finir, toutes les parois comportant une structure lourde sont dénuées de pare-vapeur (hors cas 24 bis).

Cas 1 à 19

L'analyse se base sur trois critères (détaillés en annexe 1) :

- Le premier critère concerne l'absence d'accumulation d'eau. Son respect prouve que la paroi a la capacité de sécher correctement et de rester hygrothermiquement stable dans le temps.
- Le second est le risque de condensation. La paroi ne doit pas contenir un élément dont l'humidité relative est supérieure à 98 % pour le satisfaire, même localement.
- Le troisième est la pérennité des matériaux structurels et l'absence de développement fongique dans les matériaux biosourcés. Pour le satisfaire la paroi ne doit pas contenir un matériau biosourcé dont la teneur en eau dépasse 23 % en masse pendant huit semaines de l'année, même en des endroits particuliers de la paroi. Ce critère est abaissé à 20 % en masse pour les éléments jouant un rôle structurel (montant bois, panneau de contreventement OSB). Pour les matériaux à base de bois (montants, tasseaux, OSB), on ne doit jamais dépasser 30 % en masse même ponctuellement.

Pour les configurations des cas 1 à 16, les critères d'évaluation de l'absence de risques liés à l'humidité sont respectés.

En revanche, les cas 17 à 19 ne sont pas conformes. La teneur en eau dans la paille à l'interface avec le panneau OSB dépasse effectivement les 30 % en masse (limite maximale admissible). De plus, le panneau de contreventement OSB des cas 18 et 19 excède également les 20 % en masse pendant plus de 8 semaines cumulés par an, en ne comptabilisant que les périodes supérieures à une semaine.

Le cas 4 bis, reprenant globalement le cas 4 avec quelques variations (voir page 38) permet de démontrer que dans le cadre d'un emploi du complexe respectant scrupuleusement la règle du facteur 5 (Sd de la membrane intérieure 5 fois plus élevée que le Sd du parement extérieur) via un pare-pluie rigide ayant artificiellement un Sd accentué à 3.6 m, aucun problème hygrothermique n'apparait, respectant alors les règles mentionnées auparavant.

Pour les cas 1 ter à 5 ter, la réduction de la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau du panneau OSB (Sd_{sec}=3m) entraine un changement de comportement en particulier. En effet, ce changement entraine une circulation de la vapeur d'eau facilitée et donc une légère augmentation de cette dernière dans les parois modélisées. Cependant, ce gap reste minime (au maximum +1.2 %. -M entre le cas 5 et 5 ter) et ne représente pas de danger pour l'intégrité de la paroi.

Le cas 18 bis permet quant à lui d'étudier le couplage d'une membrane hygrovariable avec un panneau de contreventement extérieur disposant d'un Sd plus faible, ici un panneau *Fermacell*, le tout en zone montagne (le plus défavorable).

Ainsi, tel que stipulé dans le DTU 31.4, le Sd le plus faible de la membrane hygrovariable (ici 0.3 m dans le cadre de la membrane *Proclima Intello*®, cf. BDD WUFI®) doit être à minima 5 fois plus élevé que le Sd le plus fort du parement extérieur (soit 0.06 m). Etant donné qu'une telle valeur est difficilement accessible, un contreventement extérieur à l'aide d'une plaque *Fermacell* a été choisi (Sd assez faible, égal à 0.192 m). Ici alors, uniquement un facteur 1.6 est respecté. Cependant, l'étude des résultats montre que la paroi, auparavant dépassant les critères d'acceptation des résultats, est maintenant acceptable au regard de ces mêmes indicateurs. On peut néanmoins noter un dépassement de la limite de 23 % en masse dans la paille à l'interface avec le panneau *Fermacell* mais sur une durée assez courte pour que cela reste viable.

Cas 20 à 35

Les cas 20 à 35 concernent l'utilisation de l'isolation en paille hachée insufflée en ITE, le tout couplé avec une structure lourde en béton banché ou en brique pleine.

Dans l'ensemble, aucun risque hygrothermique ne semble apparaitre pour les cas disposant d'une structure en béton banché. En effet, de par les propriétés intrinsèques du matériau, ce dernier joue un rôle de régulation de la vapeur d'eau et ainsi, limite toute accumulation aux interfaces sensibles.

Cependant, ces conclusions ne peuvent être extrapolées aux cas disposant de brique pleine. Le matériau en question est plus capillaire que le béton mais dispose surtout d'un coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ bien moins élevé que le béton, laissant ainsi plus passer la vapeur d'eau.

Cela entraine alors un non-respect des règles de viabilité décrites dans l'annexe 1 pour les cas 24 à 26 (ITE sous bardage) avec un dépassement des teneurs en eau critiques dans l'isolant ainsi que dans le panneau OSB.

Néanmoins, l'isolation en paille hachée reste possible sur une structure en brique, comme le montre les cas 32 à 35. En effet, l'ajout d'une surisolation après la paille permet de décaler le point froid de la paroi et ainsi éviter le risque hygrothermique.

Concernant le cas 24 bis, est ici étudié l'installation d'une membrane pare-vapeur Sd=18m entre la structure en brique pleine et l'isolant en paille hachée. Le positionnement de la membrane au niveau de cette interface permet alors de faciliter sa pose dans le cadre de projets de rénovation.

Cette même membrane permet ainsi de bloquer le flux de vapeur venant de l'intérieur et qui s'accumulait auparavant dans l'isolant ainsi que dans le panneau OSB. Avec la membrane, le flux de vapeur d'eau est ainsi régulé et de ce fait, la paroi est maintenant viable au regard des indicateurs de l'annexe 1.

Cas 36 à 38

Les cas suivants concernent les points singuliers de l'installation.

Pour ces trois cas, les zones les plus défavorables ont été analysées et les valeurs de teneur en eau respectent en tout point les règles d'interprétation des résultats, montrant alors la résilience du procédé pour ces détails étudiés.

FIN DE RAPPORT

ANNEXES

ANNEXE 1 : REGLES D'INTERPRETATION DES RESULTATS

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 (e.g. développement des moisissures ou des algues, la pourriture, la corrosion, etc.).

Les risques sont évalués à partir des teneurs en eau et humidités relatives des produits et de leurs évolutions au cours de la dernière année de simulation.

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 de la durée de la simulation et conduire à des condensations importantes.

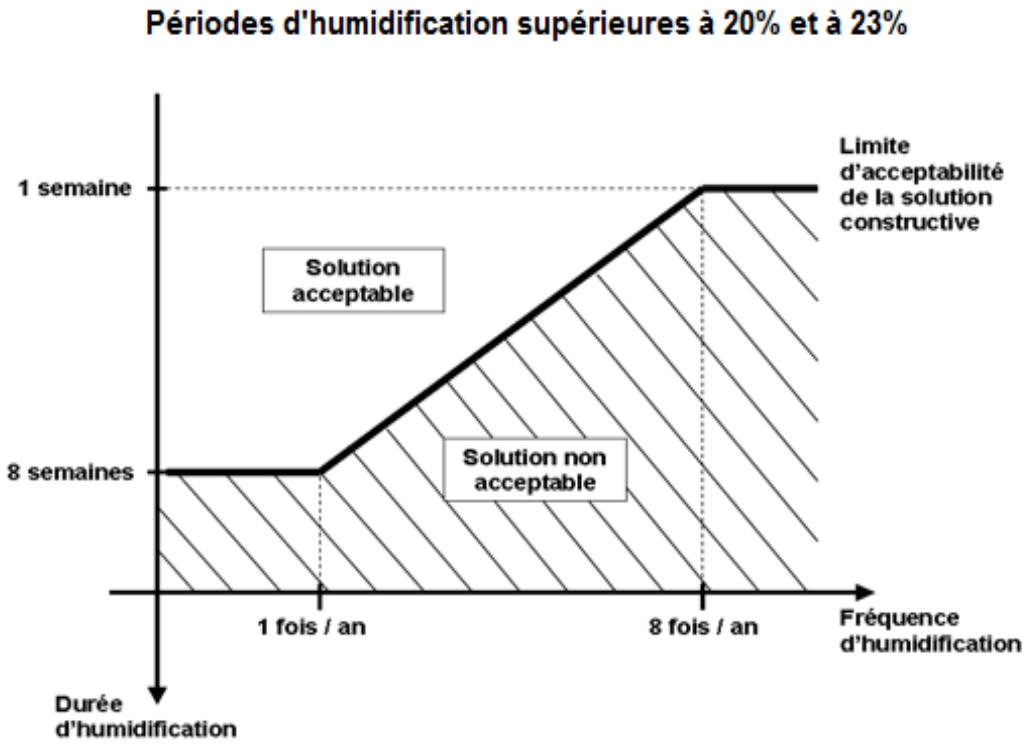
Une paroi, pour être jugée satisfaisante, ne pourra pas contenir des éléments dont l'humidité relative est supérieure à 98 %, même en des endroits particuliers de la paroi. En effet les tolérances du logiciel font qu'au-delà de 98 %, le risque de condensation peut être considéré comme très probable.

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, etc.) 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, etc.) 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-avant.

Figure 2 : 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 pourcentage 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.

ANNEXE 2 : PRESENTATION DES CONDITIONS AUX LIMITES EXTERIEURES ET INTERIEURES

A2.1 Ambiances extérieures

Les conditions aux limites des températures et humidités des différentes simulations correspondent à une zone climatique de plaine continentale (Nancy), à une zone de climat océanique (Brest), une zone de climat méditerranéen (Nice) et à une zone de climat de montagne (La Chaux-de-Fonds). Les deux figures suivantes présentent l'évolution des températures et humidités en fonction du temps pour ces climats.

Figure 3 : Variation de la température et de l'humidité relative au cours d'une année à Nancy

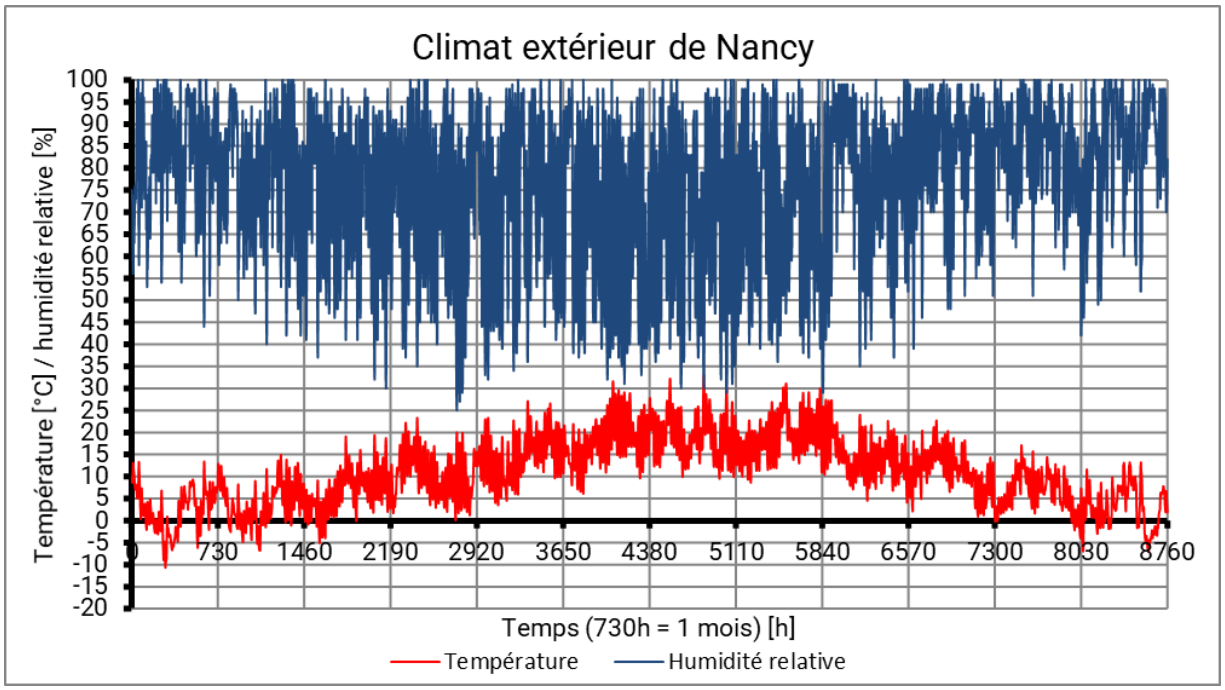


Figure 4 : Variation de la température et de l'humidité relative au cours d'une année à Brest

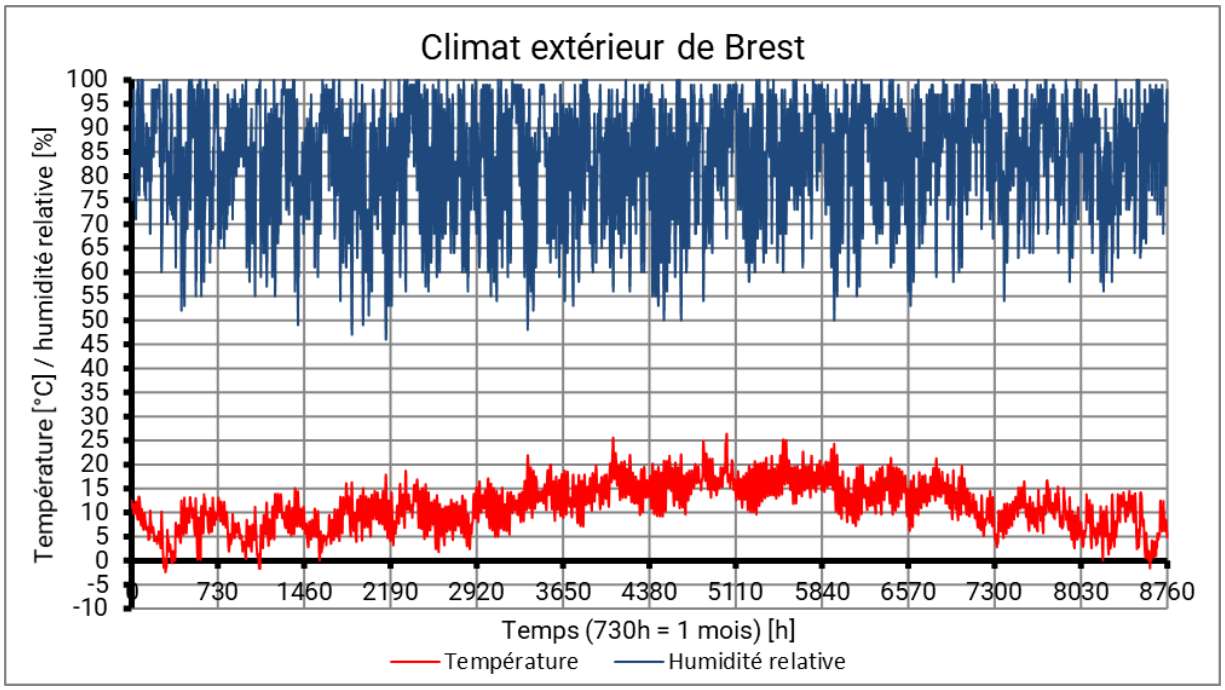


Figure 5 : Variation de la température et de l'humidité relative au cours d'une année à Nice

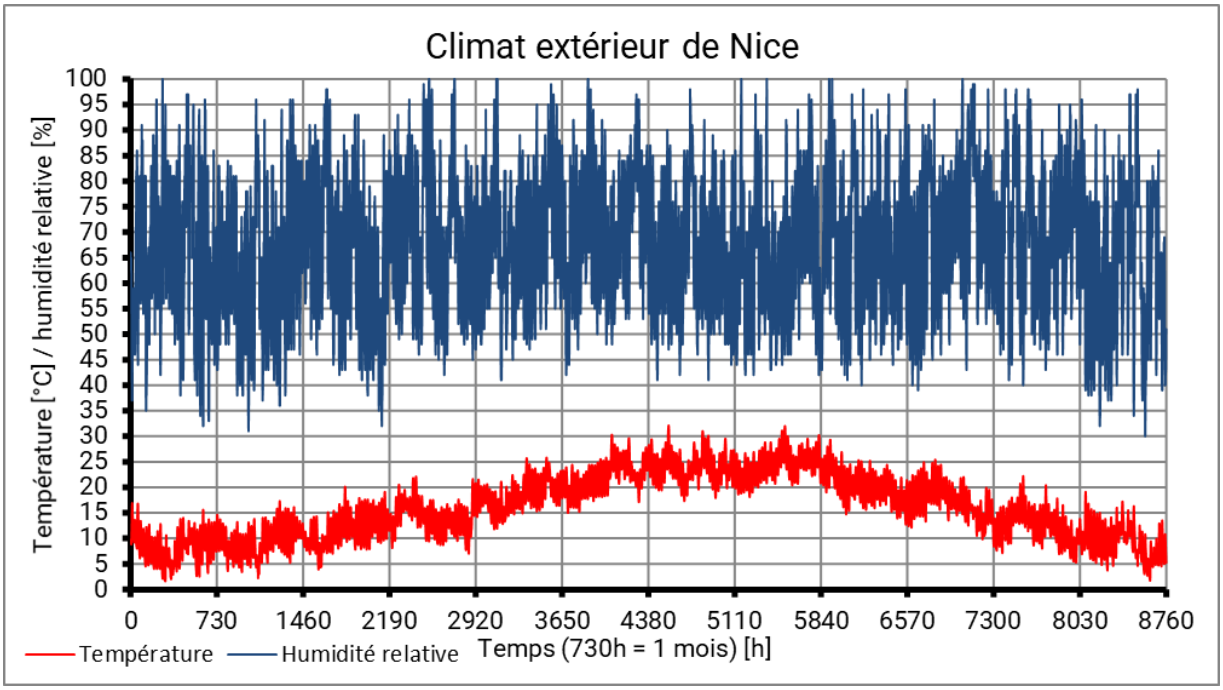
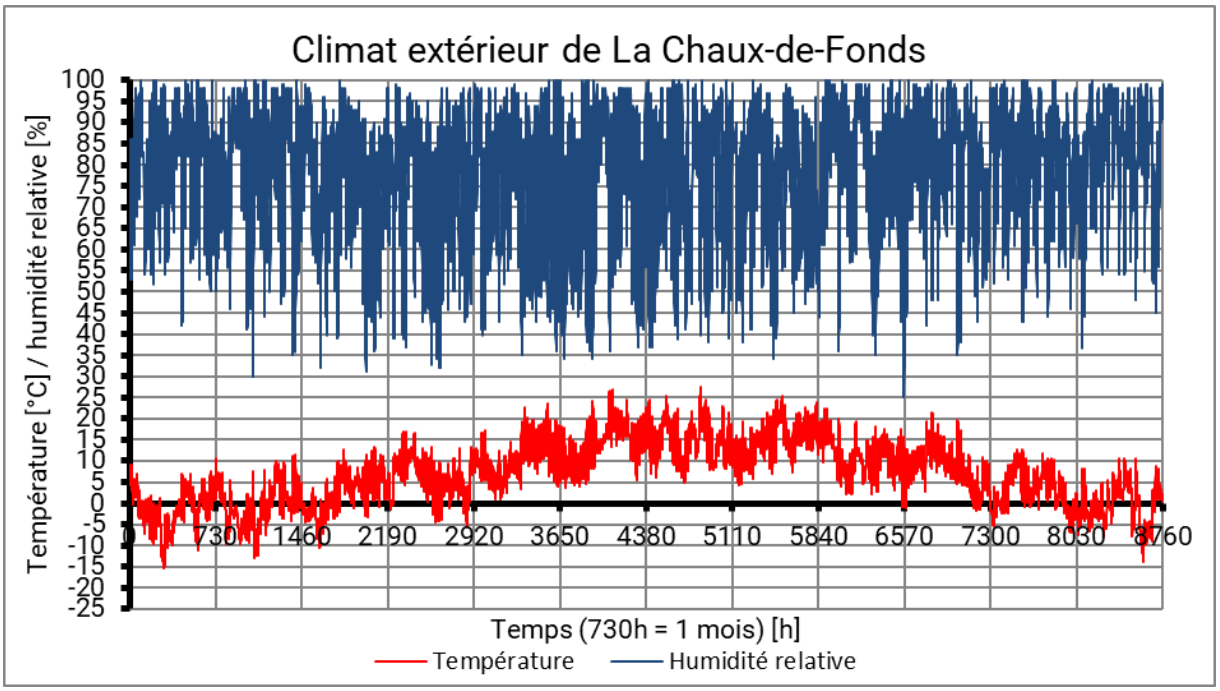


Figure 6 : Variation de la température et de l'humidité relative au cours d'une année à La Chaux-de-Fonds



A2.2 Ambiances intérieures

Dans les documents DTU 20.1, DTU 40.1, 40.2, 40.3, 40.4 et 43.3, quatre types de locaux sont définis :

- local à faible hygrométrie : W/n ≤ 2,5 g/m^3 ;
- local à hygrométrie moyenne : 2,5 < W/n ≤ 5 g/m^3 ;
- local à forte hygrométrie : 5 < W/n ≤ 7,5 g/m^3 ;
- local à très forte hygrométrie : W/n > 7,5 g/m^3.

Avec :

W : quantité de vapeur d'eau produite à l'intérieur d'un local par heure, exprimée en grammes par heure (g/h),

n : le taux horaire de renouvellement d'air exprimé en mètre cube par heure (m^3/h)

En règle générale :

➢ Local à faible hygrométrie : les locaux équipés de ventilations mécaniques contrôlées et de systèmes propres à évacuer les pointes de production de vapeur d'eau dès qu'elles se produisent (par exemple : hottes, …) sont des locaux à faible hygrométrie.

➢ Local à hygrométrie moyenne : les locaux correctement chauffés et ventilés, sans sur-occupation, et les locaux de production dont le process ne génère pas de vapeur d'eau sont des locaux à hygrométrie moyenne.

➢ Local à forte hygrométrie : les locaux médiocrement ventilés et les locaux avec forte concentration humaine sont des locaux à forte hygrométrie.

➢ Local à très forte hygrométrie : les locaux spéciaux où l'activité maintient une humidité relative élevée sont des locaux à très forte hygrométrie.

De plus, il existe également dans ces documents DTU un classement des locaux à exposition à l'eau liquide projetée sur les parois. Ce classement comporte les cinq niveaux ci-dessous :

- EA : locaux secs ou faiblement humides
- EB : locaux moyennement humides
- EB+ : locaux privatifs : locaux humides à usage privatif
- EB+ : locaux collectifs : locaux humides à usage collectif
- EC : locaux très humides en ambiance non agressive

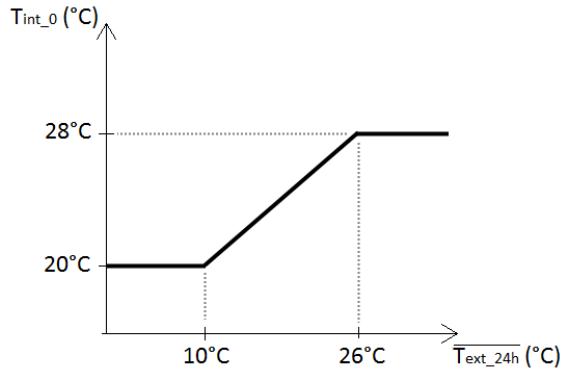
Les locaux à hygrométrie moyenne ($2.5 < W/n \leq 5 g/m^3$) peuvent être associés aux locaux à exposition à l'eau liquide projetée EB et EB+ pour les locaux privatifs.

Les locaux à forte hygrométrie ($5 < W/n \leq 7,5 g/m^3$) peuvent être associés aux locaux à exposition à l'eau liquide projetée EB et EB+ pour les locaux privatifs et pour les locaux à usage collectif.

Les ambiances intérieures prises en compte pour les simulations de cette étude sont à hygrométrie moyenne avec un W/n maximum de 5 g/m³.

Durant la période hivernale, la température minimale possible dans le local est fixée à 20 °C. Cette température est néanmoins directement influencée par la température extérieure. De ce fait, la température intérieure est définie comme fonction de la moyenne glissante de la température extérieure sur 24 h, telle que :

$$\overline{T_{ext_{24h}}}(h) = \int_{h-23}^{h} T_{ext}\,(h)$$

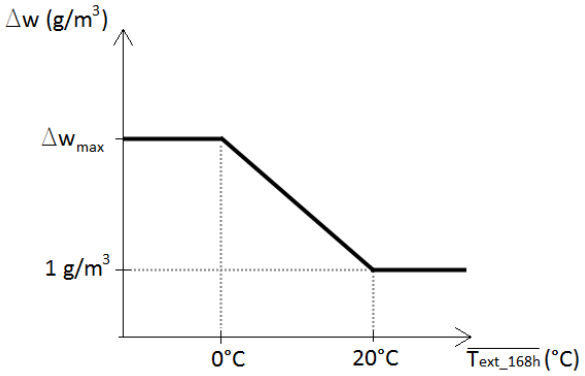


Abaque de détermination de la température intérieure

L'humidité absolue de l'air intérieur est définie à l'aide de la moyenne glissante de la température extérieure sur une semaine, telle que représentée sur l'abaque ci-dessous. La valeur de cet excès est au minimum égale à 1g/m³ allant jusqu'à la valeur limite du climat.

$$\overline{T_{ext_{168h}}}(h) = \int_{h-167}^{h} T_{ext}\,(h)$$

$$w_{int_0}(h) = \overline{w_{ext_{168}}}(h) + \Delta w(h)$$



Abaque de détermination de l'excès d'humidité intérieur

L'humidité relative de l'air intérieur est déterminée par le calcul suivant :

$$HR_{int_0}(h) = \frac{w_{int_0}(h) \cdot R \cdot T_{int}(h)}{M_{eau} \cdot pv_{sat}\big(T_{int}(h)\big)}$$

Où :

- HR : humidité relative en % ;
- W : humidité absolue en $kg_{eau}/kg_{air\ sec}$;
- T : température en K ;
- Pv : pression de vapeur d'eau en Pa ;

- M : masse molaire en kg/mol ;
- R : constante des gaz parfaits en J/mol.K ;
- Le suffixe *int* pour intérieur ; le suffixe *int_0* pour intérieur en évolution libre ; le suffixe *sat* pour saturante.

Pour les zones climatiques retenues, les ambiances intérieures sont représentées par les graphiques suivants :

Figure 7 : Variation de la température et de l'humidité relative intérieure pour un local à hygrométrie moyenne à Nancy

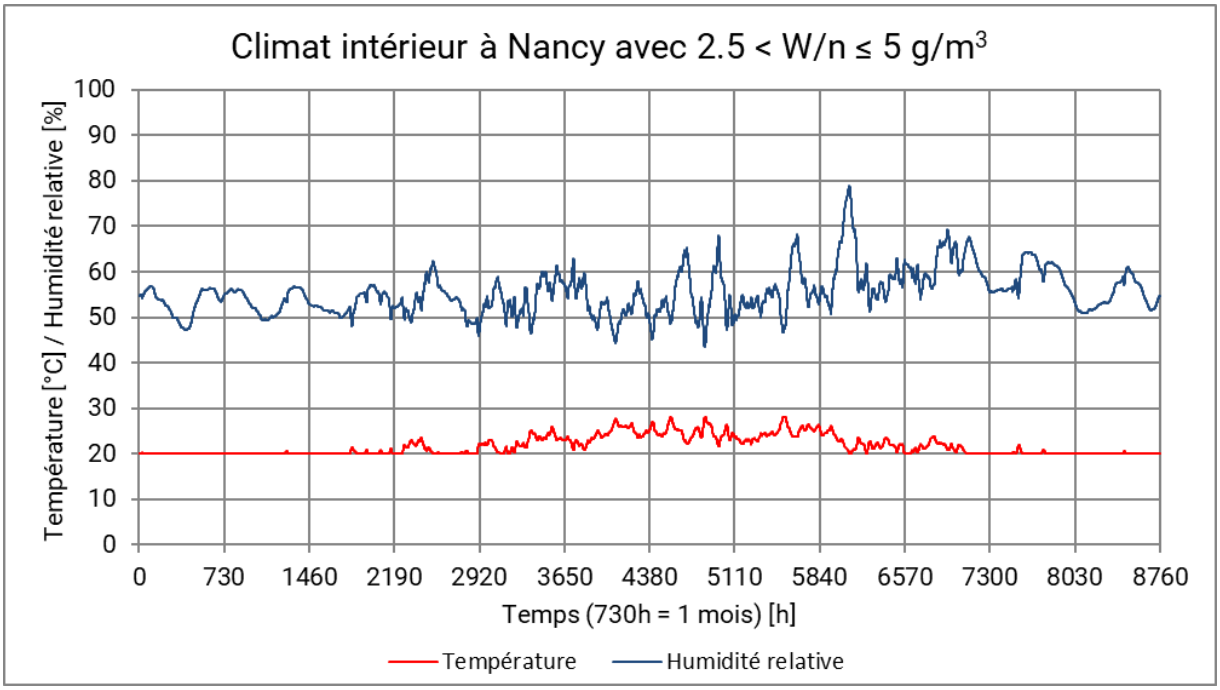


Figure 8 : Variation de la température et de l'humidité relative intérieure pour un local à hygrométrie moyenne à Brest

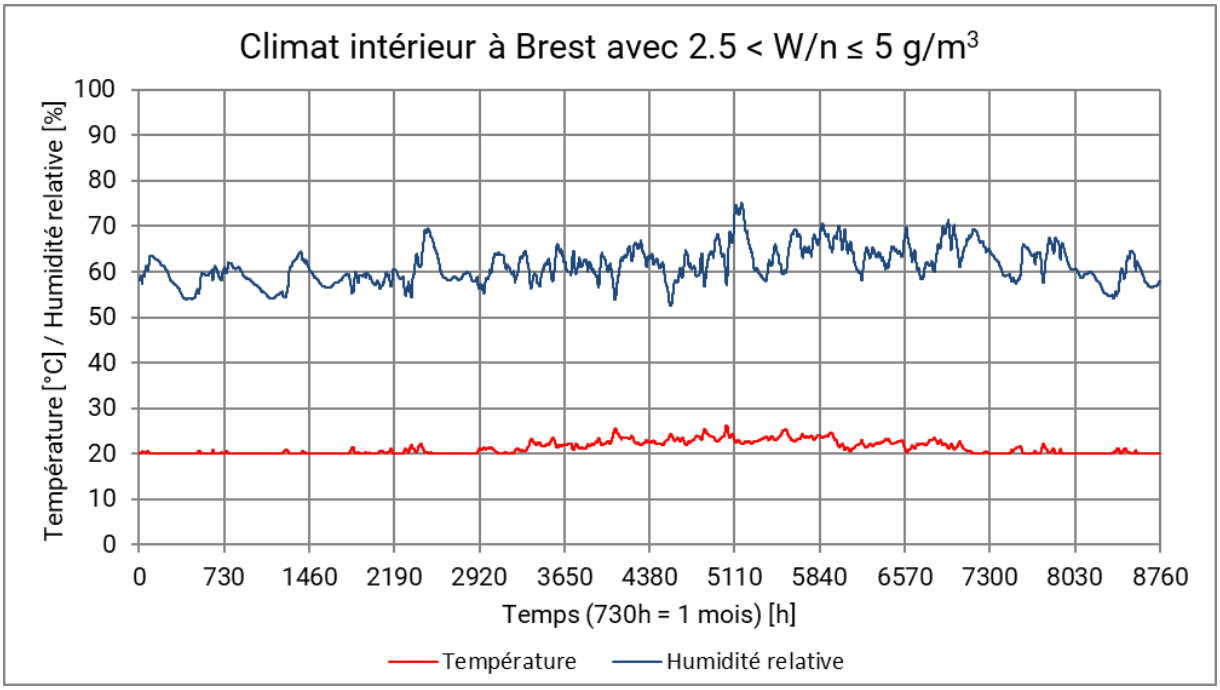


Figure 9 : Variation de la température (avec consigne T_{max} = 24°C) et de l'humidité relative intérieure pour un local à hygrométrie moyenne à Nice

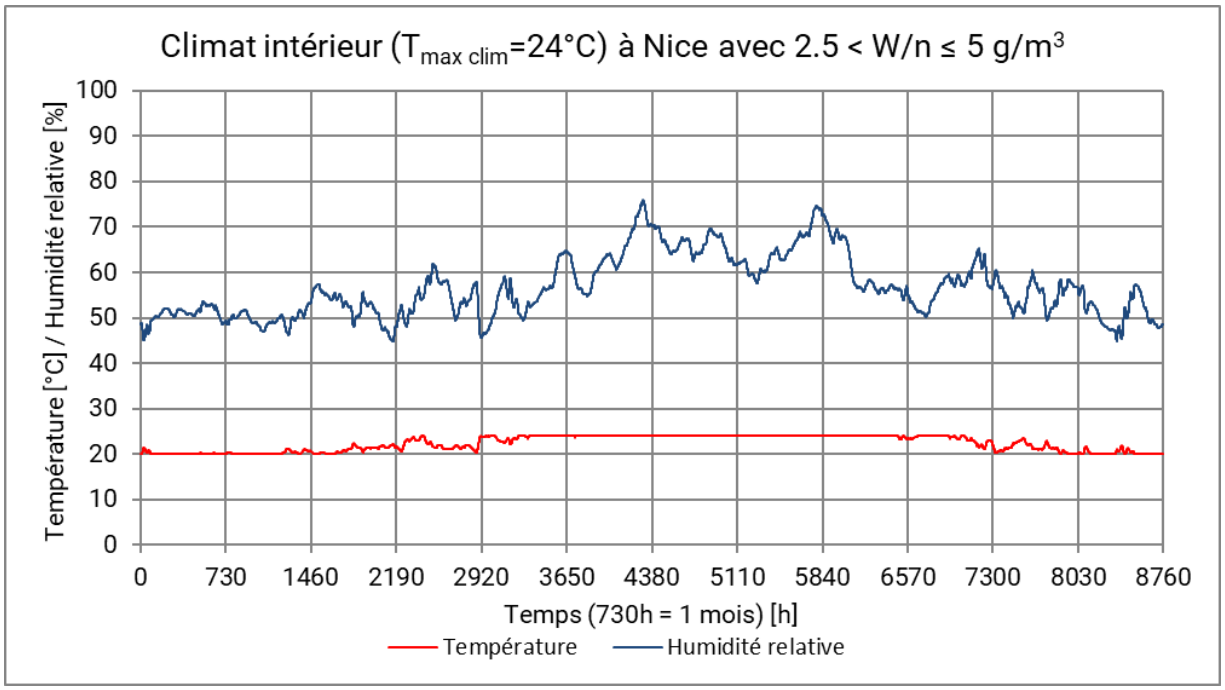


Figure 10 : Variation de la température et de l'humidité relative intérieure pour un local à hygrométrie moyenne à La Chaux-de-Fonds

