

Projet d'application Th-Bât : Détermination du coefficient de transmission thermique surfacique U_p dans le cas d'une isolation inversée de toiture-terrasse en polystyrène extrudé (XPS)

1. Méthode de calcul du coefficient de transmission thermique U_p

La méthode de calcul du coefficient de transmission surfacique U_p de la paroi en partie courante des toitures à isolation inversée, est déterminé conformément au fascicule parois opaques des règles Th-bat et basée sur la norme NF EN ISO 6946, est réalisée de la façon suivante :

$$U_p = U_c + \Delta U_3$$

Note 1 :

- le coefficient U_p est présenté en résultat final avec 2 chiffres significatifs;
- U_c est calculé à 0,001 près;
- ΔU_3 correspond à la correction liée à l'écoulement des eaux de pluie entre l'isolant et la membrane d'étanchéité. Il est calculé à 0,001 près. Si ΔU_3 est inférieur à 0,001 après arrondi, alors ΔU_3 est considéré comme nul.

$$\frac{1}{U_c} = 0,14 + R_0 + R_i = R_T$$

Note 2 :

- le calcul des résistances thermiques est réalisé avec 3 chiffres significatifs;
- R_T est la résistance thermique totale, exprimée en $(m^2.K)/W$;
- R_0 est la résistance thermique, exprimée en $(m^2.K)/W$, entre la face interne de la toiture et la surface du revêtement d'étanchéité;
- R_i est la résistance thermique, exprimée en $(m^2.K)/W$, de la couche d'isolant au-dessus du revêtement d'étanchéité en tenant compte de la variation $\Delta \lambda_h$ due à l'infiltration d'eau entre le revêtement d'étanchéité et l'isolation rapportée.

Note 3 : cette application ne vise que les systèmes sans fixations mécaniques ni espace d'air entre les panneaux isolants (ΔU_1 et ΔU_2 considérés comme nuls)

R_i est établie par les relations suivantes fonction de la présence d'une ou deux épaisseurs d'isolant :

- Cas d'un seul lit d'isolant :

$$R_i = \frac{e_i}{\lambda + \Delta\lambda_h}$$

- e_i est l'épaisseur d'isolant exprimée en m;
- λ est la conductivité thermique de l'isolant corrigée, selon le Fascicule Matériaux §1.3.1, par le facteur F_R de sécurité qui tient compte de la représentativité de la valeur déclarée;
- $\Delta\lambda_h$ est la majoration de λ en W/(m.K) déterminée selon §3.

- Cas de 2 lits d'isolant :

$$R_i = \frac{e_{sup}}{\lambda_{csup} + \Delta\lambda_h} + \frac{e_{inf}}{\lambda_{cinf} + \Delta\lambda_h + \Delta\lambda_{inf2lits}}$$

- e_{sup} et e_{inf} sont respectivement les épaisseurs d'isolant posée en lit supérieur et inférieur, exprimées en m;
- λ_{csup} et λ_{cinf} sont respectivement les conductivités thermiques de base des panneaux isolants posés en couches supérieure et inférieure pour les épaisseurs données e_{sup} et e_{inf} , et corrigées selon le Fascicule Matériaux §1.3.1, par le facteurs F_R . Elles sont exprimées en W/(m.K);
- $\Delta\lambda_h$ est la majoration de λ en W/(m.K) déterminée selon §3;
- $\Delta\lambda_{inf2lits}$ est la majoration de λ donnée induite par l'utilisation de 2 épaisseurs d'isolants dans le tableau 1.

ΔU est établie par la relation suivante :

$$\Delta U_3 = p.f.x.\left(\frac{R_i}{R_T}\right)^2$$

- p est l'intensité moyenne en mm/jour des précipitations pendant la saison de chauffage. En climat de plaine, ce facteur est fixé pour chaque département et est repris dans le tableau 3. En climat de montagne, ce paramètre est donné par la station météorologique la plus proche.
- f est le facteur de drainage et x le facteur d'augmentation de la déperdition de chaleur du au drainage. Les valeurs du paramètre $f.x$ sont fonction de l'utilisation d'un écran de séparation spécifique ou courant. Les paramètres $f.x$ (en solution courante et

éventuellement en solution spécifique) sont déterminées par essai selon l'ETAG 031. Le paramètre $f.x$ est égal à 0,04 par défaut en l'absence d'essais. Si le paramètre $f.x$ est $\leq 0,001$ alors la pénalité ΔU est égale à 0.

Epaisseur de la couche inférieure	Epaisseur de la couche supérieure	Majoration $\Delta\lambda_{inf2lits}$ (W/(m.K))
$e_{inf} \leq 100$ mm	$e_{sup} \leq e_{inf}$	0,006
$100 < e_{inf} \leq 120$ mm		0,005
$120 < e_{inf} \leq 140$ mm		0,004
$140 < e_{inf} \leq 200$ mm		0,003

Tableau 1 : Valeurs du coefficient $\Delta\lambda_{inf2lits}$ en W/(m.K)

Destination de la toiture- terrasse	Inaccessible	Technique, zones techniques, y compris avec chemin de nacelle	Toiture-terrasse accessible aux piétons et au séjour	Jardin	Végétalisée
			<ul style="list-style-type: none">• Dalles préfabriquées posées à sec• Dalles sur plots• Revêtement de sol dur• Pavés en béton• Béton coulé en place		
<i>f.x</i> Solution courante	0,04		0,04	0,04	
<i>f.x</i> Solution avec un écran spécifique	f.x mesuré ^{(1), (2)}				
<div>1) selon l' ETAG 031</div> <div>2) si $f.x \leq 0,001$, ΔU_3 est alors considéré comme nul</div>					

Tableau 2 : Valeurs utiles du paramètre f.x

N°	Département	p	N°	Département	p	N°	Département	p
01	Ain	2,12	32	Gers	1,99	64	Pyrénées-Atlantiques	3,42
02	Aisne	1,89	33	Gironde	2,90	65	Hautes-Pyrénées	3,33
03	Allier	1,84	34	Hérault	2,31	66	Pyrénées-Orientales	1,87
04	Alpes-Haute Provence	2,03	35	Ille-et-Vilaine	1,93	67	Bas-Rhin	1,33
05	Hautes-Alpes	2,03	36	Indre	2,06	68	Haut-Rhin	1,31
06	Alpes Maritimes	2,74	37	Indre-et-Loire	1,98	69	Rhône	2,12
07	Ardèche	2,62	38	Isère	2,58	70	Haute-Saône	2,86
08	Ardennes	1,89	39	Jura	2,21	71	Saône-et-Loire	2,21
09	Ariège	2,85	40	Landes	2,87	72	Sarthe	1,99
10	Aube	1,81	41	Loir-et-Cher	1,99	73	Savoie	2,91
11	Aude	2,22	42	Loire	1,56	74	Haute-Savoie	2,91
12	Aveyron	2,19	43	Haute-Loire	1,56	75	Paris	1,69
13	Bouches-du-Rhône-	1,81	44	Loire-Atlantique	2,48	76	Seine-Maritime	2,24
14	Calvados	2,09	45	Loiret	1,78	77	Seine-et-Marne	1,81
15	Cantal	1,93	46	Lot	2,50	78	Yvelines	1,69
16	Charente	2,40	47	Lot-et-Garonne	1,99	79	Deux-Sèvres	1,86
17	Charente-Maritime	2,42	48	Lozère	1,56	80	Somme	2,04
18	Cher	1,94	49	Maine-et-Loire	1,86	81	Tarn	1,83
19	Corrèze	1,93	50	Manche	1,84	82	Tarn-et-Garonne	1,99
2A	Corse-du-Sud	2,41	51	Marne	1,58	83	Var	2,42
2B	Haute-Corse	2,41	52	Haute-Marne	2,25	84	Vaucluse	2,01
21	Côte-d'Or	1,89	53	Mayenne	1,93	85	Vendée	2,32
22	Côte d'Armor	2,37	54	Meurthe-et-Moselle	2,00	86	Vienne	2,07
23	Creuse	1,93	55	Meuse	2,25	87	Haute-Vienne	3,01
24	Dordogne	1,99	56	Morbihan	2,90	88	Vosges	2,00
25	Doubs	3,00	57	Moselle	2,08	89	Yonne	1,72
26	Drôme	2,62	58	Nièvre	2,20	90	Territoire-de-Belfort	3,06
27	Eure	1,59	59	Nord	1,84	91	Essonne	1,69
28	Eure-et-Loir	1,59	60	Oise	1,83	92	Hauts-de-Seine	1,69
29	Finistère	2,89	61	Orne	2,24	93	Seine-Saint-Denis	1,69
30	Gard	2,44	62	Pas-de-Calais	1,67	94	Val-de-Marne	1,69
31	Haute-Garonne	1,83	63	Puy-de-Dôme	1,19	95	Val-d'Oise	1,69

Légende :

P : précipitations moyennes en période de chauffe (octobre à avril période 1961-1990), en mm/jour, valable pour le climat de plaine.

(1) Les données représentées ici sont celles des stations du réseau synoptique de Météo France qui ont effectué des mesures sur la période de 1961-1990 et qui n'ont pas subi de déplacement important sur cette période. A celles-ci, ont été ajoutées six stations qui ont subi un déplacement important durant cette période et pour lesquelles la série trentenaire n'était pas homogène : Gourdon (Lot), Grenoble (Isère), Limoges (Haute-Vienne), Millau (Aveyron), Rouen (Seine-Maritime), Tours (Indre-et-Loire). Nous avons choisi de calculer des moyennes pour ces stations, sur la plus longue période homogène comprise entre 1961 et 1990, pour avoir la meilleure répartition possible (origine Météo France).

Tableau 3: Valeur des précipitations moyennes p en mm/jour pour le climat de plaine

2. Exemples de calculs thermiques

2.1. Solution courante en un lit

Hypothèse de la construction de la toiture-terrasse inaccessible - lestage gravillons : bâtiment, situé à Saint-Denis (Seine-Saint-Denis 93)	<u>Valeurs thermiques</u>
- Élément porteur en béton armé, d'épaisseur 0,20 m ($\lambda_{\text{utile}} = 2 \text{ W/(m.K)}$) - Revêtement d'étanchéité en asphalte 5 + 20 ($\lambda_{\text{UTILE}} = 0,70 \text{ et } 1,15 \text{ W/(m.K)}$)	$R_0 = 0,125 \text{ m}^2.\text{K/W}$
- Lit en panneau XPS d'épaisseur 200 mm : <ul style="list-style-type: none">• $e_i = 200 \text{ mm}$• $\lambda = 0,029 \text{ W/(m.K)}$• $\Delta\lambda_h = 0,0015 \text{ W/(m.K)}$	$R_i = 6,557 \text{ m}^2.\text{K/W}$
- Résistance thermique totale : $1/U_c = 0,14 + R_0 + R_i$	$1/U_c = 6,822 \text{ m}^2.\text{K/W}$
soit un coefficient	$U_c = 0,147 \text{ W/(m}^2.\text{K)}$
<ul style="list-style-type: none"> • - ΔU_3 à apporter sur le coefficient U_p de transmission thermique moyen de la toiture, correction ΔU_3 en raison de l'eau de pluie qui circule entre l'isolant et le revêtement : <ul style="list-style-type: none"> ➢ paramètre $p = 1,69 \text{ mm/jour}$ selon le <i>tableau 3</i> ➢ valeur $f.x = 0,04$ en solution courante 	
soit une correction	$\Delta U_3 = 0,062 \text{ W/(m}^2.\text{K)}$
Le coefficient de transmission global de la toiture	$U_p = U_c + \Delta U_3 = 0,21 \text{ W/(m}^2.\text{K)}$

2.2. Solution avec écran spécifique en un lit

Hypothèse de la construction de la toiture-terrasse inaccessible – lestage gravillons : bâtiment, situé à Saint-Denis (Seine-Saint-Denis 93) (<u>Valeurs thermiques</u>
- Élément porteur en béton armé, d'épaisseur 0,20 m ($\lambda_{\text{UTILE}} = 2 \text{ W/(m.K)}$) - Revêtement d'étanchéité en asphalte 5 + 20 ($\lambda_{\text{UTILE}} = 0,70 \text{ et } 1,15 \text{ W/(m.K)}$)	$R_0 = 0,125 \text{ m}^2.\text{K/W}$
- Lit en panneau XPS d'épaisseur 200 mm associé à un écran spécifique : <ul style="list-style-type: none"> • $e_i = 200 \text{ mm}$ • $\lambda = 0,029 \text{ W/(m.K)}$ • $\Delta\lambda_h = 0,0015 \text{ W/(m.K)}$ 	$R_i = 6,557 \text{ m}^2.\text{K/W}$
- Résistance thermique totale : $1/U_c = 0,14 + R_0 + R_1$	$1/U_c = 6,822 \text{ m}^2.\text{K/W}$
soit un coefficient	$U_c = 0,147 \text{ W/(m}^2.\text{K)}$
<ul style="list-style-type: none"> • - ΔU_3 à apporter sur le coefficient U_p de transmission thermique moyen de la toiture, correction ΔU_3 en raison de l'eau de pluie qui circule entre l'isolant et le revêtement : <ul style="list-style-type: none"> • paramètre $p = 1,69 \text{ mm/jour}$ selon le <i>tableau 3</i> • valeur $f.x = 0,001$ avec l'emploi de l'écran spécifique associé aux panneaux XPS 	
soit une correction	$\Delta U_3 = 0,00 \text{ W/(m}^2.\text{K)}$ ¹⁾
Le coefficient de transmission global de la toiture	$U_p = U_c + \Delta U_3 = 0,15 \text{ W/(m}^2.\text{K)}$
¹⁾ ΔU est considéré comme nul car $f.x \leq 0,001$.	

2.3. Solution en deux lits

Hypothèse de la construction de la toiture-terrasse inaccessible – lestage gravillons : bâtiment situé à Saint-Denis (Seine-Saint-Denis)	<u>Valeurs thermiques</u>
- Élément porteur en béton armé, d'épaisseur 0,20 m ($\lambda_{\text{UTILE}} = 2 \text{ W/(m.K)}$) - Revêtement d'étanchéité en asphalte 5 + 20 ($\lambda_{\text{UTILE}} = 0,70$ et $1,15 \text{ W/(m.K)}$)	$R_0 = 0,125 \text{ m}^2.\text{K/W}$
- Lit en panneau XPS d'épaisseur 320 mm associé à un écran spécifique : <ul style="list-style-type: none"> • $e_1 = 160 \text{ mm}$ • $e_2 = 160 \text{ mm}$ • $\lambda = 0,029 \text{ W/(m.K)}$ • $\Delta\lambda = 0,0015 \text{ W/(m.K)}$ • $\Delta\lambda_{\text{inf2lits}} = 0,003 \text{ W/(m.K)}$ 	$R_i = 10,022 \text{ m}^2.\text{K/W}$
- Résistance thermique totale : $1/U_c = 0,14 + R_0 + R_i$	$1/U_c = 10,287 \text{ m}^2.\text{K/W}$
soit un coefficient	$U_c = 0,097 \text{ W/(m}^2.\text{K)}$
<ul style="list-style-type: none"> • - ΔU_3 à apporter sur le coefficient U_p de transmission thermique moyen de la toiture correction ΔU_3 en raison de l'eau de pluie qui circule entre l'isolant et le revêtement : <ul style="list-style-type: none"> • paramètre $p = 1,69 \text{ mm/jour}$ selon le tableau 3 • valeur $f.x = 0,001$ avec l'emploi de l'écran spécifique associé aux panneaux XPS 	
soit une correction	$\Delta U_3 = 0,00 \text{ W/(m}^2.\text{K)}$ ¹⁾
Le coefficient de transmission global de la toiture	$U_p = U_c + \Delta U_3 = 0,10 \text{ W/(m}^2.\text{K)}$
¹⁾ ΔU_3 est considéré comme nul car $f.x \leq 0,001$.	

3. Détermination de la valeur de majoration $\Delta\lambda_H$

l'usage des panneaux en isolation inversée se réalisant dans des conditions plus sévères que la normale, il convient de corriger la conductivité thermique dans cette application.

$$\lambda_i = \lambda + \Delta\lambda_H$$

- λ_i : conductivité thermique corrigée pour tenir compte de l'humidité additionnelle dans le cas d'un usage en isolation inversée;
- λ est la conductivité thermique de l'isolant corrigée, selon le Fascicule Matériaux §1.3.1, par le facteur F_R de sécurité qui tient compte de la représentativité de la valeur déclarée;
- $\Delta\lambda_H$: majoration de conductivité thermique suivant le type de protection. Exprimé en $W/m\cdot K$;
- *Note: la majoration de conductivité thermique est exprimée avec 2 chiffres significatifs. Elle est arrondie par excès à 0,0005 $W/m\cdot K$ près.*

3.1. Facteur de conversion F_m

La détermination de la majoration $\Delta\lambda_H$ est réalisée conformément à la norme NF EN ISO 10456.

$$\Delta\lambda_H = \lambda \cdot F_m - \lambda$$

avec

- $F_m = e^{f_\psi \cdot \psi_{cor}}$ et $\psi_{cor} = \psi_2 - \psi_1$
- λ est la conductivité thermique de l'isolant corrigée, selon le Fascicule Matériaux §1.3.1, par le facteur F_R de sécurité qui tient compte de la représentativité de la valeur déclarée;
- F_m facteur de conversion lié à l'humidité,
- f_ψ coefficient de conversion relatif à la teneur en humidité volumique de l'isolant défini par défaut dans la norme NF EN ISO 10456 ou déterminé spécifiquement (voir § 3.2.2),
- ψ_2 teneur en humidité volumique en œuvre, exprimée en m^3/m^3
- ψ_1 teneur en humidité volumique initiale, correspondant aux conditions d'humidité de la valeur déclarée, exprimée en m^3/m^3

Note : le facteur de conversion lié à l'humidité F_m est arrondi à 0,001 près.

3.2. Paramètres de calcul en fonction du type de protection

La teneur en eau des panneaux ψ_2 diffère suivant le type de protection. Les seuils maximaux attendus sont fixés à :

- 2 % (0,02 en m^3/m^3) pour les protections plutôt ouvertes à la diffusion de la vapeur d'eau : protection meuble (gravier), dalles préfabriquées à sec ou sur plots, systèmes de végétalisation hors systèmes "tout-en-un";
- 4 % (0,04 en m^3/m^3) pour les protections fermées : carreaux sur chape, dallage béton, pavés, terre végétale, systèmes de végétalisation autres que ceux considérés comme protection ouverte.

Note : dans le cas de planchers chauffants (support d'étanchéité) il tient lieu de prendre en considération les conditions des protections fermées même en présence de protection ouverte.

3.3. Coefficient de conversion f_ψ

3.3.1. Valeur forfaitaire

Par défaut le coefficient de conversion f_ψ est pris égal à 2,5 conformément à la norme NF EN ISO 10456.

3.3.2. Valeur par essais

Le coefficient de conversion peut être déterminé par essais réalisés selon l'EAD 040650-00-1201.

3.4. Valeurs tabulées de majoration de conductivité thermique $\Delta\lambda_h$ avec coefficient de conversion f_ψ forfaitaire

Lorsqu'il n'existe pas d'essais de détermination d'un coefficient de conversion f_ψ spécifique, les valeurs tabulées dans le tableau n°4 suivant s'appliquent. Elles sont fonction de la conductivité thermique de l'isolant corrigée, selon le Fascicule Matériaux §1.3.1, par le facteur F_R de sécurité qui tient compte de la représentativité de la valeur déclarée et de la protection, ouverte ou fermée.

Conductivité thermique de l'isolant	$\Delta\lambda_h$ en (W/m·K)	
	Protection ouverte	Protection fermée
0,027	0,0015	0,003
0,028	0,0015	0,003
0,029	0,0015	0,0035
0,03	0,002	0,0035
0,031	0,002	0,0035
0,032	0,002	0,0035
0,033	0,002	0,0035
0,034	0,002	0,004
0,035	0,002	0,004
0,036	0,002	0,004
0,037	0,002	0,004
0,038	0,002	0,004
0,039	0,002	0,0045
0,04	0,0025	0,0045
0,041	0,0025	0,0045
0,042	0,0025	0,0045
0,043	0,0025	0,005
0,044	0,0025	0,005
0,045	0,0025	0,005

Tableau 4 Valeurs tabulées de majoration de conductivité thermique $\Delta\lambda_h$

3.5. Convention de classification de protection pour l'application du

$\Delta\lambda_h$

Le tableau ci-dessous indique la classification à l'ouverture à la vapeur d'eau des protections de toitures terrasses selon la destination,

Destination de la toiture- terrasse	Inaccessi- ble	Technique, zones techniques, y compris avec chemin de nacelle	Toiture-terrasse accessible aux piétons et au séjour		Jardin	Végéta- lisée
			<ul style="list-style-type: none">• Dalles préfabriquées posées à sec• Dalles sur plots	<ul style="list-style-type: none">• Revêtement de sol dur• Pavés en béton• Béton coulé en place		
Type de protectio- ns	Valeur protection ouverte ¹⁾		Valeur protection ouverte ¹⁾	Valeur protection fermée	Valeur protection fermée	

¹⁾ cas des planchers chauffants avec température du revêtement d'étanchéité < 30°C : Δλ_h = valeur protection fermée

Tableau 5 Majoration de conductivité thermique $\Delta\lambda_h$ selon la nature de la protection, ouverte ou fermée