

Simulation de la post-isolation thermique de toitures existantes du bâtiment B35 –
Site du CHU

Étude des nœuds constructifs, du risque de condensation superficielle et du comportement hygrothermique de la toiture

EnergySuD – Université de Liège

KEZIMANA Marie-Faustine
MONFILS Stéphane
HAUGLUSTAINE Jean-Marie
24/10/2016



Table des matières

1	Étude de transfert de chaleur en 3 dimensions (TRISCO)	3
1.1	Nœud constructif 1 (NC1) – Chéneau central toiture supérieure	3
1.1.1	Données et hypothèses	3
1.1.2	Résultats	4
1.1.3	Conclusions	4
1.2	Nœud constructif 2 (NC2) – Façade principale au niveau +2	5
1.2.1	Situation existante	6
1.2.2	Rénovation 1 : Ré-isolation thermique des toitures uniquement.....	12
1.2.3	Rénovation 2 : Remplacement du vitrage uniquement.....	18
1.2.4	Rénovation 3 : Ré-isolation thermique de la toiture & remplacement du vitrage.....	23
1.2.5	Conclusions	28
1.2.6	Propositions d'améliorations.....	30
2	Étude du comportement hygrothermique de la toiture (GLASTA)	34
2.1	Données et hypothèses	34
2.1.1	Climats	34
2.1.2	Composition de paroi	36
2.2	Simulations GLASTA et résultats.....	37
2.2.1	Point bas d'un pan de toiture : 16 cm de cellulose	38
2.2.2	Point haut d'un pan de toiture : 92 cm de cellulose.....	39
2.3	Conclusions	40

Il est envisagé d'isoler les toitures du bâtiment B35, sur le site du CHU-Liège (ULg). La présente étude consiste à déterminer le risque de condensation superficielle intérieure des parois aux niveaux de nœuds constructifs problématiques (discontinuité de l'isolation thermique) et de simuler le transfert de vapeur d'eau à travers les toitures suite aux travaux de rénovation envisagés.

1 ÉTUDE DE TRANSFERT DE CHALEUR EN 3 DIMENSIONS (TRISCO)

1.1 NŒUD CONSTRUCTIF 1 (NC1) – CHÉNEAU CENTRAL TOITURE SUPÉRIEURE



Figure 1 - Situation du nœud constructif 1

1.1.1 Données et hypothèses

Col.	Type	CEN-rule	Name	Pat.	λ [W/mK]	ϵ [-]	θ [°C]	h [W/m²K]	q [W/m²]
0	BC_SIMPL	NIHIL	Toiture int.				18.0	8.00	0
1	BC_SIMPL	NIHIL					0.0	25.00	0
2	MATERIAL		BA int.		1.700				
3	MATERIAL		LM old		0.100				
4	MATERIAL		Cellulose new		0.039				
5	MATERIAL		Bois dense		0.180				

Tableau 1 – NC1 : Données et hypothèses

Les caractéristiques de l'isolant existant (laine minérale) sont inconnues. Nous supposons une couche d'isolation aux performances thermiques dégradées au fil du temps. Sa conductivité thermique λ devrait ainsi être comprise en 0,05 et 0,1 W/mK.

La température intérieure est fixée à 18°C, et 0°C côté extérieur.

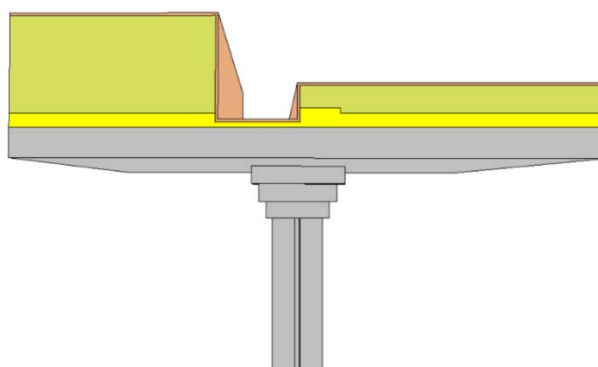


Figure 2 – NC1 : Présence d'une isolation thermique existante *continue*

1.1.2 Résultats

TRISCO - Calculation Results

TRISCO data file: B35_détaill1.trc

Number of nodes = 169607

Heat flow divergence for total object = 5.28483e-011

Heat flow divergence for worst node = 0.00274158

Col.	Type	Name	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
0	BC_SIMPL	Toiture int.	15.76	72	57	42	18.00	52	54	0
1	BC_SIMPL		0.00	92	64	67	1.70	34	64	49
2	MATERIAL	BA int.	12.98	46	56	47	18.00	52	54	0
3	MATERIAL	LM ancienne	0.97	46	49	51	17.74	34	95	47
4	MATERIAL	Cellulose new	0.00	91	65	66	16.81	56	95	50
5	MATERIAL	Bois dense	0.00	92	64	67	6.77	34	65	48

Tableau 2 – NC1 : Résultats de la simulation TRISCO

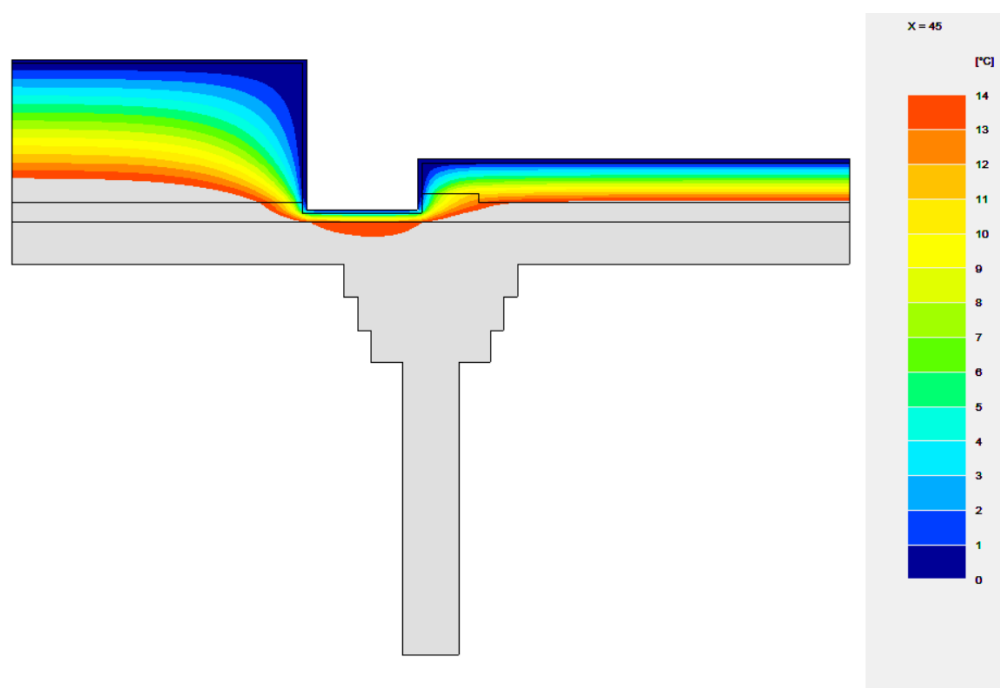


Figure 3 - NC1 : Isothermes

1.1.3 Conclusions

En considérant la présence de l'isolation thermique de laine minérale existante, placée ***sans interruption*** au niveau du chéneau central de la toiture supérieure, la température intérieure de surface de la paroi ne descend pas en dessous de 14°C. Le risque de condensation superficielle intérieure reste donc faible à l'endroit du chéneau central.

1.2 NŒUD CONSTRUCTIF 2 (NC2) – FAÇADE PRINCIPALE AU NIVEAU +2

Il s'agit d'un nœud constructif plus complexe, combinant plusieurs jonctions de parois toiture-mur. Par ailleurs, il existe des ponts thermiques qui ne seront pas résolus suite aux travaux envisagés. L'étude comprendra donc l'analyse de la situation existante, la situation où seules les toitures seront ré-isolées, ensuite où seuls les vitrages seront remplacés, et enfin, la situation combinant ces deux travaux d'amélioration.

Nous proposons ensuite, en conclusion, l'analyse de problèmes existants et non résolus par les travaux, et une proposition d'amélioration.

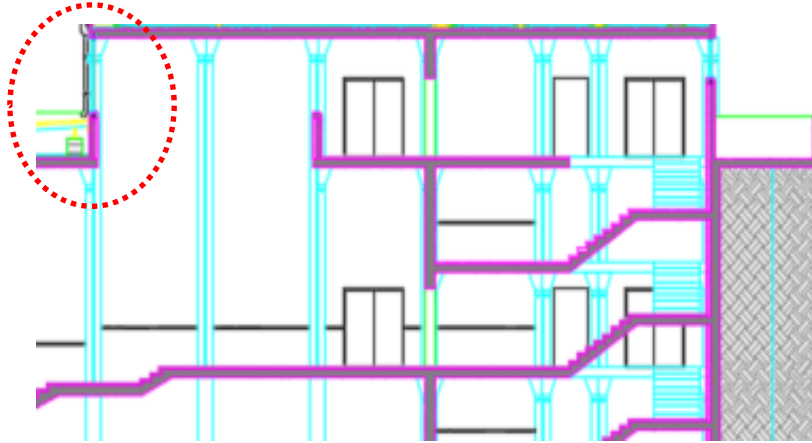


Figure 4 - Situation du nœud constructif 2



Figure 5 – Vues de la façade analysée

1.2.1 Situation existante

1.2.1.1 Hypothèses matériaux et ambiances

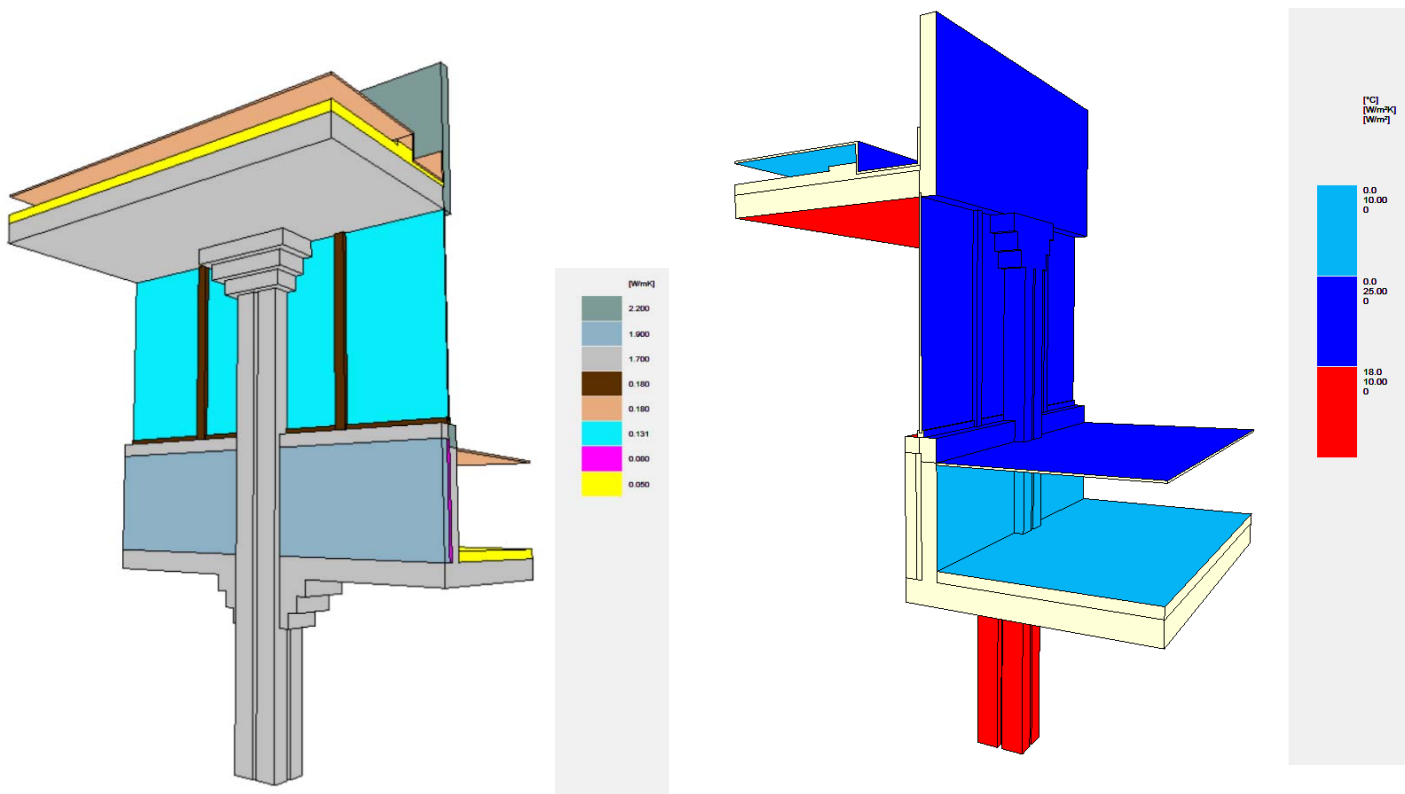


Figure 6 - NC2, Situation initiale : Aperçu graphique du modèle TRISCO

Col.	Type	CEN-rule	Name	Pat.	λ [W/mK]	ϵ [-]	θ [°C]	h [W/m²K]	q [W/m²]
0	BC_SIMPL	NIHIL	Toiture int.				18.0	10.00	0
1	BC_SIMPL	NIHIL	Ext 0°				0.0	25.00	0
2	MATERIAL		BA int.		1.700				
3	MATERIAL		LM old		0.050				
5	MATERIAL		Voligeage		0.180				
6	MATERIAL		Heraklith		0.080				
7	MATERIAL		Blocs Béton lourd int.		1.900				
8	MATERIAL		Vitrage Ug 3.1		0.131				
9	MATERIAL		Afzélia (feuillu)		0.180				
10	MATERIAL		BA ext		2.200				
11	BC_SIMPL	NIHIL	EANC				0.0	10.00	0

Tableau 3 - NC2, Situation initiale : Données et hypothèses

1.2.1.2 Résultats

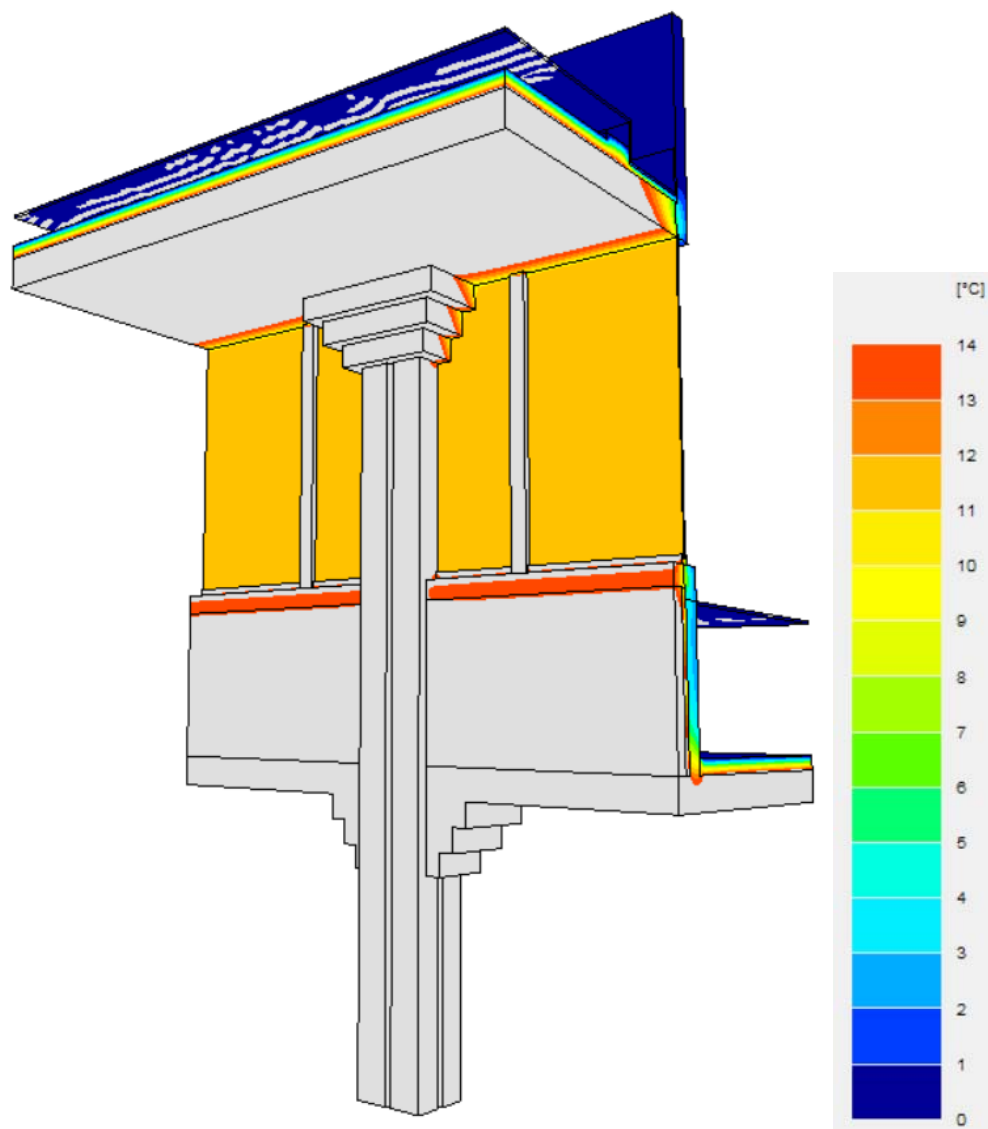


Figure 7 - NC2, Situation initiale : Vue intérieure, Isothermes

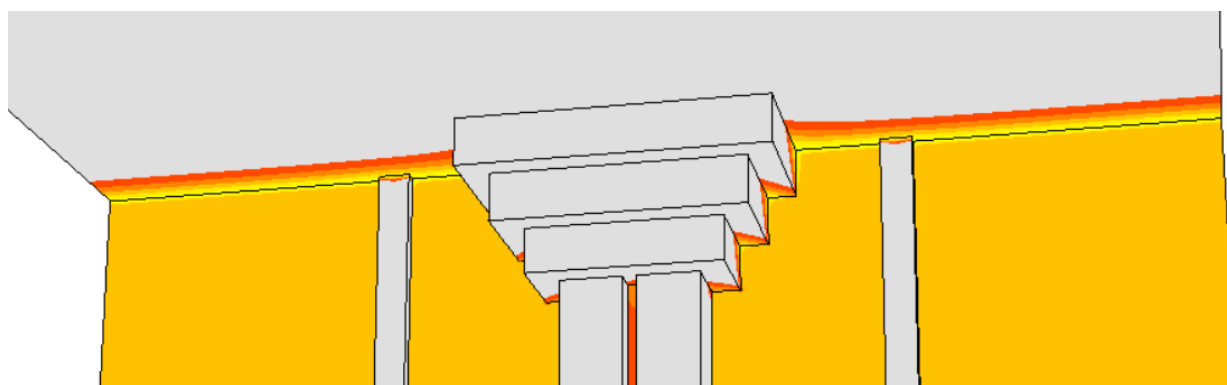


Figure 8 - NC2, Situation initiale : Vue au niveau du plafond

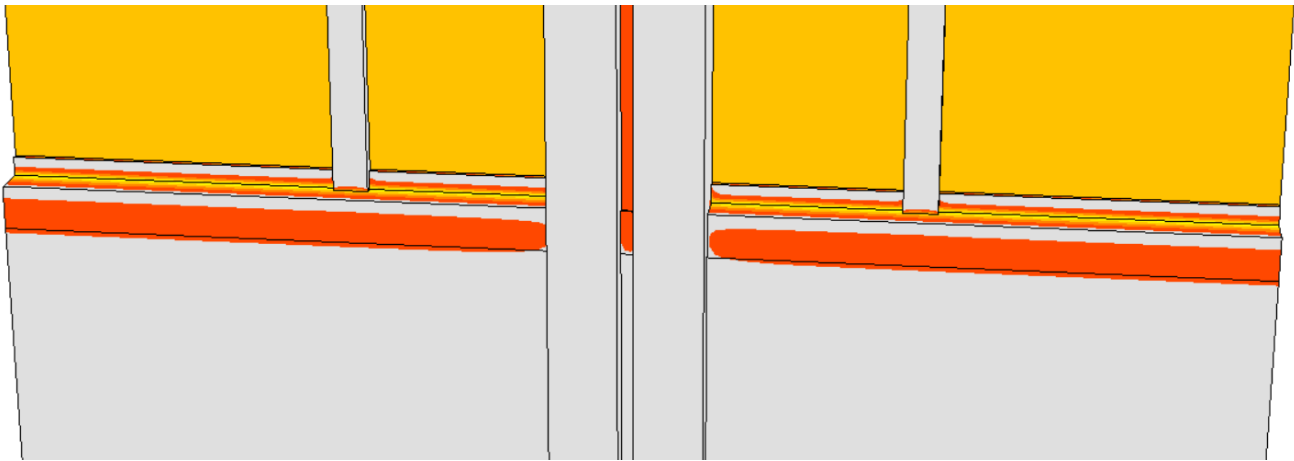


Figure 9 - NC2, Situation initiale : Vue au niveau de l'appui de fenêtre

Les endroits où l'isolation thermique des parois est interrompue (= ponts thermiques) sont marqués sur les figures 7, 8 et 9 par des zones de température de surface intérieure plus froides. Les zones où cette température superficielle intérieure est inférieure à 14°C (en rouge) sont également les surfaces où le risque de formation de condensation superficielle est élevé.

Ces zones sont :

- À la jonction toiture-façade, au niveau du plafond, sur une profondeur d'une vingtaine de centimètres comptés à partir du châssis de fenêtre ;
- À l'appui de fenêtre, côté intérieur, sur une dizaine de centimètres comptés depuis le châssis

TRISCO - Calculation Results										
TRISCO data file: B35_détail2.sit.initiale.trc										
Number of nodes = 1623894										
Heat flow divergence for total object = 4.566e-013										
Heat flow divergence for worst node = 200										
Col.	Type	Name	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
0	BC_SIMPL	Toiture int.	7.19	53	103	279	18.00	119	118	3
1	BC_SIMPL	Ext 0°	-0.03	158	98	176	4.67	53	100	175
2	MATERIAL	BA int.	0.59	119	88	164	18.00	119	118	3
3	MATERIAL	LM old	0.00	105	152	298	16.23	0	0	112
5	MATERIAL	Voligeage	-0.00	211	52	163	4.54	0	138	293
6	MATERIAL	Heraklith	3.60	0	102	152	15.93	211	106	116
7	MATERIAL	Blocs Béton lou	10.44	0	106	168	16.66	107	113	119
8	MATERIAL	Vitrage Ug 3.1	2.12	137	101	270	12.36	86	103	252
9	MATERIAL	Afzélia (feuill	-0.03	158	98	176	17.23	152	107	199
10	MATERIAL	BA ext	0.00	105	93	354	7.92	118	103	175
11	BC_SIMPL	EANC	-0.00	211	52	163	7.42	0	93	117

Tableau 4 – NC2, Situation initiale : Résultats de la simulation TRISCO

Par sa nature lisse et non poreuse, le vitrage existant, peu isolant constitue aussi un lieu privilégié à la formation de condensation superficielle intérieure.

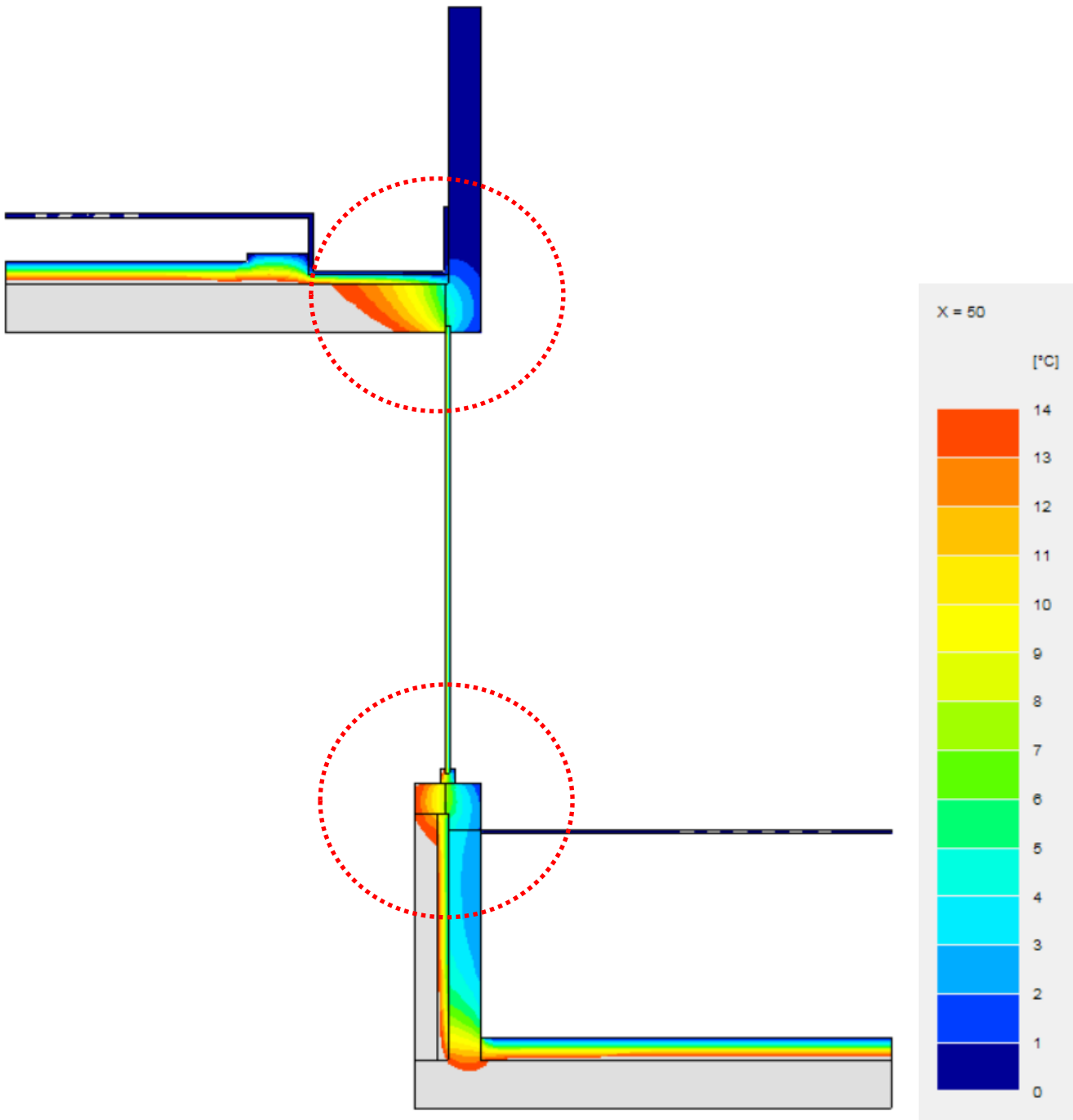


Figure 10 - NC2, Situation initiale : Coupe verticale au centre d'une baie de fenêtre

Sur la Figure 10, l'interruption de l'isolation thermique des parois est marquée des perturbations dans les isothermes (seuls les isothermes des températures inférieures à 14°C sont représentées sur la figure).

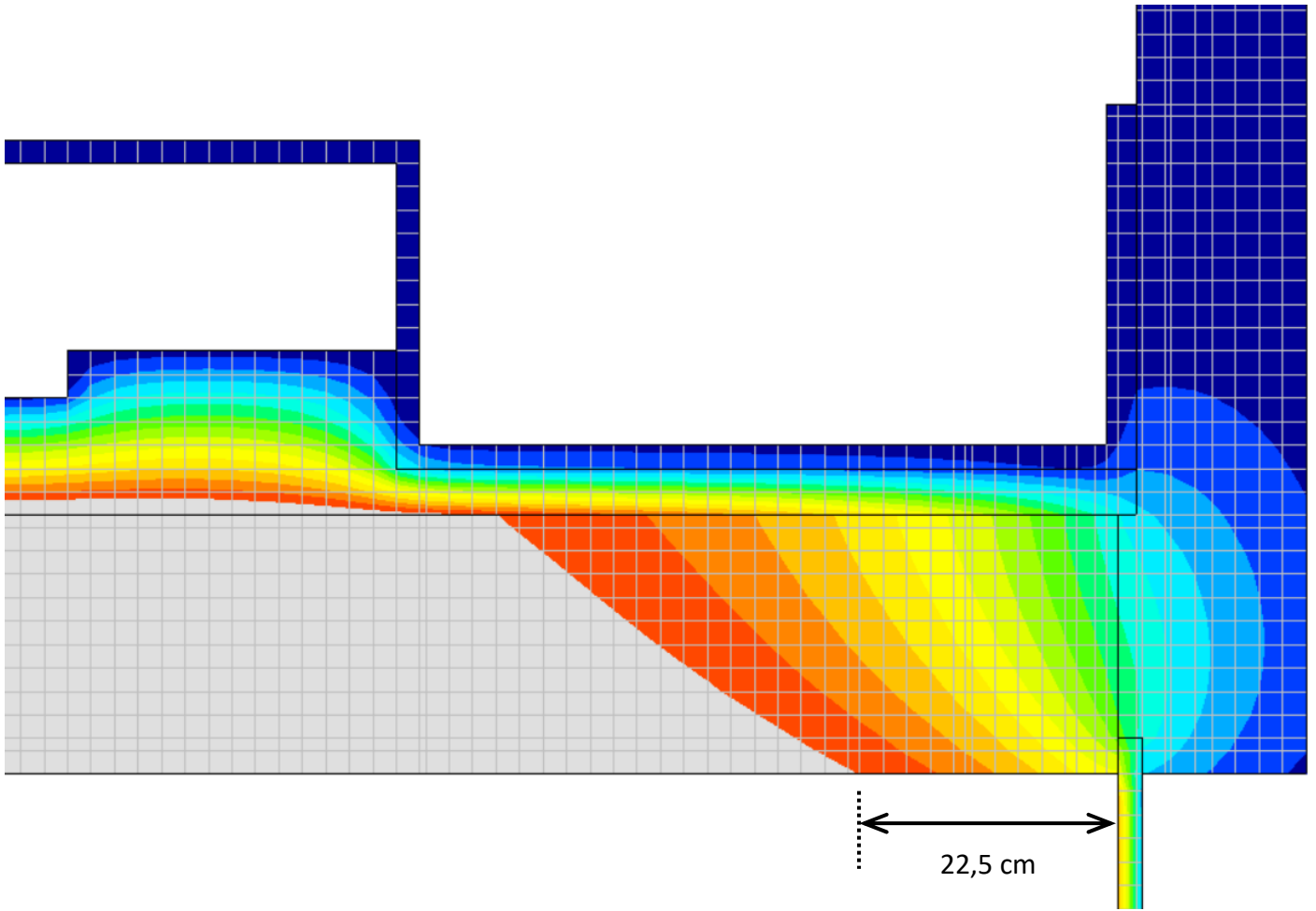


Figure 11 - NC2, Situation initiale : Agrandissement au niveau du plafond

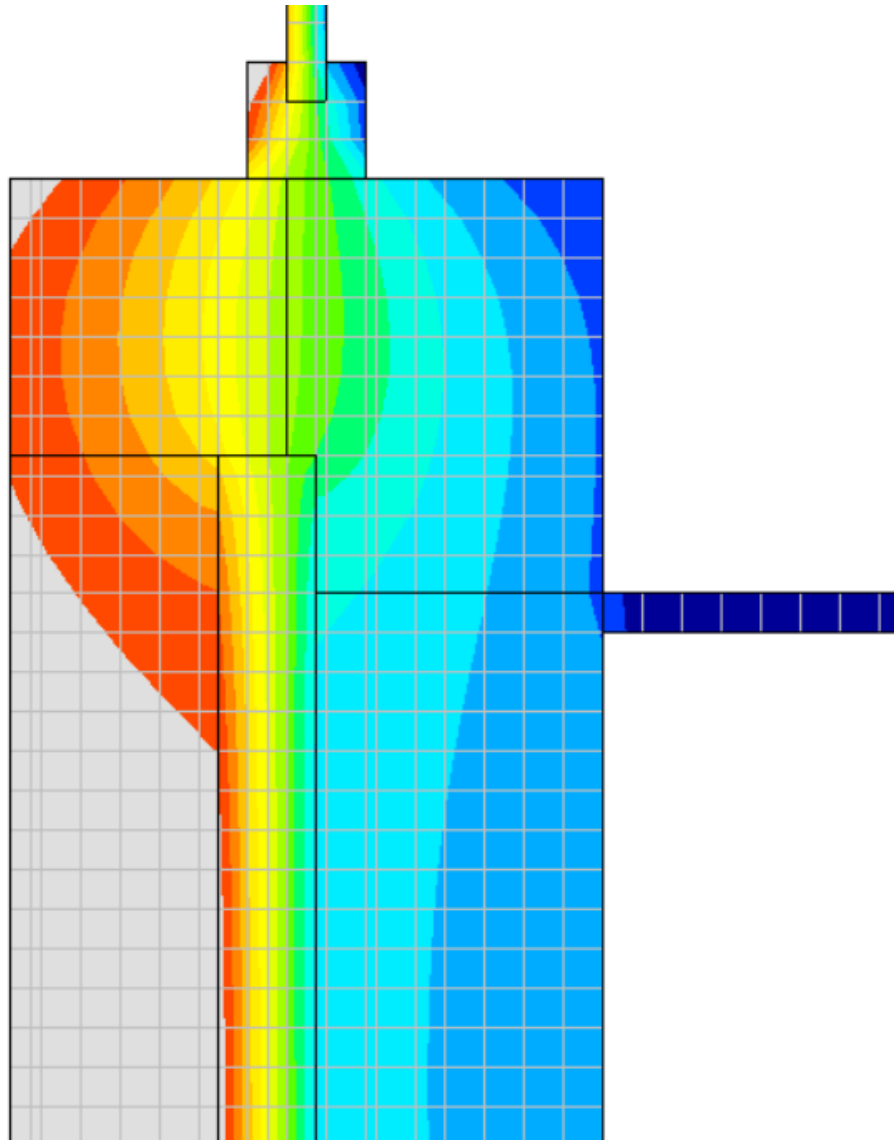


Figure 12 - NC2, Situation initiale : Agrandissement au niveau de l'appui de fenêtre

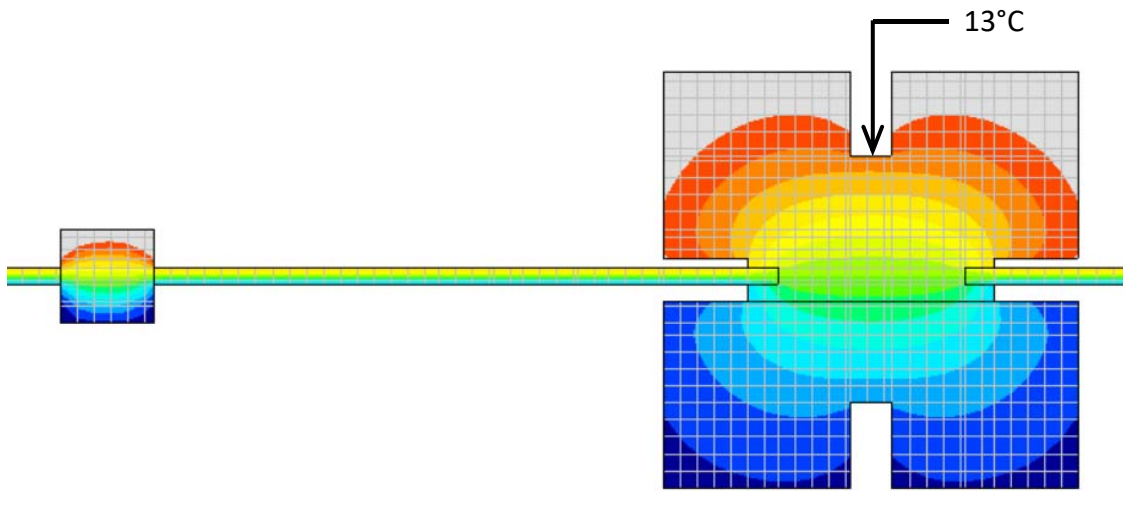


Figure 13 - NC2, Situation initiale : Coupe horizontale au travers de la colonne

La Figure 13 représente la modélisation de la colonne en coupe. La forme du trèfle est remplacée par un ensemble de « carrés capables ». Au niveau des arêtes intérieures, la température superficielle est comprise entre 9 et 14°C.

1.2.2 Rénovation 1 : Ré-isolation thermique des toitures uniquement

1.2.2.1 Hypothèse matériaux et ambiances

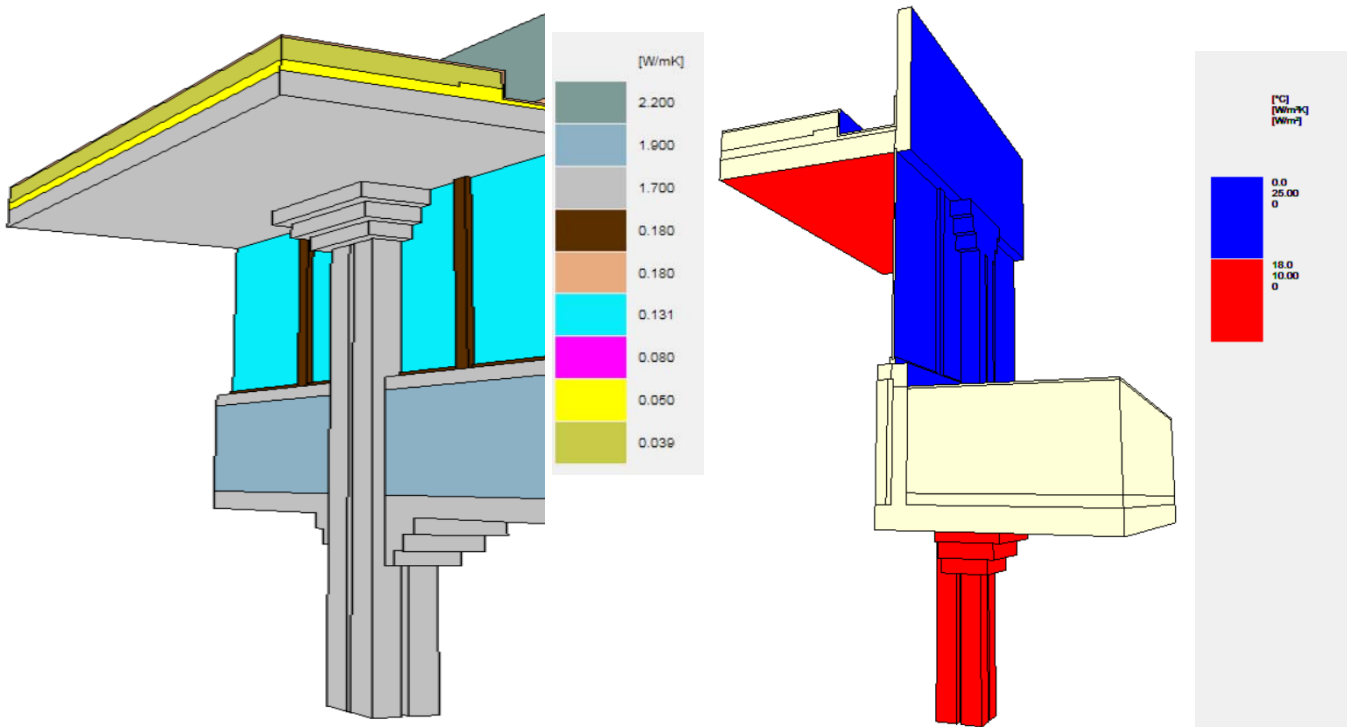


Figure 14 - NC2, Rénovation 1 : Aperçu graphique du modèle TRISCO

Col.	Type	CEN-rule	Name	Pat.	λ [W/mK]	s [-]	θ [°C]	h [W/m ² K]	q [W/m ²]
0	BC_SIMPL	NIHIL	Toiture int.				18.0	10.00	0
1	BC_SIMPL	NIHIL	Ext 0°				0.0	25.00	0
2	MATERIAL		BA int.		1.700				
3	MATERIAL		LM old		0.050				
4	MATERIAL		Cellulose new		0.039				
5	MATERIAL		Voligeage		0.180				
6	MATERIAL		Heraklith		0.080				
7	MATERIAL		Blocs Béton lourd int.		1.900				
8	MATERIAL		Vitrage Ug 3.1		0.131				
9	MATERIAL		Afzélia (feuillu)		0.180				
10	MATERIAL		BA ext		2.200				

Tableau 5 - NC2, Rénovation 1 : Données et hypothèses

1.2.2.2 Résultats

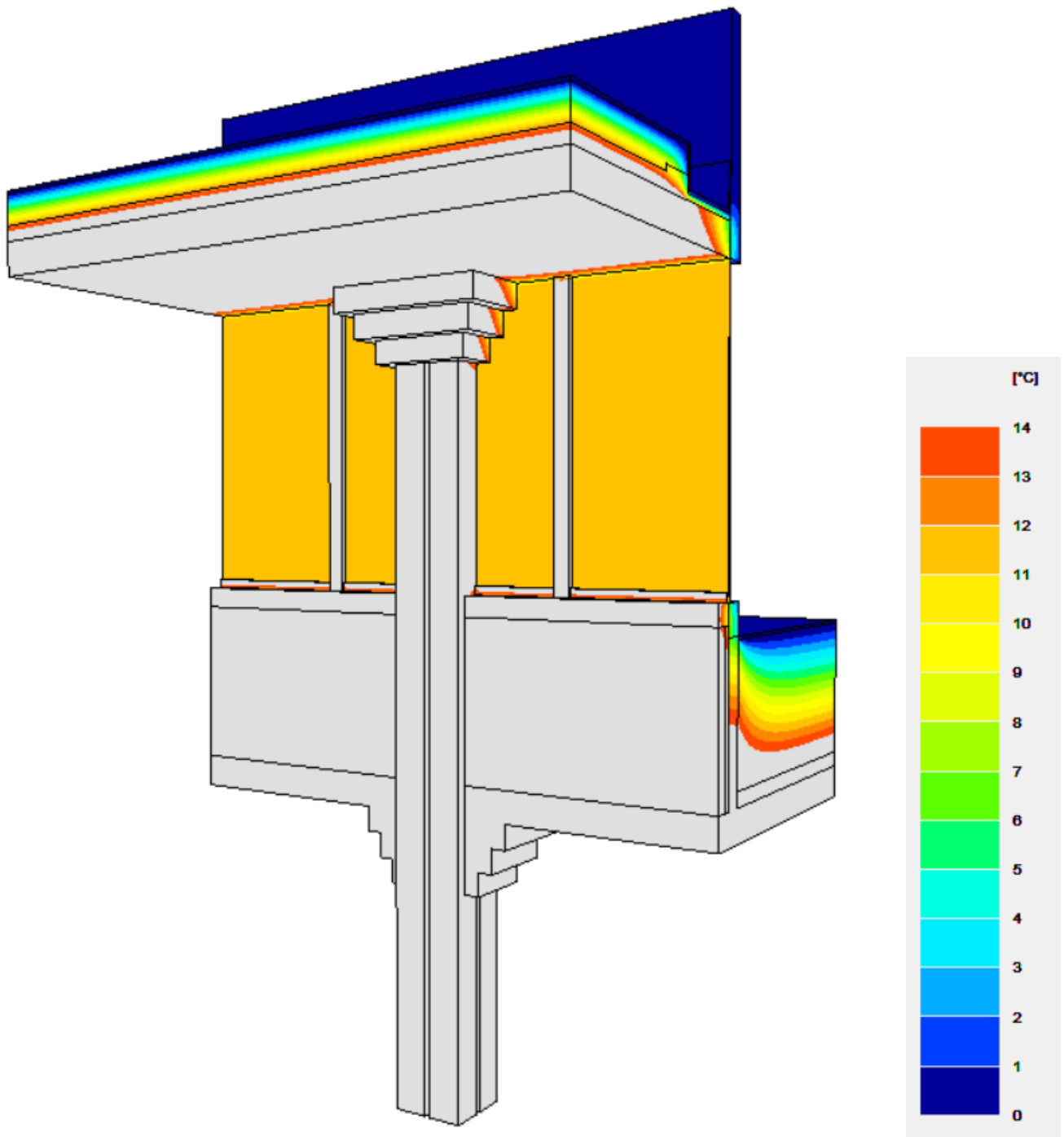


Figure 15 - NC2, Rénovation 1 : Vue intérieure

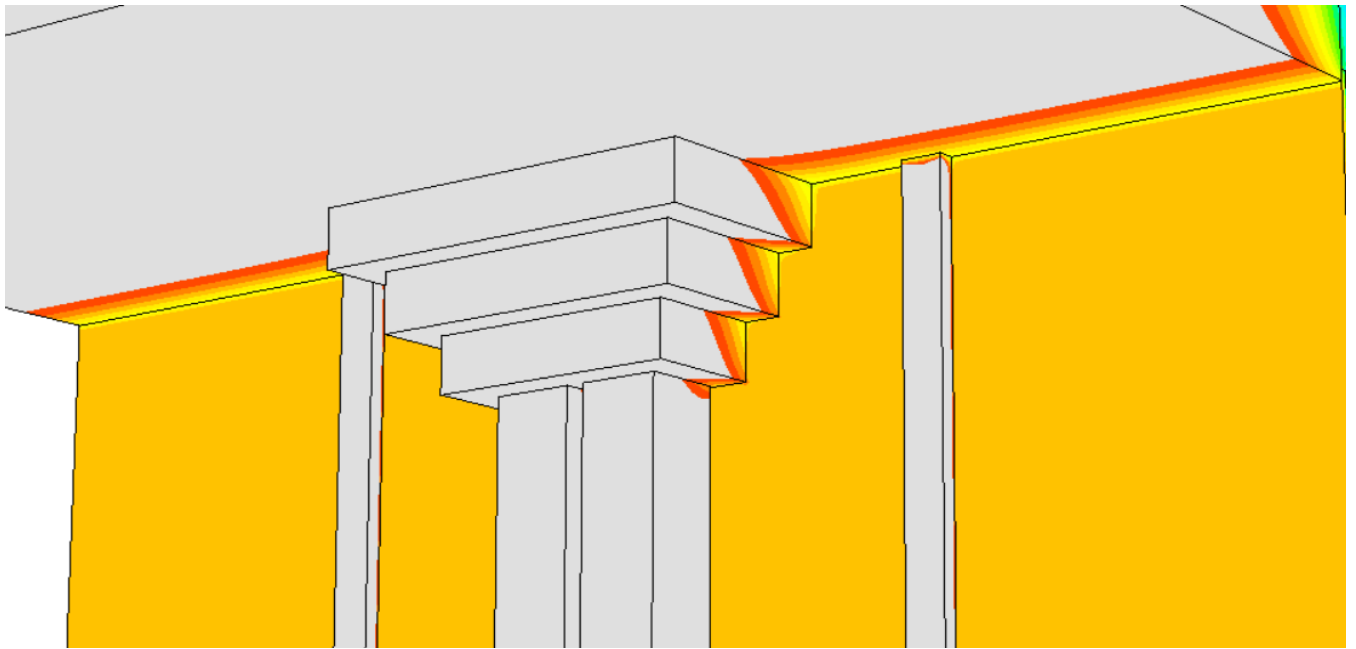
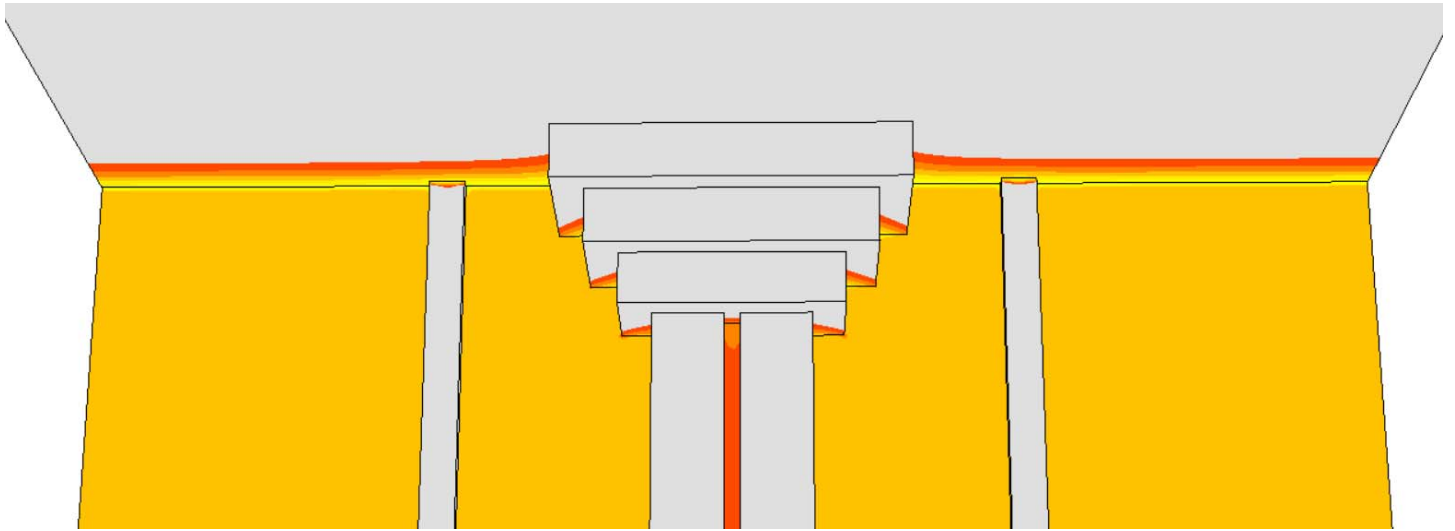


Figure 16 - NC2, Rénovation 1 : Vue au niveau du plafond

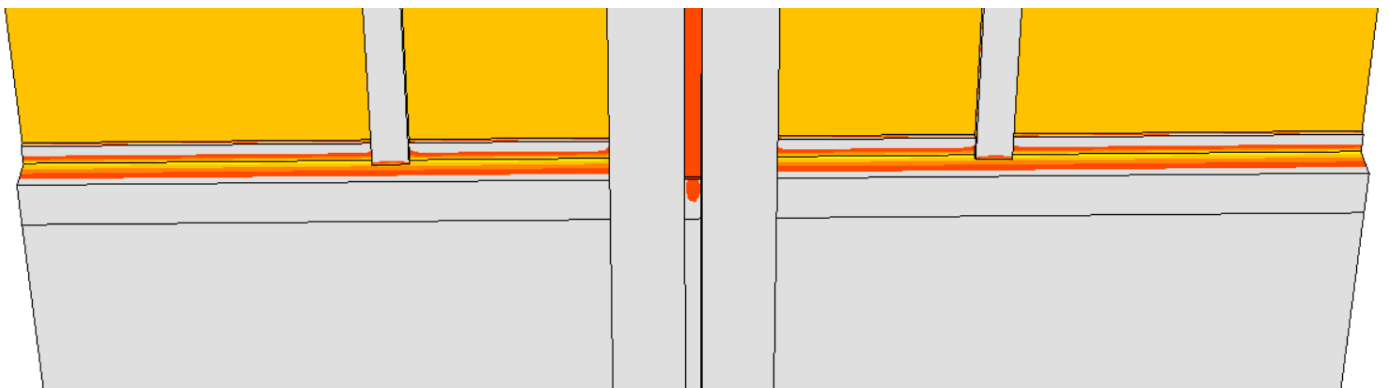


Figure 17 - NC2, Rénovation 1 : Vue au niveau de l'appui de fenêtre

Au niveau de l'appui de fenêtre, l'isolation thermique complémentaire des toitures permet de diminuer l'étendue des zones où la température de surface intérieure est inférieure à 14°C.

Cependant, on ne constate (quasi) aucun changement au niveau du plafond. Car le niveau d'isolation thermique n'a pas varié sous le chéneau.

TRISCO - Calculation Results

TRISCO data file: B35_détail2.rénol.trc

Number of nodes = 2630980

Heat flow divergence for total object = 9.37359e-010

Heat flow divergence for worst node = 0.252866

Col.	Type	Name	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
0	BC_SIMPL	Toiture int.	7.19	53	103	279	18.00	92	88	0
1	BC_SIMPL	Ext 0°	-0.04	158	98	176	5.14	53	100	175
2	MATERIAL	BA int.	1.83	119	88	164	18.00	92	88	0
3	MATERIAL	LM old	0.51	105	138	298	17.85	211	49	112
4	MATERIAL	Cellulose new	0.02	105	138	306	16.92	0	89	117
5	MATERIAL	Voligeage	0.00	105	137	307	4.88	105	93	163
6	MATERIAL	Heraklith	6.43	138	102	165	17.71	0	106	114
7	MATERIAL	Blocs Béton lou	11.16	189	106	168	17.81	0	113	112
8	MATERIAL	Vitrage Ug 3.1	2.12	137	101	270	12.36	86	103	252
9	MATERIAL	Afzélia (feuill	-0.04	158	98	176	17.23	152	107	198
10	MATERIAL	BA ext	0.00	105	93	354	8.48	105	103	169

Tableau 6 – NC2, Rénovation 1 : Résultats de la simulation TRISCO

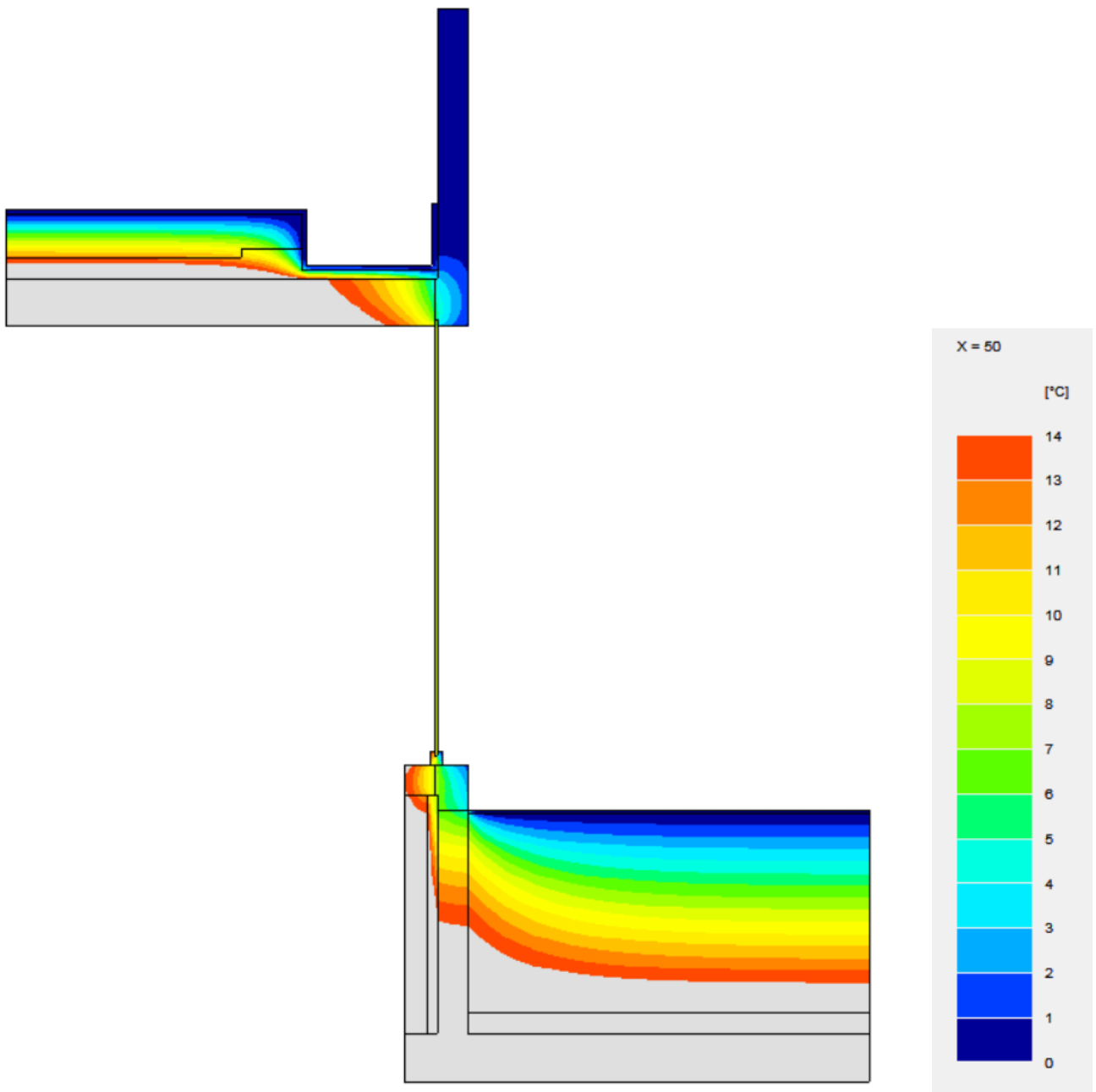


Figure 18 - NC2, Rénovation 1 : Coupe verticale au centre d'une baie de fenêtre

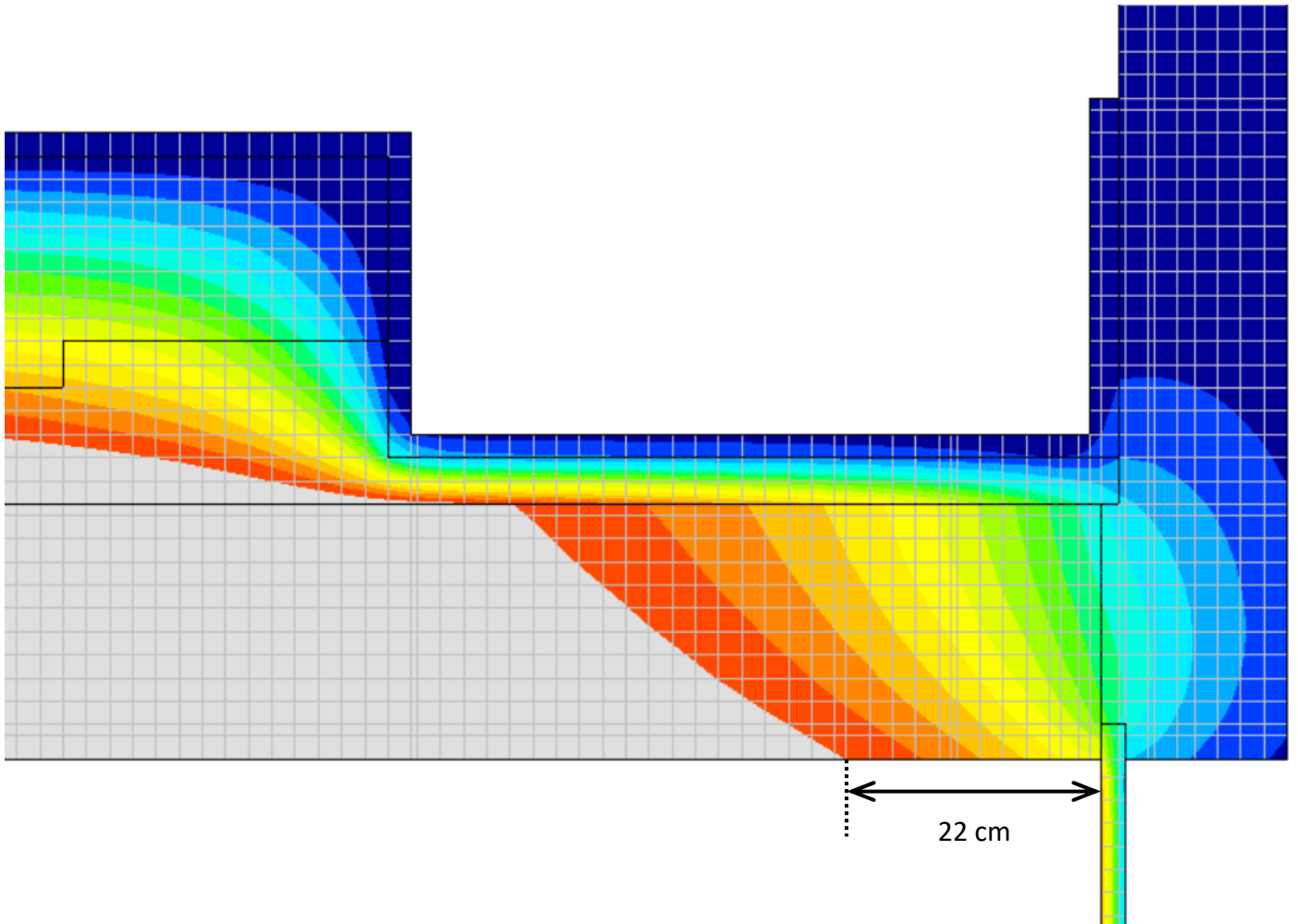


Figure 19 - NC2, Rénovation 1 : Agrandissement au niveau du plafond

La Figure 19 montre que la ré-isolation de la toiture ne permet pas de réduire l'impact du pont thermique au niveau du plafond, à l'endroit du chéneau.

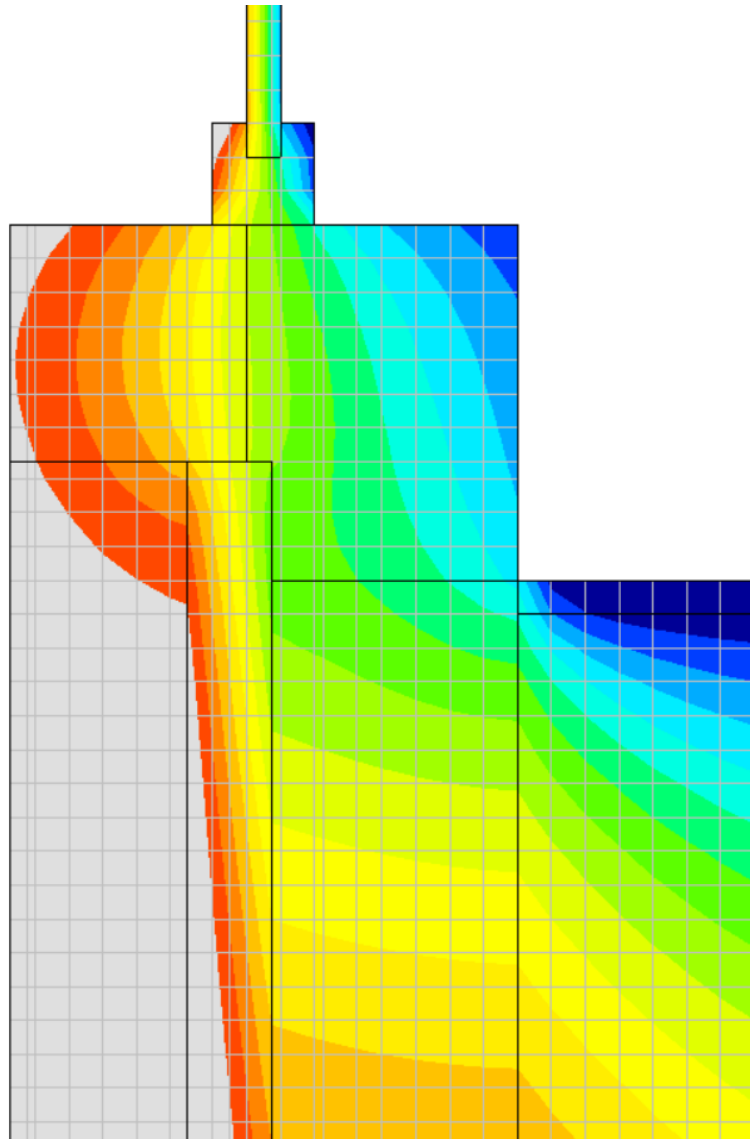


Figure 20 - NC2, Rénovation 1 : Agrandissement au niveau de l'appui de fenêtre

Par contre, la ré-isolation de la toiture inférieure permet d'améliorer la résistance thermique au droit de l'allège.

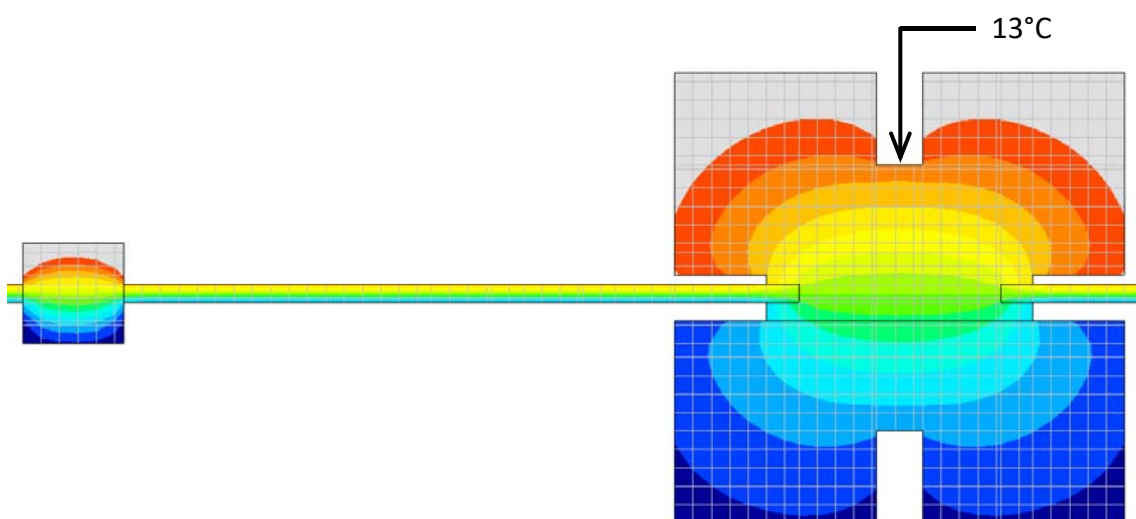


Figure 21 - NC2, Rénovation 1 : Coupe horizontale au travers de la colonne

Au niveau des arêtes intérieures des colonnes, la température superficielle intérieure est comprise entre 9 et 14°C.

1.2.3 Rénovation 2 : Remplacement du vitrage uniquement

1.2.3.1 Hypothèses matériaux et ambiances

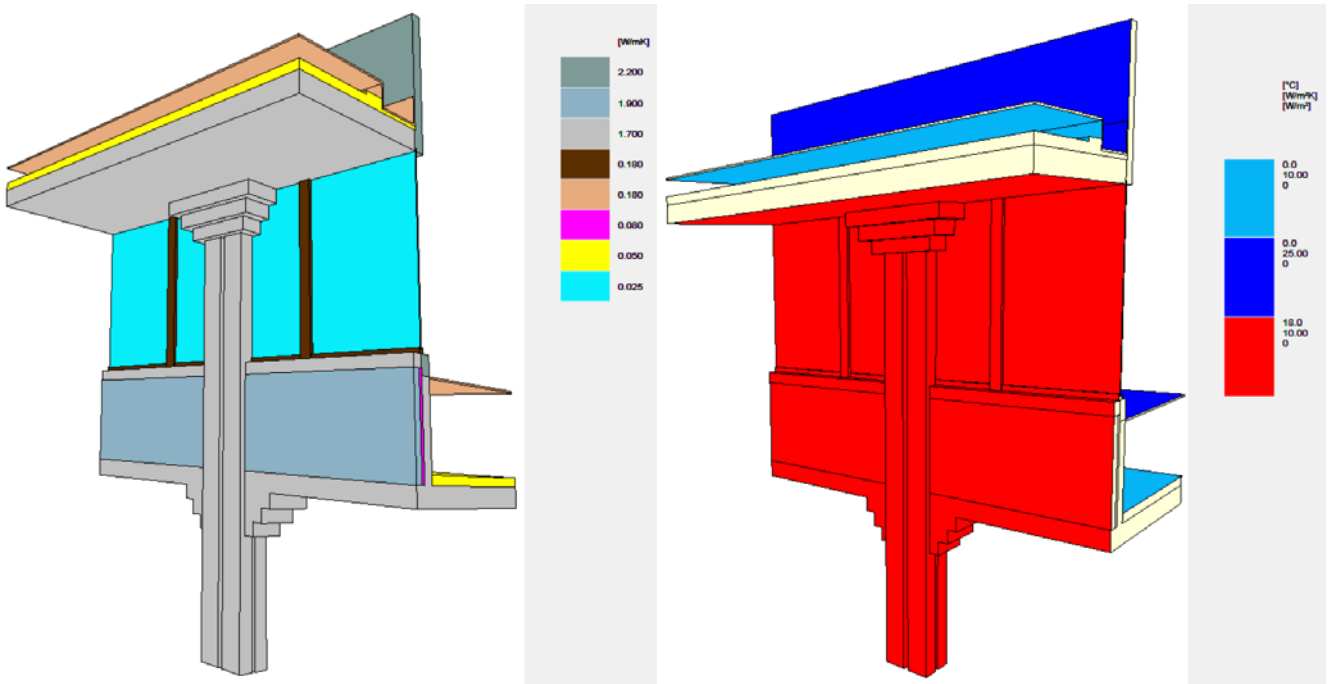


Figure 22 - NC2, Rénovation 2 : Aperçu graphique du modèle TRISCO

Col.	Type	CEN-rule	Name	Pat.	λ [W/mK]	ε [-]	θ [°C]	h [W/m²K]	q [W/m²]
0	BC_SIMPL	NIHIL	Toiture int.				18.0	10.00	0
1	BC_SIMPL	NIHIL	Ext 0°				0.0	25.00	0
2	MATERIAL		BA int.		1.700				
3	MATERIAL		LM old		0.050				
5	MATERIAL		Voligeage		0.180				
6	MATERIAL		Heraklith		0.080				
7	MATERIAL		Blocs Béton lourd int.		1.900				
8	MATERIAL		Vitrage Ug 0.9		0.025				
9	MATERIAL		Afzélia (feuillu)		0.180				
10	MATERIAL		BA ext		2.200				
11	BC_SIMPL	NIHIL	EANC				0.0	10.00	0

Tableau 7 - NC2, Rénovation 1 : Données et hypothèses

1.2.3.2 Résultats

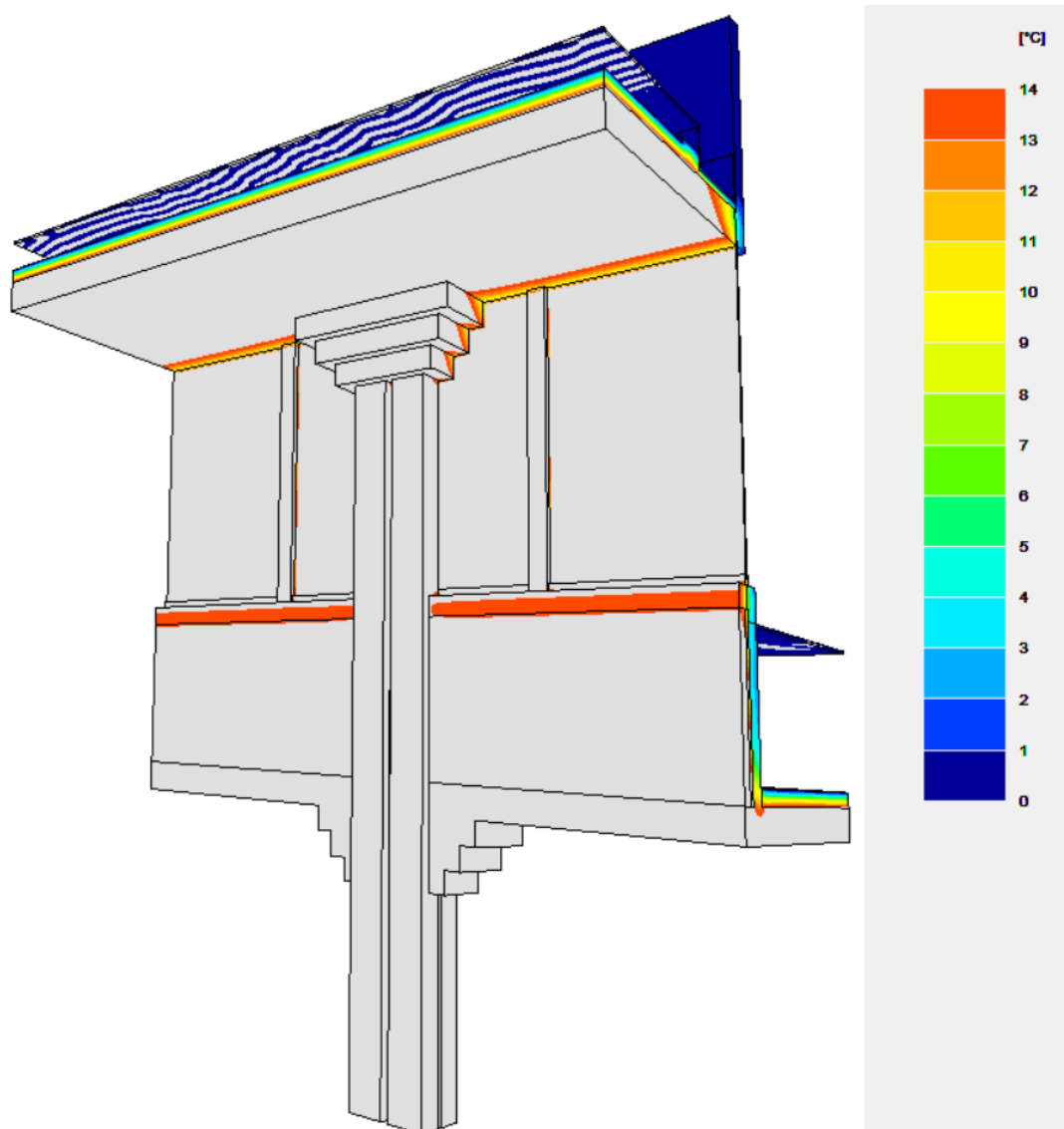


Figure 23 - NC2, Rénovation 2 : Vue intérieure

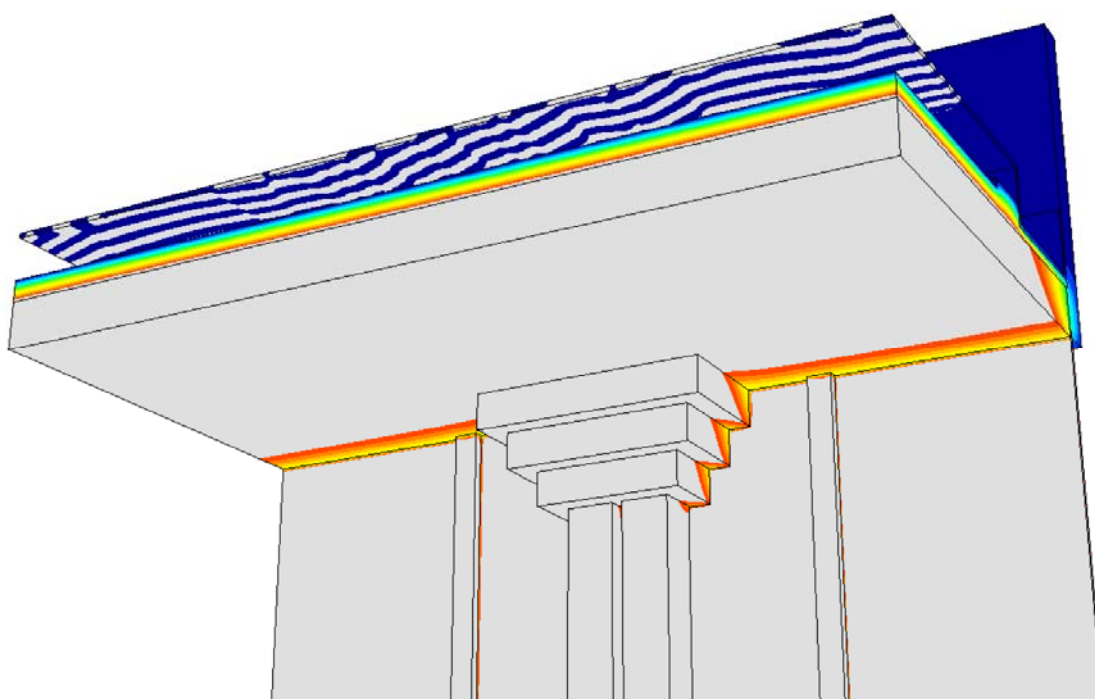


Figure 24 - NC2, Rénovation 2 : Vue au niveau du plafond

Grâce au double vitrage, la température superficielle intérieure du vitrage est désormais supérieure à 14°C.

TRISCO data file: B35_détail2.reno2.trc

Number of nodes = 1623894
 Heat flow divergence for total object = 2.32847e-012
 Heat flow divergence for worst node = 200

Col.	Type	Name	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
0	BC_SIMPL	Toiture int.	7.25	53	103	279	18.00	119	118	3
1	BC_SIMPL	Ext 0°	-0.03	158	98	176	4.68	53	100	175
2	MATERIAL	BA int.	0.59	119	88	164	18.00	119	118	3
3	MATERIAL	LM old	0.00	105	152	298	16.23	0	0	112
5	MATERIAL	Voligeage	-0.00	211	48	163	4.54	0	138	293
6	MATERIAL	Heraklith	3.61	0	102	152	15.93	0	106	116
7	MATERIAL	Blocs Béton lou	10.44	211	106	168	16.66	107	113	119
8	MATERIAL	Vitrage Ug 0.9	0.13	96	101	251	16.83	73	103	278
9	MATERIAL	Afzélia (feuill	-0.03	158	98	176	17.26	152	107	256
10	MATERIAL	BA ext	0.00	105	93	354	7.96	118	103	175
11	BC_SIMPL	EANC	-0.00	211	48	163	7.42	0	93	117

Tableau 8 – NC2, Rénovation 2 : Résultats de la simulation TRISCO

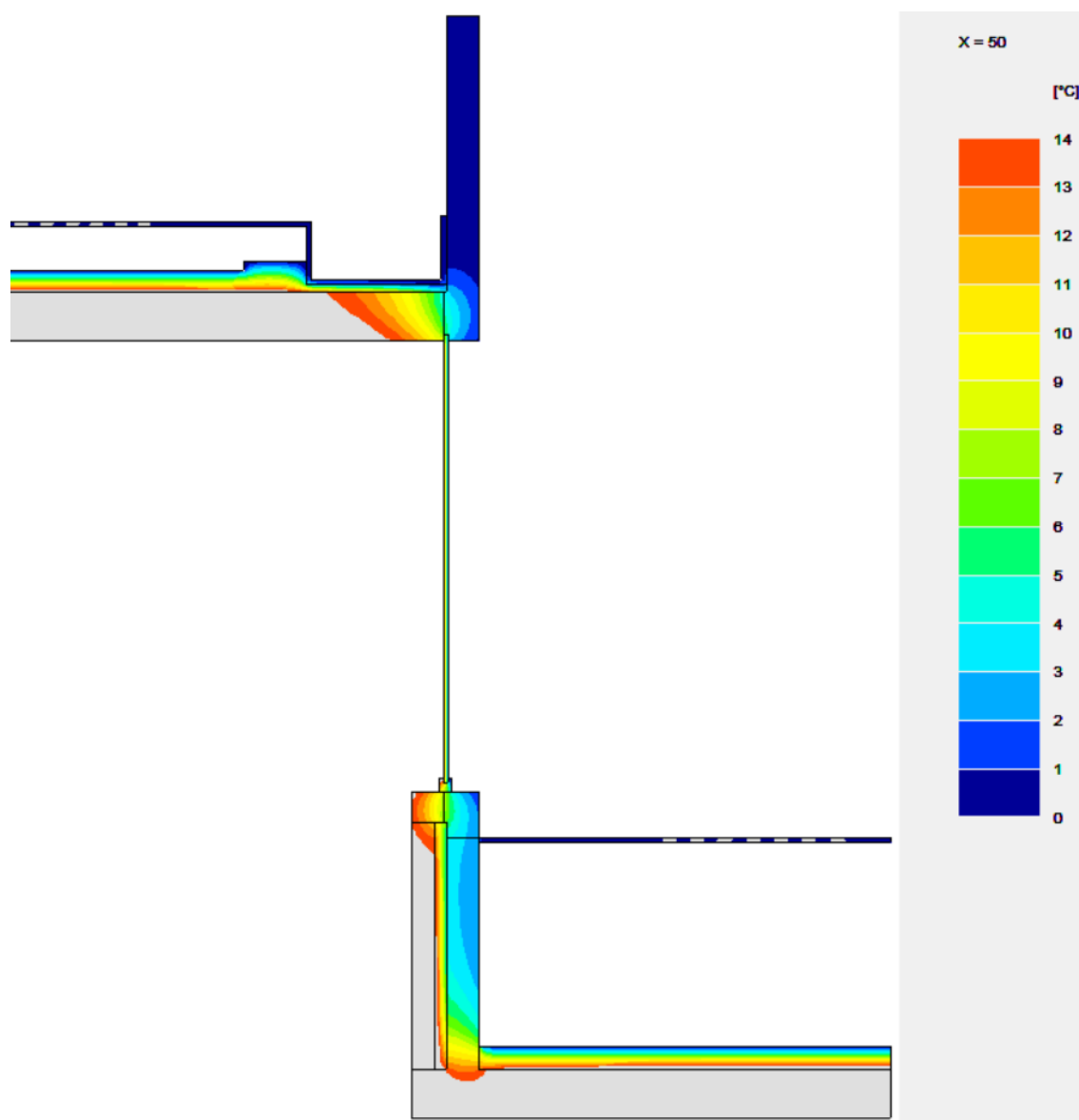


Figure 25 - NC2, Rénovation 2 : Coupe verticale au centre d'une baie de fenêtre

Suite au seul remplacement du vitrage, il n'y a (quasi) aucune variation concernant les températures superficielles intérieures, tant au niveau du plafond que de l'appui de fenêtre.

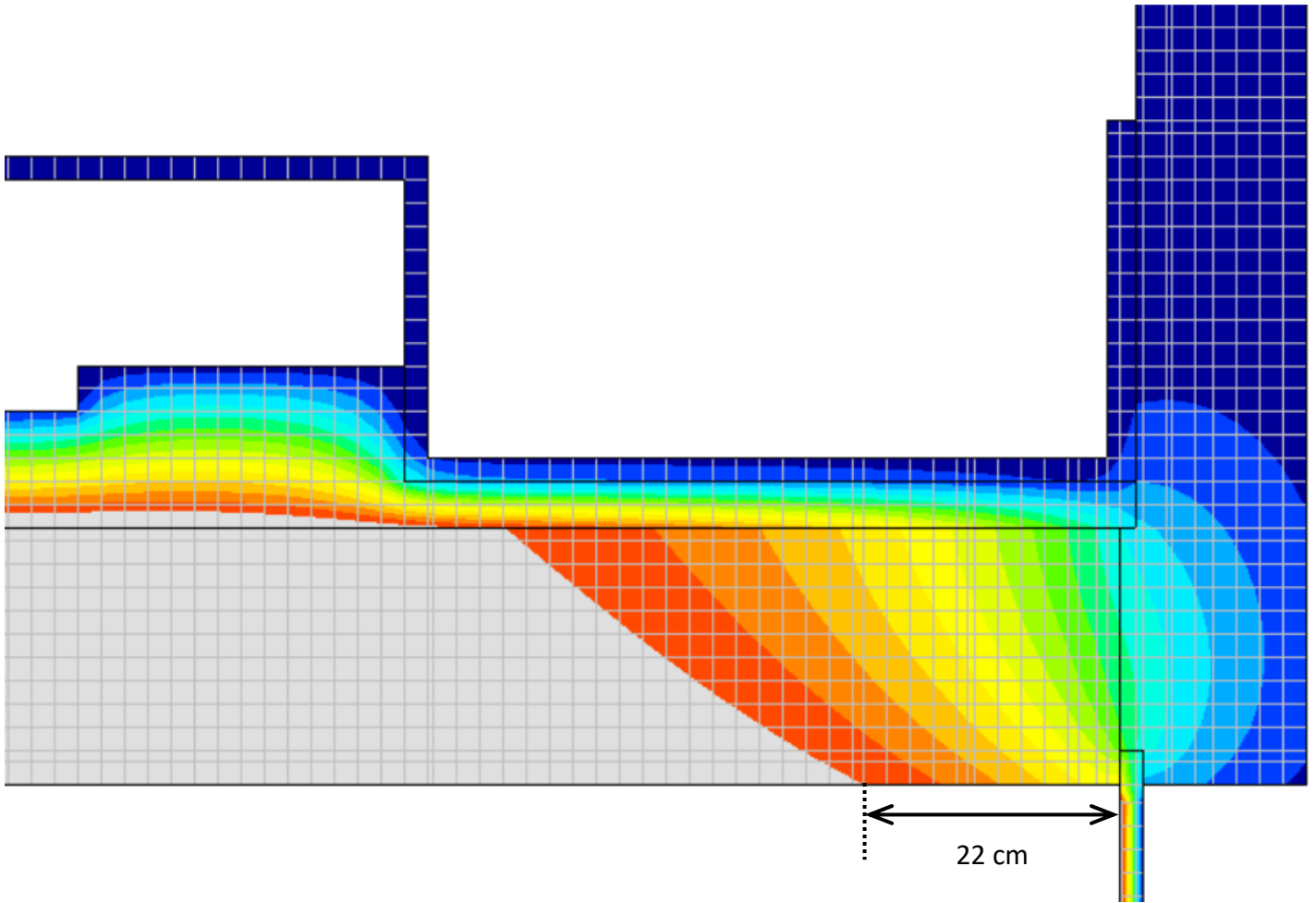


Figure 26 - NC2, Rénovation 2 : Agrandissement au niveau du plafond

Les isothermes au niveau du plafond sont pareilles à celle de la situation initiale.

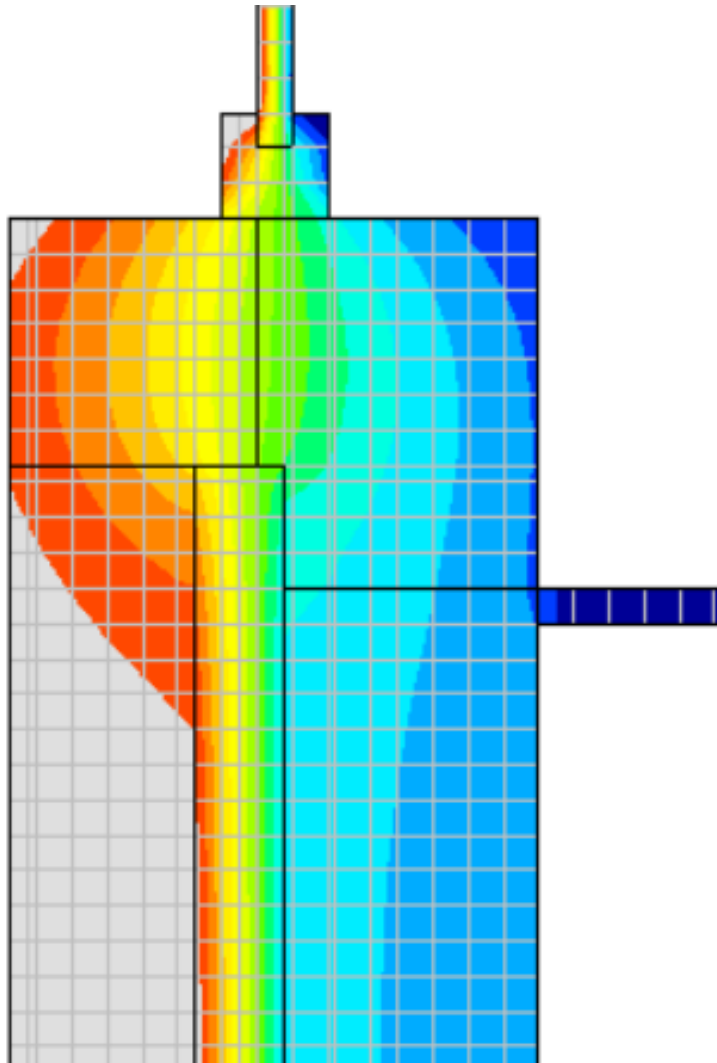


Figure 27 - NC2, Rénovation 2 : Agrandissement au niveau de l'appui de fenêtre

Les isothermes au niveau de l'appui de fenêtre sont pareilles à celle de la situation initiale.

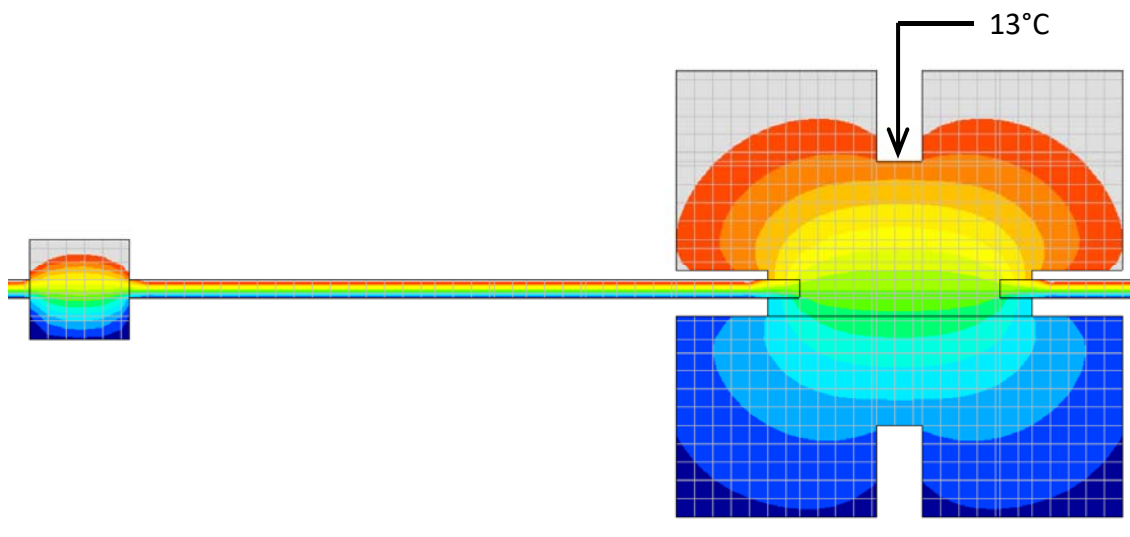


Figure 28 - NC2, Rénovation 2 : Coupe horizontale au travers de la colonne

Au niveau des arêtes intérieures, la température superficielle est comprise entre 9 et 14°C.

1.2.4 Rénovation 3 : Ré-isolation thermique de la toiture & remplacement du vitrage

1.2.4.1 Hypothèses matériaux et ambiances

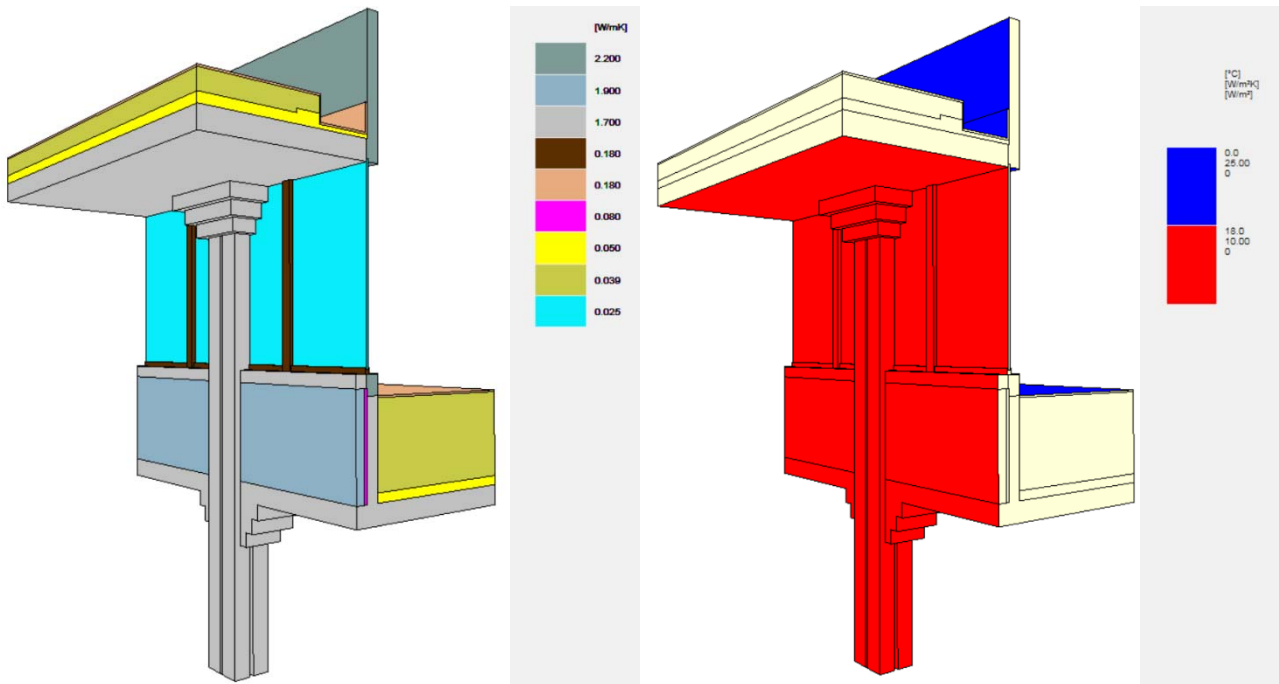


Figure 29 - NC2, Rénovation 3 : Aperçu graphique du modèle TRISCO

Col.	Type	CEN-rule	Name	Pat.	λ [W/mK]	ε [-]	θ [°C]	h [W/m²K]	q [W/m²]
0	BC_SIMPL	NIHIL	Toiture int.				18.0	10.00	0
1	BC_SIMPL	NIHIL	Ext 0°				0.0	25.00	0
2	MATERIAL		BA int.		1.700				
3	MATERIAL		LM old		0.050				
4	MATERIAL		Cellulose new		0.039				
5	MATERIAL		Voligeage		0.180				
6	MATERIAL		Heraklith		0.080				
7	MATERIAL		Blocs Béton lourd int.		1.900				
8	MATERIAL		Vitrage Ug 0.9		0.025				
9	MATERIAL		Afzélia (feuillu)		0.180				
10	MATERIAL		BA ext		2.200				

Tableau 9 - NC2, Rénovation 3 : Données et hypothèses

1.2.4.2 Résultats

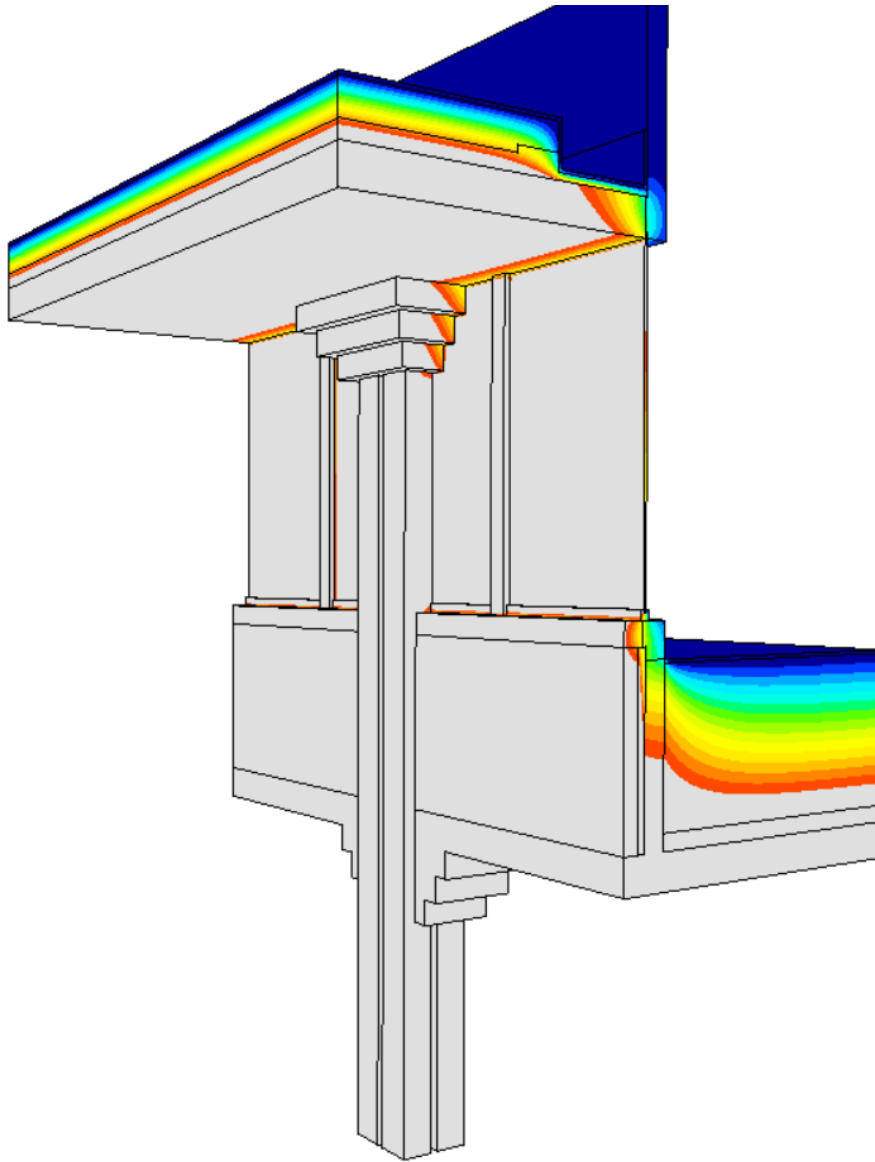


Figure 30 - NC2, Rénovation 3 : Vue intérieure

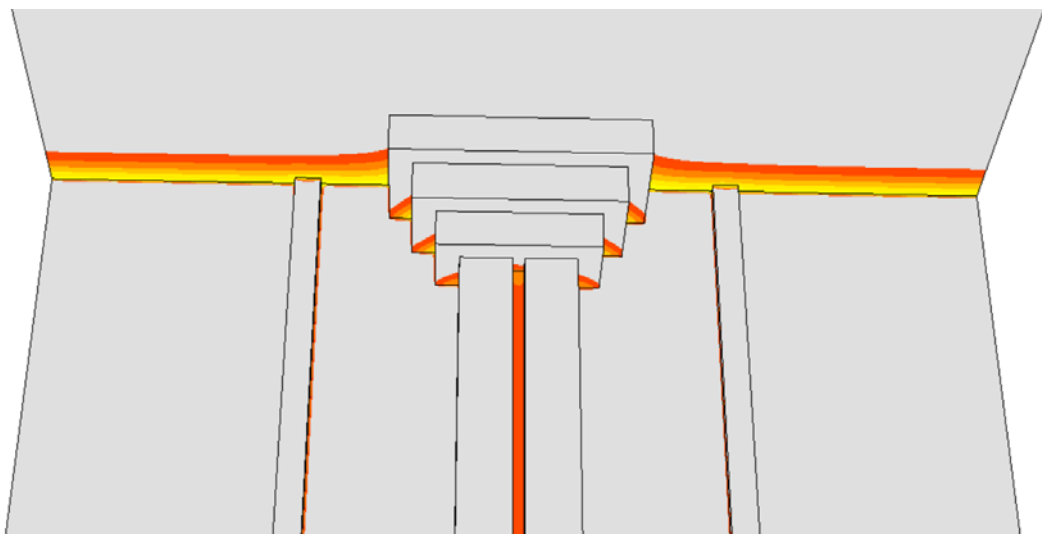


Figure 31 - NC2, Rénovation 3 : Vue au niveau du plafond

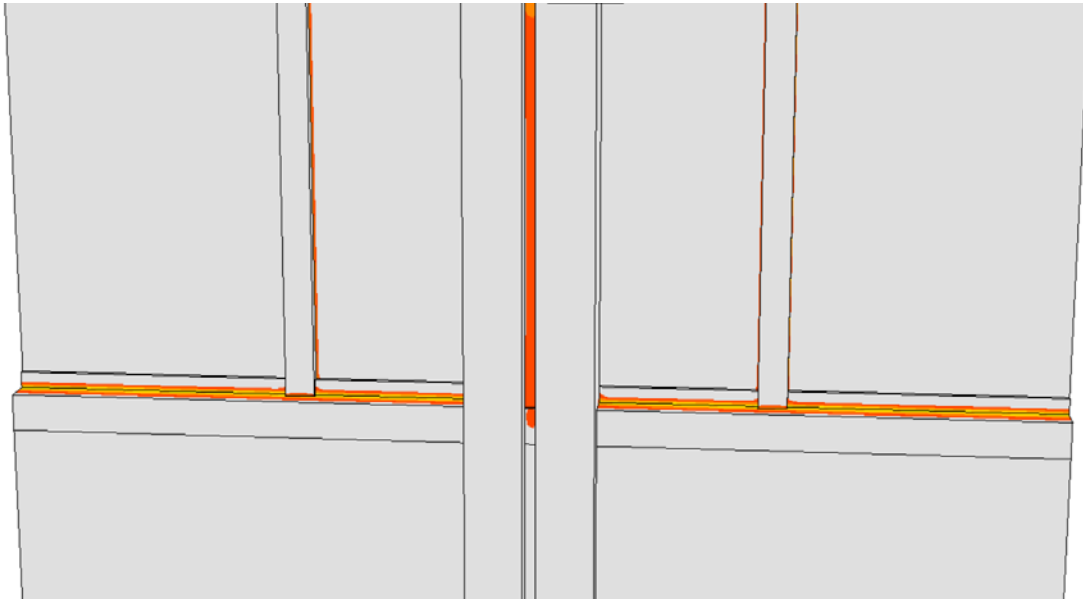


Figure 32 - NC2, Rénovation 3 : Vue au niveau de l'appui de fenêtre

Au niveau de l'appui de fenêtre, l'isolation thermique complémentaire des toitures permet de diminuer l'étendue des zones où la température de surface intérieure reste inférieure à 14°C.

Cependant, on ne constate (quasi) aucun changement au niveau du plafond. Car le niveau d'isolation thermique n'a pas varié au droit du chéneau.

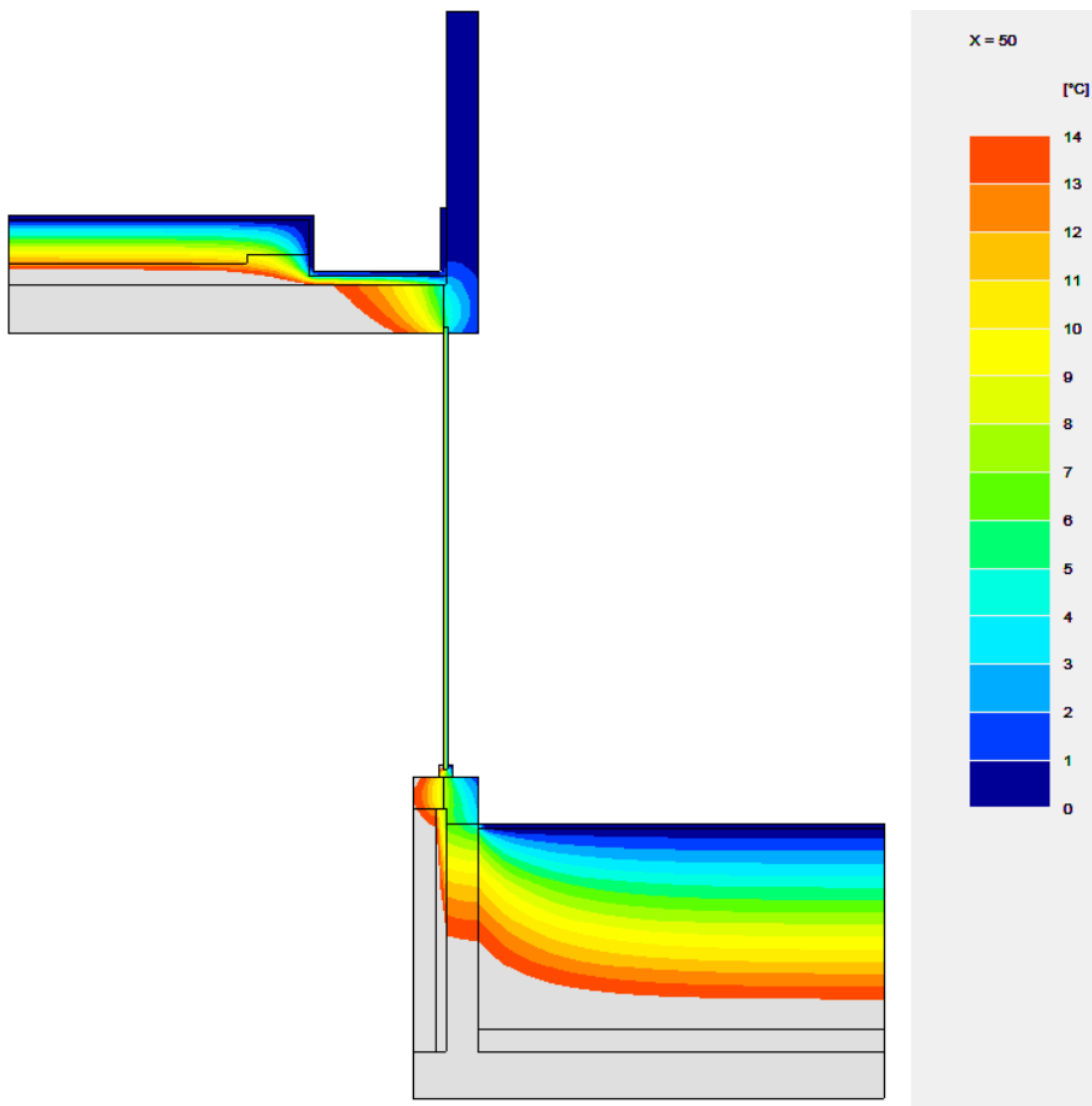


Figure 33 - NC2, Rénovation 3 : Coupe verticale au centre d'une baie de fenêtre

TRISCO - Calculation Results

TRISCO data file: B35_détail2.reno3.trc

Number of nodes = 2630980

Heat flow divergence for total object = 1.69389e-010

Heat flow divergence for worst node = 0.0403015

Col.	Type	Name	tmin [°C]	X	Y	Z	tmax [°C]	X	Y	Z
0	BC_SIMPL	Toiture int.	7.26	53	103	279	18.00	92	88	0
1	BC_SIMPL	Ext 0°	-0.04	158	98	176	5.15	53	100	175
2	MATERIAL	BA int.	1.83	119	88	164	18.00	92	88	0
3	MATERIAL	LM old	0.51	105	138	298	17.85	211	49	112
4	MATERIAL	Cellulose new	0.02	105	138	306	16.92	0	89	117
5	MATERIAL	Voligeage	0.00	105	137	307	4.89	105	93	163
6	MATERIAL	Heraklith	6.43	138	102	165	17.71	0	106	114
7	MATERIAL	Blocs Béton lou	11.16	188	106	168	17.81	211	113	112
8	MATERIAL	Vitrage Ug 0.9	0.13	96	101	251	16.83	73	103	278
9	MATERIAL	Afzélia (feuill	-0.04	158	98	176	17.26	152	107	256
10	MATERIAL	BA ext	0.00	105	93	354	8.50	104	103	169

Tableau 10 – NC2, Rénovation 3 : Résultats de la simulation TRISCO

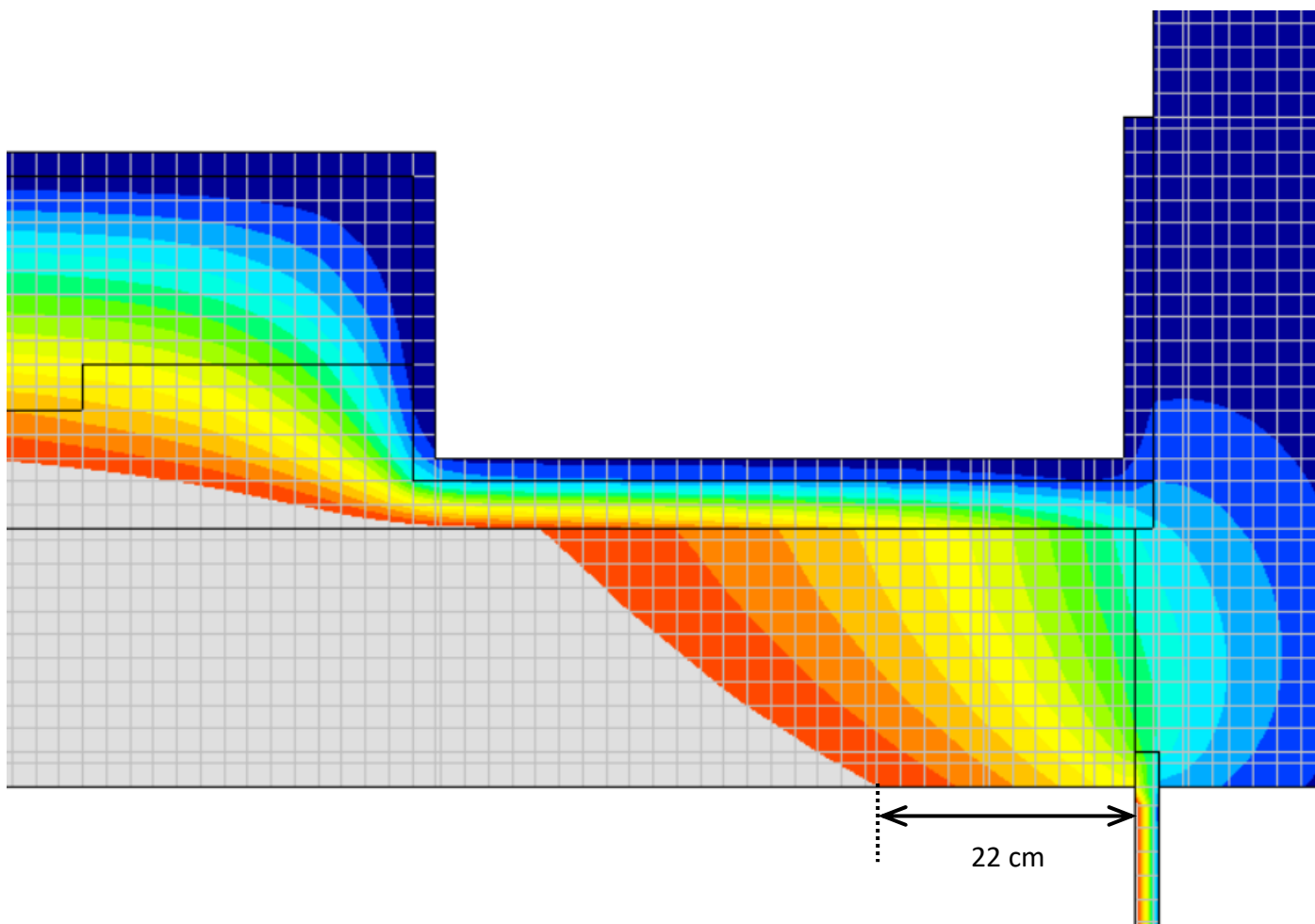


Figure 34 - NC2, Rénovation 3 : Agrandissement au niveau du plafond

La Figure 34 montre que la ré-isolation de la toiture ne permet pas de réduire l’impact du pont thermique au niveau du plafond, sous le chéneau de la toiture.

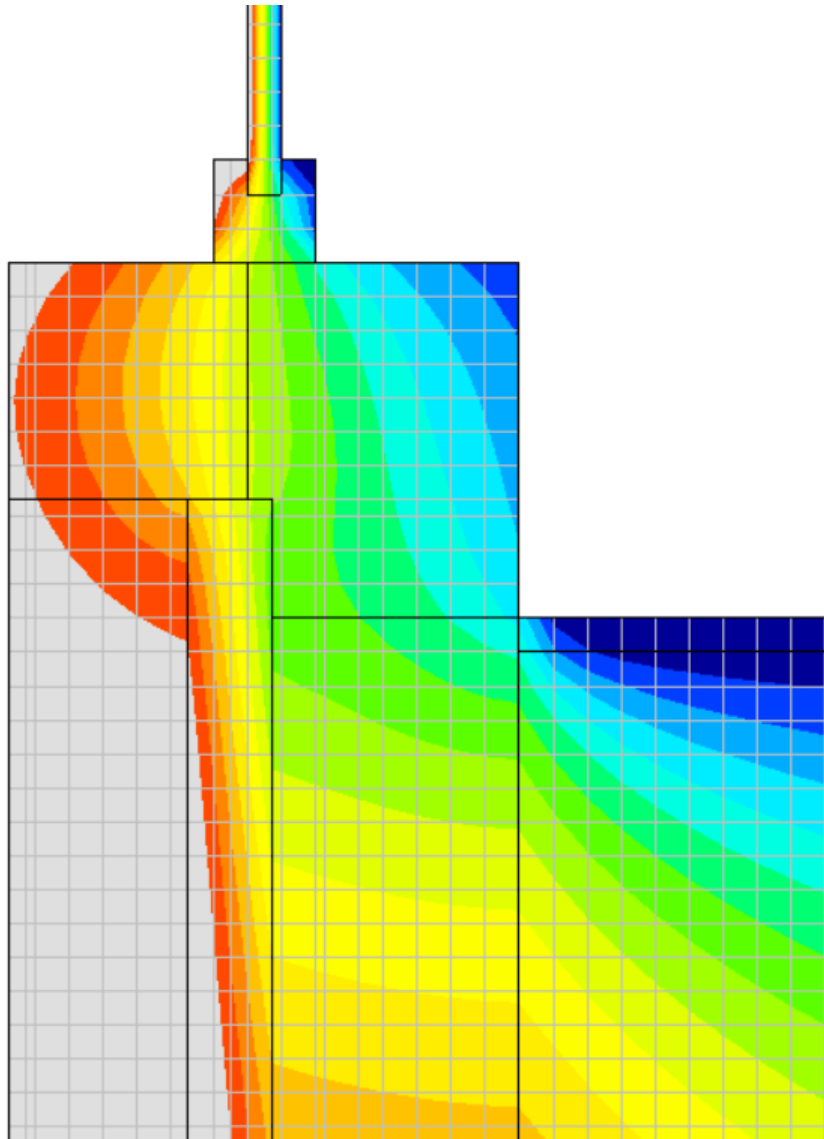


Figure 35 - NC2, Rénovation 3 : Agrandissement au niveau de l'appui de fenêtre

Par contre, la ré-isolation de la toiture inférieure permet d'améliorer la résistance thermique au droit de l'allège.

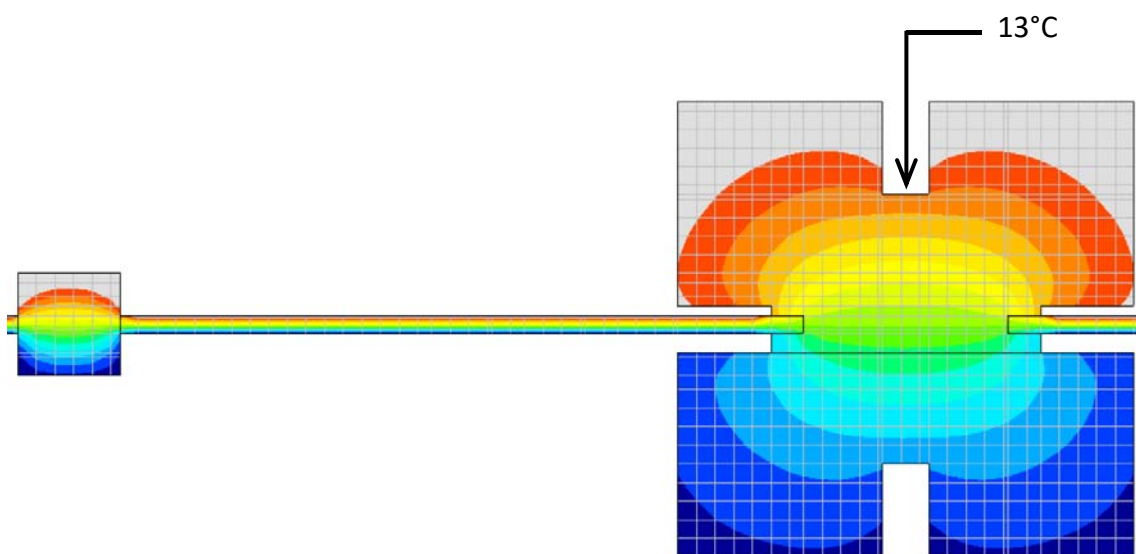


Figure 36 - NC2, Rénovation 3 : Coupe horizontale au travers de la colonne

Au niveau des arêtes intérieures, la température superficielle reste comprise entre 9 et 14°C.

1.2.5 Conclusions

1.2.5.1 Ré-isolation thermique de la toiture uniquement

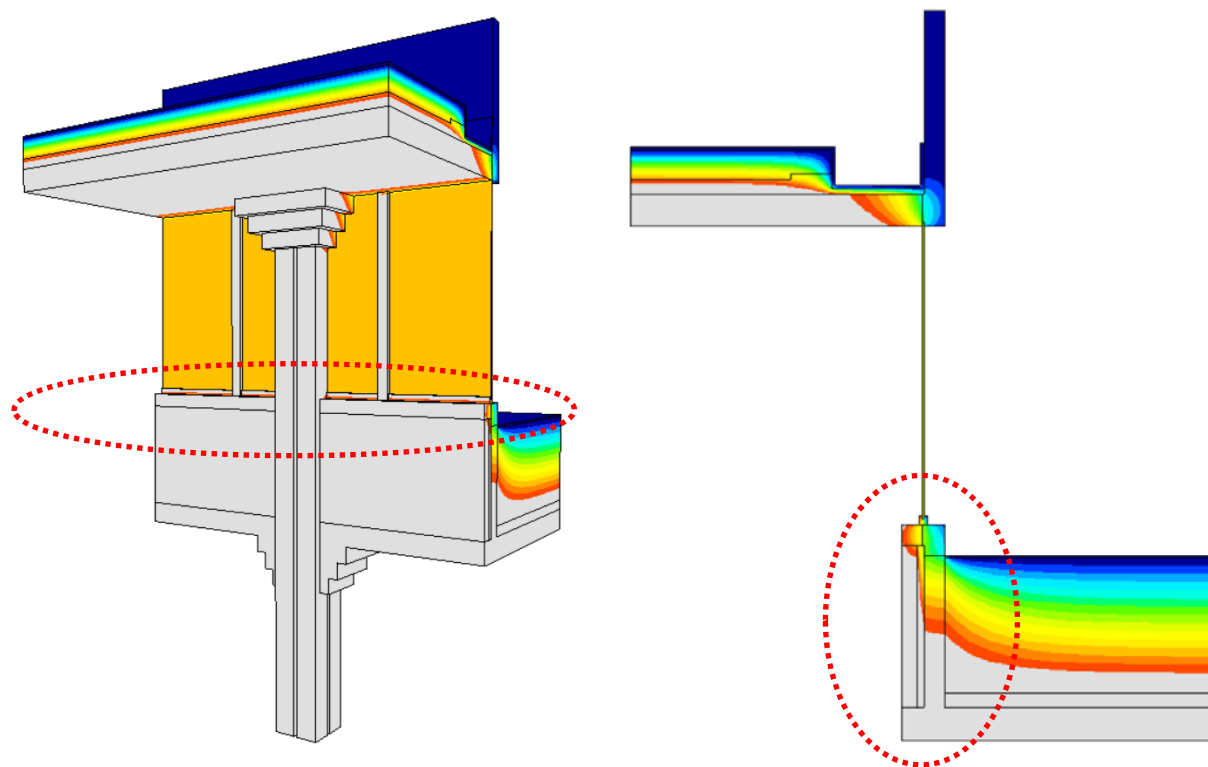


Figure 37 - NC2, Ré-isolation de la toiture uniquement : vue intérieure et en coupe

Au niveau de l'appui de fenêtre, l'isolation thermique complémentaire des toitures permet de diminuer l'étendue des zones où la température de surface intérieure est inférieure à 14°C.

Cependant, on ne constate (quasi) aucun changement au niveau du plafond. Car le niveau d'isolation thermique n'a pas varié sous la corniche en toiture. Seule une isolation thermique complémentaire (par ex. un bandeau recouvrant au plafond une zone de ± 1 m de profondeur à partir du châssis) pourrait réduire l'étendue de la zone à risque.

1.2.5.2 Remplacement du vitrage uniquement

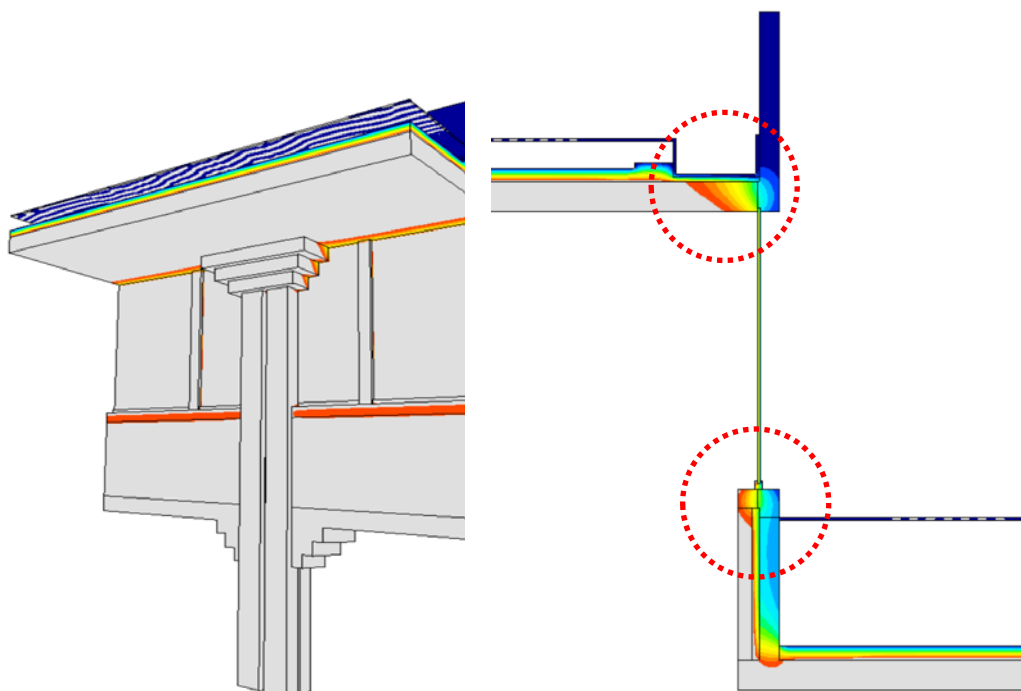


Figure 38 - NC2, Seul emplacement du vitrage : vue intérieure et en coupe

Grâce au double vitrage, la température superficielle intérieure du vitrage est désormais supérieure à 14°C. La performance énergétique de la paroi a donc été améliorée, et le vitrage ne constitue plus la surface où la condensation se forme préférentiellement. On la retrouvera sur les surfaces restées froides et/ou aux ponts thermiques.

D'autre part, le remplacement du vitrage n'a (quasi) aucune influence sur l'étendue des zones où la température superficielle intérieure est inférieure à 14°C. Cela est mis en évidence par la comparaison de la situation existante et de la situation rénovée au niveau de l'appui de fenêtre (voir Figure 39 ci-dessous).

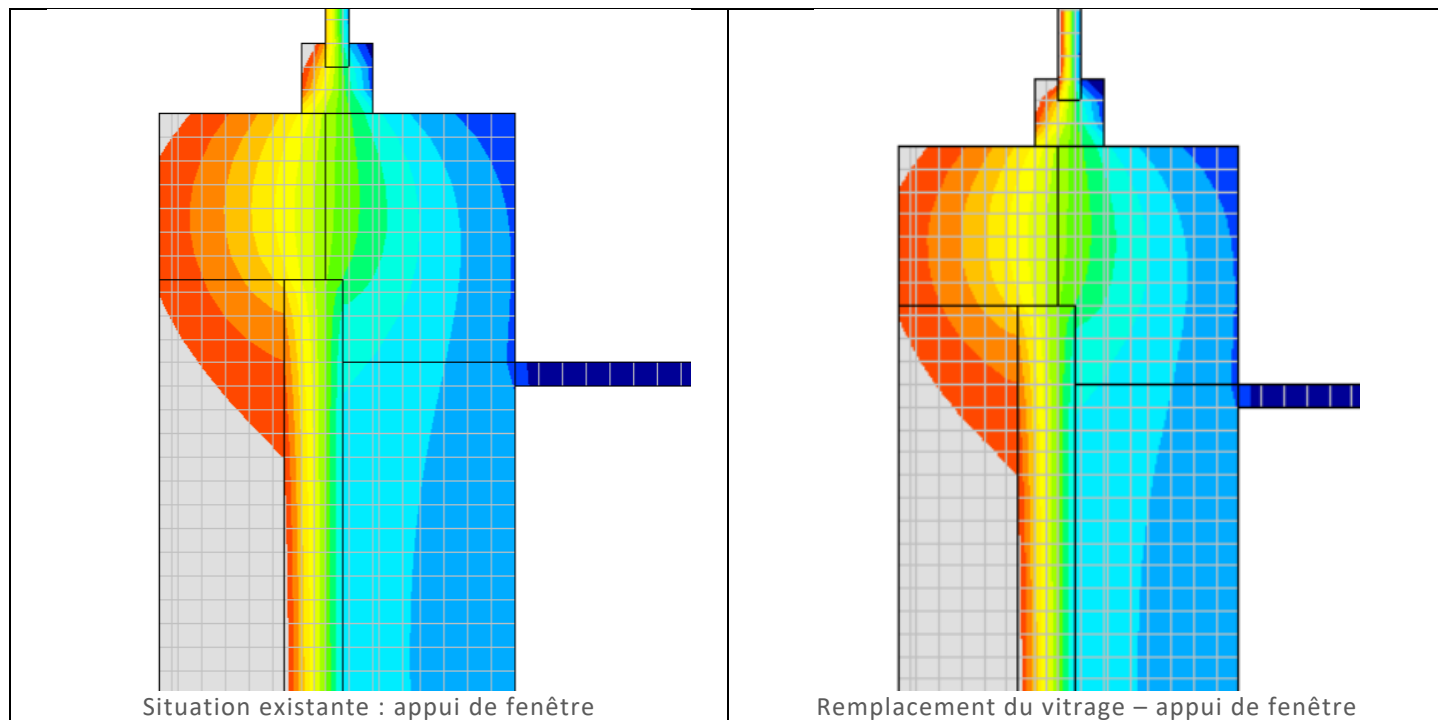


Figure 39 - NC2, Seul emplacement du vitrage : vue en coupe de l'allège avant / après

1.2.5.3 Ré-isolation thermique de la toiture et remplacement du vitrage

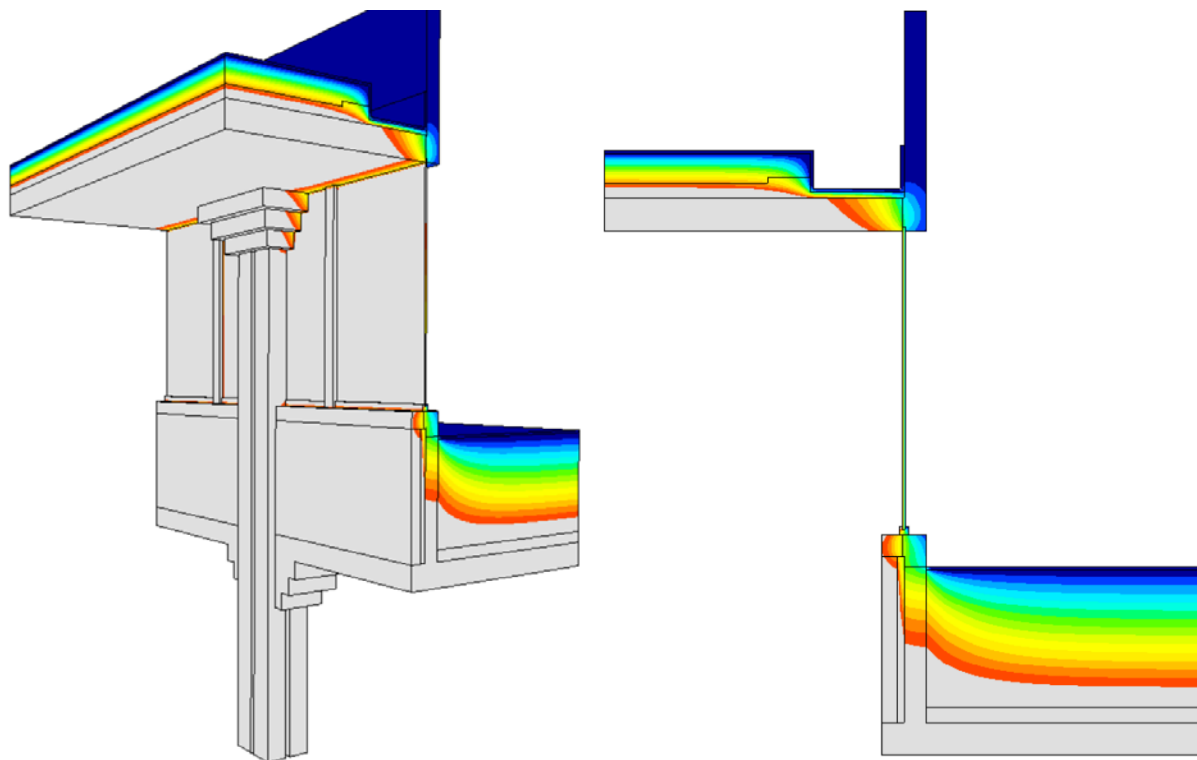


Figure 40 - NC2, Ré-isolation de la toiture et remplacement du vitrage : vue intérieure et en coupe

Ce cas constitue la combinaison des 2 scénarios précédents.

La zone à risque au niveau de l'appui de fenêtre est moins étendue. Mais on ne constate aucune variation au niveau du plafond par rapport à la situation existante. Seule une isolation thermique complémentaire aurait une incidence sur l'étendue de la zone à risque (voir § 1.2.5.1 Ré-isolation thermique de la toiture uniquement).

1.2.6 Propositions d'améliorations

1.2.6.1 Solution 1 : Pose d'un isolant au plafond sur une profondeur d'un mètre et d'un dormant en partie supérieure du vitrage

Afin de réduire le pont thermique au niveau du plafond, une solution consiste à poser un isolant contre la façade extérieure et sur une profondeur d'un mètre. L'isolant proposé dans la simulation ci-dessous est un panneau d'isolant de polystyrène extrudé XPS ($\lambda = 0,034 \text{ W/mK}$) de 6 cm d'épaisseur, à fleur d'un dormant placé contre le plafond, panneau à recouvrir par un panneau (de bois ?) pour obtenir un résultat esthétiquement acceptable.

1.2.6.1.1 Hypothèses matériaux et ambiances

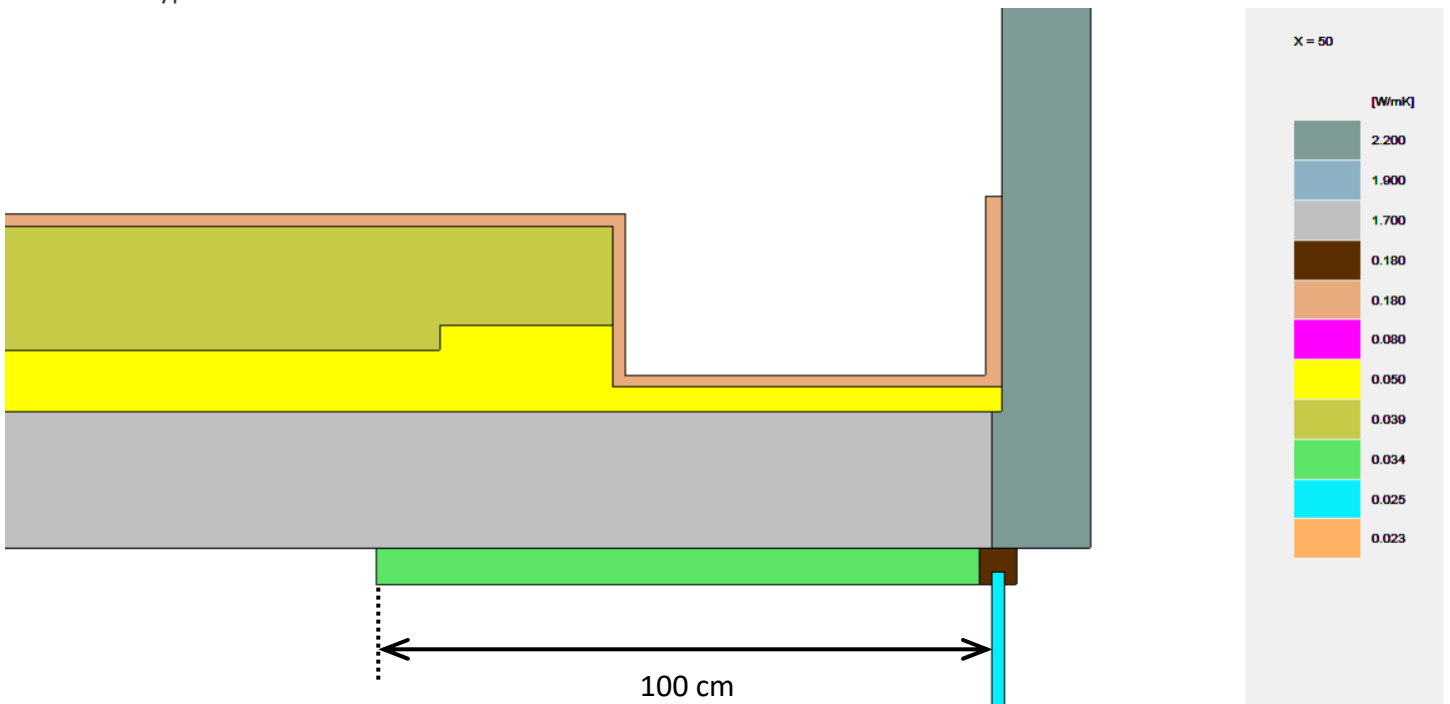


Figure 41 - NC2, Solution 1 : Pose d'un isolant XPS, d'épaisseur 6 cm

Col.	Type	CEN-rule	Name	Pat.	λ [W/mK]	ϵ [-]	θ [°C]	h [W/m²K]	q [W/m²]
0	BC_SIMPL	NIHIL	Toiture int.				18.0	10.00	0
1	BC_SIMPL	NIHIL	Ext 0°				0.0	25.00	0
2	MATERIAL		BA int.		1.700				
3	MATERIAL		LM old		0.050				
4	MATERIAL		Cellulose new		0.039				
5	MATERIAL		Voligeage		0.180				
6	MATERIAL		Heraklith		0.080				
7	MATERIAL		Blocs Béton lourd int.		1.900				
8	MATERIAL		Vitrage Ug 0.9		0.025				
9	MATERIAL		Afzélia (feuillu)		0.180				
10	MATERIAL		BA ext		2.200				
11	MATERIAL		XPS 0.034		0.034				
12	MATERIAL		PUR 0.023		0.023				

Tableau 11 - NC2, Solution 1 : Données et hypothèses

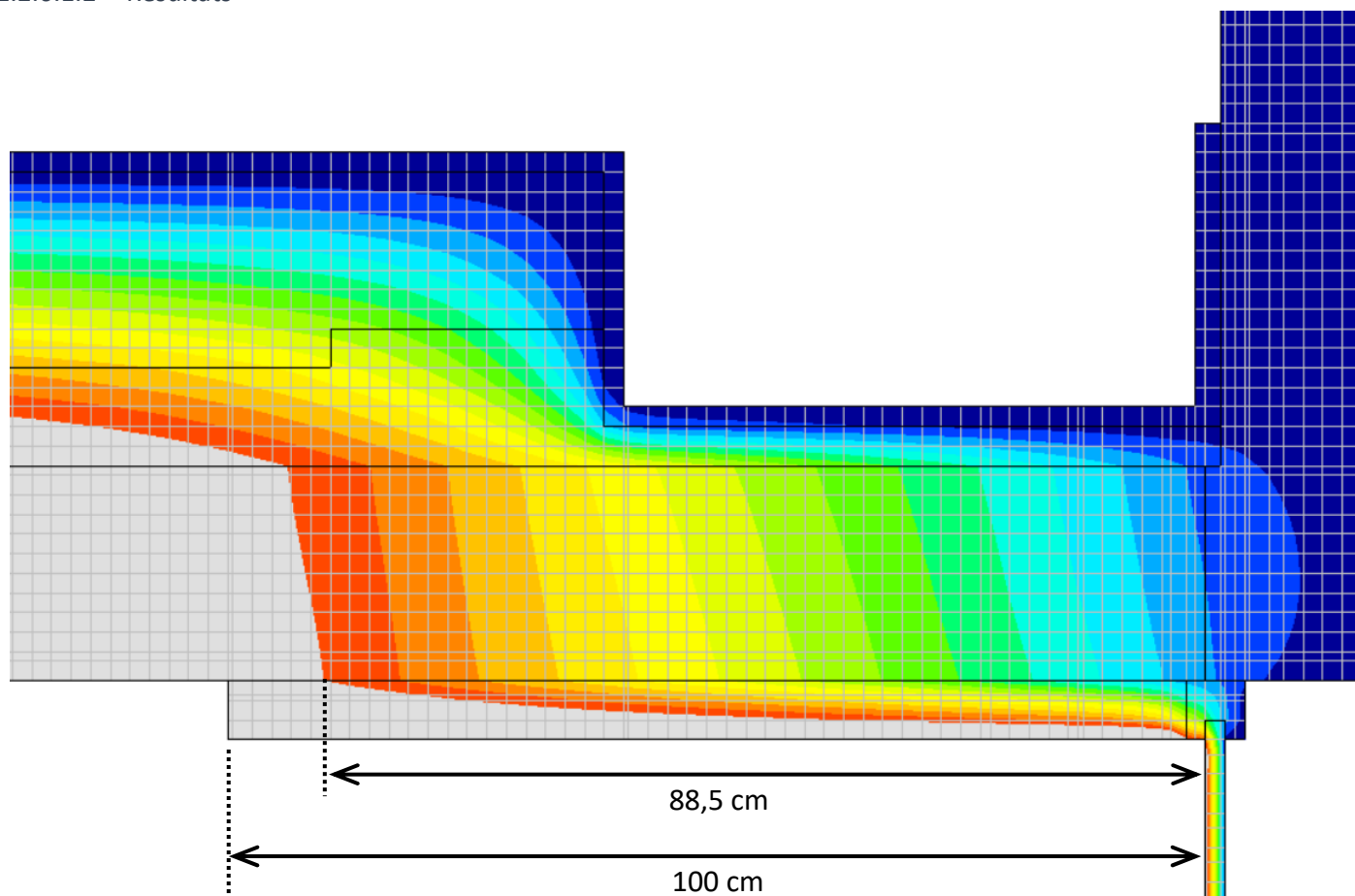


Figure 42 - NC2, Solution 1 : Agrandissement au niveau du plafond, au droit du chéneau

Il n'y a, désormais, plus aucune zone où la température superficielle intérieure serait inférieure à 14°C.

1.2.6.2 Solution 2 : Remplacement total de l'appui de fenêtre et introduction d'une coupure thermique

Afin de réduire le pont thermique au niveau de l'appui de fenêtre, une solution consiste à créer une coupure thermique. L'appui de fenêtre existant doit alors être retiré et remplacé par un appui de fenêtre en 2 parties (intérieure et extérieure), séparées par un élément isolant. L'élément isolant proposé dans la simulation ci-dessous est un panneau d'isolant en mousse de polyuréthane PUR ($\lambda = 0,023 \text{ W/mK}$) de 4 cm d'épaisseur. Les deux parties intérieure et extérieure du seuil de fenêtre seraient en béton préfabriqué, par exemple.

1.2.6.2.1 Hypothèses matériaux et ambiances

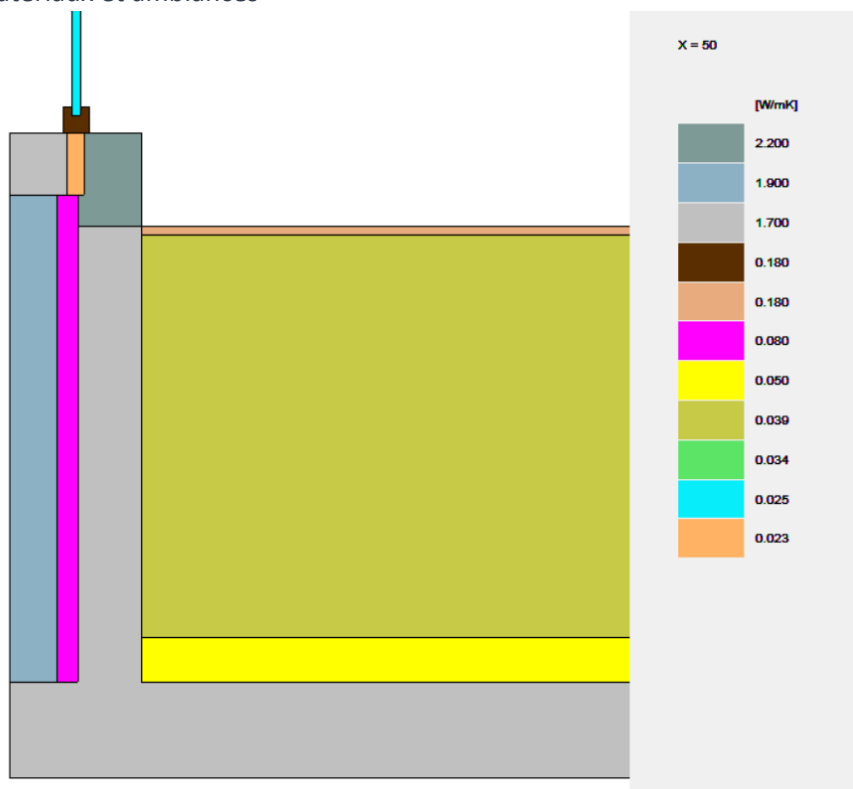


Figure 43 - NC2, Solution 2 : Introduction d'une coupure thermique en PUR, épaisseur 4 cm

Col.	Type	CEN-rule	Name	Pat.	λ [W/mK]	ε [-]	θ [°C]	h [W/m²K]	q [W/m²]
0	BC_SIMPL	NIHIL	Toiture int.				18.0	10.00	0
1	BC_SIMPL	NIHIL	Ext 0°				0.0	25.00	0
2	MATERIAL		BA int.		1.700				
3	MATERIAL		LM old		0.050				
4	MATERIAL		Cellulose new		0.039				
5	MATERIAL		Voligeage		0.180				
6	MATERIAL		Heraklith		0.080				
7	MATERIAL		Blocs Béton lourd int.		1.900				
8	MATERIAL		Vitrage Ug 0.9		0.025				
9	MATERIAL		Afzélia (feuillu)		0.180				
10	MATERIAL		BA ext		2.200				
11	MATERIAL		XPS 0.034		0.034				
12	MATERIAL		PUR 0.023		0.023				

Tableau 12 - NC2, Solution 2 : Données et hypothèses

1.2.6.2.2 Résultats

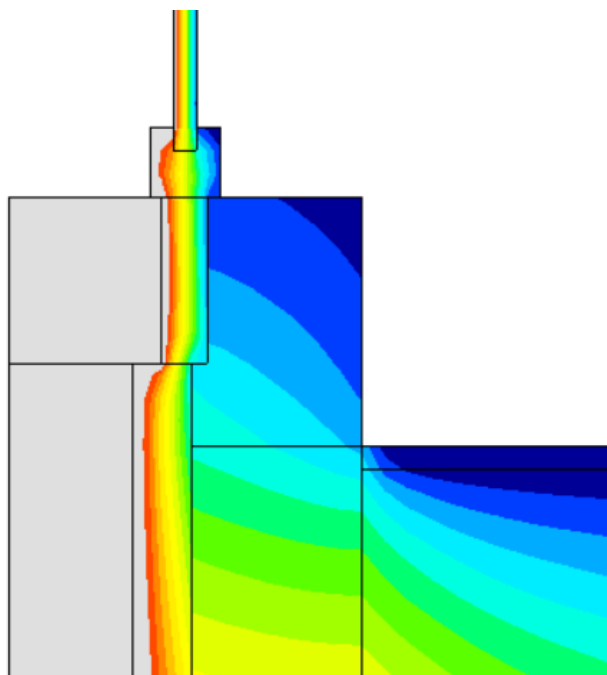
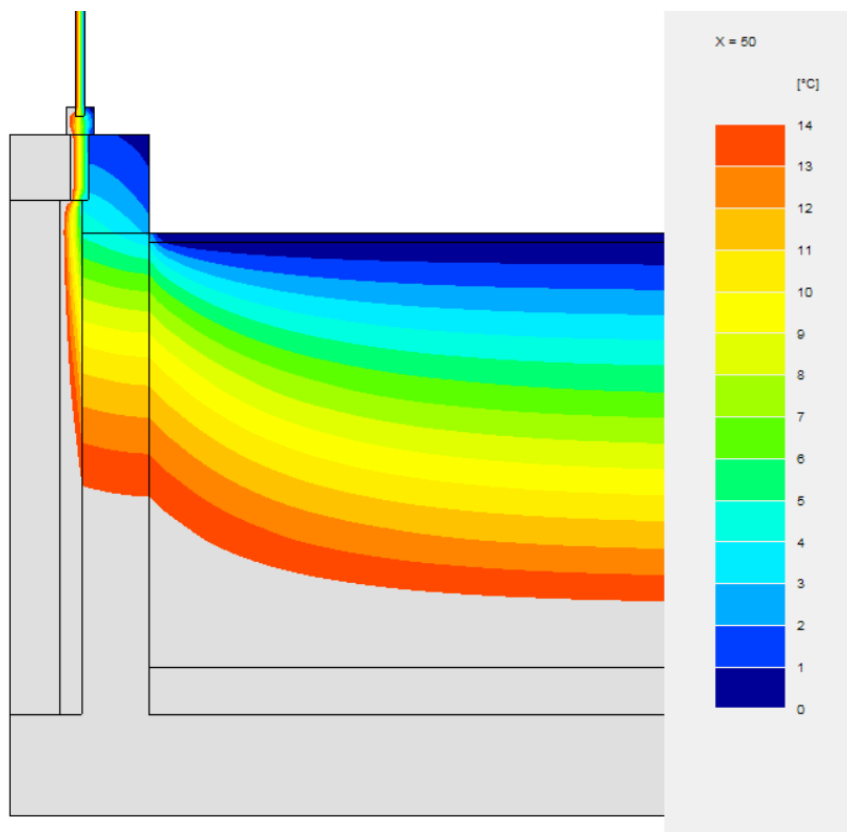


Figure 40 - NC2, Solution 2 : Agrandissements au niveau de l'appui de fenêtre

Cette disposition fait entièrement disparaître, sur le seuil intérieur et sur l'allège, toute zone où la température superficielle intérieure serait inférieure à 14°C.

2 ÉTUDE DU COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE DE LA TOITURE (GLASTA)

D'après les informations disponibles, la toiture devrait comprendre un pare-vapeur sous la laine minérale. Le probable pare-vapeur placé à l'époque de la construction devait être un papier kraft ou une feuille d'aluminium collée à l'isolant. En considérant ces éléments incertains, nous préférons ignorer la présence d'un pare-vapeur dans le complexe existant de la toiture. Cette situation est d'ailleurs la plus défavorable.

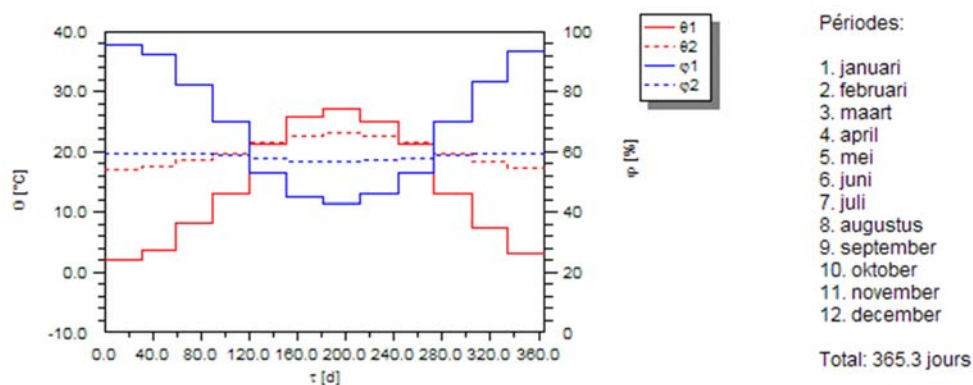


Figure 41 - Précédente rénovation de la toiture

2.1 DONNÉES ET HYPOTHÈSES

2.1.1 Climats

Le climat extérieur est le climat observé à Uccle, représentatif du climat belge.



Graphique 1 - Données climats : T° [°C] et HR [%] extérieures (1) et intérieures (2)

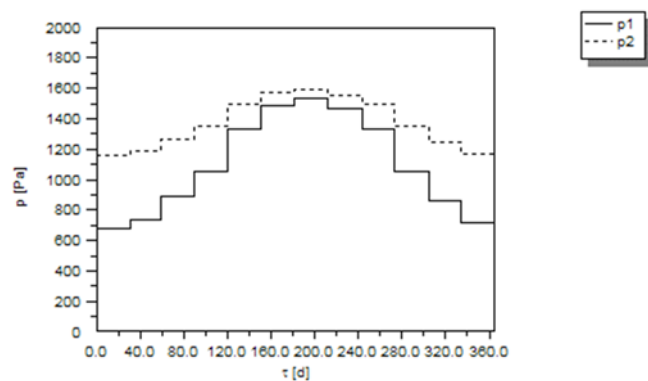
En ce qui concerne le climat intérieur, on peut distinguer 4 types possibles (= classes) de climat intérieur. Ces 4 classes de climat intérieur se différencient selon la pression annuelle moyenne p_i de la vapeur d'eau du climat intérieur (voir tableau ci-après).

Classe de climat intérieur	Types de bâtiments concernés	Exemples de bâtiments	Pression de vapeur annuelle moyenne à l'intérieur p_i [Pa]	Différence de pression de vapeur moyenne pendant 4 semaines $(p_i - p_e)$ [Pa]
CC I	Bâtiments où la production d'humidité est faible à nulle en permanence	Entrepôts de marchandises sèches Eglises, salles d'exposition, garages, ateliers	$1.100 \leq p_i < 1.165$	$< 159 - 10 \cdot \theta_e$
CC II	Bâtiments bien ventilés, à production d'humidité limitée par m^3	Habitations ventilées selon la norme Ecoles, magasins, bureaux non climatisés Salles de sports et halls polyvalents	$1.100 \leq p_i < 1.370$	$< 436 - 22 \cdot \theta_e$
CC III	Bâtiments moyennement ventilés, à production d'humidité plus importante au m^3	Habitations non ventilées selon la norme Hôpitaux, homes Salles des fêtes, théâtres Bâtiments faiblement climatisés (HR ≤ 60 %)	$1.370 \leq p_i < 1.500$	$< 713 - 22 \cdot \theta_e$
CC IV	Bâtiments à production d'humidité élevée	Bâtiments fortement climatisés (HR > 60 %) Locaux d'hydrothérapie Piscines couvertes Locaux industriels humides tels que blanchisseries, imprimeries, brasseries, usines à papier....	$p_i > 1.500$ Pa, limitée à 3.000 Pa	$> 713 - 22 \cdot \theta_e$

Tableau 13 – Classes de climat intérieur

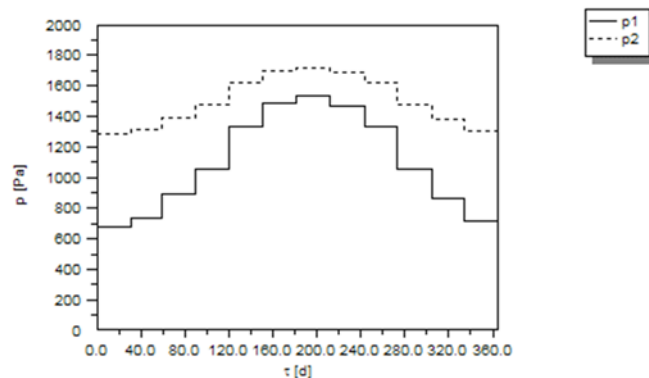
Les climats intérieurs choisis pour les simulations sont les classes de :

- Climats II représentant le climat intérieur d'un local correctement ventilé. La ventilation est alors la principale responsable de l'équilibre hygrothermique du local



Graphique 2 - Pression annuelle moyenne extérieure (1) et intérieure, Climat II (2)

- Climat III représentant le climat intérieur d'un local d'utilisation intense, et insuffisamment ventilé.



Graphique 3 - Pression annuelle moyenne extérieure (1) et intérieure, climat III (2)

2.1.2 Composition de paroi

La nouvelle couche d'isolation de cellulose serait insufflée sous le voligeage incliné de la toiture. L'épaisseur de cette couche varie entre 16 et 92 cm sur la toiture supérieure du bâtiment.

Nous considérons donc ici ces 2 épaisseurs extrêmes de la toiture.

Paroi: B35_TOITURE_SUP						
Commentaire: sans pare vapeur existant – 16//92 cm cellulose + 14 LM						
Nom du côté 1 : EXT h1 [W/m²K] : 25 μd-1 [m] : 0.0014						
No.	Nom	d [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	μ [-]	μd [m]
1	Etanchéité_DeboPlast	0,004	0,200	0,0200	20 000,0	80*
2	bois	0,020	0,180	0,1111	20,0	0,40
3	> Cellulose 1	0,160	0,039	4,1026	1,0	0,16
	> Cellulose 2	0,920	0,039	25,5897	1,0	0,92
4	Laine de verre	0,140	0,035	4,0000	1,0	0,14
5	béton_mv_2300	0,220	1,700	0,1294	135,0	29,70
No.	Nom	hup [-]	wcr [kg/m³]	wmax [kg/m³]	w [kg/m³]	
1	Etanchéité_DeboPlast	0	-	-	-	
2	bois	1	150	200	-	
3	Cellulose	1	950	950	-	
4	laine de verre	1	950	950	-	
5	béton_mv_2300	1	100	150	-	
Nom du côté 2: INT h2 [W/m²K] : 10 μd-2 [m] : 0,0084						
> Total1 : d = 0,5440 m U = 0,118 W/m²K R = 8,363 m²K/W μd = 110,4098 m						
> Total2 : d = 1,2640 m U = 0,037 W/m²K R = 26,707 m²K/W μd = 111,1200 m						

(*) D'après le fabricant DEBROER, pour l'étanchéité du DeboPlast 4 BLS/F K180, μ = 20 000 ; μd = 80 m

Tableau 14 – Composition de la toiture ré-isolée

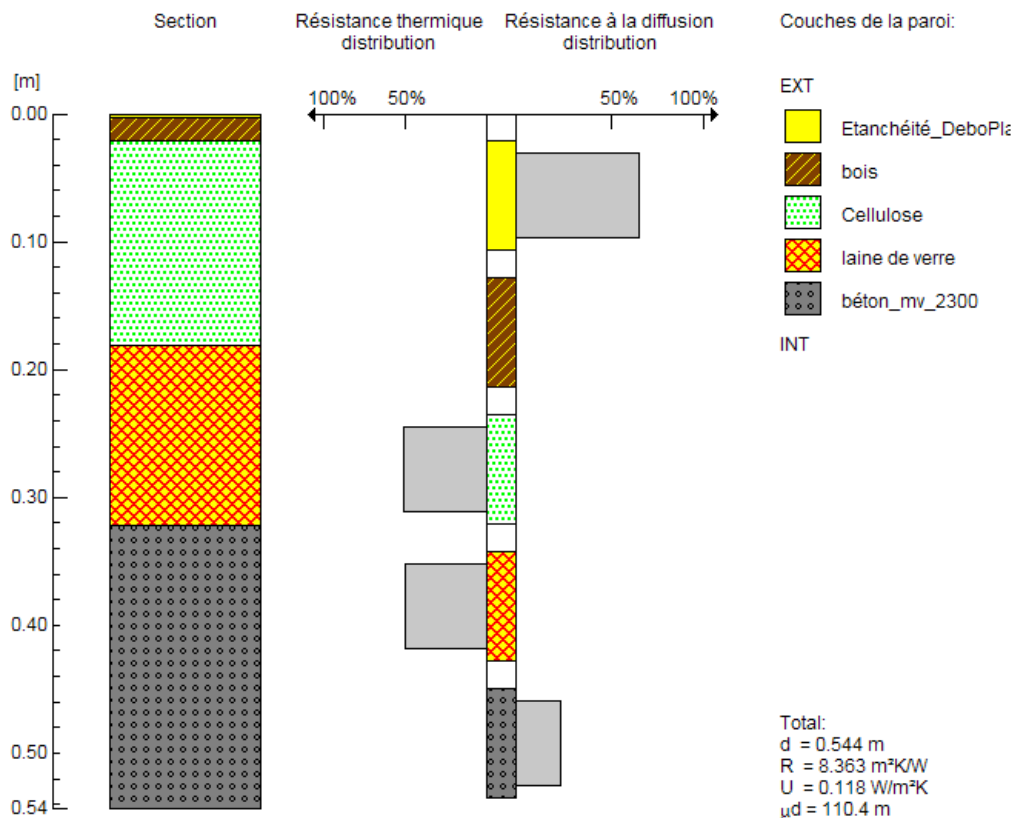


Figure 42 - Cas 1 : Cellulose, épaisseur 16 cm

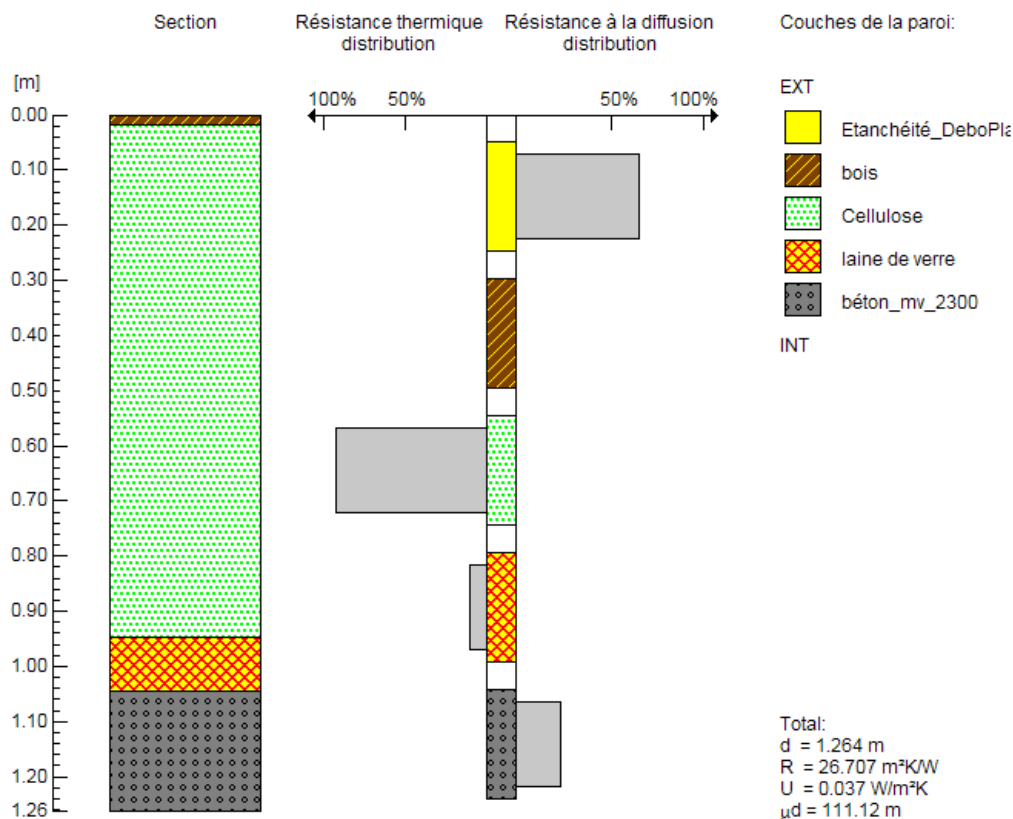


Figure 43 - Cas 2 : Cellulose, épaisseur 92 cm

2.2 SIMULATIONS GLASTA ET RÉSULTATS

Le logiciel GLASTA calcule, grâce à la méthode de Glaser, le transfert de la vapeur d'eau à travers une paroi, au cours de plusieurs années. En effet, les fluctuations du climat intérieur et du climat extérieur influencent sensiblement le processus de condensation, faisant alterner périodes de condensation interne et périodes de séchage.

La condensation maximale accumulée en une année doit rester limitée, de telle manière que le pouvoir isolant ne soit pas compromis et que les matériaux devenus humides ne subissent pas de dégâts dus au gel, à la corrosion, au pourrissement, à la dissolution de certaines colles, à la formation de moisissures, etc. Ainsi, la condensation maximale accumulée en une année doit être strictement limitée à :

- **A.** Un maximum de $0,05 \text{ kg/m}^2$ pour les matériaux d'origine végétale, et structures contenant de la colle ne résistant pas à l'eau ;
- **B.** Un maximum de $0,15 \text{ kg/m}^2$ pour les matériaux d'origine végétale, et structures contenant de la colle résistant à l'eau ;
- **C.** Un maximum absolu de $0,5 \text{ kg/m}^2$, quel que soit le matériau.

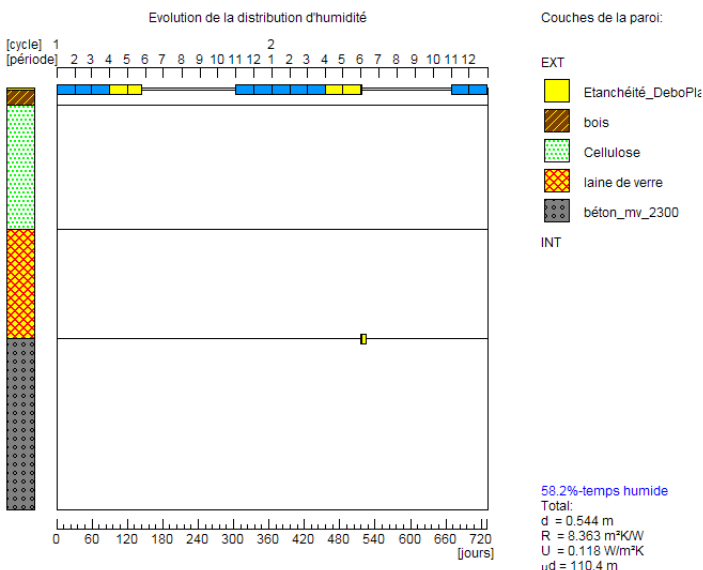
Ces limites (**A**, **B**, **C**) sont rappelées sur les graphiques des résultats de simulations réalisées par le logiciel GLASTA.

Les observations sont similaires en considérant un climat intérieur de classe 3 (local plus humide ou insuffisamment ventilé) :

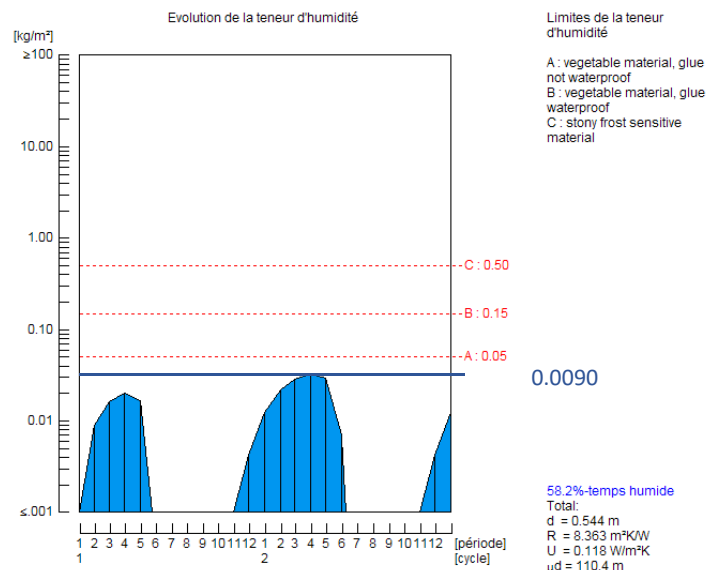
Paroi: B35_TOITURE_SUP_16.WAL

Climat: Brhoric3.boc

Méthode de calcul : GLASER



Graphique 6 - Diagramme de la distribution d'humidité



Graphique 7 - Diagramme de la teneur en eau

Dans le cas d'un climat de classe 3, on observe de la condensation entre l'étanchéité et son support en bois, mais également, pendant une très courte période, au-dessous de la dalle de béton.

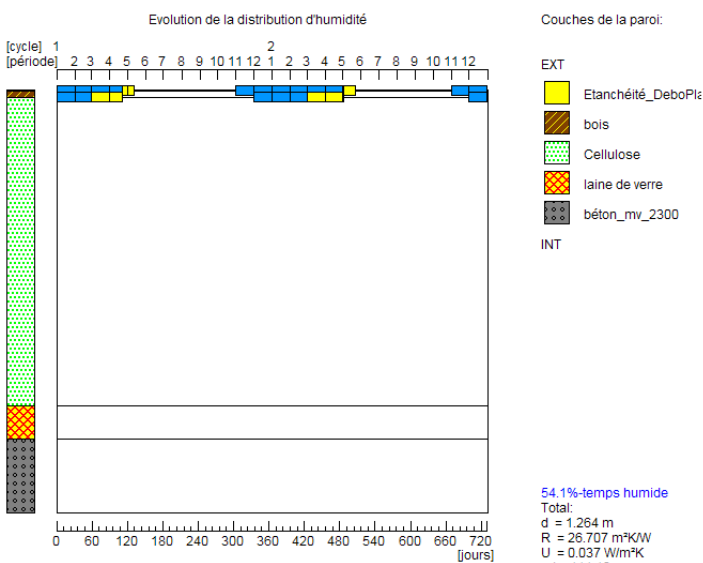
La quantité des condensats par période augmente (entre 0,0037 et 0,0090 kg/m²), mais reste inférieure au niveau maximal admissible (0,05 kg/m²).

2.2.2 Point haut d'un pan de toiture : 92 cm de cellulose

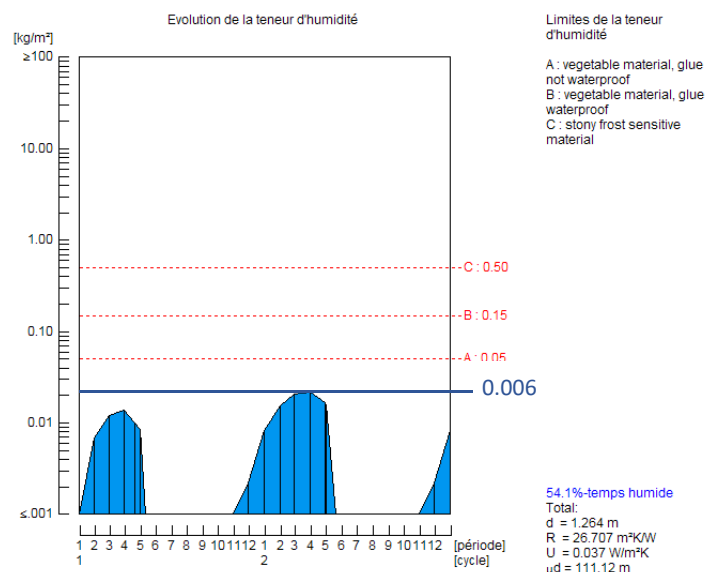
Paroi: B35_TOITURE_SUP_92.WAL

Climat: Brhoric2.boc

Méthode de calcul: GLASER



Graphique 8 - Diagramme de la distribution d'humidité



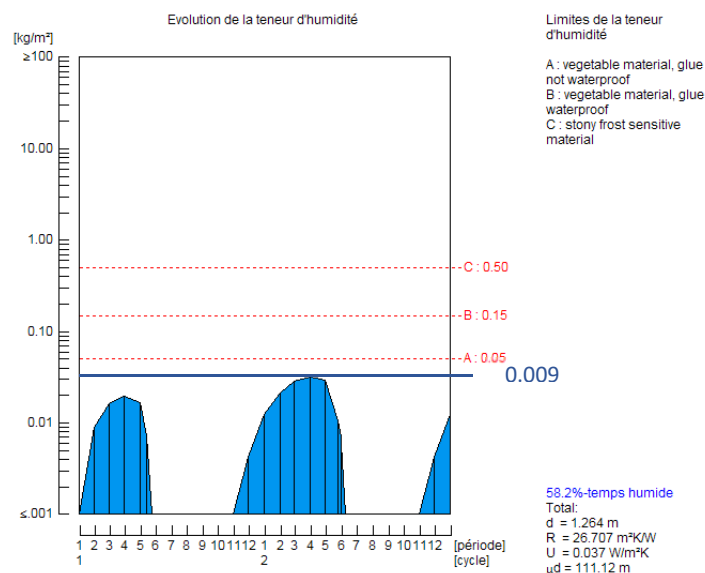
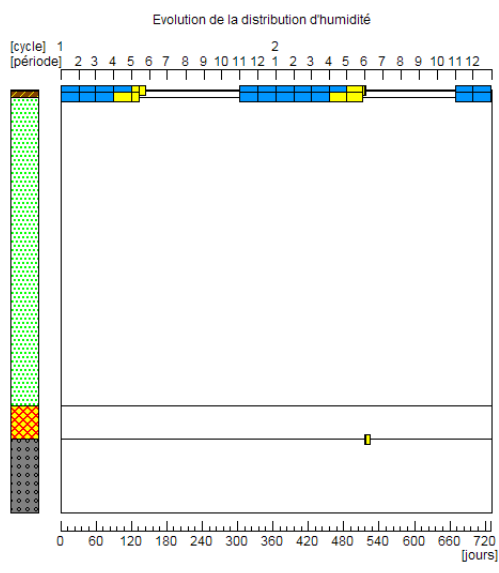
Graphique 9 - Diagramme de la teneur en eau

Au point haut de la toiture, dans le cas d'un climat intérieur de classe 2, la condensation apparaît en dessous et au-dessus du voligeage. La quantité des condensats par période varie entre 0,0016 et 0,0069 kg/m² ; elle reste donc inférieure au niveau maximal admissible (0,05 kg/m²).

Paroi: B35_TOITURE_SUP_92.WAL

Climat: Brhoric3.boc

Méthode de calcul : GLASER



Graphique 11 - Diagramme de la teneur en eau

Graphique 10 - Diagramme de la distribution d'humidité

Au point haut de la toiture, dans le cas d'un climat intérieur de classe 3, la quantité des condensats par période varie entre 0,0037 et 0,0090 kg/m², mais reste inférieure aux niveaux maximum admissibles (0,05 kg/m²).

2.3 CONCLUSIONS

En considérant des situations courantes de climats intérieurs de classe II et III, on observe de la condensation à l'endroit de la plus forte et de la plus faible épaisseur d'isolant de la toiture supérieure du bâtiment B35, selon la situation :

- entre la membrane d'étanchéité et le voligeage en bois ;
- sous le voligeage ;
- sur la dalle de béton.

Cette condensation peut totalement sécher durant un cycle, évitant la formation d'une masse d'eau permanente dans le complexe de toiture.

Par ailleurs, la quantité de condensats reste dans tous les cas inférieure au niveau maximal admissible (0,05 kg/m²).

Ainsi fait à Liège, le 25/10/2016.

Marie-Faustine KEZIMANA
Ingénieur Architecte de recherche
EnergySuD – ULg

Stéphane MONFILS
Ingénieur Architecte de recherche
EnergySuD – ULg

Prof. Jean-Marie HAUGLUSTAIN
Directeur de l'équipe de recherche
EnergySuD-ULg