



Réno2020

Jean-Marie HAUGLUSTAINE

Monique LEJEUNE

Stéphane MONFILS

S

1.

2.

2.1.	!	"	
2.1.1.	Composition rentrée dans le logiciel PEB.....		10
2.1.2.	Vérification dans Trisco.....		11
2.1.2.1.	Modèle.....		11
2.1.2.2.	Résultats graphiques.....		12
2.1.2.3.	Résultats numériques.....		13
2.1.2.4.	Composition alternative dans les logiciels PEB et Trisco.....		14
2.1.3.	Glata.....		15
2.2.	#		\$
2.2.1.	Composition rentrée dans le logiciel PEB.....		19
2.2.2.	Vérification dans Trisco.....		20
2.2.2.1.	Modèle.....		20
2.2.2.2.	Résultats graphiques.....		20
2.2.2.3.	Résultats numériques.....		20
2.2.3.	Glata.....		21
2.2.3.1.	Configuration principale : à travers l'isolant.....		21
2.2.3.2.	Solutions ?.....		23
2.2.4.	Composition alternative dans la PEB.....		24
2.2.5.	Dans Trisco.....		25
2.3.	%	&	'
2.3.1.	PEB.....		27
2.3.2.	Glata.....		27
2.4.)	"	&
2.4.1.	PEB.....		32
2.4.2.	Glata.....		33
2.5.	,	"	"
2.5.1.	PEB.....		36
2.5.2.	Glata.....		37
2.6.)	"	" - "



2.6.1.	PEB	40
2.6.2.	Glasta	40
2.7.	,	/
2.7.1.	Briques + isolant extérieur (R+1 et R+2).....	42
2.7.2.	Structure bois (entrées).....	43
2.7.2.1.	PEB	44
2.7.2.2.	Glasta.....	44
2.8.	0 1 "	/\$
2.8.1.	PEB	48
2.8.2.	Glasta	49
2.9.	#	2
2.9.1.	PEB	54
2.9.2.	Glasta :	54
3.	3 & 4 0 2	
3.1.		2
3.2.	5 6 4 0	2
3.3.) 4 0	2
3.4.) 4 0	2
3.5.) 4 0 7	2
3.5.1.	Interruptions propres à une paroi	59
3.5.2.	Percements de parois par des canalisations.....	60
3.5.3.	Intersection de 2 ou 3 nœuds constructifs linéaires	60
3.5.4.	Contact direct avec le sol.....	60
3.5.5.	Continuité de la couche isolante	61
3.6.	8 0 " * 9 4 0	(
3.6.1.	Option A : méthode détaillée	62
3.6.2.	Option B : Méthode des nœuds PEB-conformes.....	62
3.6.3.	Option C : Pénalité forfaitaire.....	62
3.7.) 4 ;< 0	(
3.7.1.	Définition de la couche isolante d'une paroi	63
3.7.2.	Condition 1 : satisfaire à une des règles de base pour un détail à faible pont thermique.....	64
3.7.2.1.	Règle 1 : épaisseur minimale de contact des couches isolantes.....	64

3.7.2.2.	Règle 2 : interposition d'un élément isolant	66
3.7.2.3.	Règle 3 : longueur du chemin de moindre résistance.....	70
3.7.3.	Condition 2: satisfaire à $\Psi_e \leq \Psi_{e,lim}$	71
3.8.	=	
3.8.1.	Nœuds constructifs linéaires entre 2 volumes protégés ou plus.....	72
3.8.2.	Combinaisons de nœuds constructifs linéaires difficiles à distinguer.....	72
3.9.	> 0	
3.9.1.	Nœud constructif linéaire.....	73
3.9.2.	Nœud constructif ponctuel.....	74
4.) 4 0	2
4.1.	* ?	2
4.2.	; 0 @	2
4.2.1.	Contact des isolants en façade et en retour de baie	76
4.2.2.	Jonction du châssis en aluminium avec l'isolant en retour de baie	76
4.2.3.	Jonction du châssis avec le seuil.....	77
4.3.	, 0 !	\$
4.3.1.	Encastrement d'une poutre métallique.....	81
4.3.1.1.	Situation initiale.....	81
4.3.1.2.	Solution 1	84
4.3.1.3.	Solution 2	86
4.3.2.	Jonction avec un plancher intermédiaire	88
4.3.3.	Fin de l'isolant au niveau du rez-de-chaussée.....	92
4.3.3.1.	Nœud 1 : jonction avec l'isolant de façade	92
4.3.3.2.	Nœud 2 : contact des isolants en présence.....	96
4.3.3.3.	Nœud 3 : connection avec le châssis.....	96
4.4.	, " "	
4.4.1.	Jonction avec le plancher du RDC.....	97
4.4.2.	Jonction avec le plancher du palier	99
4.4.3.	Nœud 3 : jonction avec le mur le long de la rue de la Glacière.....	103
4.4.4.	Ancrages métalliques (terrasses et escalier).....	106
4.5.	?	\$
4.5.1.	Mur de refend (WC / salle de bain).....	108
4.5.1.1.	Cas 1 : sans retour d'isolant thermique.....	109

4.5.1.2.	Cas 2 : avec retour d'isolant thermique	110
4.5.2.	Mur pignon / annexe	112
4.5.2.1.	Cas 1 : sans retour d'isolant.....	113
4.5.2.2.	Cas 2 : avec retour d'isolant	114
4.5.3.	Mur mitoyen (annexe) / plancher du R+1	115
4.5.3.1.	Solution 1 : rupture thermique.....	118
4.5.3.2.	Solution 2 : remplir la cavité d'isolant.....	119
4.5.3.3.	Solution 3 : remplir le plancher d'isolant	121
4.5.3.4.	Solution 4 : combinaison des solutions 1 et 3.....	122
4.6.)	0 !	
4.6.1.	Hypothèse de la lisse.....	123
4.6.1.1.	Hypothèse A.....	124
4.6.1.2.	Hypothèse B.....	125
4.6.1.3.	Hypothèse C.....	126
4.6.2.	Position relative des deux parois	130
4.6.2.1.	Alignement intérieur.....	130
4.6.2.2.	Alignement extérieur	131
4.6.3.	Jonction avec la maçonnerie existante isolée par l'extérieur	134
4.6.3.1.	Alignement intérieur.....	134
4.6.3.2.	Alignement extérieur	136
4.7. #		
4.7.1.	Poutres cintrées	137
4.7.2.	Autres nœuds concernant la toiture métallique	139
4.8.)	" " - " . /	
4.8.1.	Angle des murs creux.....	140
4.8.2.	Jonction avec le mur mitoyen (façade arrière).....	140
4.8.3.	Jonction avec la fenêtre en façade	141
4.8.4.	Jonction avec le mur mitoyen (façade avant).....	141
4.9. :	* 9 4 0 ' /	
	& 8=#8 /	
4.9.1.	Introduction	142
4.9.2.	Nœud « 8 » : rencontre d'un plancher en bois et d'un mur de façade.....	142
4.9.3.	Nœud « 14 » : Construction d'un nouveau mur de façade léger sur un ancien mur isolé par l'intérieur.....	146



4.9.4. Nœud « 21 » : étude d'un nœud créé par une isolation mixte (intérieur / extérieure)	151
4.9.5. Nœud « 32 » : jonction d'un nouveau mur creux, d'un ancien mur isolé et d'un plancher intérieur	154
4.9.6. Nœud « 999 » : encastrement d'un poutre métallique de support de plancher.....	159
4.9.7. Nœud « 34 » : mur creux, acrotère et toiture plate	163

1.

Cette étude sur la performance énergétique du bâtiment sis au 13 de la rue Ferrer à Seraing, rénové dans le cadre de l'action Réno2020, comprend plusieurs parties. Elle a été menée tout au long du projet de recherche et du chantier qui suivit les études préalables.

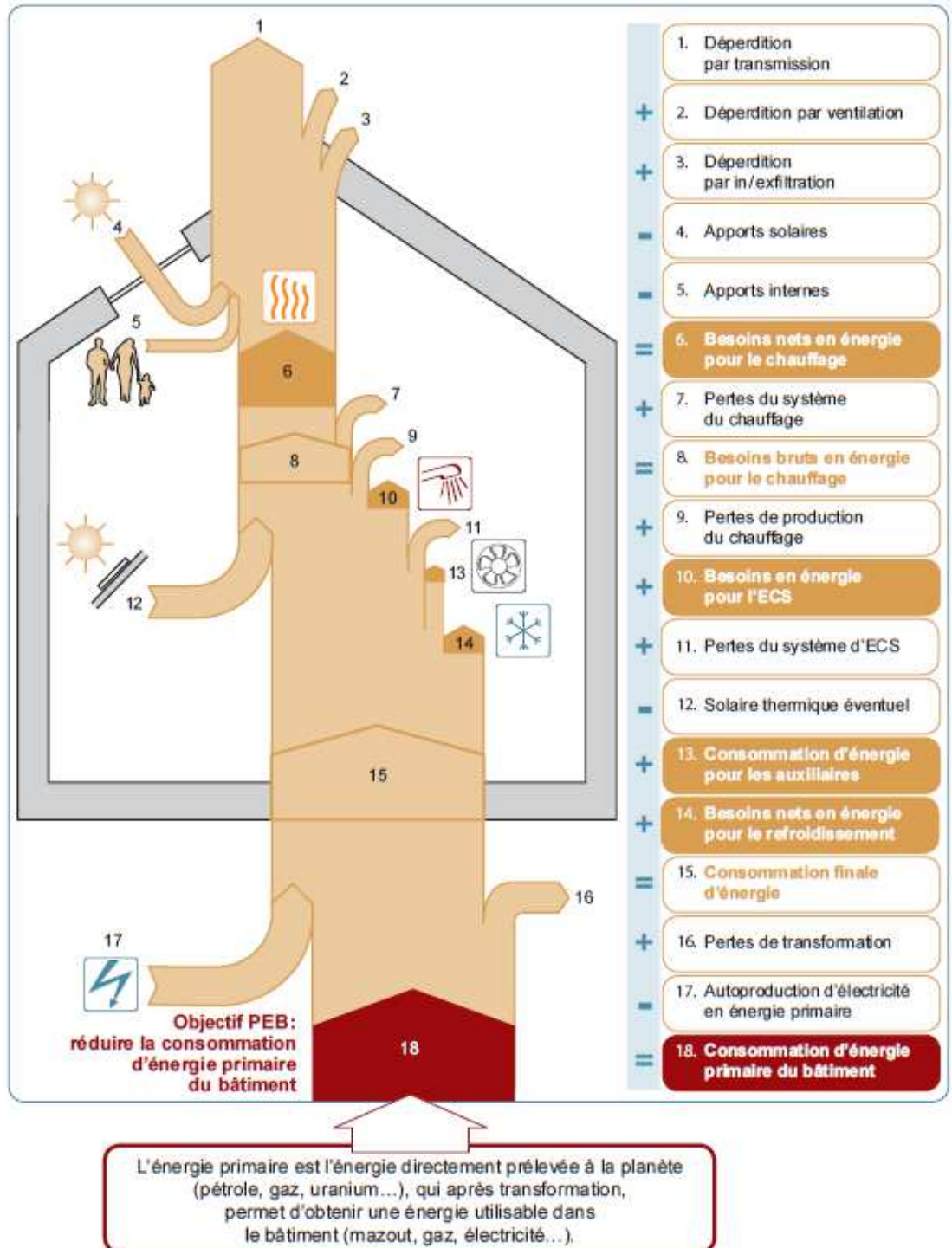


Fig. 1 : bilan énergétique (source : guide PEB)

Conformément aux principes de bases de la minimisation d'un bilan énergétique (Fig. 1),

l'étude s'intéresse d'abord à la réduction des besoins de chauffage du bâtiment, au travers de l'isolation de l'enveloppe, de la réduction des pertes par la ventilation (en ce compris les infiltrations / exfiltrations) et de la valorisation des gains solaires et internes.

Nous nous attellerons donc d'abord à décrire la composition des différentes parois délimitant le volume protégé. Cette analyse ne portera pas seulement sur le respect des exigences réglementaires en termes d'isolation thermique : à la demande des industriels partenaires du projet, une modélisation supplémentaire de certaines parois a été réalisée dans un ou plusieurs logiciels « indépendants » développés par Physibel, afin de vérifier les performances hygrothermiques de cette paroi :

- Trisco, un programme informatique qui permet l'analyse du transfert de chaleur en régime statique au travers d'« objets » tridimensionnels faits dans différents matériaux et soumis à différentes conditions limites.
- Glasta, qui permet l'analyse du transfert de vapeur d'eau, afin de vérifier (voire éviter) le risque de condensation à l'intérieur de la paroi.

Enfin, une étude des nœuds constructifs a été menée sur le bâtiment, afin de pointer les faiblesses thermiques (qu'elles soient ponctuelles ou linéaires), de vérifier leur confirmité vis-à-vis de la réglementation thermique PEB (lorsque cela est pertinent : nous verrons qu'une rénovation ne réglant pas nécessairement tous les problèmes de l'isolation thermique de l'enveloppe, la notion de « nœuds constructifs » doit être adaptée à ces chantiers particuliers). Cette étude reprendra d'abord une présentation de la nouvelle réglementation, suivie de l'analyse de certains nœuds du bâtiment. Tous n'ont pas été regardés à la loupe, mais constituent une série de nœuds relativement représentatifs de la problématique liée à la rénovation performancielle d'un bâtiment existant.

2.

2.1. ! "

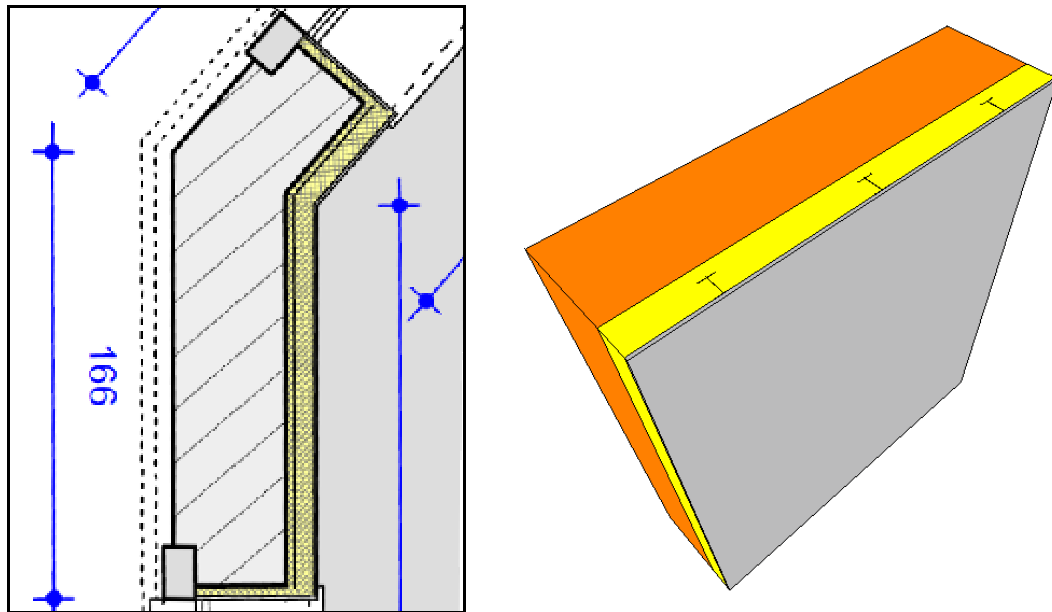


Fig. 2 : mur existant isolé par l'intérieur

Il s'agit des murs existants, composés de briques, en contact direct avec l'environnement extérieur, du côté des rues Ferrer et de la Glacière. Selon les plans et les spécifications des architectes, une structure intérieure en acier est posée indépendamment du mur de briques (fixée au sol et au plafond). L'isolant se répartit alors en deux couches :

- 7,5 cm de laine minérale sont posés entre les éléments de structure en acier.
- Une couche supplémentaire d'isolant, d'épaisseur à déterminer (au moment de commencer cette analyse), est ajoutée entre la structure et le mur en briques.

La paroi se trouve donc composée comme suit :

- Briques extérieures, existantes, sur une épaisseur de 39 cm ;
 - Ne connaissant pas les caractéristiques de la brique, nous avons pris la valeur λ la plus défavorable que propose l'annexe 7, soit $\lambda_e = 1,61 \text{ W/mK}$.
- Isolation en laine minérale (Naturoll 032, Knauf), d'épaisseur à préciser ;
- Couche d'isolation composée : structure acier + laine minérale (Naturoll 032, Knauf) sur 7,5 cm ;
- Plaque de plâtre, d'une épaisseur supposée de 1,25 cm ;

Il est utile de préciser à ce stade que la structure indépendante en acier (utilisée en contre-cloison intérieure pour la plupart des murs de façade) n'est pas à considérer comme un nœud constructif. En effet, à l'annexe G (point G.2) de l'annexe VII de l'AGW du 17 Avril 2008, on peut lire :

« Les calculs numériques sont mis en application pour déterminer la valeur U des éléments de

constructions présentant éventuellement des pertes de chaleur supplémentaires (ex. des composants qui interrompent une couche d'isolation, des parois munies d'éléments de construction métalliques), des constructions complexes ou des éléments préfabriqués (ex. des profilés d'encadrement, des modules de façades légères), des situations d'angle ou des jonctions dans lesquels un flux thermique tridimensionnel apparaît, etc. »

Pour ces structures métalliques, il faut donc faire un calcul numérique à l'aide d'un logiciel validé selon la NBN EN ISO 10211 (comme Trisco). Nous analyserons donc le mur suivant différentes méthodes afin d'en tirer certaines conclusions.

2.1.1. 8 & ;

La contre-cloison doit être encodée comme « composée » dans le logiciel PEB, avec une proportion d'acier, et une proportion d'isolant. La structure étant plus mince qu'une structure bois, il ne peut être fait usage des proportions par défaut ; la fraction considérée est donc de 0,1% d'acier pour 99,9% d'isolant (soit un profilé de 0,6 mm d'épaisseur tous les 60 cm). Le logiciel calcule donc une valeur λ « équivalente » en tenant compte de la fraction d'acier et de la fraction d'isolant et de leurs valeurs λ respectives.

Extérieur						Résistance superficielle ext. Rse = 0,04 [m ² K/W]	
#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	Options	R [m ² K/W]		
1	Maçonnerie	Briques en terre cuite (Eléments de maçonneries) - AU: 1.81 Mortier de ciment (Enduits) - AU: 1.5	0,39	M	0,245	✖	
2	Simple	Laine minérale 032 - AU: 0.032	0,05	F	1,562	✖	
3	Composée	Naturoll 032 - AU: 0.032 Acier (Métaux) - AU: 50.0	0,075	C F	0,915	✖	
4	Simple	Plaques de plâtre entre deux couches de carton (Matériaux hétérogènes)	≤ 0.014		0,05	✖	

Intérieur		Résistance thermique (surface à surface) Rt = 2,77 [m ² K/W]	
		Résistance superficielle int.	Rsi = 0,13 [m ² K/W]
		Résistance thermique totale	RT = 2,94 [m ² K/W]
		Valeur U indicative	U = 0,34 [W/m²K]

Fig. 3 : PEB : composition du mur existant isolé par l'intérieur

A cause des mauvaises performances thermiques de l'acier ($\lambda = 50$ W/mK), la couche composée d'isolant et d'acier voit sa résistance affaiblie. Une couche de même épaisseur (7,5 cm), composée uniquement d'isolant ($\lambda = 0,032$ W/mK) devrait avoir une résistance thermique de 2,344 m²K/W. Dans notre cas, la résistance de la couche composée (99,9% isolant + 0,1% structure en acier) est de 0,915 m²K/W (soit une valeur $\lambda_{\text{équivalente}} = 0,075$ [m]/0,915 [m²K/W] = 0,082 W/mK).

Pour obtenir le respect de l'exigence réglementaire sur la qualité de l'isolation thermique de la paroi (0,4 W/m²K au moment de l'étude), il a fallu augmenter l'épaisseur de la couche supplémentaire d'isolant inséré entre la structure et la brique : des 3 cm prévus par les architectes, 4 cm sont devenus un strict minimum et 5 cm ont été préconisés. La valeur U qui en résulte est de **0,34 W/m²K** (voir Fig. 3 ci-dessus). Remarquons que la même paroi, sans la présence de la structure acier, aurait une valeur U calculée selon la méthode réglementaire de la PEB, de 0,23 W/m²K

2.1.2. > 0

Tel que nous l'avons annoncé dans l'introduction, nous utiliserons pour vérifier certains calculs un logiciel indépendant de simulation des transferts de chaleur : Trisco, développé par Physibel. Ce calcul est accepté par la Région dans le cadre de la PEB.

Trisco est un programme informatique qui permet l'analyse du transfert de chaleur en régime statique, dans des « objets » tridimensionnels faits dans différents matériaux et soumis à différentes conditions limites. Il permet la caractérisation colorée des différents matériaux, qui ne peuvent être modélisés que dans un repère d'axe orthogonal. Différentes base de données matériaux existent pour paramétrer les calculs (valeurs λ ...).

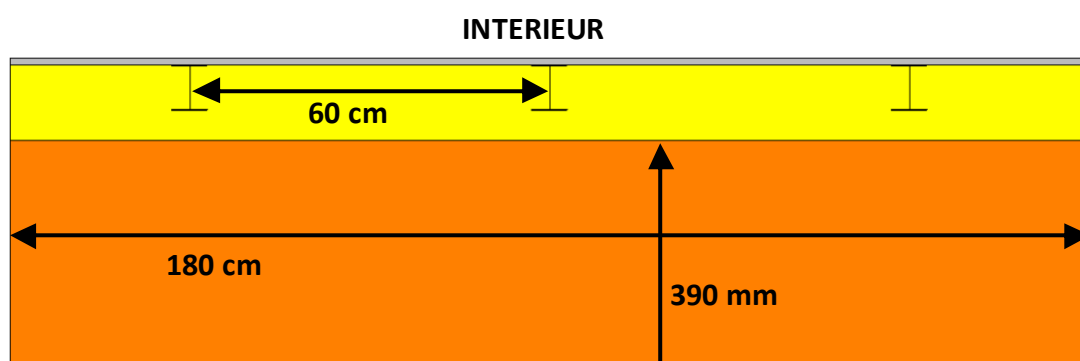


Fig. 4 : Trisco : plan d'ensemble du modèle « mur existant isolé par l'intérieur »

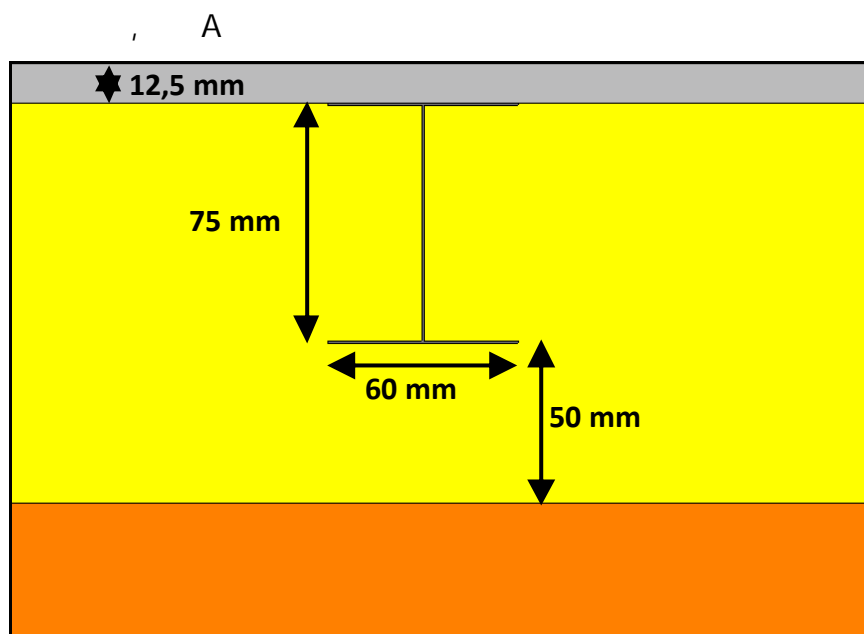


Fig. 5 : Trisco : plan de détail du modèle « mur existant isolé par l'intérieur »

D'une manière générale, les valeurs λ utilisées sont identiques à celles employées dans le logiciel PEB, pour permettre une comparaison facile des résultats :

- Orange : briques existantes + joints de mortier, $\lambda = 1,61 \text{ W/mK}$;

39 cm d'épaisseur

- Jaune : isolant Knauf, laine minérale Naturoll 032 ($\lambda = 0,032 \text{ W/mK}$, épaisseur : 50 mm + 75 mm = 125 mm)
- Gris foncé : acier (pour la structure : $\lambda = 50 \text{ W/mK}$, profilé de 0,6 mm d'épaisseur tous les 60 cm)
- Gris clair : plaque de plâtre entre deux papiers forts ($e = 12,5 \text{ mm}$, $R = 0,05 \text{ m}^2\text{K/W}$; $\rightarrow \lambda = 0,25 \text{ W/mK}$)

Le modèle complet offre une surface de $[1,8 \text{ m} * 2 \text{ m} =] 3,6 \text{ m}^2$ au transfert de chaleur, une différence de température de 20°C a été imposée entre l'intérieur et l'extérieur ; le résultat donné par le logiciel étant un flux de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur (en W), la division de celui-ci par la surface du mur et par le ΔT nous donnera la valeur U (en $\text{W/m}^2\text{K}$).

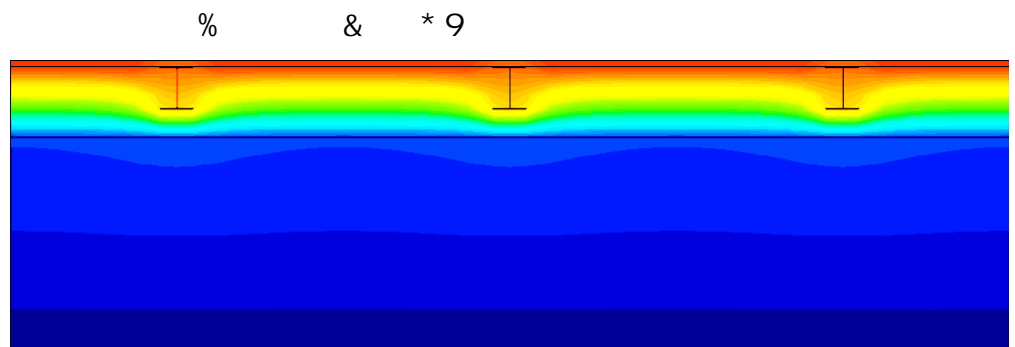


Fig. 6 : Trisco : résultats graphiques du transfert de chaleur au travers du mur existant isolé par l'intérieur (plan d'ensemble)

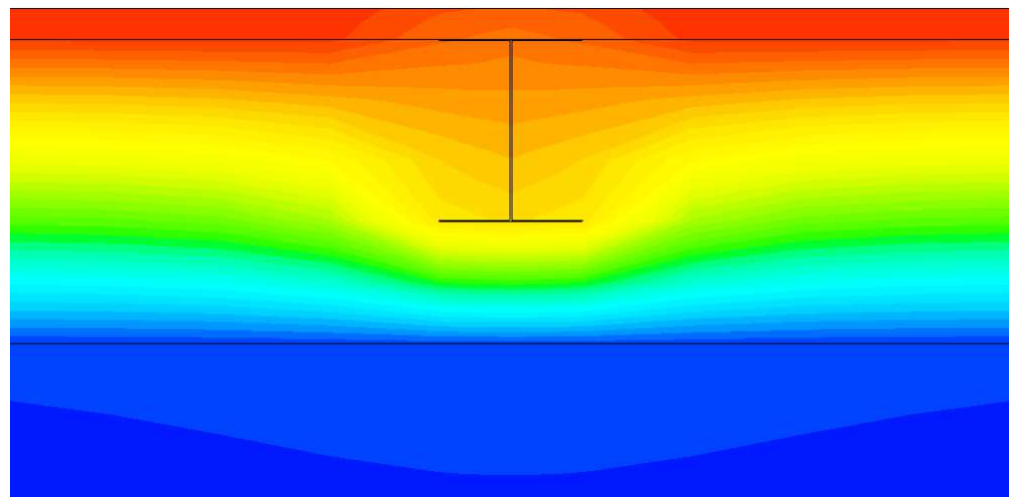


Fig. 7 : Trisco : résultats graphiques du transfert de chaleur au travers du mur existant isolé par l'intérieur (plan de détail)

Malgré l'affaiblissement thermique créé par l'acier, qui provoque une inflexion dans les courbes de températures, nous voyons déjà que le flux de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur ne semble pas modifié de façon importante.

/ 8 & ;
#

La valeur U « annoncée » par le logiciel PEB est de 0,36 W/m²K :

Extérieur						Résistance superficielle ext. R _{se} = 0,04 [m ² K/W]	
#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	Options	R [m ² K/W]	...	
1	Maçonnerie	Briques en terre cuite (Éléments de maçonneries) - AU: 1.61 Mortier de ciment (Enduits) - AU: 1.5	0.39	M	0,245	✗	
2	Composée	Naturoll 032 - AU: 0.032 Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - AU: 0.18	0.125	⊙ ⊕	2,306	✗	
3	Simple	Plaques de plâtre entre deux couches de carton (Matériaux hétérogènes)	≤ 0.014		0,05	✗	

Intérieur		Résistance thermique (surface à surface) R _t = 2,60 [m ² K/W]	
		Résistance superficielle int.	R _{si} = 0,13 [m ² K/W]
		Résistance thermique totale	R _T = 2,77 [m ² K/W]
		Valeur U indicative	U = 0,36 [W/m²K]

Fig. 11 : PEB : composition alternative du mur existant isolé par l'intérieur

Voyons maintenant le résultat de la modélisation dans le logiciel Trisco.

Une fraction de bois de 15% traduit, pour une pièce de bois de 63 mm d'épaisseur, un entraxe de 357 mm entre les éléments de structure.

Les lambdas choisis sont identiques à ceux qui sont utilisés dans la composition PEB du mur.

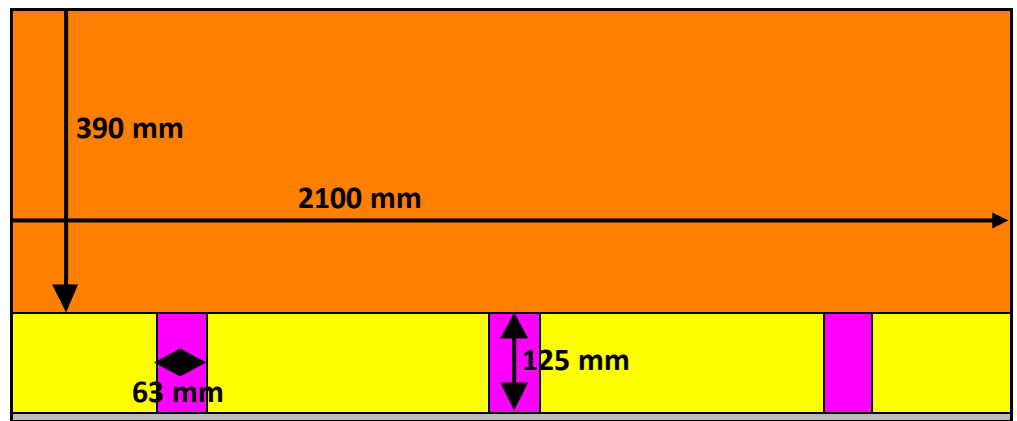


Fig. 12 : Trisco : plan d'ensemble du modèle alternatif du mur existant isolé par l'intérieur

La surface d'échange est de 4,2 m². Pour une différence de température de 20 °C, les résultats délivrés par Trisco sont donnés ci-dessous (Fig. 13) : la valeur U est donc de $29,41 / (4,2 * 20) = 0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$, à peu près identique au résultat annoncé par le logiciel PEB (0,36 W/m²K).

L'on voit donc clairement que la méthode de calcul règlementaire, décrite dans l'annexe 7 de l'AGW du 17 Avril 2008, a été établie pour les techniques de construction traditionnelles. Les structures en bois sont correctement modélisées, à l'inverse de l'acier qui, à cause de ses mauvaises caractéristiques thermiques, obtient de mauvais scores. Un calcul

numérique est donc bel et bien nécessaire dans ce cas.

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
2	BC_SIMPL	extérieur	0.28	47	1	0	0.28	3	1	40
4	BC_SIMPL	intérieur	18.09	32	18	35	19.42	0	18	15
5	MATERIAL	mur plein de br	0.28	47	1	0	2.29	12	11	24
6	MATERIAL	structure bois	2.18	44	11	32	17.90	44	16	5
7	MATERIAL	Knauf Naturoll	1.84	47	11	31	19.20	0	16	15
17	MATERIAL	plaque de plâtr	17.30	32	16	35	19.42	0	18	15

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
2	BC_SIMPL	extérieur		0.00	29.41
4	BC_SIMPL	intérieur		29.41	0.00

Fig. 13 : Trisco : résultats numériques du transfert de chaleur au travers du mur existant isolé par l'intérieur (version alternative) pour $\Delta T = 20^\circ\text{C}$

2.1.3.






Profitons de l'analyse complète de la composition du mur pour évaluer le risque de condensation grâce à un autre logiciel développé par Physibel : Glasta. Le transfert de vapeur d'eau qu'il calcule est un transfert « unidimensionnel », à travers un mur dont la composition est identique en tous points de sa surface infinie... Nous nous intéresserons au transfert au travers de la couche d'isolant, qui représente 99,9% de la composition du mur et qui est bien moins résistant au transfert de vapeur d'eau. Nous analyserons le mur dans un environnement de classe de climat 3 (le plus chargé en vapeur d'eau que nous pourrions trouver dans un logement) par « sécurité » :

Paroi: RENO2020_MUR_ISOLÉ_INT_WAL Commentaire: Mur isolé par l'intérieur, sans structure acier

Totals: d [m] 0.5325 U [W/m²K] 0.230 Rc [m²K/W] 4.181 ud [m] 4.285

Représentation graphique: horizontal vertical Echelle auto echelle [m]: 0.00

côté 1: extérieur h1 [W/m²K] 25.000 ud-1 [m] 0.0014

No.	Nom	d [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	μ [-]	μd [m]	hup [-]	wcr [kg/m³]	wmax [kg/m³]	w [kg/m³]	pa [-]
1	briques	0.3900	1.610	0.242	10.0	3.9	<input checked="" type="checkbox"/>	100.000	100.000	0.000	
2	vieux plâtre	0.0050	0.700	0.007	25.0	0.125	<input checked="" type="checkbox"/>	150.000	400.000	0.000	
3	laine de verre	0.0500	0.032	1.562	1.0	0.05	<input checked="" type="checkbox"/>	950.000	950.000	0.000	
4	laine de verre	0.0750	0.032	2.344	1.0	0.075	<input checked="" type="checkbox"/>	950.000	950.000	0.000	
5	carton gypse	0.0125	0.500	0.025	10.0	0.125	<input checked="" type="checkbox"/>	250.000	500.000	0.000	

côté 2: intérieur h2 [W/m²K] 7.700 ud-2 [m] 0.0084

Terminer Sélectionner

Fig. 14 : Glasta : composition du mur existant isolé par l'intérieur

Les résultats (voir Fig. 15, 16 et 17 ci-dessous) ne sont guère encourageants : bien que le mur sèche complètement chaque année, la quantité maximale de condensats (à l'interface entre les briques et l'isolant) est bien trop élevée et risque d'endommager les matériaux en présence. Nous pouvons expliquer son apparition par l'application de l'isolant par l'intérieur du logement ; le mur de briques, froid, étant à peu près 30 fois plus résistant au transfert de la vapeur que l'isolant, il retiendra la vapeur à l'interface briques / isolant où la température est nettement

inférieure au point de rosée : la condensation se forme.

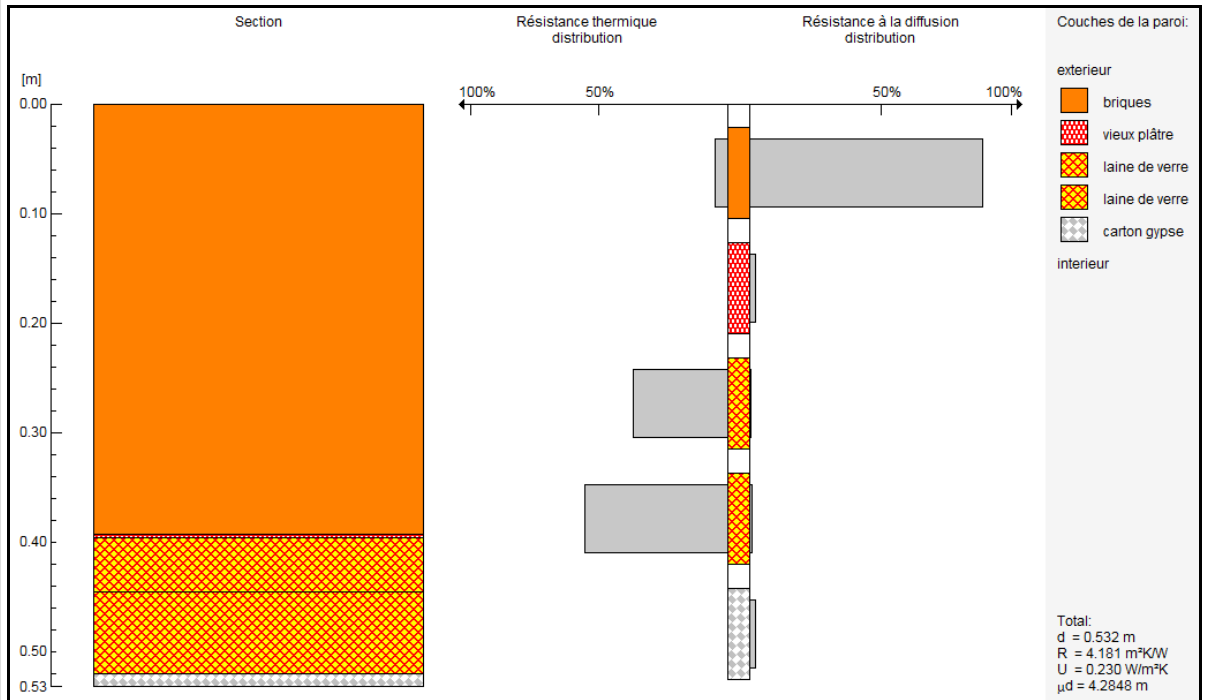


Fig. 15 : Glasta : Comparaison des résistances au transfert de chaleur (partie gauche du graphique) et de vapeur d'eau (partie droite) du mur existant isolé par l'intérieur

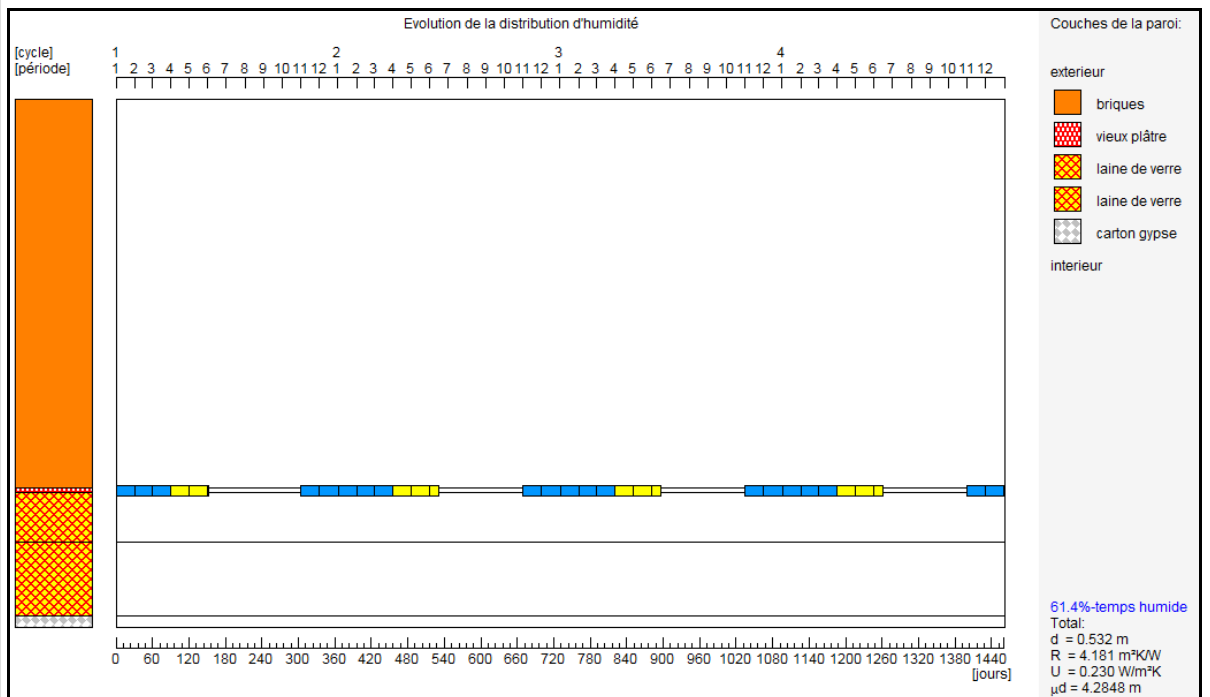


Fig. 16 : Glasta : Evolution et distribution d'humidité dans le mur existant isolé par l'intérieur en classe de climat 3.

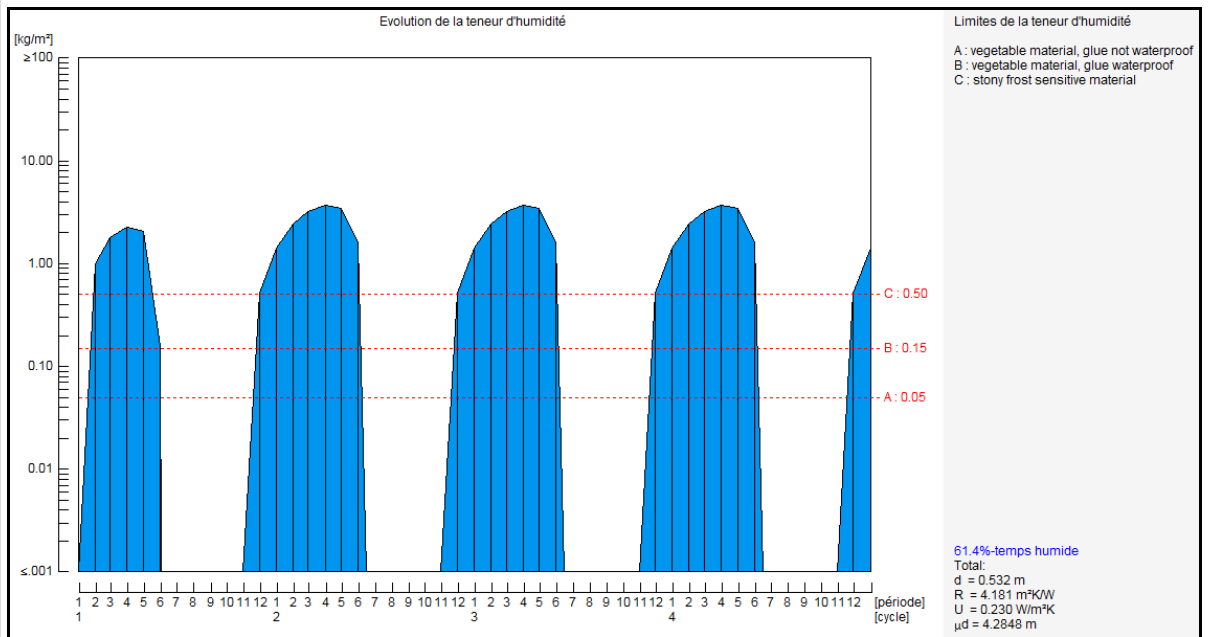


Fig. 17 : Glasta : Evolution de la teneur en humidité (quantités de condensats) du mur existant isolé par l'intérieur (climat 3)

Remarquons que les résultats sont similaires en classe de climat 2 :

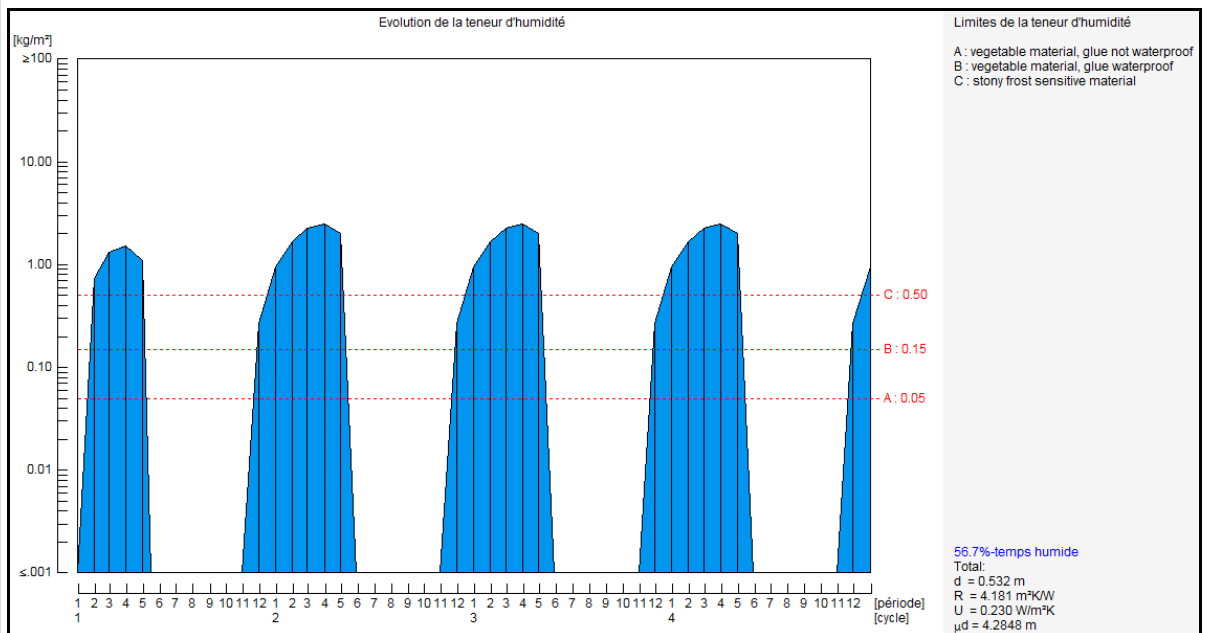


Fig. 18 : Glasta : Evolution de la teneur en humidité (quantités de condensats) du mur existant isolé par l'intérieur (climat 2)

Si nous ajoutons un pare-vapeur (de type feuille de polyéthylène, avec un μd de 10 m) en classe de climat 3, la condensation se fera toujours au même endroit mais en moindre quantité.

Bien qu'encore relativement élevée, cette quantité de condensats reste acceptable, d'autant que les conditions de climat imposées sont localement (cuisine, salle d'eau) et temporellement limitées. Il est bien sûr toujours possible d'utiliser un pare-vapeur, ou un isolant, plus résistant à la diffusion de vapeur d'eau.

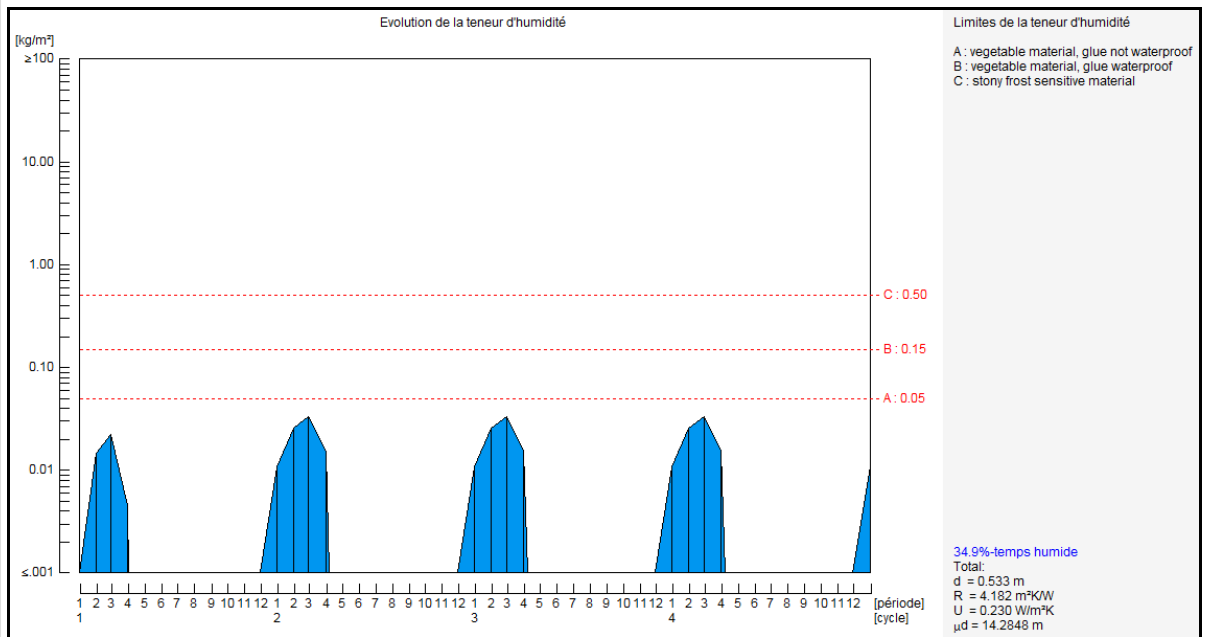


Fig. 19 : Glasta : Evolution de la teneur en humidité (quantités de condensats) du mur existant isolé par l'intérieur (climat 3, avec pare-vapeur dont le $\mu d = 10$ m)

À la lumière de ce que nous venons d'analyser (notamment la responsabilité de l'isolant, son emplacement intérieur et sa faible résistance au transfert de vapeur d'eau), il est inutile d'analyser la composition « alternative » dans laquelle la structure en acier a été remplacée par une structure en bois.

2.2.

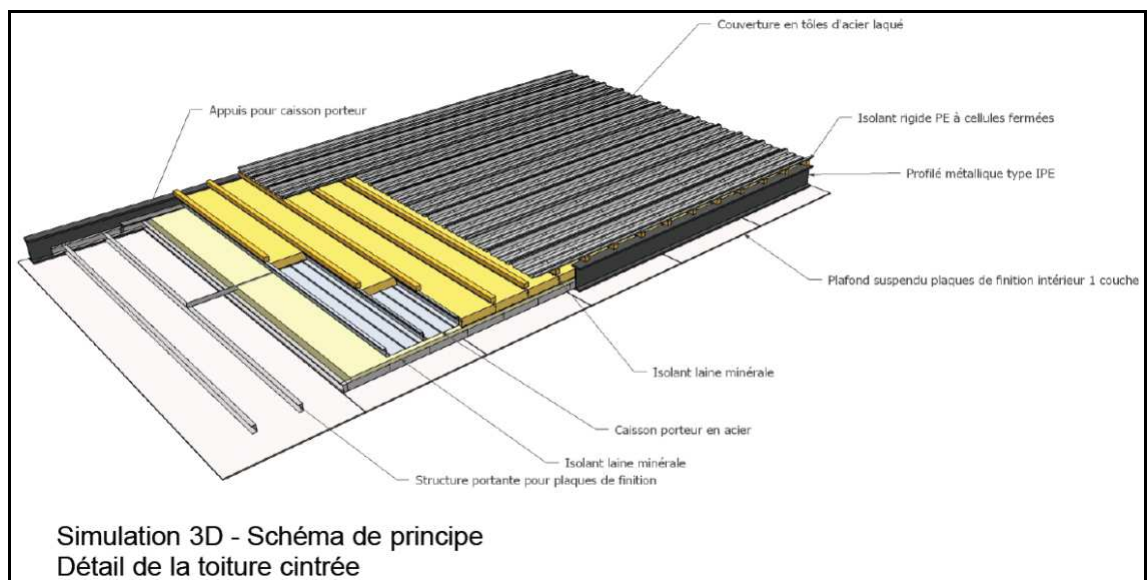


Fig. 20 : schéma de principe de composition de la toiture cintrée

Nous allons suivre, pour analyser la nouvelle toiture qui surplombera le dernier étage, le même raisonnement que celui que nous avons appliqué concernant le mur. La composition prévue sera donc présentée et analysée, ainsi qu'une variante « traditionnelle » en bois.

2.2.1. 8 & ;

La composition qui a été encodée dans le logiciel PEB reprend les spécifications des architectes et de l'ingénieur qui a dimensionné la toiture (voir figure ci-dessus issue des plans de l'ingénieur diffusés avec l'accord des architectes). La toiture repose sur 2 poutres cintrées IPE 240 en acier et une poutre de même épaisseur (240 mm) en béton, placée le long du mur mitoyen de la rue Ferrer (aucun de ces trois élément de structure n'est encodé dans la PEB). Entre ces poutres sont placés des bacs en acier, profonds de 9 cm, remplis d'isolant, et sur lesquels la couverture en tôle d'acier est posée (séparées cependant des bacs par des rupteurs thermiques en polyéthylène extrudé). Sous les bacs, un plenum est disponible pour renforcer l'isolation et placer les techniques éventuelles ; une double plaque de plâtre referme le complexe de toiture.

Il a été décidé en cours de chantier qu'une couche supplémentaire d'isolant serait ajoutée au-dessus des bacs, afin de remplir l'espace laissé libre sous la couverture (entre les rupteurs thermiques), notamment parce que cet espace ne peut être ventilé (pour éviter de court-circuiter la rupture thermique).

La première composition ne comportait que 9 cm d'isolant placés à l'intérieur des bacs. Les remarques que nous avons formulées concernant la trop faible épaisseur d'isolant et le non-respect de la réglementation (la valeur U était proche de 0,7 W/m²K alors que la réglementation impose un U_{max} de 0,3 W/m²K) en découlant ont été prises en compte, et l'on a rempli une partie du plenum de la toiture de 10 cm d'isolant supplémentaires, ne laissant vides que les espaces nécessaires au passage des techniques en toiture.

Extérieur						Résistance superficielle int. Rsi = 0,04 [m ² K/W]	
#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	Options	R [m ² K/W]	...	
1	Simple	Acier (Métaux) - λU: 50.0	7.5E-4		0,00	✖	
2	Composée	Polyéthylène extrudé (PEF) (Matériaux isolants) - λU: 0.045 Naturoll 035	0.04	Ⓢ Ⓡ	0,17	✖	
3	Composée	Acier (Métaux) - λU: 50.0 - λU: 0.035	0.09	Ⓢ Ⓡ	0,115	✖	
4	Simple	Acier (Métaux) - λU: 50.0	6.0E-4		0,00	✖	
5	Simple	- λU: 0.035	0.1	Ⓡ Ⓢ	2,857	✖	
6	Composée	Acier (Métaux) - λU: 50.0 Air non ventilé (Air)	0.1	Ⓢ	0,073	✖	
7	Simple	Plaques de plâtre entre deux couches de carton (Matériaux hétérogènes)	≤ 0.014		0,05	✖	

Intérieur		Résistance thermique (surface à surface) Rt = 3,27 [m ² K/W]	
		Résistance superficielle int.	Rsi = 0,10 [m ² K/W]
		Résistance thermique totale	RT = 3,41 [m ² K/W]
		Valeur U indicative	U = 0,30 [W/m²K]

Fig. 21 : PEB : composition de la toiture cintrée et valeur U

Le coefficient de transmission thermique de la toiture (sans tenir compte des ponts thermiques linéaires singuliers que constituent les 3 poutres cintrées) calculé par la PEB est de 0,298 W/m²K pour cette toiture.

2.2.2. > 0 #
, A

Les dimensions et valeurs lambda sont identiques à celles renseignées dans la composition PEB. Dans le cas présent, nous n’avons pas tenu compte de la poutre centrale. Nous veillerons, pour la comparaison, à faire tourner le logiciel Trisco sur un deuxième modèle, plus complet, tenant compte de cette structure en acier, pour en déterminer l’effet (il s’agira bien là d’un nœud constructif : voir le point 4.2.8).

Le modèle que nous présentons offre une surface d’échange de [1,8 m * 1,305 m =] 2,349 m² au transfert de chaleur. Une différence de température de 30°C a été imposée entre l’intérieur et l’extérieur.

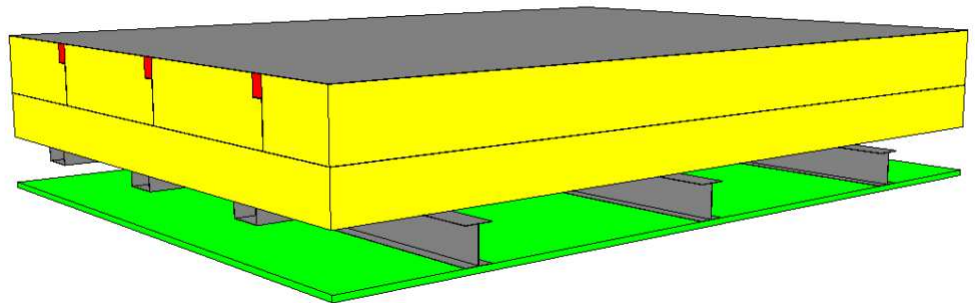


Fig. 22 : Trisco : vue 3D du modèle de la toiture cintrée

% & * 9

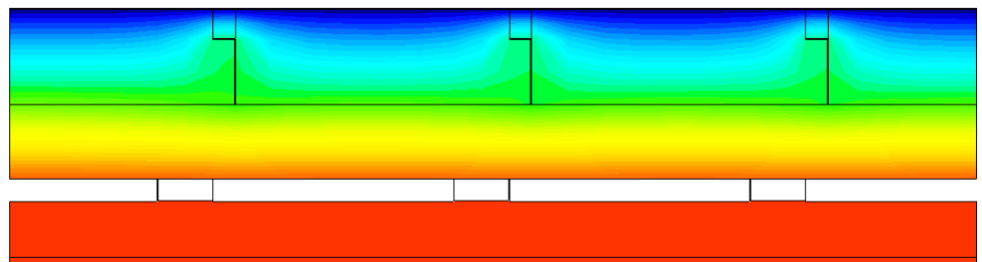
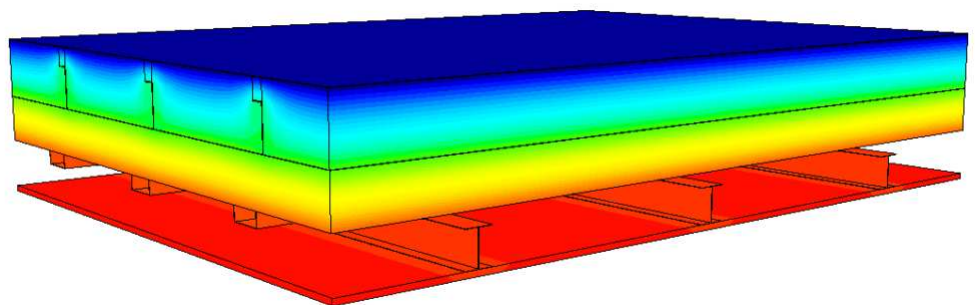


Fig. 23 : Trisco : vue 3D et coupe des résultats graphiques du modèle de la toiture cintrée

% 9

Le flux entre l’intérieur et l’extérieur est de 7,94 W, pour une différence de



température de 20°C, et une paroi de 2,349 m² de surface.

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
2	BC_SIMPL	EXTERIEUR	0.10	1	0	20	0.22	47	34	20
3	MATERIAL	plâtre	19.27	26	24	2	19.60	0	44	1
4	MATERIAL	polyéthylène	0.20	28	8	19	7.31	51	33	17
6	BC_SIMPL	INTERIEUR	19.38	25	24	1	19.60	0	44	1
7	MATERIAL	laine de verre	0.10	36	0	19	18.28	47	44	10
8	MATERIAL	acier	0.10	1	0	20	19.36	40	0	2
13	BC_FRE_S	fx-plaf 2	18.22	43	19	10	19.54	17	44	2

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
2	BC_SIMPL	EXTERIEUR		0.00	7.94
6	BC_SIMPL	INTERIEUR		7.94	0.00
13	BC_FRE_S	fx-plaf 2	18.92	7.94	7.94

Fig. 24 : Trisco : résultats numériques du modèle de la toiture cintrée (ΔT = 20°C)

Cela nous donne donc une valeur $U = 7,94 / (20 * 2,349) = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$, au lieu des 0,298 W/m²K annoncés par le logiciel PEB. Dans ces conditions de température (ΔT = 20°C), la température minimale atteinte dans le plenum est de 18,22°C, ce qui semble y confirmer l'absence de condensation superficielle. Cependant, sachant que de l'isolant a été rajouté sous les bacs en acier (qui jouent un rôle de pare-vapeur dans la composition), une étude supplémentaire de la toiture avec Glasta a confirmé le risque potentiel de condensation dans le complexe de toiture, et la nécessité de placer un pare-vapeur, côté intérieur.

2.2.3.

Comme dans l'exemple du mur, nous ne pouvons modéliser le transfert en trois dimensions dans Glasta. Nous ne tiendrons pas compte, à l'instar de ce que nous avons fait dans le cas du mur, de la configuration qui ne passe qu'à travers l'acier, sachant la très faible représentativité de cette composition.

8 0 &

6'

Paroi: RENO2020_TOITURE ACIER.WAL Commentaire:

Totals: d [m] 0.3438 U [W/m²K] 0.141 Rc [m²K/W] 6.919 μd [m] 108.4

Représentation graphique: horizontal vertical Echelle auto Echelle [m]: 0.00

côté 1: extérieur h1 [W/m²K] 25.000 μd-1 [m] 0.0014

No.	Nom	d [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	μ [-]	μd [m]	hup [-]	wcr [kg/m³]	wmax [kg/m³]	w [kg/m³]	pa [-]
1	acier	0.0008	50.000	0.000	8.0e+004	60	<input type="checkbox"/>				
2	laine de verre	0.0400	0.035	1.143	1.0	0.04	<input type="checkbox"/>				
3	laine de verre	0.0900	0.035	2.571	1.0	0.09	<input checked="" type="checkbox"/>	950.000	950.000	0.000	
4	acier	0.0006	50.000	0.000	8.0e+004	48	<input type="checkbox"/>				
5	laine de verre	0.1000	0.035	2.857	1.0	0.1	<input checked="" type="checkbox"/>	950.000	950.000	0.000	
6	vide H ^a 5cm	0.1000	0.310	0.323	0.0	0.002	<input type="checkbox"/>				
7	carton gypse	0.0125	0.500	0.025	10.0	0.125	<input checked="" type="checkbox"/>	250.000	500.000	0.000	

côté 2: intérieur h2 [W/m²K] 7.700 μd-2 [m] 0.0084

Fig. 25 : Glasta : composition de la toiture cintrée

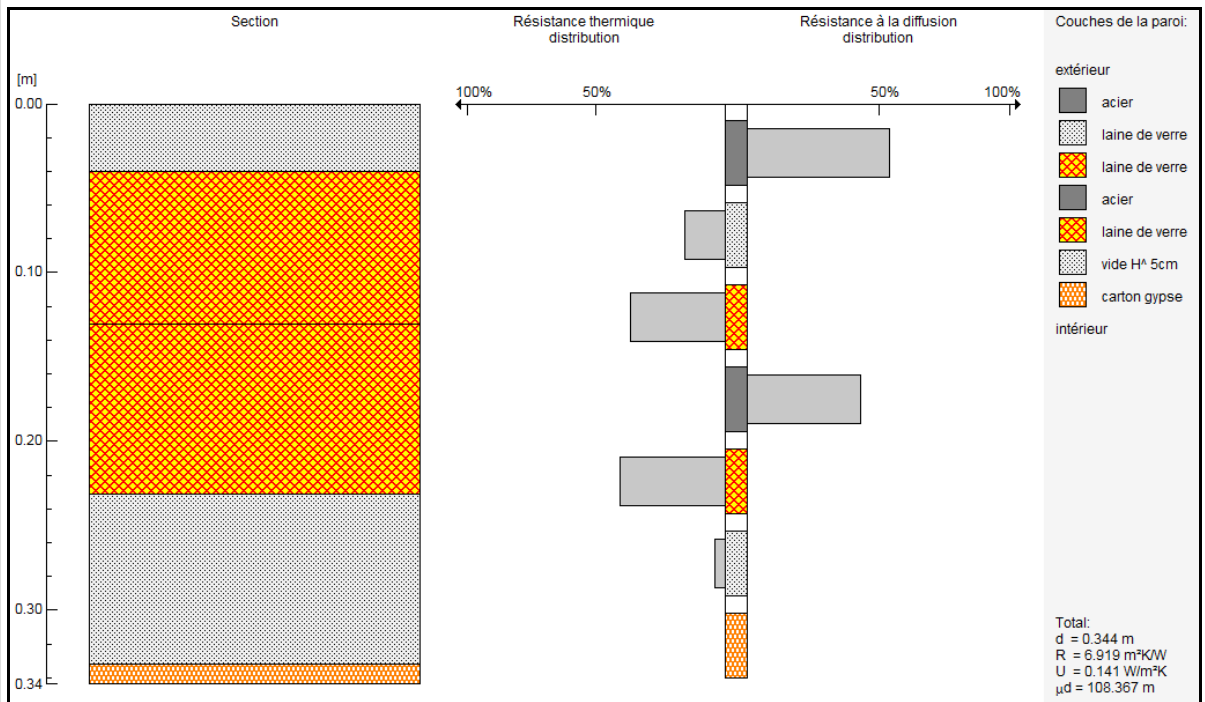


Fig. 26 : Glasta : composition (graphique) de la toiture cintrée et comparaison des résistances au transfert de chaleur (partie gauche du graphique) et de vapeur d'eau (partie droite) de la toiture cintrée

Comme nous pouvons le constater sur les figures ci-dessous, les résultats sont semblables à ceux relevés pour le mur et sa contre-cloison intérieure.

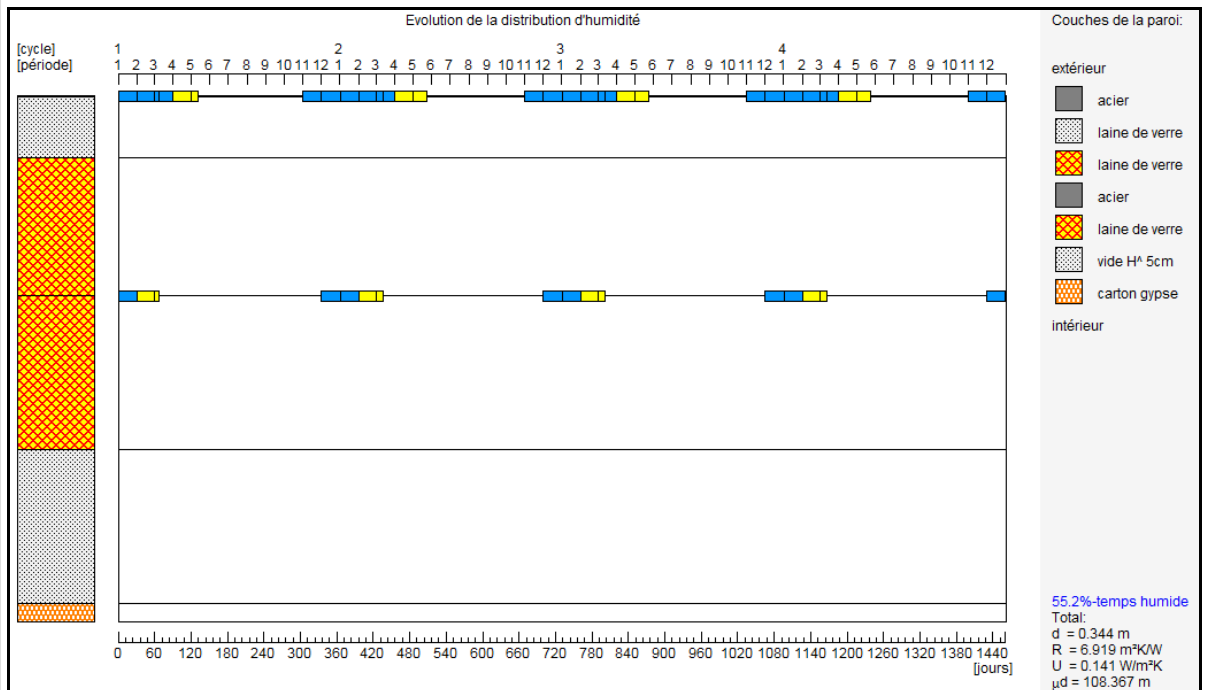


Fig. 27 : Glasta : évolution et distribution d'humidité dans la toiture cintrée

L'image indique que la condensation se fait en deux endroits : à l'interface entre les plaques d'acier (fond du bac) et l'isolant en sous-face (la résistance théorique de l'acier au passage de la vapeur, presque infinie, a été réduite pour tenir compte des « joints » par lesquels la vapeur peut passer) ; le

revêtement extérieur constitue un autre écran pare-vapeur en acier.

L'image ci-dessous montre l'importante quantité de condensats dans le complexe. Nous avons donc un double problème : la présence d'acier en plaques, qui oppose une résistance très importante au transfert de vapeur (et constitue donc un bon pare-vapeur), et la présence d'isolant du côté intérieur (chaud). La condensation n'est pas une surprise dans ce cas.

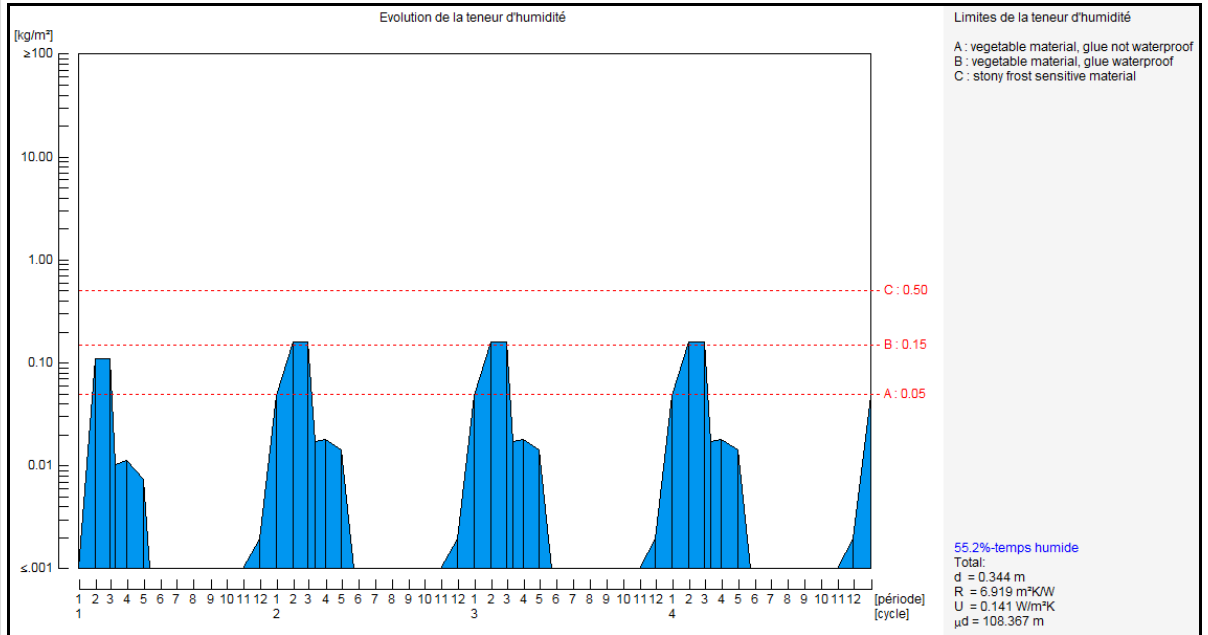


Fig. 28 : Glasta : évolution de la teneur d'humidité dans la toiture cintrée (situation initiale)

= B

1. Placer un pare-vapeur du côté intérieur afin de limiter le transfert au travers de la toiture (par exemple de type Intello avec un μd de 10 m) :

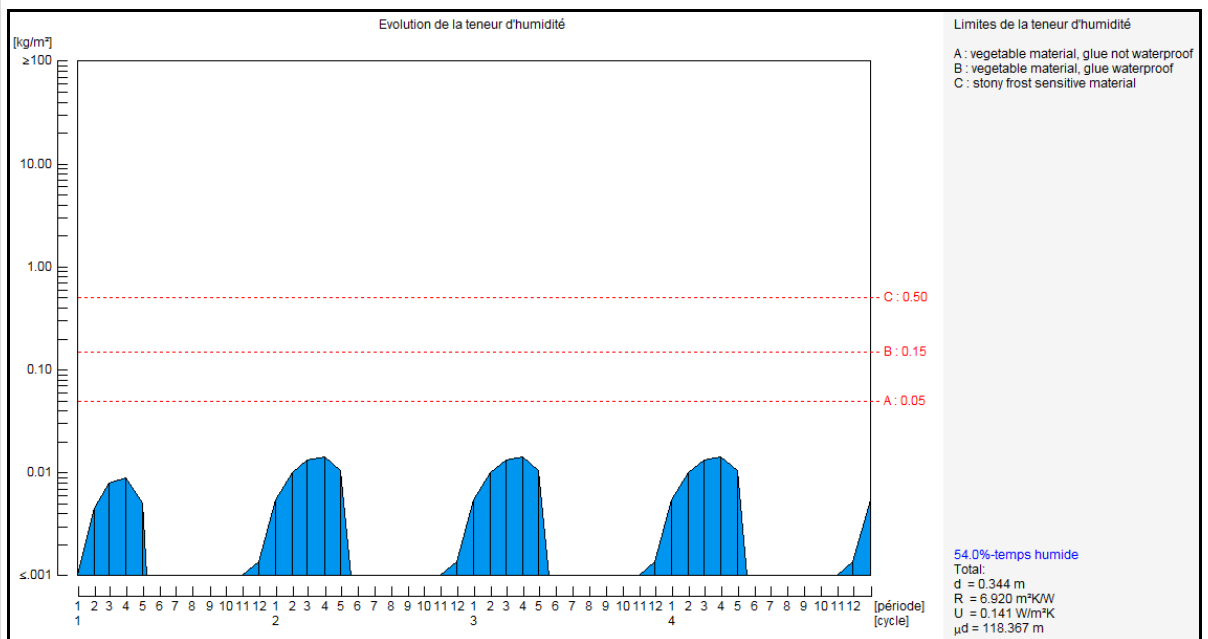


Fig. 29 : Glasta : évolution de la teneur d'humidité dans la toiture cintrée (avec pare-vapeur, $\mu d = 10$ m)

Les quantités de condensats (que l'on retrouve évidemment aux mêmes endroits) s'en trouvent diminuées à un niveau acceptable, compte tenu de la capacité de séchage annuelle.

2. Remplacer l'isolant en sous-face par un autre, qui possède une meilleure résistance au transfert de vapeur d'eau ; dans l'exemple ci-dessous, nous avons remplacé la laine de verre ($\mu = 1,3$) par du polystyrène extrudé ($\mu = 150$), et le pare-vapeur a été supprimé de l'équation. On remarque des résultats similaires à ceux de la solution « pare-vapeur Intello » ci-dessus.

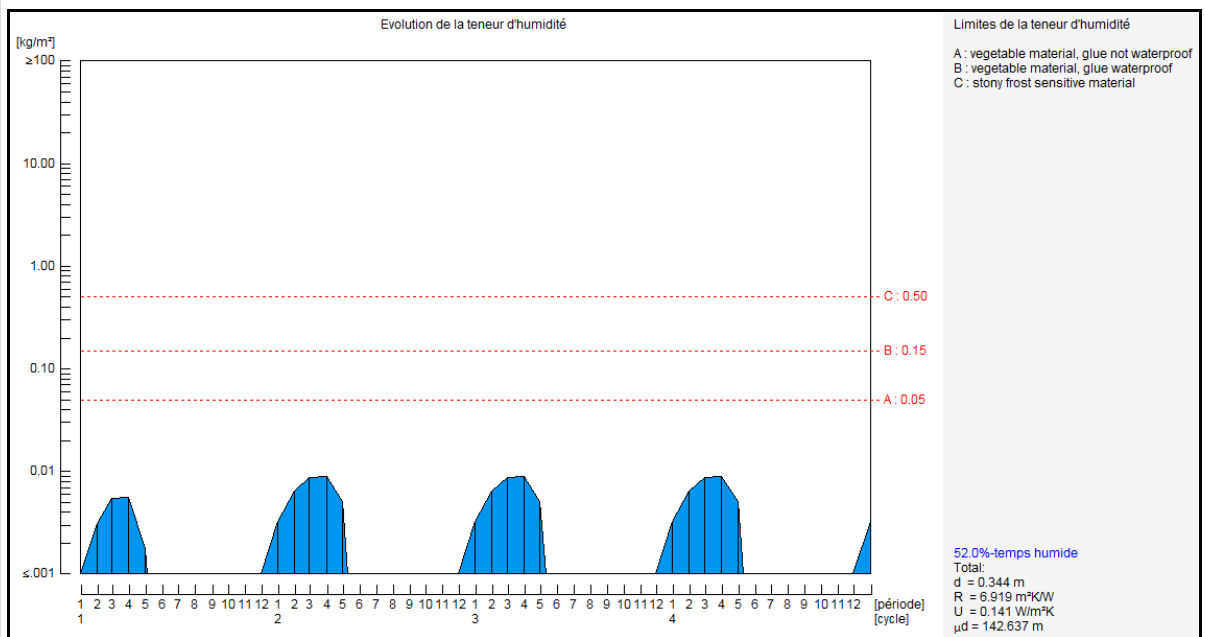


Fig. 30 : Glasta : évolution de la teneur d'humidité dans la toiture cintrée (avec un autre isolant, $\mu = 150$)

2.2.4. 8 ; ;

Comme nous l'avons annoncé plus haut, nous allons étudier, à titre de comparaison, le transfert thermique dans une toiture plus « traditionnelle » (avec une structure bois) ; nous ne retrouverons donc plus d'acier dans la composition. Les grandes poutres cintrées en acier sont remplacées par du lamellé-collé, sur lesquelles des pannes sont accrochées pour former la structure primaire. Le bac en acier structurel disparaît donc lui aussi, pour faire place à une structure faite de pannes et de chevrons. Nous allons supprimer les rupteurs thermiques en polyéthylène, qui n'ont aucune raison d'être dans une toiture traditionnelle ; ils étaient entourés d'isolant dans la version acier, ils seront entourés d'une lame d'air fortement ventilée dans la structure en bois. L'épaisseur d'isolant sera identique à celle introduite dans la première modélisation (soit 23 cm), mais répartie différemment (5 cm entre les chevrons, 18 cm entre les pannes). L'espace résiduel servira de vide technique, comme dans la version acier.

Les fractions de bois ne seront cette fois pas prises par défaut, puisque nous devons vérifier la concordance des résultats avec une simulation Trisco :

- Pannes : au vu des plans de l'ingénieur et de la portée maximale des pannes, nous opterons pour une section 17,5 cm * 6,3 cm avec un entraxe de 90 cm.

La fraction de bois que nous en déduisons est donc de 7%.

- o Chevrons : de section 5 cm * 6 cm, ils sont posés avec un entraxe de 40 cm, ce qui nous donne une fraction de bois de 15%.

Le coefficient U calculé est de **0,19 W/m²K**.

Extérieur					Résistance superficielle int. Rsi = 0,10 [m ² K/W]	
#	Type de la couche	Type de matériau	Épaisseur [m]	Options	R [m ² K/W]	
1	Simple	Air fortement ventilé (Air)	-		0,00	✖
2	Composée	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - λU: 0.18 - λU: 0.035	0.05	⊙ ⊕	0,881	✖
3	Composée	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - λU: 0.18 - λU: 0.035	0.18	⊙ ⊕	3,987	✖
4	Composée	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - λU: 0.18 Air non ventilé (Air)	0.1	⊙	0,174	✖
5	Simple	Plaques de plâtre entre deux couches de carton (Matériaux hétérogènes)	≤ 0.014		0,05	✖

Intérieur		Résistance thermique (surface à surface) Rt = 5,09 [m ² K/W]	
		Résistance superficielle int.	Rsi = 0,10 [m ² K/W]
		Résistance thermique totale	RT = 5,29 [m ² K/W]
		Valeur U indicative	U = 0,19 [W/m²K]

Fig. 31 : PEB : composition alternative de la toiture cintrée et valeur U

2.2.5. 5 # 7

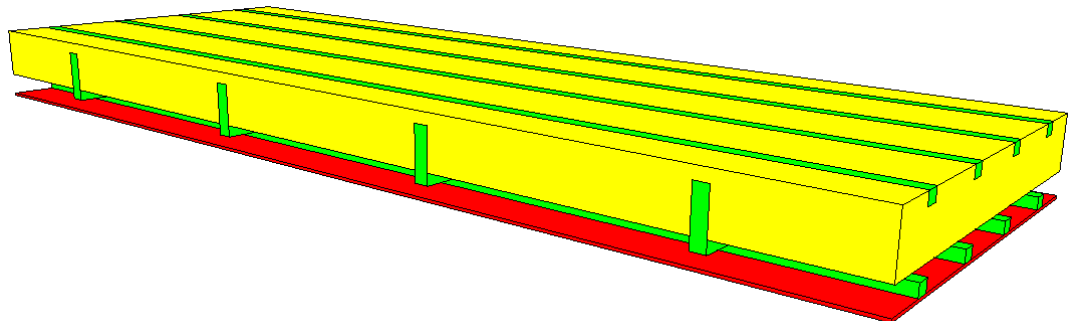


Fig. 32 : Trisco : vue 3D du modèle alternatif de la toiture cintrée

Les lattes, contre-lattes et recouvrements n'ont pas été modélisés. La coulisse étant fortement ventilée, ces éléments n'interviennent pas dans le transfert de chaleur (à part pour limiter l'influence du vent sur le transfert de chaleur, ce dont nous avons tenu compte en donnant à la condition limite extérieure une valeur du coefficient de transfert thermique par convection $h_e = h_i = 7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Pour une différence de température de 20°C entre l'intérieur et l'extérieur, les résultats délivrés par Trisco sont donnés ci-dessous (voir Fig. 33 et 34) : un flux de 26,95 W traverse le complexe de toiture, pour une surface d'échange de $[4,863 \text{ m} \times 1,663 \text{ m}] = 8,087 \text{ m}^2$.

Par conséquent, **$U = 26,95 / (20 \times 8,087) = 0,167 \text{ W/m}^2\text{K}$** .

Les calculs selon la PEB et selon les règles du transfert de chaleur appliqué en 3 dimensions donnent des résultats, sinon semblables, au moins très proches.

Clr. Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	BC_SIMPL interieur	19.56	79	5	1	19.61	69	6	1
2	BC_SIMPL exterieur	0.25	92	28	12	1.43	13	6	12
3	MATERIAL bois de charpen	0.48	92	7	12	19.57	68	6	2
4	MATERIAL plaques de plât	19.49	79	5	2	19.61	69	6	1
7	MATERIAL isolant Naturol	0.25	92	28	12	18.79	77	0	6
8	BC_FRE_S plenum	18.00	80	20	6	19.51	68	27	2

Clr. Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
1	BC_SIMPL interieur		26.95	0.00
2	BC_SIMPL exterieur		0.00	26.95
8	BC_FRE_S plenum	19.07	26.79	26.79

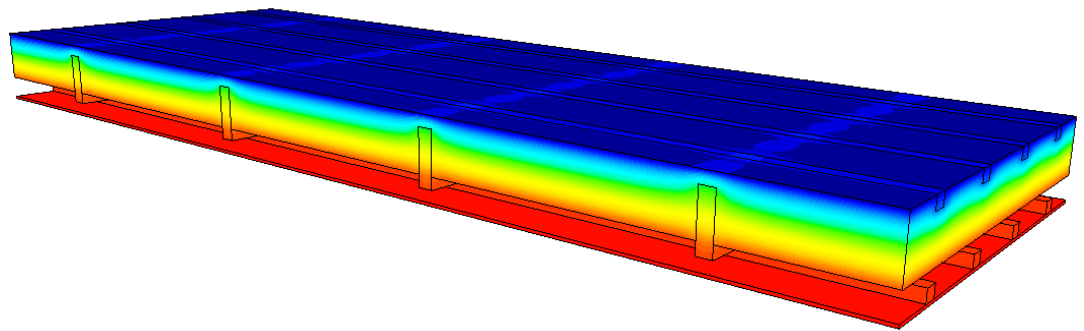
Fig. 33 : Trisco : résultats numériques du modèle alternatif de la toiture cintrée ($\Delta T = 30^\circ\text{C}$)

Fig. 34 : Trisco : vue 3D des résultats graphiques du modèle alternatif de la toiture cintrée

2.3. % &

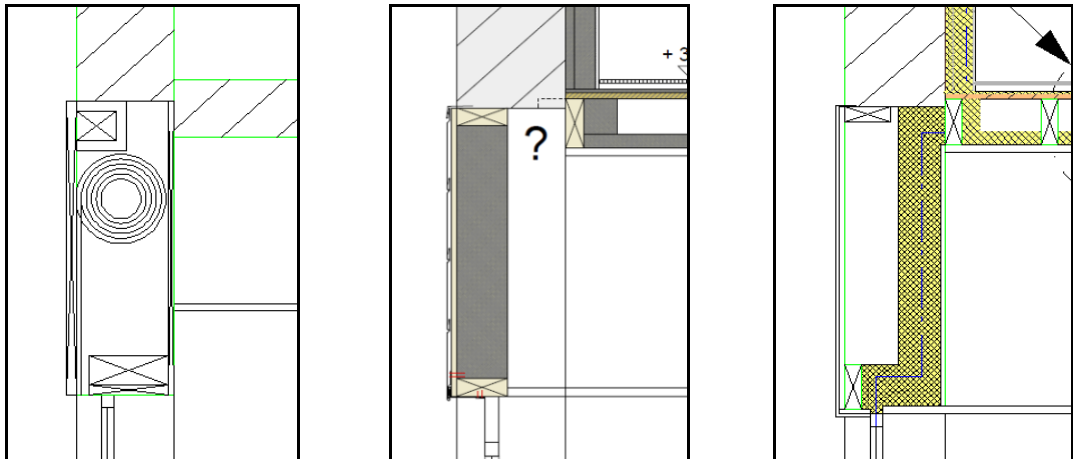


Fig. 35 : vue en coupe de la situation initiale, de la proposition des architectes et de celle d'EnergySuD pour les caissons à volets

Le démontage des panneaux publicitaires en façade a permis de découvrir des caissons à volets dissimulés (invisibles également de l'intérieur, cachés par le faux-plafond). Le démontage et l'évacuation de ces volets a été réalisé, ainsi que leur remplacement par un remplissage bois/isolant sur une épaisseur de 14 cm. Ci-dessus (Fig. 35) et de gauche à droite, la situation initiale, la proposition envoyée par les architectes et notre proposition.

2.3.1. :

Selon le logiciel PEB, la valeur U de cette partie de la paroi est de 0,31 W/m²K, grâce à l'épaisse couche d'isolant thermique présente entre les éléments de structure en bois (14 cm) ; Nous avons vu que la prise en compte de ce genre de couche composée était correcte dans le logiciel PEB, nous dispensant ainsi de la vérification par Trisco.

Extérieur					Résistance superficielle int. Rsi = 0,13 [m ² K/W]	
#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	Options	R [m ² K/W]	
1	Simple	Air fortement ventilé (Air)	-		0,00	✖
2	Simple	Panneau d'OSB (Oriented Strand Board) (Bois et dérivés de bois) - λU: 0.13	0.018		0,138	✖
3	Simple	Air non ventilé (Air)	0.25		0,18	✖
4	Composée	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - λU: 0.18 - λU: 0.032	0.14	⊙ ⊕	2,583	✖
5	Simple	Plaques de plâtre entre deux couches de carton (Matériaux hétérogènes)	≤ 0.014		0,05	✖

Intérieur		Résistance thermique (surface à surface) Rt = 2,95 [m ² K/W]	
		Résistance superficielle int.	Rsi = 0,13 [m ² K/W]
		Résistance thermique totale	RT = 3,21 [m ² K/W]
		Valeur U indicative	U = 0,31 [W/m²K]

Fig. 36 : PEB : composition des caissons à volets isolés et valeur U

2.3.2.

Comme pour le mur qui le surplombe, le « caisson à volet » doit faire l'objet d'une analyse dans Glasta pour évaluer la nécessité d'un pare-vapeur.

Paroi:		Commentaire:									
RÉNO2020_CAISSEON_VOLET_AFTEF											
Totals											
d [m]	U [W/m ² K]	Rc [m ² K/W]	μd [m]								
0.4205	0.190	5.010	1.176								
Représentation graphique											
<input checked="" type="radio"/> horizontal <input type="radio"/> vertical		<input checked="" type="checkbox"/> Echelle auto echelle [m]: 0.00									
côté 1:	extérieur	h1 [W/m ² K]	7.700								
		μd-1 [m]	0.0014								
No.	Nom	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	μ [-]	μd [m]	hup [-]	wcr [kg/m ³]	wmax [kg/m ³]	w [kg/m ³]	pa [-]
1	OSB	0.0180	0.130	0.138	50.0	0.9	☒	150.000	200.000	0.000	☒
2	vide V 10cm	0.2500	0.560	0.446	0.0	0.001	☐				☒
3	laine de verre	0.1400	0.032	4.375	1.0	0.14	☒	950.000	950.000	0.000	☒
4	carton gypse	0.0125	0.250	0.050	10.0	0.125	☒	250.000	500.000	0.000	☒
côté 2:		intérieur	h2 [W/m ² K]	7.700		μd-2 [m]	0.0084				

Fig. 37 : Glasta : composition initiale des caissons à volets isolés (proposition d'EnergySuD)

Dans sa composition initiale, nous voyons que la résistance principale à la diffusion de vapeur d'eau se trouve du côté froid de l'isolant (Fig. 38), ce qui n'est pas de bon augure, confirmé par les résultats graphiques ci-dessous (Fig. 39 et 40).

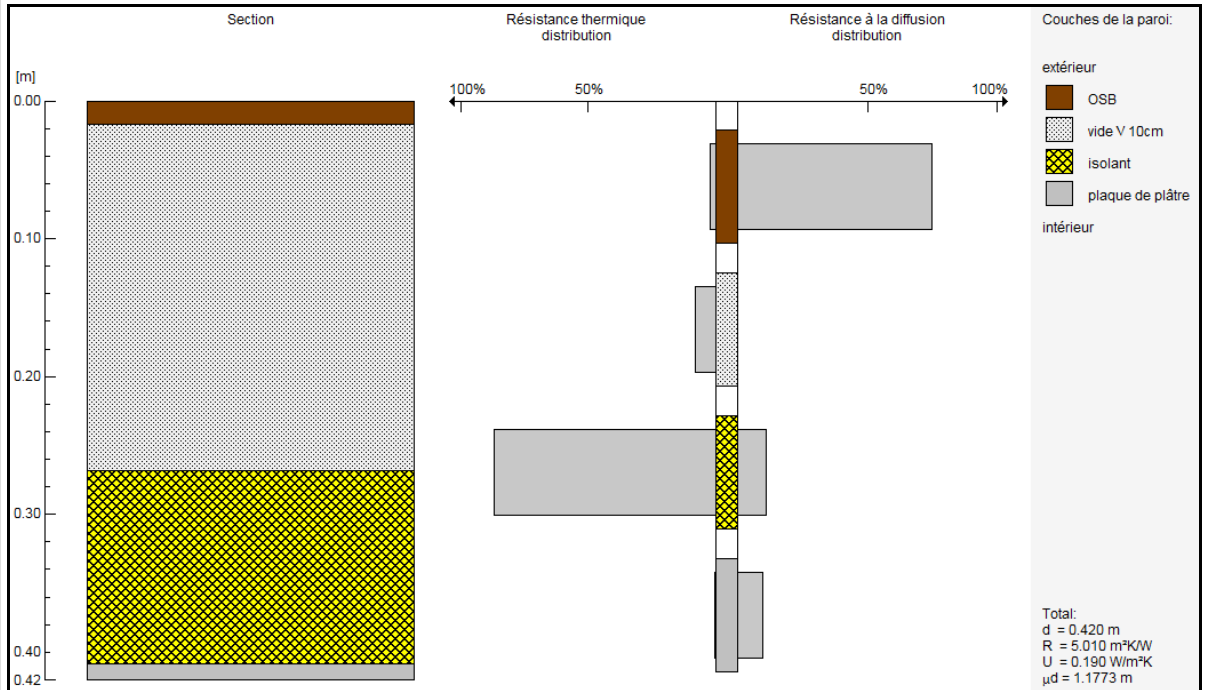


Fig. 38 : Glasta : composition du caisson à volets et comparaison des résistances au transfert de chaleur (à gauche) et de vapeur d’eau (à droite) du caisson à volets (situation initiale – proposition d’EnergySuD)

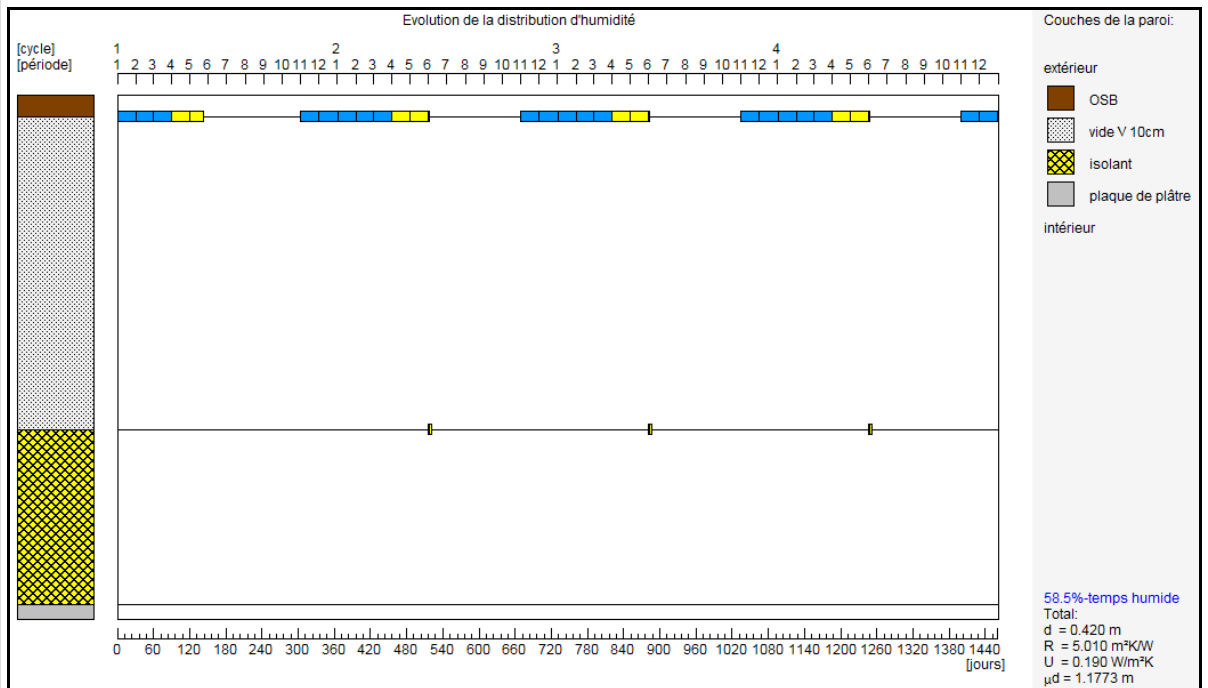


Fig. 39 : Glasta : évolution et distribution d’humidité dans les caissons à volets isolés (situation initiale – proposition d’EnergySuD)

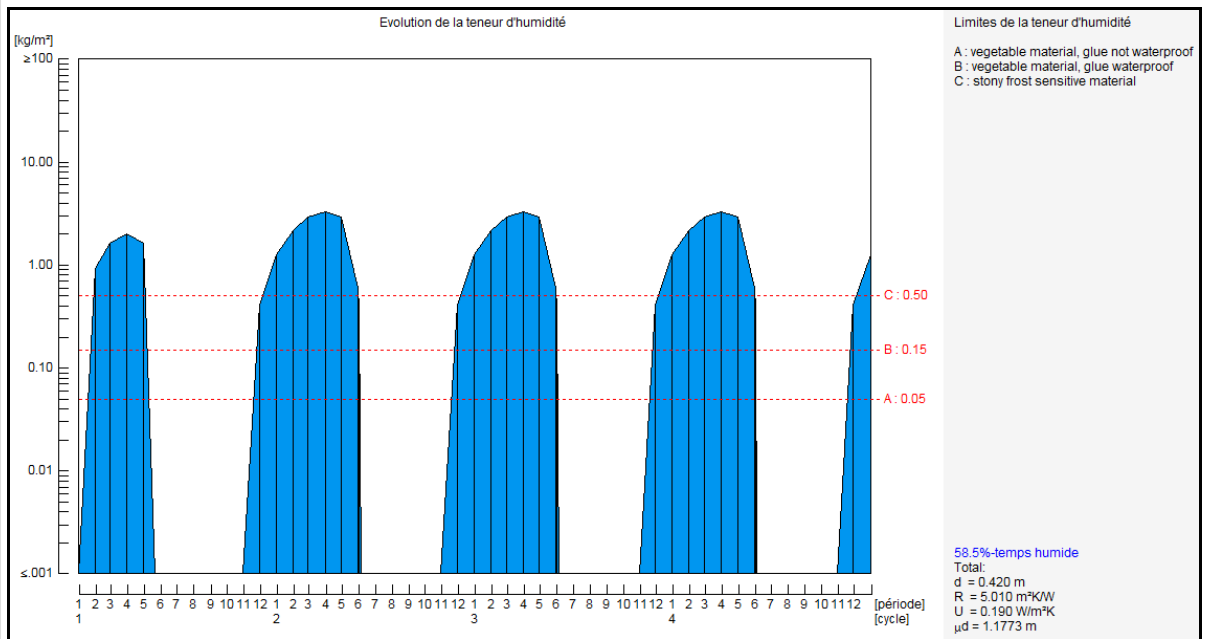


Fig. 40 : Glasta : évolution de la teneur d’humidité dans les caissons isolés (situation initiale – proposition d’energySuD)

Un problème potentiellement important se présente donc. Remarquons qu’ici également, les résultats sont sensiblement les mêmes en classe de climat 2. De même, si nous considérons la composition donnée par les architectes (avec l’isolant accolé à l’OSB), les résultats sont semblables, voire pires si l’on considère que la condensation qui se forme sur la face intérieure de l’OSB est en contact direct avec l’isolant dans ce cas :

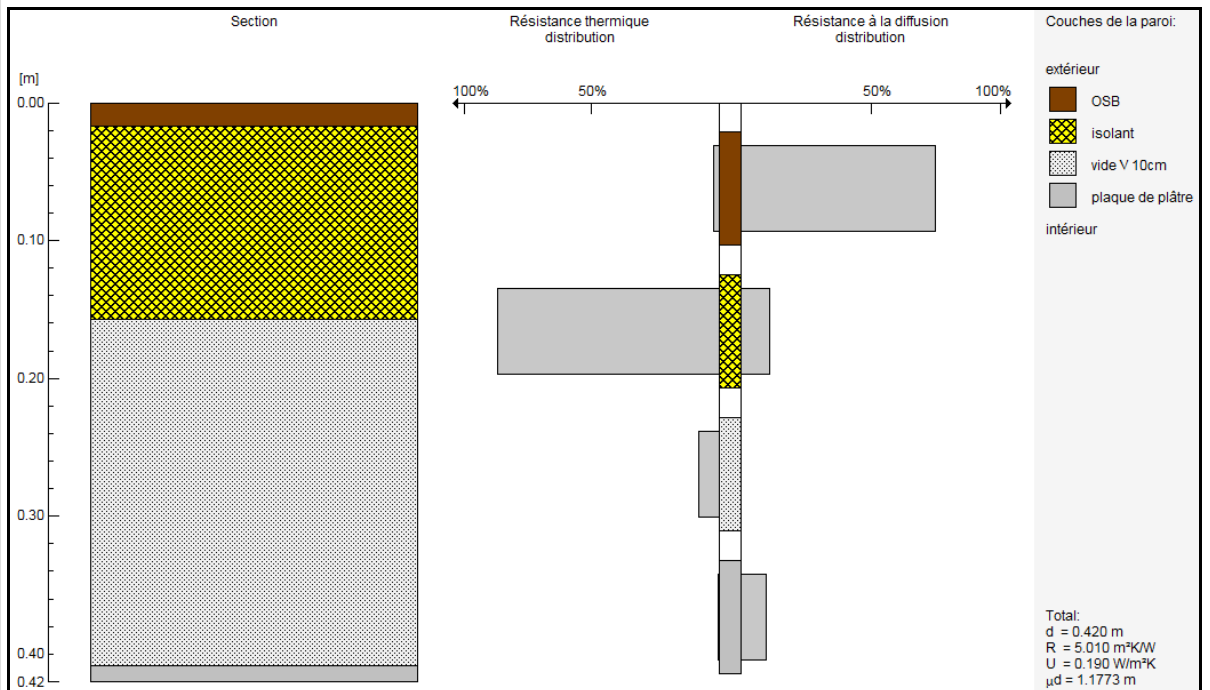


Fig. 41 : Glasta : composition et comparaison des résistances au transfert de chaleur (à gauche) et de vapeur d’eau (à droite) du caisson à volets (situation initiale – proposition des architectes)

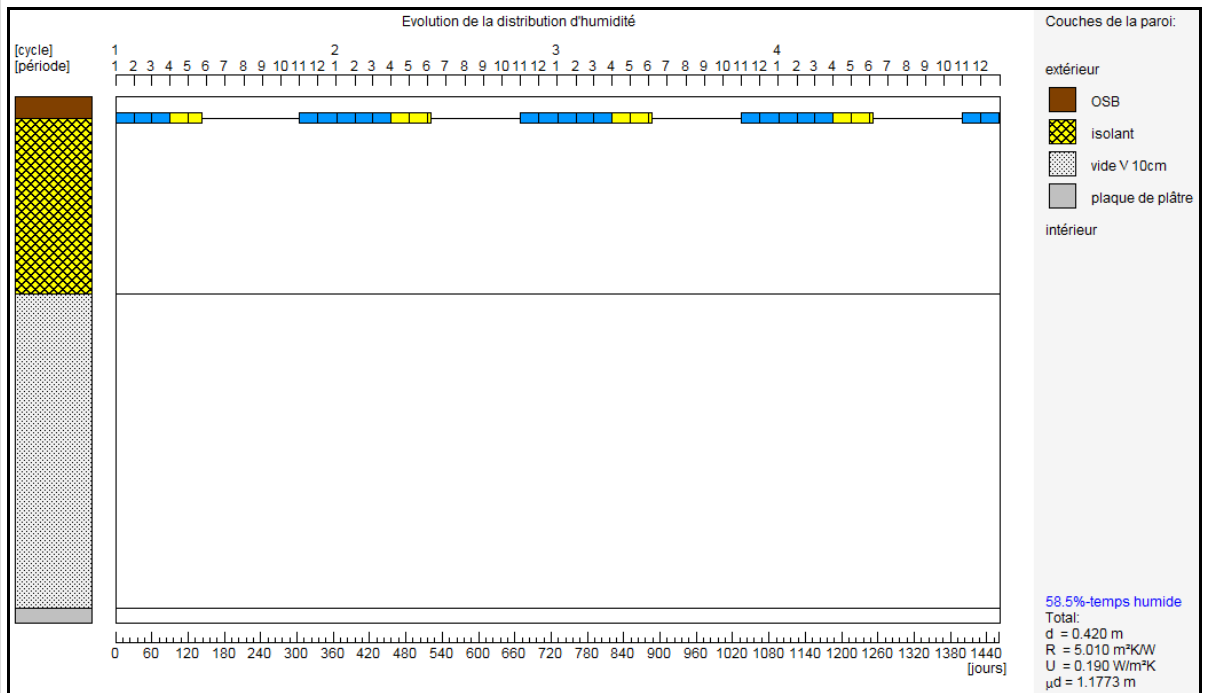


Fig. 42 : Glasta : évolution et distribution d’humidité dans les caissons à volets isolés (situation initiale – proposition des architectes)

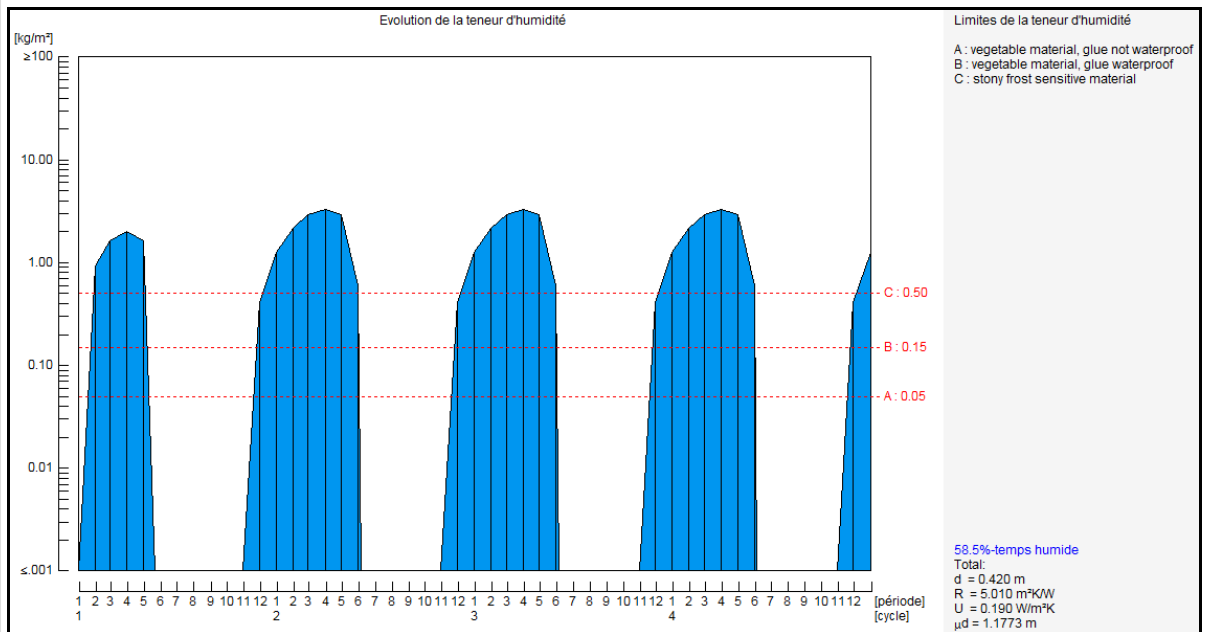


Fig. 43 : Glasta : évolution de la teneur d’humidité dans les caissons isolés (situation initiale – proposition des architectes)

Si l’on considère dorénavant l’isolant du côté intérieur de la cavité (et la classe de climat 3), deux solutions s’offrent à nous : placer un pare-vapeur du côté chaud de l’isolant, ou ventiler la cavité du mur pour permettre le séchage rapide des condensats.

La première solution nous donne, pour une feuille de polyéthylène ($\mu d = 7,5 \text{ m}$) :

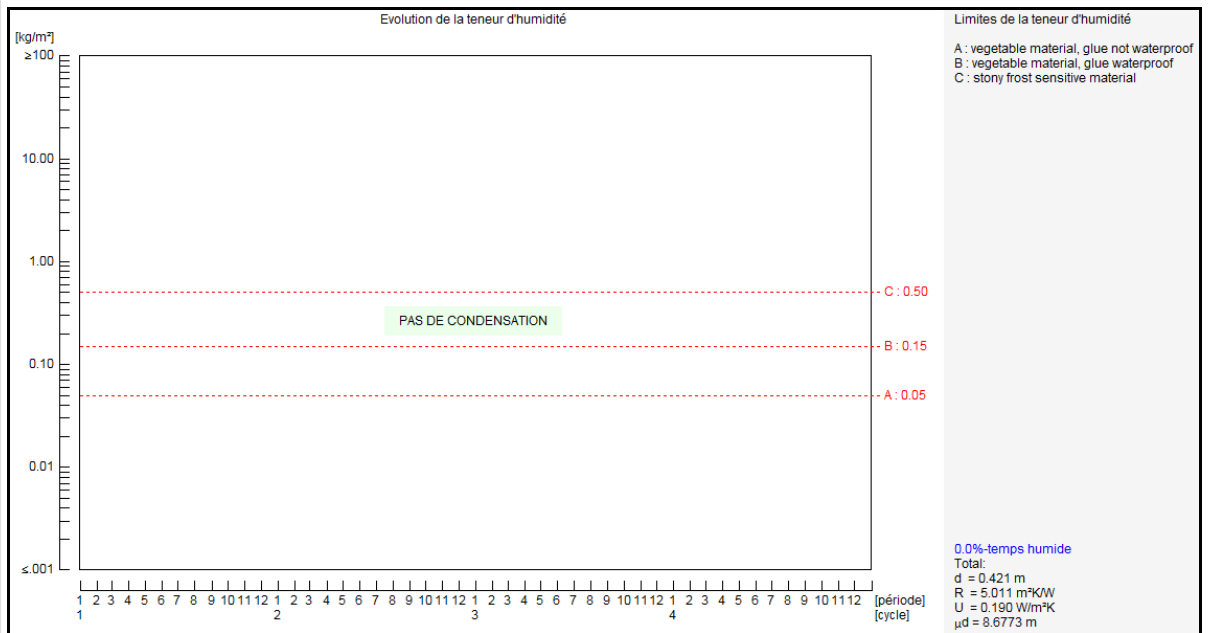


Fig. 44 : Glasta : évolution de la teneur d’humidité dans les caissons isolés (avec pare-vapeur – proposition d’energySuD)

La seconde (en supposant une ventilation suffisante de la cavité, traduite dans le logiciel par la disparition de l’OSB, et une valeur réduite du coefficient de transfert par convection) donne les résultats suivants (ainsi qu’une valeur U de la paroi légèrement supérieure : **0,35 W/m²K**) :

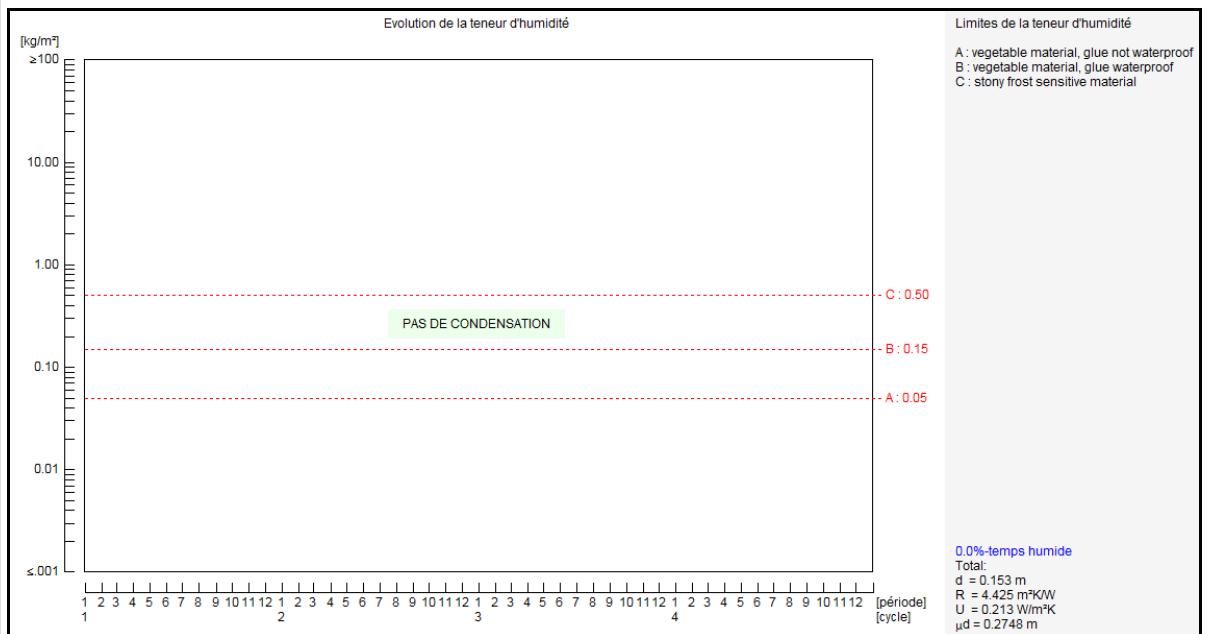


Fig. 45 : Glasta : évolution de la teneur d’humidité dans les caissons isolés (avec ventilation – proposition d’energySuD)

2.4.) " & " * % +

2.4.1. : ;

La composition a été traduite dans le logiciel PEB (voir Fig. 47 ci-dessous), sans tenir compte des éléments métalliques structurels ponctuels telles que les poutres IPE 240 qui reprennent les efforts de la toiture ou la poutre « linteau » du schéma ci-dessous ; les éléments de structure réguliers en bois sont par contre pris en compte dans une couche composée. La composition renseigne une structure de 18 cm en bois, et 14 cm d'isolant en remplissage ; les 4 cm restant étant destinés à un espace technique intérieur, nous les renseignerons comme une couche d'air non ventilé.

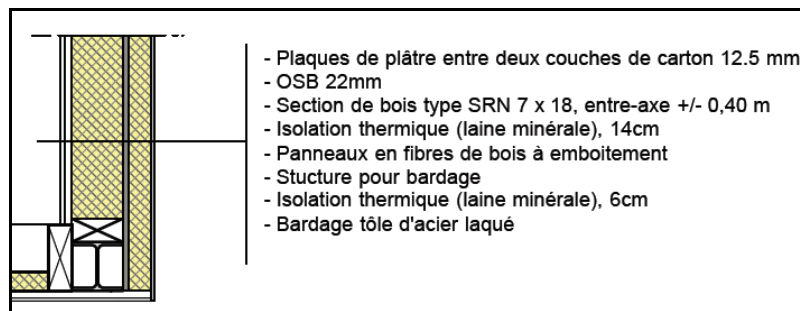


Fig. 46 : Schéma de principe de composition du nouveau mur léger

Les calculs réalisés précédemment (voir 2.2.4 et 2.2.5) nous permettent d'admettre la valeur U calculée par le logiciel PEB dans le cas d'une structure bois (dans le cas présent, **0,22 W/m²K**). Le nœud constructif représenté par la présence d'une structure métallique demandera une analyse spécifique dans la suite du présent rapport (voir point 4.9.3).

Extérieur						Résistance superficielle int. Rsi = 0,13 [m²K/W]	
#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	Options	R [m²K/W]		
1	Simple	Acier (Métaux) - AU: 50.0	0.0020		0,00		✖
2	Simple	Air fortement ventilé (Air)	-		0,00		✖
3	Composée	bois - AU: 0.18 - AU: 0.032	0.06	⊙ ⊕	1,107		✖
4	Simple	Panneau de fibres de bois (y compris MDF) - AU: 0.09	0.016		0,178		✖
5	Composée	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - AU: 0.18 Panneau de fibres de bois (y compris MDF) - AU: 0.032	0.14	⊙ ⊕	2,583		✖
6	Composée	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - AU: 0.18 Air non ventilé (Air)	0.04	⊙	0,185		✖
7	Simple	Panneau d'OSB (Oriented Strand Board) (Bois et dérivés de bois) - AU: 0.13	0.022		0,169		✖
8	Simple	Plaques de plâtre entre deux couches de carton (Matériaux hétérogènes)	≤ 0.014		0,05		✖

Intérieur		Résistance thermique (surface à surface) Rt = 4,27 [m²K/W]	
		Résistance superficielle int.	Rsi = 0,13 [m²K/W]
		Résistance thermique totale	RT = 4,53 [m²K/W]
		Valeur U indicative	U = 0,22 [W/m²K]

⚠ Les couches se trouvant avant la couche d'air fortement ventilée ne seront pas prises en compte.

Fig. 47 : PEB : composition du nouveau mur léger rehaussant le R+3

2.4.2.

Par contre, il y a lieu de vérifier si la composition actuelle ne pose pas de problème majeur vis-à-vis de la diffusion à la vapeur d'eau.

Si une ventilation n'est pas prévue entre l'isolant et la tôle d'acier en bardage, un problème risque à première vue de se poser. Nous avons volontairement abaissé la valeur μ de l'acier (renseignée par Physibel à 10^{12} , ce qui correspond à une plaque d'acier de dimension infinie sans joints) à 10^5 pour tenir compte des joints entre les tôles, comme nous l'avons fait pour l'étude de la toiture.

Paroi:		Commentaire:									
RÉNO2020_NOUVELLE PAROI LÉGÈRE		Ferrer 13 - nouvelle paroi légère qui rehausse la toiture									
Totals:											
d [m]	U [W/m²K]	Rc [m²K/W]	μd [m]								
0.3113	0.140	6.996	82.24								
côté 1: extérieur		h1 [W/m²K]	$\mu d-1$ [m]								
		25.000	0.0014								
No.	Nom	d [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	μ [-]	μd [m]	hup [-]	wcr [kg/m²]	wmax [kg/m²]	w [kg/m²]	pa [-]
1	acier	0.0008	50.000	0.000	1.0e+005	80	□				
2	vide V 2cm	0.0200	0.120	0.167	0.1	0.001	□				
3	laine de verre	0.0600	0.032	1.875	1.0	0.06	☒	950.000	950.000	0.000	☒
4	fibre de bois	0.0160	0.090	0.178	50.0	0.8	☒	150.000	200.000	0.000	☒
5	laine de verre	0.1400	0.032	4.375	1.0	0.14	☒	950.000	950.000	0.000	☒
6	vide V 4cm	0.0400	0.220	0.182	0.0	0.001	□				
7	OSB	0.0220	0.130	0.169	50.0	1.1	☒	150.000	200.000	0.000	☒
8	carton gypse	0.0125	0.250	0.050	10.0	0.125	☒	250.000	500.000	0.000	☒
côté 2: intérieur		h2 [W/m²K]	$\mu d-2$ [m]								
		7.700	0.0084								

Fig. 48 : Glasta : composition initiale du nouveau mur léger rehaussant le R+3

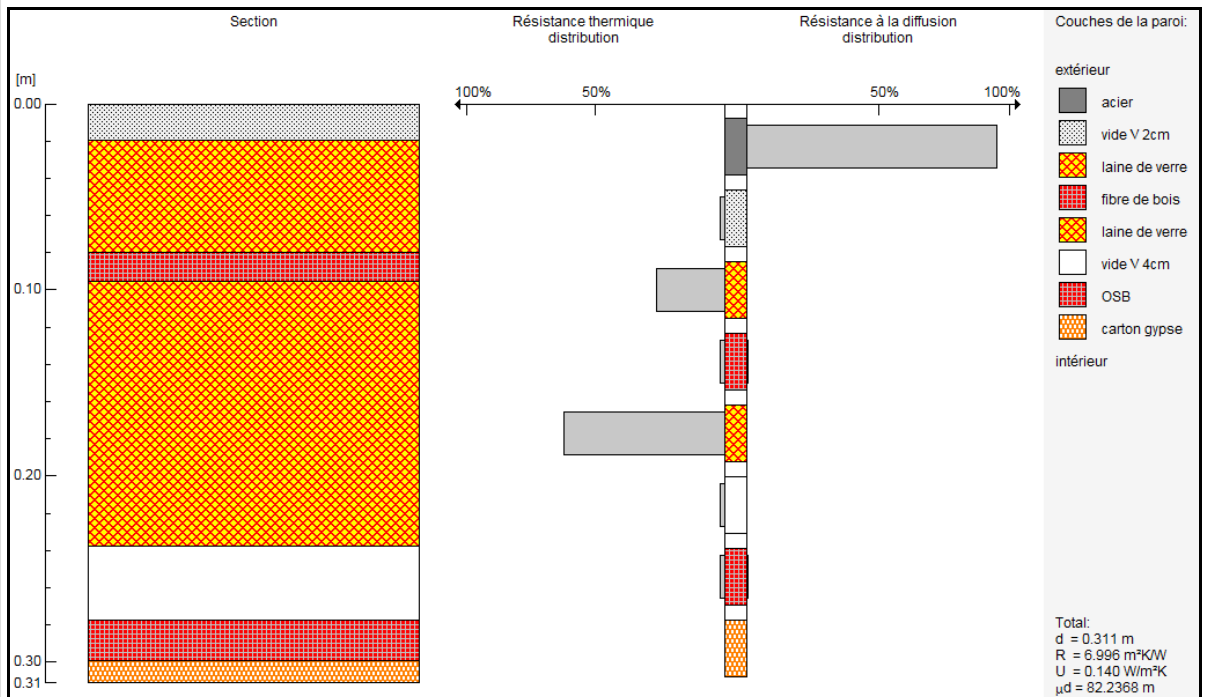


Fig. 49 : Glasta : composition (graphique) et comparaison des résistances au transfert de chaleur (à gauche) et de vapeur d'eau (à droite) du nouveau mur

Les premiers résultats confirment nos craintes :

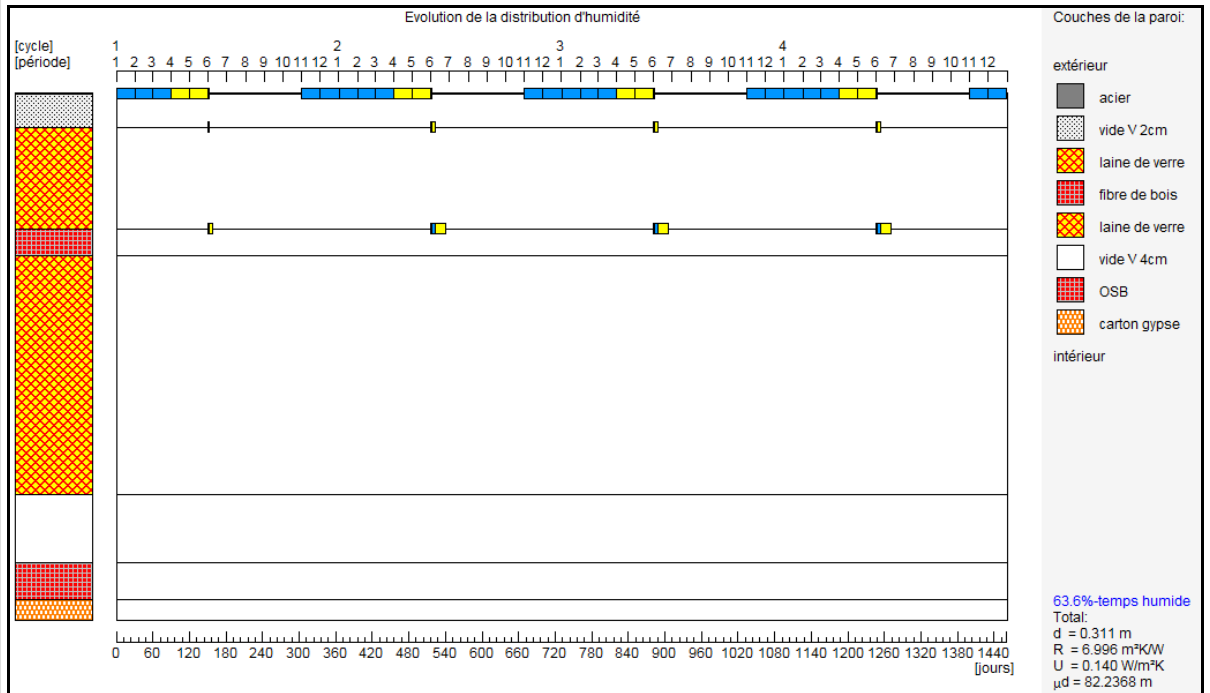


Fig. 50 : Glasta : évolution et distribution d’humidité dans le nouveau mur léger (situation initiale)

De la condensation semble se former à plusieurs interfaces ; la majeure partie se trouve cependant entre l’isolant extérieur et la tôle de bardage. Bien que visiblement les condensats sèchent entre chaque cycle, il faut encore analyser la quantité prédite pour en évaluer la gravité :

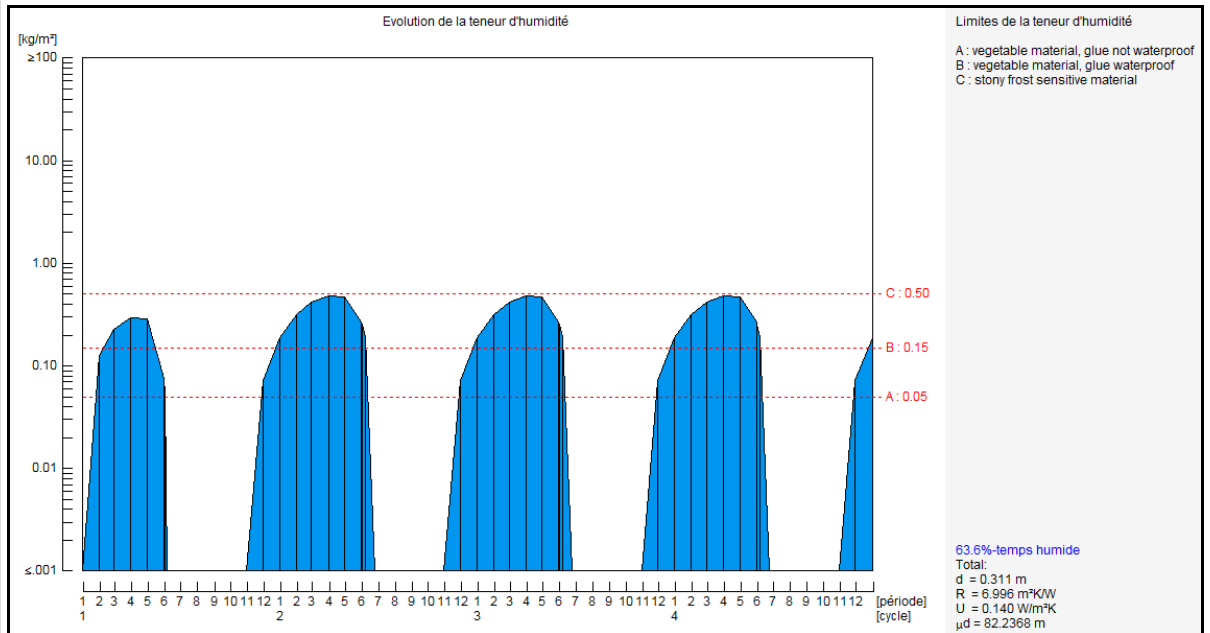


Fig. 51 : Glasta : évolution de la teneur d’humidité dans le nouveau mur léger (situation initiale)

Les quantités sont trop importantes, quel que soit le type de matériau considéré. Comme pour le caisson à volets étudié plus haut, deux solutions s’imposent :

- Placer une membrane pare-vapeur du côté chaud de l'isolant. Voici, par exemple, les graphiques résultant de l'interposition d'une feuille de polyéthylène entre les plaques de plâtre et le panneau d'OSB :

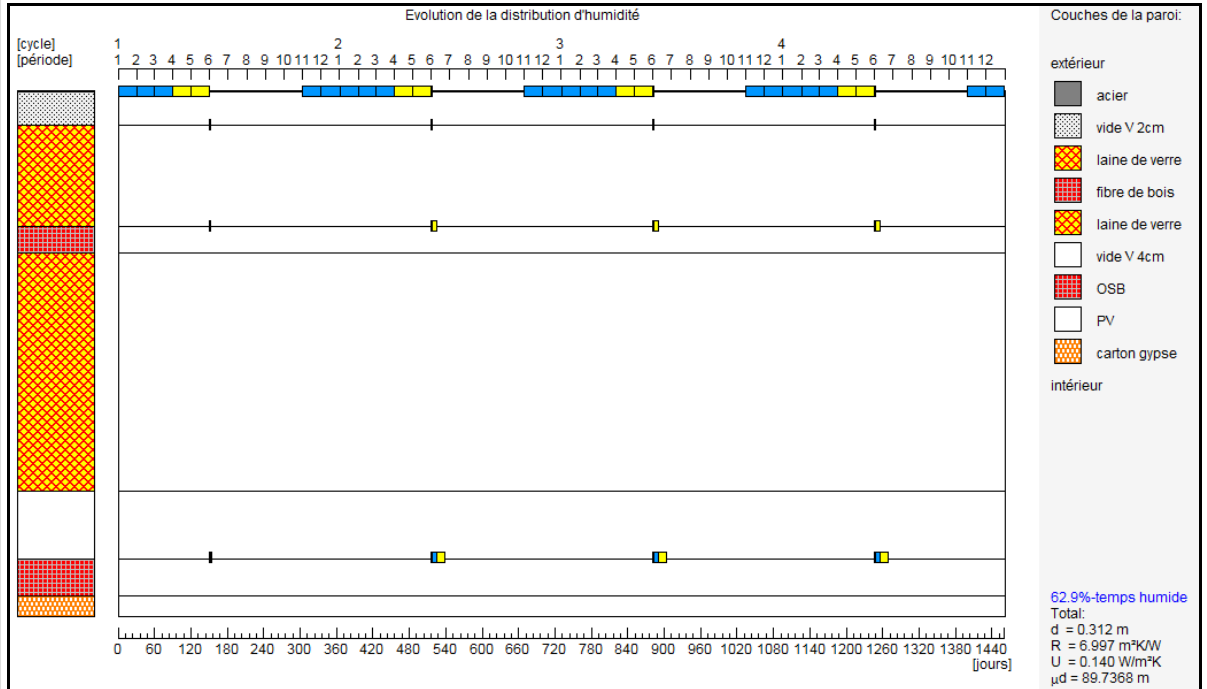


Fig. 52 : Glasta : évolution et distribution d'humidité dans le nouveau mur léger (avec pare-vapeur)

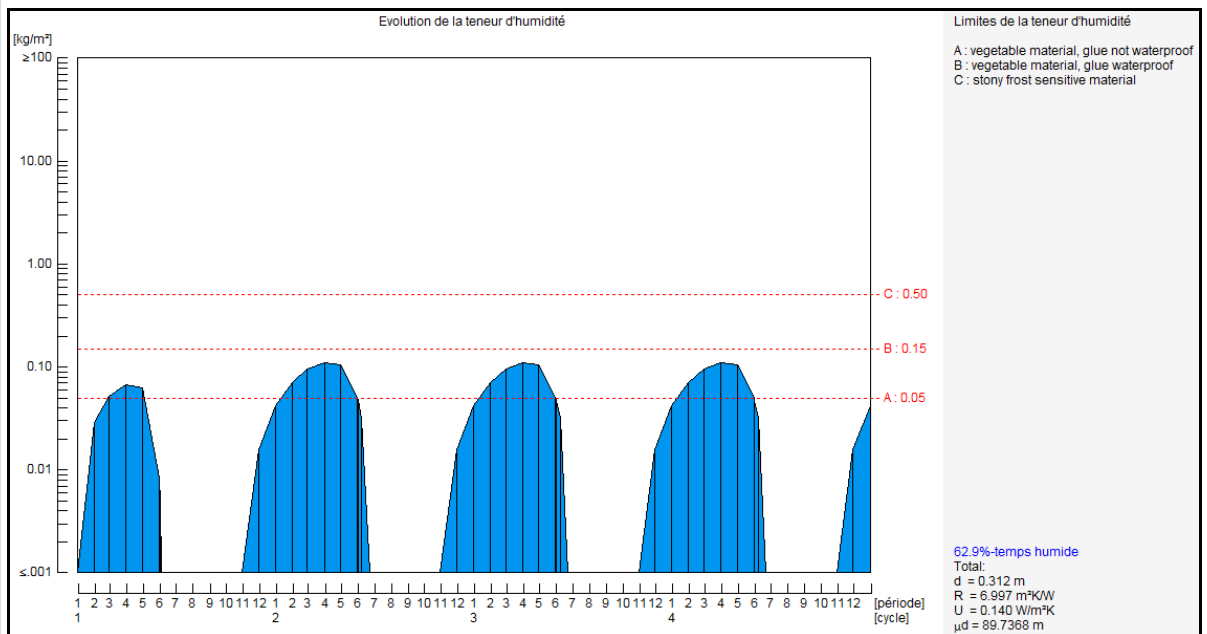


Fig. 53 : Glasta : évolution de la teneur d'humidité dans le nouveau mur léger (avec pare-vapeur)

Bien qu'inférieures, les quantités de condensats restent importantes. Un pare-vapeur plus résistant au transfert de vapeur d'eau est nécessaire, ou l'utilisation d'un isolant lui-même plus résistant.

- Ventiler un espace vide entre le bardage et la couche d'isolant thermique adjacente, quitte à enlever un centimètre d'isolant pour avoir une cavité à ventiler. La quantité de condensats devient alors nulle :

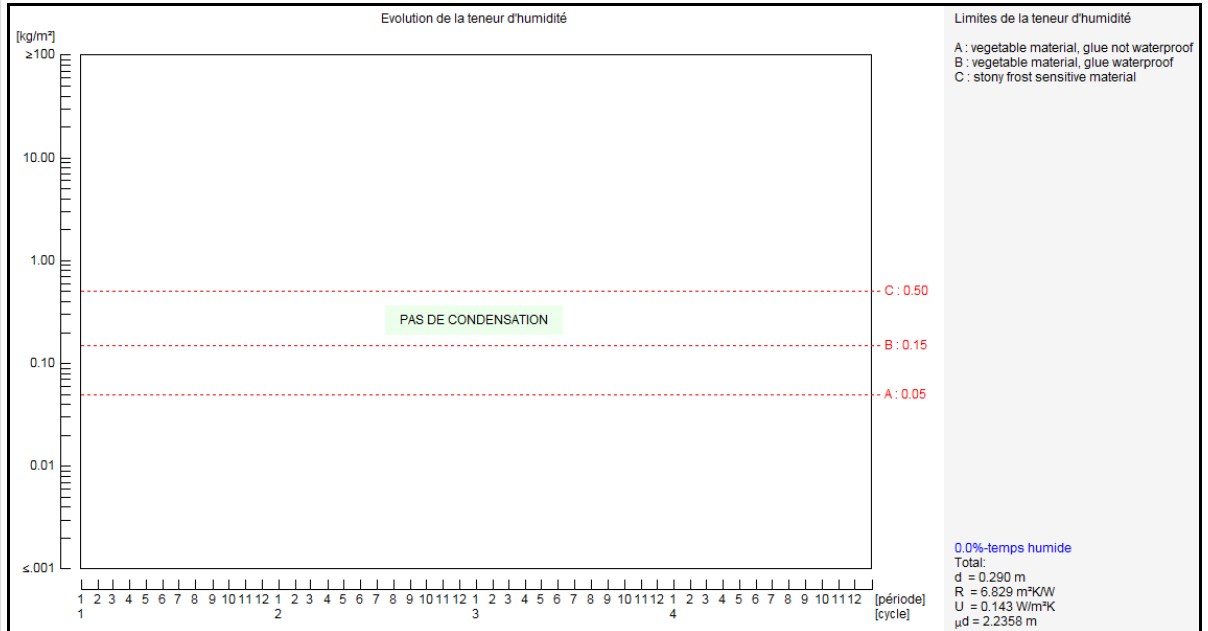


Fig. 54 : Glasta : évolution de la teneur d'humidité dans le nouveau mur léger (avec ventilation)

2.5. , " "

2.5.1. ; ;

Extérieur						Résistance superficielle int. Rsi = 0,13 [m²K/W]	
#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	Options	R [m²K/W]		
1	Simple	Acier (Métaux) - λU: 50.0	0.0020		0,00		✖
2	Simple	Air fortement ventilé (Air)	-		0,00		✖
3	Composée	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - λU: 0.18 Laine minérale (MW) - λU: 0.032	0.12	⊙ ⊕	2,214		✖
4	Maçonnerie	Briques en terre cuite (Eléments de maçonneries) - λU: 0.81 Mortier de ciment (Enduits) - λU: 0.93	0.39	⊕	0,47		✖
5	Simple	Plâtre (Enduits) - λU: 0.52	0.0050		0,01		✖

Intérieur		Résistance thermique (surface à surface) Rt = 2,69 [m²K/W]	
		Résistance superficielle int.	Rsi = 0,13 [m²K/W]
		Résistance thermique totale	RT = 2,95 [m²K/W]
		Valeur U indicative	U = 0,34 [W/m²K]

⚠ Les couches se trouvant avant la couche d'air fortement ventilée ne seront pas prises en compte.

Fig. 55 : PEB : composition du mur existant isolé par l'extérieur

La valeur U calculée selon la méthode PEB réglementaire est 0,34 W/m²K, valeur qui peut être acceptée conformément aux conclusions tirées plus haut dans le cas de la composition alternative de la toiture (2.2.4 et 2.2.5).

2.5.2.

Au vu de la composition de la paroi et des résultats précédents (voir 2.3.2 et 2.4.2), nous pouvons penser de prime abord qu'aucun problème de condensation ne devrait apparaître, pour autant qu'une ventilation correcte de la coulisse extérieure soit mise en œuvre. Le profilé de revêtement extérieur étant une onde trapézoïdale, il est raisonnable de penser que le « nez » des ondes constitue une zone de ventilation possible. Les résultats ci-dessous confirment notre première impression : pas de condensation.

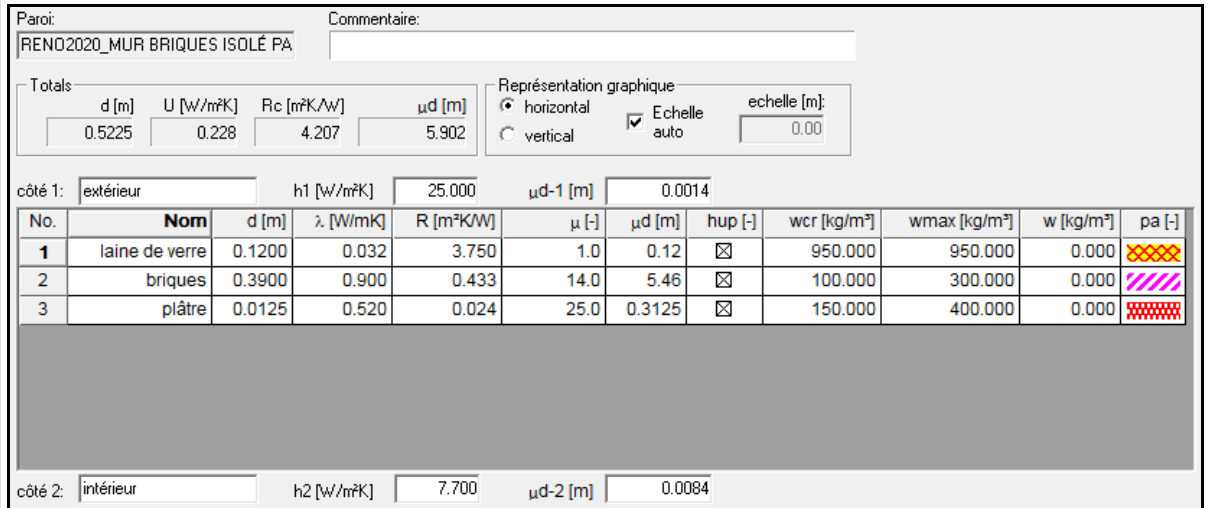


Fig. 56 : Glasta : composition initiale du mur existant isolé par l'extérieur.

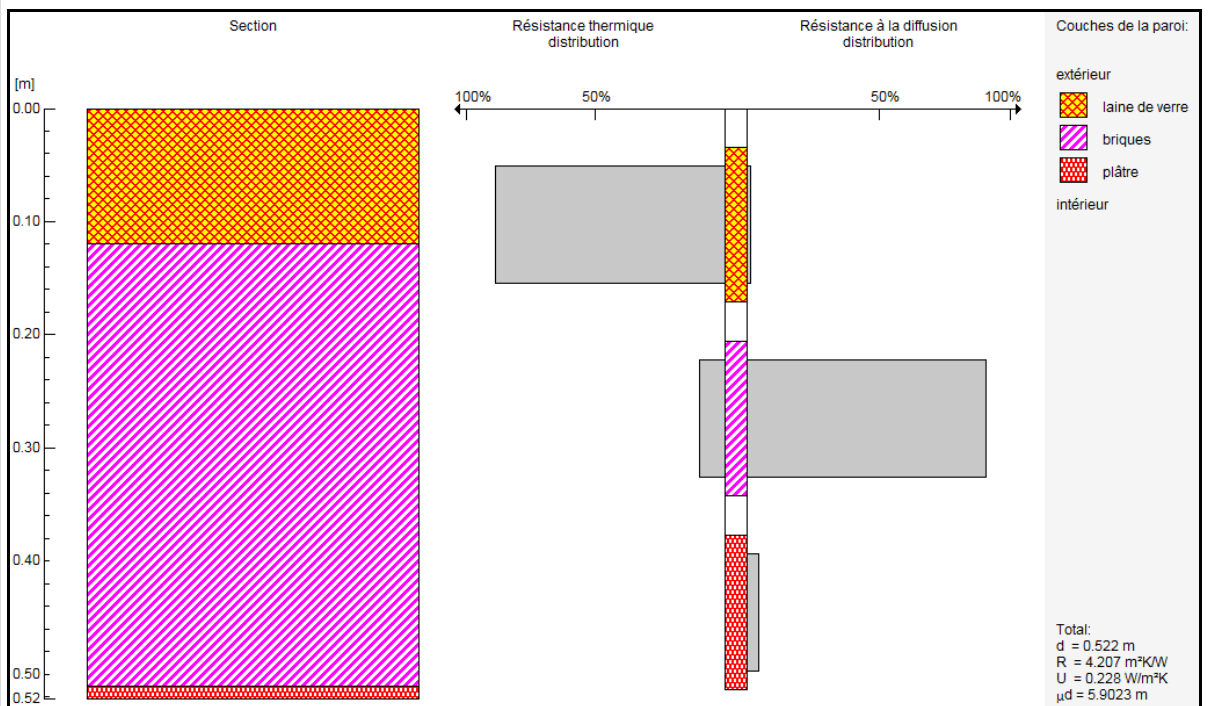


Fig. 57 : Glasta : composition (graphique) et comparaison des résistances au transfert de chaleur (à gauche) et de vapeur d'eau (à droite) du mur existant isolé par l'extérieur.

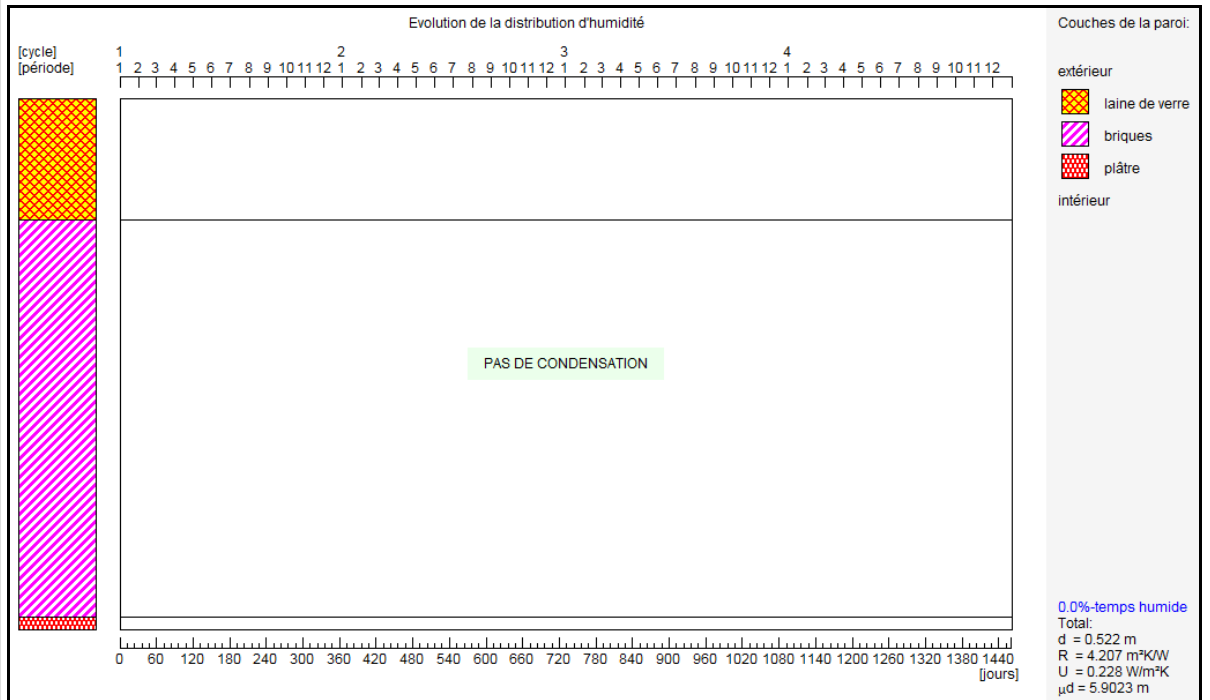


Fig. 58 : Glasta : évolution et distribution d’humidité dans le mur existant isolé par l’extérieur

Si aucune coulisse n’existe entre le bardage et l’isolant, où si celle-ci n’est pas ventilée, les résultats sont évidemment tout autres :

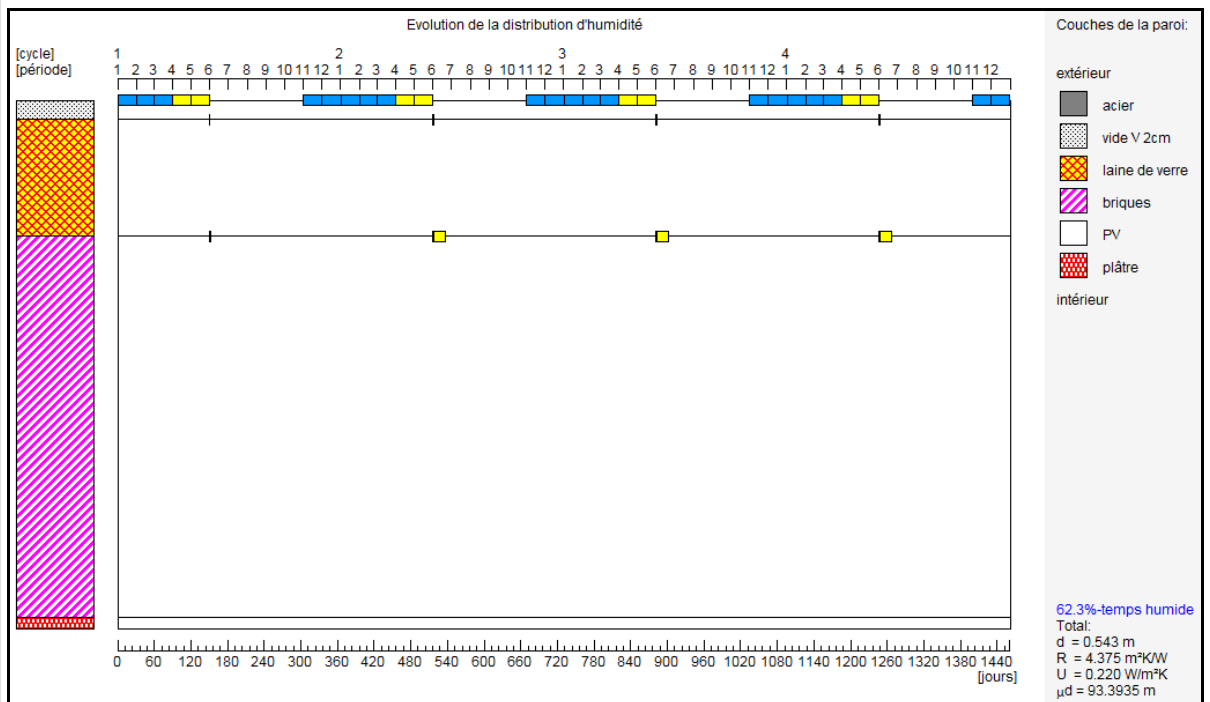


Fig. 59 : Glasta : évolution de la distribution d’humidité dans le mur existant isolé par l’extérieur (sans coulisse ou ventilation)

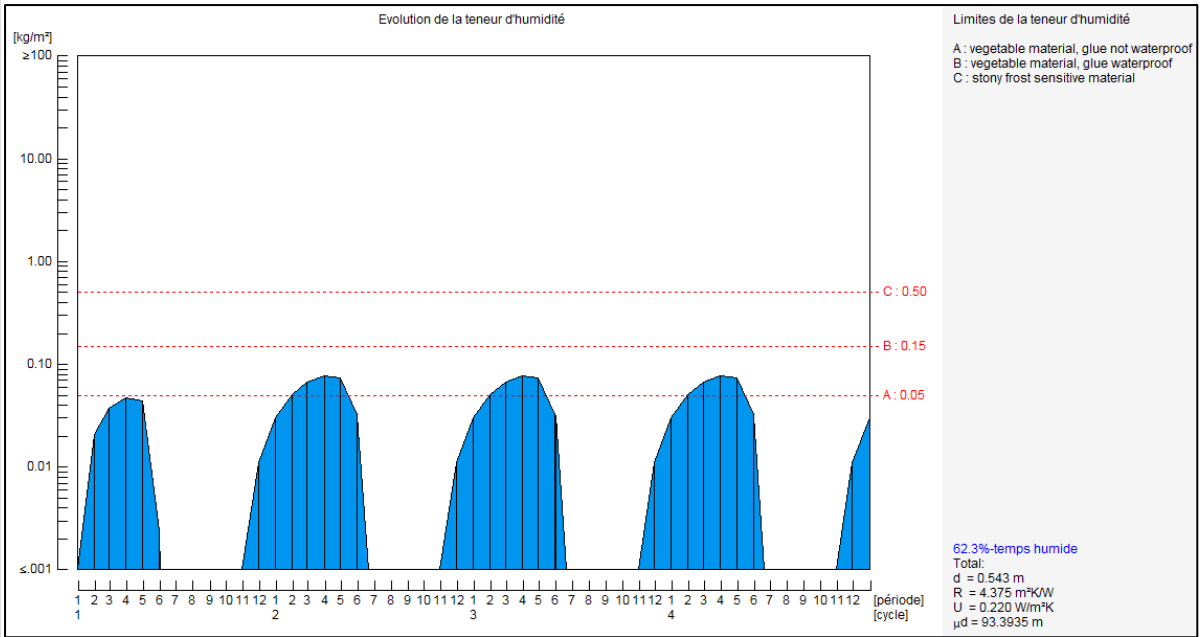


Fig. 60 : Glasta : évolution de la teneur d'humidité dans le mur existant isolé par l'extérieur (avec coulisse ou ventilation)

Ici encore, la présence d'une tôle (extérieure) en métal, qui joue le rôle de pare-vapeur, amène un problème de condensation si la ventilation (et donc le séchage rapide des condensats) n'est pas gérée correctement. Remarquons qu'un pare-vapeur peut toujours être ajouté du côté intérieur pour éviter ce problème : une valeur μd de 10 m permet déjà de descendre sous la limite « A ».

2.6.) " " " " .

Précisons l'emplacement de ces murs :

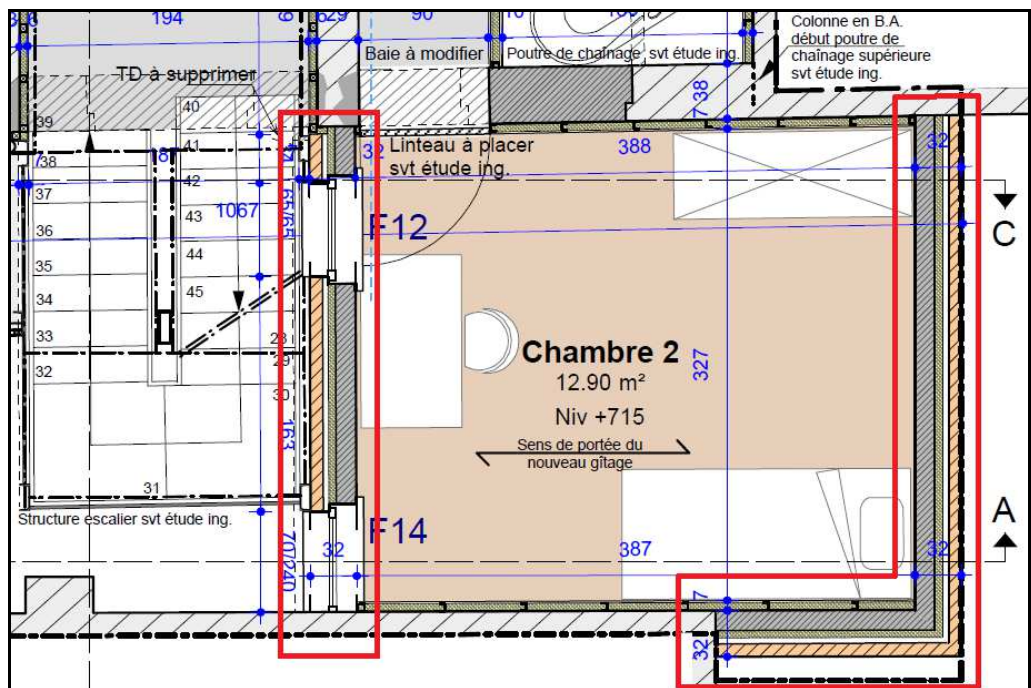


Fig. 61 : Illustration de l'emplacement des nouveaux murs creux



2.6.1. :

Ces nouveaux murs possèdent une composition traditionnelle, faite de blocs en béton lourd, d'un isolant en polyuréthane, d'une coulisse ventilée et d'une brique de parement, lui procurant ainsi une valeur **U = 0,29 W/m²K** :

U calculé : 0.287 (Valeur U pour extérieur)

Environnement indicatif : Extérieur

Introduction directe du U : Oui Non

Couches

Extérieur Résistance superficielle ext. Rse = 0,04 [m²K/W]

#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	Options	R [m²K/W]
1	Maçonnerie	Briques en terre cuite (Eléments de maçonneries) - AU: 1.81 Mortier de ciment (Enduits) - AU: 1.5	0.09	M	0,056
2	Simple	Air peu ventilé (Air)	0.03	V	NA
3	Simple	Recticel 024 - AU: 0.024	0.08	F	3,333
4	Maçonnerie	Maçonnerie en blocs creux de béton lourd (Matériaux hétérogènes) Mortier de ciment (Enduits) - AU: 0.93	0.19	M	0,143
5	Simple	Plâtre (Enduits) - AU: 0.52	0.0050		0,01

Intérieur

Résistance thermique (surface à surface) Rt = - - - [m²K/W]
 Résistance superficielle int. Rsi = 0,13 [m²K/W]
 Résistance thermique totale RT = 3,82 [m²K/W]
Valeur U indicative U = 0,29 [W/m²K]

+ Couche simple + Couche composée + Couche de maçonnerie

Fig. 62 : PEB : composition du nouveau mur creux

2.6.2.

Ici également, il y a un risque que les résultats dépendent du niveau de ventilation de la coulisse (qui existe dans cette composition). Commençons par analyser le cas d'une coulisse non ventilée :

Paroi: RENO2020_NOUVEAU MUR CREUX

Totals: d [m] 0.3500 U [W/m²K] 0.260 Rc [m²K/W] 3.678 μd [m] 3.871

Représentation graphique: horizontal vertical Echelle auto échelle [m]: 0.00

côté 1: extérieur h1 [W/m²K] 25.000 μd-1 [m] 0.0014

No.	Nom	d [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	μ [-]	μd [m]	hup [-]	wcr [kg/m³]	wmax [kg/m³]	w [kg/m³]	pa [-]
1	briques	0.0900	1.100	0.082	9.0	0.81	☒	100.000	300.000	0.000	
2	vide V 4cm	0.0300	0.220	0.136	0.0	0.001	☐				
3	polyurethane	0.0800	0.024	3.333	10.0	0.8	☒	950.000	950.000	0.000	
4	maçonner. béton	0.1400	1.250	0.112	14.3	2	☒	100.000	150.000	0.000	
5	plâtre	0.0100	0.700	0.014	25.0	0.25	☒	150.000	400.000	0.000	

côté 2: intérieur h2 [W/m²K] 7.700 μd-2 [m] 0.0084

Fig. 63 : Glasta : composition initiale du nouveau mur creux

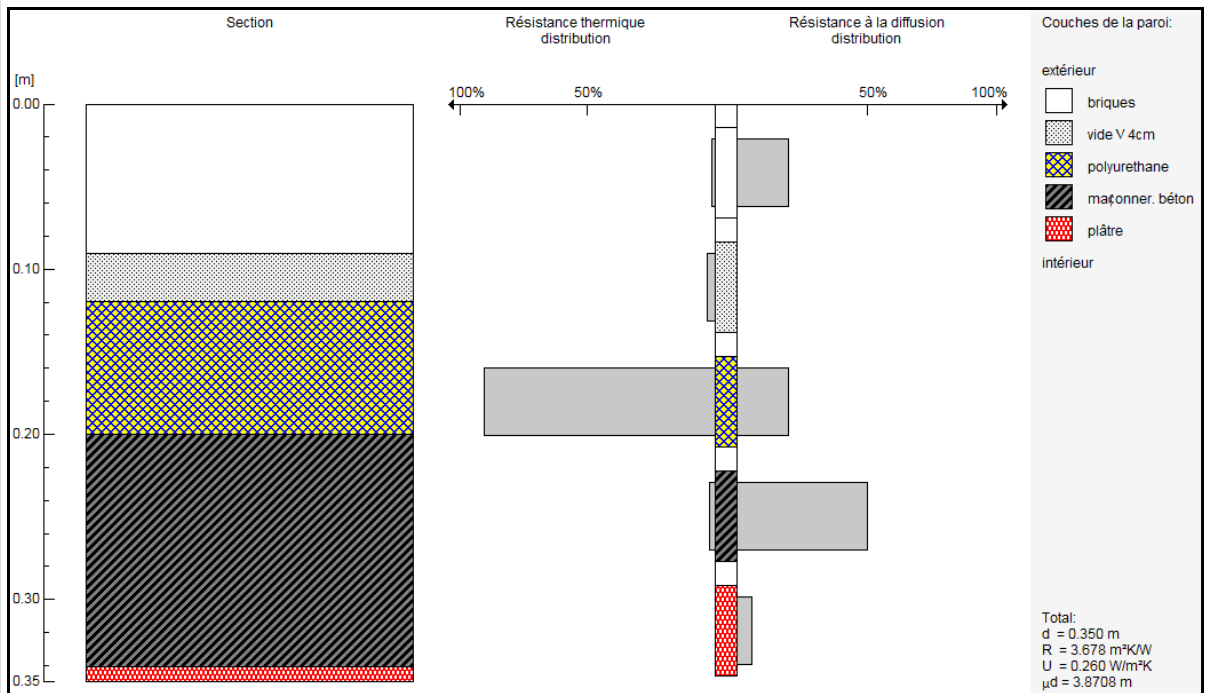


Fig. 64 : Glasta : composition graphique initiale et comparaison des résistances au transfert de chaleur (à gauche) et de vapeur d'eau (à droite) du nouveau mur creux

Les résultats délivrés par le logiciel pour cette composition sont présentés ci-dessous :

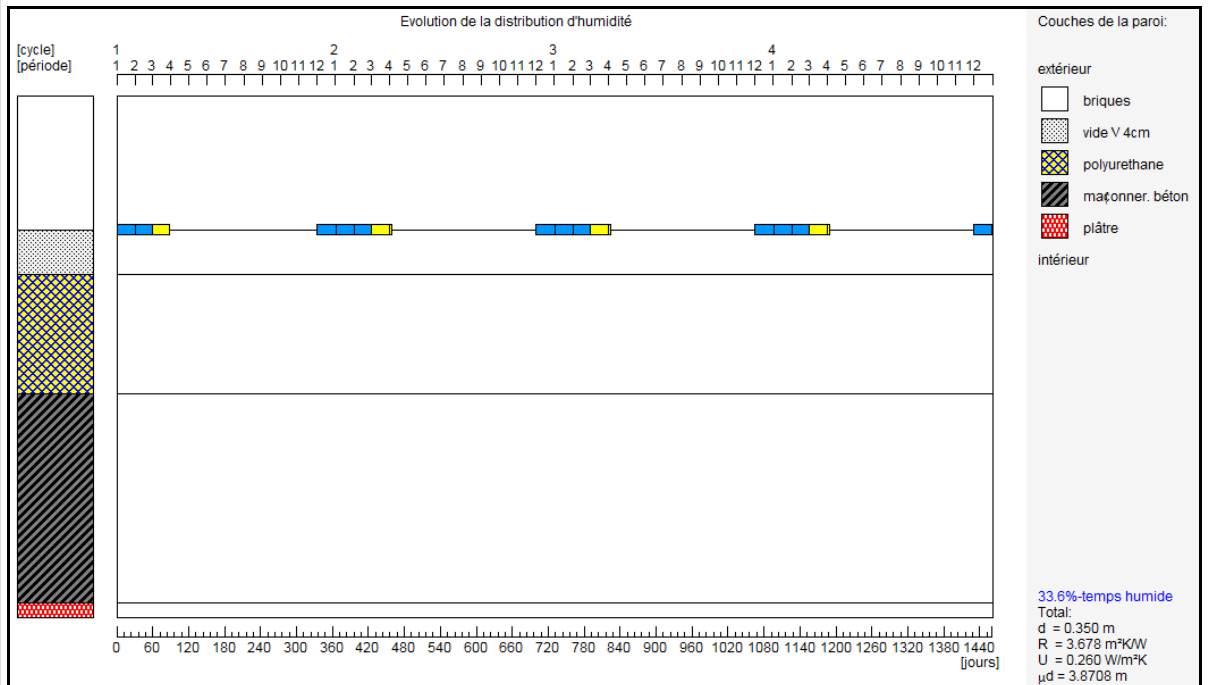


Fig. 65 : Glasta : évolution et distribution d'humidité dans le nouveau mur creux

C'est bien l'interface entre les briques et la coulisse qui est touché par la condensation. N'oublions cependant pas le rôle des briques (poreuses) et de la coulisse, qui permettent, si les quantités ne sont pas trop importantes, de sécher les condensats, ou de les évacuer vers les drains en pied de mur.

Ci-dessous, une vue du graphique présentant la quantité de condensats :

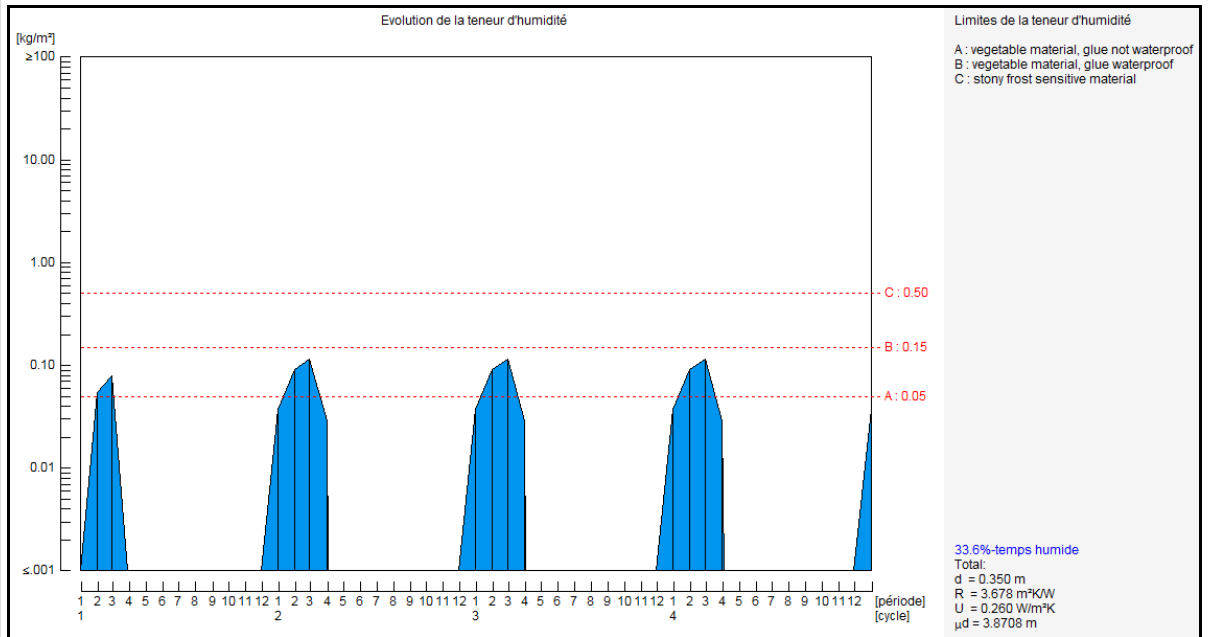


Fig. 66 : Glasta : évolution de la teneur d'humidité dans le nouveau mur creux

La quantité n'est pas très importante, mais il pourrait être prudent de ventiler la coulisse un peu plus fort :

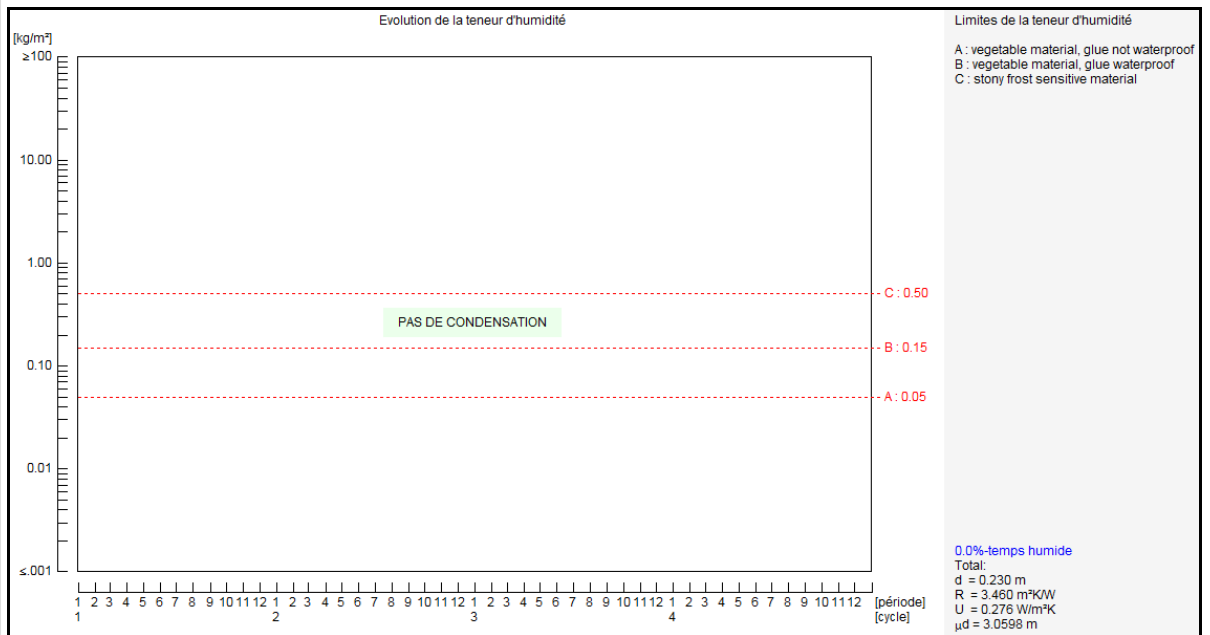


Fig. 67 : Glasta : évolution de la teneur d'humidité dans le nouveau mur creux (plus ventilé)

2.7. ,

2.7.1. ; 9 + " -%+ %+ .

Nous nous trouvons ici dans la même situation qu'au point 2.5 (mur extérieur en briques isolé par l'extérieur), à ceci près que l'épaisseur du mur de brique est plus



faible : 13 ou 29 cm, suivant le côté choisi par rapport à la porte :

Extérieur						Résistance superficielle int. Rsi = 0,13 [m²K/W]	
#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	Options	R [m²K/W]	...	
1	Simple	Acier (Métaux) - λU: 50.0	0.0020		0,00	✖	
2	Simple	Air fortement ventilé (Air)	-		0,00	✖	
3	Composée	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - λU: 0.18 Laine minérale (MW) - λU: 0.032	0.12	⊙ ⊕	2,214	✖	
4	Maçonnerie	Briques en terre cuite (Eléments de maçonneries) - λU: 0.81 Mortier de ciment (Enduits) - λU: 0.93	0.13	⊕	0,157	✖	
5	Simple	Plâtre (Enduits) - λU: 0.52	0.0050		0,01	✖	

Intérieur		Résistance thermique (surface à surface) Rt = 2,38 [m²K/W]	
		Résistance superficielle int.	Rsi = 0,13 [m²K/W]
		Résistance thermique totale	RT = 2,64 [m²K/W]
		Valeur U indicative	U = 0,38 [W/m²K]

⚠ Les couches se trouvant avant la couche d'air fortement ventilée ne seront pas prises en compte.

Fig. 68 : PEB : composition du mur du palier (avec 13 cm de briques)

- 13 cm de briques : **U = 0,38 W/m²K**
- 29 cm de briques : **U = 0,35 W/m²K**

Extérieur						Résistance superficielle int. Rsi = 0,13 [m²K/W]	
#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	Options	R [m²K/W]	...	
1	Simple	Acier (Métaux) - λU: 50.0	0.0020		0,00	✖	
2	Simple	Air fortement ventilé (Air)	-		0,00	✖	
3	Composée	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - λU: 0.18 Laine minérale (MW) - λU: 0.032	0.12	⊙ ⊕	2,214	✖	
4	Maçonnerie	Briques en terre cuite (Eléments de maçonneries) - λU: 0.81 Mortier de ciment (Enduits) - λU: 0.93	0.29	⊕	0,35	✖	
5	Simple	Plâtre (Enduits) - λU: 0.52	0.0050		0,01	✖	

Intérieur		Résistance thermique (surface à surface) Rt = 2,57 [m²K/W]	
		Résistance superficielle int.	Rsi = 0,13 [m²K/W]
		Résistance thermique totale	RT = 2,83 [m²K/W]
		Valeur U indicative	U = 0,35 [W/m²K]

⚠ Les couches se trouvant avant la couche d'air fortement ventilée ne seront pas prises en compte.

Fig. 69 : PEB : composition du mur du palier (avec 29 cm de briques)

Les résultats affichés plus hauts concernant la diffusion de vapeur d'eau sont donc également valables pour ces parois-ci, pour autant que les caractéristiques des matériaux soient identiques.

2.7.2. = 1 - .

Cette paroi est celle qui entoure les portes d'entrée dans les différents appartements. En l'absence d'une composition exacte, nous prendrons une hypothèse basée sur les plans et la composition de parois semblables (comme

celles qui rehaussent la toiture, voir point 2.4), donnant ainsi la composition suivante :

- Plaque de plâtre intérieure (1,25 cm)
- Panneau OSB (2,2 cm)
- Structure de bois avec remplissage en laine de verre, 10 cm selon les plans
- Panneau OSB (1,25 cm)
- Bardage extérieur en acier, avec une coulisse ventilée.

: ;

Les résultats de la simulation PEB sont les suivants :

Extérieur					Résistance superficielle int. Rsi = 0,13 [m²K/W]	
#	Type de la couche	Type de matériau	Épaisseur [m]	Options	R [m²K/W]	...
1	Simple	Acier (Métaux) - λU: 50.0	0.0020		0,00	✗
2	Simple	Air fortement ventilé (Air)	-		0,00	✗
3	Composée	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - λU: 0.18 Laine minérale (MW) - λU: 0.032	0.14	Ⓒ Ⓕ	2,583	✗
4	Simple	Plaques de plâtre entre deux couches de carton (Matériaux hétérogènes)	≤ 0.014		0,05	✗

Intérieur		Résistance thermique (surface à surface) Rt = 2,63 [m²K/W]
		Résistance superficielle int. Rsi = 0,13 [m²K/W]
		Résistance thermique totale RT = 2,89 [m²K/W]
		Valeur U indicative U = 0,35 [W/m²K]

⚠ Les couches se trouvant avant la couche d'air fortement ventilée ne seront pas prises en compte.

Fig. 70 : PEB : composition du mur d'entrée (structure bois)

Constatant que 10 cm de couche composée (structure + isolant thermique), prévus initialement, ne suffisent pas à atteindre l'exigence réglementaire U_{max} , nous avons demandé aux architectes d'augmenter cette épaisseur à 12 cm pour atteindre l'objectif, avec une valeur U de 0,35 W/m²K.

Les résultats d'une simulation Glasta seront probablement à mettre en parallèle avec ceux des autres parois parées du côté extérieur par un bardage en acier : la ventilation d'une coulisse entre le bardage et le reste du mur est la meilleure solution pour éviter toute condensation potentiellement problématique :

Paroi: RÉNO2020_NOUVELLE PAROI LÉGÈRE Commentaire: Ferrer 13 - nouvelle paroi légère qui rehausse la toiture

Totals: d [m] 0.2133 U [W/m²K] 0.197 Rc [m²K/W] 4.899 μd [m] 82.28

Représentation graphique: horizontal (selected), vertical, Echelle auto (checked), echelle [m]: 0.00

côté 1: extérieur h1 [W/m²K] 25.000 μd-1 [m] 0.0014

No.	Nom	d [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	μ [-]	μd [m]	hup [-]	wcr [kg/m²]	wmax [kg/m²]	w [kg/m²]	pa [-]
1	acier	0.0008	50.000	0.000	1.0e+005	80	<input type="checkbox"/>				
2	vide V 2cm	0.0200	0.120	0.167	0.1	0.001	<input type="checkbox"/>				
3	OSB	0.0180	0.130	0.138	50.0	0.9	<input checked="" type="checkbox"/>	150.000	200.000	0.000	
4	laine de verre	0.1400	0.032	4.375	1.0	0.14	<input checked="" type="checkbox"/>	950.000	950.000	0.000	
5	OSB	0.0220	0.130	0.169	50.0	1.1	<input checked="" type="checkbox"/>	150.000	200.000	0.000	
6	carton gypse	0.0125	0.250	0.050	10.0	0.125	<input checked="" type="checkbox"/>	250.000	500.000	0.000	

côté 2: intérieur h2 [W/m²K] 7.700 μd-2 [m] 0.0084

Fig. 71 : Glasta : composition du mur d'entrée

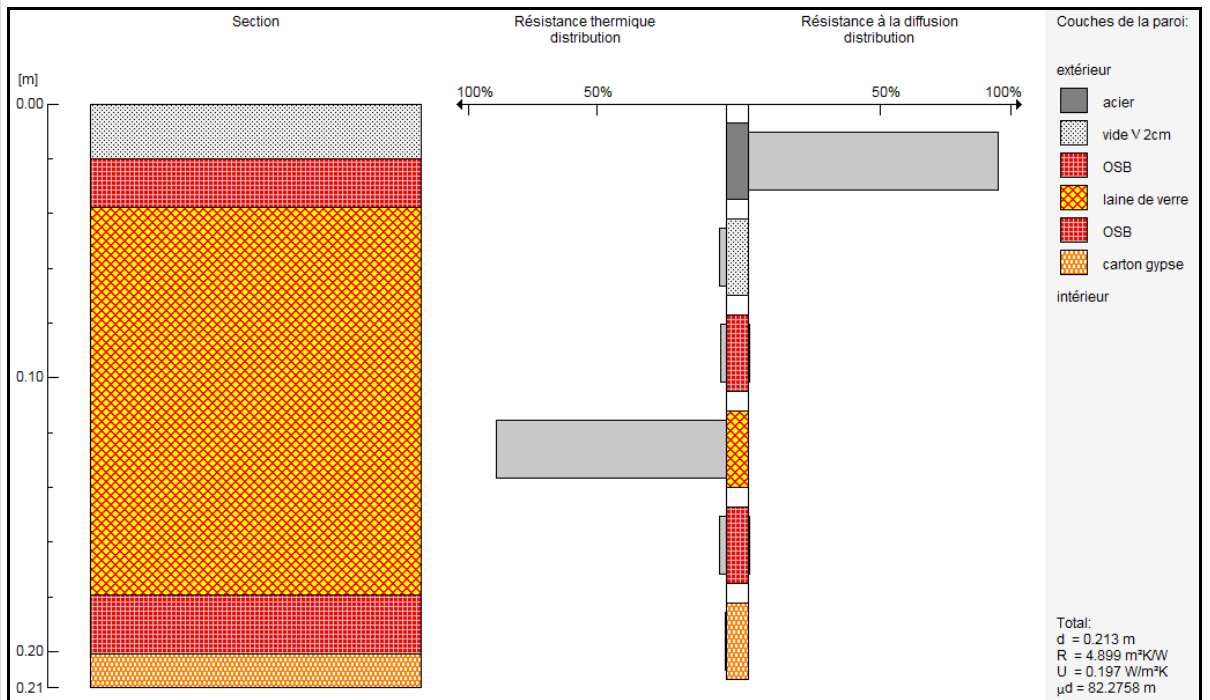


Fig. 72 : Glasta : composition graphique et comparaison des résistances au transfert de chaleur (à gauche) et de vapeur d'eau (à droite) du mur d'entrée

Les résultats pour la classe de climat 3 sont les suivants :

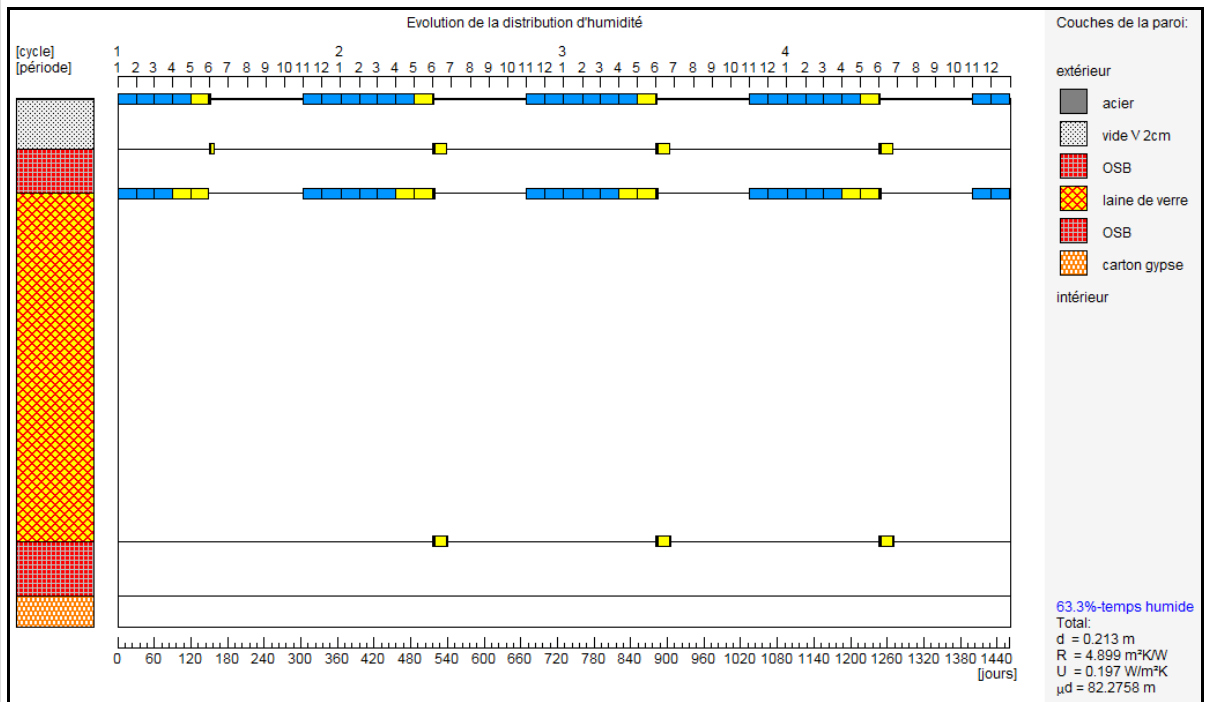


Fig. 73 : Glasta : évolution et distribution d’humidité dans le mur d’entrée

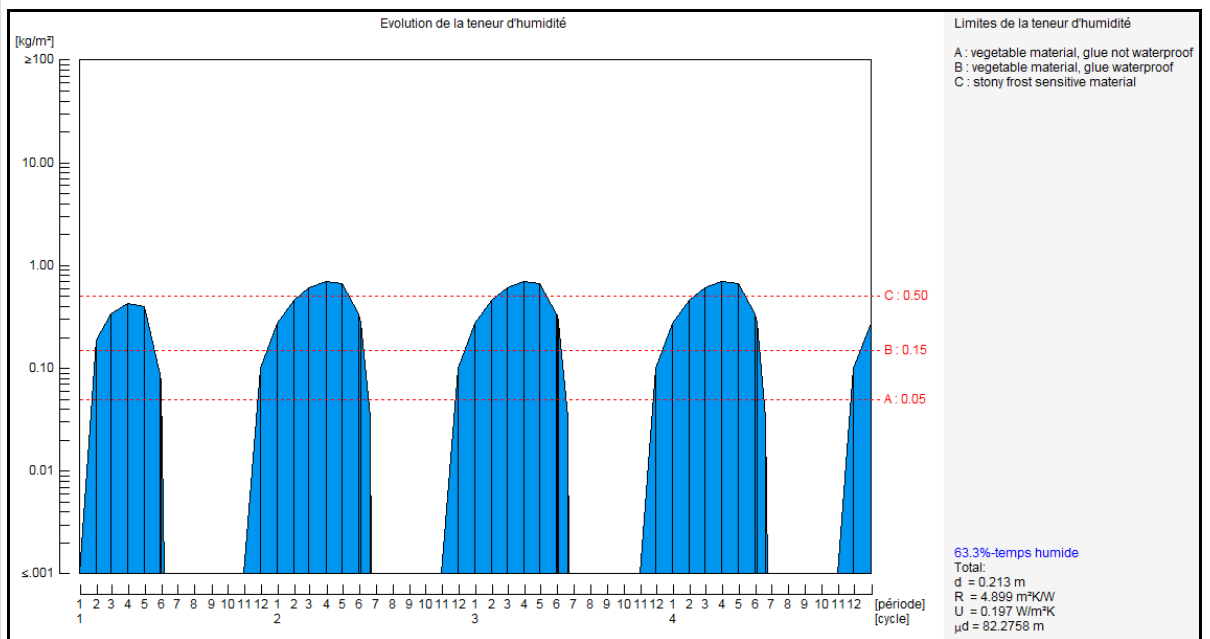


Fig. 74 : Glasta : évolution de la teneur d’humidité dans le mur d’entrée

Ils sont, bien sûr, inadmissibles et imputables aux mêmes paramètres que les simulations précédentes : la présence d’acier en revêtement extérieur peut s’avérer potentiellement catastrophique si la ventilation d’une coulisse n’est pas organisée correctement. Dans le cas où la coulisse est fortement ventilée, les résultats sont les suivants :

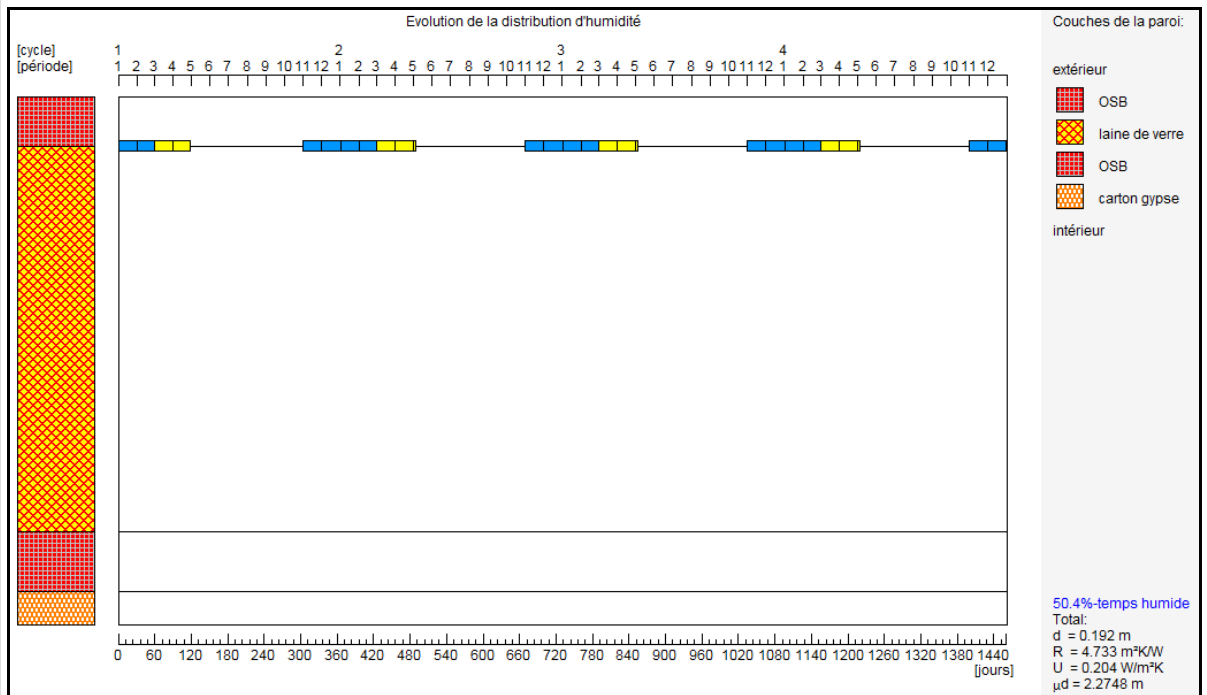


Fig. 74 : Glasta : évolution et distribution d’humidité dans le mur d’entrée (avec ventilation)

On le voit, la condensation est toujours présente, à cause du panneau d’OSB qui devient la couche la plus résistante au transfert de vapeur d’eau. Elle ne se retrouve cependant plus qu’à un endroit, et une période de séchage est clairement marquée. Reste à connaître la quantité de condensats :

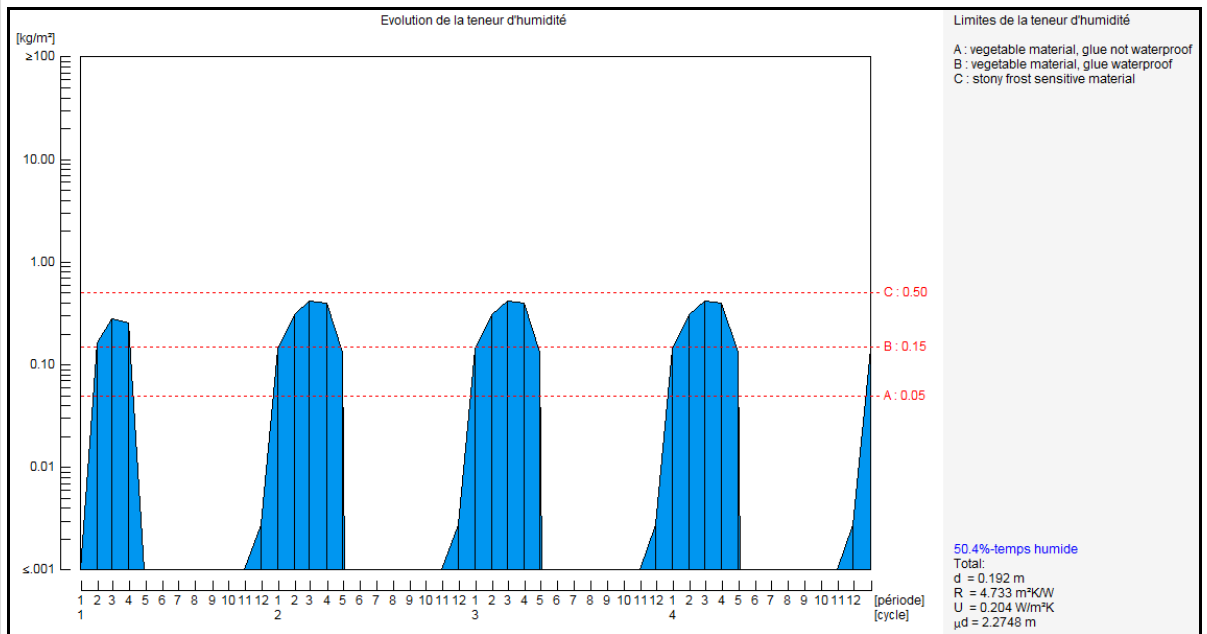


Fig. 75 : Glasta : évolution de la teneur d’humidité dans le mur d’entrée (avec ventilation)

Ce résultat n’est pas encore admissible, la quantité de condensats potentiels est encore trop importante, indiquant la nécessité d’imposer un pare-vapeur (par exemple une feuille de polyéthylène, $\mu_d = 7,5 \text{ m}$) :

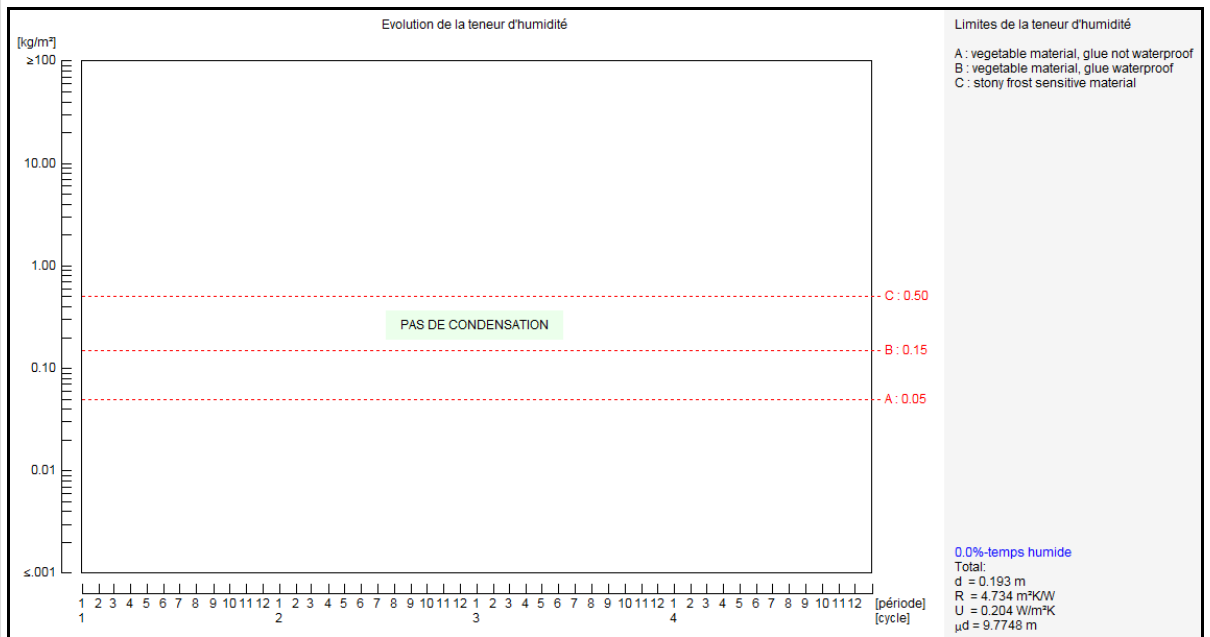


Fig. 76 : Glasta : évolution de la teneur d’humidité dans le mur d’entrée (avec pare-vapeur)

2.8. 0 1 "

Certaines parois de déperdition ne présentent pas une surface importante au transfert de chaleur, mais peuvent toutefois être importantes. C’est le cas du plafond du rez-de-chaussée qui sert aussi de palier (extérieur) d’entrée pour l’appartement du R+1 ; d’éventuels problèmes pourraient survenir si certaines précautions ne sont pas prises, notamment du point de vue du comportement vis-à-vis de l’eau. Nous considérerons que la partie du plafond du R+2 qui sert de plancher au balconnet du R+3 possède la même composition.

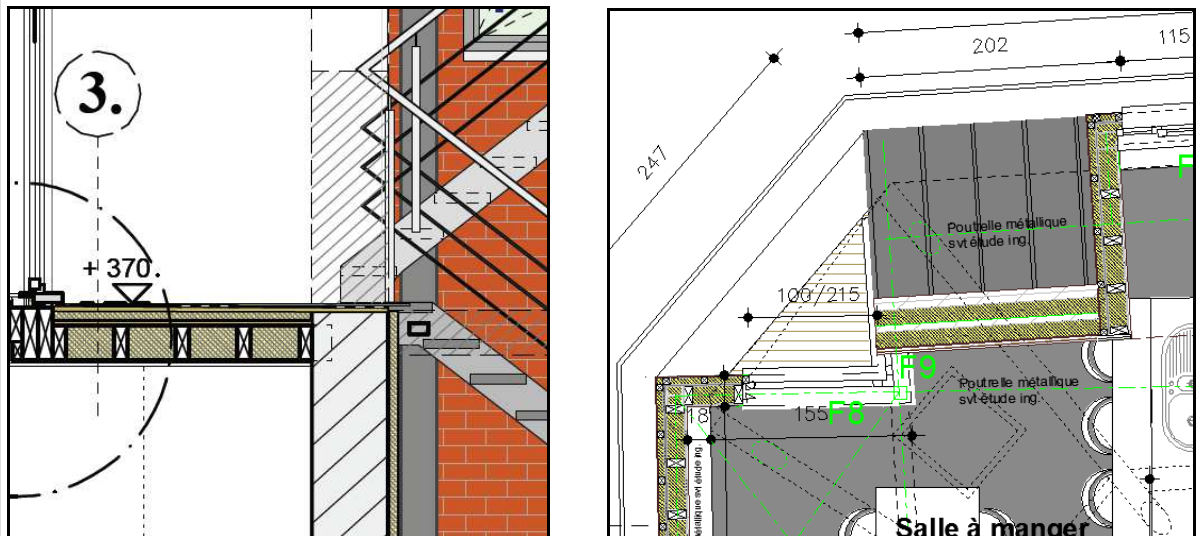


Fig. 77 : illustration de l’emplacement du « plafond sous l’ambiance extérieure »

2.8.1. ; ;

Suivant la composition décrite par les architectes, le coefficient de transmission thermique selon la PEB est le suivant :



U calculé : 0.27 (Valeur U pour extérieur)

Profil de toit : Toit plat + forme de pente

Introduction directe du U : Oui Non

Couches

Extérieur Résistance superficielle int. Rsi = 0,04 [m²K/W]

#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	Options	R [m²K/W]	
1	Simple	Acier (Métaux) - AU: 50.0	0.0010		0,00	✖
2	Simple	Membrane bitumeuse (Divers) - AU: 0.23	0.0080		0,035	✖
3	Simple	Panneau d'OSB (Oriented Strand Board) (Bois et dérivés de bois) - AU: 0.13	0.022	ⓐ	0,169	✖
4	Composée	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - AU: 0.18 Laine minérale (MW) - AU: 0.035	0.06	ⓐ ⓑ	1,178	✖
5	Simple	Panneau d'OSB (Oriented Strand Board) (Bois et dérivés de bois) - AU: 0.13	0.044	ⓐ	0,338	✖
6	Composée	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - AU: 0.18 Air non ventilé (Air)	0.1	ⓐ	0,174	✖
7	Composée	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - AU: 0.18 Laine minérale (MW) - AU: 0.035	0.08	ⓐ ⓑ	1,57	✖
8	Simple	Plaques de plâtre entre deux couches de carton (Matériaux hétérogènes)	≤ 0.014		0,05	✖
9	Simple	Plaques de plâtre entre deux couches de carton (Matériaux hétérogènes)	≤ 0.014		0,05	✖

Intérieur Résistance thermique (surface à surface) Rt = 3,56 [m²K/W]
Résistance superficielle int. Rsi = 0,10 [m²K/W]
Résistance thermique totale RT = 3,70 [m²K/W]
Valeur U indicative U = 0,27 [W/m²K]

Fig. 78 : PEB : composition du plafond sous ambiance extérieure

Les « 8 cm min. » d'isolation thermique entre les éléments de structure du plancher sont donc suffisants pour descendre sous le coefficient U_{max} admissible par la réglementation. Remplir la cavité d'isolant (passer de 8 à 18 cm) descendrait cette valeur U de 0,27 W/m²K à 0,18 W/m²K.

Outre les précautions à prendre pour l'étanchéité à l'eau d'un plancher extérieur, il convient, comme souvent pour une toiture plate, de réaliser une étude de la diffusion de la vapeur d'eau au travers du complexe.

2.8.2.

Voici la composition encodée dans Glasta et les résultats pour la classe de climat 3 :

côté 1: exterieur		h1 [W/m²K]	25.000	μd-1 [m]	0.0014						
No.	Nom	d [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	μ [-]	μd [m]	hup [-]	wcr [kg/m³]	wmax [kg/m³]	w [kg/m³]	pa [-]
1	acier	0.0010	50.000	0.000	8.0e+007	8e+004	☐				☐
2	bitumen	0.0050	0.200	0.025	6.0e+004	300	☐				☐
3	OSB	0.0220	0.130	0.169	30.0	0.66	☒	100.000	300.000	0.000	☐
4	laine minérale	0.0600	0.035	1.714	1.0	0.06	☒	950.000	950.000	0.000	☐
5	OSB	0.0440	0.130	0.338	30.0	1.32	☒	100.000	300.000	0.000	☐
6	vide H* 5cm	0.1000	0.310	0.323	0.0	0.001	☐				☐
7	laine minérale	0.0800	0.035	2.286	1.0	0.08	☒	950.000	950.000	0.000	☐
8	plaques de plâtre	0.0250	0.250	0.100	10.0	0.25	☒	250.000	500.000	0.000	☐

côté 2: interieur h2 [W/m²K] 7.700 μd-2 [m] 0.0084

Fig. 79 : Glasta : composition du plafond sous ambiance extérieure

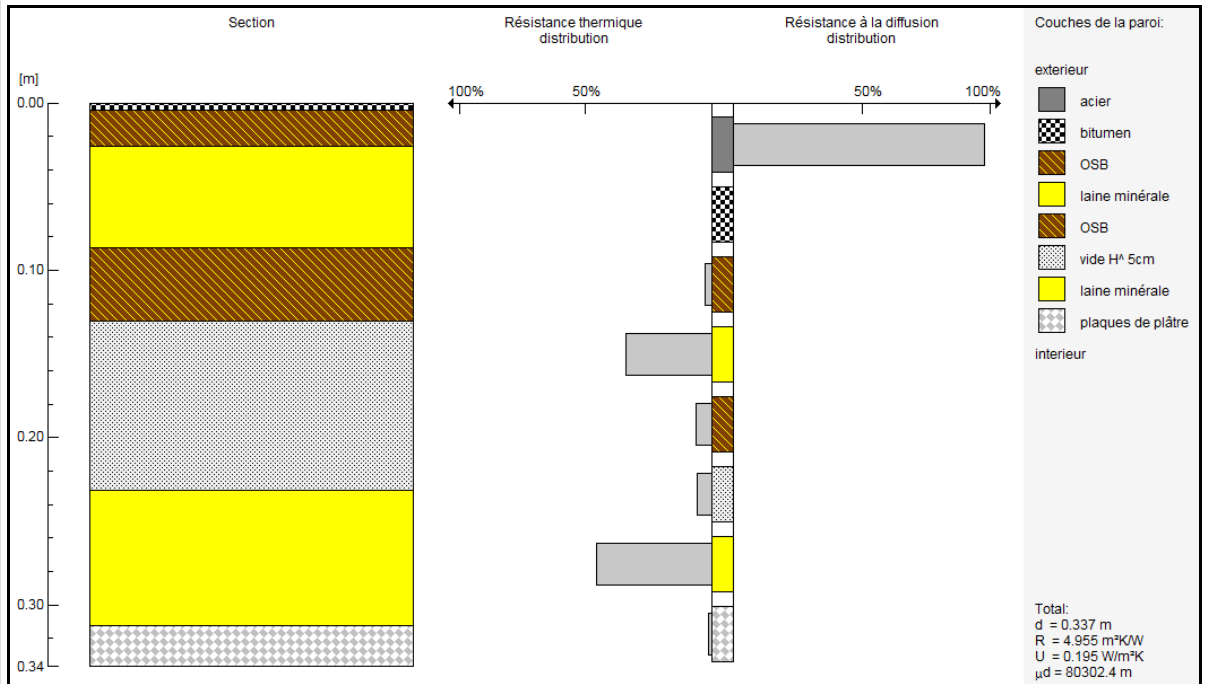


Fig. 80 : Glasta : composition graphique et comparaison des résistances au transfert de chaleur (à gauche) et de vapeur d'eau (à droite) du plafond sous ambiance extérieure

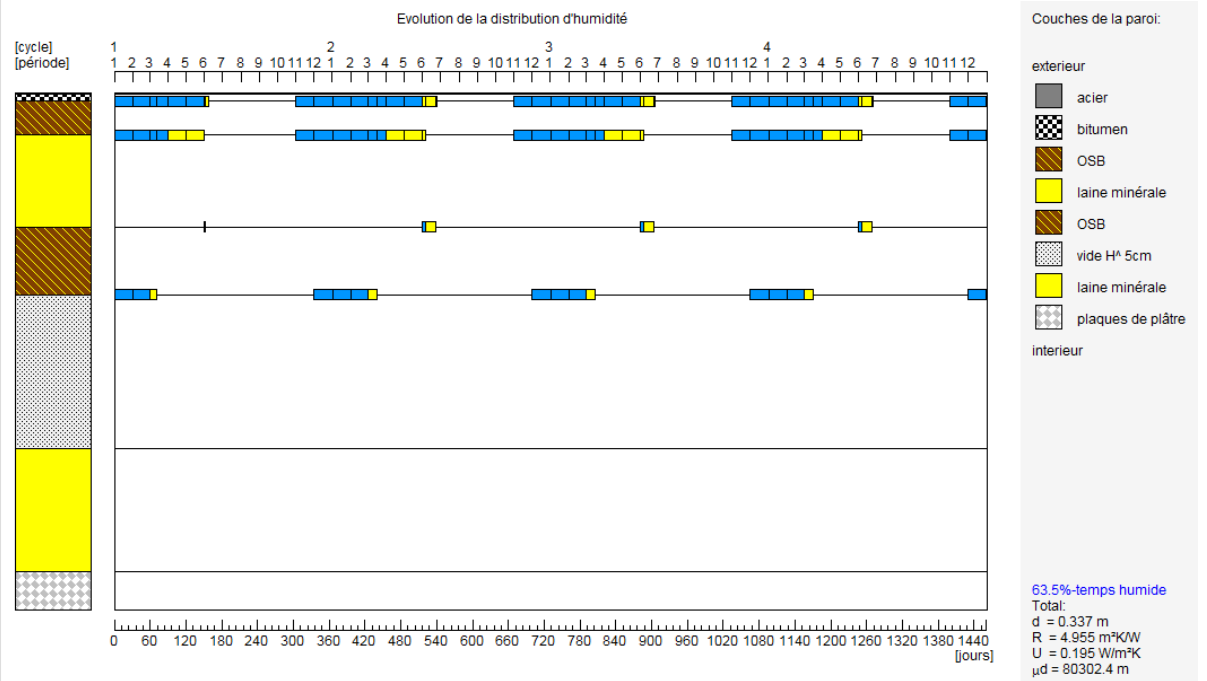


Fig. 81 : Glasta : évolution et distribution d'humidité dans le plafond sous ambiance extérieure (situation initiale)

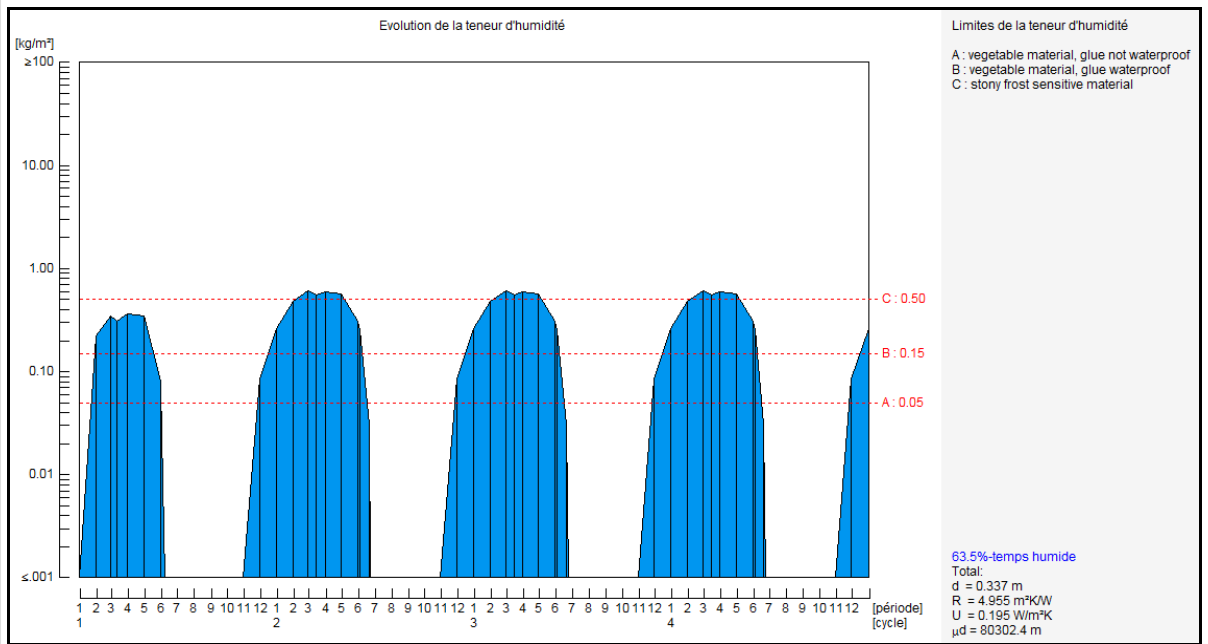


Fig. 82 : évolution de la teneur d’humidité dans le plafond sous ambiance extérieure (situation initiale)

Malgré l’affaiblissement de la résistance opposée par le revêtement métallique ($\mu d = 8 \cdot 10^4 \text{ m}$ au lieu de $1 \cdot 10^9$) pour tenir compte des imperfections, les résultats graphiques parlent d’eux-mêmes : trop de condensats, répartis sur toute l’épaisseur du plancher, à cause de résistances trop importantes à la diffusion de vapeur d’eau.

Même si la ventilation sous le revêtement extérieur en acier était assurée, le problème ne serait pas résolu pour autant :

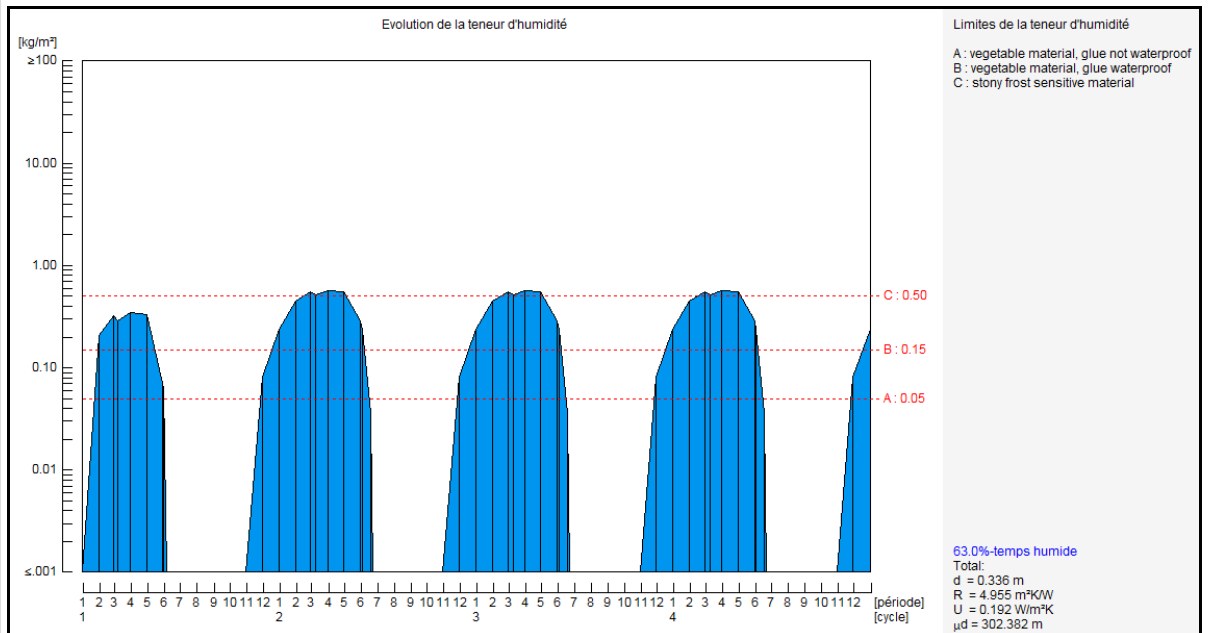


Fig. 83 : Glasta évolution de la teneur d’humidité dans le plafond sous ambiance extérieure (coulisse ventilée)

Le problème vient plutôt, comme dans la plupart des toitures plates, de la résistance importante à la diffusion apportée par la nécessaire membrane bitumineuse qui garantit l’étanchéité à l’eau. Reste donc à étudier quel valeur minimale de résistance à la diffusion de vapeur d’eau (μd) doit avoir le pare-vapeur

qui sera placé du côté chaud de la paroi (entre les 2 plaques de plâtre ou entre ces plaques et la structure isolée par exemple). Il s'avère qu'un μd de 20 m est un minimum pour descendre sous la limite « A » de condensats :

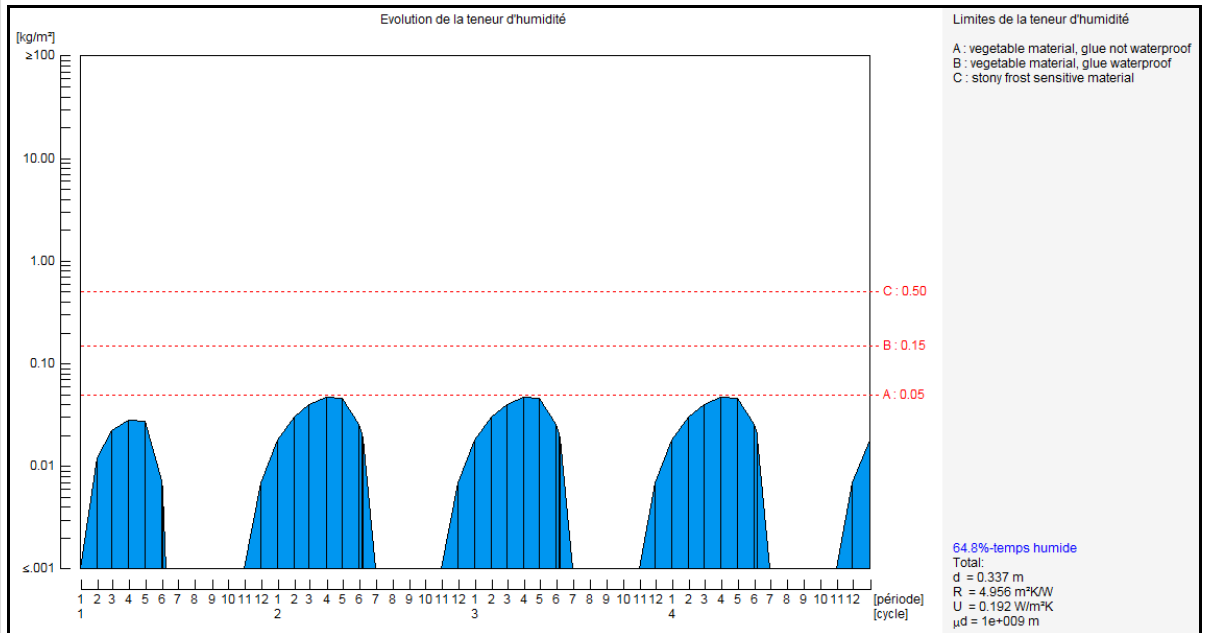


Fig. 84 : Glasta : évolution de la teneur d'humidité dans le plafond sous ambiance extérieure (avec pare-vapeur, $\mu d = 20$ m)

Si la cavité entre les éléments structurels en bois était remplie de 18 cm d'isolant (au lieu des 8 cm minimum annoncés), la situation serait encore un peu plus délicate (la quantité de condensats étant encore un peu plus élevée) ; sans pare-vapeur, le graphique est le suivant :

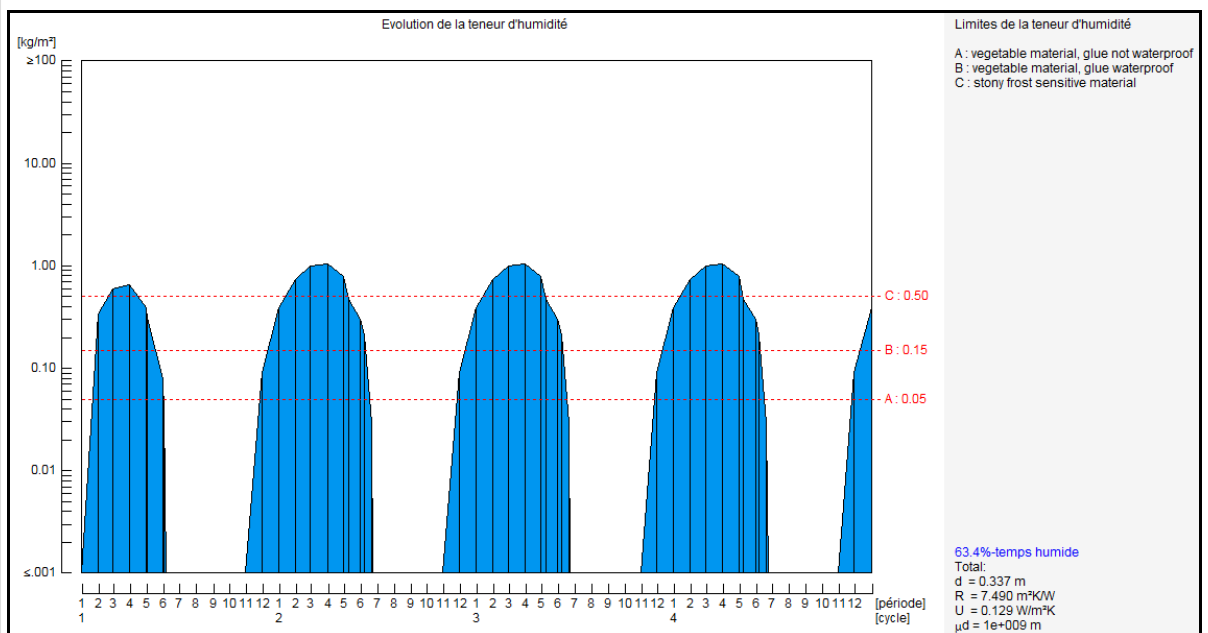


Fig. 85 : Glasta : évolution de la teneur d'humidité dans le plafond sous ambiance extérieure (isolation complète, sans ventilation ni pare-vapeur)

Le pare-vapeur nécessaire dans ce cas devrait avoir, pour passer sous la limite « A », un μ d minimal de 20 m :

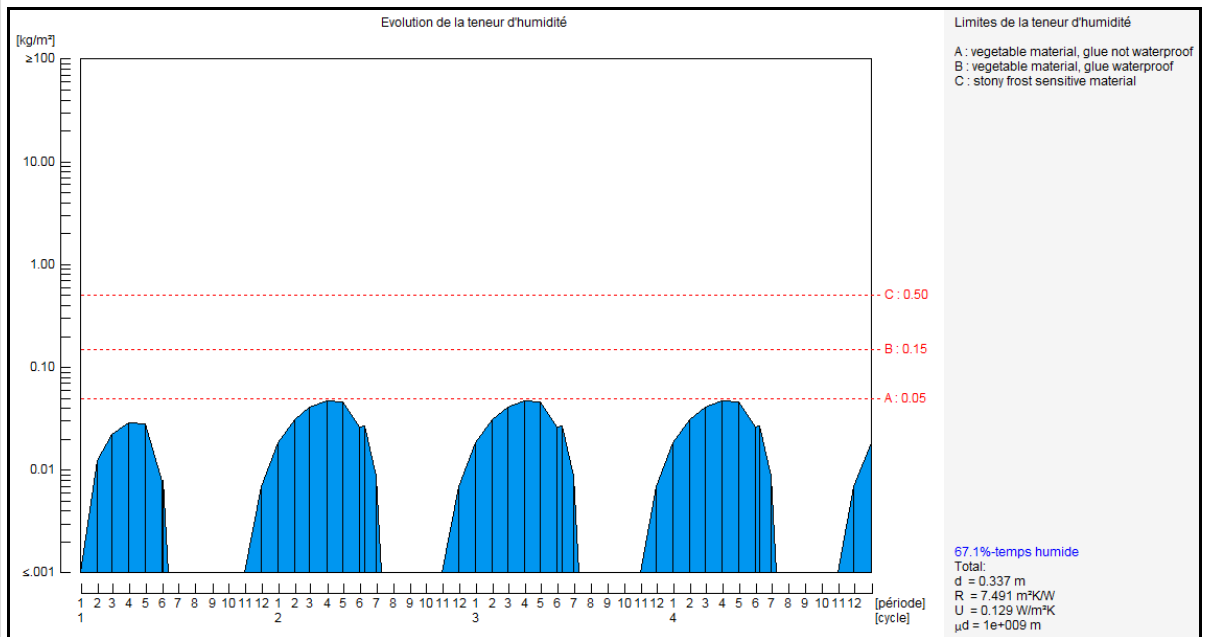


Fig. 86 : Glasta : évolution de la teneur d'humidité dans le plafond sous ambiance extérieure (isolation complète, avec pare-vapeur de μ d = 20 m)

2.9.

L'annexe reconstruite sera recouverte d'une toiture plate dont il est nécessaire d'analyser la composition et la qualité d'isolation thermique.

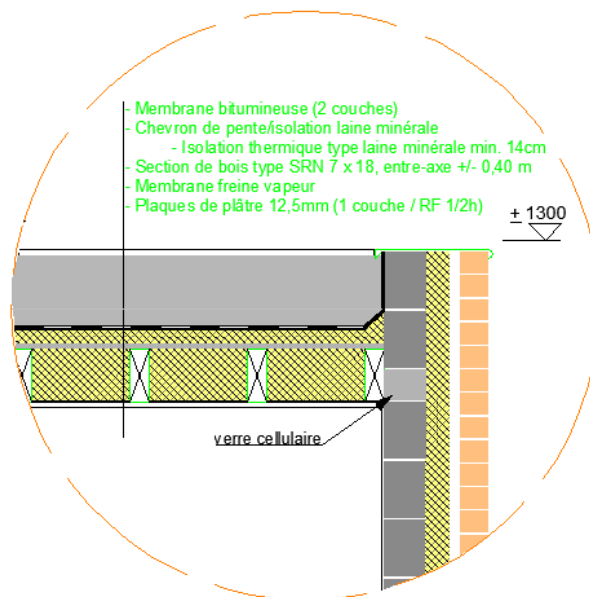


Fig. 87 : illustration de l'emplacement et de la composition de la toiture plate

La toiture plate nécessitant d'office une membrane extérieure d'étanchéité à l'eau, elle ne répond pas au principe général de la constitution d'une enveloppe vis à vis du transfert de vapeur, à savoir être de plus en plus perméable à la vapeur depuis l'intérieur vers



l'extérieur. Le pare-vapeur est donc ici pratiquement toujours nécessaire pour empêcher toute migration de vapeur d'eau à l'intérieur de la paroi de toiture plate, ainsi que nous le verrons dans la seconde partie.

2.9.1. ; ;

Voici la composition encodée dans le logiciel, selon les spécifications des architectes :

U calculé : 0,243 (Valeur U pour extérieur)

Profil de toit : Toit plat + forme de pente

Introduction directe du U : Oui Non

Couches

Extérieur						Résistance superficielle int. Rsi = 0,04 [m²K/W]	
#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	Options	R [m²K/W]		
1	Simple	Membrane bitumeuse (Divers) - AU: 0.23	0.0050		0,022		X
2	Composée	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - AU: 0.18 Laine minérale (MW) - AU: 0.035	0.03	Ⓢ Ⓣ	0,469		X
3	Composée	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - AU: 0.18 Laine minérale (MW) - AU: 0.035	0.18	Ⓢ Ⓣ	3,435		X
4	Simple	Plaques de plâtre entre deux couches de carton (Matériaux hétérogènes)	≤ 0.014		0,05		X

Intérieur

Résistance thermique (surface à surface) Rt = 3,98 [m²K/W]
 Résistance superficielle int. Rsi = 0,10 [m²K/W]
 Résistance thermique totale RT = 4,12 [m²K/W]
Valeur U indicative U = 0,24 [W/m²K]

Fig. 88 : PEB : composition de la toiture plate

La valeur U_{max} est respectée ($U = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K} < 0,3 \text{ W/m}^2\text{K} = U_{max}$).

2.9.2. 6

Voici la composition encodée pour l'évaluation de la diffusion de vapeur d'eau dans le logiciel Glasta de Physibel, suivie des résultats délivrés :

côté 1: extérieur		h1 [W/m²K]	25.000	$\mu d-1$ [m]	0.0014						
No.	Nom	d [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	μ [-]	μd [m]	hup [-]	wcr [kg/m²]	wmax [kg/m²]	w [kg/m²]	pa [-]
1	bitumen	0.0050	0.200	0.025	6.0e+004	300	☐				☐
2	laine de roche	0.2100	0.037	5.676	1.0	0.21	☒	950.000	950.000	0.000	☒
3	carton gypse	0.0125	0.500	0.025	10.0	0.125	☒	250.000	500.000	0.000	☒
côté 2: intérieur		h2 [W/m²K]	7.700	$\mu d-2$ [m]	0.0084						

Fig. 89 : Glasta : composition de la toiture plate

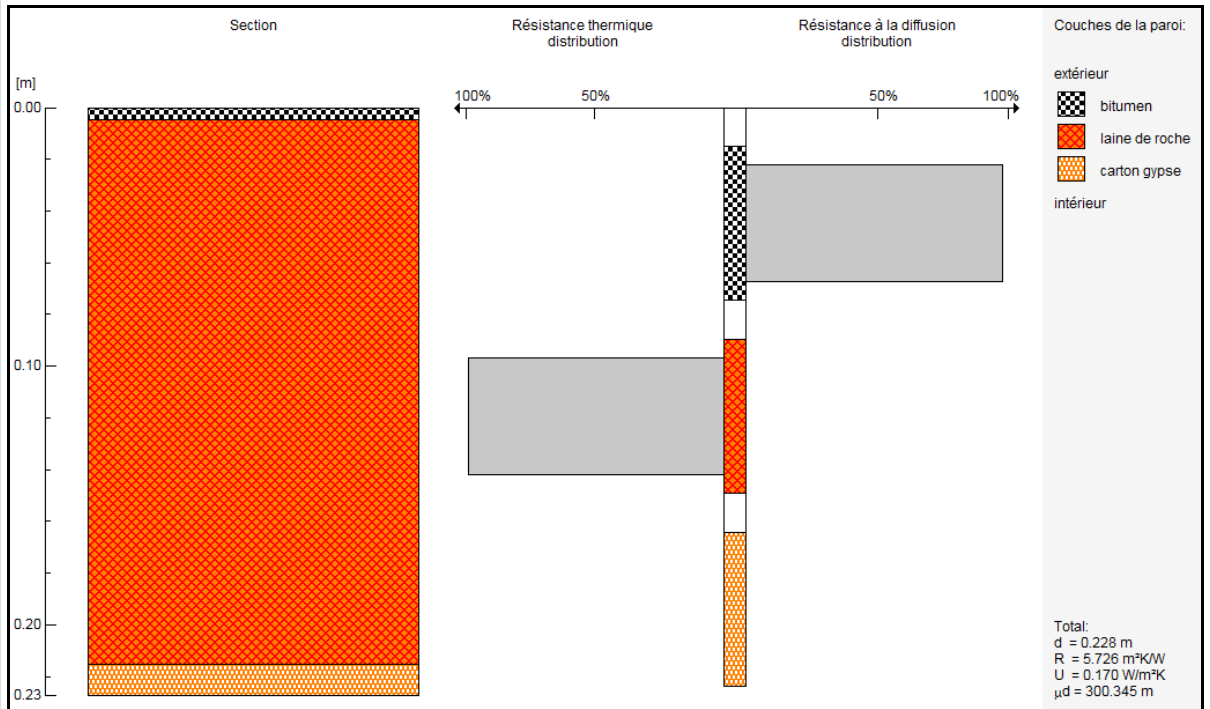


Fig. 90 : Glasta : composition graphique et comparaison des résistances au transfert de chaleur (à gauche) et de vapeur d'eau (à droite) de la toiture plate

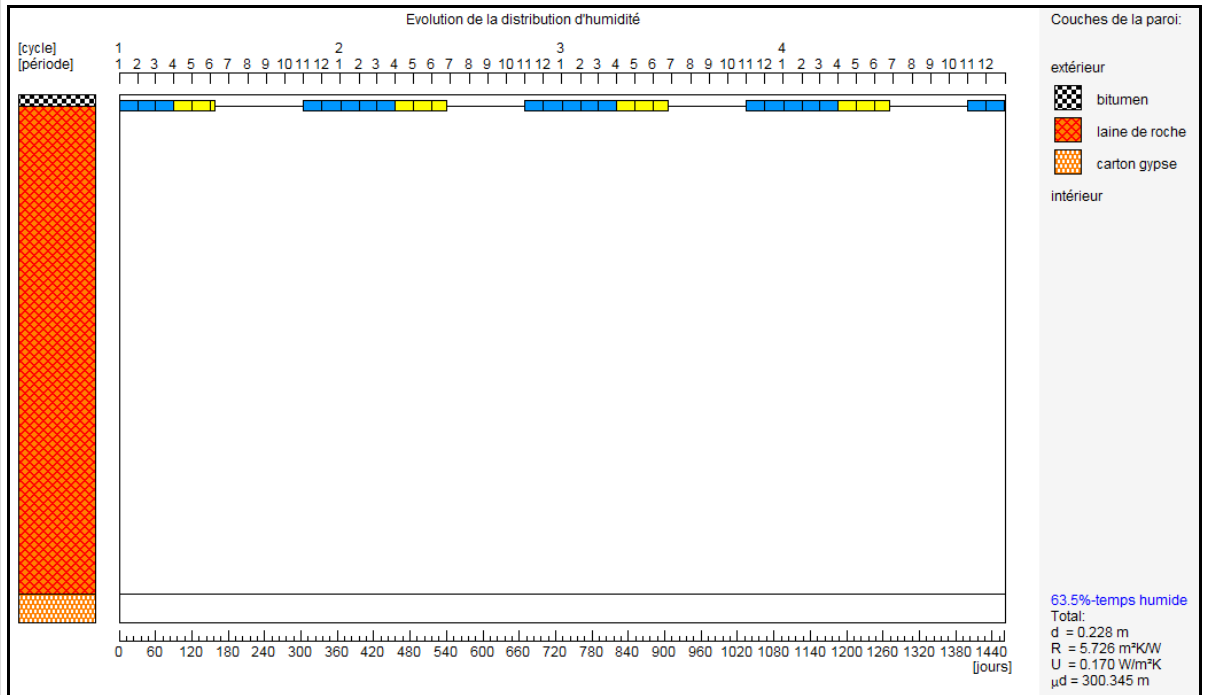


Fig. 91 : Glasta : évolution et distribution d'humidité dans la toiture plate

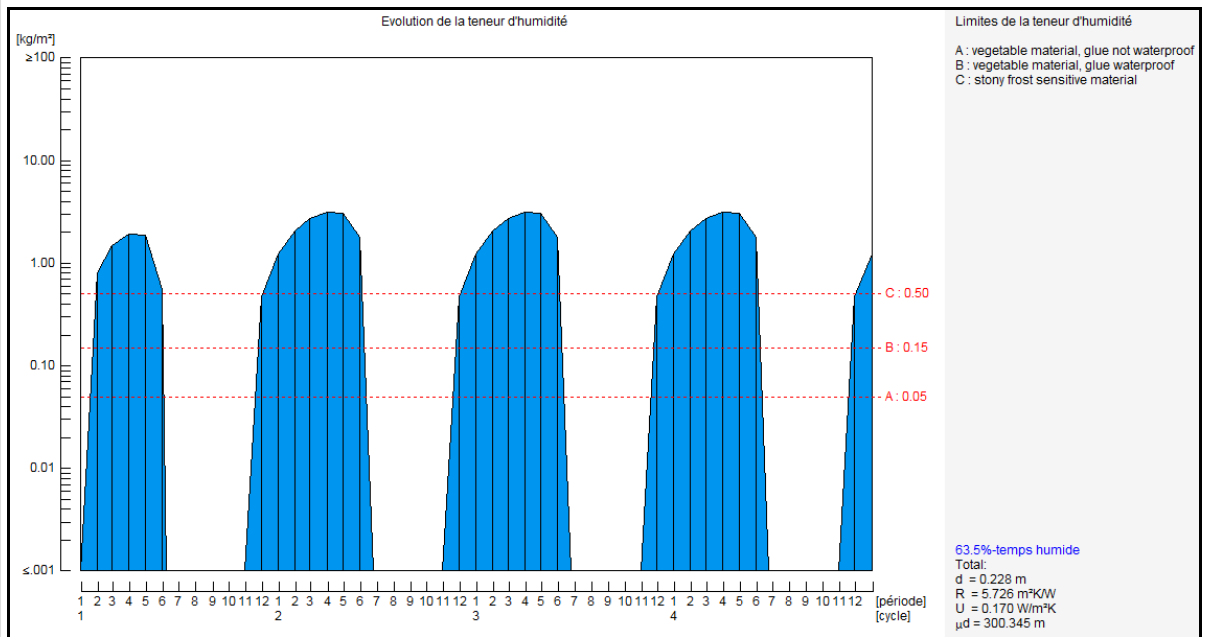


Fig. 92 : Glasta : évolution de la teneur d’humidité dans la toiture plate (situation initiale)

Ces résultats sont, comme nous l’avons expliqué plus haut, somme toute logique pour une toiture plate. L’élément le plus résistant à la diffusion de la vapeur d’eau est l’étanchéité extérieure. Nous n’avons pas encore, dans ces résultats, pris en compte de pare-vapeur, ce qui est fait dans les résultats suivant, avec l’introduction d’une membrane qui oppose à la diffusion de vapeur une résistance de 25 m :

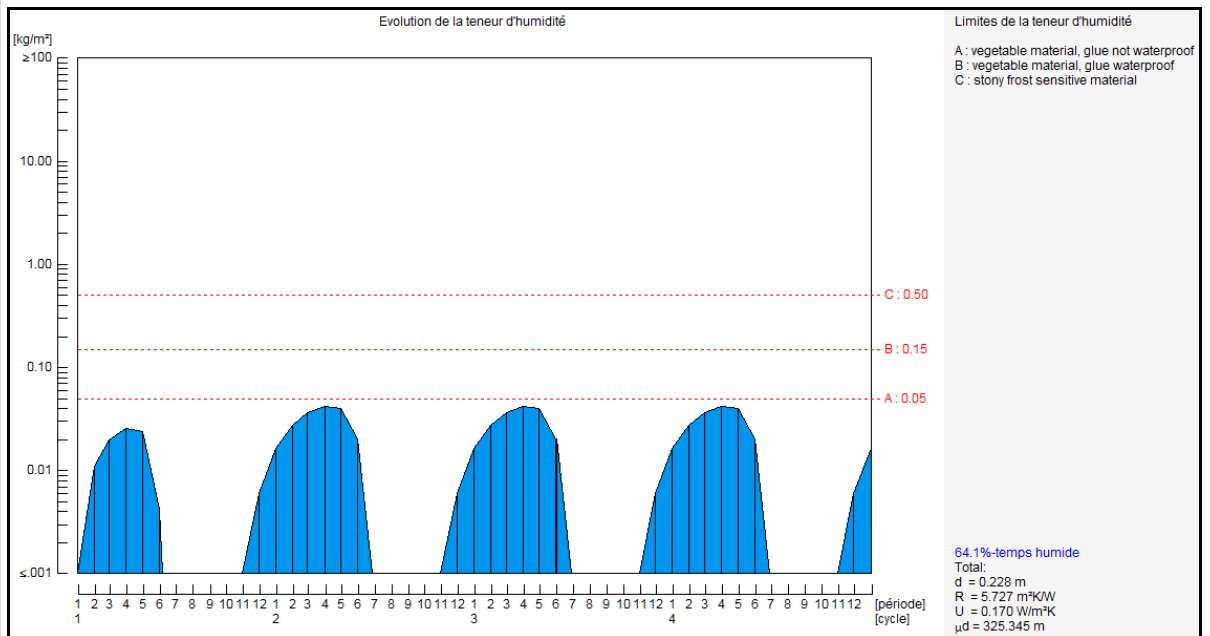


Fig. 93 : Glasta : évolution de la teneur d’humidité dans la toiture plate (avec pare-vapeur de $\mu_d = 25$ m)

Au vu de ces résultats, nous pouvons dire qu’un μ_d de 25 m est un minimum à prescrire pour éviter les dégâts importants dus à la condensation dans la toiture plate.

3. 3 & 4

0

3.1.

Le présent rapport se base sur un projet (provisoire) de texte réglementaire, daté du mois de mars 2010, issu du groupe de réflexion interrégional sur la prise en compte des nœuds constructifs dans la PEB. L'analyse des différents nœuds constructifs dans le chapitre 4 se base donc sur ces textes préliminaires. Notons toutefois que depuis lors, les textes ont été publiés au Moniteur sans faire l'objet de modifications majeures et la réglementation a été implémentée en Wallonie. Nous pouvons donc considérer que les chapitres 3 et 4 sont conformes à la réglementation.

3.2. 5 6 4 0

Dans le domaine de la construction, un pont thermique est un endroit de l'enveloppe où se produisent des pertes de chaleur excessives et où des problèmes de condensation et de moisissures peuvent apparaître. Or, les nouvelles réglementations ont été mises sur pied pour inciter à gérer et traiter les détails d'exécution du point de vue thermique, afin de réduire l'importance des pertes supplémentaires dues à ces points particuliers de l'enveloppe. Dès lors, la connotation négative du terme « pont thermique » ne pouvait s'appliquer à l'ensemble des nœuds constructifs : la notion de conformité à la réglementation PEB apparaît.

Les nœuds constructifs ne sont évidemment pris en compte que dans les parois de la surface de déperdition (identiques à celles considérées dans le calcul du niveau K).

3.3.) 4 0

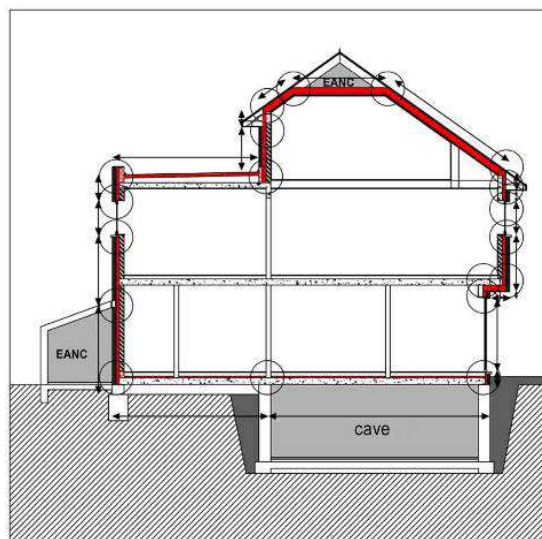


Fig. 94 : exemples de nœuds constructifs linéaires à la jonction de parois de déperdition

Un nœud constructif linéaire peut se présenter aux trois endroits suivants :

- Là où deux parois de la surface de déperdition se rejoignent, même si la coupure thermique est assurée dans le détail (acrotères, appuis de fondation, raccords de fenêtres ou portes à la maçonnerie, jonction de deux façades...). L'intersection entre l'environnement intérieur, l'environnement extérieur et un EANC constitue toujours un nœud constructif, même si la couche isolante est continue.
- Là où une paroi de la surface de déperdition rencontre une paroi à la limite d'une parcelle adjacente, même si cette paroi n'est pas une paroi de la surface de déperdition.

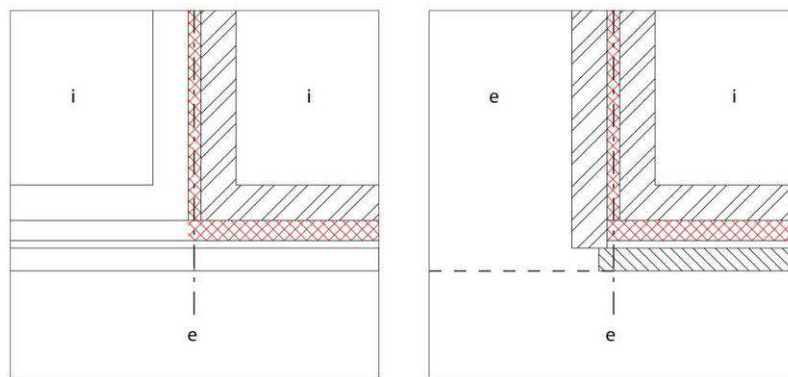


Fig. 95 : exemples de nœuds constructifs à la jonction de parcelles

- Là où, dans une même paroi de la surface de déperdition, la couche isolante est entièrement ou partiellement interrompue.

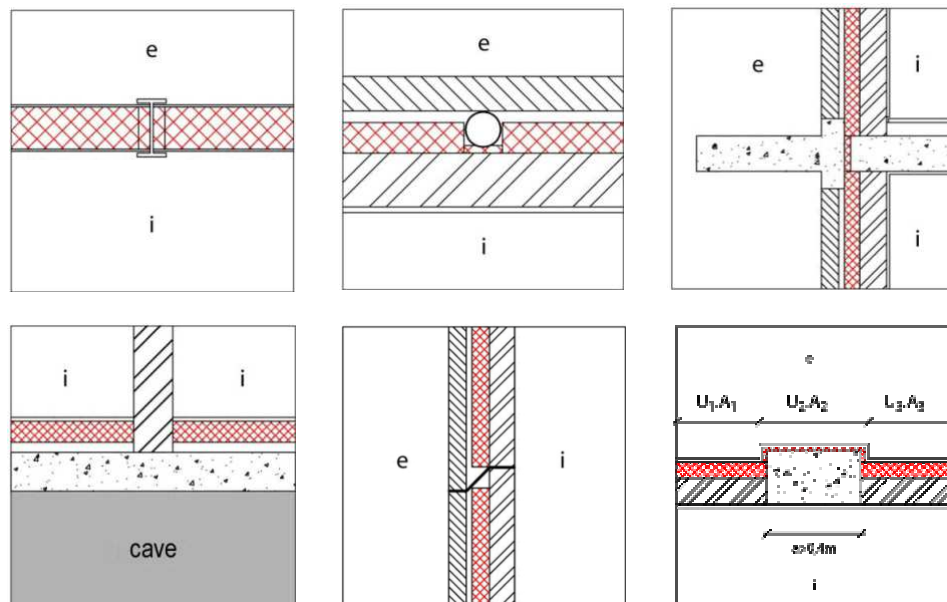


Fig. 96 : exemples de nœuds constructifs dus à l'interruption de la couche isolante. En haut à gauche, la couche isolante est interrompue par un profil en acier et, au centre, par une conduite d'eau pluviale. À droite, l'épaisseur de la couche isolante est diminuée à l'endroit du raccord de balcon. En bas à gauche, la couche isolante du plancher est complètement interrompue par le mur intérieur. En bas au centre, le raccord de la couche isolante par une étanchéité dont l'exécution négligente interromp l'isolation par une couche d'air.

Le cas inférieur droit mérite une explication supplémentaire : la couche isolante ne peut être interrompue que sur une distance maximale de 0,4 m, ce qui signifie qu'en coupe, la plus courte distance entre les deux extrémités de l'interruption de la couche isolante complète ne peut être plus grande que 0,4 m ; dans le cas contraire, l'interruption doit être considérée comme une paroi à part entière. Dans ce cas, deux nœuds constructifs linéaires apparaissent le long des deux côtés de la nouvelle paroi, étant donné qu'à ces endroits, deux parois de la superficie de déperdition se joignent.

3.4.) 4 0

On parle de nœuds constructifs ponctuels lorsque la couche isolante d'une paroi est interrompue ponctuellement, par exemple :

- Colonnes qui traversent la couche isolante d'un plancher au-dessus de l'extérieur, d'un parking, d'une cave... ;
- Poutres perpendiculaires à une paroi qui en interrompent la couche isolante ;
- Points de fixation de capteurs solaires, mâts... qui traversent la couche isolante ;
- Ancrages ponctuels de supports de maçonneries (par exemple supports ponctuels de cornières utilisées localement pour soutenir des maçonneries) ;

3.5.) 4 0 7

Il y a des situations qui provoquent un transfert thermique bi- ou tridimensionnel mais qui ne sont pas considérées comme des nœuds constructifs, soit parce que leur influence sur la déperdition thermique est limitée, soit parce que leur influence est déjà prise en compte dans la perte par transmission à travers les parois de la surface de déperdition.

3.5.1.

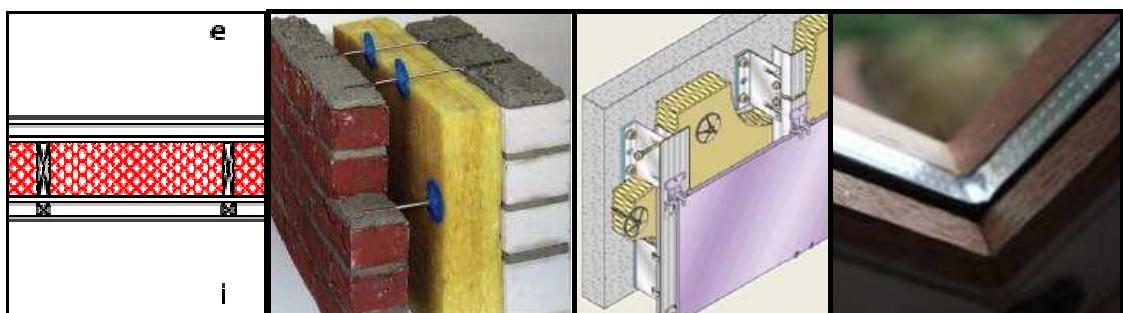


Fig. 97 : Interruption propre à une paroi : exemples de la structure bois, des crochets de maçonnerie, des intercalaires de vitrage et des profils Z de fixation pour habillage de façade

Les interruptions (linéaires ou ponctuelles) qui sont propres à une paroi et qui sont réparties sur sa surface, ne sont pas considérées comme des nœuds constructifs dans la réglementation PEB. Leur influence est déjà prise en compte dans le calcul du coefficient de transmission thermique U de la paroi considérée (ossature bois, intercalaires écarteurs de vitrages, crochets de parement...).

3.5.2.

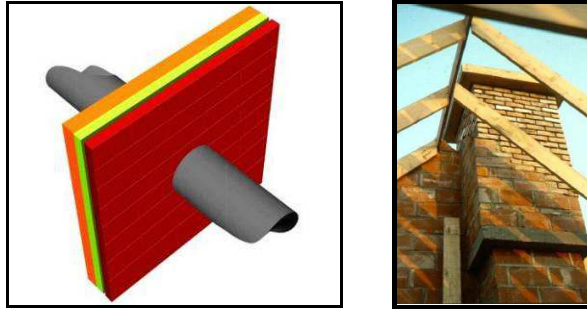


Fig. 98 : Exemple du percement d'une paroi par une canalisation ou une cheminée

Des percements de la paroi – hors plan de la paroi – causés par des gaines de ventilation, des conduits de fumée, des évacuations d'eau pluviale et autres passages de conduites, ne doivent pas être considérés comme des nœuds constructifs ponctuels.

3.5.3.

4

0

Lorsque l'on a déjà pris en compte les déperditions supplémentaires causées par deux ou trois nœuds constructifs linéaires, leur intersection n'est pas considérée comme un nœud constructif ponctuel, la déperdition thermique supplémentaire étant considérée négligeable.

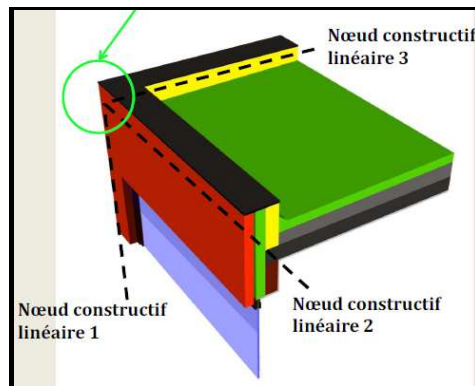


Fig. 99 : Intersection de 3 nœuds constructifs linéaires : exemple du toit plat

3.5.4.

8

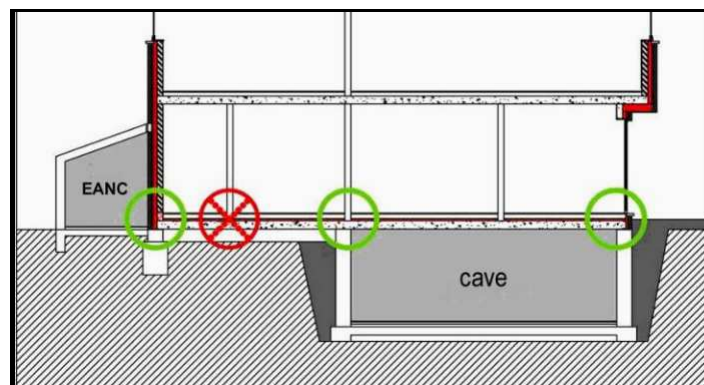


Fig. 100 : Exemple de contacts directs avec le sol

L'annexe IV de l'arrêté PEB prévoit trois options possibles pour déterminer l'impact des nœuds constructifs sur le niveau K (voir Fig. 102 ci-dessus). Une (et une seule) de ces 3 options devra être choisie pour déterminer les déperditions d'un volume K.

3.6.1. C D 6 *

Avec cette option, la déperdition supplémentaire due au nœud constructif est déterminée le plus exactement possible par un calcul numérique à l'aide d'un logiciel validé. On peut choisir de calculer le bâtiment dans son ensemble ou de calculer séparément chacun des nœuds constructifs.

Dans le premier cas, le bâtiment est modélisé et calculé numériquement dans son ensemble, ce qui implique qu'il n'y a pas que la géométrie du bâtiment qui doit être introduite, mais aussi les matériaux utilisés et les détails à l'endroit des nœuds constructifs, ce qui nécessite un travail conséquent avec des connaissances et des logiciels spécialisés.

Le calcul numérique fournit le coefficient de transfert thermique par transmission H_{T3D} , soit la déperdition thermique totale par transmission du bâtiment complet pour une différence de température de 1°K entre l'intérieur et l'extérieur. Ce coefficient est donc la somme du flux thermique au travers des parois ($H_{T\text{ constructions}}$) et du flux thermique au travers des nœuds constructifs ($H_{T\text{ junctions}}$).

La seconde méthode, au niveau des nœuds constructifs, détermine le coefficient de transfert thermique pour chaque nœud constructif séparément : une valeur Ψ_e est déterminée pour chaque nœud constructif linéaire et une valeur χ_e pour chaque nœud constructif ponctuel. Pour chaque nœud constructif, il est permis de choisir :

- La valeur exacte de Ψ_e et/ou χ_e , déterminée d'après un calcul numérique validé ;
- Une valeur par défaut (défavorable, mais solution facile pour les nœuds constructifs dont les coefficients ne sont pas facilement disponibles).

3.6.2. C ; 6 , * 4 ; ; < 0

Des recherches sur les logements existants ont montré que l'influence de nœuds constructifs bien étudiés s'élevait à environ 3 points sur le niveau K total d'un logement. Si on peut montrer que les nœuds constructifs sont effectivement bien étudiés (« PEB-conformes »), alors un supplément forfaitaire de 3 points K est prévu pour ces nœuds constructifs (sans autre calcul). Les nœuds constructifs qui ne satisfont pas les critères sont comptés séparément, de la même manière que dans l'option A.

Cette option a pour avantage que le calcul total pour la prise en compte des nœuds constructifs est réduit à un minimum. Il n'est pas nécessaire ici de déterminer les valeurs Ψ_e et χ_e , ni les longueurs des nœuds constructifs linéaires ou le nombre des nœuds constructifs ponctuels conformes.

3.6.3. C 8 6 0 0

Lorsque le maître d'œuvre et/ou le maître de l'ouvrage ne font pas l'effort d'étudier ou de limiter la déperdition thermique au droit des nœuds constructifs, l'influence

inconnue des nœuds constructifs sur la déperdition thermique totale est fixée par une pénalité forfaitaire de 10 points sur le niveau K.

Cette option, comme l'option précédente, ne décharge pas le maître d'œuvre de la responsabilité de réduire au minimum absolu les risques dus aux ponts thermiques, par exemple de moisissures et de condensation.

3.7.) 4 : ; < 0

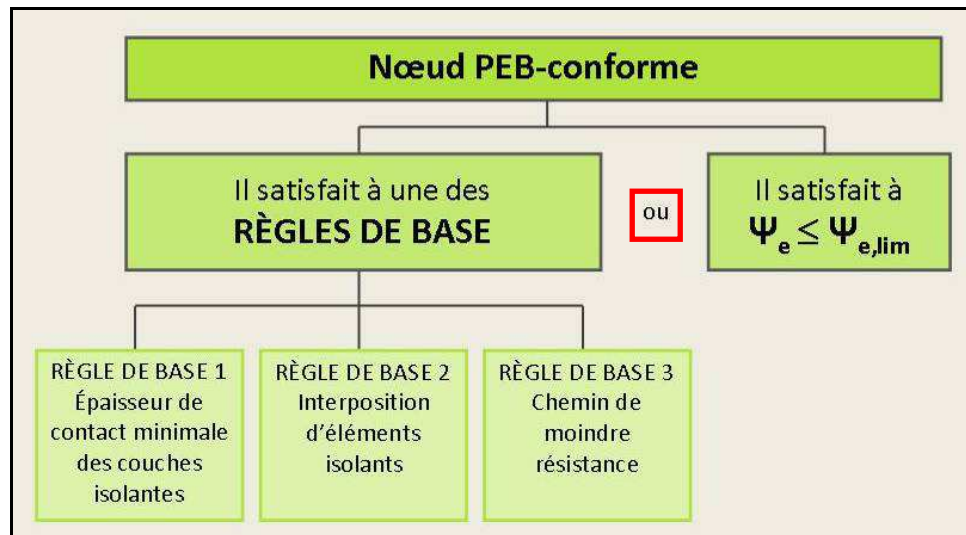


Fig. 103 : Règles de conformité pour les nœuds constructifs

Il s'agit de nœuds constructifs dont la configuration n'amène aucune perte énergétique excessive. Par conséquent, sont considérés « négligeables » :

- Les nœuds constructifs qui répondent à une des règles de base d'une configuration à pont thermique négligeable.
- Les nœuds constructifs qui satisfont à la valeur limite qui est d'application : $\Psi_e \leq \Psi_{e,lim}$.

3.7.1. 5 0 *

Les « règles de base pour un détail à pont thermique négligeable » se focalisent chacune sur les couches isolantes des parois et sur d'éventuels éléments isolants interposés. Il est important de définir clairement ce que l'on entend par couche isolante d'une paroi de la surface de déperdition : il s'agit en théorie de la couche de matériau avec la plus grande résistance thermique.

Pour une couche de construction composée, la résistance thermique doit être prise en compte en pondérant la conductivité thermique selon la superficie (dans le cas exemple d'une isolation placée dans une ossature bois, en appliquant les fractions de bois et d'isolant).

La couche isolante peut également être constituée de plusieurs couches de matériaux, homogènes ou non, à condition que :

- o les couches accolées de matériaux se succèdent ET

- il n'y ait aucune couche d'air intercalée ET
- chacune des couches de matériaux ait une valeur $\lambda \leq 0,2 \text{ W/mK}$.

Dans ce cas, les couches isolantes doivent être considérées comme une couche isolante assemblée, avec une épaisseur $d = \sum d_i$ et la résistance thermique $R = \sum R_i$.

Remarques :

- Une succession ininterrompue de couche de matériaux qui satisfont aux conditions de base doit être considérée comme une couche isolante assemblée. On ne peut donc pas considérer une seule des couches de matériaux comme la couche isolante.
- Pour l'application des règles de base, il ne peut y avoir qu'une seule couche d'isolation. Si par exemple, outre l'isolation du creux, une isolation par l'extérieur devait être placée, alors une seule des deux (celle avec la plus grande résistance thermique) doit être considérée comme couche isolante de la paroi.

3.7.2. 8 6 0 ' A& 1 ' 0 1 * 9

Les règles de base permettent, d'une manière simple et principalement visuelle, de déterminer si un nœud constructif est PEB-conforme ou non. Le calcul est de ce fait fortement simplifié, vu qu'aucun calcul numérique n'est exigé. Ces règles de base sont basées sur le principe de la « continuité thermique » garantie : les couches isolantes de deux parois jointives de la surface de déperdition doivent s'accoler de manière toujours continue. La condition peut être satisfaite par une des trois situations suivantes :

- Règle de base 1 : les couches isolantes sont jointes directement l'une à l'autre avec une épaisseur de contact minimale.
- Règle de base 2 : les couches isolantes ne se joignent pas directement mais il existe des éléments isolants intercalés, de sorte que la coupure thermique est conservée.
- Règle de base 3 : les couches isolantes ne se joignent pas directement et la coupure thermique ne peut pas être assurée. Dans ce cas, le « chemin de moindre résistance » doit être suffisamment long.

Si un nœud constructif satisfait à une de ces trois règles de base, le nœud constructif est par définition PEB-conforme.

%A& 6
*

Cette règle de base est d'application aux nœuds constructifs où les couches isolantes des parois qui se joignent peuvent se connecter directement l'une à l'autre. Du point de vue thermique, la meilleure solution pour ces nœuds constructifs est d'assurer un maximum de contact entre les couches isolantes, ce qui signifie que l'épaisseur de contact entre les deux couches isolantes (d_{contact}) doit être la plus grande possible. Du point de vue pratique cette situation n'est pas toujours faisable. C'est pourquoi, la règle de base 1

prévoit la possibilité de s'écarter jusqu'à une certaine limite de cette situation thermiquement idéale :

$$d_{\text{contact}} \geq \frac{1}{2} * \min (d_1, d_2), \text{ avec :}$$

- d_{contact} = épaisseur de contact des couches isolantes entre elles.
- d_1 et d_2 = épaisseurs respectives des couches isolantes des 2 parois qui se joignent.

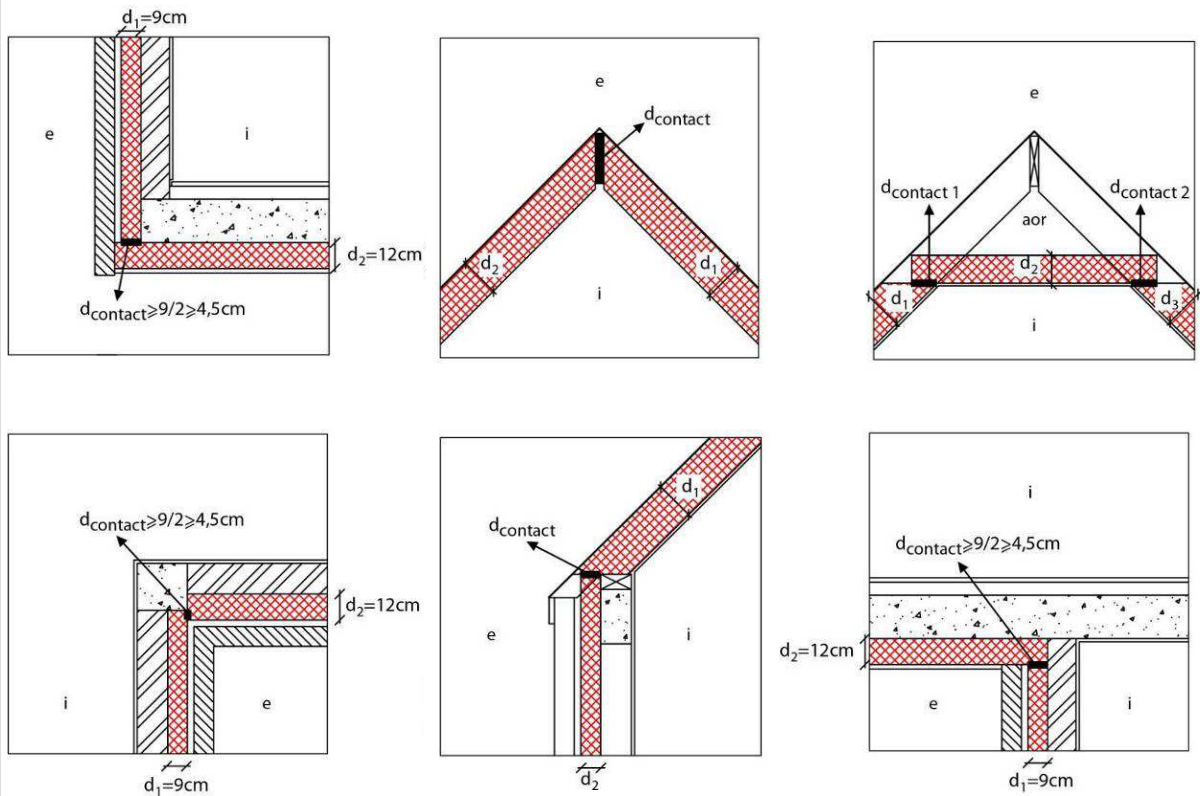


Fig. 104 : Epaisseur minimale de contact : exemples

Dans le cas des châssis de fenêtre ou de porte sans coupure thermique, la formule de base 1 reste valable mais l'épaisseur d_i du châssis de fenêtre ou de porte doit être interprétée comme l'épaisseur du cadre fixe du châssis de fenêtre ou de porte mesuré perpendiculairement au plan du vitrage.

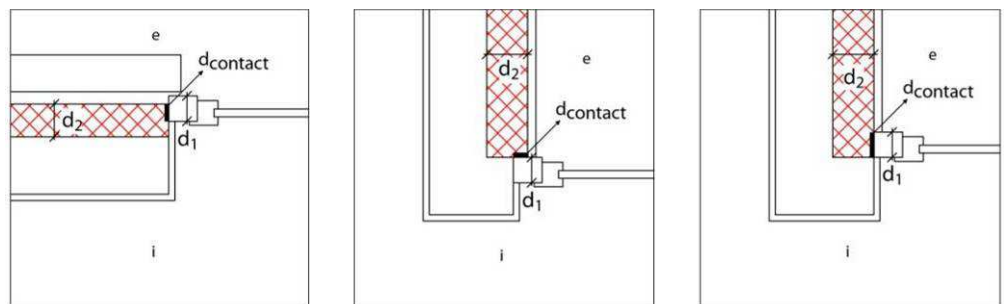


Fig. 105 : Epaisseur minimale de contact : exemples de châssis sans coupure thermique

Dans le cas de châssis de porte ou de fenêtre avec coupure thermique, on n'utilise pas la formule générale de la règle de base 1, mais la couche isolante (de la paroi) doit nécessairement être en contact direct avec la

coupure thermique, sur toute son épaisseur.

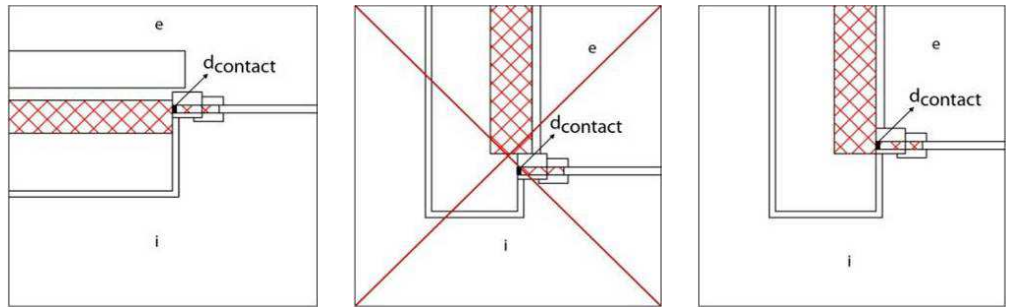


Fig. 106 : Epaisseur minimale de contact : exemples de châssis avec coupure thermique

%A& 6

Cette règle de base est d'application pour les nœuds constructifs où les couches isolantes ne peuvent pas se raccorder directement l'une à l'autre mais où il existe bien la possibilité d'intercaler des éléments isolants, qui maintiennent ainsi la coupure thermique (exemples : raccord d'un toit plat avec un mur extérieur, appuis de fondation...).



Fig. 107 : Exemples d'interposition d'un élément isolant

La règle de base 2 indique que tous les éléments isolants doivent répondre simultanément aux trois exigences représentées sur le schéma ci-dessous.

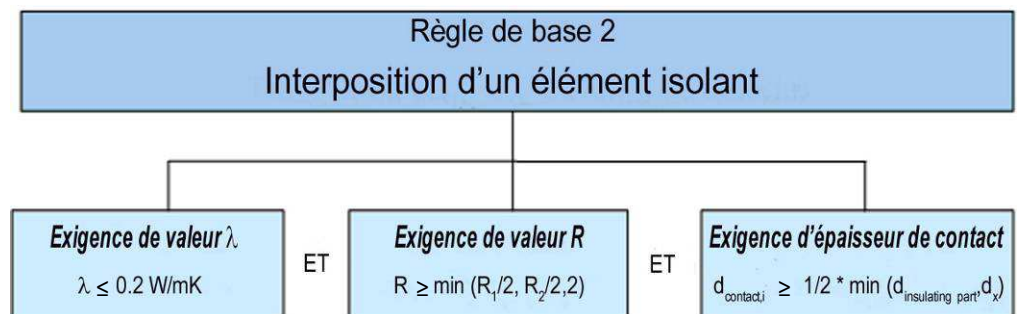


Fig. 108 : Règles de conformité pour les éléments isolants interposés

Exigence de valeur λ : La conductivité thermique $\lambda_{insulating\ part}$ de chacun des éléments isolants doit être $\leq 0,2\ W/mK$;

Remarque : il est parfois nécessaire de placer des fixations mécaniques qui percent localement l'élément isolant interposé, telles que des ancrages de fenêtres, des chevilles... Si ces fixations mécaniques ont une valeur $\lambda > 0,2\ W/mK$ et si elles relient les faces chaude et froide de l'isolant, la

superficie totale de ces fixations mécaniques ne peut dépasser 1 cm² par mètre courant de nœud constructif.

Exigence de valeur R : la résistance thermique R de l'élément isolant doit être suffisamment grande, comparativement aux caractéristiques des couches isolantes environnantes : plus la capacité d'isolation des couches isolantes (résistances thermiques R_1 et R_2) est grande, plus la résistance thermique R d'un élément isolant inséré doit être grande également.

L'exigence sur la valeur R impose que la résistance thermique de chaque élément isolant ne peut être inférieure à la moitié de la plus petite des valeurs R_1 et R_2 . Pour que l'exigence de valeur R reste supportable dans le cas de fortes isolations, une limite à été fixée pour R, à savoir 2 m²K/W.

$$R \geq \min (R_1/2, R_2/2, 2)$$

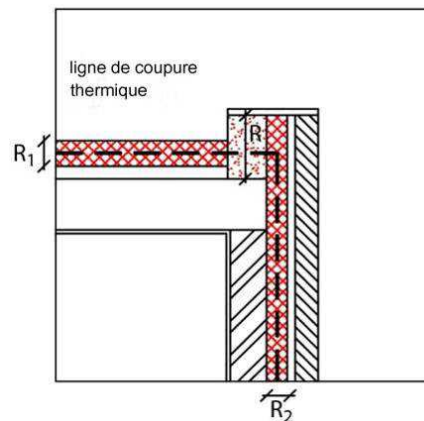


Fig. 109 : Résistance thermique minimale de l'élément interposé : exemple uni-directionnel

Remarques :

- Dans le cas d'éléments isolants orthogonaux, l'épaisseur $d_{insulating part}$ doit toujours être mesurée perpendiculairement à la ligne de coupure thermique qui les traverse. Lorsque la ligne de coupure thermique traverse l'élément isolant suivant deux directions, alors il y a deux valeurs R pour un même élément isolant, qui doivent toutes deux répondre à l'exigence de valeur R.

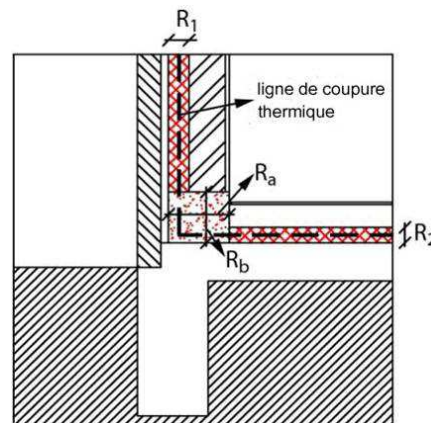


Fig. 110 : Résistance thermique minimale de l'élément interposé : exemple bi-directionnel

- Dans le cas plus particulier des éléments isolants non orthogonaux, il ne faut pas mesurer en fonction de la ligne de coupure thermique mais il faut uniquement relever la plus courte distance qui sépare la face chaude de la face froide de l'élément isolant. Cette plus courte distance constitue le point « faible » de l'élément isolant et détermine de ce fait la valeur minimale de la résistance thermique de l'élément isolant.

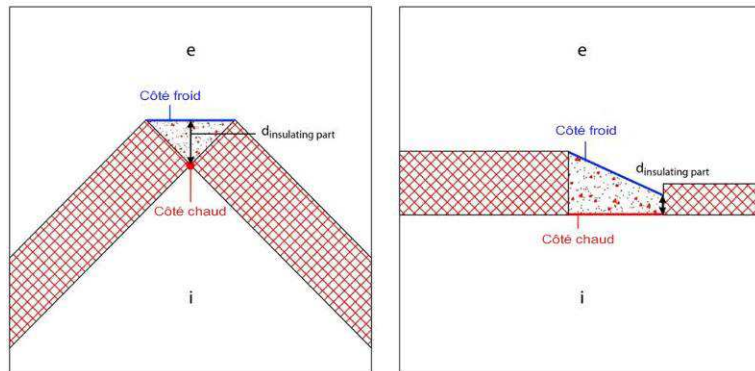


Fig. 111 : Résistance thermique minimale de l'élément interposé : exemple non-orthogonal

- Lorsqu'un châssis de fenêtre ou de porte joint le nœud constructif, l'exigence de valeur R de la règle de base 2 est légèrement adaptée. Il n'est notamment pas tenu compte de la valeur U_f du châssis de fenêtre ou de porte mais uniquement de la résistance thermique de la couche isolante de la paroi opaque. La limite supérieure est abaissée à $1,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ dans le cas de fortes isolations.

$$R \geq \min (R_1/2 ; 1,5)$$

- Dans certains cas, il est permis d'« additionner » l'influence de différents éléments isolants. Les épaisseurs et les résistances thermiques peuvent être additionnées dans une direction perpendiculaire à la ligne de coupure thermique si chacun des éléments isolants a une valeur $\lambda \leq 0,2 \text{ W/mK}$ ET qu'il n'y a aucune couche d'air entre eux. Cela permet de considérer les différents éléments isolants comme un élément isolant « homogène » avec une épaisseur $d = \sum d_i$ de chacun des éléments isolants et la résistance thermique $R = \sum R_i$ de chacun des éléments isolants.
- Ligne de coupure thermique : ligne ininterrompue qui peut être tracée d'une couche isolante à une autre, en passant à travers les éléments isolants. Une ligne de coupure thermique doit être le plus possible parallèle aux limites des couches isolantes et des éléments isolants qu'elle traverse. La position de ligne de coupure thermique n'est pas importante, tant qu'elle répond à la définition ; si une ligne de coupure thermique peut être tracée, une infinité peut l'être. Si l'exigence de valeur R est respectée pour une ligne de coupure thermique, alors elle l'est pour toutes les autres.

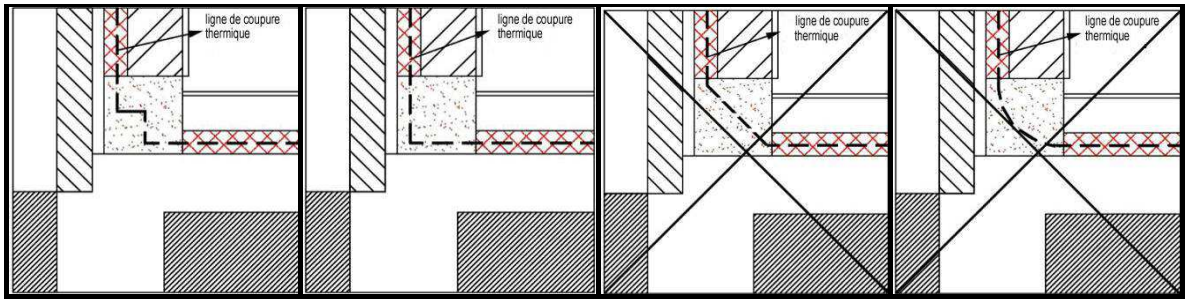


Fig. 112 : Exemples de lignes de coupure thermique

- Dans le cas de châssis de fenêtre et de porte avec coupure thermique, la ligne de coupure thermique doit passer par la coupure thermique du châssis.

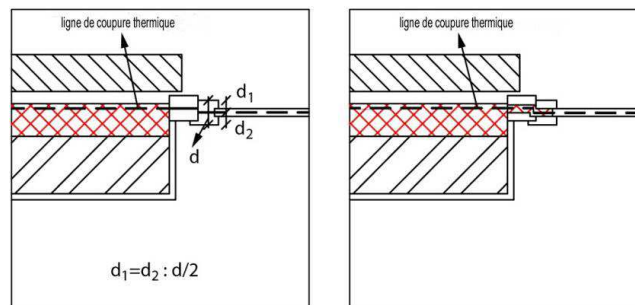


Fig. 113 : Exemples de lignes de coupure thermique (cas des châssis)

Exigence d'épaisseur de contact : la situation dans laquelle deux couches isolantes se joignent directement est très comparable à la situation dans laquelle un élément isolant joint directement une couche isolante ou un autre élément isolant. Dans les deux situations, les épaisseurs des éléments ou couches qui se joignent jouent un rôle dans la formulation de l'exigence.

$$d_{\text{contact},i} \geq \min (d_{\text{insulating part}}/2, d_x/2)$$

Si un élément isolant d'une épaisseur $d_{\text{insulating part}}$ est accolé à une couche isolante, alors d_x est à considérer comme l'épaisseur de la couche isolante et la moitié de la plus petite des deux épaisseurs est la limite inférieure de l'épaisseur de contact entre eux.

Si un élément isolant d'une épaisseur $d_{\text{insulating part}}$ est accolé à un autre élément isolant, alors d_x est à considérer comme l'épaisseur de l'autre élément isolant et, à nouveau, la moitié de la plus petite des deux épaisseurs est la limite inférieure de l'épaisseur de contact entre eux.

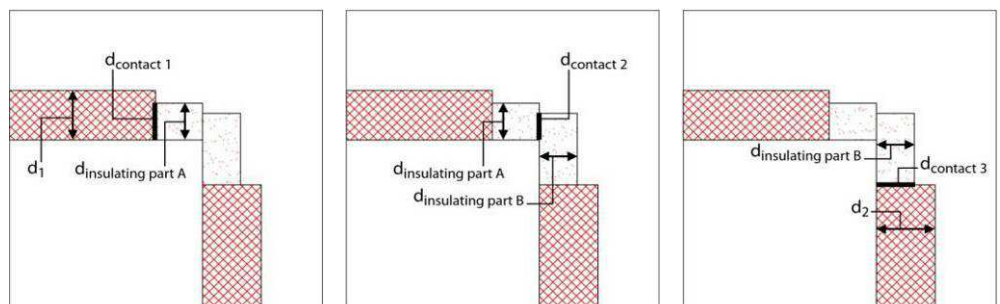


Fig. 114 : Epaisseur minimale de contact avec l'élément isolant interposé

Remarques :

- Si un élément isolant joint un châssis de fenêtre ou de porte sans coupure thermique, alors d_x est égal à l'épaisseur du cadre fixe du châssis de fenêtre ou de porte, mesurée perpendiculairement au plan du vitrage.
- Si un élément isolant joint un châssis de fenêtre ou de porte avec coupure thermique, alors il faut que l'élément isolant soit en contact direct avec la coupure thermique et ce sur toute l'épaisseur de la coupure thermique.

%A& 6 & *

Il existe des situations dans lesquelles les couches isolantes ne peuvent pas se joindre directement et dans lesquelles il n'est pas possible d'intercaler un élément isolant (par exemple, pour des raisons de stabilité). La coupure thermique ne peut pas, dans de telles situations, être conservée. Cela ne signifie pas pour autant qu'on ait à faire à un détail mal étudié. La règle de base 3 prévoit en effet une possibilité d'obtenir quand même, sans coupure thermique, un nœud constructif PEB-conforme.

La 3^e règle de base suppose que le flux thermique suivra toujours le chemin le plus facile de l'intérieur vers l'extérieur. Si la coupure thermique n'est pas présente, alors cela signifie que le flux thermique suit le chemin vers l'extérieur qui passe par l'interruption des couches isolantes, ce que l'on appelle le « chemin de moindre résistance ».

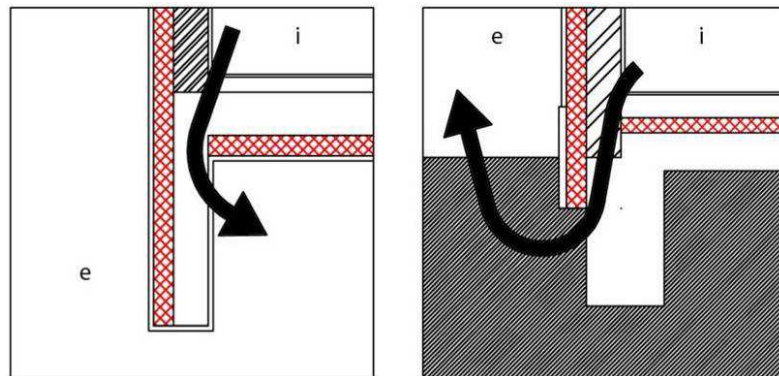


Fig. 115 : Chemin de moindre résistance : exemples

Le chemin de moindre résistance est strictement défini comme le plus court trajet entre l'environnement intérieur et l'environnement extérieur ou un espace adjacent non chauffé, qui ne coupe nulle part une couche d'isolant ou un élément isolant dont la résistance thermique est plus grande ou égale à la plus petite des deux résistances R_1 et R_2 (= les résistances thermiques des couches isolantes des parois). Cela signifie qu'on doit dessiner, sur le plan de coupe du nœud constructif, la ligne la plus courte, de l'intérieur vers l'extérieur ou vers un EANC qui ne coupe nulle part une couche isolante. Si la longueur totale de cette ligne est inférieure à 1 mètre, alors il est recommandé d'ajouter de l'isolant, à condition que cet isolant présente une résistance thermique plus grande ou égale à la plus petite valeur de R_1 et R_2 .

Le chemin de moindre résistance doit contourner les « obstacles », ce qui l'allonge automatiquement et permet de satisfaire l'exigence pour le nœud constructif.

On parle de nœud PEB-conforme lorsque le chemin de moindre résistance est suffisamment long, à savoir, plus grand ou égal à 1 mètre. Lorsque c'est le cas, le flux thermique doit franchir une distance suffisamment grande et la déperdition thermique peut rester limitée.

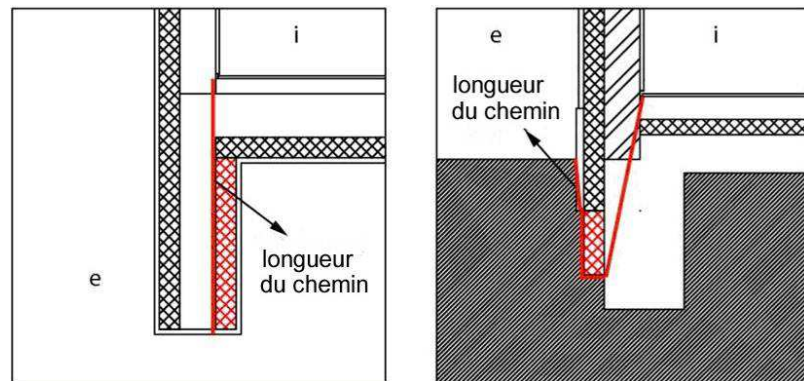


Fig. 116 : Chemin de moindre résistance : exemples de solutions

3.7.3. Ψ_e et $\Psi_{e,lim}$

Lorsqu'à l'aide d'un calcul numérique validé, il peut être démontré que la valeur Ψ_e d'un nœud constructif est plus petite ou égale à la valeur limite correspondante $\Psi_{e,lim}$, alors le nœud constructif est PEB-conforme. Cela peut être démontré de plusieurs manières, tant que le calcul a été effectué à l'aide d'un calcul numérique validé, personnel, fourni par le fabricant, extrait d'une base de données...

Ces valeurs limites $\Psi_{e,lim}$ sont définies par type de nœud constructif.

Valeurs limites des coefficients de conductivité linéiques Ψ_e :

	$\Psi_{e,lim}$
1. ANGLE SORTANT (1)(2)	
• 2 murs	-0,10 W/m.K
• Autres angles sortants	0,00 W/m.K
2. ANGLE RENTRANT (3)	0,15 W/m.K
3. RACCORDS aux FENÊTRES et aux PORTES	0,10 W/m.K
4. APPUI DE FONDATION	0,05 W/m.K
5. BALCONS - AUVENTS	0,10 W/m.K
6. RACCORDS DE PAROIS D'UN MÊME VOLUME PROTÉGÉ OU ENTRE 2 VOLUMES PROTÉGÉS DIFFÉRENTS AVEC UNE PAROI DE LA SURFACE DE DÉPERDITION	0,05 W/m.K
7. TOUS LES NŒUDS QUI N'ENTRENT PAS DANS LES CATÉGORIES 1 à 6	0,0 W/m.K
(1) A l'exception d'appui de fondation	
(2) Pour un "angle sortant", l'angle α - mesuré entre les deux faces extérieures de la paroi de la surface de déperdition- doit satisfaire à : $180^\circ < \alpha < 360^\circ$.	
(3) Pour un "angle rentrant", l'angle α - mesuré entre les deux faces extérieures de la paroi de la surface de déperdition- doit satisfaire à : $0^\circ < \alpha < 180^\circ$.	

Fig. 117 : Valeurs de $\Psi_{e,lim}$

Extraire une valeur Ψ_e d'une base de données ou d'une autre source est seulement autorisé à condition que le détail personnel corresponde entièrement (géométrie,

valeurs λ...) au détail pour lequel la valeur Ψ_e a été calculée. Si ce n'est pas le cas, alors un nouveau calcul numérique validé est toujours nécessaire.

Il est à remarquer qu'aucune valeur limite n'est définie pour les nœuds constructifs ponctuels.

3.8. =

3.8.1.) 4 0
&

Pour tenir compte, à l'aide de calculs numériques validés, d'un nœud constructif linéaire qui se situe à la limite de plusieurs volumes protégés, il faut regarder chaque part propre $\Psi_{e,i}$ du total de la valeur Ψ_e . Cette part propre $\Psi_{e,i}$ doit être plus petite ou égale au $\Psi_{e,lim}$, partagé par le nombre de volumes protégés i dans lesquels le nœud de construction linéaire est impliqué.

L'exemple de la Fig. 118 montre un nœud constructif qui se trouve à l'intersection entre 2 volumes protégés.

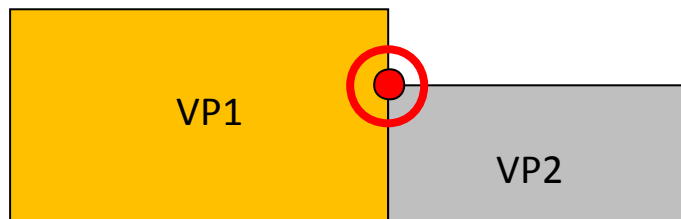


Fig. 118 : Nœuds constructifs linéaires entre 2 volumes protégés ou plus

Selon le tableau, ce nœud constructif doit être catalogué comme un angle rentrant
→ Pour le nœud constructif dans son entièreté $\Psi_{e,lim,TOT} = 0,10 \text{ W/mK}$.

Une part des déperditions totales du nœud constructif doit être attribuée au volume protégé 1 ($\Psi_{e,1}$) et une autre au volume protégé 2 ($\Psi_{e,2}$). Nous avons donc :

$$\Psi_{e,1} + \Psi_{e,2} = \Psi_{e,TOT}$$

$$\Psi_{e,1} \leq \Psi_{e,lim,TOT} / 2 = 0,05 \text{ W/mK}$$

$$\Psi_{e,2} \leq \Psi_{e,lim,TOT} / 2 = 0,05 \text{ W/mK}.$$

3.8.2. 8 1 4 0
00 ' &

Dans certaines situations, les nœuds de construction linéaires sont si proches les uns des autres qu'il n'est physiquement pas possible de les séparer ni, pour chacun d'eux, de déterminer une valeur Ψ_e et de la vérifier par rapport à la valeur limite (voir Fig. 119 ci-dessous). Pour ces cas, il est permis de considérer la combinaison comme un nœud constructif « combiné » constitué des différents nœuds de construction. Ceci ne tient pas compte des nœuds constructifs ponctuels.

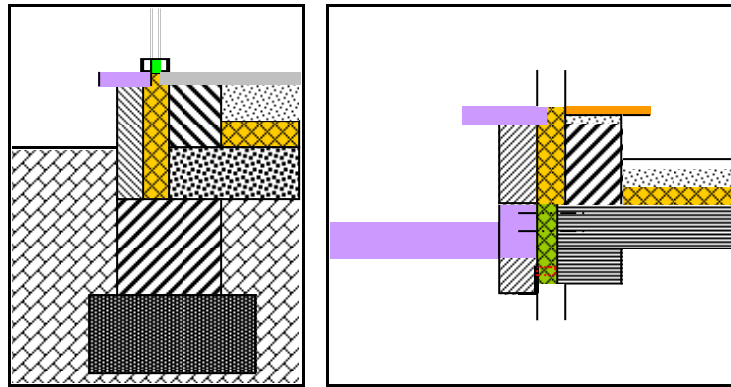


Fig. 119 : Combinaisons de nœuds constructifs linéaires difficiles à distinguer. À gauche, un appui de fondation en combinaison avec un seuil de fenêtre ou de porte. À droite, un encastrement de balcons en combinaison avec le raccordement d'une fenêtre au dessus et/ou en dessous du balcon.

- Raccord à la fondation : $\Psi_{e,lim} = 0,05 \text{ W/mK}$
- Seuil de porte : $\Psi_{e,lim} = 0,10 \text{ W/mK}$
- Balcon : $\Psi_{e,lim} = 0,10 \text{ W/mK}$
- Seuil de fenêtre : $\Psi_{e,lim} = 0,10 \text{ W/mK}$
- → Pour celui de gauche, $\Psi_{e,lim,TOT} = 0,05 + 0,10 = 0,15 \text{ W/mK}$.
- → Pour celui de droite, $\Psi_{e,lim,TOT} = 0,10 + 0,10 + 0,10 = 0,30 \text{ W/mK}$.

3.9. > 0

Dans le cas où le nœud n'est pas PEB-conforme et que l'on ne souhaite pas en déterminer les déperditions supplémentaires par un calcul numérique, il est toujours possible de prendre en considération une valeur par défaut, par définition plus pénalisante. Celle-ci est fonction du matériau, des valeurs $\Psi_{e,lim}$ et, dans le cas des nœuds ponctuels, de la section de l'élément qui constitue l'interruption de la couche isolante.

3.9.1.) 4 0

- Nœuds constructifs sans coupure thermique, avec liaisons structurelles linéaires en acier ou en béton armé (exemples : linteaux qui traversent l'isolant jusqu'à la face extérieure, balcons traversant, supports métalliques de la maçonnerie extérieure qui touchent la face intérieure sur toute sa longueur...)

$$\Psi_{e,def} = 0,9 + \Psi_{e,lim} \text{ [W/mK]}$$

- Nœuds constructifs avec coupure thermique avec liaisons structurelles ponctuelles en métal (exemple : balcons suspendus avec un système préfabriqué d'ancrage enrobé d'isolant)

$$\Psi_{e,def} = 0,4 + \Psi_{e,lim} \text{ [W/mK]}$$

- Autres :

$$\Psi_{e,def} = 0,15 + \Psi_{e,lim} \text{ [W/mK]}$$

3.9.2.) 4 0

- Coupures de la couche isolante par des éléments en métal (exemples : profil « L » en acier qui traverse la couche isolante d'une façade, points de suspension pour supports de maçonnerie...)

$$\Psi_{e,def} = 4,7 * z + 0,03 \text{ [W/K]}$$

z = longueur du côté du carré dans lequel s'inscrit le percement [m]

- Coupures de la couche isolante par d'autres matériaux que le métal (exemple : colonne en béton qui traverse la couche isolante d'un plancher...)

$$\Psi_{e,def} = 3,8 * A + 0,1 \text{ [W/K]}$$

A = surface du percement [m²]

4.) 4 0

4.1. * ?

Nous allons, dans la suite de ce rapport, étudier la conformité (ou la non-conformité) de plusieurs nœuds constructifs, choisis en concertation avec les autres partenaires du projet Réno2020. Ces nœuds concernent l'ensemble des parois de déperdition du bâtiment et des points singuliers « habituels » du secteur de la rénovation.

Les nœuds seront tous analysés suivant le même principe : les plans et/ou coupes nous permettront de déterminer si un nœud peut être considéré conforme ou non. S'il n'est pas conforme, l'étude sera au minimum étendue à un (des) conseil(s) afin de rendre ce détail conforme. Dans certains cas, l'analyse pourra se poursuivre par une (des) modélisation(s) sur Trisco afin d'en connaître les déperditions supplémentaires.

En fin de rapport se trouvent 6 nœuds constructifs particuliers, pour lesquels l'étude complète (via une modélisation Trisco) est nécessaire : ces nœuds ont été sélectionnés en groupe de travail pour pouvoir comparer les résultats de la simulation avec les résultats d'une campagne de mesure (monitoring in-situ) menée par le CSTC.

4.2. ; 0 @

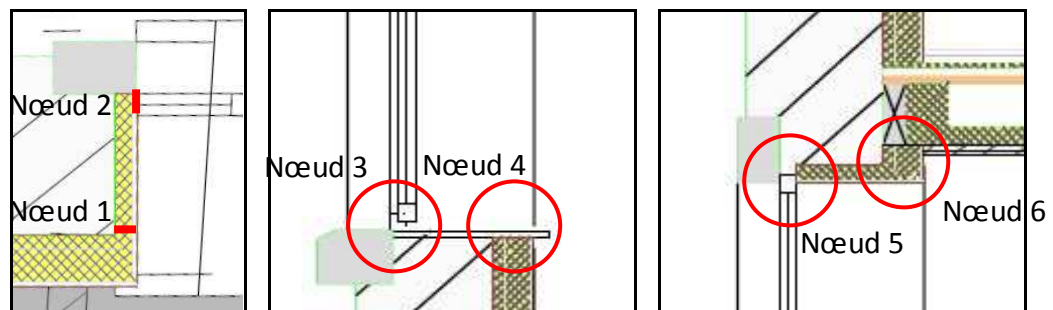


Fig. 120 : Baies de fenêtre : illustration des nœuds constructifs étudiés

Deux types de nœud sont considérés ici : le raccord entre l'isolant (intérieur) de façade et celui du retour de baie d'un côté (nœuds 1, 4 et 6 dans la Fig. 120) ; la jonction entre ce même isolant de retour de baie et le châssis d'autre part (nœuds 2, 3 et 5 dans la Fig. 120). Pour cela, nous devons poser certaines hypothèses :

- L'isolant en façade est une laine minérale (type Naturoll Ecosse 032 de Knauf), d'une épaisseur de 12,5 cm (5 cm contre le mur en « rupture thermique » et 7,5 cm entre les éléments de structure métallique)
- L'isolant en retour de baie est un panneau isolant Knauf « A13 + PUR » composé de 30 mm de polyuréthane ($\lambda = 0,024 \text{ W/mK}$) et d'une plaque de plâtre.
- Le châssis est en aluminium, avec une coupure thermique.
- Nous considérons que toutes les (nouvelles) fenêtres sont identiques dans les 3 appartements, en termes de composition et de jonctions avec les retours de baies : nous n'en analyserons donc qu'une seule dans ce rapport.

4.2.1. 8 0 ! 1

Rappel de la règle de base d'application pour juger de la conformité des nœuds constructifs où les couches isolantes des parois se joignent, physiquement, directement l'une à l'autre : du point de vue thermique, la meilleure solution est d'assurer une jonction maximale des couches isolantes, ce qui signifie que l'épaisseur de contact entre les deux couches isolantes (d_{contact}) doit être la plus grande possible. Du point de vue pratique, cela n'est pas toujours réalisable, c'est pourquoi la règle de base s'assouplit face à cette situation thermiquement idéale : l'épaisseur de contact doit être au minimum égale à la moitié de la plus petite des deux épaisseur d'isolant en présence.

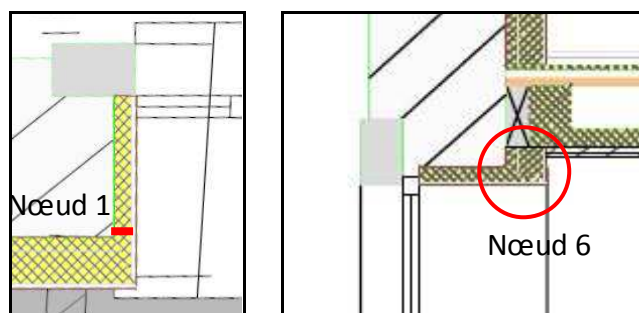


Fig. 121 : Illustration du contact des isolants étudié

Dans les cas ci-dessus, par exemple, les isolants concernés ont une épaisseur de 3 et 12,5 cm, respectivement. Le contact entre ces deux couches doit donc être au minimum de $3/2 = 1,5$ cm ; il est, en réalité de 3 cm (épaisseur totale de la couche d'isolant en retour de baie). Ces nœuds sont donc jugés **conformes à la PEB**.

4.2.2. G *H 1

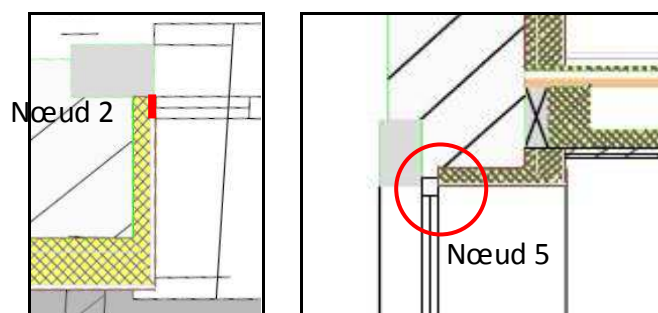


Fig. 122 : Illustration de la jonction châssis/isolant étudiée

Rappel : dans le cas des châssis de fenêtre ou de porte sans coupure thermique, la formule de base 1 (épaisseur de contact minimal) reste valable, bien que corrigée : on considère l'épaisseur d_i du châssis, mesuré perpendiculairement au plan du vitrage, comme une couche d'isolant dans la règle de base 1. Le contact entre les deux couches d'« isolant » doit donc être égale, au minimum, à la moitié de la plus petite de leurs épaisseurs.

Dans le cas de châssis de porte ou de fenêtre avec coupure thermique, on n'utilise

pas la formule générale de la règle de base 1, mais la couche isolante (de la paroi) doit nécessairement être en contact direct avec la coupure thermique et ce sur toute son épaisseur.

Les travaux ayant été menés entre deux visites sur le chantier, nous n'avons pas été en mesure de vérifier la mise en œuvre de l'isolant, ni son contact avec les châssis. Toutefois, si la mise en œuvre a été réalisée conformément aux plans de l'architecte (voir Fig. 122 ci-dessus), le contact entre l'isolant et la coupure thermique est entier, et le nœud constructif 2 peut être considéré conforme à la PEB. Dans le cas du nœud 3, nous pouvons voir que le contact n'est pas entier avec la coupure thermique, ce qui signifie que le nœud est non conforme (à moins qu'une mousse isolante n'ait été injectée entre le châssis et la maçonnerie qui le surplombe, auquel cas le nœud est conforme).

4.2.3. G

* H

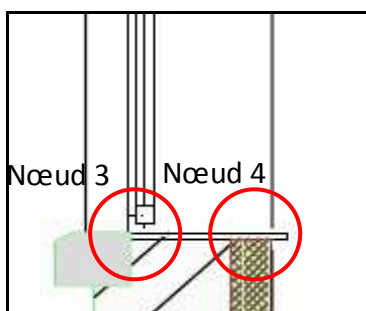


Fig. 123 : Illustration des jonctions châssis/seuil étudiées

L'absence complète d'isolant sous la tablette intérieure de fenêtre rend le **nœud constructif non conforme** :

- Il n'y a pas de continuité de la couche isolante ni de contact direct et entier entre la couche d'isolant et la rupture thermique du châssis (règle 1).
- La règle de base 2 n'est pas non plus respectée ; pour rappel, elle s'applique à l'analyse des nœuds constructifs où les couches isolantes ne peuvent pas se raccorder directement l'une à l'autre mais où un autre élément isolant maintient la coupure thermique.

Elle indique que tous les éléments interposés isolants doivent répondre simultanément à trois exigences, la première desquelles concerne la conductivité thermique de ces éléments isolants qui doit être inférieure ou égale à 0,2 W/mK ; dans le cas qui nous intéresse (voir Fig. 123 ci-dessus), l'élément qui fait la jonction entre le châssis et l'isolant en façade est le mur lui-même, composé de briques, dont la valeur λ minimum donnée par l'annexe 7 de l'AGW du 17 Avril 2008 est donnée ci-dessous. Sans connaître la masse volumique des briques en présence, nous pouvons conclure que la première condition de la règle 2 sur l'interposition d'élément isolant n'est pas respectée. Il n'y a, dès lors, pas besoin de vérifier les deux autres conditions.

Tableau A.3 - Briques en terre cuite		
La chaleur massique c vaut 1000 J/(kg.K)		
Masse volumique ρ (kg/m ³)	λ_{01} W/(m.K)	λ_{0e} W/(m.K)
$\rho \leq 700$	0.22	0.43
$700 < \rho \leq 800$	0.25	0.49
$800 < \rho \leq 900$	0.28	0.56
$900 < \rho \leq 1000$	0.32	0.63
$1000 < \rho \leq 1100$	0.35	0.70
$1100 < \rho \leq 1200$	0.39	0.77
$1200 < \rho \leq 1300$	0.42	0.84
$1300 < \rho \leq 1400$	0.47	0.93
$1400 < \rho \leq 1500$	0.51	1.00
$1500 < \rho \leq 1600$	0.55	1.09
$1600 < \rho \leq 1700$	0.60	1.19
$1700 < \rho \leq 1800$	0.65	1.28
$1800 < \rho \leq 1900$	0.71	1.40
$1900 < \rho \leq 2000$	0.76	1.49
$2000 < \rho \leq 2100$	0.81	1.61

Fig. 124 : Annexe 7 de l'AGW du 17/04/2008 : tableau des valeurs λ des briques en terre cuite

- La seule solution pour que ce nœud soit considéré conforme serait de satisfaire à la règle de base 3. Il existe en effet des situations, comme la présente, dans lesquelles les couches isolantes ne peuvent se joindre directement et où il n'est pas possible d'intercaler un élément isolant. Dans de telles situations, la règle de base 3 prévoit la possibilité d'obtenir la conformité du nœud sans réelle coupure thermique si le « chemin de moindre résistance » est supérieur à 1 mètre (voir 3.7.2.3). Dans le cas présent, ce « chemin de moindre résistance » mesure, au plus, 6 cm, et passe sous le châssis, dans la brique, pour rejoindre l'extérieur.
- Reste la possibilité de respecter une valeur Ψ_{\max} précisée par la réglementation. En effet, lorsqu'à l'aide d'un calcul numérique validé il peut être démontré que la valeur de déperdition thermique linéaire Ψ_e d'un nœud constructif est plus petite ou égale à la valeur correspondante $\Psi_{e,\text{lim}}$, alors le nœud constructif est PEB-conforme. La valeur limite à respecter pour le coefficient de transmission linéique $\Psi_{e,\text{lim}}$ est définie selon le type de nœud constructif et vaut, dans le cas présent, 0,10 W/mK (voir Fig. 117 au point 3.7.3).

Nous allons donc modéliser le nœud constructif dans Trisco et en déduire les déperditions linéaires, afin de les comparer à cette valeur limite. Dans la Fig. 125 ci-dessous, nous retrouvons les matériaux suivants :

- En bleu, la tablette en granit ($\lambda = 3,49$ W/mK) ;
- En vert, le seuil en pierre calcaire ferme ($\lambda = 2,09$ W/mK) ;
- En orange, les briques de terre cuite ($\lambda = 1,61$ W/mK) ;
- En gris, l'enduit de plâtre intérieur ($\lambda = 0,52$ W/mK) ;
- La fenêtre a été décomposée en son châssis ($U_f = 2,93$ W/m²K, ce qui correspond, pour 6 cm d'épaisseur, à un $\lambda_{\text{équivalent}} = 0,35$ W/mK) et son vitrage, dont le $U_g = 0,8$ W/m²K donne une valeur $\lambda_{\text{équivalente}} = 0,0167$ W/mK ;

- Enfin, en jaune, l'isolant Knauf Naturoll 035, dont la valeur λ initiale de 0,035 W/mK a été corrigée (0,0465 W/mK) pour tenir compte de la présence de la structure métallique (voir étude de la paroi au point 2.1).

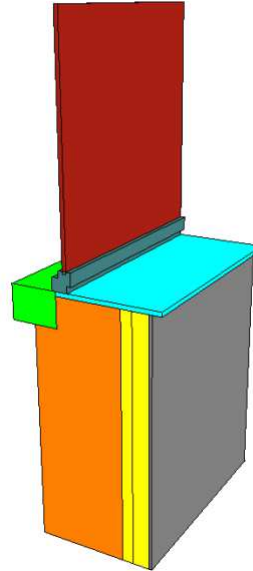


Fig. 125 : Trisco : vue 3D du modèle « jonction châssis/seuil »

Autres hypothèses :

- $T_{\text{int}} = 20^\circ\text{C}$, $T_{\text{ext}} = 0^\circ\text{C} \rightarrow \Delta T = 20^\circ\text{C}$
- $h_{\text{int}} = 7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($\rightarrow R_{\text{int}} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$)
- $h_{\text{ext}} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($\rightarrow R_{\text{ext}} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$)
- Largeur du modèle : 1 m (pour la simplicité des calculs)

Dans cette situation « initiale » (lisez : avec un nœud constructif non conforme), le flux traversant le modèle est de 48,44 W pour 20°C de ΔT :

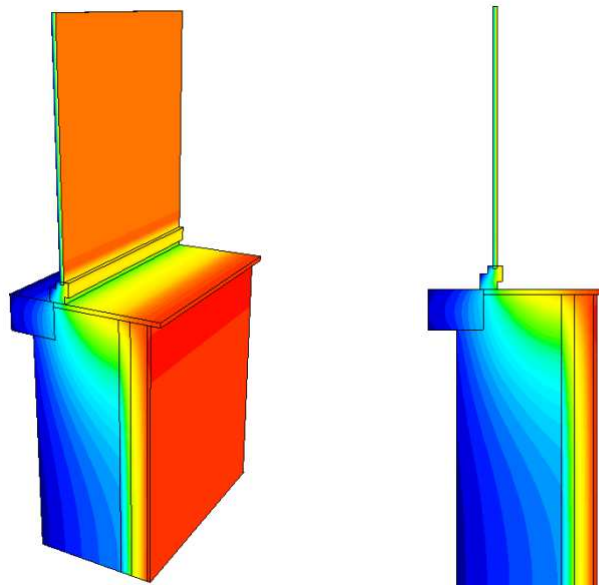


Fig. 126 : Trisco : vue 3D et coupe 2D des résultats graphiques du modèle « jonction châssis/seuil »

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
2	BC_SIMPL	exterieur	0.32	6	20	0	3.29	8	20	25
3	MATERIAL	calcaire ferme	0.33	2	19	25	4.57	9	19	24
4	MATERIAL	tablette en gra	4.54	9	3	25	19.04	29	20	25
5	MATERIAL	briques	0.32	6	20	0	14.44	22	20	24
6	MATERIAL	isolant	2.05	22	18	0	16.76	24	19	24
7	MATERIAL	châssis alu	0.49	8	2	27	15.90	13	20	29
8	MATERIAL	plâtre	18.59	26	2	24	19.60	27	1	22
9	BC_SIMPL	Intérieur	7.94	12	1	25	19.60	27	1	22
10	MATERIAL	isolant + metal	10.02	24	20	0	19.45	26	1	22
11	MATERIAL	intercalaire	2.20	11	2	29	14.17	12	20	29
12	MATERIAL	vitrage 0.8	0.42	11	20	30	18.39	12	4	30

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
2	BC_SIMPL	exterieur		0.00	48.44
9	BC_SIMPL	Intérieur		48.44	0.00

Fig. 127 : Trisco : résultats numériques du modèle « jonction châssis/seuil »

De ce flux total traversant l'entièreté du modèle pour un ΔT de 20°C, nous devons soustraire les flux traversant le mur de façade ($U = 0,275 \text{ W/m}^2\text{K}$) et la fenêtre ($U = 1,68 \text{ W/m}^2\text{K}$) :

- Façade :
 - $U = 0,275 \text{ W/m}^2\text{K}$, $S_{\text{modèle}} = 1,16 \text{ m}^2$ (dimensions extérieures)
 - $\rightarrow \text{Flux} = \phi = 6,38 \text{ W}$
- Fenêtre :
 - $U = 1,68 \text{ W/m}^2\text{K}$, $S_{\text{modèle}} = 1,09 \text{ m}^2$ (dimensions extérieures)
 - $\rightarrow \phi = 36,62 \text{ W}$
- $\Phi_{\text{total}} = 43 \text{ W}$
- \rightarrow Flux dû au nœud constructif = $48,44 - 43 = 5,44 \text{ W}$ et ce, pour 1 m de long et un pour ΔT de 20°C $\rightarrow \Psi_e = 0,272 \text{ W/mK}$.
- La limite maximale ($\Psi_{e,\text{lim}}$) pour un raccord de fenêtre étant de 0,1 W/mK, nous ne respectons pas non plus cette condition de conformité.

Pour information, calculons la valeur par défaut de prise en compte de ce nœud constructif. Ne s'agissant ni d'un nœud avec liaison structurelle linéaire en acier ou en béton armé, ni d'un nœud avec liaisons structurelles ponctuelles en acier, la valeur par défaut est égale à $0,15 + \Psi_{e,\text{lim}} [\text{W/mK}]$, soit $0,15 + 0,10 = 0,25 \text{ W/mK}$, ce qui est légèrement meilleur que la valeur réelle.

Aucun des seuils de fenêtres du bâtiment n'est donc conforme à la PEB. Notre conseil, dans ce cas, est le suivant : ajouter de l'isolant en-dessous de la tablette intérieure de fenêtre afin de rendre la couche d'isolation continue ; il faut pour cela que le contact de cette nouvelle couche d'isolant soit le plus grand possible avec l'isolant en façade, et complet avec la coupure thermique du châssis. Une autre solution serait de déplacer la fenêtre pour la placer dans la continuité de la couche d'isolant en façade.

Dans le premier cas, l'inconvénient tient principalement dans la surélévation de la tablette, et donc la diminution de la surface de vitrage ; il est également possible de

« creuser » l'allège afin de placer l'isolant sans devoir relever la tablette, mais cela impose un certain surcoût. Dans la seconde solution, l'inconvénient est la perte quasi complète de l'espace tablette du côté intérieur, et la nécessité de traiter les contours de la baie qui n'étaient pas à l'extérieur dans la situation existante.

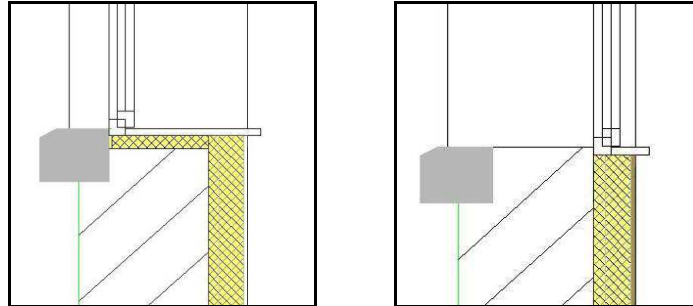


Fig. 128 : Illustration de « solutions » au problème de la jonction non conforme châssis/seuil

4.3. , 0 !

4.3.1. : 9

/ =

Le remaniement du plan d'un appartement passe souvent, pour la création d'ouvertures comme c'est la cas ici, par le remplacement de certains murs porteurs par des poutres (en métal ou en béton) encastrées dans la structure existante (par exemple dans un mur porteur de façade). Malheureusement, lorsqu'il est décidé d'isoler ces murs par l'intérieur, un nœud constructif potentiellement problématique se présente :

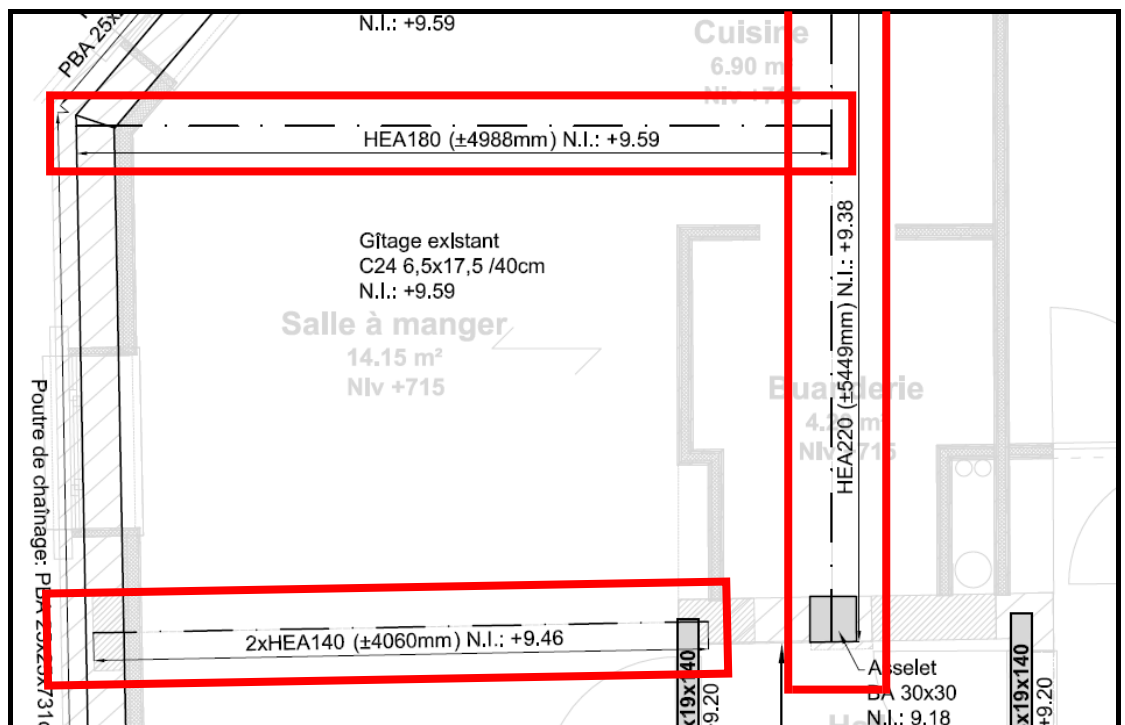


Fig. 129 : poutres métalliques encastrées dans la maçonnerie – plans d'ingénierie

L'encastrement des poutres directement dans la maçonnerie, sans « manchon » isolant pour protéger des déperditions supplémentaires engendrées, ne saurait répondre à aucune règle de conformité de la PEB, c'est pourquoi nous passerons directement à l'étude Trisco, qui sera réalisée sur la poutre HEA 180.

Nous considérerons un encastrement de 20 cm dans la maçonnerie existante, une parfaite isolation thermique autour de l'élément encastré et une différence de température de 20°C entre les ambiances intérieure et extérieure.

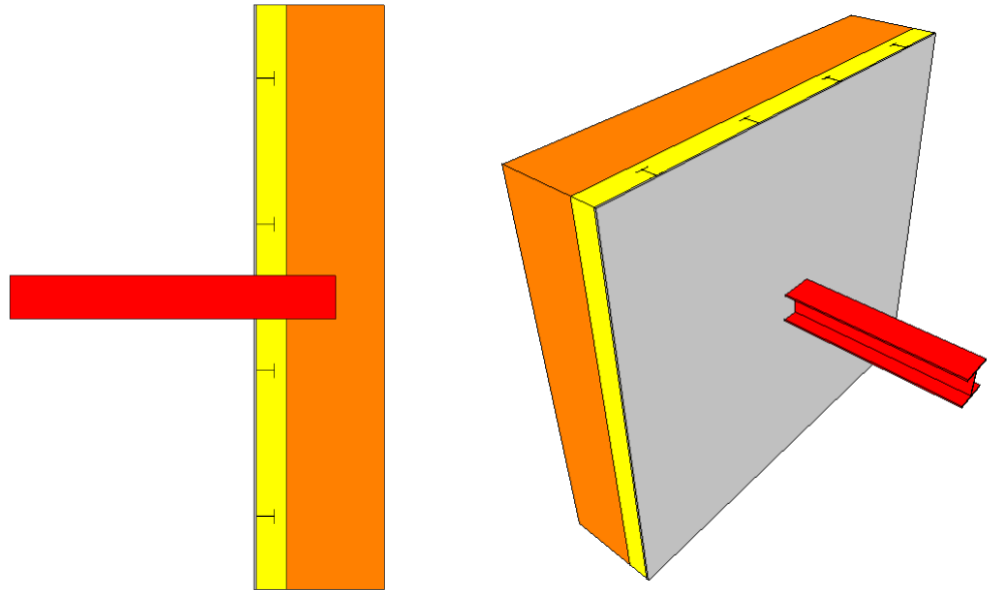


Fig. 130 : Trisco : vues 2D et 3D du modèle de l'encastrement d'une poutre métallique dans la maçonnerie existante

Les résultats numériques et graphiques sont ci-dessous (Fig. 131 et 132).

Le flux traversant le modèle est de 37,02 W, duquel nous pouvons déduire celui qui est propre au mur :

- $U_{mur} = 0,275 \text{ W/m}^2\text{K}$, $S_{mur} = 5,205 \text{ m}^2$, $\Delta T = 20^\circ\text{C} \rightarrow \phi_{mur} = 28,63 \text{ W}$
- $\rightarrow \phi_{NC} = 8,39 \text{ W}$, attribuable à l'encastrement de la poutre en acier dans la maçonnerie $\rightarrow \Psi_e = 0,42 \text{ W/K}$.

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
2	MATERIAL	briques	0.22	95	1	0	8.39	46	11	29
4	MATERIAL	acier	4.14	43	6	25	19.97	46	43	30
5	MATERIAL	plâtre	13.53	45	17	27	19.52	39	18	29
6	BC_SIMPL	interieur	13.93	45	18	27	19.97	46	43	30
7	MATERIAL	isolant 032	1.53	95	11	0	19.37	39	17	30
8	BC_SIMPL	exterieur	0.22	95	1	0	0.80	47	1	30

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
6	BC_SIMPL	interieur		37.02	0.00
8	BC_SIMPL	exterieur		0.00	37.02

Fig. 131 : Trisco : résultats numériques de l'encastrement d'une poutre métallique dans la maçonnerie existante

Notons que la température intérieure minimale est de 13,93°C (pour 0°C à

l'extérieur et 20°C à l'intérieur). Le facteur de température atteint presque la valeur pivot de 0,7. La marge est faible...

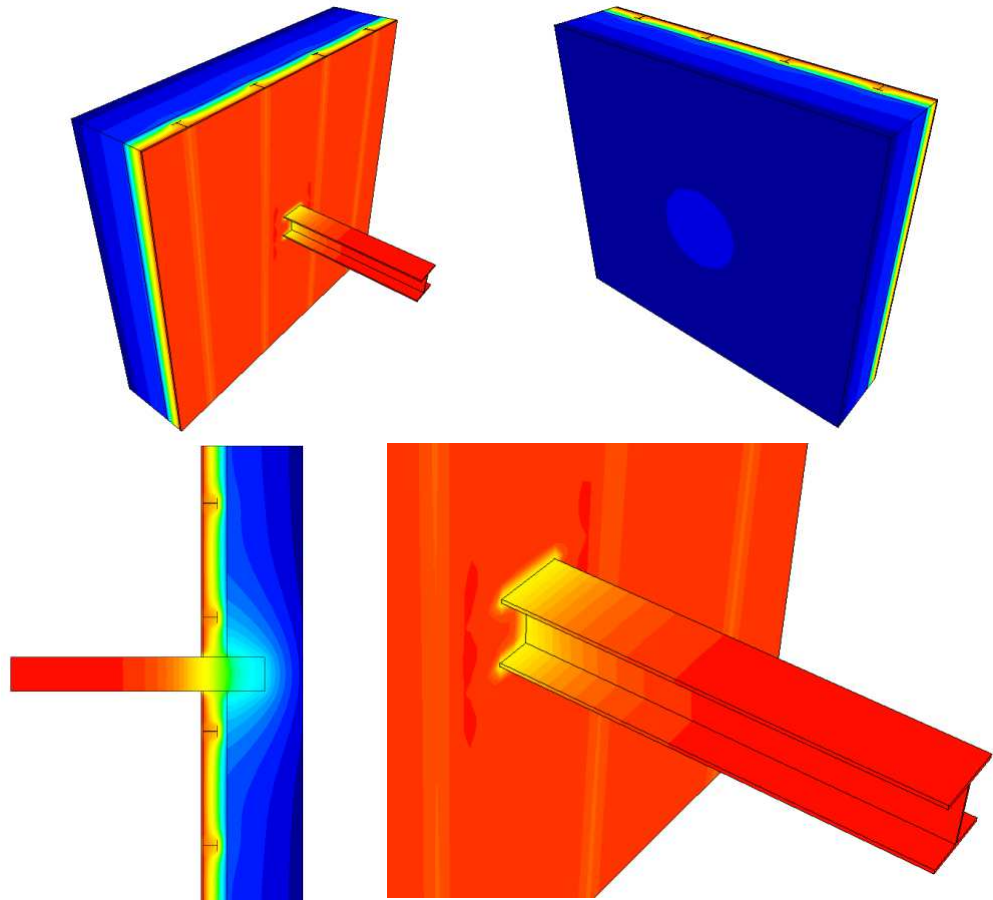


Fig. 132 : Trisco : résultats graphiques de l'encastrement d'une poutre métallique dans la maçonnerie existante

Si la poutre était encadrée de 10 cm dans la maçonnerie (au lieu de 20 cm dans la modélisation initiale), le flux total traversant le modèle serait de 36,51 W au lieu de 37,02 W. La différence peu importante indique qu'il ne s'agit pas là d'un paramètre majeur.

Nous allons maintenant modifier les dimensions de la poutre afin d'avoir les résultats pour les HEA 140 et 220, toute autre chose restant égale.

- Dans le premier cas (HEA 140), $\phi_{\text{tot}} = 33,96 \text{ W}$ pour $5,03 \text{ m}^2$ de surface, réparti en $\phi_{\text{mur}} = 27,66 \text{ W}$ et $\phi_{\text{NC}} = 6,3 \text{ W}$ attribuable à la poutre, soit une déperdition $\Psi_e = 0,315 \text{ W/K}$.
- Dans le deuxième cas (HEA 220), $\phi_{\text{tot}} = 40,58 \text{ W}$, dont $\phi_{\text{mur}} = 29,63 \text{ W}$ (pour $5,39 \text{ m}^2$ de surface) et $\phi_{\text{NC}} = 10,95 \text{ W}$ imputable au nœud constructif ponctuel qu'est la poutre. Les déperditions supplémentaires de la poutre s'élèvent donc à $\Psi_e = 0,55 \text{ W/K}$.

La valeur de déperdition par défaut prévue par la PEB pour un nœud constructif ponctuel dû à une « coupure de la couche isolante par des éléments en métal » est de $4,7 \cdot z + 0,03 \text{ W/K}$, où z est la longueur du côté dans lequel s'inscrit le percement, en mètre.

- Une HEA 140 est haute de 133 mm et large de 140 mm. Le côté du carré exinscrit est donc de 0,14 m. La déperdition par défaut est donc $\chi_{e,def} = 4,7 \cdot 0,14 + 0,03 = 0,6 \text{ W/K}$, supérieure à la valeur « réelle » calculée.
- Une HEA 180 est donc pénalisée, par défaut, par une déperdition $\chi_{e,def} = 4,7 \cdot 0,18 + 0,03 = 0,876 \text{ W/K}$.
- Une HEA 220 est, elle, caractérisée par une déperdition supplémentaire forfaitaire $\chi_{e,def} = 4,7 \cdot 0,22 + 0,03 = 1,064 \text{ W/K}$.

/ =

Voyons maintenant comment résoudre ce pont thermique (ou nœud constructif non conforme) en ajustant l'isolation. Nous nous attarderons uniquement sur le cas de la HEA 180, la (les) solution(s) proposée(s) pouvant être adaptées en conséquences pour les deux autres types de poutres.

Dans sa configuration actuelle, le nœud ne saurait être conforme : la couche d'isolation est interrompue par la pénétration de la poutre en acier ; les règles 1 et 2 de conformité ne sont donc pas respectées. De plus, le chemin de moindre résistance est égal à l'épaisseur de la paroi, donc inférieur à 1 m.

L'interruption étant somme toute de dimensions « réduites », il devrait être possible d'interposer un élément isolant (par exemple sous la forme d'un manchon d'isolation – qui ne peut être placé qu'avant l'encastrement – dans le fond de l'encoche réalisée dans la maçonnerie). Cet élément isolant doit respecter certaines conditions :

- $\lambda \leq 0,2 \text{ W/mK}$. Si l'élément placé est bien un isolant, cela ne devrait pas poser de problèmes.
- $R > \min (R_1/2 ; R_2/2 ; 2)$
 - R_1 et R_2 représentent les résistances thermiques des isolants placés de part et d'autre de l'élément interposé qu'il rejoint. Dans notre cas, ces résistances sont toutes deux égales à celle de l'isolant de la façade, soit $3,1743 \text{ m}^2\text{K/W}$ (voir l'étude de cette paroi au point 2.1).
 - → La résistance minimale de l'isolant doit être de $1,587 \text{ m}^2\text{K/W}$ soit $e_{\min} = 1,587 \cdot 0,032 = 0,051 \text{ m}$. Il faut donc au minimum 5,1 cm d'isolation en laine minérale avec une valeur $\lambda = 0,032 \text{ W/mK}$ (identique à celle utilisée en isolation du mur). Cette épaisseur minimale monte à 6,4 cm pour un isolant avec une valeur $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$ (valeur moyenne commune), descend à 3,8 cm pour du polyuréthane (en prenant une valeur $\lambda = 0,024 \text{ W/mK}$ comme le PUR utilisé dans les murs creux). Les épaisseurs susmentionnées doivent être les mêmes sur toutes les faces de l'encoche réalisée pour encastrement la poutre.
- les isolants en présence doivent présenter un contact entre eux qui soit au moins égal à la moitié de l'épaisseur d'isolant placé dans

l'encoche (puisque cette épaisseur est la plus faible).

Nous allons modéliser un exemple, avec un isolant incompressible (type PUR ou foamglass), et la valeur λ la plus faible possible pour pouvoir en diminuer l'épaisseur ; nous allons donc placer un PUR de 5 cm, avec une valeur $\lambda = 0,024 \text{ W/mK}$ (en vert dans la Fig. 117 ci-dessous). Le remplissage a été réalisé avec le même isolant.

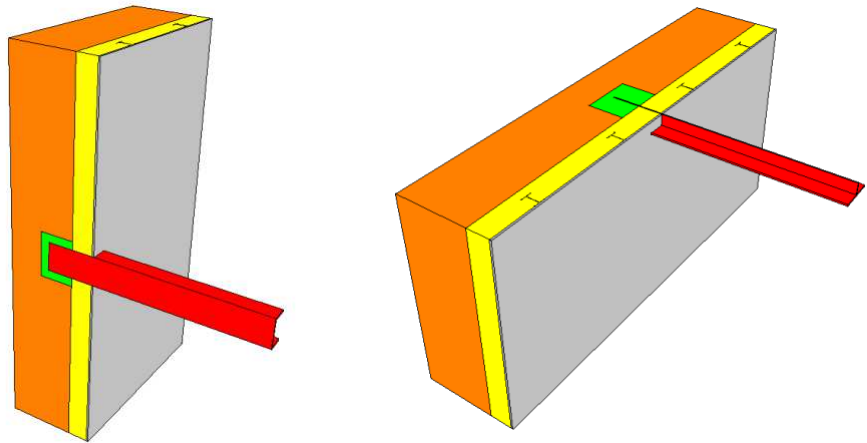


Fig. 133 : Trisco : vue 3D de la solution 1 proposée pour l'encastrement de la poutre

Les résultats, pour une surface de déperdition totale de $5,445 \text{ m}^2$ et un ΔT de 20°C , sont les suivants :

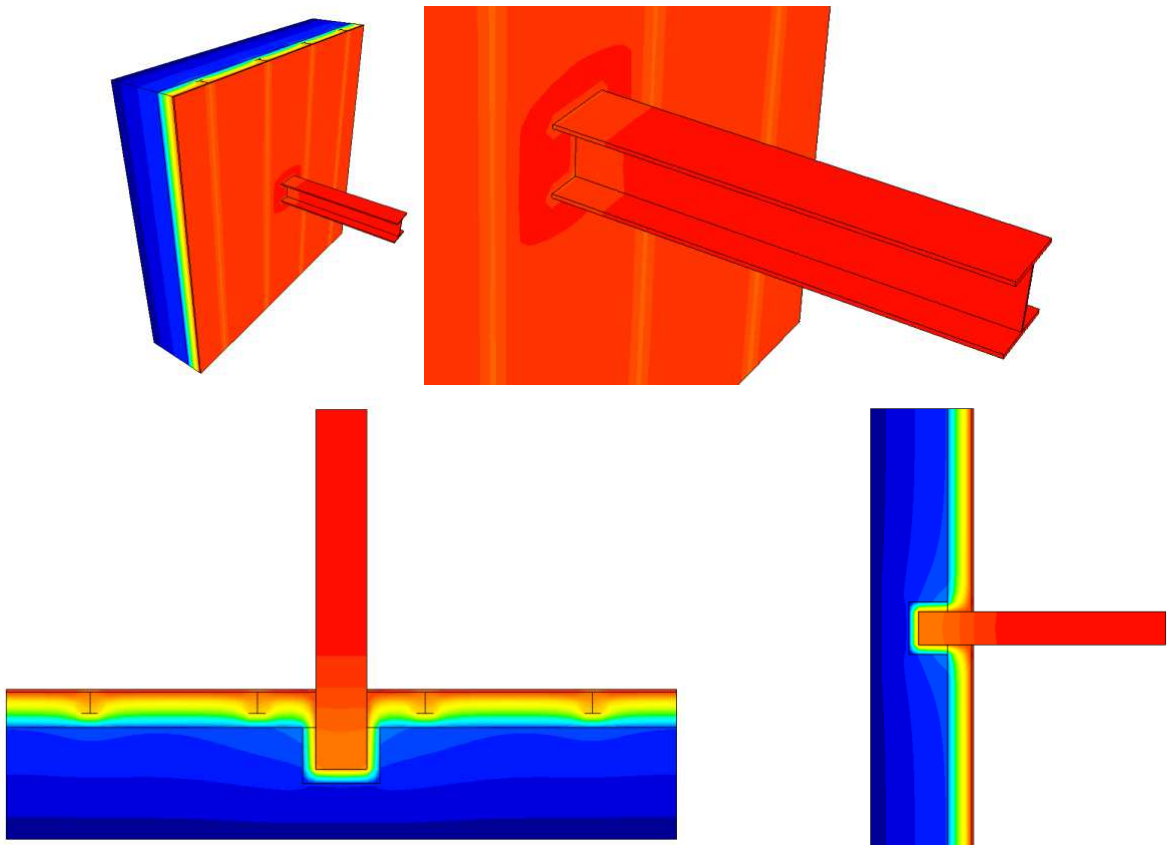


Fig. 134 : Trisco : résultats graphiques de la modélisation de la solution 1 pour l'encastrement de la poutre

Clr. Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
2	MATERIAL briques	0.22	92	1	0	2.53	45	11	20
3	MATERIAL PUR	0.99	49	6	26	18.15	44	11	27
4	MATERIAL acier	15.12	55	13	53	20.00	44	38	26
5	MATERIAL plâtre	17.89	80	17	0	19.75	48	18	26
6	BC_SIMPL interieur	18.40	11	18	53	20.00	44	38	26
7	MATERIAL isolant 032	1.51	92	11	0	19.67	48	17	27
8	BC_SIMPL exterieur	0.22	92	1	0	0.26	45	1	20

Clr. Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
6	BC_SIMPL interieur		30.90	0.00
8	BC_SIMPL exterieur		0.00	30.90

Fig. 135 : Trisco : résultats numériques de la modélisation de la solution1 pour l'encastrement de la poutre

- - $\phi_{\text{mur}} = 0,275 \text{ [W/m}^2\text{K]} * 20 \text{ [}^\circ\text{C]} * 5,445 \text{ [m}^2\text{]} = 29,95 \text{ W}$
- $\rightarrow \phi_{\text{NC}} = 30,9 \text{ W} - 29,95 \text{ W} = 0,95 \text{ W}$
- $\rightarrow \Psi_e = 0,0475 \text{ W/K}$; venant de 0,42 W/K, le gain est important...

Deux remarques à ceci :

- la faisabilité technique de cette solution est contestable ; de plus, le modèle présenté est « idéal », en termes d'épaisseurs mises en œuvre ou de réalisations techniques (pas d'écart, pas de jeu, un contact parfait des isolants...).
- en rénovation, nous nous trouvons souvent confrontés à des poutres métalliques qui sont déjà en place ; la solution proposée n'est dès lors pas réalisable puisqu'il n'est pas raisonnable (techniquement et économiquement) de retirer la poutre pour placer le manchon isolant dans l'encoche.

Suite à cette deuxième remarque, nous allons vérifier une autre solution qui consiste à enrober la poutre dans de l'isolant pour allonger le chemin de moindre résistance.

/ =

La « conformité » de cette solution est différente de celle de la solution précédente ; en effet, il ne s'agit plus ici d'interposer un élément isolant pour rejoindre deux isolants mais d'allonger le chemin de moindre résistance. Une distance d'1 mètre est le minimum requis entre les ambiances intérieure et extérieure, ce qui signifie que l'emballage doit être réalisé sur un minimum de 50 cm à l'intérieur. Nous analyserons également les résultats pour un enrobage complet (sur toute la longueur de la poutre, dans le cas où celle-ci n'est pas dissimulée par un faux-plafond).

Les exigences sur l'isolant à placer sont semblables à celles du cas précédent :

[...] Le chemin de moindre résistance est strictement défini comme le plus court trajet entre l'environnement intérieur et l'environnement extérieur ou un espace adjacent non chauffé qui ne coupe nulle part une couche d'isolant ou un élément isolant dont la résistance thermique est plus grande ou égale à la plus petite des deux résistances R_1 et R_2 (= les résistances thermiques des couches isolantes des parois). [...] Si la longueur totale de cette

ligne est inférieure à 1 mètre, alors il est recommandé d'ajouter de l'isolant, à condition que cet isolant présente une résistance thermique plus grande ou égale à la plus petite valeur de R_1 et R_2 . [...]

Les résistances R_1 et R_2 étant identiques à celles de la solution précédente, nous étudierons cette solution 2 avec les mêmes paramètres (5 cm de PUR – $\lambda = 0,024$ W/mK – en emballage de la poutre) :

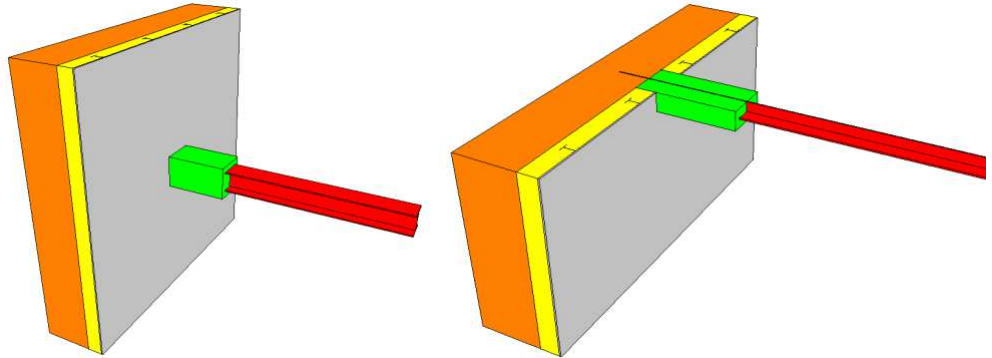


Fig. 136 : Trisco : vue 3D de la solution 2 proposée pour l'encastrement de la poutre

Voici les résultats :

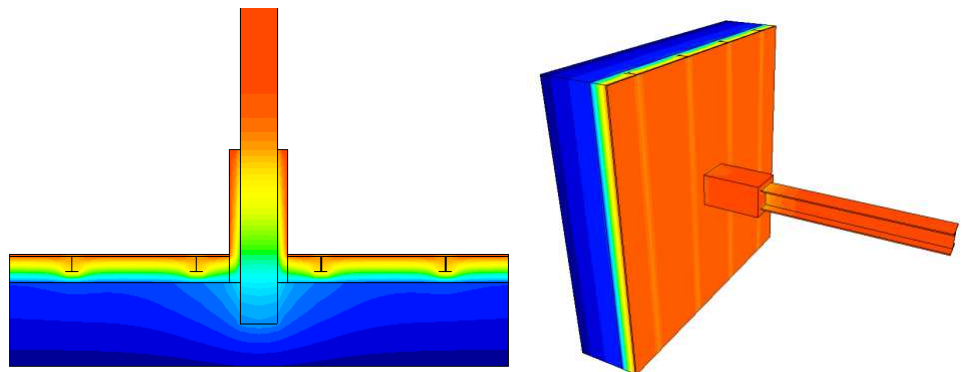


Fig. 137 : résultats graphiques de la modélisation de la solution 2 pour l'encastrement de la poutre

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
2	MATERIAL	briques	0.22	94	1	0	5.05	46	14	27
3	MATERIAL	PUR	3.01	53	14	31	20.14	41	22	20
4	MATERIAL	acier	2.66	43	6	29	20.00	48	46	26
5	MATERIAL	plâtre	17.89	11	20	0	19.48	39	21	18
6	BC_SIMPL	interieur	17.50	45	31	22	20.14	41	22	20
7	MATERIAL	isolant 032	1.52	94	14	0	19.32	39	20	18
8	BC_SIMPL	exterieur	0.22	94	1	0	0.53	47	1	25
Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]					
6	BC_SIMPL	interieur		34.26	0.02					
8	BC_SIMPL	exterieur		0.00	34.24					

Fig. 138 : résultats numériques de la modélisation de la solution 2 pour l'encastrement de la poutre

De ce $\phi_{\text{tot}} = 34,26$ W totaux, nous déduisons le $\phi_{\text{mur}} = 29,95$ W ; la déperdition associée à ce nœud est donc $\Psi_e = 0,22$ W/K.

Prolonger l'isolant de 50 cm supplémentaires fait descendre le flux total à

33,45 W, et les déperditions à 0,175 W/K. Un emballage isolant complet, sur toute la longueur de la poutre, diminue le flux thermique total à 33,17 W et la déperdition à 0,16 W/K

Les résultats obtenus avec cette deuxième solution sont globalement moins bons que ceux obtenus avec la première. L'acier étant fortement conducteur de la chaleur, il n'est pas étonnant que la meilleure solution soit celle qui garde la poutre dans l'ambiance chaude intérieure plutôt qu'en dehors de la couche d'isolation. Cette deuxième solution augmente la surface de déperdition de façon bien plus importante que la première. De plus, nous savons maintenant que les solutions les plus simples (comme une continuité la plus complète de la couche d'isolation de façade, sans modifications de taille importante) sont souvent les meilleures.

Nous pouvons cependant admettre que la deuxième solution, qui devrait être plus largement applicable en rénovation, permet de diviser les déperditions pas un facteur 3, ce qui est appréciable.

En fin de rapport (voir 4.9.6) se trouve une analyse d'un nœud semblable mais plus proche de la situation réellement rencontrée dans le chantier de la rue Ferrer (et sans solution d'isolation, puisqu'aucune proposition n'a été mise en œuvre), pour comparaison avec les résultats de mesure du CSTC.

4.3.2. G

*

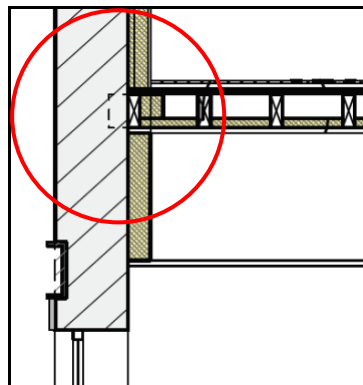


Fig. 139 : Illustration de la jonction mur/plancher étudiée

Considérons les hypothèses suivantes :

- La composition du mur de façade est maintenant connue et analysée (voir point 2.1 ci-dessus).
- Cette jonction est représentative de toutes les autres entre un plancher rénové et la façade à rue isolée par l'intérieur, pour autant que le sens de portée des solives de plancher soit identique (parallèle au mur de façade).
- La composition du plancher selon les plans du PU est la suivante (de haut en bas) :
 - Revêtement de sol : 15 mm
 - Chape sèche en fibroplâtre : 22 mm
 - Isolation acoustique type laine minérale : 10 mm

- OSB : 22 mm
- Isolation thermique type laine de roche ($\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$) : 50 mm
- Section de bois type SRN 65 * 180 mm, entreaxe de 0,4 m (existant)
- Plafond existant (à conserver) → revêtement type plâtre.

Nous pouvons constater qu'un renfort d'isolation thermique a été apporté le long de la solive qui court le long du mur de briques, à l'intérieur du plancher, afin d'assurer une continuité maximale entre les isolants thermiques des étages inférieur et supérieur. La solive elle-même est comptabilisée dans la « couche isolante » locale.

Le plancher qui sépare deux unités PEB d'un même volume protégé n'est pas considéré comme une surface de déperdition. Dans le détail qui nous préoccupe, l'isolation thermique « importante » est celle qui couvre le mur de façade, et le nœud constructif ne concerne que l'interruption de l'isolant par le plafond existant (plâtre) et l'OSB.

Pour rappel : « Dans certains cas, il est permis d'additionner l'influence de différents éléments « isolants ». Les épaisseurs et les résistances thermiques des différents éléments isolants peuvent être additionnées dans une direction perpendiculaire à la ligne de coupure thermique si chacun des éléments isolant a une valeur $\lambda \leq 0.2 \text{ W/mK}$ ET qu'il n'y a aucune couche d'air entre eux. Cela permet de considérer les différents éléments isolants comme un élément isolant « homogène » avec une épaisseur d égale à la somme des épaisseurs d_i de chacun des éléments isolants et la résistance thermique R égale à la somme des résistances thermiques R_i de chacun des éléments isolants. »

Ces deux éléments doivent donc respecter simultanément les trois conditions suivantes :

- $\lambda < 0,2 \text{ W/mK}$
- $R \geq \min (R_1/2 ; R_2/2 ; 2)$
- $d_{\text{contact},i} \geq \min (d_{\text{insulating part}}/2 ; d_x/2)$

Les éléments « interrupteurs » sont caractérisés par des valeurs $\lambda = 0,52 \text{ W/mK}$ pour le plâtre et $0,13 \text{ W/mK}$ pour l'OSB. Le plâtre ne respecte donc pas la première condition, et le nœud entier peut d'ores et déjà être déclaré non conforme. Malheureusement, il n'est pas toujours possible d'enlever ce matériau pour assurer un contact complet entre les isolants thermiques.

Pour l'OSB, la deuxième condition peut toujours être satisfaite. Nous allons considérer la distance la plus courte entre les faces chaude et froide de l'isolant ; il s'agit de l'épaisseur totale d'isolant du mur, soit 12,5 cm. La résistance est donc égale à $0,125[\text{m}] / 0,13[\text{W/mK}] = 0,96 \text{ m}^2\text{K/W}$, à comparer avec les résistances des deux isolants en présence :

- $R_{\text{isolant mur}} = 1,5625 + 1,6118 = 3,1743 \text{ m}^2\text{K/W}$.
- $R_{\text{isolant plancher}} = 0,063/0,18 + 0,12/0,035 = 3,78 \text{ m}^2\text{K/W}$.

La résistance de l'OSB devrait donc atteindre $3,1743/2 = 1,587 \text{ m}^2\text{K/W}$, ce qui n'est pas le cas, l'OSB forme donc un **nœud constructif non conforme** selon la deuxième règle de conformité.

Le chemin de moindre résistance passant également par ces interruptions de l'isolation, il n'atteint pas le mètre « réglementaire » pour déclarer le nœud conforme.

Reste donc à vérifier si les déperditions supplémentaires restent inférieures à la valeur maximale autorisée, soit pour un « *raccord de parois d'un même volume protégé ou entre 2 volumes protégés différents avec une paroi de la surface de déperdition* », 0,05 W/mK.

Dans le même temps, nous pourrions comparer ces déperditions « réelles » à la valeur par défaut, qui est de $0,15 + 0,05 [\Psi_{e,lim}] = 0,2 \text{ W/mK}$.

Le modèle est réalisé sur Trisco, en conservant les mêmes valeurs λ : 1,61 W/mK pour la brique, 0,032 W/mK pour l'isolant de façade, 0,035 W/mK pour l'isolant du plancher, 50 W/mK pour l'acier, 0,52 W/mK pour le plâtre, 0,18 W/mK pour la structure en bois du plancher, 0,13 W/mK pour les autres éléments en bois (OSB, revêtement de plancher...). La résistance thermique du complexe « Brio » utilisé en plancher (« *chape sèche en fibroplâtre, 22mm* » dans la description de la paroi) est de $0,23 \text{ m}^2\text{K/W}$; ce matériau sera modélisé selon sa composition exacte : 10 mm d'isolant de type laine de roche ($\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$), et 18 mm de fibroplâtre ($\lambda = 0,52 \text{ W/mK}$).

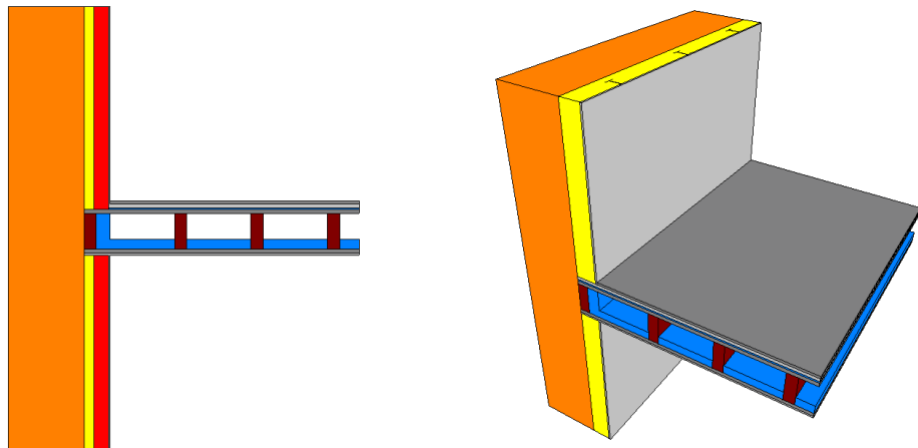


Fig. 140 : Trisco : vue 3D du modèle de la jonction mur/plancher étudiée

Les résultats numériques indiquent un flux total, de l'intérieur vers l'extérieur, $\phi_{tot} = 25,04 \text{ W}$ pour une différence de température de 20°C et une surface de déperdition totale de $4,1 \text{ m}^2$.

Considérant $\phi_{mur} = 0,275 [\text{W/m}^2\text{K}] * 20 [^\circ\text{C}] * 4,1 [\text{m}^2] = 22,52 \text{ W}$, la différence due au nœud constructif, est $\phi_{NC} = 25,04 - 22,52 = 2,52 \text{ W}$ pour un nœud d'1,8 m de long et 20°C de ΔT , soit $\Psi_e = 0,07 \text{ W/mK}$.

Nous sommes donc légèrement au-dessus de la valeur maximale imposée, $\Psi_{e,lim}$, qui est de $0,05 \text{ W/mK}$ pour un nœud de ce type. Nous sommes par contre en-dessous de la valeur par défaut, pénalisante, de $0,20 \text{ W/mK}$.

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
3	MATERIAL	acier	10.87	13	60	20	18.50	21	14	4
4	MATERIAL	bois de structu	2.05	11	23	29	19.99	58	58	23
5	MATERIAL	briques	0.22	1	69	56	2.53	11	11	21
6	MATERIAL	plâtre	2.22	11	0	20	20.00	62	11	20
7	MATERIAL	isolant Knauf N	1.50	11	46	56	19.36	21	63	10
8	MATERIAL	OSB	1.96	11	23	31	20.00	62	11	21
9	BC_FRE_S	cavité sol 1	17.15	22	0	29	19.03	32	48	25
10	MATERIAL	isolant Knauf N	4.89	16	0	26	20.00	62	61	23
11	BC_FRE_S	cavité sol 2	19.44	34	37	27	19.83	44	49	25
12	BC_SIMPL	int RDC	17.32	22	35	20	20.00	62	11	20
13	BC_SIMPL	int R+1	17.67	22	34	36	20.00	62	11	36
14	BC_SIMPL	air extérieur	0.22	1	69	56	0.28	1	34	25
15	BC_FRE_S	cavité sol 3	19.90	46	37	27	19.97	56	48	25
16	BC_FRE_S	cavité sol 4	19.97	58	37	27	19.98	62	49	29

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
9	BC_FRE_S	cavité sol 1	18.46	1.73	1.73
11	BC_FRE_S	cavité sol 2	19.72	0.33	0.33
12	BC_SIMPL	int RDC		12.90	0.00
13	BC_SIMPL	int R+1		12.15	0.00
14	BC_SIMPL	air extérieur		0.00	25.04
15	BC_FRE_S	cavité sol 3	19.95	0.06	0.06
16	BC_FRE_S	cavité sol 4	19.98	0.00	0.00

Fig. 141 : Trisco : résultats numériques de la jonction mur/plancher étudiée

Les résultats graphiques, pour une différence de 20°C entre l'intérieur et l'extérieur sont les suivants :

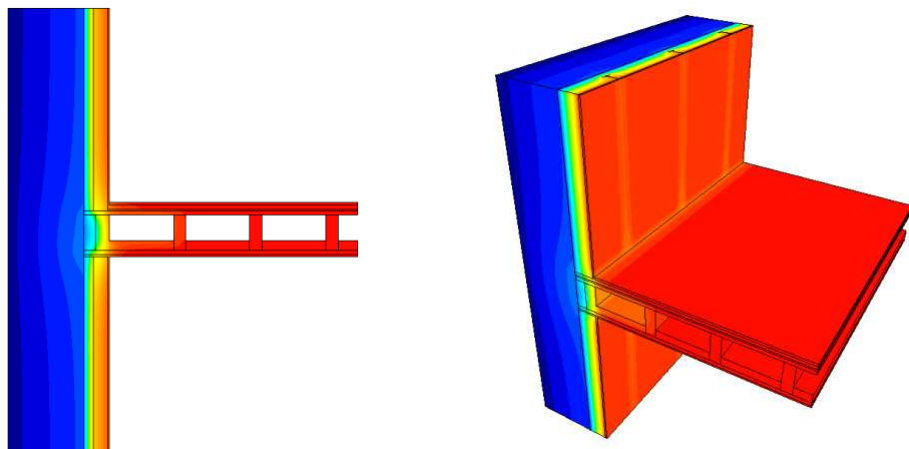


Fig. 142 : Trisco : résultats graphiques de la jonction mur/plancher étudiée

Dans ce cas également, un détail semblable se retrouve en fin de rapport pour comparaison avec les résultats délivrés par le CSTC suite au monitoring des six nœuds constructifs choisis. La modélisation Trisco devant par conséquent être la plus proche de la réalité que possible, nous avons notamment considéré un remplissage complet des cavités du plancher par de l'isolant (voir 4.9.2).

4.3.3.

| < < *

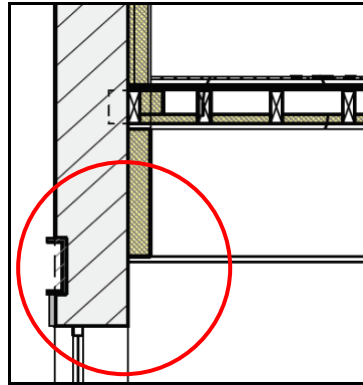


Fig. 143 : Illustration de l'arrêt d'isolation au rez-de-chaussée

Peut-on réellement considérer ceci comme un nœud constructif (selon la définition de la PEB) ? Il faudrait pour cela étudier la jonction (inexistante) entre la couche d'isolant de façade et la fenêtre du rez-de-chaussée, et nous pouvons d'ores et déjà annoncer que ce « détail » ne respecte aucune des conditions de conformité à la PEB. La seule solution possible est la continuité de l'isolant le long de la paroi.

RECTIFICATIF

Ainsi que nous l'avons décrit au point 2.3, le démontage des panneaux publicitaires en façade a permis de découvrir que des caissons à volets se « cachaient » derrière, dissimulés à l'intérieur par le faux-plafond. Le remplissage des ces caissons par de l'isolant sur une épaisseur de 14 cm est prévu, générant ainsi trois nœuds constructifs :

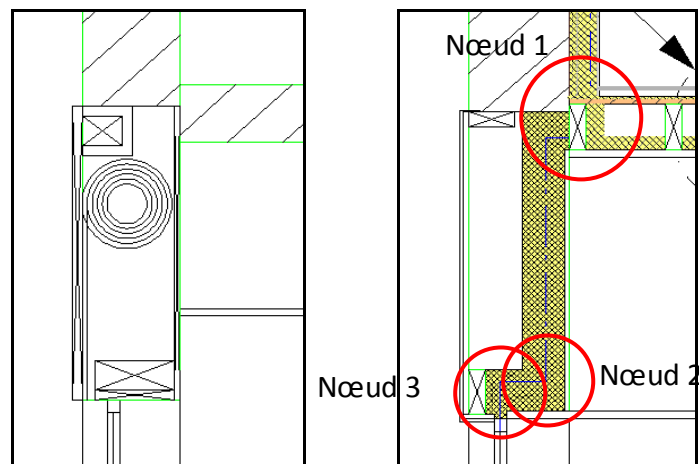


Fig. 144 : vue en coupe de la situation initiale et de la solution d'isolation des caissons à volets

Outre la nécessité de s'assurer que l'isolant reste en place, il serait intéressant de veiller à rendre ce(s) nouveau(x) nœud(s) conforme(s) à la PEB, en tentant de respecter la continuité de l'isolant.

/) 4 6 0 !

Comparativement à ce qui a été dit au point 4.3.1, le plancher qui sépare deux unités PEB n'est pas une surface de déperdition. L'analyse de ce nœud doit donc vérifier la conformité de la jonction entre l'isolant rapporté en

remplissage du caisson, et celui qui est placé sur la façade à rue.

Sachant que la continuité de l'isolation thermique n'est pas assurée, que nous sommes en présence d'une « interposition d'un élément isolant » et afin de simplifier l'étude (théorique) de ce nœud, le plus simple est de le diviser en deux nœuds distincts : la panne constitue la jonction entre l'isolant des caissons et celui du plancher ; le panneau d'OSB sera la jonction entre l'isolant du plancher et celui de la façade.

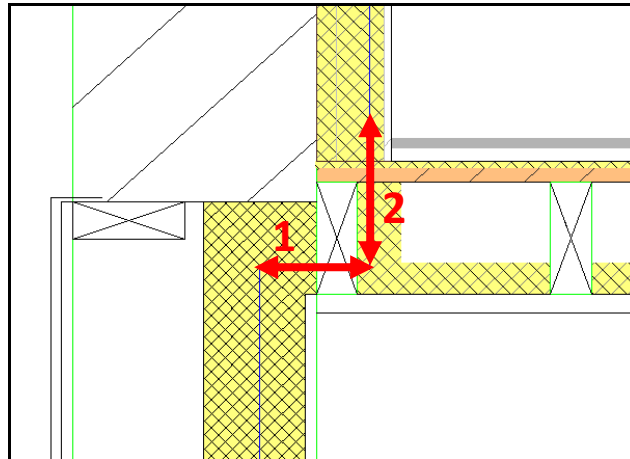


Fig. 145 : Détail du nœud de jonction des caissons isolés avec l'isolant en façade

Étudions les conditions de conformité de ces deux pièces interposées :

- Pour la panne de bois :
 - $\lambda \leq 0,2 \text{ W/mK}$, car $\lambda_{\text{par défaut}} = 0,18 \text{ W/mK}$
 - $R_{\text{panne}} = 0,18/0,18 = 1 \text{ m}^2\text{K/W}$
 - $R_{\text{isolant plancher}} = 0,18/0,035 = 5,14 \text{ m}^2\text{K/W}$
 - $R_{\text{isolant caisson}} = 0,14/0,032 = 4,375 \text{ m}^2\text{K/W}$

Les conditions de résistance ne sont donc pas respectées, le nœud est non conforme. Pour résoudre ce problème, il faudrait augmenter la résistance de la pièce de bois, ou diminuer celle des isolants : la condition serait alors respectée d'un point de vue strictement réglementaire. La raison « officielle » est la suivante :

« La résistance thermique R de l'élément isolant doit être suffisamment grande ; cette exigence est reliée aux caractéristiques de la (des) couche(s) isolante(s) environnante(s) : plus la capacité d'isolation des couches isolantes est grande (déterminée par les résistances thermiques R_1 et R_2), plus la résistance thermique R d'un élément isolant inséré doit être grande également. »

- La troisième condition, bien qu'inutile puisque le nœud est déclaré non-conforme à ce stade, est respectée. Le contact entre la pièce de bois et les isolants est suffisant.
- Pour le panneau d'OSB :
 - $\lambda_{\text{OSB par défaut}} = 0,13 \text{ W/mK} < 0,2$
 - $R_{\text{OSB}} = 0,135/0,13 = 1,04 \text{ m}^2\text{K/W}$

- $R_{\text{isolant façade}} = 1,5625 + 1,6118 = 3,1743 \text{ m}^2\text{K/W}$
- $R_{\text{isolant plancher}} = 0,063/0,18 + 0,07/0,035 = 2,35 \text{ m}^2\text{K/W}$

La résistance de l'OSB, mesurée perpendiculairement à la ligne de coupure thermique, ne respecte pas la condition de conformité. La condition de contact est quant à elle remplie, mais cela ne suffit pas à déclarer cette partie du nœud conforme.

Afin d'évaluer les déperditions supplémentaires dues à ce nœud dans son ensemble, étudions-le sur Trisco. Les valeurs λ utilisées sont identiques aux précédentes. Le panneau de bois qui referme la cavité est considéré comme étant de l'OSB. Selon le logiciel PEB (voir point 2.3.1), la valeur U du caisson isolé est de 0,31 W/m²K si l'on considère la cavité ventilée (voir point 2.3).

Les résultats numériques et graphiques, pour un ΔT de 20°C et une surface de déperdition de 4,1 m², sont présentés dans les Fig. 147 et 148 ci-dessous :

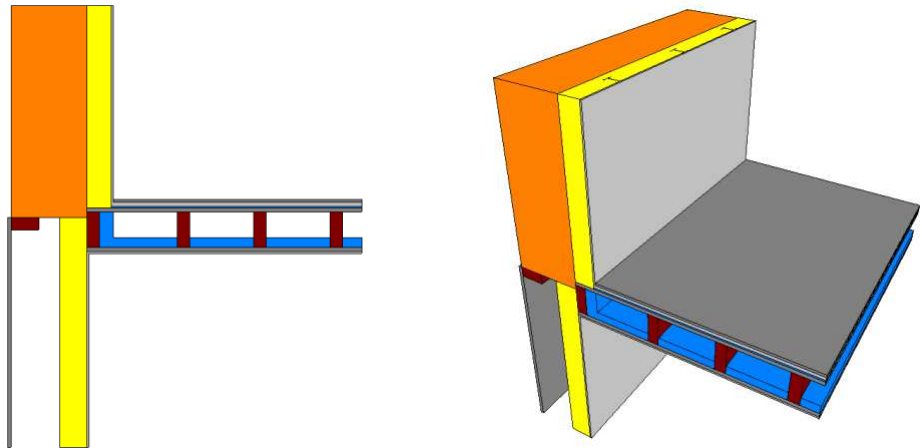


Fig. 146 : Trisco : vue 3D du modèle de la jonction caisson/façade étudiée

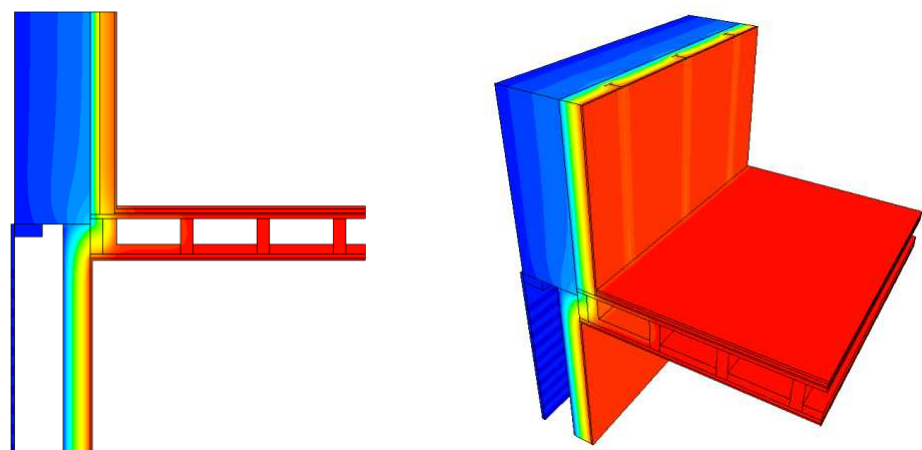


Fig. 147 : Trisco : résultats graphiques de la jonction caisson/façade

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
2	MATERIAL	acier	12.74	17	37	34	18.50	25	60	53
3	BC_SIMPL	cavité dans le	-0.00	2	58	19	1.22	10	11	30
4	MATERIAL	bois de structu	0.03	2	0	27	19.99	62	49	23
5	MATERIAL	briques	0.17	2	0	30	3.43	14	58	30
6	MATERIAL	plâtre	17.27	25	35	36	20.00	66	49	20
7	MATERIAL	isolant Knauf N	0.23	10	0	29	19.36	14	69	3
8	MATERIAL	OSB	-0.00	2	58	19	20.00	66	21	21
9	BC_FRE_S	cavité sol 1	17.79	26	69	32	19.40	36	49	25
10	MATERIAL	isolant Naturo1	8.40	20	69	31	20.00	66	48	23
11	BC_FRE_S	cavité sol 2	19.65	38	37	28	19.89	48	48	25
12	BC_SIMPL	int RDC	18.52	15	69	20	20.00	66	49	20
13	BC_SIMPL	int R+1	17.94	26	35	40	20.00	66	50	40
14	BC_SIMPL	air extérieur	-0.00	1	60	19	0.25	2	58	44
15	BC_FRE_S	cavité sol 3	19.94	50	37	28	19.98	60	49	25
16	BC_FRE_S	cavité sol 4	19.98	62	37	28	19.99	66	48	32

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
3	BC_SIMPL	cavité dans le		0.00	10.29
9	BC_FRE_S	cavité sol 1	19.04	1.10	1.10
11	BC_FRE_S	cavité sol 2	19.83	0.21	0.21
12	BC_SIMPL	int RDC		10.26	0.00
13	BC_SIMPL	int R+1		11.44	0.00
14	BC_SIMPL	air extérieur		0.00	11.41
15	BC_FRE_S	cavité sol 3	19.97	0.04	0.04
16	BC_FRE_S	cavité sol 4	19.99	0.00	0.00

Fig. 148 : Trisco : résultats graphiques de la jonction caisson/façade (situation initiale)

Le flux total de l'intérieur vers l'extérieur est donc de 21,7 W. Nous pouvons en déduire les flux dus aux murs :

- Au rez-de-chaussée :

- $U_{\text{mur}} = 0,31 \text{ W/m}^2\text{K}$, $S_{\text{mur}} = 2,13 \text{ m}^2$, $\Delta T = 20^\circ\text{C}$
- $\rightarrow \phi_{\text{mur}} = 0,346 * 2,13 * 20 = 13,206 \text{ W}$

- À l'étage :

- $U_{\text{mur}} = 0,275 \text{ W/m}^2\text{K}$, $S_{\text{mur}} = 1,96 \text{ m}^2$, $\Delta T = 20^\circ\text{C}$
- $\rightarrow \phi_{\text{mur}} = 0,275 * 1,96 * 20 = 10,8 \text{ W}$

$\rightarrow \phi_{\text{NC}} = 21,7 - 14,74 - 10,8 = -2,306 \text{ W}$, pour 1,8 m de nœud étudié et 20°C de différence de température, soit $\Psi_e = -0,064 \text{ W/mK}$.

La valeur limite renseignée dans la littérature est de $0,05 \text{ W/mK}$, le nœud est donc conforme à la PEB.

Afin d'accepter la conformité de ce nœud à la PEB directement, la solution serait, comme nous le développerons également plus loin pour un autre nœud constructif, de déplacer la panne de quelques centimètres vers l'intérieur du bâtiment (si bien sûr cela est possible à tout autre point de vue), pour faire passer l'isolation de la façade derrière cette pièce de bois et lui permettre ainsi de rejoindre l'isolant du caisson. On obtient le nœud illustré ci-dessous (cerclé de rouge) : dans ce cas, la résolution du nœud est immédiate. Le contact entre les couches d'isolation est direct et entier, le nœud est donc conforme, sans qu'il soit besoin de diminuer les épaisseurs d'isolant ou de faire appel à une étude poussée dans un logiciel tel que Trisco.

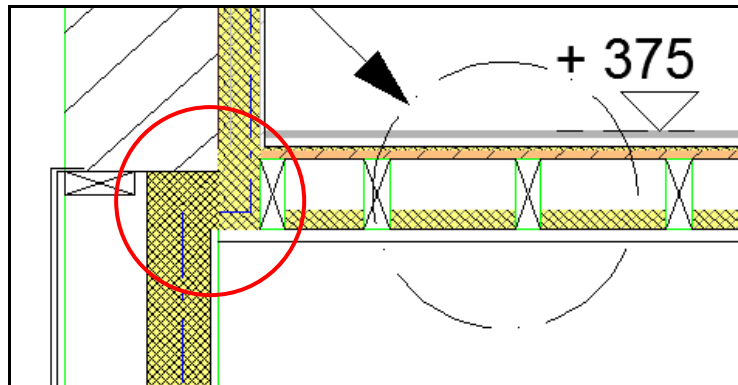


Fig. 149 : Détail résolu du nœud de jonction des caissons isolés avec l'isolant en façade

/) 4 6

Étant donné que ces deux isolants sont en contact direct et entier (14 cm), la première règle de conformité rend ce nœud conforme.

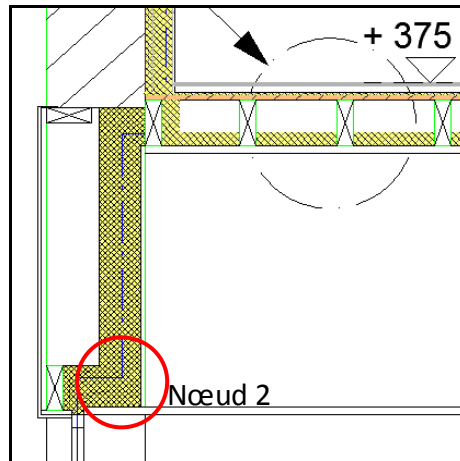


Fig. 150 : Illustration du 2^{ème} nœud constructif généré par l'isolation des caissons à volets

/) 4 6 * H

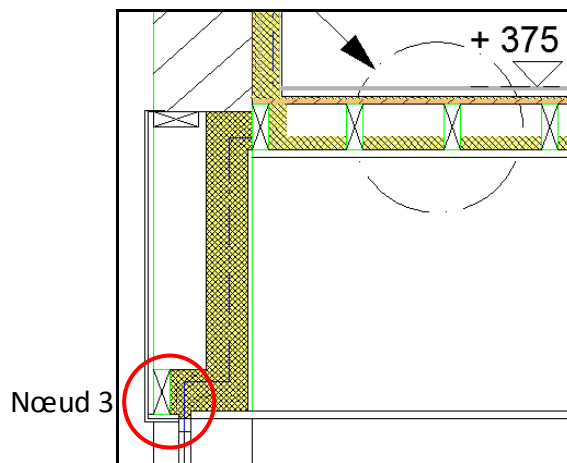


Fig. 151 : Illustration du 3^{ème} nœud constructif généré par l'isolation des caissons à volets

Nous renvoyons au résumé réalisé sur les textes réglementaires (chapitre 3) pour les règles de conformité, mais nous pouvons rappeler que la deuxième

d'entre elles est ajustée en cas de présence d'un châssis de fenêtre : $R \geq \min (R_1/2 ; 1,5)$, R_1 étant la résistance thermique de la couche isolante de la paroi opaque. Il est également essentiel que cette isolant soit en contact plein et entier avec la rupture thermique du châssis en aluminium, ce qui sera le cas dans notre étude si le placement de l'isolant respecte le dessin ci-dessous, rendant ainsi le **nœud conforme**.

4.4.

Pour la composition et l'étude préalable de la paroi, voir point 2.5

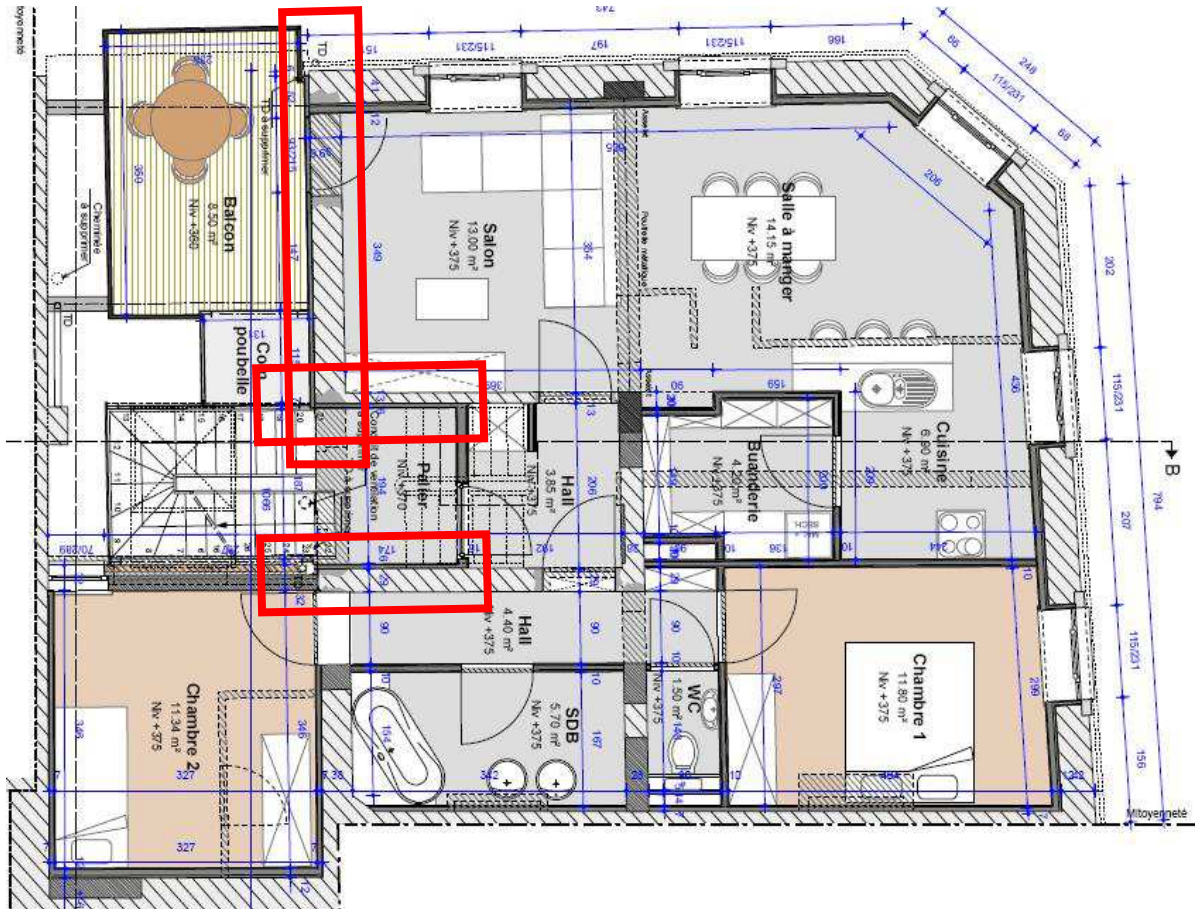


Fig. 152 : Mise en évidence des murs existants isolés par l'extérieur sur le plan du R+1 après rénovation

4.4.1.

G

*

%58

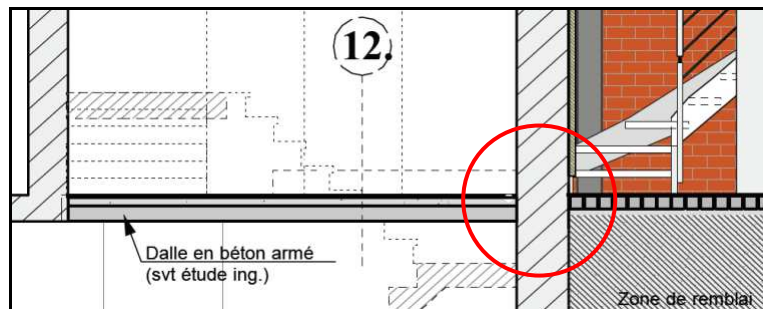


Fig. 153 : Détail d'une coupe du bâtiment – illustration du NC : jonction du mur extérieur et du plancher

À l'instar du nœud décrit au point 4.3.3, il ne s'agit probablement pas d'un « nœud constructif » tel qu'il est imaginé dans la nouvelle réglementation. Ceci tient de la réflexion raisonnable : la réglementation n'imposant pas l'isolation de toutes les parois de déperdition d'un bâtiment en rénovation (mais uniquement le respect des valeurs U_{\max} pour les parois modifiées ou nouvellement construites), la situation illustrée ci-dessus (soit l'arrêt de l'isolation thermique de la paroi sans pouvoir la raccorder à l'isolation – inexistante – d'une autre paroi) est fréquente. Ce « non-nœud » n'est donc pas conforme et ne saurait l'être, mais il est toujours possible d'évaluer les déperditions supplémentaires (c'est-à-dire non encore prises en compte dans la PEB via le coefficient de transmission thermique des parois), grâce à une étude de type Trisco.

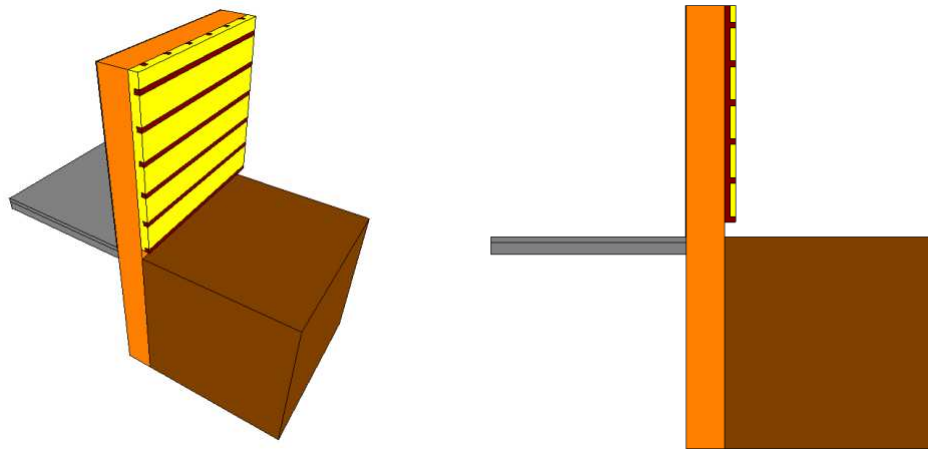


Fig. 154 : Trisco : vue 3D du modèle de la jonction du plancher sur cave non isolé et du mur existant isolé par l'extérieur

Si nous considérons, comme nous l'avons suggéré lors de l'analyse du mur au point 2.5, qu'une ventilation est permise dans la coulisse séparant l'isolant du revêtement en acier, nous pouvons nous passer de modéliser le susdit revêtement. Il suffit alors d'adapter le coefficient d'échange par convection du côté extérieur de la paroi ($h_e = h_i = 7,7$ au lieu de 25). Les résultats graphiques délivrés par Trisco pour ce détail sont les suivants :

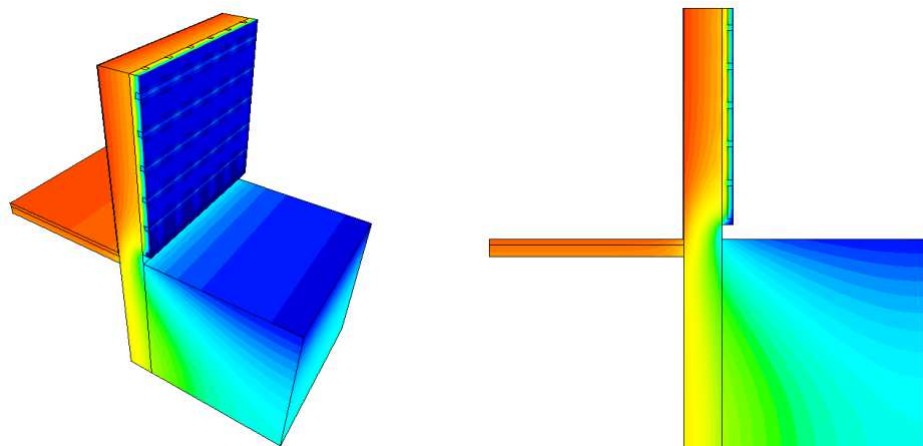


Fig. 155 : Trisco : résultats graphiques du modèle de la jonction du plancher sur cave non isolé et du mur existant isolé par l'extérieur

Les résultats numériques délivrés par Trisco pour ce détail sont les suivants :

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	BC_SIMPL	interieur	16.66	44	54	46	19.23	44	60	118
2	BC_SIMPL	exterieur	0.03	56	4	51	6.82	55	72	51
3	BC_FRE_S	cave	13.99	45	72	35	17.16	0	68	40
4	MATERIAL	sol	0.96	99	67	46	10.34	55	1	0
5	MATERIAL	briques	4.72	55	66	46	19.11	45	60	118
6	MATERIAL	bois	0.10	59	72	51	16.24	55	43	118
7	MATERIAL	isolant Naturol	0.03	56	4	51	16.50	55	60	118
8	MATERIAL	béton lourd arm	15.05	45	18	40	17.97	0	1	44
9	MATERIAL	plâtre	16.40	45	66	46	19.23	44	60	118
10	MATERIAL	béton lourd non	15.88	45	66	44	18.50	3	70	46

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
1	BC_SIMPL	interieur		110.63	0.00
2	BC_SIMPL	exterieur		0.00	110.63
3	BC_FRE_S	cave	15.67	50.62	50.62

Fig. 156 : Trisco : résultats numériques du modèle de la jonction du plancher sur cave non isolé et du mur existant isolé par l'extérieur

Il existe donc un flux de chaleur total de 110,63 W quittant l'ambiance intérieure pour rejoindre l'ambiance extérieure ; la cave est un espace dont le logiciel lui-même calcule la température résultante, ainsi que le flux de chaleur y transitant (50,62 W). De ces 110,63 W, enlevons le flux imputable au mur et au plancher, il nous restera celui attribuable au pont thermique.

- Mur extérieur :
 - $U_{\text{mur}} = 0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$, $S_{\text{mur}} = 2,4 * 2,561 = 6,15 \text{ m}^2$, $\Delta T = 20^\circ\text{C}$
 - $\rightarrow \phi_{\text{mur}} = 41,67 \text{ W}$
- Plancher :
 - $R_{\text{plancher}} = 0,129 \text{ m}^2\text{K/W} \rightarrow R_{\text{tot}} = 0,469 \text{ m}^2\text{K/W}$
 - $S_{\text{plancher}} = 2,4 * 2,52 = 6,05 \text{ m}^2$
 - $\Delta T = 20 - 4,33$ (température résultante dans la cave selon le logiciel) = $15,67^\circ\text{C}$, soit un avec l'ambiance intérieure de $4,33^\circ\text{C}$
 - $\rightarrow \phi_{\text{plancher}} = 55,78 \text{ W}$.
- $\phi_{\text{NC}} = 110,63 - 55,78 - 41,67 = 13,18 \text{ W}$.
- En prenant un ΔT de 20°C (celui qui a été imposé entre l'intérieur et l'extérieur) en considération, $\Psi_e = 0,275 \text{ W/mK}$.

4.4.2. G

*

Dans le cas présenté par la Fig. 157 ci-dessous, le nœud peut être classé non conforme sans mener plus loin l'analyse. En effet, nous pouvons commencer par pointer le manque de contact direct entre les isolants présents à l'extérieur du mur et à l'intérieur du plancher. Ensuite, nous savons déjà que la brique ne peut être considérée comme un élément isolant interposé. Enfin, le chemin le plus court entre les ambiances intérieure et extérieure est égal à l'épaisseur du plancher, soit moins de 30 cm, ce qui est insuffisant pour respecter la 3^e règle de conformité.

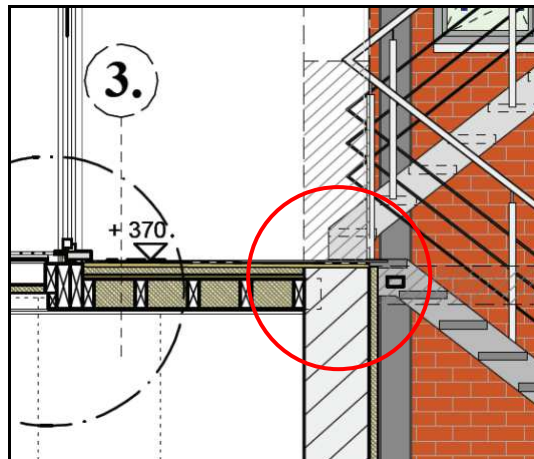


Fig. 157 : Détail d'une coupe du bâtiment – illustration du NC : jonction du mur existant isolé par l'extérieur et du palier d'entrée du R+1

Calculons les déperditions supplémentaires dues à ce nœud via Trisco. Les valeurs λ rentrées dans le logiciel sont bien sûr égales à celles utilisées dans le calcul PEB.

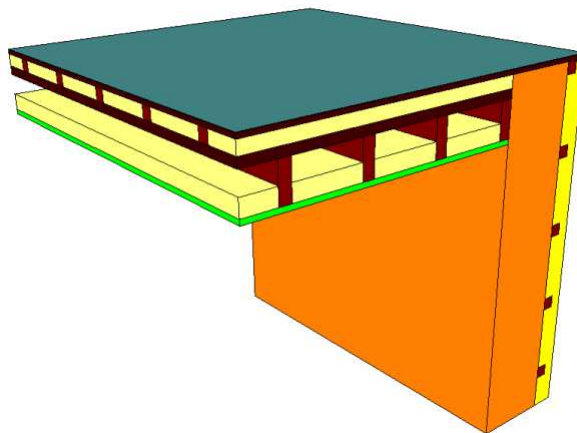


Fig. 158 : Trisco : vue 3D du modèle de la jonction du mur existant isolé par l'extérieur et du palier d'entrée du R+1

Pour une différence de 20°C entre les ambiances intérieure et extérieure, les résultats graphiques et numériques sont les suivants :

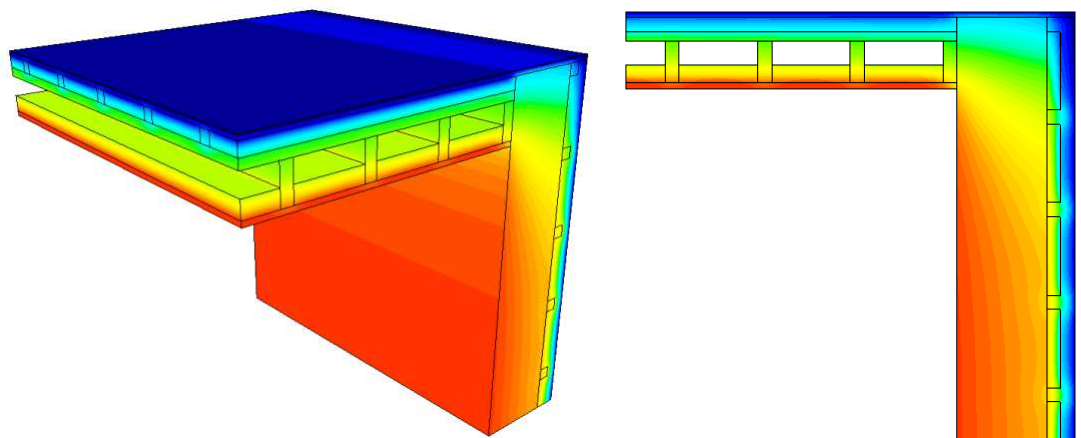


Fig. 159 : Trisco : résultats graphiques du modèle de la jonction du mur existant isolé par l'extérieur et du palier d'entrée du R+1

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	BC_SIMPL	interieur	15.13	43	6	20	19.51	0	60	20
2	BC_SIMPL	exterieur	0.02	57	32	6	0.84	57	6	61
3	MATERIAL	plâtre	13.85	43	6	18	19.51	0	60	20
4	MATERIAL	bois	0.06	57	5	5	18.19	5	0	18
5	MATERIAL	briques	2.94	53	6	5	19.17	43	0	67
6	MATERIAL	metal	0.11	58	16	1	0.78	46	24	2
7	MATERIAL	isolant Knauf N	0.02	57	32	6	16.41	53	60	67
8	MATERIAL	isolant seul	0.81	35	0	5	19.14	0	60	18
9	MATERIAL	OSB	0.03	57	4	5	9.24	5	12	9
10	MATERIAL	membrane bitumi	0.10	57	8	3	0.88	46	24	3
11	BC_FRE_S		8.51	0	6	9	11.66	5	24	14
12	BC_FRE_S		8.49	12	30	9	11.65	7	24	14
13	BC_FRE_S		8.39	26	6	9	11.58	19	24	14
14	BC_FRE_S		7.99	41	30	9	11.27	31	48	14

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
1	BC_SIMPL	interieur		49.27	0.00
2	BC_SIMPL	exterieur		0.00	49.27
11	BC_FRE_S		9.92	1.84	1.84
12	BC_FRE_S		9.90	3.68	3.68
13	BC_FRE_S		9.79	3.68	3.68
14	BC_FRE_S		9.33	3.62	3.62

Fig. 160 : Trisco : résultats numériques du modèle de la jonction du mur existant isolé par l'extérieur et du palier d'entrée du R+1

Le mur de briques isolé par l'extérieur a un coefficient de transmission thermique $U_{\text{mur}} = 0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$ et, dans le cas présent, une surface de déperdition $S_{\text{mur}} = 2 * 1,854 = 3,708 \text{ m}^2$. Le flux thermique qui le traverse, pour un ΔT de 20°C est donc $\phi_{\text{mur}} = 25,14 \text{ W}$.

Ainsi que nous l'avons développé au point 2.8, le plafond isolé par 8 cm de laine minérale entre les éléments structurels, a un $U_{\text{plafond}} = 0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$. Pour une surface de déperdition $S_{\text{plafond}} = [1,941 * 2 =] 3,882 \text{ m}^2$ et un ΔT de 20°C , le flux de chaleur le traversant sera $\phi_{\text{plafond}} = 20,264 \text{ W}$.

$$\phi_{\text{NC}} = 49,27 \text{ W} - 25,14 \text{ W} - 20,264 \text{ W} = 3,866 \text{ W} \rightarrow \Psi_e = 0,1 \text{ W/mK}$$

La valeur limite ($\Psi_{e,\text{lim}}$) pour cet « angle sortant » est de 0 W/mK , nous sommes donc hors des limites de conformité. La valeur par défaut dans la PEB serait de $0,15 + 0 = 0,15 \text{ W/mK}$, supérieure au résultat obtenu.

Notons que la température surfacique minimale, à la jonction du mur et du plancher, est de $15,13^\circ\text{C}$ dans les conditions du calcul numérique.

Si le plancher était rempli d'isolant, les résultats numériques du calcul seraient changés (voir Fig. 161) Le coefficient U du plancher change également, passant de $0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$ à $0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$. Le flux qui lui est imputable diminue donc de $20,264 \text{ W}$ à $14,13 \text{ W}$, faisant passer les déperditions du nœud constructif de $0,1 \text{ W/mK}$ à $0,154 \text{ W/mK}$, passant au-delà de la valeur par défaut. Le renforcement de l'isolation des parois adjacentes tend à augmenter le flux thermique qui s'échappe par le point faible, ce qui est somme toute assez logique : en augmentant la résistance du plancher, la chaleur va préférentiellement se diriger vers le point faible. L'important reste, bien sûr, que le flux de chaleur total quittant l'ambiance intérieure diminue, et que la température minimale sur la face intérieure du modèle ne descende pas sous certaines valeurs critiques (elle reste ici à $15,13^\circ\text{C}$).

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	BC_SIMPL	interieur	15.13	43	6	20	19.66	0	60	20
2	BC_SIMPL	exterieur	0.02	57	8	6	0.84	57	54	61
3	MATERIAL	plâtre	13.86	43	6	18	19.66	0	60	20
4	MATERIAL	bois	0.06	57	7	5	18.65	5	0	18
5	MATERIAL	briques	2.92	53	6	5	19.17	43	12	67
6	MATERIAL	metal	0.11	58	4	1	0.77	46	60	2
7	MATERIAL	isolant Knaufl N	0.02	57	8	6	16.41	53	12	67
8	MATERIAL	isolant seul	0.57	36	22	5	19.40	0	60	18
9	MATERIAL	OSB	0.03	57	8	5	8.43	6	60	9
10	MATERIAL	membrane bitumi	0.10	57	16	3	0.86	46	60	3

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
1	BC_SIMPL	interieur		45.43	0.00
2	BC_SIMPL	exterieur		0.00	45.43

Fig. 161 : résultats numériques du modèle tenant compte d'un remplissage du plancher avec de l'isolant.

Que deviendrait cette déperdition si nous placions un isolant pour rejoindre les isolants présents dans le plancher et sur le mur (comme illustré dans la Fig. 162 ci-dessous).

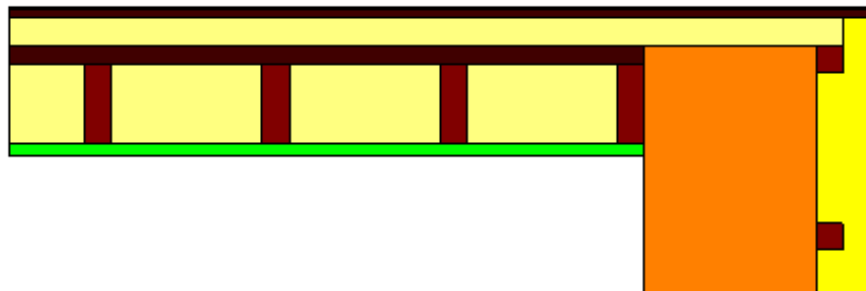


Fig. 162 : illustration de la solution proposée.

Etant donné que ce mur fait moins de 40 cm d'épaisseur, il ne s'agit pas d'une nouvelle paroi, mais d'un « élément interposé isolant » dont il faut vérifier le respect à la règle 2 de conformité :

- Le bois et l'isolant présents ont des valeurs λ inférieures à la limite de 0,2 W/mK. La couche composée de bois (11%) + isolant (89%) possède une résistance de 1,178 m²K/W selon la PEB ;
- Entre le plancher et le mur extérieur, la plus petite résistance de la couche isolante se trouve du côté du mur. Sa résistance (bois + isolant, selon la PEB) est de 2,214 m²K/W, ce qui signifie que l'isolant interposé doit avoir une résistance minimale de $2,214/2 = 1,107$ m²K/W pour rendre ce nœud conforme. Comme mentionné ci-dessus, la résistance de l'isolant placé en jonction est de 1,178 m²K/W, nous respectons donc bien cette deuxième condition.
- Le contact est entier entre l'élément interposé et les couches isolantes du plancher et du mur (voir Fig. 162 ci-dessus).

Dans ces conditions, le nœud est conforme. Voici les résultats graphiques et numériques issus de TRISCO (Fig. 163 et 164 ci-dessous) :

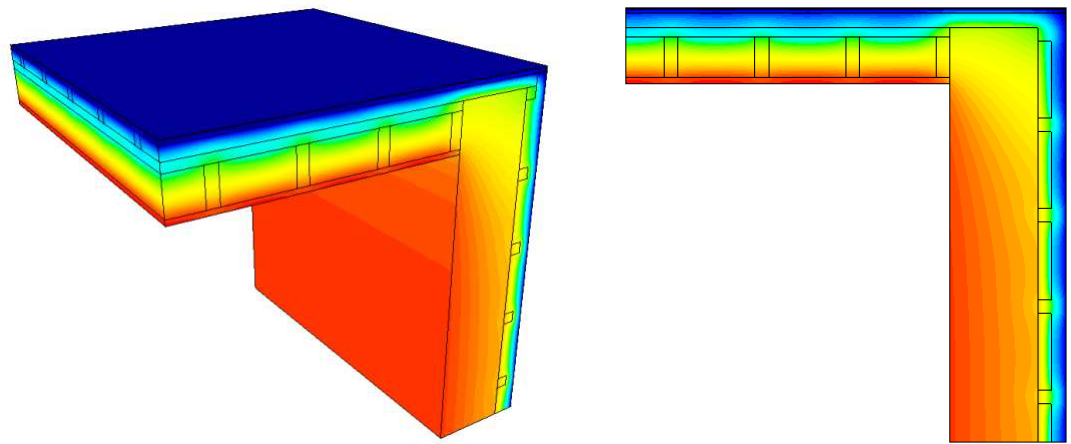


Fig. 163 : Résultats graphiques de la simulation de la solution

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	BC_SIMPL	interieur	16.74	43	6	20	19.67	36	60	20
2	BC_SIMPL	exterieur	0.02	57	60	5	0.85	57	54	63
3	MATERIAL	plâtre	15.92	43	6	18	19.67	36	60	20
4	MATERIAL	bois	0.07	57	5	5	18.66	31	0	18
5	MATERIAL	briques	8.37	53	6	7	19.19	43	60	69
6	MATERIAL	metal	0.06	58	0	1	0.48	46	54	2
7	MATERIAL	isolant Knauf N	0.02	57	60	5	16.45	53	60	69
8	MATERIAL	isolant seul	0.59	0	2	5	19.42	36	12	18
9	MATERIAL	OSB	0.02	57	60	5	11.92	43	60	9
10	MATERIAL	membrane bitumi	0.06	57	12	3	0.57	46	54	3

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
1	BC_SIMPL	interieur		39.26	0.00
2	BC_SIMPL	exterieur		0.00	39.26

Fig. 164 : Résultats numériques de la simulation de la solution

Le flux total passe de 45,43 à 39,26 W, desquels nous pouvons déduire ceux imputables au plancher et au mur (identiques au cas précédent : 25,14 W pour le mur et 14,13 W pour le plancher). « Restent » donc -0,01 W imputables au nœud constructif, soit une déperdition linéaire négligeable (≈ 0 W/mK).

4.4.3.) 4 6 &

A

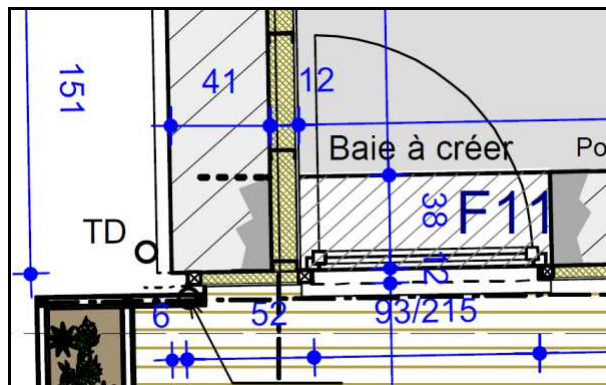


Fig. 165 : Détail du plan : accès vers les terrasses. Illustration de la jonction entre une isolation intérieure et une isolation extérieure.

Dans le cas illustré ci-dessus, la jonction est simple et nette ; il n'est dès lors pas difficile de classer ce nœud dans la catégorie « conforme » : les isolants se touchent sur une épaisseur égale à la plus grande des deux épaisseurs en présence.

Il a été cependant constaté sur chantier que le placement de la porte n'a pas scrupuleusement suivi le plan ci-dessus : la couche d'isolation qui « traverse » la maçonnerie au dos de la porte a été amincie (5 cm), et le châssis a été fixé sur la structure bois de l'isolant extérieur, elle-même accrochée à la maçonnerie.

Ce nœud, en particulier, fait l'objet d'un monitoring complet de la part du CSTC, il est donc important, pour la comparaison entre les résultats simulés et mesurés, de le modéliser dans sa configuration réelle : voir point 4.9.4 en fin de rapport.

Dans la foulée de notre réflexion, nous pouvons légitimement nous poser la question de la conformité pour cette même jonction à d'autres endroits qu'à celui de la porte (au niveau de la maçonnerie, du plancher, du linteau...). Le détail devrait alors plutôt ressembler à ceci :

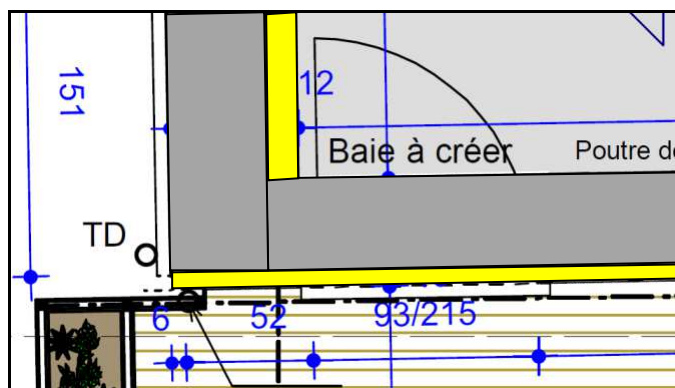


Fig.166 : simulation du nœud constructif au niveau de la maçonnerie

Et, dans cette configuration, le nœud n'est probablement plus conforme, puisque les isolants ne se touchent plus, la brique ne peut être considérée comme un élément isolant interposé conforme, et le chemin de moindre résistance mesure approximativement 50 cm. C'est là un problème récurrent lorsque l'on mixe les techniques d'isolation dans la rénovation d'un bâtiment (certaines parois sont isolées par l'intérieur, d'autres par l'extérieur). Pour attester de la (non-)conformité de ce nœud, nous devons encore comparer ses déperditions linéaires avec la valeur limite $\psi_{e,lim}$.

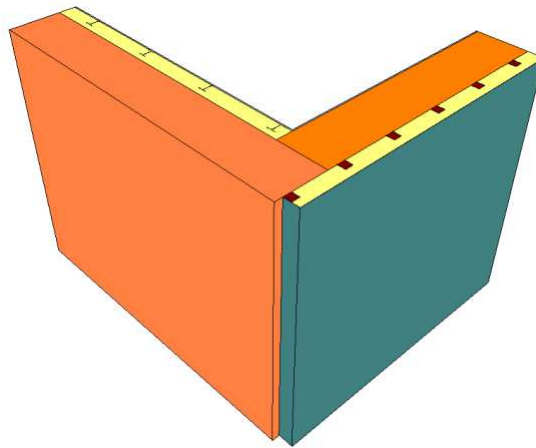


Fig. 167 : Trisco : vue 3D du modèle de la jonction des murs isolés par l'intérieur et par l'extérieur avec maçonnerie en interposition

L'explication de l'utilisation de deux couleurs (et donc deux matériaux) pour modéliser deux façades composées des mêmes briques tient dans la variation de leur conductivité thermique en fonction de l'humidité : un matériau humide conduit mieux la chaleur qu'un matériau sec. Ainsi, le mur de gauche sur la Fig. 167 ci-dessus est isolé par l'intérieur ; de ce fait, les briques restent exposées à la pluie battante et, au vu de leur qualité d'absorption, leur valeur λ a été maintenue à 1,61 W/mK. Par contre, le mur de droite est isolé par l'extérieur, il jouit donc d'une protection efficace contre l'humidité extérieure, la valeur λ de ses briques peut être abaissée à 0,83 W/mK (joints compris).

Résultats graphiques :

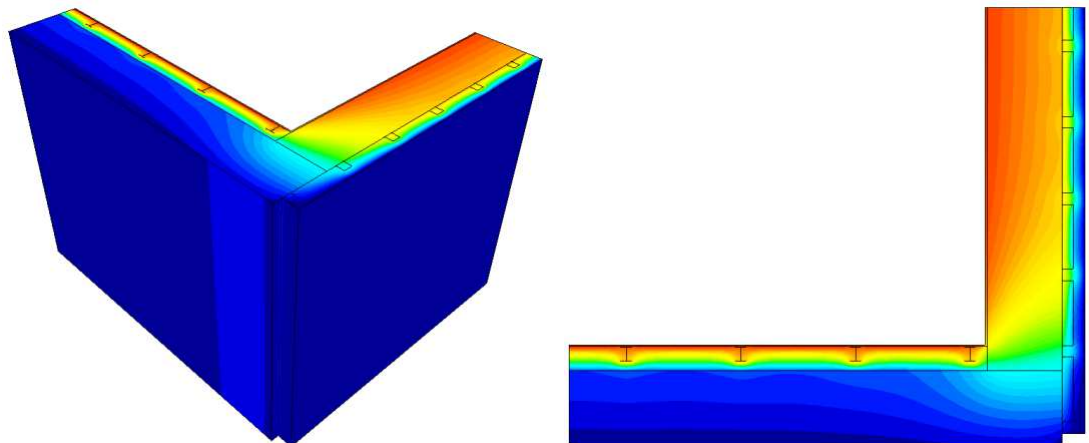


Fig. 168 : Trisco : résultats graphiques du modèle de la jonction des murs isolés par l'intérieur et par l'extérieur avec maçonnerie en interposition

Les résultats numériques (voir Fig. 169 ci-dessous) indiquent un $\phi_{\text{tot}} = 65,07$ W traversant les deux parois et le nœud constructif pour rejoindre l'ambiance extérieure.

Le mur de gauche, isolé par l'intérieur, est caractérisé (voir point 2.1) par une valeur $U_{\text{mur}} = 0,275$ W/m²K et une surface de déperdition de $2,7 \text{ m} * 2 \text{ m} = 5,4 \text{ m}^2$. Pour un ΔT de 20°C, le flux correspondant est donc de 29,7 W.

Le mur de droite, isolé par l'extérieur, est caractérisé (voir point 2.5) par une valeur

$U_{\text{mur}} = 0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$ et une surface de déperdition de $2,291 \text{ m} \times 2 \text{ m} = 4,582 \text{ m}^2$. Pour un ΔT de 20°C , le flux correspondant est de $31,07 \text{ W}$.

Ensemble, ces deux murs représentent un flux de chaleur de $60,77 \text{ W}$. Dans notre modèle, le nœud constructif est donc responsable d'un $\phi_{\text{NC}} = 65,07 - 60,77 = 4,3 \text{ W}$, soit une déperdition thermique linéaire $\Psi_e = 0,11 \text{ W/mK}$.

La valeur limite ($\Psi_{e,\text{lim}}$) pour un angle sortant constitué de 2 murs est de $-0,10 \text{ W/mK}$. Par conséquent la valeur par défaut serait de $0,15 - 0,1 = 0,05 \text{ W/mK}$, inférieure au résultats annoncé.

Résultats numériques :

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	BC_SIMPL	interieur	14.50	85	26	18	19.45	74	26	20
2	BC_SIMPL	exterieur	0.03	101	7	12	0.63	90	1	36
4	MATERIAL	bois	0.04	100	6	7	16.05	96	74	48
5	MATERIAL	briques	4.84	86	16	18	19.06	86	79	0
6	MATERIAL	metal	0.03	101	7	12	18.51	60	24	3
8	MATERIAL	isolant seul	0.03	100	7	12	19.37	75	24	41
9	MATERIAL	plâtre	12.67	86	24	18	19.45	74	26	20
11	MATERIAL	briques_2	0.22	0	1	55	5.49	89	16	36

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
1	BC_SIMPL	interieur		65.07	0.00
2	BC_SIMPL	exterieur		0.00	65.07

Fig. 169 : Trisco : résultats numériques du modèle de la jonction des murs isolés par l'intérieur et par l'extérieur avec maçonnerie en interposition

4.4.4. D & 9 -

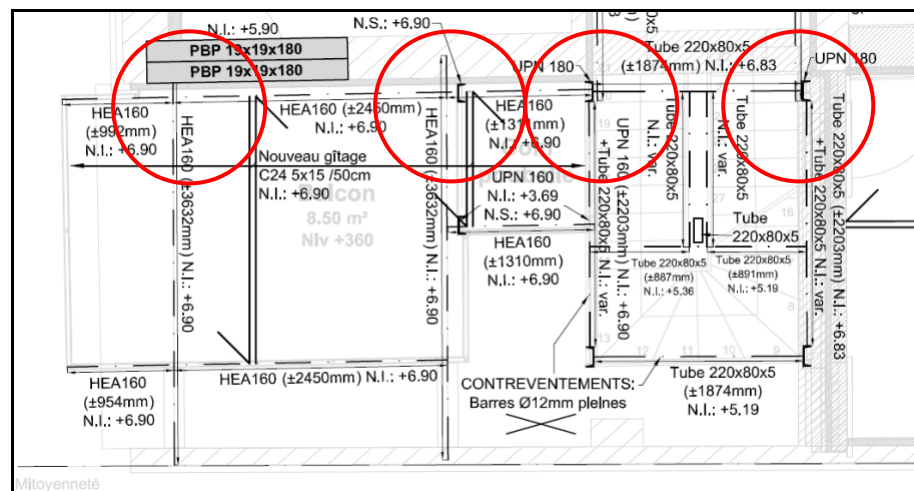


Fig. 170 : Illustration de l'emplacement des ancrages métalliques par l'extérieur

De manière identique au point 4.3.1, il s'agit ici d'une poutre métallique, traversant la couche d'isolant thermique pour s'encastrent dans le mur de briques existant. Il existe cependant plusieurs « détails » qui rendent ce nœud différent : d'abord, l'encastrement est extérieur (la poutre est extérieure), ensuite le coefficient U_{mur} de transmission thermique est plus faible mais la valeur de la conductivité thermique des briques a été adaptée (conformément au nœud précédent) pour tenir compte d'un taux d'humidité plus faible... Nous avons modélisé la HEA 180 :

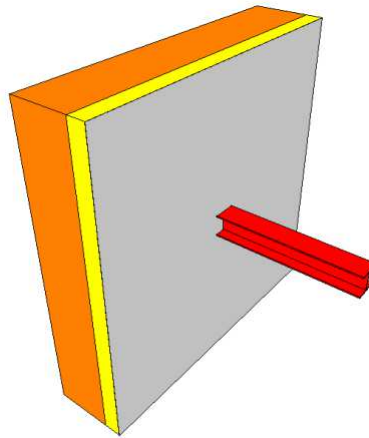


Fig. 171 : Trisco : vue 3D du modèle de l'ancrage d'une poutrelle métallique (extérieure) dans un mur isolé par l'extérieur.

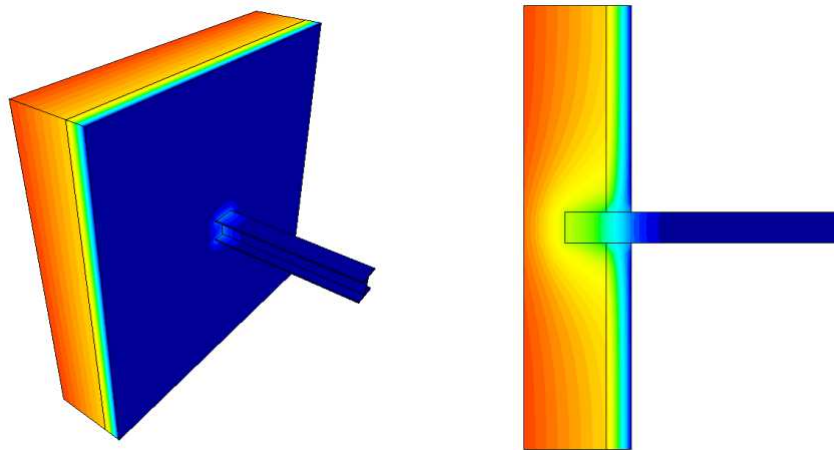


Fig. 172 : Trisco : résultats graphiques du modèle de l'ancrage d'une poutrelle métallique (extérieure) dans un mur isolé par l'extérieur.

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
2	MATERIAL	briques	6.82	24	28	24	19.04	0	20	0
4	MATERIAL	acier	0.00	24	52	24	11.59	30	24	28
5	MATERIAL	acier	0.26	34	32	24	2.35	26	31	26
6	BC_SIMPL	exterieur	0.00	24	52	24	2.34	24	32	22
7	MATERIAL	isolant + struc	0.26	34	31	24	15.52	50	28	48
8	BC_SIMPL	interieur	17.73	25	20	24	19.04	0	20	0

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
6	BC_SIMPL	exterieur		0.00	39.50
8	BC_SIMPL	interieur		39.51	0.00

Fig. 173 : Trisco : résultats numériques du modèle de l'ancrage d'une poutrelle métallique (extérieure) dans un mur isolé par l'extérieur.

Si l'on retire de ce $\phi_{tot} = 39,5 \text{ W}$ le flux qui traverse le mur ($U_{mur} = 0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$, $S_{mur} = 4,65 \text{ m}^2$ et $\Delta T = 20^\circ\text{C} \rightarrow \phi_{mur} = 31,62\text{W}$), il reste, pour le nœud constructif seul, un $\phi_{NC} = 7,88 \text{ W}$, ou $\Psi_e = 0,394 \text{ W/K}$.

Il n'existe aucune valeur limite ($\Psi_{e,lim}$) pour les nœuds constructifs ponctuels. La contribution par défaut de ce nœud en particulier dans les déperditions de l'enveloppe s'élèverait à $4,7 \cdot z + 0,03 \text{ [W]}$, soit, avec $z = 0,16 \text{ m}$ (le côté du carré

en prolongeant l'isolation thermique le long du mur de refend d'un mètre au minimum (voir Fig. 175 ci-dessous).

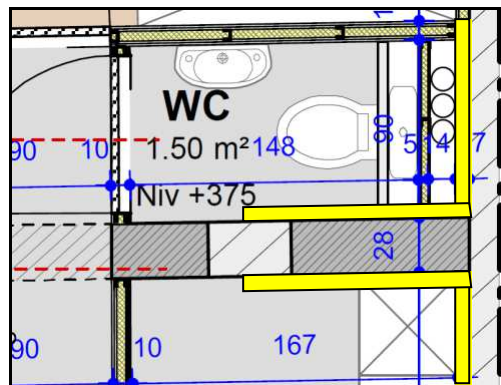


Fig. 175 : illustration de la solution proposée pour la conformité du nœud constructif créé par le mur de refend

Quelles seraient les déperditions associées à un tel nœud, avec et sans isolant ajouté sur le mur de refend ?

$$/ 2 \quad 8 \quad 6 \quad * \quad 9$$

Pour rendre ce calcul hypothétique plus réaliste, nous adapterons la composition du mur « extérieur » à celles du vrai mur extérieur isolé par l'intérieur (étudié au point 2.1) : isolé par 12,5 cm de laine de verre, dont 5 cm en rupture thermique entre la brique et la structure métallique qui renferme les 7,5 cm restant.

Les valeurs de conductivité thermique ont été adaptées en conséquence : la couche composée d'isolant et de la structure en acier est caractérisée par un λ_{moyen} de 0,0465 W/mK, la brique sèche une valeur λ de 0,83 W/mK.

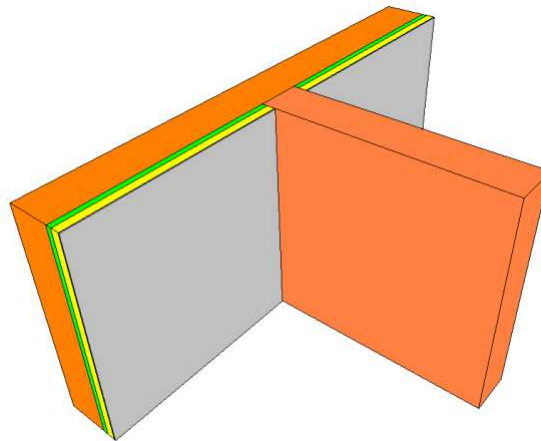


Fig. 176 : Trisco : vue 3D du modèle du nœud constructif créé par le mur de refend (situation initiale)

Pour une différence de température de 20°C entre les deux faces du mur, les résultats sont les suivants :

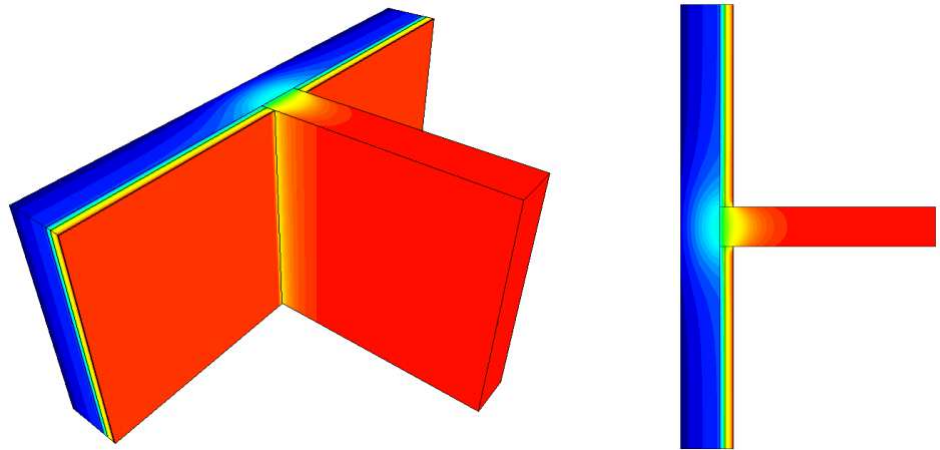


Fig. 177 : Trisco : résultats graphiques du modèle du nœud constructif créé par le mur de refend (situation initiale)

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	BC_SIMPL	interieur 1	14.70	40	37	0	20.00	40	77	40
2	MATERIAL	briques	0.23	0	20	7	6.64	45	30	32
3	MATERIAL	isolation seule	1.60	0	30	9	10.52	37	32	0
4	MATERIAL	briques int	5.47	40	30	0	20.00	50	77	40
5	MATERIAL	plâtre	13.99	50	35	40	19.32	54	37	40
6	BC_SIMPL	interieur 2	14.70	50	37	0	20.00	50	77	40
7	MATERIAL	isolant + struc	8.84	40	32	0	19.11	54	35	40
8	BC_SIMPL	exterieur	0.23	0	20	7	0.76	45	20	0

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
1	BC_SIMPL	interieur 1		37.39	0.00
6	BC_SIMPL	interieur 2		37.39	0.00
8	BC_SIMPL	exterieur		0.00	74.77

Fig. 178 : Trisco : résultats numériques du modèle du nœud constructif créé par le mur de refend (situation initiale)

Le mur « extérieur », d'une surface de 8,78 m², est caractérisé comme nous le savons par un $U_{mur} = 0,275 \text{ W/m}^2\text{K}$, laissant ainsi passer dans nos calculs un $\phi_{mur} = 48,29 \text{ W}$. Les 26,48 W restant sont assignables au nœud constructif, résultant ainsi en une déperdition $\Psi_e = 0,662 \text{ W/mK}$, bien supérieur au $\Psi_{e,lim}$ acceptable pour un « raccord de paroi d'un même volume protégé », qui est de 0,05 W/mK. De ce fait, la valeur par défaut de la PEB est de $0,15 + \Psi_{e,lim}$, soit 0,2 W/mK, bien inférieure à la valeur calculée de déperditions « réelles ».

Remarquons que la température minimale atteinte sur la face intérieure du mur, à l'intersection avec le mur de refend, est de 14,7°C. Le facteur de température de 0,7 est tout juste atteint, nous permettant de ne pas craindre de « graves » problèmes de condensation.

/ 2 8 6 * 9

Étudions maintenant les résultats dans le cas 2, avec un retour de l'isolation thermique le long du mur de refend, des deux côtés de celui-ci, sur une longueur d'1 mètre (remarquons que dans ce cas, le nœud pourrait être déclaré conforme à la PEB puisque le chemin de moindre résistance atteint une longueur > 1 m).

N'ayant aucune imposition sur la valeur U du mur de refend (il ne s'agit pas d'une paroi de déperdition), nous l'isolons avec 5 cm de laine minérale.

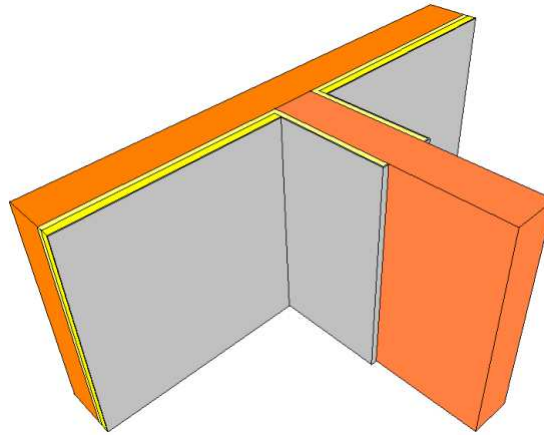


Fig. 179 :Trisco : vue 3D du modèle du nœud constructif créé par le mur de refend (solution proposée)

Graphiquement, les résultats (graphiques : Fig. 180 ; numériques : Fig. 181) sont plus séduisants, indiquant notamment que la température surfacique intérieure minimale est plus élevée que dans le cas 1 (18,32°C) :

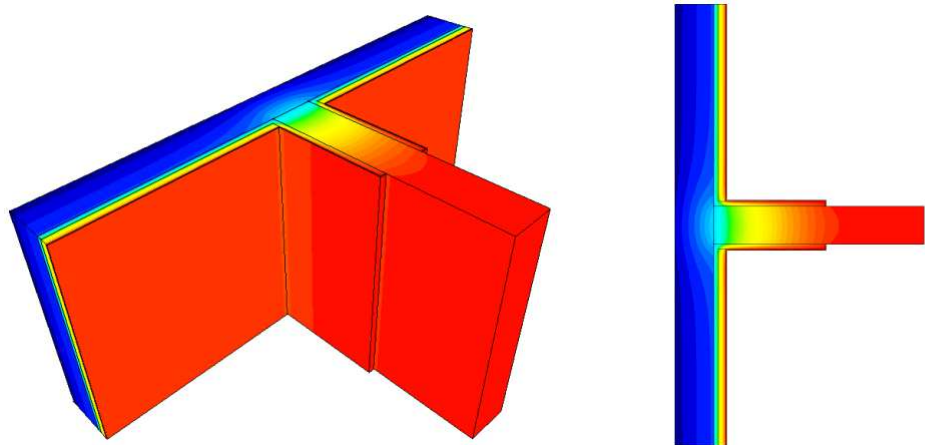


Fig. 180 : Trisco : résultats graphiques du modèle du nœud constructif créé par le mur de refend (solution proposée)

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	BC_SIMPL	interieur 1	18.32	40	37	1	20.00	44	79	40
2	MATERIAL	briques	0.23	0	20	0	4.01	49	30	40
3	MATERIAL	isolation seule	1.59	0	30	0	19.94	42	57	40
4	MATERIAL	briques int	3.40	54	30	0	20.00	54	79	40
5	MATERIAL	plâtre	17.17	56	35	0	19.96	40	59	40
6	BC_SIMPL	interieur 2	18.32	58	37	0	20.00	54	79	40
7	MATERIAL	isolant + struc	7.83	42	32	1	19.06	36	35	1
8	BC_SIMPL	exterieur	0.23	0	20	0	0.47	49	20	39

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
1	BC_SIMPL	interieur 1		31.26	0.00
6	BC_SIMPL	interieur 2		31.26	0.00
8	BC_SIMPL	exterieur		0.00	62.51

Fig. 181 : Trisco : résultats numériques du modèle du nœud constructif créé par le mur de refend (solution proposée)

Le flux diminue de 74,77 à 62,51 W. Les dimensions du modèle ayant sensiblement changé entre le cas 1 et le cas 2, la surface de déperdition du mur « extérieur » est maintenant de 9,02 m², portant le flux thermique traversant cette paroi seule à 49,61 W.

Le nœud constructif est donc responsable des 12,9 W restant, soit une déperdition linéaire $\Psi_e = 0,32 \text{ W/mK}$, ou une diminution de l'ordre de 51% par rapport au cas 1. On se rapproche de la valeur par défaut suggérée par la PEB, bien qu'on lui reste supérieur.

La température minimale calculée sur la surface intérieure est effectivement supérieure à celle que Trisco avait calculé dans le cas 1. De 14,7°C, elle monte à 18,32°C, nous permettant d'ignorer les risques de condensations superficielle. Notons toutefois que les risques de condensation interne au mur extérieur restent d'actualité, comme nous l'avons développé au point 2.1, surtout dans des locaux humides.

4.5.2. , & K "

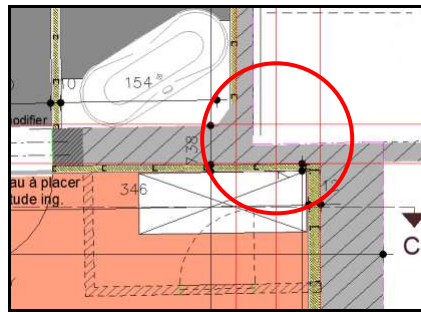


Fig. 182 : Illustration du nœud constructif formé par la rencontre des murs pignons mitoyens

Ne s'agissant pas de surfaces de déperdition, il ne devrait pas être nécessaire d'attester la conformité de ce nœud constructif selon la PEB. Dans le même état d'esprit et les mêmes hypothèses qu'au point 4.5.1, nous étudierons ce nœud comme si le mur était extérieur. La solution de conformité consiste donc également en une prolongation de l'isolant thermique le long des murs afin d'augmenter la longueur du chemin de moindre résistance pour qu'il atteigne 1 m au minimum :

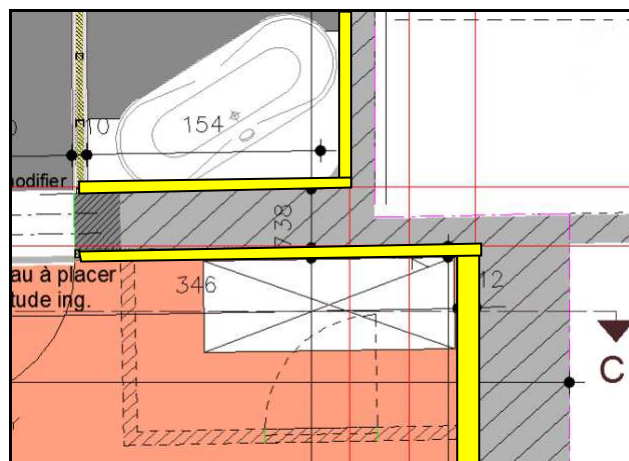


Fig. 183 : illustration de la solution proposée pour le nœud constructif formé par la rencontre des murs pignons mitoyens

Modélisons d'abord la situation projetée par les architectes, avec les hypothèses que nous connaissons :

/ 2 8 6

Notons que l'isolant le long du mur de la chambre est de toute manière prévu dans le projet. Par contre, ce mur, avec nos hypothèses, devient extérieur sur une longueur de l'ordre d'1,2 m (à droite sur la Fig.183 ci-dessus). Afin de respecter le U_{max} , nous donnerons à ce mur la composition des murs extérieurs isolés par l'intérieur.

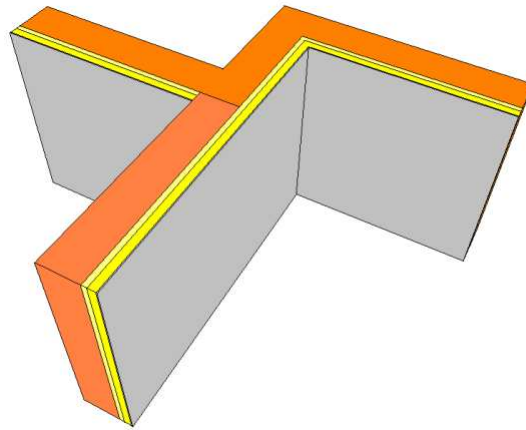


Fig. 184 : Trisco : vue 3D du nœud constructif formé par la rencontre des murs pignons mitoyens (situation initiale)

Dans les hypothèses prises ci-dessus, les résultats sont les suivants :

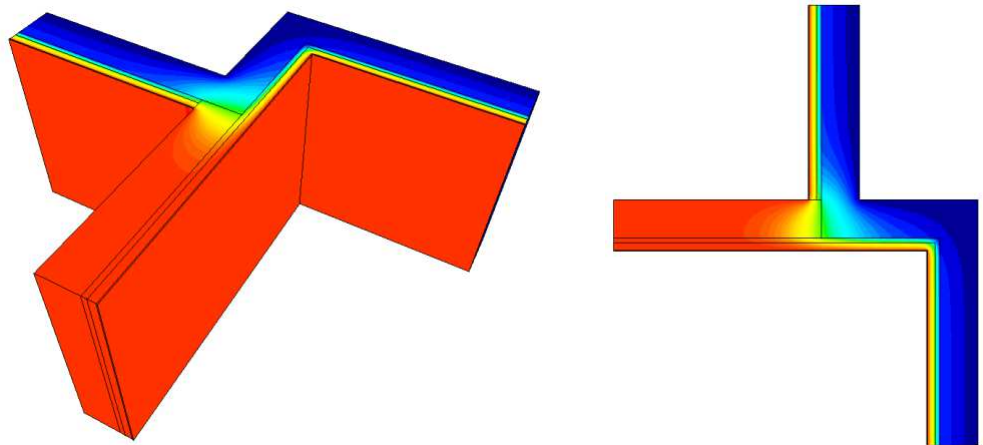


Fig. 185 : Trisco : résultats numériques de la modélisation du nœud constructif formé par la rencontre des murs pignons mitoyens (situation initiale)

Nous avons ici 11,48 m² de mur en contact avec l'ambiance extérieure. Considérant une composition identique aux « vrais » murs extérieurs isolés par l'intérieur, caractérisés par un $U_{mur} = 0,275 \text{ W/m}^2\text{K}$, le flux associé est $\phi_{mur} = 63,14 \text{ W}$, laissant un $\phi_{NC} = 14,76 \text{ W}$ restant traverser le nœud constructif. La déperdition associée est donc $\Psi_e = 0,37 \text{ W/mK}$.

Clr. Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1 BC_SIMPL	interieur 1	14.84	75	40	39	19.99	115	40	27
2 MATERIAL	briques	0.02	20	40	40	8.49	69	50	0
3 MATERIAL	isolation seule	0.81	30	50	38	19.99	115	52	40
4 MATERIAL	briques int	6.38	69	40	35	19.99	115	40	27
5 MATERIAL	plâtre	14.19	74	40	39	20.00	115	56	40
6 BC_SIMPL	interieur 2	18.23	36	56	4	20.00	115	56	40
7 MATERIAL	isolant + struc	3.79	32	52	39	20.00	115	55	3
8 BC_SIMPL	exterieur	0.02	20	40	40	1.38	59	40	0

Clr. Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
1 BC_SIMPL	interieur 1		41.07	0.00
6 BC_SIMPL	interieur 2		36.83	0.00
8 BC_SIMPL	exterieur		0.00	77.90

Fig. 186 : Trisco : résultats numériques de la modélisation du nœud constructif formé par la rencontre des murs pignons mitoyens (situation initiale)

La température minimale atteinte sur la surface d'un mur extérieur est de 14,84°C pour la « petite » pièce, à gauche sur la vue 3D de la Fig. 184 ci-dessus, et de 18,23°C pour la « grande » pièce à droite.

/ 2 8 6

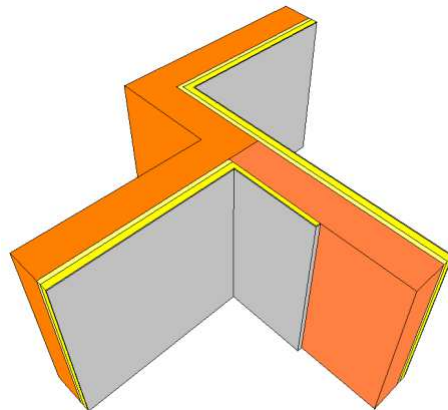


Fig. 187 : Trisco : vue 3D du nœud constructif formé par la rencontre des murs pignons mitoyens (solution proposée)

Comme dans l'étude du nœud précédent (voir 4.5.1), nous considérerons une isolation rapportée en laine minérale de 5 cm d'épaisseur.

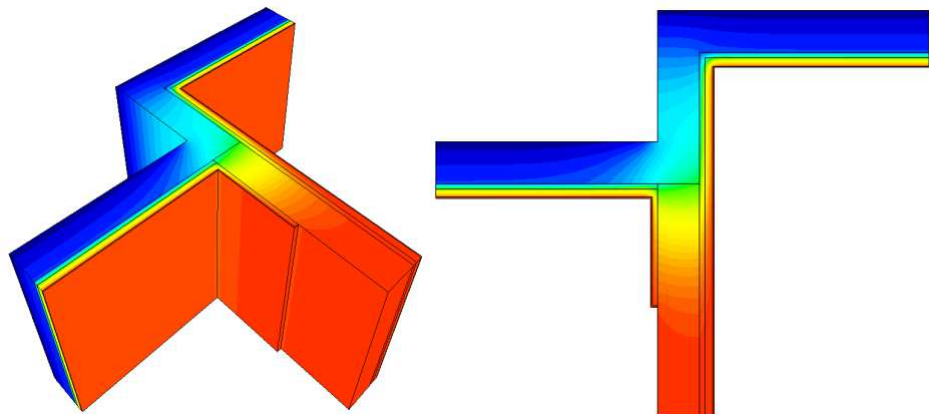


Fig. 188 : Trisco : résultats graphiques de la modélisation du nœud constructif formé par la rencontre des murs pignons mitoyens (solution proposée)

Voici les résultats numériques :

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	BC_SIMPL	interieur 1	18.42	72	40	1	19.97	113	43	0
2	MATERIAL	briques	0.23	20	99	12	8.23	66	53	40
3	MATERIAL	isolation seule	1.60	30	99	40	19.95	113	55	39
4	MATERIAL	briques int	6.08	66	43	0	19.97	113	43	0
5	MATERIAL	plâtre	17.10	32	58	0	20.00	113	59	37
6	BC_SIMPL	interieur 2	18.25	33	59	10	20.00	113	59	37
7	MATERIAL	isolant + struc	4.92	31	55	2	20.00	113	58	37
8	BC_SIMPL	exterieur	0.23	20	99	12	2.21	56	40	40

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
1	BC_SIMPL	interieur 1		31.55	0.00
6	BC_SIMPL	interieur 2		36.91	0.00
8	BC_SIMPL	exterieur		0.00	68.45

Fig. 189 : Trisco : résultats numériques de la modélisation du nœud constructif formé par la rencontre des murs pignons mitoyens (solution proposée)

La modification du modèle Trisco a légèrement modifié la surface de déperdition du mur extérieur, le portant à 11,6 m², augmentant ainsi le flux qui le traverse à 63,8 W. Par conséquent, la déperdition linéaire du nœud diminue : $\Psi_e = 0,12 \text{ W/mK}$, toujours légèrement supérieure au $\Psi_{e,lim.}$. Le nœud est toutefois rendu conforme par l'allongement du chemin de moindre résistance.

Comme l'annoncent les résultats numériques, la température minimale atteinte dans la « petite » pièce passe de 14,84°C à 18,42°C.

4.5.3. ? - " . K * %+

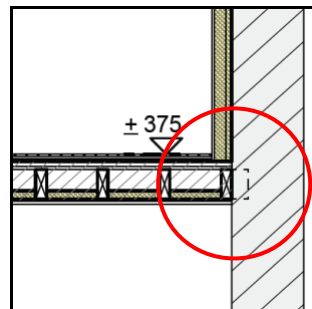


Fig. 190 : Illustration de l'emplacement du nœud constructif formé par l'intersection du mur isolé par l'intérieur et du plancher du R+1.

La rénovation du bâtiment prévoit la démolition quasi complète de l'annexe et sa reconstruction. Toutefois, un mur est conservé, et isolé par l'intérieur : le mur arrière. La similitude de ce nœud avec le point 4.3.2 est évidente. La composition du plancher est d'ailleurs identique, à cela près qu'aucun renfort d'isolation thermique n'a été ajouté à l'intérieur du plancher pour « contourner » la solive, alors que le mur de façade est un mur extérieur.

Notons également l'arrêt de l'isolation thermique au niveau du plancher séparant le rez-de-chaussée commercial (qui fait également partie du volume protégé) et le R+1. Ce plancher (mitoyen entre unités PEB) n'est donc pas une surface de déperdition ; l'isolation thermique du mur devrait logiquement se continuer à l'étage inférieur, ce qui constituerait la seule conformité possible à la PEB.

Pour les besoins de cette étude toutefois, nous imaginerons que ce plancher sépare l'ambiance intérieure d'un Espace Adjacent Non Chauffé (EANC), devenant ainsi une surface de déperdition dont la jonction avec le mur est à analyser. Remarquons qu'il est assez rare de trouver, en rénovation, un plancher léger qui remplisse un tel rôle ; les résultats de ce calcul sont à considérer en conséquence.

Analysons donc ce nœud dans Trisco pour en déduire les déperditions linéaires et les comparer au $\Psi_{e,lim}$ (0,05 W/mK pour un raccord de deux parois d'un même volume protégé). Afin de rester cohérent vis-à-vis de nos hypothèses, nous devons garantir la valeur U_{max} du plancher ; en plaçant un minimum de 8 cm de laine minérale entre les éléments de structure en bois, la valeur $U_{plancher} = 0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$:

Couches						Résistance superficielle int. Rsi = 0,17 [m²K/W]	
#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	Options	R [m²K/W]	...	
1	Simple	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - λU : 0.13	0.015		0,115	✘	
2	Simple	Knauf Brio + LM	-		0,23	✘	
3	Simple	Panneau d'OSB (Oriented Strand Board) (Bois et dérivés de bois) - λU : 0.13	0.022		0,169	✘	
4	Composée	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - λU : 0.18 Air non ventilé (Air)	0.1	⊙	0,244	✘	
5	Composée	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - λU : 0.18 Laine minérale (MW) - λU : 0.035	0.08	⊙ ⊕	1,366	✘	
6	Simple	Plaques de plâtre entre deux couches de carton (Matériaux hétérogènes)	≤ 0.014		0,05	✘	

Résistance thermique (surface à surface)	Rt = 2,17 [m²K/W]
Résistance superficielle int.	Rsi = 0,17 [m²K/W]
Résistance thermique totale	RT = 2,51 [m²K/W]
Valeur U indicative	U = 0,40 [W/m²K]

Fig. 191 : PEB : composition du plancher du R+1 (8 cm d'isolant)

Rappelons que les éléments qui ont déjà été pris en compte dans la composition de la paroi ne devraient pas être considérés comme nœuds constructifs : c'est ici le cas de la solive, dont l'influence est déjà fixée par la fraction de bois de la couche composée.

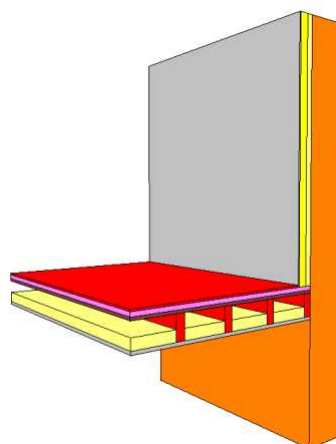


Fig. 192 : Trisco : vue 3D du nœud constructif formé par l'intersection du mur isolé par l'intérieur et du plancher du R+1

Le complexe Knauf Brio avec laine minérale, qui présente une résistance thermique de 0,23 m²K/W pour une épaisseur de 32 mm, est modélisé comme un matériau unique de même épaisseur avec une valeur $\lambda_{\text{équivalente}}$ de 0,14 W/mK.

Les résultats obtenus avec Trisco pour une différence de température de 20°C sont les suivants :

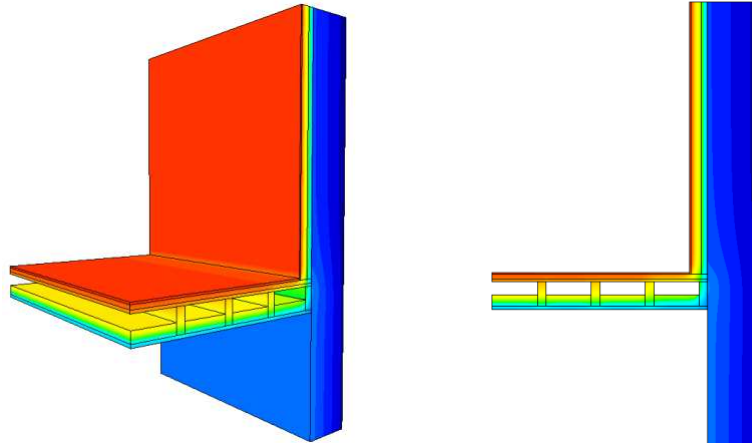


Fig. 193 : Trisco : résultats graphiques de la modélisation du nœud constructif formé par l'intersection du mur isolé par l'intérieur et du plancher du R+1

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	BC_SIMPL	interieur	17.66	36	40	30	19.28	36	40	35
2	MATERIAL	briques	0.23	20	31	70	2.63	30	24	24
3	MATERIAL	isolation seule	1.60	30	36	70	14.58	73	24	23
4	MATERIAL	bois	2.35	30	35	21	19.27	82	23	30
5	MATERIAL	plâtre	2.35	30	35	21	19.28	36	40	35
6	BC_FRE_S	interieur cave	2.28	30	31	0	4.71	71	23	20
7	MATERIAL	isolant + struc	7.71	32	38	29	19.05	35	40	35
8	BC_SIMPL	exterieur	0.23	20	31	70	0.33	20	0	20
9	MATERIAL	OSB	2.50	30	40	27	17.53	82	24	27
10	BC_FRE_S	cavité 1	7.39	33	7	23	13.79	46	24	25
11	BC_FRE_S	cavité 2	12.07	48	40	23	15.91	54	23	25
12	BC_FRE_S	cavité 3	13.00	60	40	23	16.28	66	23	25
13	BC_FRE_S	cavité 4	13.34	72	40	23	16.58	82	24	25
14	MATERIAL	Knauf Brio + LM	2.33	30	40	29	18.81	82	23	29

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
1	BC_SIMPL	interieur		44.52	0.00
6	BC_FRE_S	interieur cave	3.32	16.18	16.18
8	BC_SIMPL	exterieur		0.00	44.52
10	BC_FRE_S	cavité 1	11.50	6.52	6.52
11	BC_FRE_S	cavité 2	14.57	4.73	4.73
12	BC_FRE_S	cavité 3	15.07	4.46	4.46
13	BC_FRE_S	cavité 4	15.46	3.89	3.89

Fig. 194 : Trisco : résultats numériques de la modélisation du nœud constructif formé par l'intersection du mur isolé par l'intérieur et du plancher du R+1

Les flux traversant les cavités internes au plancher ne seront pas pris en compte. Nous avons donc au total 60,7 W quittant l'ambiance intérieure pour rejoindre les ambiances plus fraîches de la cave ou de l'extérieur. Les résultats nous indiquent aussi que la température résultante de la modélisation dans la cave est de 3,32°C, soit un ΔT entre l'intérieur et la cave de 16,68°C. Le plancher est donc responsable d'un flux $\phi_{\text{plancher}} = 0,4 \text{ [W/m}^2\text{K]} * 16,68 \text{ [}^\circ\text{C]} * (1,99 \text{ [m]} * 2 \text{ [m]}) = 26,55 \text{ W}$.

Nous devons également attribuer au mur la responsabilité du transfert d'un flux s'élevant à $\phi_{\text{mur}} = 0,275 \text{ [W/m}^2\text{K]} * 20 \text{ [}^\circ\text{C]} * (2,274 \text{ [m]} * 2 \text{ [m]}) = 25,014 \text{ W}$.

Restent donc 9,138 W de flux de chaleur, imputable au nœud constructif. Considérant une différence de température de 20°C, les déperditions s'élèvent à $\Psi_e = 0,23 \text{ W/mK}$.

À tous points de vue donc, ce nœud n'est pas conforme à la PEB. Au vu du détail ci-dessus (voir Fig. 192), comment pourrait-il l'être ? Les « vrais » isolants thermiques en présence sont loin de se rejoindre, et le pont thermique est ici flagrant.

$$/ 2 = 6 * 9$$

Imaginons maintenant une première solution théorique alternative, qui consisterait en un déplacement de la solive (celle qui court le long du mur et fait office d'élément isolant interposé) de 5 cm vers l'intérieur du bâtiment, pour permettre le passage de la couche d'isolation – rupteur thermique. Il serait probablement plus difficile de laisser passer également la structure métallique derrière la solive, ainsi que l'isolant qu'elle renferme, étant donné que cette structure est censée prendre appui sur le sol et le plafond (voir point 2.1).

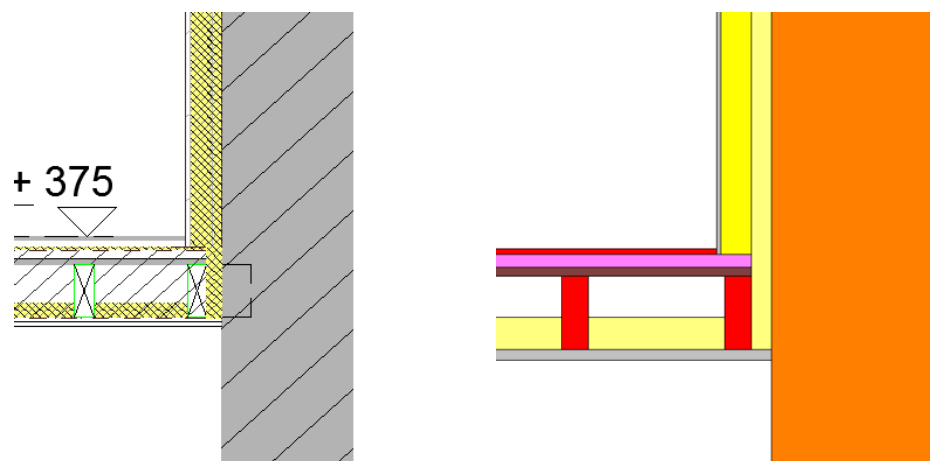


Fig. 195 : illustrations (en coupe) de la solution 1 proposée pour le nœud constructif formé par l'intersection du mur isolé par l'intérieur et du plancher du R+1

Dans ce cas, la solive seule interrompt la ligne de coupure thermique ; étant déjà prise en compte dans la composition du plancher dans la PEB, elle ne devrait pas être un obstacle à la conformité du nœud, que nous avons analysé avec Trisco pour en évaluer les déperditions (voir Fig. 196 pour les résultats graphiques et la Fig. 197 pour les résultats numériques).

On voit que par rapport à l'exercice précédent, le flux total n'a pas été amoindri, passant de 60,7 W à 60,81 W. Ceci peut s'expliquer par une légère augmentation de la surface de déperdition du plancher à cause de l'ajout des 5 cm d'isolation en rupture thermique. Sachant que le ΔT entre l'intérieur et l'extérieur est de 20°C, et que celui entre l'intérieur et la cave est de $20 - 3,49 = 16,51^\circ\text{C}$, voyons les flux attribuables aux deux parois de déperditions :

- $\phi_{mur} = 0,275 \text{ [W/m}^2\text{K]} * 20 \text{ [}^\circ\text{C]} * (2,274 \text{ [m]} * 2 \text{ [m]}) = 25,014 \text{ W}$
- $\phi_{plancher} = 0,4 \text{ [W/m}^2\text{K]} * 16,51 \text{ [}^\circ\text{C]} * (2,04 \text{ [m]} * 2 \text{ [m]}) = 26,94 \text{ W}$

Les déperditions linéaires du nœud sont donc égales à $\Psi_e = 0,22 \text{ W/mK}$ si l'on considère un ΔT de 20°C. Considérant les difficultés techniques et économiques amenées par une telle solution, le gain énergétique est très faible...

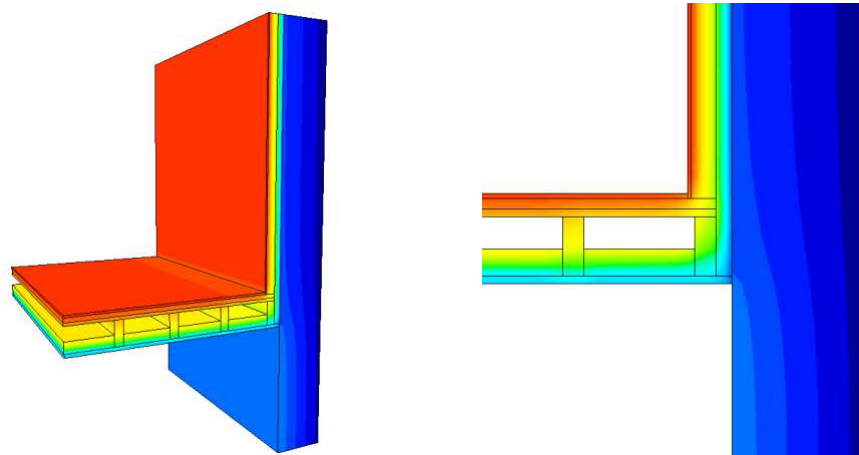


Fig. 197 : Trisco : résultats graphiques de la modélisation de la solution 1 proposée pour le nœud constructif formé par l'intersection du mur isolé par l'intérieur et du plancher du R+1

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	BC_SIMPL	interieur	18.06	36	0	28	19.28	82	0	28
2	MATERIAL	briques	0.23	20	5	68	2.39	30	0	0
3	MATERIAL	isolation seule	1.60	30	4	68	14.65	73	23	23
4	MATERIAL	bois	4.23	32	40	21	19.28	82	0	28
5	MATERIAL	plâtre	2.04	30	7	21	19.27	36	39	33
6	BC_FRE_S	interieur cave	2.17	30	3	20	4.87	71	24	20
7	MATERIAL	isolant + struc	9.60	32	22	29	19.05	35	39	33
8	BC_SIMPL	exterieur	0.23	20	5	68	0.34	20	0	0
9	MATERIAL	OSB	10.24	32	40	25	17.56	82	2	26
10	BC_FRE_S	cavité 1	10.44	34	40	23	15.23	45	23	25
11	BC_FRE_S	cavité 2	12.76	48	36	23	16.18	54	24	25
12	BC_FRE_S	cavité 3	13.16	60	40	23	16.35	65	23	25
13	BC_FRE_S	cavité 4	13.42	72	39	23	16.62	82	23	25
14	MATERIAL	Knauf Brio + LM	10.32	32	33	27	18.82	82	0	27

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
1	BC_SIMPL	interieur		43.02	0.00
6	BC_FRE_S	interieur cave	3.49	17.79	17.79
8	BC_SIMPL	exterieur		0.00	43.02
10	BC_FRE_S	cavité 1	13.66	5.09	5.09
11	BC_FRE_S	cavité 2	14.93	4.52	4.52
12	BC_FRE_S	cavité 3	15.16	4.39	4.39
13	BC_FRE_S	cavité 4	15.52	3.85	3.85

Fig. 198 : Trisco : résultats numériques de la modélisation de la solution 1 proposée pour le nœud constructif formé par l'intersection du mur isolé par l'intérieur et du plancher du R+1

/ 2 = 6

D'une manière générale, nous pouvons déjà conclure qu'il serait intéressant d'augmenter l'épaisseur d'isolant dans le plancher. Par exemple, quelle serait l'influence du remplissage de la cavité du plancher la plus proche du nœud constructif ici étudié ?

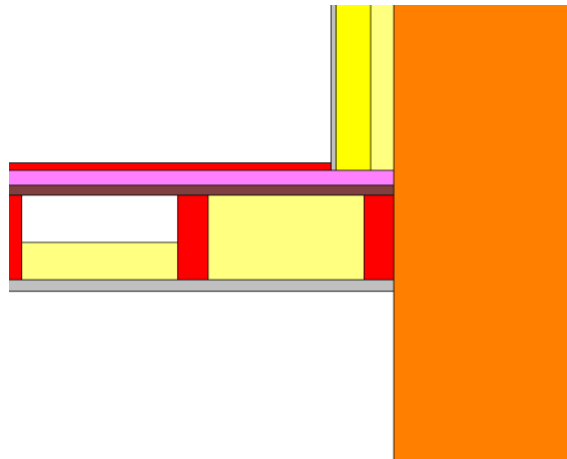


Fig. 199 : illustration (en coupe) de la solution 2 proposée pour le nœud constructif formé par l'intersection du mur isolé par l'intérieur et du plancher du R+1

Les résultats sont les suivants :

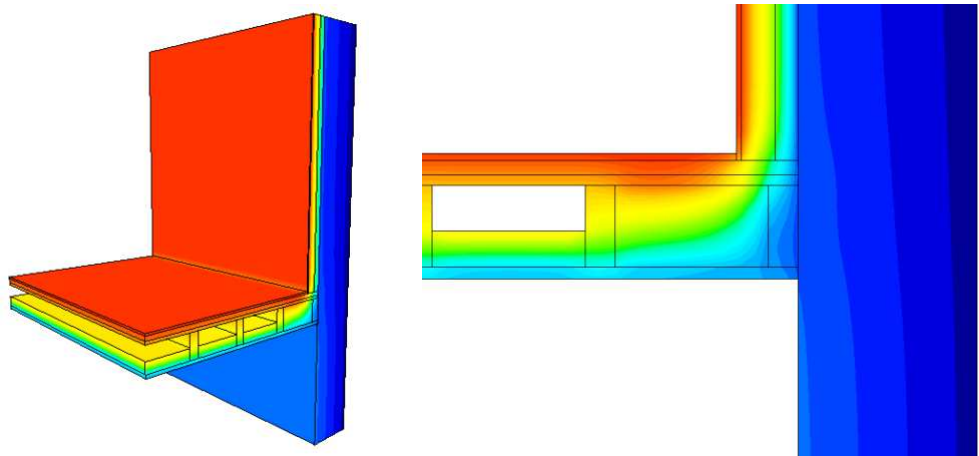


Fig. 200 : Trisco : résultats graphiques de la modélisation de la solution 2 proposée pour le nœud constructif formé par l'intersection du mur isolé par l'intérieur et du plancher du R+1

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	BC_SIMPL	interieur	17.65	36	0	29	19.47	43	38	29
2	MATERIAL	briques	0.23	20	40	69	2.14	30	39	0
3	MATERIAL	isolation seule	1.60	30	8	69	17.74	43	39	25
4	MATERIAL	bois	1.78	30	23	23	19.47	43	38	29
5	MATERIAL	plâtre	1.88	30	0	21	19.27	36	30	36
6	BC_FRE_S	interieur cave	1.98	30	0	20	4.53	71	0	20
7	MATERIAL	isolant + struc	6.50	32	7	28	19.04	35	30	36
8	BC_SIMPL	exterieur	0.23	20	40	69	0.30	20	0	0
9	MATERIAL	OSB	1.89	30	23	26	18.28	43	39	26
11	BC_FRE_S	cavité 2	12.42	48	0	23	16.13	52	4	25
12	BC_FRE_S	cavité 3	13.02	60	35	23	16.28	65	38	25
13	BC_FRE_S	cavité 4	13.28	72	35	23	16.55	82	38	25
14	MATERIAL	Knauf Brio + LM	1.83	30	23	28	19.13	43	7	28

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
1	BC_SIMPL	interieur		41.30	0.00
6	BC_FRE_S	interieur cave	3.12	16.04	16.03
8	BC_SIMPL	exterieur		0.00	41.30
11	BC_FRE_S	cavité 2	14.87	4.71	4.71
12	BC_FRE_S	cavité 3	15.06	4.48	4.48
13	BC_FRE_S	cavité 4	15.42	3.93	3.93

Fig. 201 : Trisco : résultats numériques de la modélisation de la solution 2 proposée pour le nœud constructif formé par l'intersection du mur isolé par l'intérieur et du plancher du R+1

Le flux total est ici de 57,33 W. Si nous ne considérons pas la seule cavité remplie d'isolant comme une autre paroi (avec son propre coefficient U et sa propre surface de déperdition), il y a 26,55 W qui traversent le-dit plancher et 25,014 W qui traversent le mur. Les déperditions thermiques linéaires du nœud constructif sont alors de $\Psi_e = 0,144 \text{ W/mK}$.

Si nous considérons que la cavité remplie d'isolant a des dimensions suffisantes pour être considérée comme une autre paroi, celle-ci est caractérisée par une valeur U de 0,23 W/m²K (et une surface de déperdition de 1,765 m²) au lieu de 0,4 W/m²K (toujours valable pour le reste de la surface du plancher, soit 2,315 m²). Le flux correspondant au plancher est donc de 22,48 W, et les déperditions linéaires $\Psi_e = 0,246 \text{ W/mK}$.

$$/ 2 = 6 *$$

Menons cette solution d'isolation jusqu'au bout, en remplissant toutes les cavités d'isolant thermique :

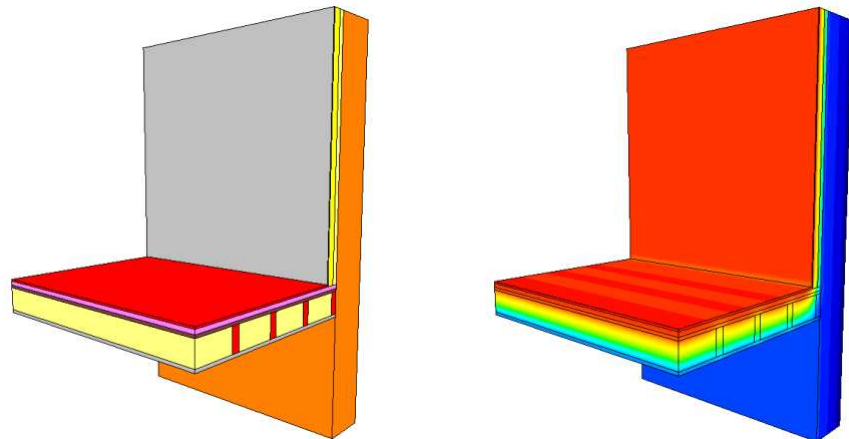


Fig. 202 : Trisco : vue 3D et résultats graphiques de la modélisation de la solution 3 proposée pour le nœud constructif formé par l'intersection du mur isolé par l'intérieur et du plancher du R+1

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	BC_SIMPL	interieur	17.62	36	40	29	19.61	82	37	29
2	MATERIAL	briques	0.22	20	37	18	1.74	30	26	26
3	MATERIAL	isolation seule	1.60	30	38	69	18.18	82	0	25
4	MATERIAL	bois	1.50	30	36	22	19.61	82	37	29
5	MATERIAL	plâtre	1.52	30	36	21	19.27	36	31	38
6	BC_FRE_S	interieur cave	1.56	30	37	20	3.33	71	40	20
7	MATERIAL	isolant + struc	6.37	32	0	28	19.04	35	31	38
8	BC_SIMPL	exterieur	0.22	20	37	18	0.23	20	6	30
9	MATERIAL	OSB	1.73	30	39	25	18.68	82	37	26
14	MATERIAL	Knauf Brio + LM	1.70	30	36	28	19.36	82	37	28

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
1	BC_SIMPL	interieur		36.92	0.00
6	BC_FRE_S	interieur cave	2.33	11.66	11.66
8	BC_SIMPL	exterieur		0.00	36.92

Fig. 203 : Trisco : résultats numériques de la modélisation de la solution 3 proposée pour le nœud constructif formé par l'intersection du mur isolé par l'intérieur et du plancher du R+1

Le flux global est de 48,58 W, desquels nous pouvons retirer 25,014 W pour

le mur et $0,23 \text{ [W/m}^2\text{K]} * (20 \text{ [}^\circ\text{C]} - 2,33 \text{ [}^\circ\text{C]}) * (1,99 \text{ [m]} * 2 \text{ [m]}) = 16,175 \text{ W}$ pour le plancher. Restent $7,39 \text{ W}$, soit une déperdition $\Psi_e = 0,185 \text{ W/mK}$. Au vu de la faible amélioration des résultats, nous pourrions penser, à l'instar du nœud analysé au point 4.4.2, qu'une isolation plus poussée de la paroi risque d'aggraver les déperditions au niveau du nœud constructif. N'oublions cependant pas qu'en termes de déperditions totales de l'enveloppe, il est préférable d'isoler le plancher complètement.

/ 2 / = / 6 1

Combinant les solutions 1 et 2, nous avons le modèle et les résultats suivants :

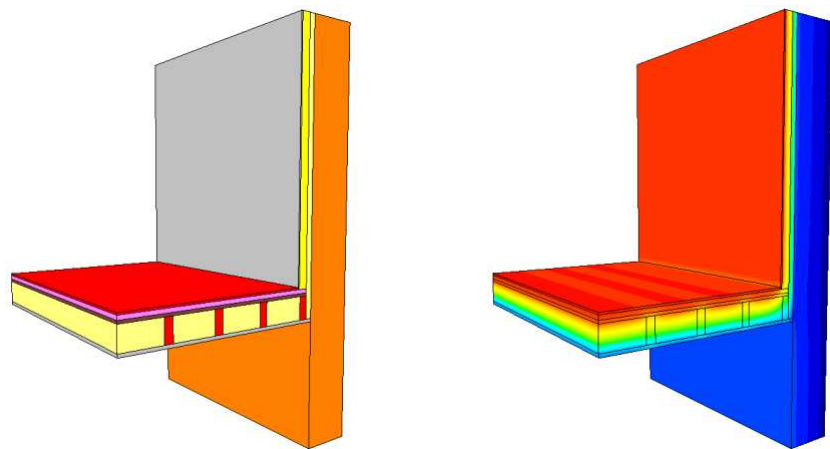


Fig. 204 : Trisco : vue 3D et résultats graphiques de la modélisation de la solution 4 proposée pour le nœud constructif formé par l'intersection du mur isolé par l'intérieur et du plancher du R+1

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
1	BC_SIMPL	interieur	17.85	36	38	29	19.62	82	38	29
2	MATERIAL	briques	0.21	20	25	25	1.68	30	5	0
3	MATERIAL	isolation seule	1.39	30	21	23	18.19	82	38	25
4	MATERIAL	bois	2.84	32	40	21	19.62	82	38	29
5	MATERIAL	plâtre	1.49	30	26	21	19.27	36	18	68
6	BC_FRE_S	interieur cave	1.57	30	0	20	3.45	71	0	20
7	MATERIAL	isolant + struc	8.96	32	0	29	19.04	35	0	68
8	BC_SIMPL	exterieur	0.21	20	25	25	0.24	20	40	0
9	MATERIAL	OSB	8.42	32	0	25	18.69	82	38	26
14	MATERIAL	Knauf Brio + LM	8.99	32	0	26	19.37	82	38	28

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
1	BC_SIMPL	interieur		36.87	0.00
6	BC_FRE_S	interieur cave	2.45	12.37	12.37
8	BC_SIMPL	exterieur		0.00	36.87

Fig. 205 : Trisco : résultats numériques de la modélisation de la solution 4 proposée pour le nœud constructif formé par l'intersection du mur isolé par l'intérieur et du plancher du R+1

- $\Phi_{\text{total}} = 49,24 \text{ W}$
- $\Phi_{\text{mur}} = 25,014 \text{ W}$
- $\Phi_{\text{plancher}} = 0,23 \text{ [W]} * 17,55 \text{ [}^\circ\text{C]} * (2,04 \text{ [m]} * 2 \text{ [m]}) = 16,47 \text{ W}$
 - $\Delta T = 20 \text{ [}^\circ\text{C, intérieur]} - 2,45 \text{ [}^\circ\text{C, cave]} = 17,55 \text{ }^\circ\text{C}$

- $\rightarrow \phi_{NC} = 49,24 \text{ W} - 25,014 \text{ W} - 16,47 \text{ W} = 7,756 \text{ W}$
- $\rightarrow \Psi_e = 0,194 \text{ W/mK}$.

4.6.) 0 !

Cette partie du rapport est consacrée au dernier niveau du bâtiment. Le projet prévoit le démontage de l'ancienne toiture, la surélévation du R+3 par de nouvelles parois légères (voir leur étude au point 2.4) et la pose d'une nouvelle toiture (voir le point 2.2).

Les maçonneries existantes seront conservées sur toute leur hauteur actuelle ; une lisse basse sera placée sur ces maçonneries et servira de base à la structure en bois des parois d'élévation. Ces deux types de paroi n'ont pas la même épaisseur (54 cm à peu près pour la maçonnerie isolée, 30 cm pour la nouvelle paroi) ; l'alignement de ces parois l'une par rapport à l'autre risque donc de jouer un rôle important dans la performance thermique de l'enveloppe, puisque cela implique un alignement des isolants thermiques ou la nécessité de prévoir une solution d'isolation si cet alignement n'existe pas, comme nous le verrons plus bas.

Cette situation nous impose, pour éviter la multiplication des calculs numériques, une autre décision quant à l'analyse des nœuds constructifs ainsi créés : la prise en compte, ou non, des lisses basses courant le long de la maçonnerie, à la jonction des murs ancien et nouveau, empêchant le contact direct des couches d'isolant présentes. Entraînent-elles d'office le (non) respect de la première règle de conformité ? Ou sont-elles incluses dans la couche d'isolation (auquel cas elles ne sont pas à considérer comme un élément interposé isolant) ? Les textes réglementaires qui définissent les méthodes d'analyse des nœuds constructifs dans la PEB disent en substance ceci :

« les interruptions de forme linéaire ou ponctuelle qui sont propres à une paroi et qui sont réparties sur sa surface, ne sont pas considérées comme des nœuds constructifs dans la réglementation PEB. Leur influence doit en effet être prise en compte dans la résistance thermique totale R_T ou le coefficient de transmission thermique U de la paroi considérée [...] ».

Un exemple donné concerne les « montants et traverses en bois dans des murs à ossature bois, chevrons et rives dans les toitures à versants, etc. ».

Outre l'analyse des conditions de conformité à la PEB des différentes configurations de nœuds constructifs, l'objectif de cette étude est aussi de mettre une valeur sur les déperditions thermiques qui y sont liées. Or ces deux objectifs peuvent être impactés de manière non négligeable par la présence de cet élément de bois.

4.6.1. L? *A

La première partie de cette étude consiste donc à tenter de trouver la meilleure (et plus réaliste) méthode de prise en compte de ces éléments dans notre analyse des nœuds constructifs. Nous allons donc analyser les déperditions d'un même nœud dans 3 configurations différentes :

- la première implique la réalisation d'un modèle détaillé de comparaison : la structure en bois et l'isolant seront décrits séparément et complètement, nous permettant ainsi d'avoir un point de comparaison réaliste.
- La deuxième configuration nous verra inclure tous les éléments de la

structure (y compris la lisse basse) dans une couche fictive composée à 85% de bois et à 15% d'isolant (soit la valeur par défaut de la fraction de bois dans la PEB). La valeur $\lambda_{\text{équivalente}}$ de cette couche composée fictive est alors de $[0,85 * 0,035 + 0,15 * 0,18 =] 0,057 \text{ W/mK}$.

- Enfin, la troisième configuration inclut également une couche fictive composée de 15% de bois et 85% d'isolant ($\lambda_{\text{équivalent}} = 0,057 \text{ W/mK}$), mais la lisse basse sera considérée comme un « élément isolant interposé » et modélisée dans Trisco, avec sa valeur λ de $0,18 \text{ W/mK}$.

Dans les trois cas, le coefficient de transmission thermique du mur de maçonnerie isolé par l'intérieur sera égal à $0,275 \text{ W/m}^2\text{K}$ (voir point 2.1).

/ (L? *A D

Il s'agit d'abord de modéliser la paroi de la façon la plus réaliste possible. Les architectes renseignent un entraxe des éléments structurels de l'ordre de $0,4 \text{ m}$; pour coller à l'hypothèse d'une fraction de bois de 15%, nous ajusterons cet entraxe ($0,433 \text{ cm}$), et nous considérerons le même pour les chevrons qui servent à la structure du bardage. Une lisse basse sera considérée pour les deux couches :

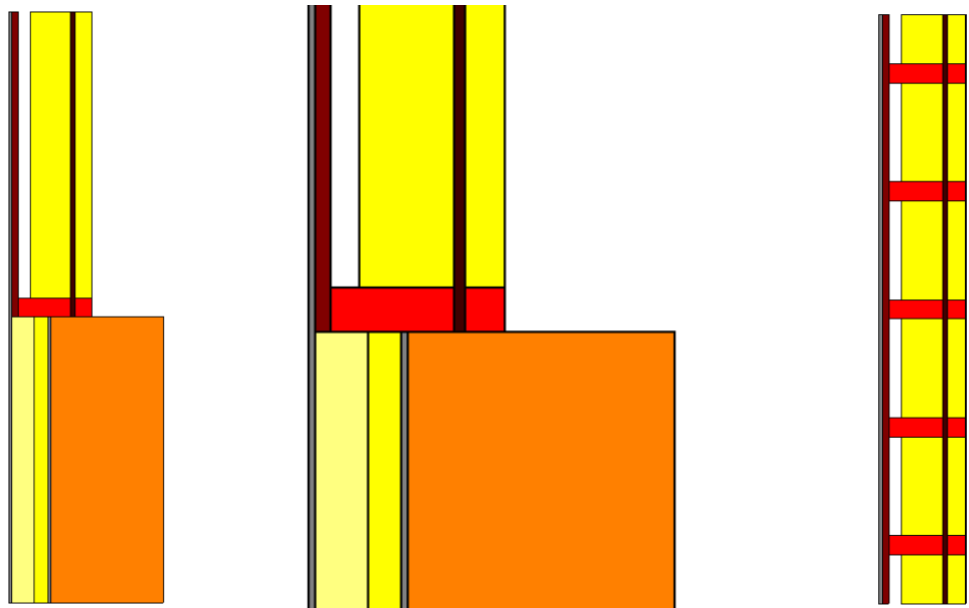


Fig. 206 : coupe et plan dans les modèles 3D de Trisco pour l'hypothèse A de la lisse

Pour une différence de température de 20°C , les résultats graphiques et numériques sont donnés ci-dessous (Fig. 207 et 208). Les deux parois, selon la PEB, sont responsables du passage des flux suivants :

- $\phi_{\text{mur,inf}} = 0,275 \text{ [W/m}^2\text{K]} * 20 \text{ [}^\circ\text{C]} * 2,17 \text{ [m}^2\text{]} = 11,935 \text{ W}$
- $\phi_{\text{mur,sup}} = 0,225 \text{ [W/m}^2\text{K]} * 20 \text{ [}^\circ\text{C]} * 2,31 \text{ [m}^2\text{]} = 10,395 \text{ W}$

D'après les résultats ci-dessus, le nœud constructif est donc responsable du passage d'un flux de $2,65 \text{ W}$, soit une déperdition $\Psi_e = 0,066 \text{ W/mK}$, légèrement supérieure au $\Psi_{e,\text{lim}}$ de $0,05 \text{ W/mK}$ fixé par les textes.

La température minimale atteinte à la surface intérieure du mur est de 18,73°C.

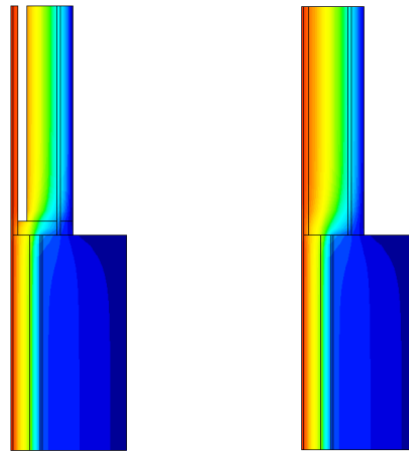


Fig. 207 : Trisco : résultats graphiques de la modélisation de l’hypothèse A de la lisse

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
2	BC_FRE_S	cavité mur 1	14.28	24	5	22	18.50	22	0	35
3	MATERIAL	fibres de bois	1.52	31	36	20	6.30	30	54	42
4	MATERIAL	briques	0.05	39	60	20	2.90	28	54	20
5	MATERIAL	acier	0.10	34	0	24	0.63	33	54	20
6	BC_SIMPL	interieur	18.73	20	6	21	19.38	20	60	42
7	MATERIAL	isolant seul	0.10	33	0	24	16.99	24	56	41
8	MATERIAL	plâtre	1.60	28	0	8	19.38	20	60	42
9	BC_SIMPL	exterieur	0.05	39	60	20	0.63	34	54	20
10	MATERIAL	OSB	16.30	22	6	20	19.30	21	60	42
11	MATERIAL	bois de structu	0.22	33	0	22	18.11	22	43	41
12	BC_FRE_S	cavité 2	14.28	24	17	22	18.50	22	12	42
13	BC_FRE_S	cavité 3	14.28	24	29	22	18.50	22	24	36
14	BC_FRE_S	cavité 4	14.27	24	31	22	18.50	22	36	42
15	BC_FRE_S	cavité 5	14.28	24	53	22	18.50	22	48	34
16	BC_FRE_S	cavité 6	14.28	24	55	22	18.50	22	60	41
23	MATERIAL	isolant + struc	9.75	25	60	7	19.18	21	60	17

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
2	BC_FRE_S	cavité mur 1	17.55	0.83	0.83
6	BC_SIMPL	interieur		24.98	0.00
9	BC_SIMPL	exterieur		0.00	24.98
12	BC_FRE_S	cavité 2	17.55	1.66	1.66
13	BC_FRE_S	cavité 3	17.55	1.66	1.66
14	BC_FRE_S	cavité 4	17.55	1.66	1.66
15	BC_FRE_S	cavité 5	17.55	1.66	1.66
16	BC_FRE_S	cavité 6	17.55	0.83	0.83

Fig. 208 : Trisco : résultats numériques de la modélisation de l’hypothèse A de la lisse

/ (L? *A ;

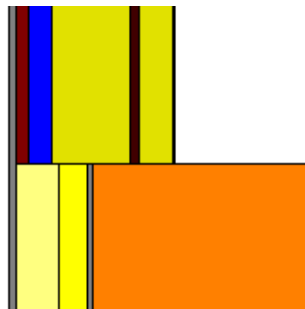


Fig. 209 : coupe dans le modèles 3D de Trisco pour l’hypothèse B de la lisse

Nous allons ici remplacer toutes les couches composées par des matériaux fictifs avec valeurs λ équivalentes. Les lisses ne seront pas modélisées. Les résultats sont les suivants :

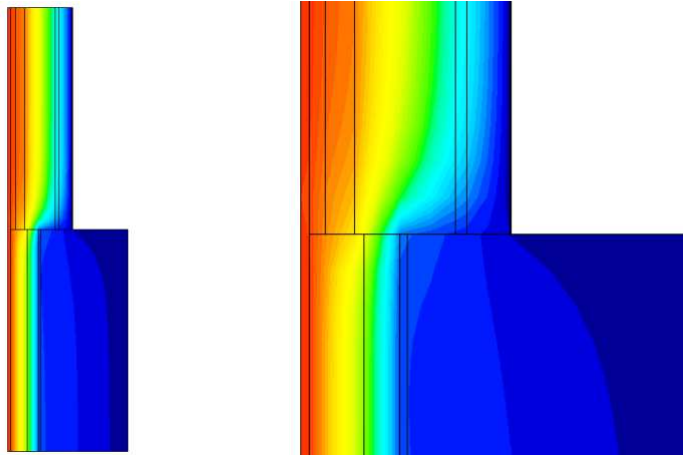


Fig. 210 : Trisco : résultats graphiques de la modélisation de l'hypothèse B de la lisse

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
2	MATERIAL	air + bois	14.77	24	0	20	18.50	22	40	40
3	MATERIAL	fibres de bois	1.20	31	40	20	6.01	30	27	40
4	MATERIAL	briques	0.05	39	40	20	2.08	28	0	20
5	MATERIAL	acier	0.16	34	40	22	0.48	33	0	20
6	BC_SIMPL	interieur	19.01	20	40	21	19.39	20	0	40
7	MATERIAL	isolant seul	1.59	27	39	15	12.57	25	26	20
8	MATERIAL	plâtre	1.51	28	40	15	19.39	20	0	40
9	BC_SIMPL	exterieur	0.05	39	40	20	0.48	34	1	20
10	MATERIAL	OSB	17.16	22	0	20	19.30	21	40	40
23	MATERIAL	isolant + struc	9.71	25	36	14	19.20	21	0	19
31	MATERIAL	bois + isolant	0.16	33	40	22	17.63	24	40	40

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
6	BC_SIMPL	interieur		21.73	0.00
9	BC_SIMPL	exterieur		0.00	21.73

Fig. 211 : Trisco : résultats numériques de la modélisation de l'hypothèse B de la lisse

Le flux $\phi_{\text{total}} = 21,73 \text{ W}$ se partage entre :

- $\phi_{\text{mur, sup}} = 0,225 \text{ [W/m}^2\text{K]} * 20 \text{ [}^\circ\text{C]} * 2 \text{ [m}^2\text{]} = 9 \text{ W}$ pour le mur supérieur
- $\phi_{\text{mur, inf}} = 0,275 \text{ [W/m}^2\text{K]} * 20 \text{ [}^\circ\text{C]} * 2 \text{ [m}^2\text{]} = 11 \text{ W}$ pour le mur inférieur
- $\rightarrow \phi_{\text{NC}} = 1,73 \text{ W}$ pour le « nœud », soit une déperdition linéaire de $\Psi_e = 0,043 \text{ W/mK}$, inférieure à la déperdition calculée dans le cas « réel ». Pour rappel, la valeur limite est de $0,05 \text{ W/mK}$ pour un raccord de deux parois d'un même volume.

Remarquons que la température surfacique minimale atteinte à l'intérieur est de $19,01^\circ\text{C}$.

/ (L? *A 8

Les couches composées sont ici encore encodées comme des couches fictives avec une valeur λ équivalente, mais la lisse sera prise en compte en

tant qu'« élément isolant interposé » :

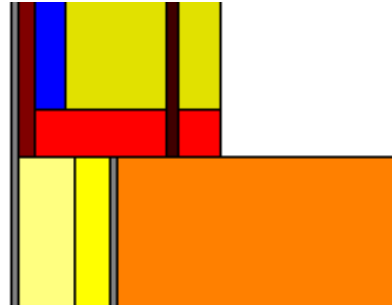


Fig. 212 : coupe dans le modèles 3D de Trisco pour l'hypothèse C de la lisse

La présence d'un élément de ce type impose le respect des trois conditions suivantes pour la conformité à la PEB :

- $\lambda \leq 0,2 \text{ W/mK}$: nous avons pris la valeur λ par défaut proposée par l'annexe 7 de l'AGW du 17/04/2008 pour les « bois de charpente en feuillus durs et résineux », soit $0,18 \text{ W/mK}$;
- $R \geq \min (R_1/2, R_2/2, 2)$
 - $R =$ résistance qu'oppose la pièce de bois au transfert de chaleur (son épaisseur est calculée perpendiculairement à la ligne de coupure thermique) = $0,18 \text{ [m]} / 0,18 \text{ [W/mK]} + 0,016 \text{ [m]} / 0,09 \text{ [W/mK]} + 0,06 \text{ [m]} / 0,18 \text{ [W/mK]} = 1,51 \text{ m}^2\text{K/W}$

Nous avons ici compté l'ensemble des couches adjacentes qui constituent la couche d'isolation de la paroi, conformément aux textes réglementaires :

« Dans certains cas, il est permis d'« additionner » l'influence de différents éléments isolants. Les épaisseurs et les résistances thermiques des différents éléments isolants peuvent être additionnées dans une direction perpendiculaire à la ligne de coupure thermique si chacun des éléments isolant a une valeur $\lambda \leq 0.2 \text{ W/mK}$ ET qu'il n'y a aucune couche d'air entre eux. Cela permet de considérer les différents éléments isolants comme un élément isolant 'homogène' avec une épaisseur d égale à la somme des épaisseurs d_i de chacun des éléments isolants et la résistance thermique R égale à la somme des résistances thermiques R_i de chacun des éléments isolants. »

- $R_1 =$ résistance de la 1^e couche d'isolant (par exemple pour le mur en maçonnerie)
 $= 1,5625 \text{ [m}^2\text{K/W]} + 1,6118 \text{ [m}^2\text{K/W]} = 3,1743 \text{ m}^2\text{K/W}$ si l'on tient compte de la structure en acier via les conclusions tirées grâce aux modélisations sur Trisco (voir point 2.1) ;
- $R_2 =$ résistance de la 2^e couche d'isolant (ici, la nouvelle paroi)
 $= 2,583 \text{ [m}^2\text{K/W]} + 0,178 \text{ [m}^2\text{K/W]} + 1,107 \text{ [m}^2\text{K/W]} = 3,868 \text{ m}^2\text{K/W}$ si l'on tient compte d'une fraction de bois de 15% pour la structure (voir point 2.5).

- → La résistance des pièces de bois interposées ($1,51 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$) doit être supérieure ou égale à la moitié de la plus petite des résistances calculées ci-dessus. Dans les hypothèses de calcul considérées, la règle 2 n'est pas respectée à quelques milliwatts près : $R_1/2 = 1,587 \text{ m}^2\text{K}/\text{W} > 1,51 \text{ m}^2\text{K}/\text{W} = R$. La conformité à la PEB n'est donc pas établie, si l'on considère cette hypothèse.
- La dernière condition de respect de la 2^e règle de conformité demande que l'épaisseur de contact entre l'élément interposé et les isolants adjacents $d_{\text{contact},i} \geq \min(d_{\text{insulating part}}/2, d_x/2)$; par exemple :

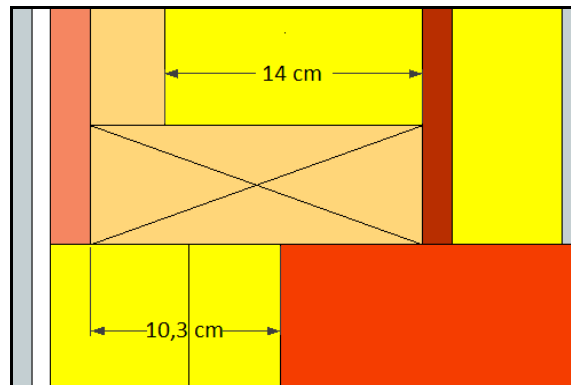


Fig.213 : illustration de l'exigence de contact dans l'évaluation de la conformité de l'hypothèse C de la lisse

- Pour le contact entre l'isolant intérieur du mur en maçonnerie et la pièce de bois :
 - $d_{\text{insulating part}} = 0,125 \text{ m}$
 - $d_x = 0,18 \text{ m}$
 - $d_{\text{contact}} = 0,103 \text{ m}$
 - → la condition est respectée pour ce contact
- Pour le contact entre l'isolant de la nouvelle paroi et la pièce de bois :
 - $d_{\text{insulating part}} = 0,14 \text{ m}$
 - $d_x = 0,18 \text{ m}$
 - $d_{\text{contact}} = 0,14 \text{ m}$
 - → la condition est également respectée pour ce contact.

Si l'on distingue les lisses basses des autres éléments de structure dans l'analyse du nœud constructif, la conformité pourrait ne pas être établie, en tout cas dans la configuration actuelle. Leur distinction impose également de les modéliser dans Trisco pour l'évaluation numérique des déperditions :

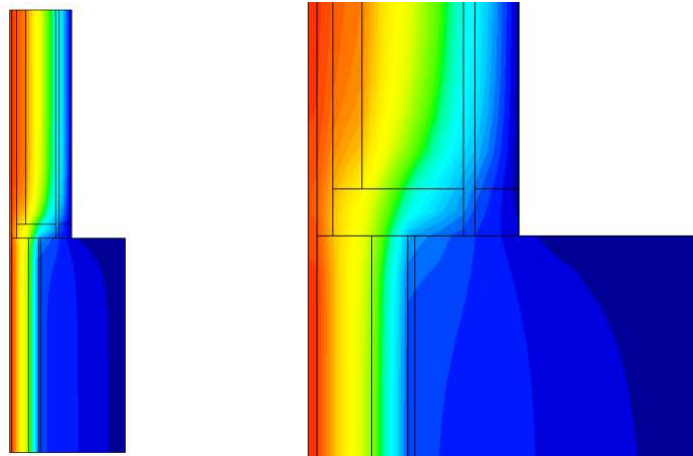


Fig. 214 : Trisco : résultats graphiques de la modélisation de l'hypothèse C de la lisse

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
2	MATERIAL	air + bois	13.85	24	1	22	18.50	22	0	42
3	MATERIAL	fibres de bois	1.51	31	40	20	6.01	30	39	42
4	MATERIAL	briques	0.05	39	40	20	2.80	28	16	20
5	MATERIAL	acier	0.16	34	34	24	0.61	33	4	20
6	BC_SIMPL	interieur	18.56	20	0	21	19.39	20	40	42
7	MATERIAL	isolant seul	1.68	27	40	9	10.72	25	15	20
8	MATERIAL	plâtre	1.60	28	40	9	19.39	20	40	42
9	BC_SIMPL	exterieur	0.05	39	40	20	0.61	34	13	20
10	MATERIAL	OSB	16.05	22	0	21	19.30	21	0	42
11	MATERIAL	bois de structu	0.24	33	35	22	16.39	22	40	22
23	MATERIAL	isolant + struc	9.75	25	33	9	19.17	21	2	16
31	MATERIAL	bois + isolant	0.16	33	34	24	17.63	24	0	42
Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]					
6	BC_SIMPL	interieur		23.67	0.00					
9	BC_SIMPL	exterieur		0.00	23.67					

Fig. 215 : Trisco : résultats numériques de la modélisation de l'hypothèse C de la lisse

De ce $\phi_{\text{total}} = 23,67 \text{ W}$, nous pouvons déduire les flux dûs aux deux parois :

- $\phi_{\text{mur,inf}} = 0,275 \text{ [W/m}^2\text{K]} * 20 \text{ [}^\circ\text{C]} * 2 \text{ [m}^2\text{]} = 11 \text{ W}$
- $\phi_{\text{mur,sup}} = 0,225 \text{ [W/m}^2\text{K]} * 20 \text{ [}^\circ\text{C]} * 2,13 \text{ [m}^2\text{]} = 9,585 \text{ W}$

Restent donc 3,085 W dû au nœud constructif, ou $\Psi_e = 0,077 \text{ W/mK}$, légèrement supérieures au $\Psi_{e,\text{lim}}$ et à la valeur de comparaison qui était de 0,06 W/mK.

La température surfacique intérieure minimale est de 18,56°C.

Il est très difficile de tirer une conclusion claire des résultats ci-dessus, puisqu'ils « se tiennent dans un mouchoir de poche ». L'hypothèse d'un modèle complet, qui sert de point de comparaison, nous délivre des résultats qui se situent entre ceux des deux autres hypothèses, nous empêchant de trancher quant à une éventuelle convention applicable dans de pareils cas de figures.

Étant donné que ces lisses sont des éléments que nous avons supposé exister, nous allons donc, dans la suite des modélisations, considérer ces éventuelles lisses basses comme étant incluses dans la composition PEB des parois, et ne pas les modéliser en surplus (comme proposé par les textes réglementaires). Les déperditions résultantes seront, en conséquence, légèrement sous-estimés.

Nous allons maintenant analyser l'impact de la position relative des nouvelles parois légères par rapport aux maçonneries sous-jacentes.

4.6.2.

Il existe deux possibilités (plus une alternative), illustrées par les trois images de la Fig. 216 ci-dessous :

- Alignement intérieur :
 - La continuité visuelle est assurée depuis l'intérieur. À l'extérieur, la différence d'épaisseur pourrait être cachée par les corniches.
 - La position relative des isolants permet une facile continuité.
- Alignement extérieur :
 - La continuité visuelle est assurée depuis l'extérieur; du côté intérieur, une « allège » est créée sur toute la longueur du mur.
 - Le contact direct des isolants est impossible, à moins qu'un isolant thermique ne soit rapporté sur l'allège pour assurer cette jonction.

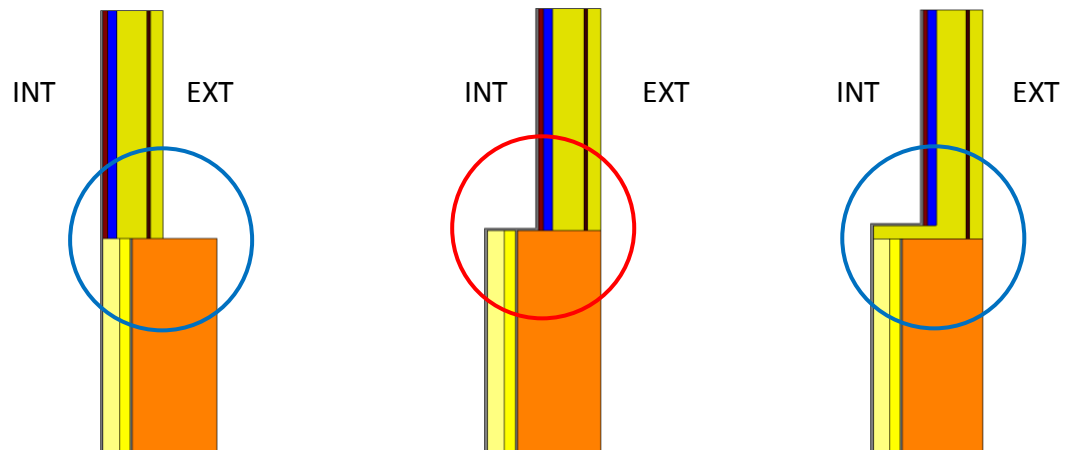


Fig. 216 : Trisco : coupe dans les modèles pour illustrer les hypothèses de position relative

/ (D &

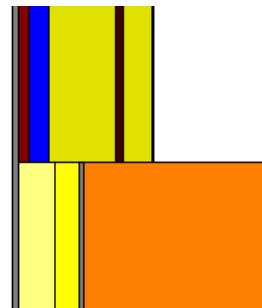


Fig. 217 : Trisco : coupe dans le modèle pour illustrer l'hypothèse d'alignement intérieur

Dans l'hypothèse où la panne sablière a déjà été prise en compte dans la résistance totale, celle-ci ne constitue plus vraiment un élément interposé isolant mais est englobée dans la couche « isolant thermique + structure bois ». Nous avons donc un contact direct entre les couches isolantes, et la

seule règle de conformité dans ce cas est celle de l'épaisseur de contact minimale entre les couches d'isolant : celle-ci doit être au moins égale à la moitié de la plus petite épaisseur d'isolant en contact.

La définition d'une « couche isolante » selon les textes réglementaires (voir point 3.7.1) nous permet de considérer que celle du nouveau mur léger est composée de la couche « isolant + structure » de 14 cm, du panneau de fibre de bois de 1,6 cm et de la couche « isolant + structure pour bardage » extérieure de 6 cm, soit 21,6 cm au total.

La « couche isolante » du mur isolé par l'intérieur a une épaisseur totale de 12,5 cm, soit l'épaisseur minimale en présence.

Le contact entre les deux couches est, dans notre calcul numérique, de 6,3 cm, très légèrement supérieur au $(12,5/2 =) 6,25$ cm minimaux requis. Théoriquement, s'il est mis en œuvre de cette manière, ce nœud est donc conforme à la PEB.

Les résultats du calcul numérique ont été exposés au point 4.6.1.2 ci-dessus (hypothèse B), nous permettant de déterminer une déperdition supplémentaire de 0,043 W/mK et une température surfacique minimale atteinte à l'intérieur de 19,01°C.

/ (D & "

Premier cas de figure

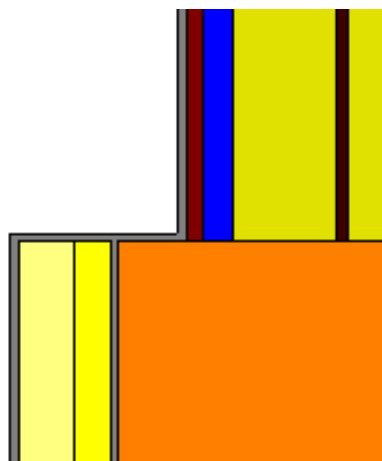


Fig. 218 : Trisco : coupe dans le modèle pour illustrer l'hypothèse d'alignement extérieur, premier cas de figure

La Fig. 218 ci-dessus parle d'elle-même :

- Aucun contact entre les couches isolantes des deux types de paroi.
- Le « matériau isolant interposé » est constitué de briques uniquement, ce qui a déjà été analysé plus haut ; un mur de maçonnerie ne constitue pas un matériau isolant au sens de la PEB.
- La longueur du chemin de moindre résistance est égale à l'épaisseur du mur supérieur, soit moins de 30 cm.

Nous allons numériser le calcul pour connaître la valeur des déperditions

engendrées. En voici les résultats :

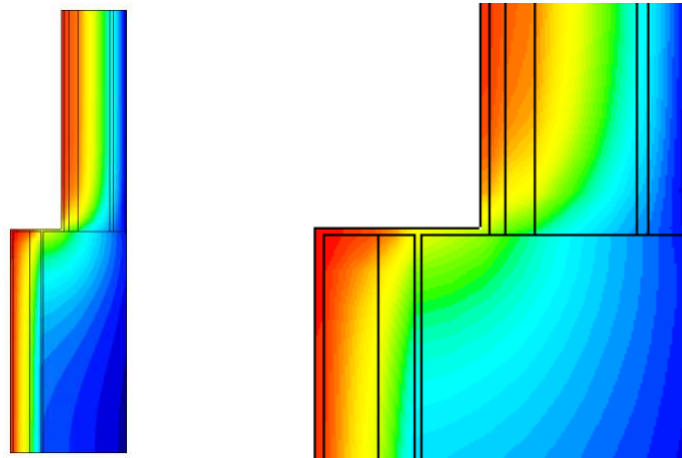


Fig. 219 : Trisco : résultats graphiques de la modélisation de l'hypothèse d'alignement extérieur, premier cas de figure

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
2	MATERIAL	air + bois	6.75	32	16	20	18.50	30	38	41
3	MATERIAL	fibres de bois	2.32	37	16	20	6.01	36	31	41
4	MATERIAL	briques	0.32	40	1	0	12.06	26	0	20
5	MATERIAL	acier	0.16	40	1	24	0.78	39	1	20
6	BC_SIMPL	interieur	11.43	28	40	21	19.83	20	39	21
7	MATERIAL	isolant seul	2.02	25	0	0	18.30	23	1	20
8	MATERIAL	plâtre	1.94	26	0	0	19.83	20	39	21
9	BC_SIMPL	exterieur	0.16	40	1	24	1.12	40	2	18
10	MATERIAL	OSB	8.35	30	19	20	19.30	29	0	41
23	MATERIAL	isolant + struc	9.95	23	0	0	19.79	21	0	20
31	MATERIAL	bois + isolant	0.16	39	1	24	17.62	32	39	41

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
6	BC_SIMPL	interieur		40.70	0.00
9	BC_SIMPL	exterieur		0.00	40.70

Fig. 220 : Trisco : résultats numériques de la modélisation de l'hypothèse d'alignement extérieur, premier cas de figure

Ces 40,7 W totaux se répartissent en :

- $\phi_{\text{mur,sup}} = 0,225 \text{ [W/m}^2\text{K]} * 20 \text{ [}^\circ\text{C]} * 2 \text{ [m}^2\text{]} = 9 \text{ W}$ pour le mur supérieur
- $\phi_{\text{mur,inf}} = 0,275 \text{ [W/m}^2\text{K]} * 20 \text{ [}^\circ\text{C]} * 2 \text{ [m}^2\text{]} = 11 \text{ W}$ pour le mur inférieur
- $\phi_{\text{NC}} = 20,7 \text{ W}$, soit une déperdition $\Psi_e = 0,52 \text{ W/mK}$. Le nœud est clairement non conforme.

Un problème tout aussi sérieux se pose dans la température constatée le long de l'arête constituée par la jonction de l'allège ainsi créée avec le mur supérieur : 11,43°C. Le facteur de température est dans ce cas inférieur à 0,7, ce qui implique un risque non négligeable de condensation.

Deuxième cas de figure

La deuxième version du nœud constructif est plus complexe, parce qu'il s'agit ici de deux nœuds en un. Nous avons rajouté, pour « résoudre » la version précédente d'un nœud clairement non conforme, un isolant en

allège, placé entre des éléments de structure en bois. Celui-ci rejoint la panne sablière en base du nouveau mur léger, créant ainsi deux nœuds constructifs (voir Fig. 221 ci-dessous), regroupés en un seul pour le calcul.

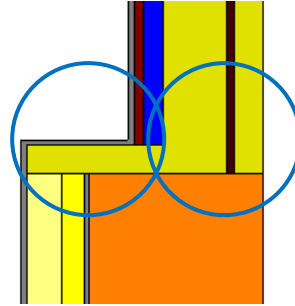


Fig. 221 : Trisco : coupe dans le modèle pour illustrer l'hypothèse d'alignement extérieur, deuxième cas de figure

Partant du postulat que les éléments de bois sont intégrés aux couches d'isolation et ne constituent pas d'éléments isolants interposés, la solution est simple : le nœud est déclaré conforme par respect de la première règle de conformité, la continuité de la couche d'isolation thermique, avec un contact conforme et suffisant entre les couches.

Il sera difficile de séparer les deux nœuds étudiés dans ce cas, nous évaluerons donc la totalité dans les résultats ci-dessous :

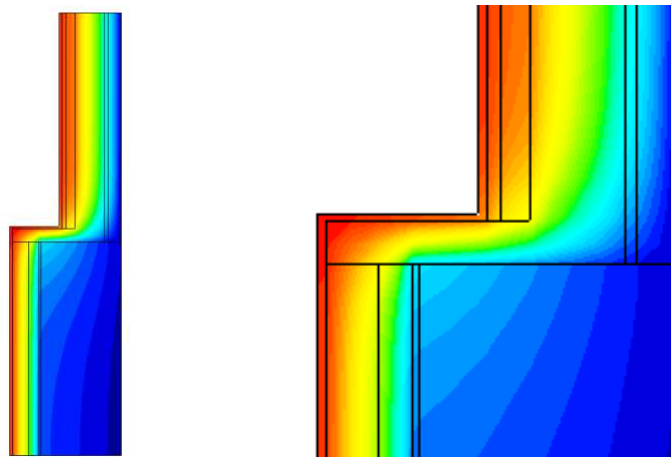


Fig. 222 : Trisco : résultats graphiques de la modélisation de l'hypothèse d'alignement extérieur, deuxième cas de figure

Du $\phi_{\text{total}} = 26,44 \text{ W}$, retirant les 11 W traversant le mur inférieur et les $(0,225 \text{ [W/m}^2\text{K]} * 20 \text{ [}^\circ\text{C]} * 2,15 \text{ [m}^2\text{]} =) 9,675 \text{ W}$ traversant le mur supérieur, il reste $5,765 \text{ W}$ imputables au nœud constructif, soit une déperdition de $\Psi_e = 0,144 \text{ W/mK}$.

La température le long de l'arête est remontée à $17,6^\circ\text{C}$, éloignant le risque de condensation superficielle. Le facteur de température est ici de $0,88$.



Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
2	MATERIAL	air + bois	12.40	32	40	22	18.50	30	0	43
3	MATERIAL	fibres de bois	1.03	37	26	20	6.01	36	0	43
4	MATERIAL	briques	0.25	40	1	0	4.22	26	0	20
5	MATERIAL	acier	0.14	40	40	23	0.35	39	0	20
6	BC_SIMPL	interieur	17.60	28	39	23	19.84	20	40	23
7	MATERIAL	isolant seul	1.73	25	0	0	13.72	23	4	20
8	MATERIAL	plâtre	1.65	26	0	0	19.84	20	40	23
9	BC_SIMPL	exterieur	0.14	40	40	23	0.49	40	1	19
10	MATERIAL	OSB	14.70	30	25	22	19.30	29	0	43
23	MATERIAL	isolant + struc	9.78	23	1	0	19.53	21	35	20
31	MATERIAL	bois + isolant	0.14	39	40	23	19.80	21	0	22

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
6	BC_SIMPL	interieur		26.44	0.00
9	BC_SIMPL	exterieur		0.00	26.44

Fig. 223 : Trisco : résultats numériques de la modélisation de l’hypothèse d’alignement extérieur, deuxième cas de figure

La solution idéale semble donc être l’alignement intérieur des murs. La décision qui a été prise collégalement est l’alignement extérieur (notamment pour satisfaire l’administration de l’Urbanisme), nous avons donc, suite à cette étude, préconisé la mise en place d’un isolant sur cette « allège », ce qui a été exécuté au travers d’un matelas de 6 cm de PUR.

Un exemple réel de nœud constructif formé par la rencontre d’un ancien mur isolé par l’intérieur et d’une nouvelle façade légère se retrouve en fin de ce rapport (voir point 4.9.3). Ce cas réel se rapproche de ce deuxième cas de figure, avec un alignement extérieur et l’ajout d’un isolant en raccord. Y ont été ajoutés la structure métallique et la fenêtre.

4.6.3. G ! "

Le problème se pose à nouveau de l’alignement des deux types de murs, il serait inutile de renouveler une étude similaire, la vérification des règles de conformité serait en tous points semblable. Analysons les schémas ci-dessous :

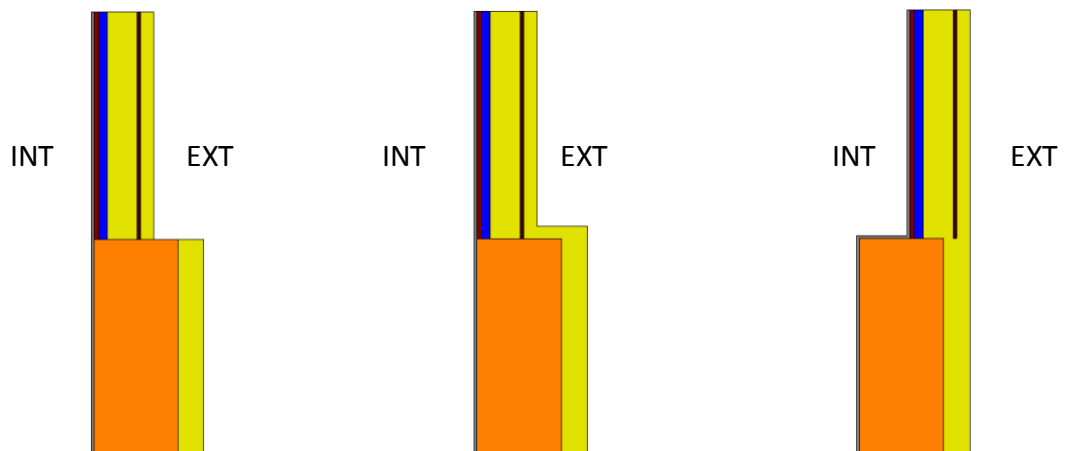


Fig. 224 : Trisco : coupe dans les modèles pour illustrer les hypothèses de position relative

/ (D &

Les résultats du premier modèle sont les suivants :

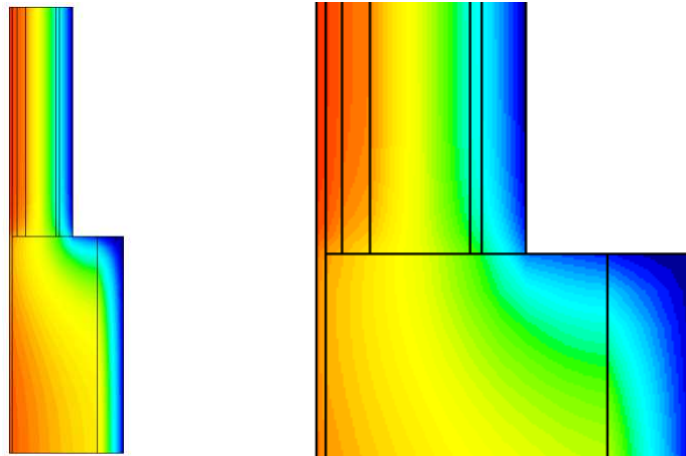


Fig. 225 : résultats graphiques de la modélisation de l'hypothèse d'alignement intérieur, premier cas de figure

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
2	MATERIAL	air + bois	14.84	24	0	20	18.37	22	1	41
3	MATERIAL	fibres de bois	5.13	29	0	41	8.73	28	26	20
4	MATERIAL	briques	1.10	36	40	20	18.35	21	28	0
5	MATERIAL	acier	0.09	41	40	19	2.34	31	29	20
6	BC_SIMPL	interieur	17.37	20	14	18	19.39	20	1	41
8	MATERIAL	plâtre	16.35	21	15	18	19.39	20	1	41
9	BC_SIMPL	exterieur	0.09	41	40	19	2.30	32	29	21
10	MATERIAL	OSB	16.13	22	13	20	19.16	21	1	41
31	MATERIAL	bois + isolant	0.09	40	40	19	17.50	24	0	40

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
6	BC_SIMPL	interieur		37.72	0.00
9	BC_SIMPL	exterieur		0.00	37.72

Fig. 226 : résultats numériques de la modélisation de l'hypothèse d'alignement intérieur, premier cas de figure

La non-conformité est ici aussi flagrante et les déperditions associées au nœud constructif seul s'élèvent à $\Psi_e = 0,373 \text{ W/mK}$. La température minimale atteinte sur la surface intérieure du mur est de 17,36°C.

Voici les résultats de l'hypothèse B, avec un isolant supplémentaire rapporté :

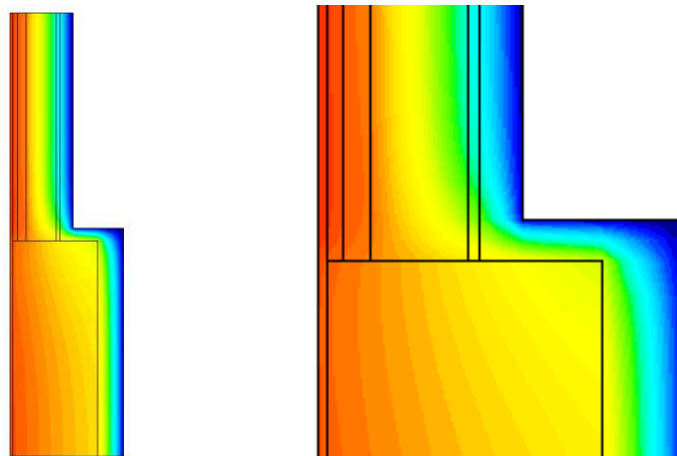


Fig. 227 : résultats graphiques de la modélisation de l'hypothèse d'alignement intérieur, deuxième cas de figure

pas déjà été par les règles de conformité.

Comme dans le cas de l'autre façade analysée précédemment (avec les murs existants isolés par l'intérieur), le choix a été fait d'aligner les faces extérieures des parois ce qui, dans le cas présent, représente la meilleure solution à tous points de vue.

4.7.

4.7.1.

La réglementation ne considère pas les structures comme des nœuds constructifs... en tous cas pas celles dont l'influence est déjà comptabilisée dans la résistance thermique des « couches composées », selon leur dénomination dans la méthode de calcul PEB et reprise telle quelle dans le logiciel. La toiture en acier que nous avons analysée (voir point 2.2) repose principalement sur deux grandes poutres cintrées en acier (IPE 240) qui n'apparaissent pas dans ces couches composées (nous n'avons tenu compte que des autres éléments en acier).

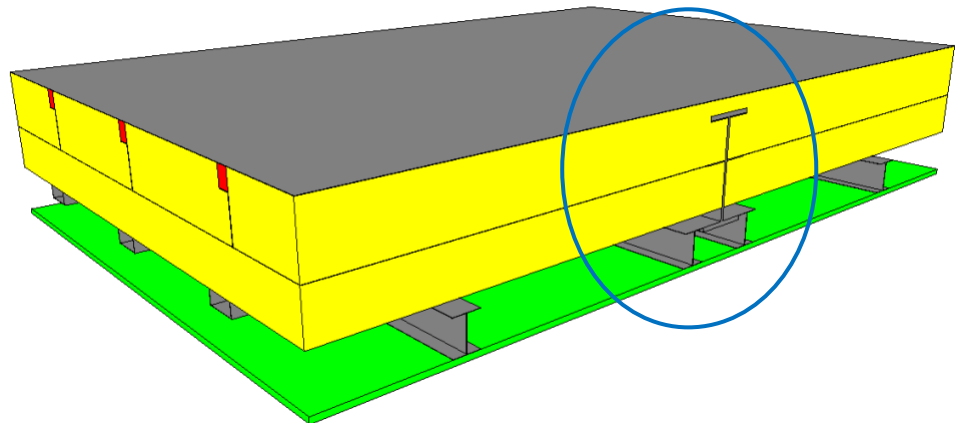
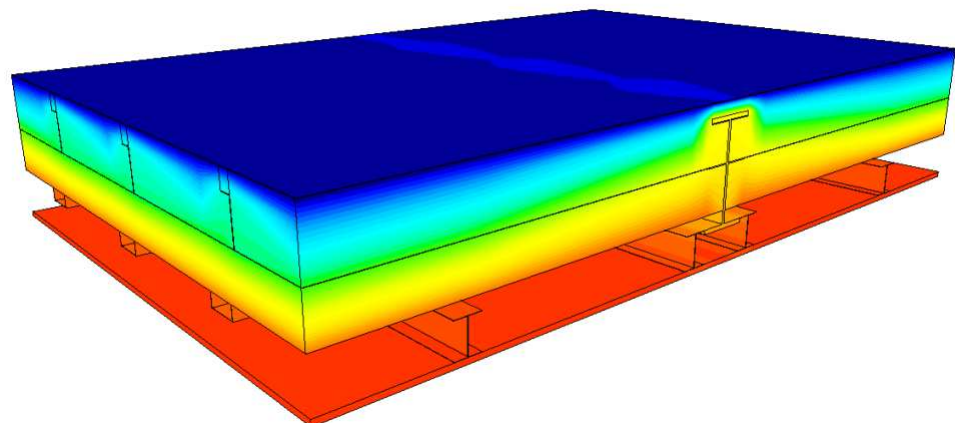


Fig. 231 : Trisco : vue 3D du modèle du nœud constructif formé par la structure métallique principale de la toiture cintrée

Les résultats graphiques nous montrent, comme on pouvait s'y attendre, l'influence d'une structure métallique sur le transfert de chaleur :



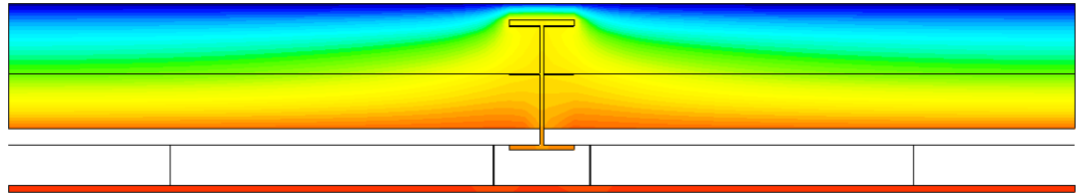


Fig. 232 : Trisco : résultats graphiques de la modélisation du nœud constructif formé par la structure métallique principale de la toiture cintrée

Les résultats numériques sont les suivants :

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
2	BC_SIMPL	EXTERIEUR	0.10	0	54	31	0.63	40	43	31
3	MATERIAL	plâtre	18.69	44	10	5	19.45	79	50	4
4	MATERIAL	polyéthylène	0.18	79	26	30	14.22	39	44	28
5	BC_FRE_S	air plenum sous	16.95	40	0	10	19.15	40	54	5
6	BC_SIMPL	INTERIEUR	18.88	44	10	4	19.45	79	50	4
7	MATERIAL	laine de verre	0.10	79	54	30	18.24	36	54	16
8	MATERIAL	acier	0.10	0	54	31	19.13	9	0	5
13	BC_FRE_S	fx-plaf 2	16.55	39	0	16	19.38	0	50	5
21	BC_FRE_S	fx-plaf 3	16.55	40	0	16	19.38	79	50	5

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
2	BC_SIMPL	EXTERIEUR		0.00	12.66
5	BC_FRE_S	air plenum sous	18.15	1.16	1.16
6	BC_SIMPL	INTERIEUR		12.66	0.00
13	BC_FRE_S	fx-plaf 2	18.53	5.04	5.04
21	BC_FRE_S	fx-plaf 3	18.53	5.04	5.04

Fig. 233 : Trisco : résultats numériques de la modélisation du nœud constructif formé par la structure métallique principale de la toiture cintrée

Ils indiquent un flux sortant vers l'extérieur de 12,66 W, pour un ΔT de 20°C et une surface d'échange de 1,98 m * 1,305 m = 2,5839 m².

Nos simulations ont annoncé, sans tenir compte des poutres structurales, une valeur $U_{\text{toiture}} = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$, qui permet donc dans le cas présent de laisser passer un flux de $0,17 \text{ [W/m}^2\text{K]} * 2,5839 \text{ [m}^2] * 20 \text{ [}^\circ\text{C]} = 8,785 \text{ W}$. Le flux (3,88 W) restant correspondrait aux déperditions supplémentaires imputables à la poutre métallique (de 1,305 m de longueur), soit $\Psi_e = 3,88 / (1,305 * 20) = 0,15 \text{ W/mK}$.

Ce genre de nœud linéaire n'entrant dans aucune catégorie de $\Psi_{e,\text{lim}}$, la valeur maximale admise est de 0 W/mK : les poutres sont donc un nœud « non PEB-conforme ».

Il est à noter toutefois l'influence positive des 4 cm d'isolant supplémentaires qui ont été ajoutés sous le revêtement de toiture (au-dessus des bacs). Sans cette épaisseur supplémentaire, les résultats numériques étaient ceux donnés à la Fig. 234 ci-dessous. Ils indiquent un flux sortant vers l'extérieur de 32,24 W, pour un ΔT de 30°C et une surface d'échange de 2,5839 m².

Nos simulations indiquent une valeur $U_{\text{toiture}} = 0,219 \text{ W/m}^2\text{K}$, soit un flux la traversant de $0,219 \text{ [W/m}^2\text{K]} * 2,5839 \text{ [m}^2] * 30 \text{ [}^\circ\text{C]} = 16,98 \text{ W}$. Reste un flux de 15,26 W imputable au nœud constructif, soit une déperdition thermique linéique $\Psi_e = 0,39 \text{ W/mK}$.

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
2	BC_SIMPL	EXTERIEUR		0.00	32.24
5	BC_FRE_S	air plenum sous	15.34	3.30	3.30
6	BC_SIMPL	INTERIEUR		32.24	0.00
13	BC_FRE_S	fx-plaf 2	16.40	12.74	12.74
19	BC_FRE_S	air sous toitur	-6.85	6.00	6.00
21	BC_FRE_S	fx-plaf 3	16.40	12.74	12.74
27	BC_FRE_S	air sous toitur	-6.98	10.48	10.48
51	BC_FRE_S	air sous toitur	-7.15	9.82	9.82
59	BC_FRE_S	air sous toitur	-7.88	7.19	7.19

Fig. 234 : Trisco : résultats numériques de la modélisation du nœud constructif formé par la structure métallique principale de la toiture cintrée, sans les 4 cm d'isolants supplémentaires

4.7.2. D 4 9

Pour clôturer le chapitre consacré à la toiture cintrée qui sera apposée sur le bâtiment rénové, nous avons décidé d'analyser la conformité de certains nœuds constructifs créés aux jonctions de cette toiture avec les autres éléments de l'enveloppe : murs de façade avant, arrière et latéral, mur mitoyen, « chiens assis » (boîtes formée par les fenêtres en façade avant), « boîte » latérale (salon – salle à manger de l'appartement au R+3), raccord avec la toiture plate de l'annexe... L'étude de ces nœuds constructifs relatifs à la structure métallique posée sur le bâtiment a été confiée au partenaire industriel Arcelor Mittal. Les résultats des quelques simulations réalisées pour eux par Cenaero sont visibles dans les rapports correspondants.

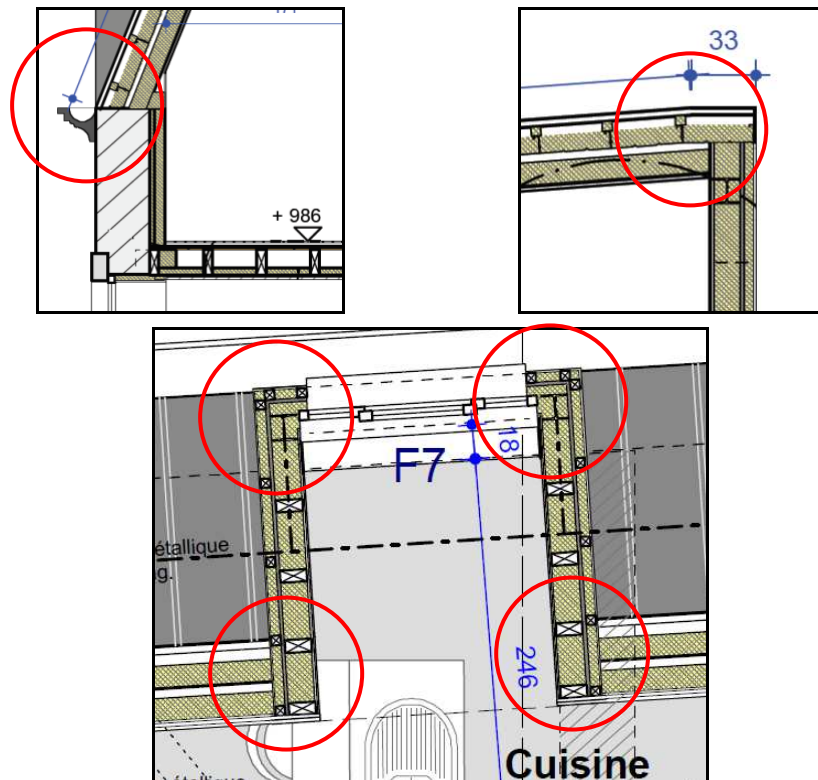


Fig. 235 : illustration des autres nœuds constructifs formés par la structure métallique en toiture, étudiés par Cenaero

4.8.)

4.8.1. D &

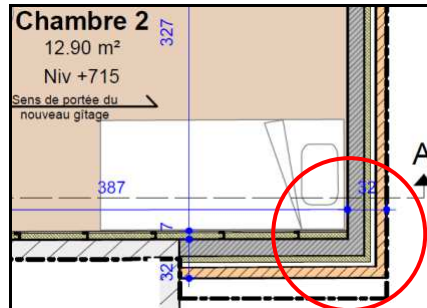


Fig. 236 : illustration du nœud constructif formé à l'angle des nouveaux murs creux en annexe

Ce cas est un peu particulier puisque nous avons une double isolation sur un mur, et une simple isolation sur l'autre. Cela étant dit, la connexion entre les deux isolants internes au mur est complète et conforme à la PEB ; le nœud peut donc être classé conforme, l'isolant supplémentaire intérieur ne pouvant qu'augmenter la performance du nœud.

4.8.2. G

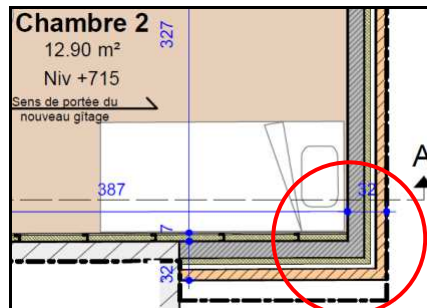


Fig. 237 : illustration du nœud constructif formé par la rencontre du nouveau mur creux de l'annexe et du mur mitoyen

L'isolation thermique du mur mitoyen a été réalisée par l'intérieur de l'annexe. L'analyse de ce nœud est relativement facile, puisque le prolongement de cette couche d'isolation le long du mur (jusqu'à rejoindre le mur arrière, comme illustré sur la Fig. 237 ci-dessus) allonge le chemin de moindre résistance à une longueur supérieure à 1 m :

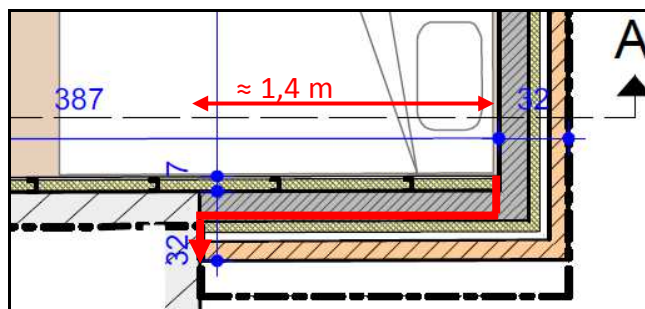


Fig. 238 : illustration du chemin de moindre résistance attestant de la conformité du nœud constructif formé par la rencontre du nouveau mur creux de l'annexe et du mur mitoyen

4.8.3.

G

0 @

0 !

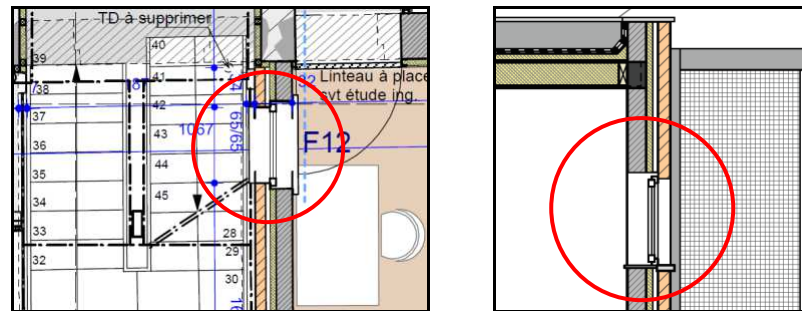


Fig. 239 : Illustration des nœuds constructifs formés par la présence des baies de fenêtres dans le nouveau mur creux de l'annexe

Si le contact entre l'isolant dans la coulisse et le châssis est plein, le nœud sera conforme. Dessiné comme il l'est sur la coupe, le nœud n'est pas conforme puisque le châssis n'est pas en contact avec l'isolant qui est présent dans la coulisse. Cette remarque est valable aux niveaux supérieur (linteau) et inférieur (seuil). La remarque a été transmise aux architectes, qui s'assureront de la bonne conformité lors de la mise en œuvre.

4.8.4.

G

? -0 !

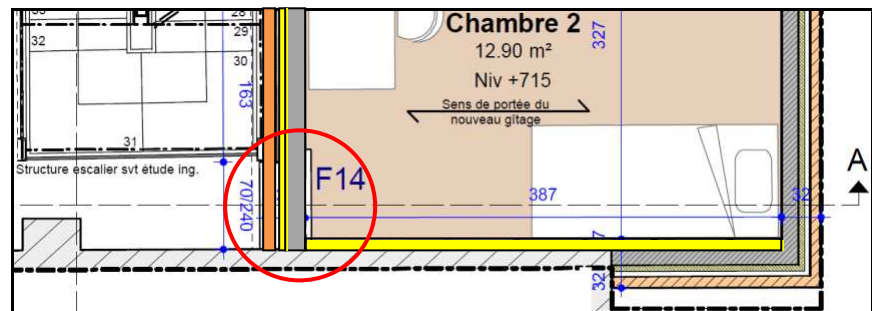


Fig. 240 : Illustration du nœud constructif (non conforme) formé par la jonction du nouveau mur creux de l'annexe avec l'isolation du mur mitoyen (réalisée par l'intérieur)

Pour d'évidentes raisons (techniques, économiques, voire performancielle) puisqu'une attention particulière est censée être portée à l'étanchéité à l'air du bâtiment), il n'a pas été possible de réaliser une jonction entre l'isolation du mur mitoyen et celle du mur creux. Le nœud est donc non conforme à la PEB.

4.9. : * 9 4 0 ' & 8=#8

4.9.1.

Il a été décidé en réunion de travail que l'étude des nœuds constructifs du chantier de la rue Ferrer devait aller plus loin que la « simple » attestation de leur conformité. La plupart des nœuds ont été choisis parce qu'ils sont représentatifs de situations régulièrement rencontrées dans un chantier de rénovation performancielle ; l'importance de l'isolation n'étant plus à démontrer, il est maintenant crucial de se pencher sur ces points faibles (thermiquement parlant) de l'enveloppe de déperdition. Six nœuds ont donc été choisis avec soin pour faire l'objet d'une analyse approfondie (en ce compris une modélisation Trisco) dans leur configuration réelle. L'objectif final est, comme nous l'avons mentionné plus haut dans le rapport, de comparer les résultats théoriques issus des simulations avec les résultats mesurés par le CSTC grâce au monitoring mis en place.

4.9.2.) 4 M \$ N 6 * 1 0 !

Ce nœud est très semblable à celui qui a été étudié au point 4.3.3 ci-dessus. Nous le répétons ici parce qu'il fait l'objet d'une mise à jour pour coller à la réalité du chantier, notamment le remplissage complet du plancher avec de l'isolant. La structure en acier qui a été noyée dans l'isolant (côté intérieur, mur de l'étage supérieur) a été complètement modélisée.

La Fig. 241 ci-dessous, issue du rapport « 120306_CSTC_Présentation_Monitoring Ferrer.pdf » du CSTC, permet de localiser l'emplacement du nœud en question, ainsi que l'emplacement des capteurs placés par le CSTC pour le monitoring :

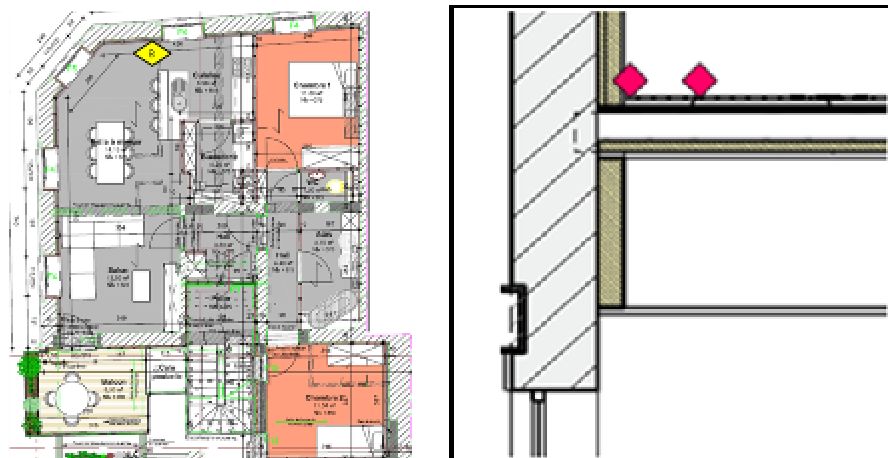


Fig. 241 : Illustration de l'emplacement du nœud constructif (formé par l'intersection du mur isolé par l'intérieur et du plancher du R+1) et des capteurs du CSTC pour le monitoring.

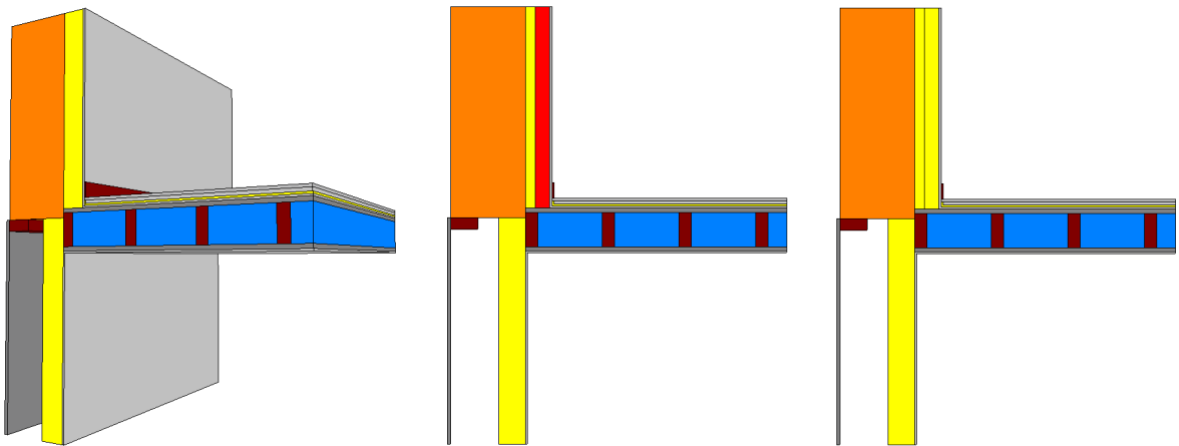


Fig. 242 : Trisco : vue 3D du modèle de la rencontre d'un plancher en bois, d'un mur de façade isolé par l'intérieur et d'un ancien caisson à volet rempli d'isolant.

Les deux coupes permettent de constater la composition du mur isolé par l'intérieur : l'image centrale de la Fig. 242 est une coupe au travers de la structure métallique, tandis que l'image de droite est une coupe au travers de l'isolant uniquement.

Voici une liste des matériaux en présence :

- En orange, l'ancien mur de briques ($\lambda = 1,61 \text{ W/mK}$) ;
- En brun, la structure en bois ($\lambda = 0,18 \text{ W/mK}$) ;
- En jaune, l'isolant thermique ($\lambda = 0,032 \text{ W/mK}$) du mur et en bleu, celui du plancher ($\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$) ;
- En rouge, la structure en acier ($\lambda = 50 \text{ W/mK}$)
- En gris, le plâtre (plaques ou enduit, selon la paroi)
- A noter l'utilisation de la chape sèche Knauf en plancher

Voici les résultats graphiques (Fig. 243) et numériques (Fig. 244) de la modélisation Trisco du nœud étudié :

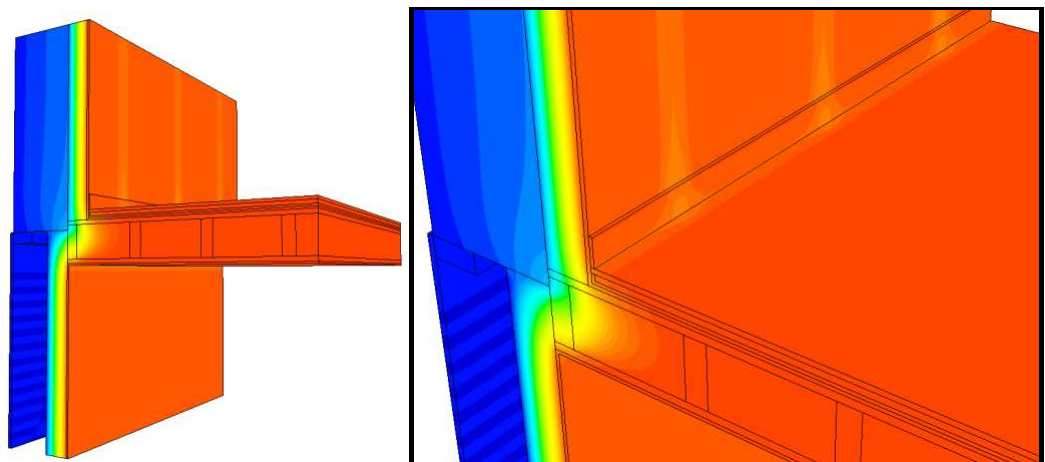


Fig. 243 : Trisco : résultats graphiques de la modélisation du nœud constructif formé par la rencontre d'un plancher en bois, d'un mur de façade isolé par l'intérieur et d'un ancien caisson à volet rempli d'isolant.

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
2	MATERIAL	acier	11.98	17	60	34	18.49	22	60	57
3	BC_SIMPL	cavité dans le	-0.00	2	12	24	1.18	10	11	32
4	MATERIAL	bois de structu	0.03	2	69	30	20.00	55	0	27
5	MATERIAL	briques	0.16	2	69	32	3.33	14	12	32
6	MATERIAL	plâtre	16.37	22	12	34	20.00	56	0	25
7	MATERIAL	isolant Knauf N	0.15	10	69	31	20.00	56	0	36
8	MATERIAL	OSB	-0.00	1	9	29	20.00	57	0	26
10	EQUIMAT	isolant Naturol	7.96	19	46	32	20.00	57	69	27
12	BC_SIMPL	int RDC	18.44	15	69	25	20.00	56	0	25
13	BC_SIMPL	int R+1	18.05	23	12	40	20.00	57	69	38
14	BC_SIMPL	air extérieur	-0.00	1	9	29	0.24	2	12	43
17	MATERIAL	quick step	17.00	23	11	37	20.00	57	69	38

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
3	BC_SIMPL	cavité dans le		0.00	10.27
12	BC_SIMPL	int RDC		10.24	0.00
13	BC_SIMPL	int R+1		11.40	0.00
14	BC_SIMPL	air extérieur		0.00	11.37

Fig. 244 : Trisco : résultats numériques de la modélisation du nœud constructif formé par la rencontre d'un plancher en bois, d'un mur de façade isolé par l'intérieur et d'un ancien caisson à volet rempli d'isolant.

Ils indiquent un flux sortant vers l'extérieur de $10,27 + 11,37 = 21,64$ W, pour un ΔT de 20°C . Nos simulations ont annoncé les valeurs $U_{\text{mur}} = 0,275$ W/m²K (soit un flux de $0,275$ [W/m²K] * $1,98$ [m²] * 20 [°C] = $10,9$ W) et $U_{\text{caisson}} = 0,31$ W/m²K (soit un flux de $0,31$ [W/m²K] * $2,13$ [m²] * 20 [°C] = $13,21$ W). Le flux résiduel ($-2,47$ W) correspond à la correction à apporter aux déperditions déjà comptées par la PEB au travers de l'influence des murs. Cette correction négative signifie que le nœud est bien conforme (voir 4.3.1), puisqu'elle correspond à une correction linéaire par degré de différence entre les ambiances intérieure et extérieure $\Psi_e = -0,069$ W/mK.

Par comparaison, l'exemple du point 4.3.1 (avec un plancher isolé sur une plus faible épaisseur), présentait un flux résiduel de $-2,306$ W et une déperdition linéaire correspondante $\Psi_e = -0,064$ W/mK.

Mais ce qui nous intéresse le plus dans ce modèle est la température calculée aux points où sont situés les capteurs. Cette température étant fonction des conditions imposées dans les ambiances intérieure et extérieure ($\Delta T = 20^\circ\text{C}$), nous calculerons également le facteur de température.

Nous avons trois données à notre disposition :

- Une représentation graphique (dessin, photos) de la position des capteurs, fournie par le CSTC (voir Fig. 245) ;
- Un relevé des températures calculées par Trisco aux points principaux de la maille créée (voir Fig. 246). Ces points principaux correspondent aux nœuds formés par le contact entre plusieurs « blocs » de matière constitutifs du modèle, qui a été discrétisé pour affiner le calcul. Les nouveaux nœuds ainsi créés par cette discrétisation n'apparaissent malheureusement pas dans la liste, de sorte qu'il arrive qu'aucun nœud présent ne corresponde aux points de positionnement des capteurs. Nous ne délivrerons dès lors pas le fichier complet, trop encombrant.

- Le code couleur employé par Trisco qui permet l'interprétation des températures grâce à l'échelle des températures et à la comparaison visuelle.

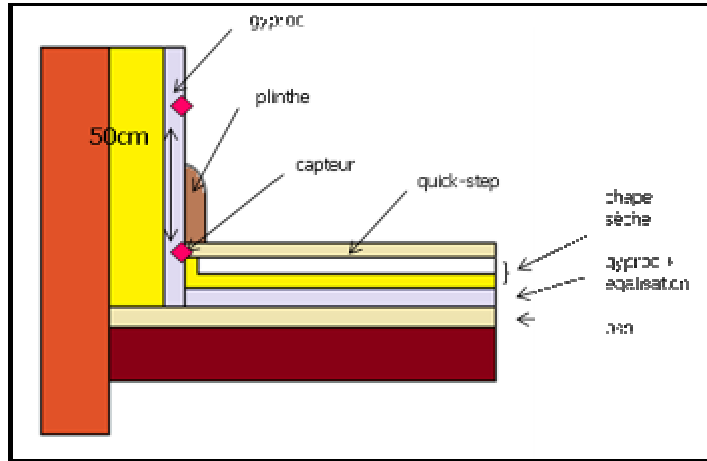


Fig. 245 : Représentation graphique de la position des capteurs du « nœud 8 »

TRISCO - Températures des coins				
Fichier de données TRISCO: Reno2020_Ferrer13_NC8.trc				
X	Y	Z	t	
				[°C]
1	0	0	-0.00	
1	0	5	0.02	
1	13	0	-0.00	
1	13	5	0.02	
2	0	0	-0.00	
2	0	4	0.02	
2	0	5	0.17	
2	0	13	0.24	
2	13	0	-0.00	

Fig. 246 : Liste (partielle) des « températures des coins » calculées par Trisco pour le modèle

Dans le cas qui nous intéresse, le capteur inférieur a été placé à la jonction du revêtement de sol et de la plaque de plâtre couvrant la face intérieure du mur supérieur. Dans notre modèle, cela correspond aux coordonnées suivantes : X = 23 ; Y ∈ [0, 69] ; Z = 37. Les températures les plus proches que l'on trouve sont au pied de la plinthe (voir Fig. 245 ci-dessus), côté intérieur : 18,9°C, soit un facteur de température de 0,945.

Ci-dessous (Fig. 246) une coupe dans les résultats graphiques (en X°=°23). L'axe Z°=°37 est indiqué pour un meilleur repère. Nous pouvons constater une fluctuation des températures sur cet axe, symptomatique de la présence de la structure en acier. Cette fluctuation reste cependant dans un intervalle de 2°C. Le facteur de température devrait en conséquence fluctuer dans un intervalle [0,845 ;°0,945].

Z°=°37

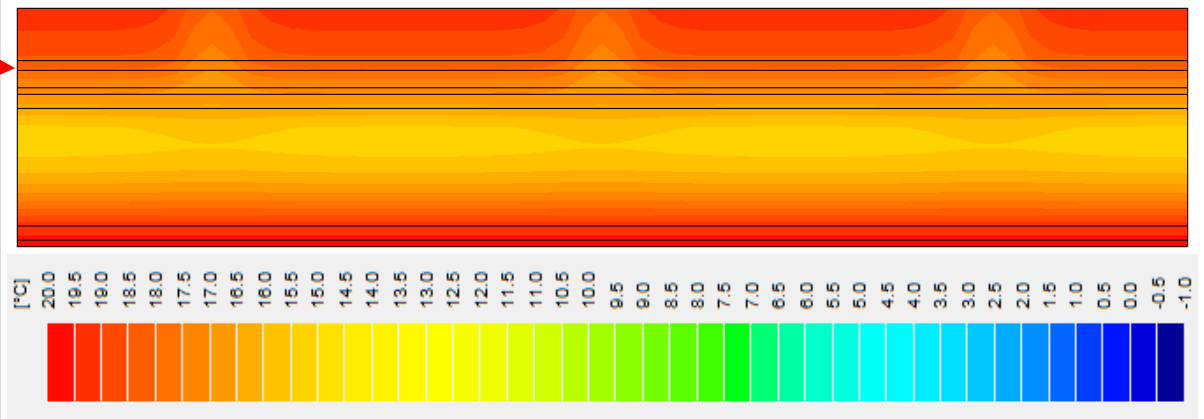


Fig. 246 : Trisco : coupe dans le graphique des résultats à l'axe X°=°23 et échelle des températures pour comparaison.

Le capteur supérieur est placé 50 cm plus haut, aux coordonnées X = 23 ; Y ∈ [0, 69] ; Z = 50. En [24, 0, 40] et en [24 ; 69 ; 40], la température est de 19,54°C. Plus haut :

Z°=°50

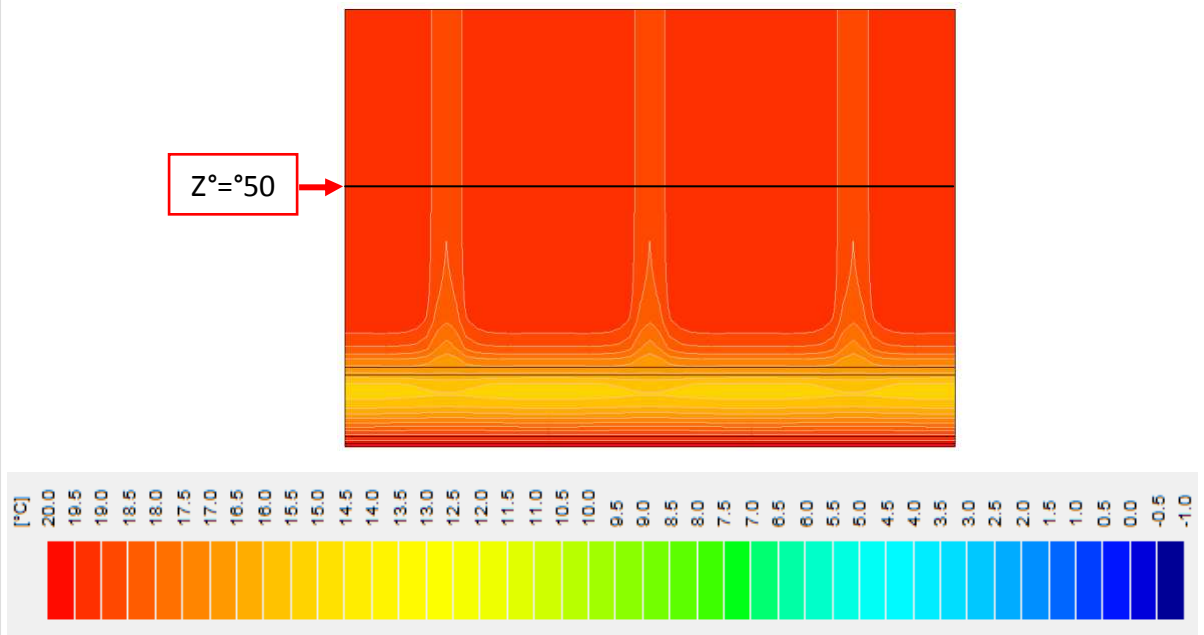


Fig. 247 : coupe dans le graphique des résultats à l'axe X°=°23 et échelle des températures pour comparaison.

On y voit que l'influence de la structure métallique décroît sur la hauteur du mur, parce qu'elle n'est plus couplée à l'influence de la structure du plancher. La température minimale en Z = 50 tourne aux alentours de [18,5°C ; 19,5°C], soit un facteur de température qui varie dans [0,925 ; 0,975].

4.9.3.) 4 M / N 6 8 0 ! &

De manière similaire à l'exemple précédent, ce nœud a déjà été étudié précédemment (voir 4.6 : « Nouvelles façades »), mais la comparaison s'arrête là. En effet, le nœud suivant est plus complexe pour les raisons suivantes, rendant la comparaison des flux et déperditions linéaires absurde :

- La présence d'une fenêtre, surface de déperdition supplémentaire entourée de nœuds constructifs.
- La présence d'une colonne structurelle en acier, adjacente à cette fenêtre. Cette colonne ne faisait pas non plus partie du modèle étudié, et sa présence est la principale raison de cette étude supplémentaire.
- La modélisation complète de la structure en bois de cette nouvelle façade, en ce compris les renforts ponctuels et les lisses, basse et haute.
- L'ajout d'un isolant polyuréthane pour réaliser la jonction mentionnée au point 4.6.2.2 (deuxième cas de figure).

Voici la position des capteurs (au troisième étage selon les précisions du CSTC) :

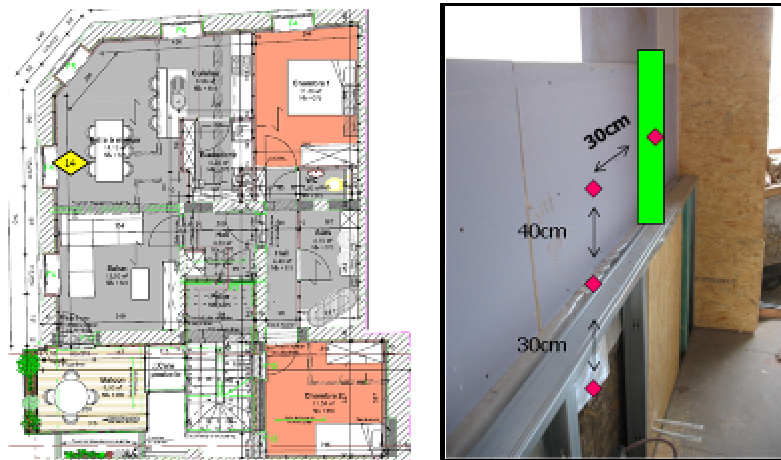


Fig. 248 : Emplacement du nœud constructif (formé par le nouveau mur léger, sa structure métallique, sa fenêtre et l'ancien mur plein isolé par l'intérieur) et des capteurs du CSTC pour le monitoring.

Il semble que le capteur inférieur soit placé entre les deux couches d'isolants, mais une information complémentaire du CSTC nous certifie qu'il est, comme pour tous les autres nœuds, placé sous la finition intérieure.

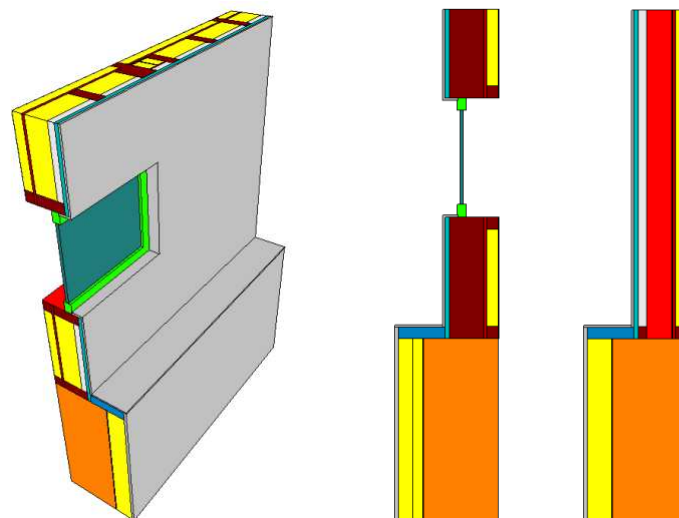


Fig. 249 : Trisco : vue 3D et coupes dans le modèle nœud constructif (formé par le nouveau mur léger et l'ancien mur plein isolé par l'intérieur). La première coupe (image centrale) est faite dans la structure bois et la fenêtre, la seconde (image de droite) dans la colonne métallique.

Voici les coordonnées des capteurs :

- Capteur 1 (au niveau de la colonne) : X = 44 ou 45 (si on considère le capteur au centre, aligné avec l'âme de la colonne) ; Y = 18 ; Z = 36.
- Capteur 2 (placé à 30 cm à l'horizontale du capteur 1, sous la fenêtre) : X = 61 ; Y = 18 ; Z = 36.
- Capteur 3 (placé 40 cm à la verticale du capteur 2, à la jonction entre les deux parois – nouvelle et ancienne isolée) : X = 61 ; Y = 18 ; Z = 46.
- Capteur 4 (placé 30 cm à la verticale du nœud 3) : X = 61 ; Y = 30 ; Z = 55.

Voici les résultats graphiques (Fig. 250) et numériques (Fig. 251) du modèle étudié :

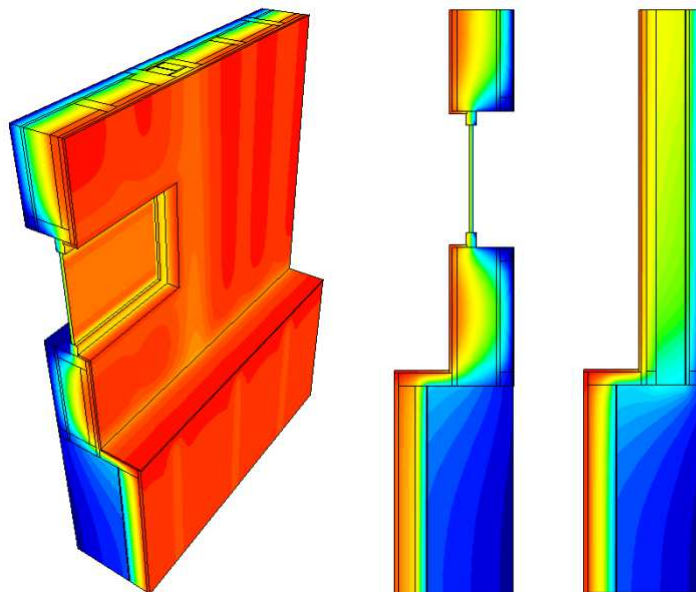


Fig. 250 : résultats graphiques de la modélisation du nœud constructif formé par le nouveau mur léger et l'ancien mur plein isolé par l'intérieur

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
2	BC_SIMPL	exterieur	0.06	83	1	9	3.39	57	11	17
3	MATERIAL	revêtement	16.57	45	19	46	19.90	48	31	44
4	BC_SIMPL	interieur	12.42	57	12	27	19.90	48	31	44
5	MATERIAL	briques	0.23	0	2	68	5.65	45	13	49
7	MATERIAL	Knauf Naturoroll	1.57	0	23	68	19.57	48	30	49
8	MATERIAL	acier	0.06	83	1	9	18.66	13	30	49
9	EQUIMAT	vide	4.91	48	5	45	11.65	44	6	0
17	MATERIAL	plâtre	1.52	0	22	68	4.47	42	23	49
18	MATERIAL	plaque de plâtr	12.00	51	14	31	19.90	48	31	46
19	MATERIAL	isolant	0.06	83	2	9	18.40	83	15	0
20	MATERIAL	fibre de bois	0.22	83	4	31	11.30	39	5	0
21	MATERIAL	OSB	2.98	0	17	49	19.46	83	18	0
25	EQUIMAT	air non ventilé	6.38	45	14	45	18.96	83	17	0
28	MATERIAL	PUR	3.01	0	18	49	19.87	47	30	46
29	MATERIAL	HEA 140 acier	4.07	48	6	49	12.79	39	14	0
35	MATERIAL	Profilé métalli	0.19	59	10	17	17.36	60	15	17
45	MATERIAL	Vitrage U 0,8 W	0.13	58	11	18	18.61	58	12	26
55	MATERIAL	Bois de structu	0.07	83	2	34	18.41	22	17	0
Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]					
2	BC_SIMPL	exterieur		0.00	45.85					
4	BC_SIMPL	interieur		45.85	0.00					

Fig. 251 : résultats numériques de la modélisation du nœud constructif formé par le nouveau mur léger et l'ancien mur plein isolé par l'intérieur

Dans les températures renseignées par le logiciel, voici ce que nous trouvons de plus proche des points étudiés :

- [0 ; 19 ; 44] et [83 ; 19 ; 44] (à l'interface entre la « tablette », le revêtement intérieur du mur léger et l'ambiance intérieure) : 17,08°C.
- [39 ; 17 ; 45] (à l'interface entre la gaine technique intérieure, au niveau de la colonne métallique, et l'OSB qui la referme) : 10,59°C.

Peu d'autres points nous intéressent, une analyse visuelle des températures s'impose (voir Fig. 252 ci-dessous). On peut y voir la nette influence de la colonne métallique sur les températures de surface, ainsi que l'influence du raccord entre les deux parois (à noter que la coupe en $Y^\circ=18$ traverse le PUR posé sur la « tablette », ce qui explique le gradient de température sous la barre des $Z^\circ=46$).

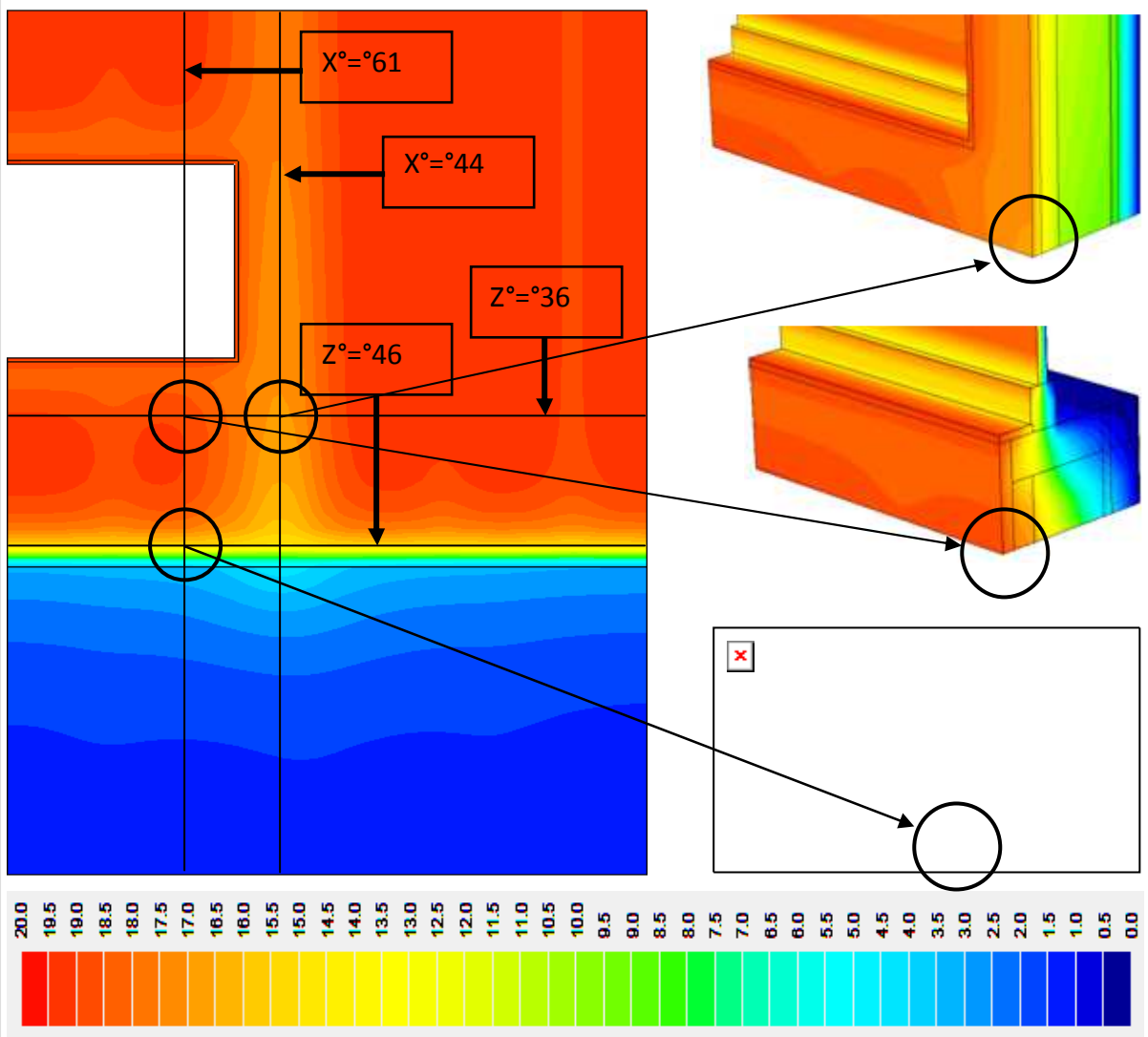


Fig. 252 : coupe dans le graphique des résultats à l'axe $Y^\circ=18$ et échelle des températures pour comparaison.

L'étude visuelle des températures nous permet de dire ceci :

- Le capteur 1 ([44 ; 18 ; 36]) se trouve dans un intervalle de température [16,5°C ; 17°C], soit un intervalle de facteur de température [0,825 ; 0,85].
- Le capteur 2 ([61 ; 18 ; 36]) se trouve dans un intervalle de température

[18,5°C ; 19°C], soit un intervalle de facteur de température [0,925 ; 0,95].

- Le capteur 3 ([61 ; 18 ; 46]) se trouve à un endroit de la paroi où il est très difficile de déterminer la température. En effet, comme le montre la Fig. 253 ci-dessous, cette zone présente une concentration d'isothermes importante, de sorte que l'imprécision sur le positionnement des données rend l'interprétation des données difficile.

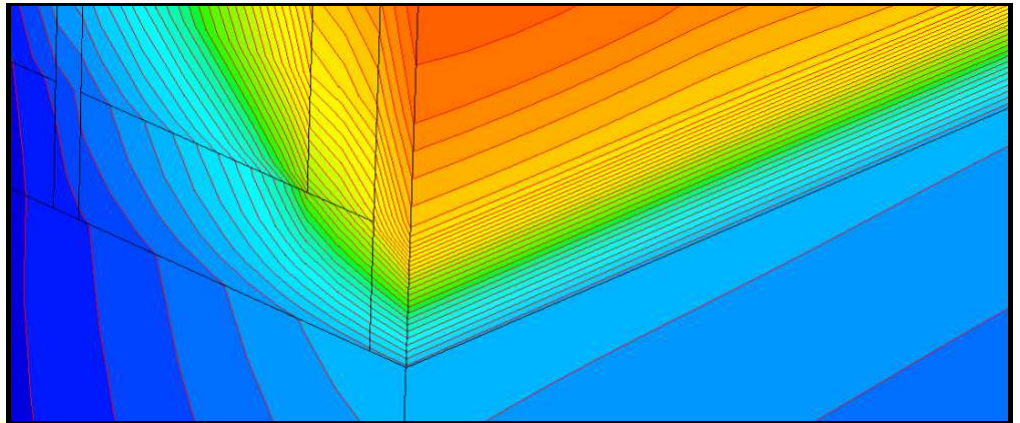


Fig. 253 : Coupe dans le graphique des résultats (X = 61 ; Y = 18) représentant la concentration des isothermes pour [61 ; 18 ; 46]

Cette concentration d'isotherme est la représentation de l'utilité de l'isolant thermique (polyuréthane) placé sur la tablette pour réaliser la continuité de la couche isolante. Le capteur étant placé légèrement au-dessus de cet isolant, nous déplacerons le capteur au point [61 ; 18 ; 45] :

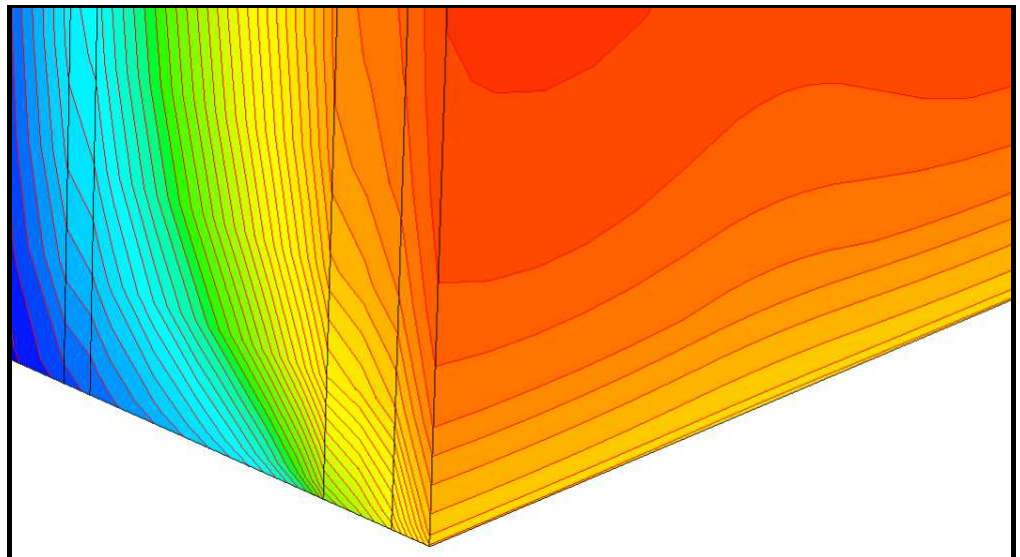


Fig. 254 : Coupe dans le graphique des résultats (X = 61 ; Y = 18 ; Z = 45) représentant la concentration des isothermes.

Le point en question se trouve dans un intervalle de température [15°C ; 15,5°C]. Nous allons cependant l'augmenter pour tenir compte des incertitudes liées à la concentration d'isothermes et de manque de précision (par exemple, [14°C ; 17°C], soit un intervalle de facteur de température de [0,7 ; 0,85]).

Reste encore le 4^{ème} capteur, situé en [61 ; 30 ; 55] :

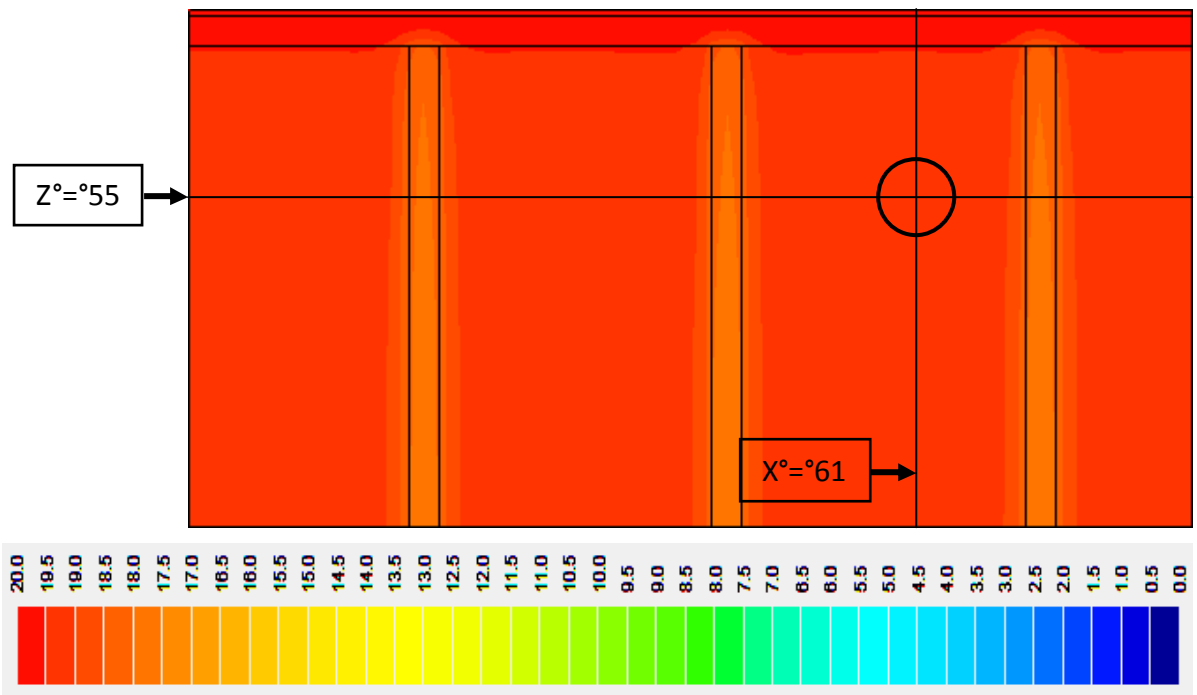


Fig. 255 : coupe dans le graphique des résultats à l'axe $Y^\circ=18$ et échelle des températures pour comparaison.

La Fig. 255 ci-dessus suggère assez clairement que le point recherché se trouve dans l'intervalle [19°C ; 19,5°C]. Toutefois, n'étant pas sûrs de l'emplacement relatif des structures métalliques renfermant l'isolant thermique mural, par rapport au point [61 ; 30 ; 55], nous élagirons cet intervalle pour tenir compte des températures atteintes au droit de ces structures métalliques. L'intervalle devient alors [17,5°C ; 19,5°C] pour les températures, [0,875 ; 0,975].

4.9.4.) 4 M N 6 4 " - K "

Ici également, le nœud a précédemment été étudié dans une forme plus simple (voir 4.4.3) et la comparaison entre les flux et les déperditions thermiques linéaires ne saurait être faite (la présence conjointe de la porte, de ses nœuds constructifs et de leurs déperditions crée la même situation que celle exposée ci-dessus) ;

Voici (voir Fig. 256) la position des capteurs (au premier étage selon les précisions du CSTC). Dans notre modèle, cela correspond aux coordonnées suivantes :

- Pour le capteur central (dans l'angle) : $X = 85$; $Y = 27$; $Z = 34$.
- Pour le capteur de gauche (sur le mur isolé par l'extérieur, au niveau du linteau de la porte), situé à 50 cm du premier : $X = 85$; $Y = 47$; $Z = 34$.
- Pour le capteur de droite (sur le mur isolé par l'intérieur, 50 cm à droite (et à l'horizontale) du capteur central) : $X = 66$; $Y = 27$; $Z = 34$.

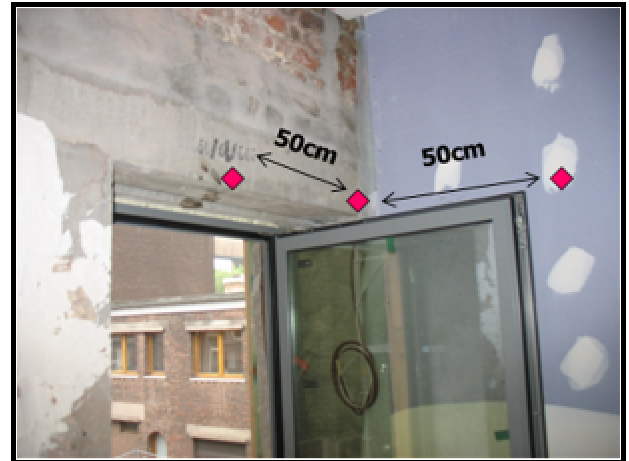
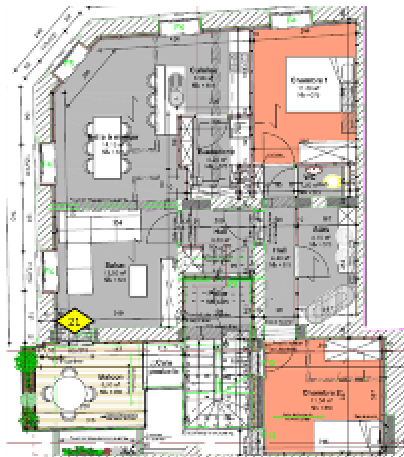


Fig. 256 : Emplacement du nœud constructif (formé par les anciens murs pleins, l'un isolé par l'intérieur et l'autre par l'extérieur, et par la porte d'accès à la terrasse) et des capteurs du CSTC pour le monitoring.

○ Capteur 1 : $X = 85$; $Y = 27$; $Z = 34$

- La température la plus proche (en [84 ; 27 ; 33], soit au niveau de la face intérieure des revêtements) est de 16,31°C, soit un facteur de température de 0,82.
- La coupe dans le modèle nous apporte quelques informations complémentaires :

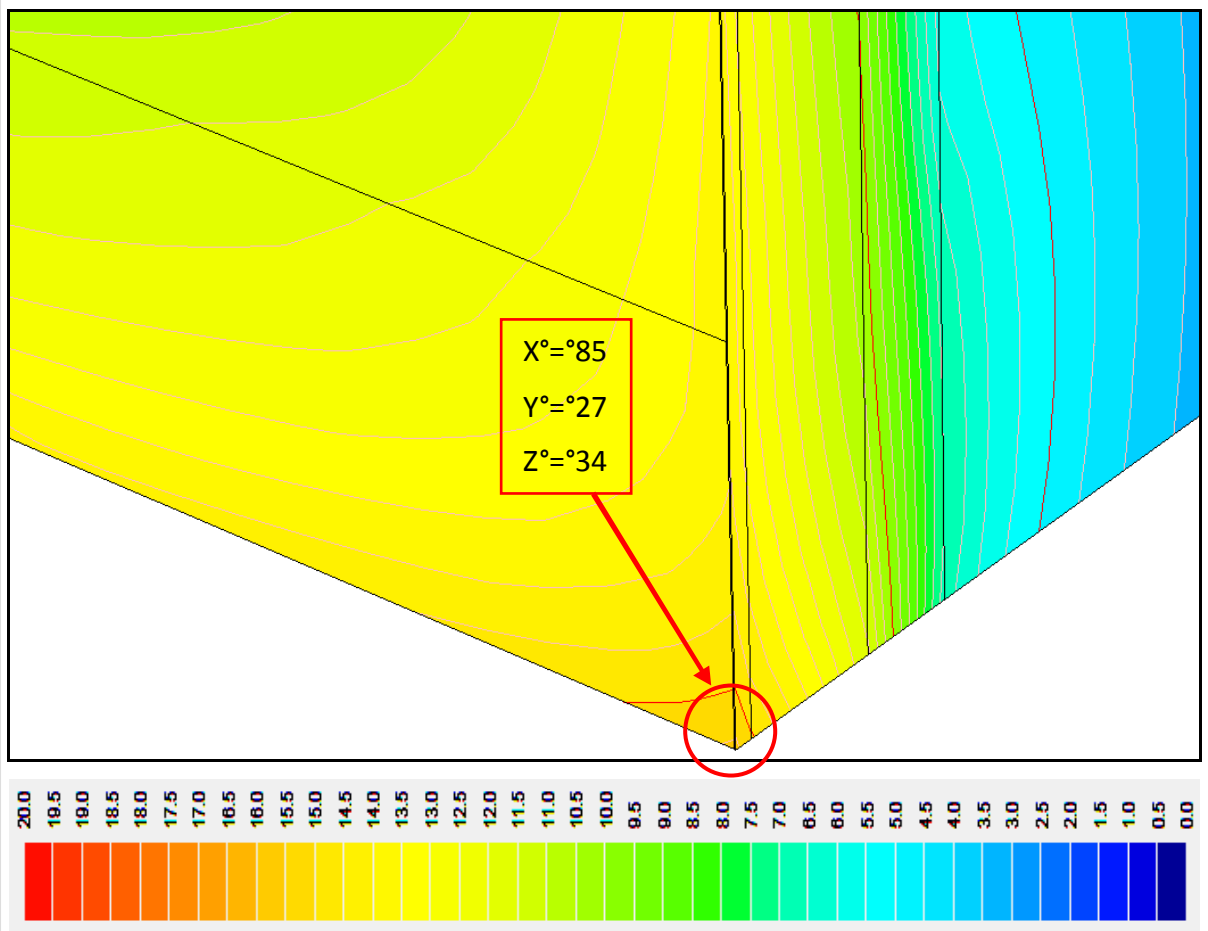


Fig. 257 : coupe dans le graphique des résultats aux axes $X^{\circ}=85$, $Y^{\circ}=27$ et $Z^{\circ}=50$ et échelle des températures pour comparaison.

La température y est légèrement inférieure à celle mentionnée plus haut pour [84 ; 27 ; 33] (à cause de la résistance du revêtement en plâtre). Le point [85 ; 27 ; 34] précisément se trouve dans l'intervalle [15°C ; 15,5°C] mais, à l'instar du 3^{ème} capteur de l'exemple précédent, la concentration des isothermes (due à la présence très proche d'isolant) nous pousse à élargir les intervalles (température et facteur de température) : [14°C ; 17°C] ou [0,7 ; 0,85].

○ Capteur 2 : X = 85 ; Y = 47 ; Z = 34

- Les points les plus proches renseignés par le logiciel :

- [84 ; 27 ; 33], à une température de 16,31°C
- [84 ; 59 ; 33], à une température de 19,45°C

Ces points étant assez espacés du point qui nous intéresse (et leur température étant assez différente), il est difficile d'extrapoler sur ces données.

- La coupe dans le modèle, en X = 85, est la suivante :

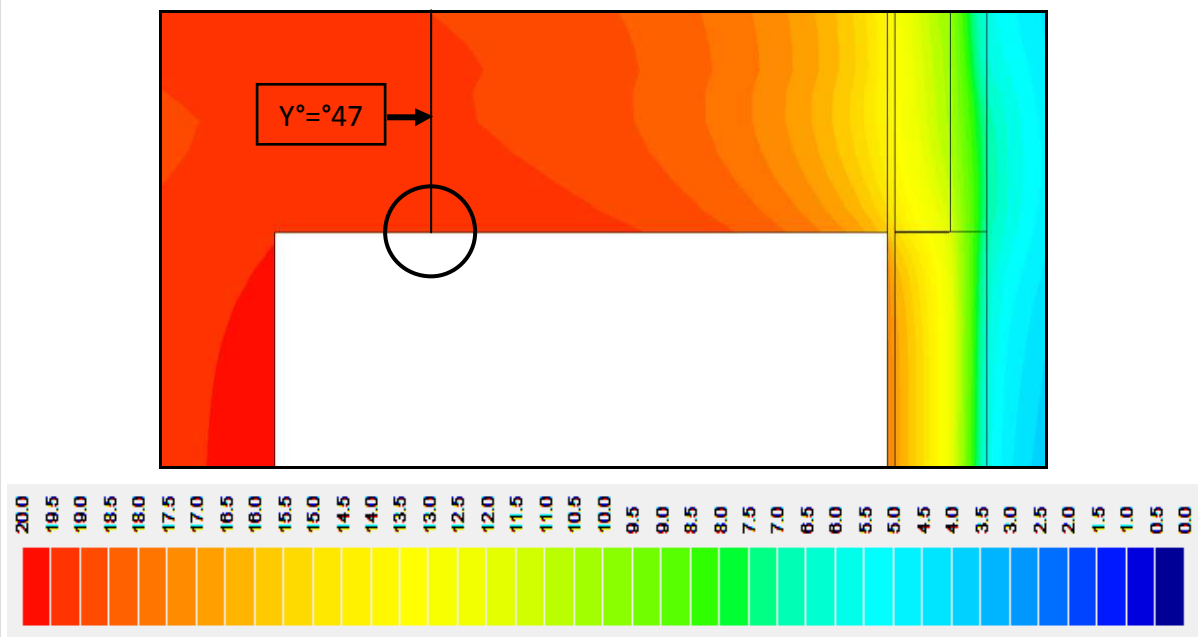


Fig. 258 : coupe dans le graphique des résultats à l'axe X°=°85 et échelle des températures pour comparaison.

La température visible est beaucoup plus proche de celle renseignée en [84 ; 59 ; 33], soit 19,45°C. Nous pouvons donc tabler sur un intervalle [19°C ; 19,5°C], soit un intervalle de facteurs de températures [0,95 ; 0,975].

○ Capteur 3 : X = 66, Y = 27, Z = 34

- Le point le plus proche est celui du capteur central, en [84 ; 27 ; 33], à une température de 16,31°C. Ici également, l'extrapolation sur cette seule base serait hasardeuse.
- Regardons la coupe (Y = 27) dans le modèle :

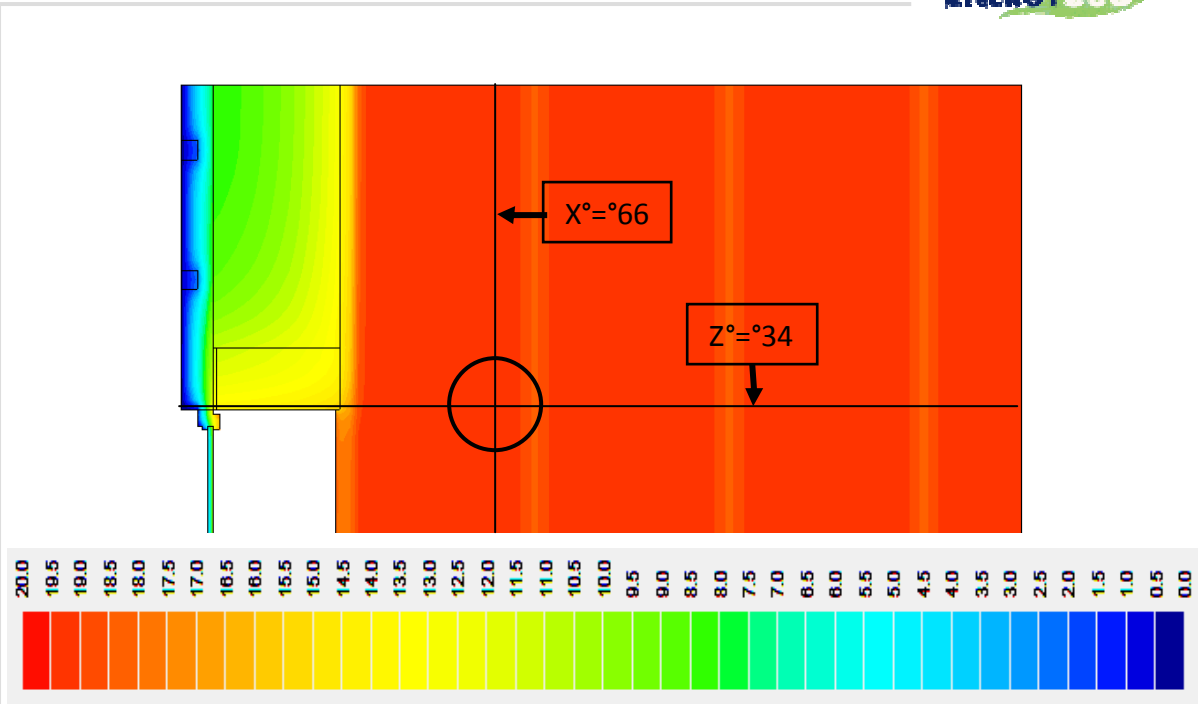


Fig. 259 : coupe dans le graphique des résultats à l'axe Y°=°27 et échelle des températures pour comparaison.

Nous pouvons voir sur l'image ci-dessus l'influence de la structure métallique sur les températures de surface. Le point indiqué ne se trouve pas dans une zone d'influence de la structure, mais nous allons cependant en tenir compte (l'imprécision de certaines données peut faire varier l'emplacement du point-capteur sur le modèle). Les températures semblent donc varier dans un intervalle plus grand que le capteur 2 : [18°C ; 19,5°C], soit un intervalle de facteurs de températures [0,9 ; 0,975].

4.9.5.) 4 M N 6 "F

*

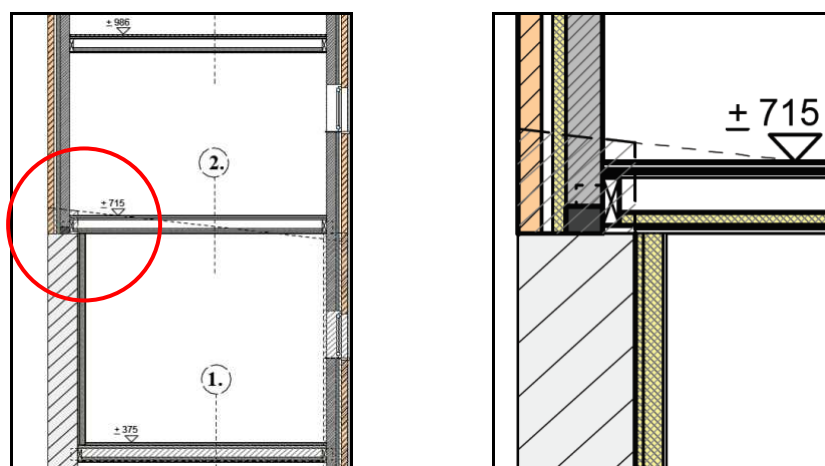


Fig. 260 : illustration du nœud constructif formé par la jonction d'un nouveau mur creux construit sur un ancien mur isolé par l'intérieur et d'un plancher intérieur

Il y a pour cela plusieurs éléments à considérer :

- A priori, le plancher ne fait pas partie de la surface de déperdition. La jonction qui nous intéresse ici est donc celle entre l'isolation intérieure du

mur existant conservé au R+1 (pièce du dessous dans la Fig. 260 ci-dessus) et l'isolation de la coulisse du mur creux érigé en surplomb de ce mur (R+2 dans la Fig. 260 ci-dessus)

- Nous devons tenir compte d'un élément interposé isolant (le bloc de verre cellulaire posé en pied du mur creux), mais l'isolation qui est dans le plancher jouera inévitablement un rôle dans la continuité éventuelle de la couche d'isolation. Notons qu'en réalité, les cavités du plancher ont été remplies d'isolant, sur toute la hauteur de la structure (soit 18 cm).
- Le plancher n'étant pas une surface de déperdition, sa structure en bois n'a pas été prise en compte à l'avance dans un éventuel calcul de déperdition. Elle devra par conséquent être intégrée à l'étude (tant comme « élément interposé isolant » que dans le modèle Trisco).

Nous savons déjà, via le point 4.3.2, qu'il est souhaitable de réaliser une jonction la plus complète possible entre l'isolation intérieure du niveau inférieur et l'isolant présent dans le plancher. La présence d'un OSB ou d'une plaque de plâtre entre ces deux isolants pourrait en théorie mettre à mal la conformité de ce premier nœud. L'épaisseur de ces matériaux et les très faibles déperditions supplémentaires associées nous permettent toutefois de relativiser l'importance de cette « non-conformité ». Le véritable nœud à analyser est donc l'interposition d'une structure bois et d'un bloc de verre cellulaire au pied du mur creux.

La règle de base 2 indique que tous les éléments isolants doivent répondre simultanément aux trois exigences connues :

- $\lambda \leq 0,2 \text{ W/mK}$
 - Comme précédemment mentionné, la valeur λ considérée pour le bois est la valeur par défaut de l'Annexe 7 des textes de l'AGW du 17 Avril 2008, soit 0,18 W/mK.
 - En ce qui concerne le bloc de verre cellulaire, la valeur λ est celle du « Périnsul » de chez Foamglass, soit 0,05 W/mK.
- $R \geq \min (R_1/2, R_2/2, 2)$
 - Comme précédemment mentionné (voir 4.6.1.3), il n'est permis d'additionner la résistance thermique des différents éléments interposés que dans une direction perpendiculaire à la ligne de coupure thermique. Dans notre cas, les éléments se succèdent, parallèlement à cette ligne de coupure thermique, nous ne pourrions donc pas additionner leurs résistances.
 - $R_{\text{pièce de bois}} = 0,18 \text{ [m]} / 0,18 \text{ [W/mK]} = 1 \text{ m}^2\text{K/W}$ Cette pièce sépare 18 cm de laine minérale (MW) et le bloc de verre cellulaire (CG).
 - $R_{\text{MW}} = 0,18 \text{ [m]} / 0,035 \text{ [W/mK]} = 5,143 \text{ m}^2\text{K/W}$
 - $R_{\text{CG}} = 0,14 \text{ [m]} / 0,05 \text{ [W/mK]} = 2,8 \text{ m}^2\text{K/W}$
 - Cette pièce de bois n'a donc pas la résistance requise.
 - Dans les mêmes conditions, le bloc de verre cellulaire est placé en

contact avec l'isolant du mur creux (PUR).

- $R_{CG} = 0,14 \text{ [m]} / 0,05 \text{ [W/mK]} = 2,8 \text{ m}^2\text{K/W}$
- $R_{PUR} = 3,333 \text{ m}^2\text{K/W}$
- La résistance de ce bloc de verre cellulaire est amplement suffisante pour satisfaire cette condition de conformité

○ $d_{\text{contact},i} \geq 1/2 * \min (d_{\text{insulating part}}, d_x)$

Le respect simultané des exigences pour chaque élément isolant interposé amène une spécification supplémentaire quant au contact des éléments entre eux :

« Si un élément isolant d'épaisseur $d_{\text{insulating part}}$ est accolé à une couche isolante, alors d_x est à considérer comme l'épaisseur de la couche isolante ; et la moitié de la plus petite des deux épaisseurs est la limite inférieure de l'épaisseur de contact entre eux.

Si un élément isolant d'épaisseur $d_{\text{insulating part}}$ est accolé à un autre élément isolant, alors d_x est à considérer comme l'épaisseur de l'autre élément isolant et, à nouveau, la moitié de la plus petite des deux épaisseurs est la limite inférieure de l'épaisseur de contact entre eux. »

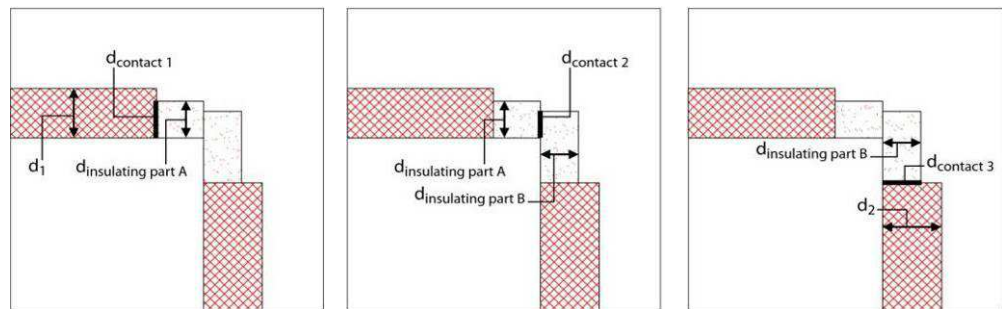


Fig. 261 : Illustration de l'exigence de contact lorsqu'il y a deux éléments interposés successifs

- Le bois est en contact plein et entier avec l'isolant du plancher (18 cm de contact)
- Le bloc de verre cellulaire est en contact plein et entier avec l'isolant présent dans la coulisse du mur creux (14 cm)
- L'épaisseur de contact entre le bloc de verre cellulaire et le bloc de bois doit valoir au minimum la moitié de la plus petite des deux épaisseurs, soit celle du bloc de verre cellulaire ($14 \text{ cm} / 2 = 7 \text{ cm}$). Si la mise en œuvre est conforme au plan délivré, ce contact est en réalité réalisé sur 11 cm, ce qui rend cette condition respectée.

La conformité de ce nœud n'est donc pas acquise dans l'immédiat. Nous allons analyser un modèle Trisco pour la vérifier (sachant que la valeur $\Psi_{e,jim}$ pour ce genre de nœud vaut $0,05 \text{ W/mK}$ (voir Fig. 117 plus haut).

Le modèle est exposé à la Fig. 262 ci-dessous, suivi par les résultats graphiques (Fig. 263) et les résultats numériques (Fig. 264) pour une différence de température de 20°C entre les ambiances intérieure et extérieure.

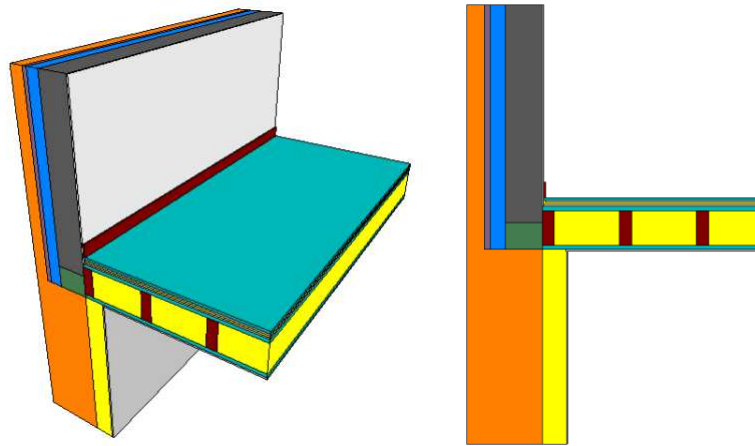


Fig. 262 : Trisco : vue 3D du modèle de la modélisation du nœud constructif formé par le nouveau mur creux, l'ancien mur plein isolé par l'intérieur et le plancher intérieur.

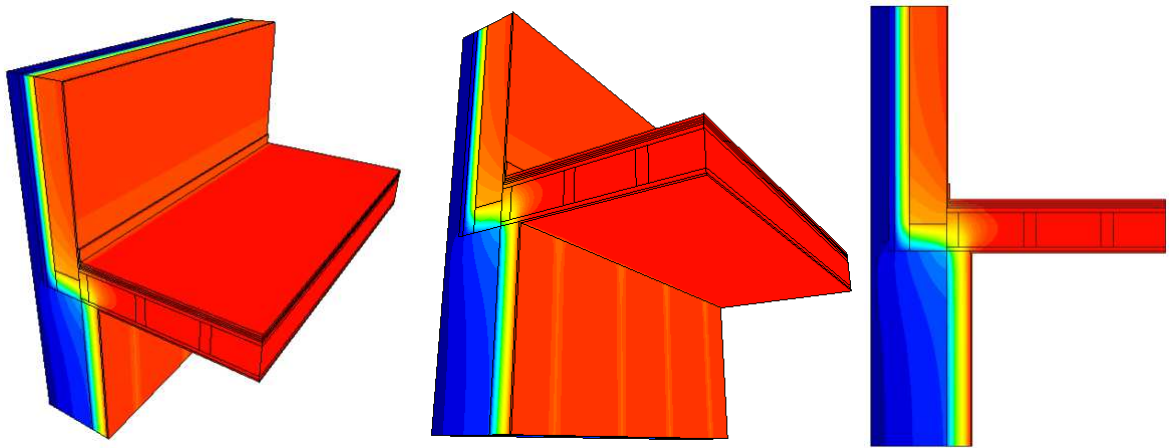


Fig. 263 : Trisco : résultats graphiques de la modélisation du nœud constructif formé par le nouveau mur creux, l'ancien mur plein isolé par l'intérieur et le plancher intérieur.

Clr.	Type	Nom	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
2	MATERIAL	briques	0.19	0	1	32	3.71	55	12	26
4	MATERIAL	acier	13.98	53	15	26	18.22	53	20	16
5	MATERIAL	plaque plâtre	17.39	0	13	34	20.00	90	54	26
7	MATERIAL	isolant 032	1.54	0	12	0	20.00	90	54	36
8	BC_SIMPL	exterieur	0.19	0	1	32	0.32	53	1	22
10	MATERIAL	Isolant 0.035 W	12.17	0	17	27	20.00	90	54	27
20	MATERIAL	Bois de structu	8.27	0	12	27	20.00	0	45	27
21	MATERIAL	OSB	3.48	0	12	26	20.00	90	54	26
24	MATERIAL	Blocs béton	16.06	0	7	31	19.20	49	12	63
25	MATERIAL	plâtre	17.29	0	12	34	19.30	50	13	63
26	MATERIAL	Recticel 0.024	0.70	0	5	28	18.44	40	7	63
27	MATERIAL	Verre cellulaire	1.64	0	7	26	16.69	55	11	31
30	BC_SIMPL	intérieur	18.27	12	21	24	20.00	90	54	25
72	EQUIMAT	coulisse ventil	0.43	0	4	30	1.06	45	5	63

Clr.	Type	Nom	ta [°C]	Fl.entr. [W]	Fl.sort. [W]
8	BC_SIMPL	exterieur		0.00	31.27
30	BC_SIMPL	intérieur		31.27	0.00

Fig. 264 : Trisco : résultats numériques de la modélisation du nœud constructif formé par le nouveau mur creux, l'ancien mur plein isolé par l'intérieur et le plancher intérieur.

Les résultats indiquent un flux sortant vers l'extérieur de 31,27 W, pour un ΔT de 20°C. Nous pouvons en déduire les flux suivants :

- Pour l'ancien mur isolé par l'intérieur :
 - $U_{\text{mur}} = 0,275 \text{ W/m}^2\text{K}$, $S_{\text{mur}} = 1,01 * 2,36 = 2,38 \text{ m}^2$
 - Soit un flux de $0,275 \text{ [W/m}^2\text{K]} * 2,38 \text{ [m}^2] * 20 \text{ [}^\circ\text{C]} = 13,1 \text{ W}$
- Pour le nouveau mur creux :
 - $U_{\text{mur}} = 0,29 \text{ W/m}^2\text{K}$, $S_{\text{mur}} = 1,269 * 2,36 = 2,99 \text{ m}^2$
 - Soit un flux de $0,29 \text{ [W/m}^2\text{K]} * 2,99 \text{ [m}^2] * 20 \text{ [}^\circ\text{C]} = 17,35 \text{ W}$
- Le plancher intérieur n'est pas une surface de déperdition, il n'y a donc aucun flux à déduire le concernant.

Le flux résiduel ($31,27 - 13,1 - 17,35 = 0,82 \text{ W}$) correspond aux déperditions supplémentaires engendrées par le nœud (non prises en compte dans les déperditions des murs extérieurs). Ce nœud linéaire modélisé mesure 2,36 m de long ; pour un ΔT de 1°C, cela correspond donc à un $\Psi_e = 0,017 \text{ W/mK}$, inférieur à la valeur limite de 0,05 W/mK. Le nœud est donc conforme à la PEB.

Concernant les températures de surface à l'endroit des capteurs, le CSTC renseigne la position suivante à évaluer :

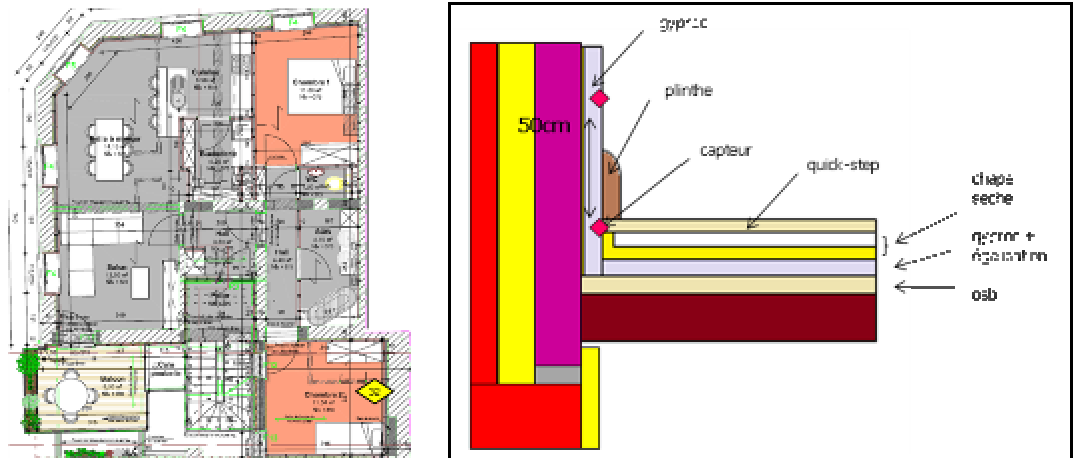


Fig. 265 : Emplacement du nœud constructif (formé par le nouveau mur creux, l'ancien mur plein isolé par l'intérieur et le plancher intérieur) et des capteurs du CSTC pour le monitoring.

Dans notre modèle, les capteurs ont les coordonnées suivantes :

- Capteur inférieur : $X \in [0 ; 90]$; $Y = 12$, $Z = 37$
- Capteur supérieur : $X \in [0 ; 90]$; $Y = 12$, $Z = 50$

Les points les plus proches délivrés par le logiciel sont les suivants :

- $[0 ; 14 ; 38]$ et $[90 ; 14 ; 38]$ (angle formé par la plinthe et le revêtement de sol, à chaque extrémité du modèle) : 18,64°C. Cette température est probablement très proche de celle que nous cherchons pour le capteur inférieur (bien que probablement légèrement plus élevée à cause de la présence de la plinthe et du revêtement en plâtre).

- [0 ; 13 ; 40] et [90 ; 13 ; 40] (au sommet de la plinthe, à l'interface avec le revêtement en plâtre, à chaque extrémité du modèle) : 18,55°C.
- [0 ; 13 ; 63] et [90 ; 13 ; 63] (contact plâtre – ambiance intérieure au sommet du modèle) : 19,30°C.

Voici une coupe dans le modèle en $Y = 12$:

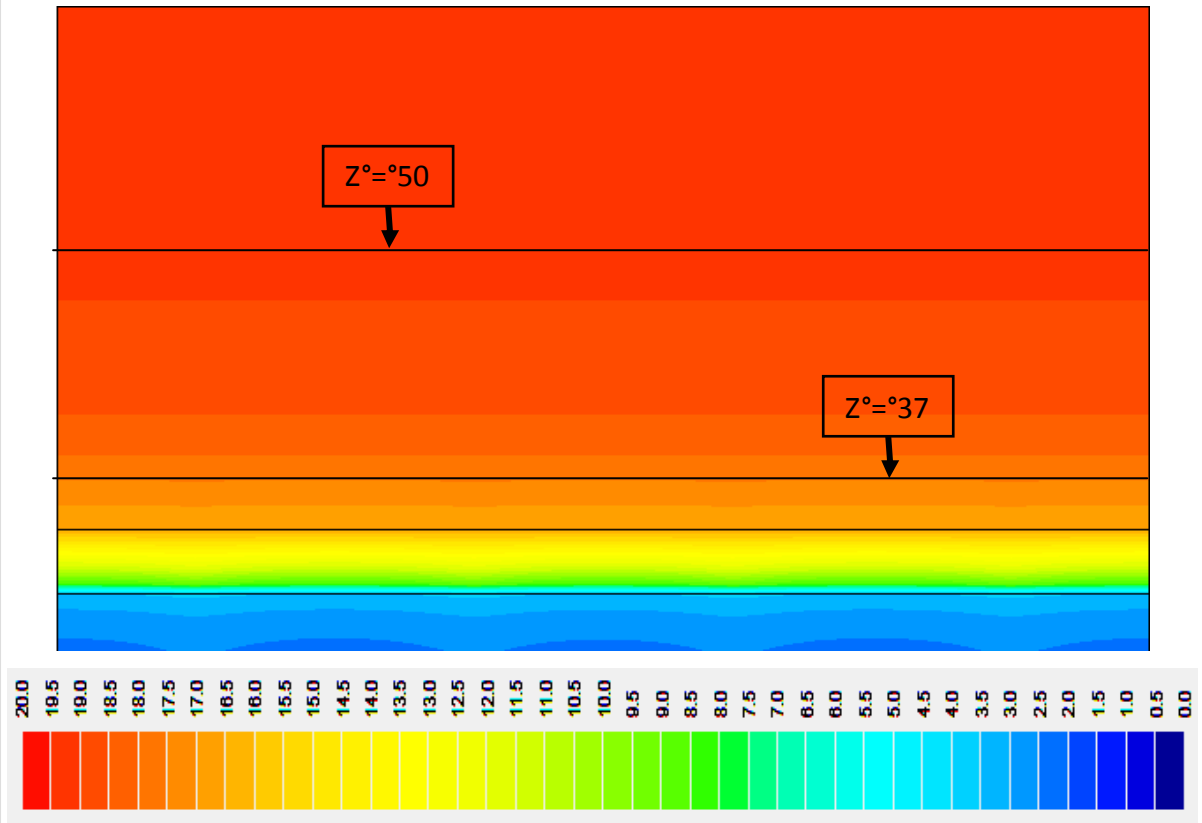


Fig. 266 : coupe dans le graphique des résultats à l'axe $Y^\circ=12$ et échelle des températures pour comparaison.

D'après la Fig. 266 ci-dessus, le capteur supérieur se trouve bien dans l'intervalle de température [19°C ; 19,5°C], soit l'intervalle de facteur de température [0,95 ; 0,975]. Le capteur inférieur quant à lui se trouve dans les intervalles [17°C ; 18°C] et [0,85 ; 0,9].

4.9.6.) 4 M N 6 9 *

Le point 4.3.1 a déjà étudié les déperditions supplémentaires imputables à l'encastrement d'une poutre métallique dans une maçonnerie (et traversant la couche d'isolation thermique du mur en question). Plusieurs différences notables nous permettent d'envisager l'étude ci-dessous :

- Dans le cas qui nous intéresse, deux poutres identiques (HEA 140) sont placées l'une à côté de l'autre (laissant un vide d'air non ventilé entre elles, en contact direct avec la maçonnerie non isolée).
- Ces poutres ne sont pas là par hasard : elles soutiennent un plancher qui a également été modélisé.

- Les côtés des poutres ont été isolés (voir Fig. 267 ci-dessous).
- L'encastrement des poutres dans la maçonnerie se fait sur une épaisseur de 15 cm (20 cm avaient été pris comme hypothèse dans le point 4.3.1).

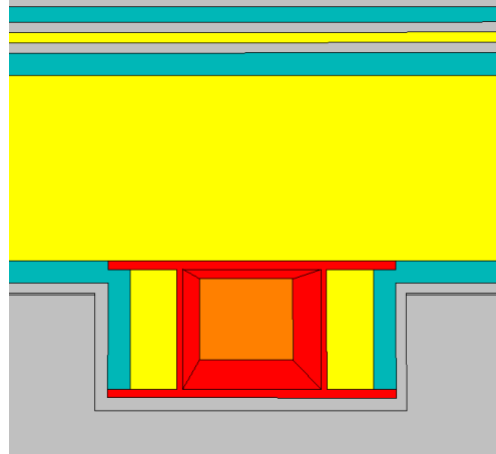


Fig. 267 : Trisco : coupe de détail dans les poutres métalliques

Voici (Fig. 268) le modèle encodé dans le logiciel Trisco, suivi de ses résultats graphiques (Fig. 269 et 270) :

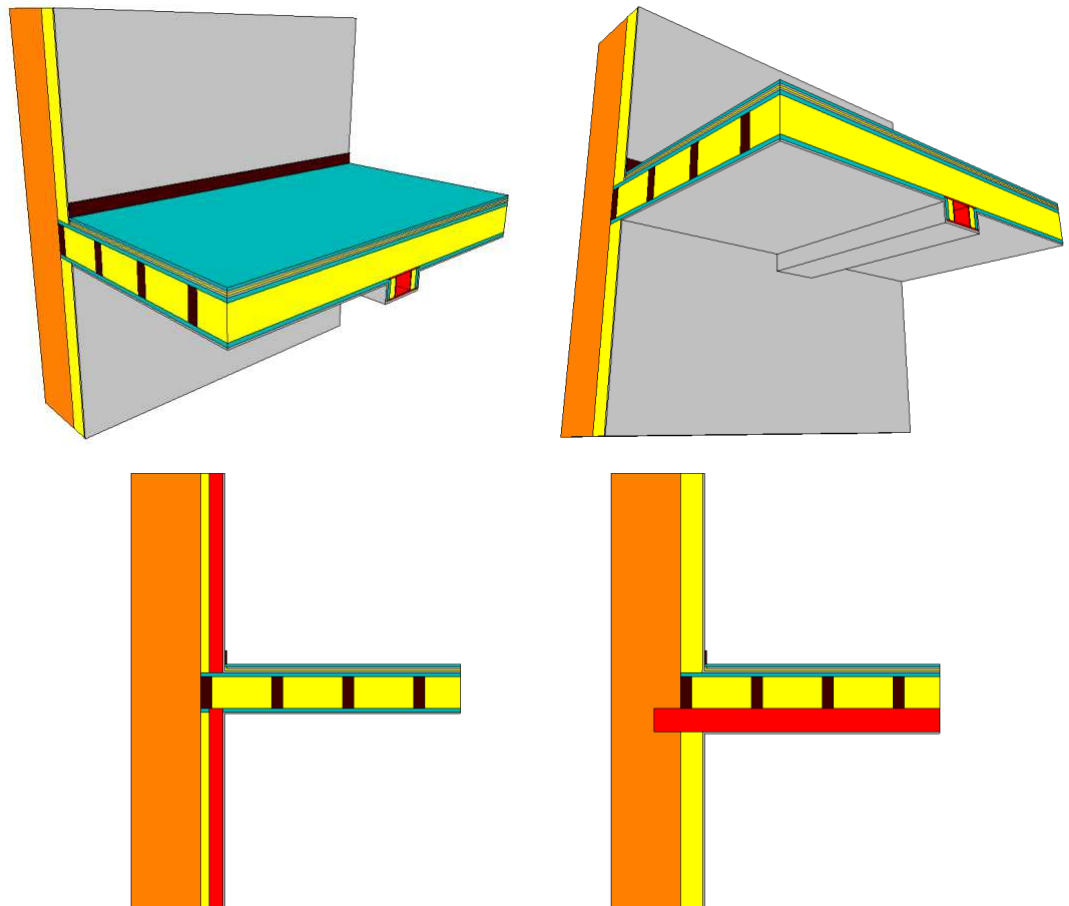


Fig. 268 : Trisco : vues 3D et coupes de la modélisation du nœud constructif formé par l'encastrement d'une double poutre métallique structurale (soutien de plancher intérieur) dans un mur existant isolé par l'intérieur. La coupe de gauche a été faite dans la structure métallique renfermant l'isolant thermique intérieur, celle de droite dans une des deux poutres structurales.

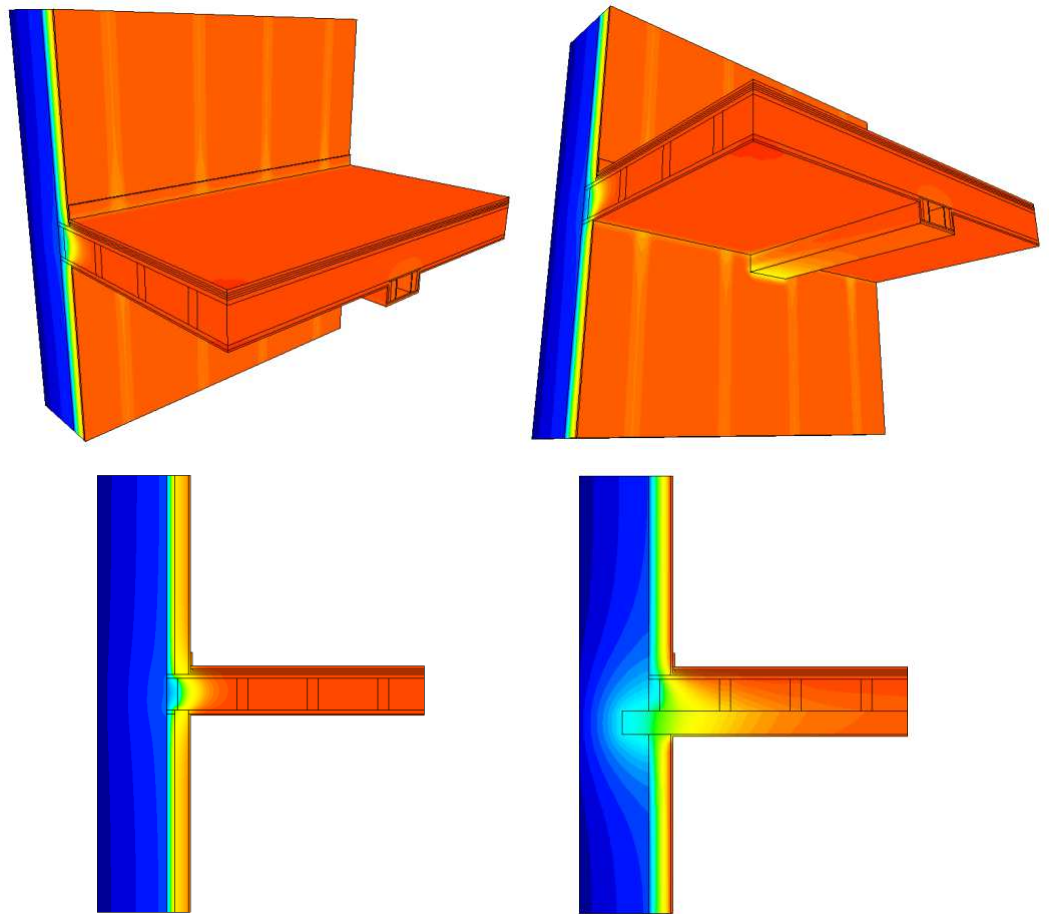


Fig. 269 : Trisco : résultats numériques de la modélisation du nœud constructif formé par l'encastrement d'une double poutre métallique structurale (soutien de plancher intérieur) dans un mur existant isolé par l'intérieur. La coupe de gauche a été faite dans la structure métallique renfermant l'isolant thermique intérieur, celle de droite dans une des deux poutres structurales.

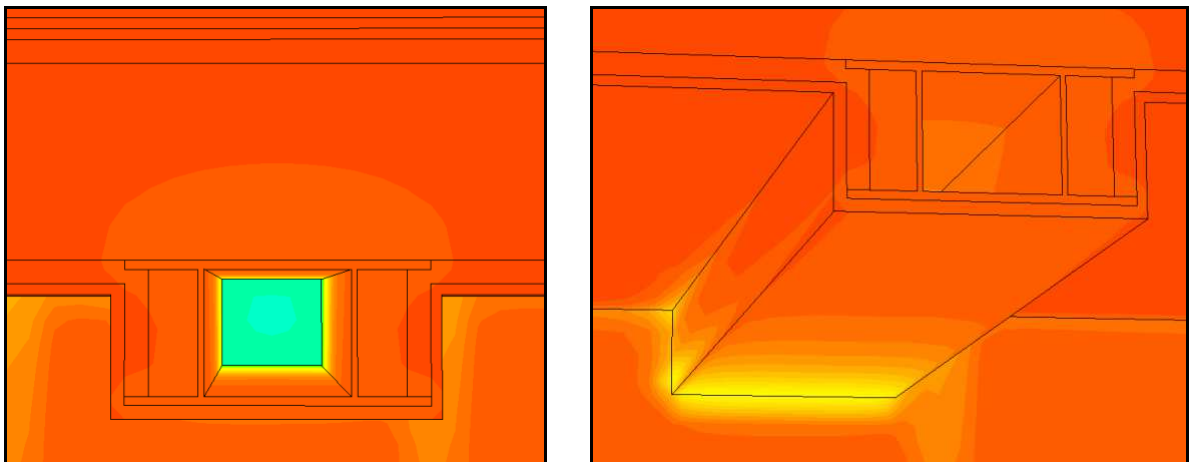


Fig. 270 : Trisco : coupe et vue 3D de détail des résultats graphiques du modèle formé par l'encastrement d'une double poutre métallique structurale (soutien de plancher intérieur) dans un mur existant isolé par l'intérieur.

Le CSTC a renseigné, comme pour les autres nœuds, la position des deux capteurs utilisés pour assurer le monitoring de ce nœud (Fig. 271) : le premier (le plus proche du mur) se trouve aux coordonnées [47 ; 21 ; 26], le second aux coordonnées [47 ; 38 ; 26].



Fig. 271 : Emplacement du nœud constructif (formé par l'encastrement d'une double poutre métallique de soutien du plancher intérieur dans un mur existant isolé par l'intérieur) et des capteurs du CSTC pour le monitoring.

Les points les plus proches, pour lesquels une température est donnée numériquement par le logiciel sont les points [39 ; 20 ; 25] (16,48°C) et [55 ; 20 ; 25] (16,82°C). Ces deux points sont les coins extrêmes du revêtement enrobant la poutre à l'endroit où elle s'encastre dans le revêtement mural, à égale distance du premier capteur. La différence de température tient dans la proximité de la structure métallique du mur, à droite sur la photo de la Fig. 271 ci-dessus. Pour compléter ceci, une analyse visuelle basée sur une coupe dans le modèle de résultats, en $Z = 26$ (pour mettre la poutre à nu) :

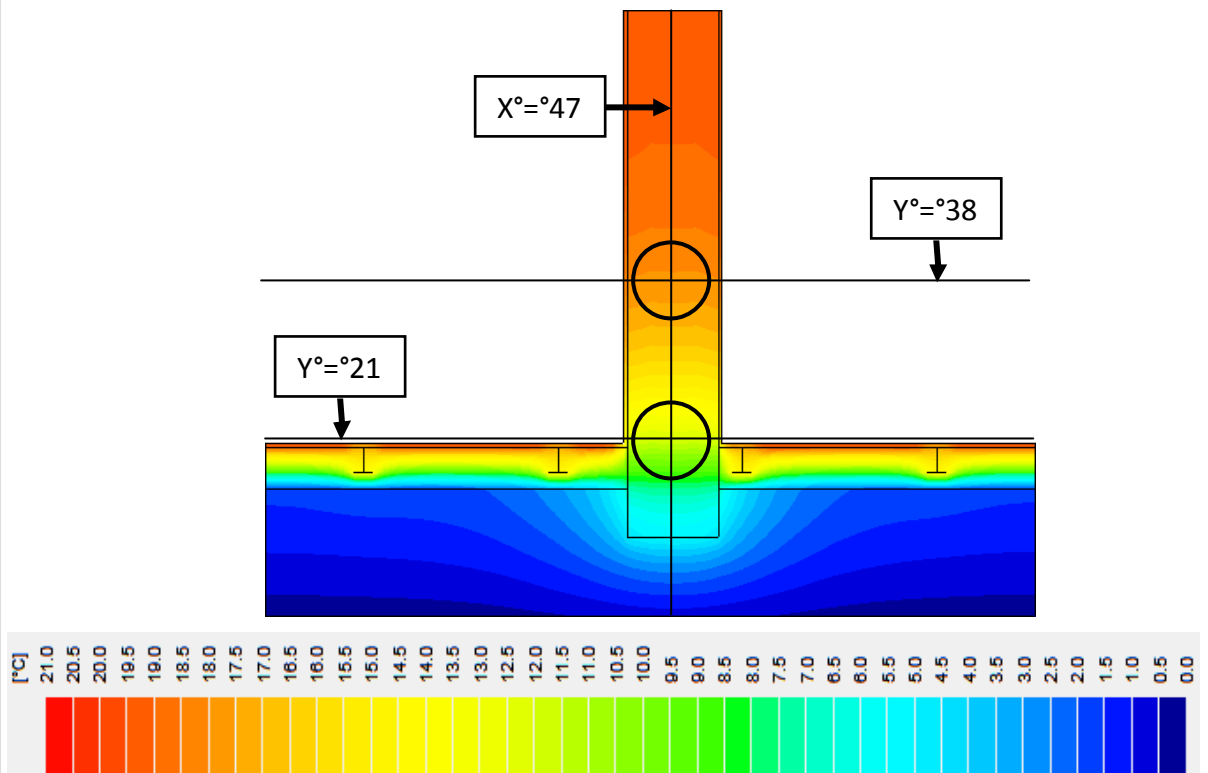


Fig. 272 : Trisco : coupe dans le graphique des résultats à l'axe $Z^{\circ}=26$ et échelle des températures pour comparaison.

La détermination de l'intervalle de température au niveau du premier capteur est rendue compliquée par une concentration d'isothermes, comme précédemment. Celle-ci est le résultat combiné des présences de l'isolant thermique environnant la poutre et de l'acier, fortement conducteur. La concentration du flux dans ce matériau conducteur est clairement visible dans la Fig. 273 ci-dessous, et montre encore (mais plus légèrement) son influence au niveau de deuxième capteur, plus éloigné. En conséquence, les intervalles de température et de facteur de température sont majorés (différemment pour les deux capteurs :

- Capteur 1 ([47 ; 21 ; 26]) \in [17°C ; 18,5°C], soit [0,85 ; 0,925] pour le facteur de température.
- Capteur 2 ([47 ; 38 ; 26]) \in [10°C ; 14°C], soit [0,5 ; 0,7] pour le facteur de température.

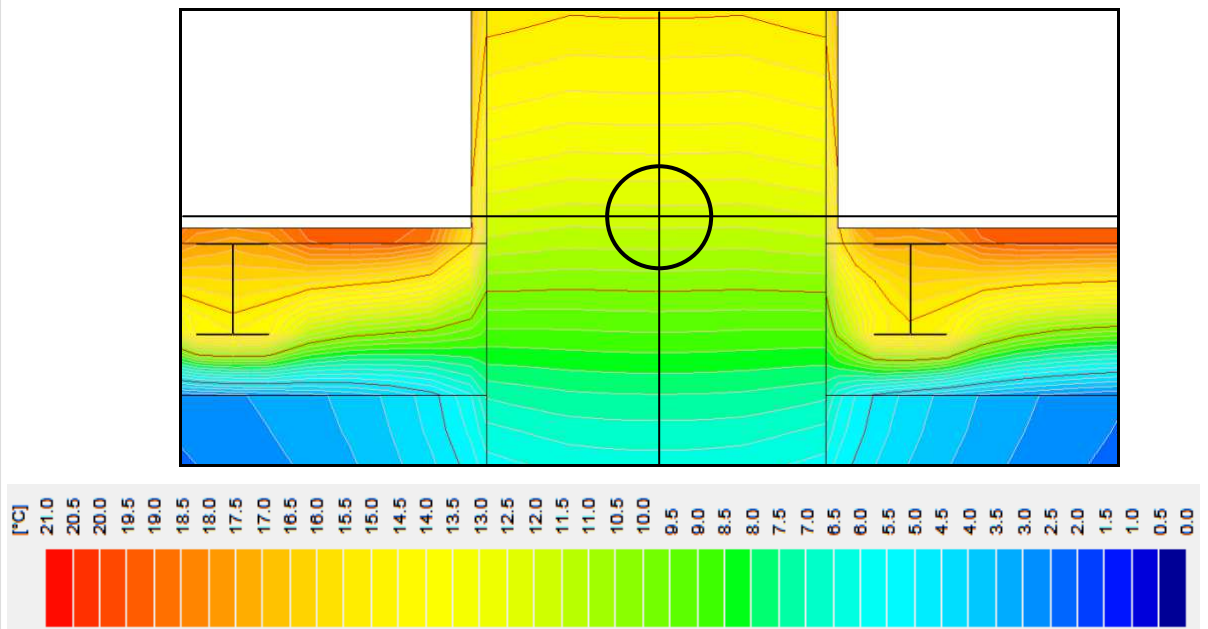


Fig. 273 : Trisco : zoom de détail sur le premier capteur dans le graphique des résultats à l'axe $Z^\circ=26$ et échelle des températures pour comparaison.

4.9.7.) 4 M / N 6 "F A

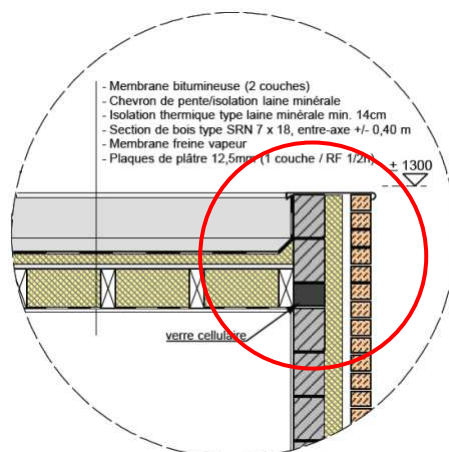


Fig. 274 : Illustration du nœud constructif formé par l'intersection de deux murs creux, de la toiture plate qu'ils supportent et de l'acrotère

Ici encore, l'analyse du nœud constructif devra être complète pour permettre la comparaison de la simulation avec les résultats mesurés par le CSTC.

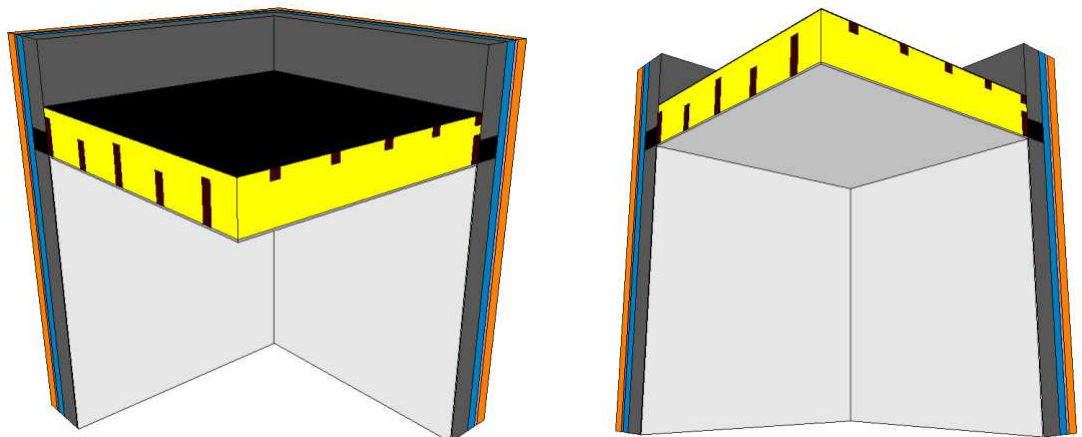
L'élément interposé ici est du verre cellulaire, qui devrait répondre aux différents critères de conformité, comme nous l'avons démontré dans le cas précédent. Par contre, la toiture ayant été analysée dans ce rapport comme une surface de déperdition, la structure bois n'est pas considérée comme un élément interposé isolant, puisqu'elle a déjà été prise en compte dans la composition de paroi PEB.

- Le verre cellulaire doit respecter les 3 conditions des éléments interposés isolants :
 - Valeur $\lambda \leq 0,2$ W/mK : comme mentionné plus haut, la valeur par défaut dans la PEB est 0,055 W/mK.
 - $R \geq \min (R_1/2, R_2/2, 2)$
 - $R_1 = R_{\text{isolant toiture}} = 3,435 \text{ m}^2\text{K/W}$ pour la couche [pannes + isolant] de 18 cm d'épaisseur + 0,469 $\text{m}^2\text{K/W}$ de moyenne pour la couche supplémentaire d'isolant entre chevrons de pente, soit 3,904 $\text{m}^2\text{K/W}$ au total.
 - $\rightarrow R_1/2 = 1,952 \text{ m}^2\text{K/W}$
 - $R_2 = R_{\text{isolant mur}} = 3,333 \text{ m}^2\text{K/W}$ pour 8 cm de PUR.
 - $\rightarrow R_2/2 = 1,667 \text{ m}^2\text{K/W}$
 - $R = R_{\text{verre cellulaire}} = 0,14 \text{ [m]} / 0,055 \text{ [W/mK]} = 2,545 \text{ m}^2\text{K/W}$

La condition est donc bien respectée.

- Condition de contact minimal : la pièce de bois a été prise en compte dans la composition de la toiture, elle ne doit donc pas être prise en compte. Par conséquent, le bloc de verre cellulaire étant en contact plein et entier avec les couches d'isolation présentes en toiture et dans le mur, la condition de contact est respectée et le nœud peut être considéré conforme.

Il nous reste à étudier la température au niveau des capteurs par une modélisation 3D dans Trisco :



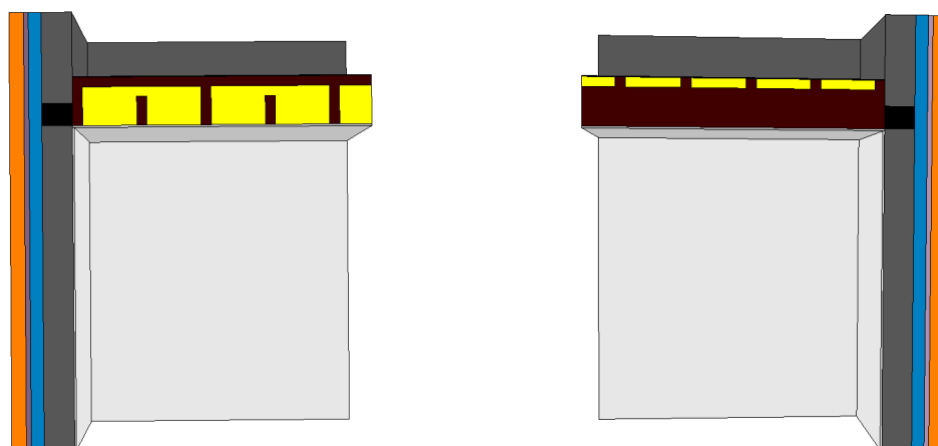


Fig. 275 : Trisco : vues 3D et coupes de la modélisation du nœud constructif formé par l'intersection de deux murs creux, de la toiture plate qu'ils supportent et de l'acrotère.

Les résultats graphiques de la modélisation sont les suivants (Fig. 276) :

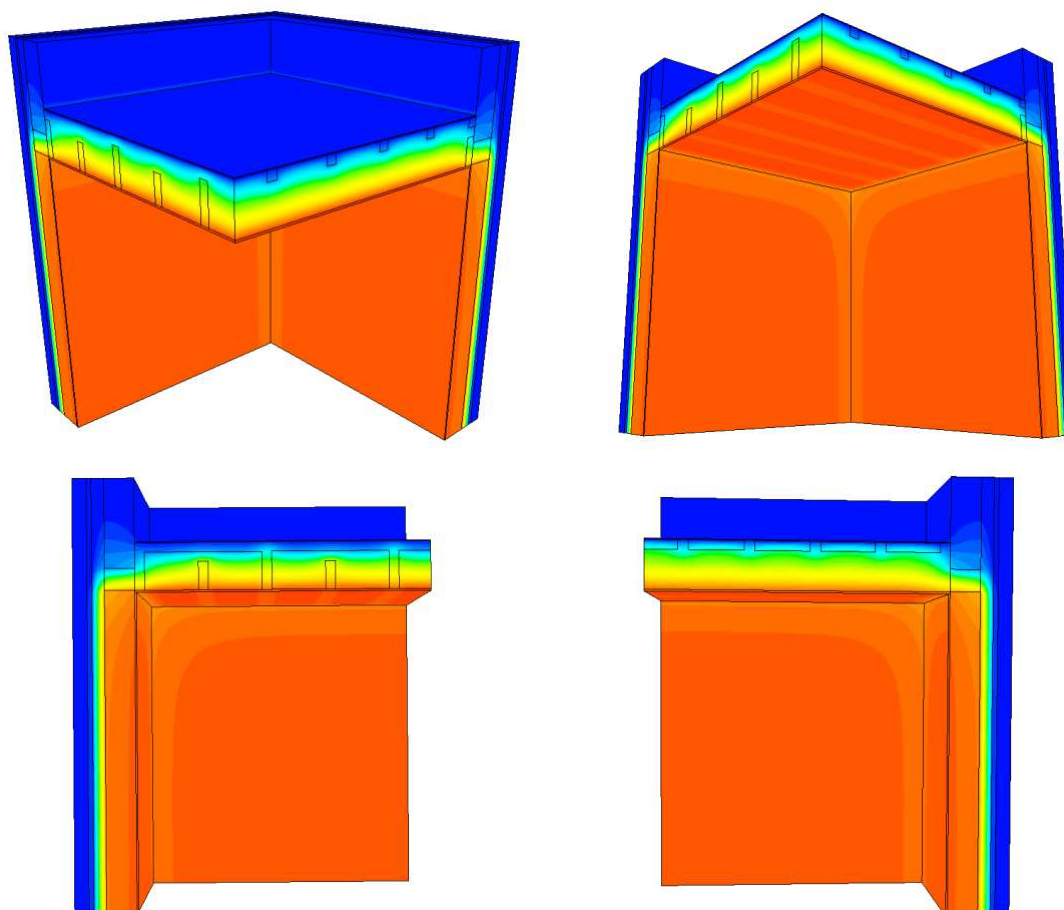


Fig. 276 : Trisco : résultats graphiques de la modélisation du nœud constructif formé par l'intersection de deux murs creux, de la toiture plate qu'ils supportent et de l'acrotère.

La Fig. 277 ci-dessous décrit la position des cinq capteurs placés par le CSTC pour le monitoring de ce nœud.

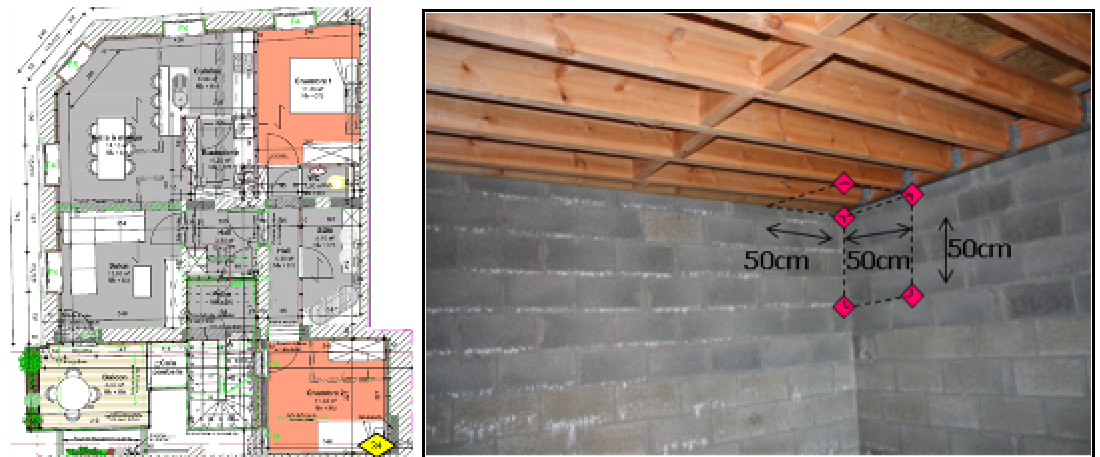


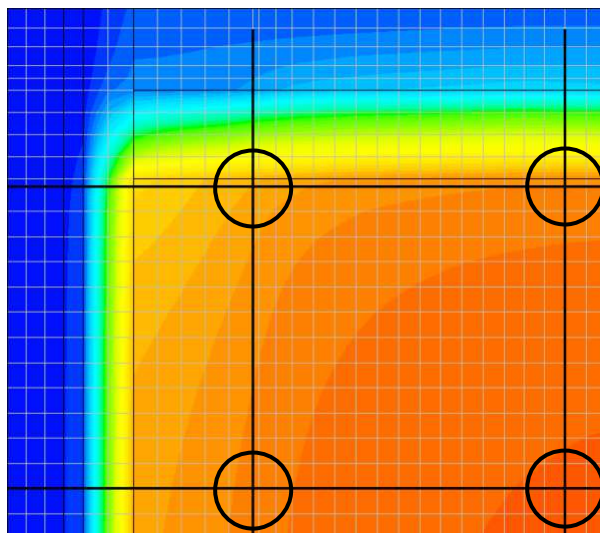
Fig. 277 : Emplacement du nœud constructif (formé par l'intersection de deux murs creux, de la toiture plate qu'ils supportent et de l'acrotère) et des capteurs du CSTC pour le monitoring.

Dans notre modèle, ces capteurs ont les coordonnées suivantes :

- Capteur 1 (celui qui est au point intersectif entre les deux murs et la toiture) : $X = 12$; $Y = 12$; $Z = 51$.
- Capteur 2 (éloigné du capteur 1 de 50 cm à l'horizontale, le long du mur de droite sur la photo ci-dessus) : $X = 12$; $Y = 28$; $Z = 51$.
- Capteur 3 (éloigné du capteur 1 de 50 cm à la verticale, le long de l'arête intersective des deux murs) : $X = 12$; $Y = 12$; $Z = 38$.
- Capteur 4 (éloigné du capteur 2 de 50 cm à la verticale et du capteur 3 de 50 cm à l'horizontale) : $X = 12$; $Y = 28$; $Z = 38$.
- Capteur 5 (placé au plafond, à ± 50 cm dans les directions X et Y du capteur 1) : $X = 28$; $Y = 28$; $Z = 51$.

Le seul point dont la température (numérique) donnée par le logiciel est proche du capteur 1 (mais sur les faces intérieures des revêtement : $[13 ; 13 ; 50]$) : $17,38^{\circ}\text{C}$.

Une analyse visuelle est donc nécessaire ; ci-dessous (Fig. 278), la coupe en $X = 12$ permet de positionner les capteurs 1 à 4.



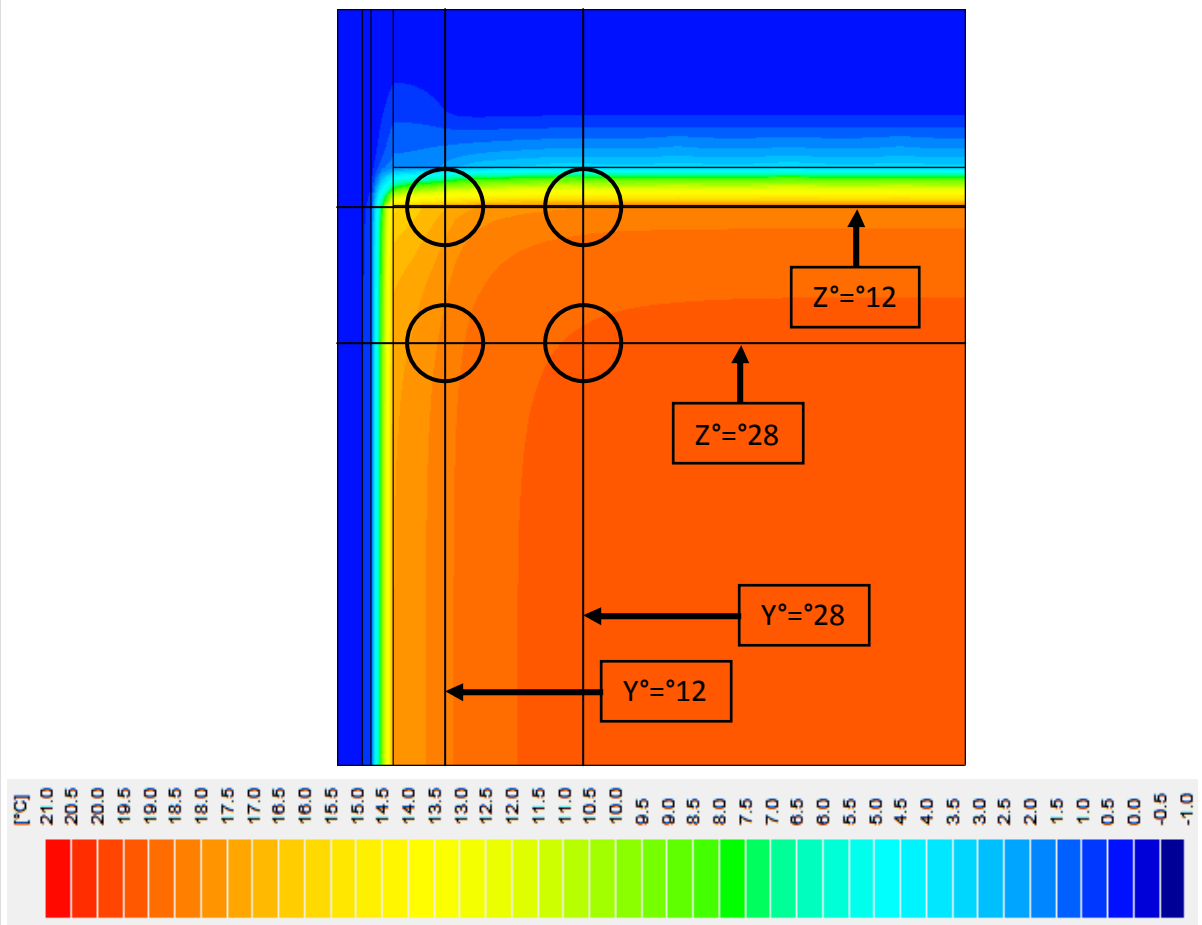


Fig. 278 : Trisco : coupes (détaillée et générale) dans le graphique des résultats à l'axe $X^\circ=12$ et échelle des températures pour comparaison.

- Le premier capteur (dans le coin supérieur gauche des coupes ci-dessus) se trouve presque sur l'isotherme des 17°C . Par sécurité (concentration d'isothermes et imprécision sur la position exacte du capteur), nous intégrerons ce point dans l'intervalle $[16^\circ\text{C} ; 18^\circ\text{C}]$, soit un facteur de température compris entre 0,8 et 0,9.
- Le deuxième capteur (coin supérieur droit sur la Fig. 278) est, quant à lui, très proche de l'isotherme des 18°C sur notre modèle. En conséquence, l'intervalle de température est $[17^\circ\text{C} ; 19^\circ\text{C}]$, celui du facteur de température, $[0,85 ; 0,95]$.
- Le troisième capteur (point inférieur gauche) se situe dans l'intervalle $[18^\circ\text{C} ; 18,5^\circ\text{C}]$. Dans le même état d'esprit, nous l'élargirons à $[17,5^\circ\text{C} ; 19^\circ\text{C}]$. Le facteur de température appartient donc à $[0,875 ; 0,95]$.
- Le quatrième capteur (coin inférieur droit) est proche de l'isotherme des 19°C ; les intervalles correspondants seront donc $[18^\circ\text{C} ; 19,5^\circ\text{C}]$ et $[0,9 ; 0,975]$.

Reste à analyser le cinquième capteur. Une coupe en $Z = 51$ (Fig. 279) permet de le positionner et d'analyser visuellement les intervalles :

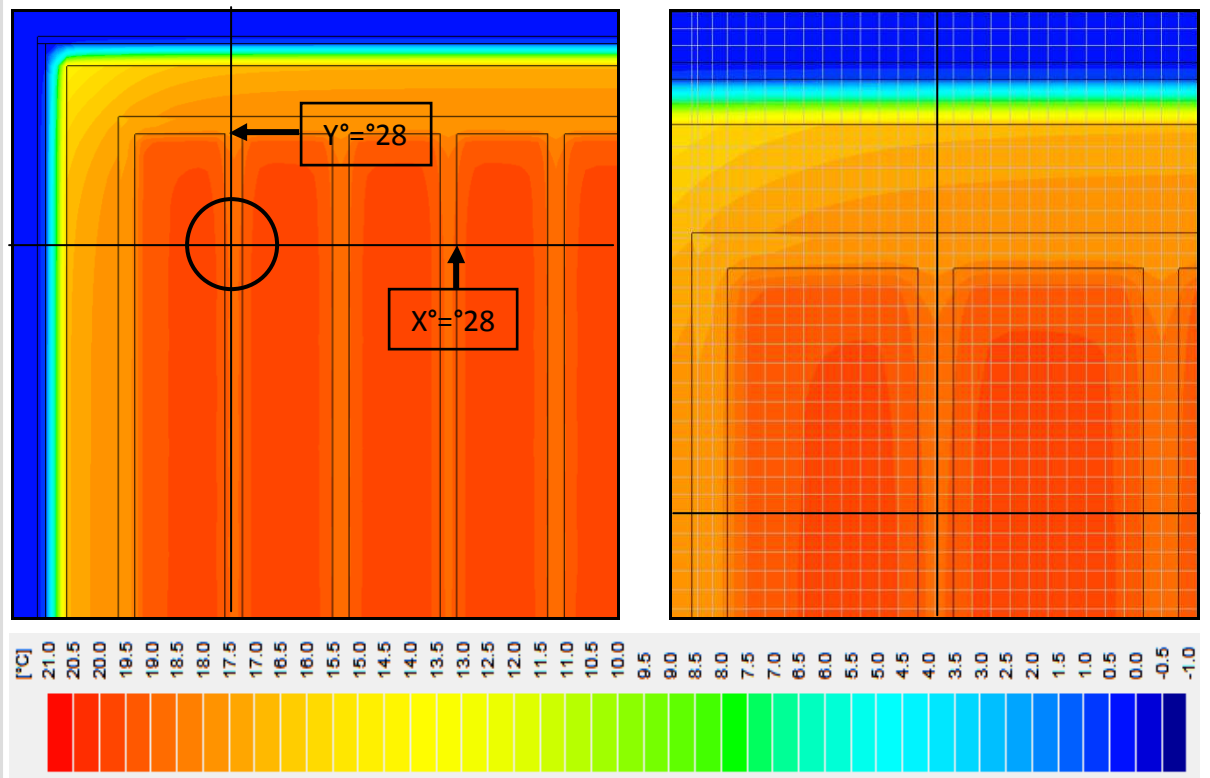


Fig. 279 : Trisco : coupes (détaillée et générale) dans le graphique des résultats à l'axe $Z^{\circ}=^{\circ}51$ et échelle des températures pour comparaison.

Ce point se trouve dans l'intervalle de température $[18,5^{\circ}\text{C} ; 19^{\circ}\text{C}]$. Par sécurité, nous l'agrandirons à $[18^{\circ}\text{C} ; 19,5^{\circ}\text{C}]$, rendant ainsi l'intervalle des facteurs de température correspondant égal à $[0,9 ; 0,975]$.