

# **Règles Th-bat – Parois opaques**

Publié le 20 décembre 2017



# Sommaire

1.Introduction .....	3
1.1 Domaine d'application .....	3
1.2 Références normatives .....	3
1.3 Définitions, symboles et indices .....	3
1.3.1 Définitions.....	3
1.3.2 Symboles et indices.....	5
1.3.2.1 Coefficient de transmission thermique.....	5
1.3.2.2 Facteur solaire .....	6
2. Caractéristiques thermiques utiles des parois opaques.....	6
3. Méthodes de calcul bâtiments neufs .....	7
3.1 Méthodes générales.....	7
3.1.1 Résistance thermique $R$ .....	7
3.1.1.1 Couches thermiquement homogènes.....	7
3.1.1.1.1 Couches solides.....	7
3.1.1.1.2 Espaces d'air .....	8
3.1.1.2 Couches thermiquement hétérogènes .....	12
3.1.1.3 Résistance superficielle .....	12
3.1.1.3.1 Surfaces planes .....	12
3.1.1.3.2 Surfaces non planes .....	14
3.1.2 Coefficient de transmission surfacique $U$ .....	15
3.1.2.1 Parois donnant sur l'extérieur ou sur un local non chauffé .....	15
3.1.2.1.1 Paroi comportant des couches d'épaisseur uniforme .....	16
3.1.2.1.2 Paroi comportant des couches d'épaisseur variable.....	19
3.1.2.2 Parois en contact avec le sol.....	20
3.1.2.2.1 Paramètres de calcul.....	21
3.1.2.2.2 Planchers.....	22
3.1.2.2.3 Murs enterrés.....	24
3.1.2.3 Parois donnant sur vide sanitaire ou sur un sous-sol non chauffé.....	24
3.1.2.3 1 Paramètres de calcul .....	24
3.1.2.3 2 Planchers sur vide sanitaire .....	25
3.1.2.3 3 Planchers sur sous-sol non chauffé .....	26
3.1.2.3.4 Murs.....	26
3.1.2.4 Parois en contact avec le sol et donnant sur un volume non chauffé....	27
3.1.3 Facteur Solaire $S$ .....	27

---

3.1.3.1	Méthode de calcul dans le cas général .....	27
3.1.2.2	Facteur solaire des parois opaques avec lame d'air ventilées .....	29
3.1.2.3	Facteur solaire d'une paroi opaque végétalisée .....	31
32	Éléments de méthodes complémentaires .....	34
3.2.1	Étalement sur plancher haut de matériaux en vrac .....	34
3.2.1.1	Soufflage à la machine sur plancher plat .....	34
3.2.1.2	Déversement manuel sur plancher plat .....	35
3.2.1.3	Soufflage à la machine ou déversement manuel sur plancher à solives ....	35
3.2.2	Produits réfléchissants .....	35

## 1. Introduction

Ce fascicule donne les méthodes de calcul des caractéristiques thermiques utiles des parois opaques et de leurs composants, et revoit vers les applications établies conformément aux dites méthodes.

### 1.1 Domaine d'application

Les caractéristiques thermiques utiles déterminées selon ce fascicule servent au calcul de la consommation d'énergie des bâtiments dans le cadre de l'application de la réglementation thermique.

### 1.2 Références normatives

Le calcul des caractéristiques thermiques des éléments d'enveloppe du bâtiment s'appuie principalement sur les travaux de la normalisation européenne.

NF EN ISO 7345	Isolation thermique – Grandeurs physiques et définitions.
NF EN ISO 13789	Performance thermique des bâtiments – Coefficient de déperdition par transmission – Méthode de calcul.
NF EN ISO 10456	Matériaux et produits pour le bâtiment – Propriétés hygrothermiques – Valeurs utiles tabulées et procédures pour la détermination des valeurs thermiques déclarées et utiles.
NF EN ISO 6946	Composants et parois de bâtiments – Résistance thermique et coefficient de transmission thermique – Méthode de calcul.
NF EN ISO 13370	Performance thermique des bâtiments – Transfert de chaleur par le sol – Méthodes de calcul.
NF EN ISO 10211	Ponts thermiques dans les bâtiments – Flux thermiques et températures superficielles – Calculs détaillés.
NF EN ISO 8990	Isolation thermique – Détermination des propriétés de transmission thermique en régime stationnaire – Méthodes à la boîte chaude gardée et calibrée.

### 1.3 Définitions, symboles et indices

#### 1.3.1 Définitions

Dans le présent document, les définitions de la norme NF EN ISO 7345 et les définitions suivantes s'appliquent :

- Local : un local est un volume totalement séparé de l'extérieur ou d'autres volumes par des parois fixes ou mobiles ;
- Espace chauffé : local ou volume fermé chauffé à une température supérieure à 12 °C en période d'occupation ;
- Dimensions intérieures : dimensions mesurées de l'intérieur des locaux déterminés selon le fascicule « Généralités » des règles Th-Bat ;
- Paroi opaque isolée : paroi opaque dont le coefficient de transmission thermique  $U$  n'excède pas 0,5 W/(m<sup>2</sup>.K) ;
- Paroi transparente ou translucide : paroi dont le facteur de transmission lumineuse (hors protection mobile éventuelle) est égal ou supérieur à 0,05. Dans le cas contraire elle est dite opaque ;
- Paroi verticale ou horizontale : une paroi est dite verticale lorsque l'angle de cette paroi avec le plan horizontal est supérieur ou égal à 60 degrés, elle est dite horizontale lorsque cet angle est inférieur à 60 degrés ;
- Plancher bas : paroi horizontale donnant sur un local chauffé uniquement sur sa face supérieure ;
- Plancher intermédiaire : paroi horizontale donnant, sur ses faces inférieure et supérieure, sur des locaux chauffés ;
- Plancher haut : paroi horizontale donnant sur un local chauffé uniquement sur sa face inférieure ;
- Liaisons périphériques : liaisons situées au pourtour d'une paroi donnée ;
- Liaisons intermédiaires : liaisons situées à l'intérieur du pourtour d'une paroi donnée ;

- Flux thermique  $\phi$  en W : quantité de chaleur transmise à (ou fournie) par un système, divisée par le temps ;
- Densité surfacique (ou linéique) du flux thermique  $\phi$ , en  $W/m^2$  (ou  $W/m$ ) : flux thermique par unité de surface (ou par unité de longueur) ;
- Conductivité thermique  $\lambda$ , en  $W/(m.K)$  : flux thermique par mètre carré, traversant un mètre d'épaisseur de matériau pour une différence de température de un kelvin entre les deux faces de ce matériau ;
- Coefficient de déperdition par transmission  $H$ , en  $W/K$  : flux thermique cédé par transmission entre l'espace chauffé et l'extérieur, pour une différence de température d'un kelvin entre les deux ambiances. Les températures, intérieure et extérieure, sont supposées uniformes ;
- Coefficient de transmission surfacique  $U$ , en  $W/(m^2.K)$  : flux thermique en régime stationnaire par unité de surface, pour une différence de température de un kelvin entre les milieux situés de part et d'autre d'un système ;
- Coefficient de transmission linéique  $\psi$ , en  $W/(m.K)$  : flux thermique en régime stationnaire par unité de longueur, pour une différence de température de un kelvin entre les milieux situés de part et d'autre d'un système ;
- Coefficient de transmission surfacique « équivalent » d'une paroi  $U_e$ , en  $W/(m^2.K)$  : coefficient de transmission surfacique tenant compte à la fois des caractéristiques intrinsèques de la paroi et de son environnement (vide sanitaire, sous-sol non chauffé, sol) ;
- Résistance thermique  $R$ , en  $(m^2.K)/W$  : inverse du flux thermique à travers un mètre carré d'un système pour une différence de température de un kelvin entre les deux faces de ce système ;
- Résistance thermique totale  $R_T$ , en  $(m^2.K)/W$  : somme de la résistance thermique  $R$  d'une paroi et des résistances thermiques superficielles côtés intérieur et extérieur ;
- Résistance superficielle  $R_s$ , en  $(m^2.K)/W$  : inverse du flux thermique passant par mètre carré de paroi, de l'ambiance à la paroi pour une différence de température de un kelvin entre celles-ci ;
- Isolation répartie : isolation assurée exclusivement par l'épaisseur de la partie porteuse de la paroi (ex. : Blocs à perforations verticales en terre cuite, blocs en béton cellulaire) ;
- Conductivité thermique « équivalente en  $W/(m.K)$  » : rapport de l'épaisseur d'une paroi sur sa résistance thermique ;
- Maçonnerie courante : maçonnerie couramment utilisée (à base de béton ou de terre cuite) de conductivité thermique équivalente  $\lambda_e \geq 0,7 W/(m.K)$  ;
- Couche thermiquement homogène : couche d'épaisseur constante ayant des propriétés thermiques uniformes ou considérées comme telles :
  - Les couches à hétérogénéités faibles et régulières peuvent être assimilées à une couche thermiquement homogène (ex. : murs en maçonnerie),
  - Un plancher à entrevous non isolant peut être assimilé à une couche thermiquement homogène,
  - Une lame d'air d'épaisseur constante est considérée comme une couche thermiquement homogène ;
- Partie courante d'une paroi : partie constituée d'une ou de plusieurs couches superposées, thermiquement homogènes ;
- Pont thermique intégré : élément intégré dans la paroi, donnant lieu à des déperditions thermiques supplémentaires par rapport à la partie courante ;
- Dimension caractéristique d'une paroi : aire de la paroi, divisée par son demi-périmètre, en mètres ;
- Epaisseur « équivalente » d'un système : épaisseur d'un matériau thermiquement homogène, ayant la même résistance thermique que ce système, en mètres ;
- Avis Technique et Document Technique d'Application : on entend par Avis Technique et Document Technique d'Application, tout avis formulé conformément à l'arrêté du 21 mars 2012 relatif à la commission chargée de formuler des Avis Techniques et Documents Techniques d'Application sur des procédés matériaux, éléments ou équipements utilisés dans la construction, délivré en vue d'établir l'aptitude à l'emploi des procédés, matériaux, éléments ou équipements utilisés dans la construction dont la constitution ou l'emploi ne relèvent pas des savoir-faire et pratiques traditionnels.
- Valeurs tabulées : valeurs obtenues par application directe des méthodes et valables dans les plages de donnée d'entrée utilisées pour l'application des méthodes,
- Valeurs par défaut : valeurs sécuritaires à utiliser comme caractéristique thermique utile pour le bâtiment neuf en absence de valeur déclarée et sans justification particulière,
- Caractéristique thermique utile : Caractéristique thermique représentative du comportement thermique des parois, éléments ou composants, qui peut être considérée comme caractéristique de la performance de ce matériau ou de ce produit une fois incorporé dans le bâtiment et ceci durant toute la durée de vie de l'ouvrage. Par conséquent, la caractéristique thermique utile, doit être à la fois représentative de l'ensemble

de la production dans l'espace et dans le temps avec la prise en compte dans la mesure du possible, des conditions moyennes d'utilisation rencontrées dans le bâtiment (mise en œuvre, température, humidité, vent, vieillissement, etc...).

- Caractéristique thermique déclarée : Caractéristique thermique établie conformément à des spécifications techniques européennes (normes harmonisées ou Documents d'Evaluation Européen) ou bien dans le cadre d'une certification. La caractéristique thermique déclarée peut être différente de la caractéristique thermique utile, notamment si les conventions servant à son élaboration, ne sont pas représentatives de celles rencontrée dans le bâtiment.

## 1.3.2 Symboles et indices

### 1.3.2.1 Coefficient de transmission thermique

Tableau I : Symboles

Symbole	Grandeur	Unité
U	Coefficient de transmission surfacique	W/(m <sup>2</sup> .K)
ψ	Coefficient de transmission linéique	W/(m.K)
χ	Coefficient de transmission ponctuel	W/K
R	Résistance thermique	m <sup>2</sup> .K/W
A	Surface	m <sup>2</sup>
l, L	Longueur, largeur, linéaire	m
λ	Conductivité thermique	W/(m.K)
ΔT	Différence de température	K
b	Coefficient de réduction de la température	-
h	Coefficient d'échange	W/(m <sup>2</sup> .K)
2D, 3D	Deux dimensions, trois dimensions	
B'	Dimension caractéristique	m
d	Épaisseur	m
v	Vitesse	m/s

Tableau II : Indices

e	Extérieur
i	Intérieur
s	Superficiel
t, T	Total
D	Direct
S	Sol
u	Non chauffé
e	« Équivalent »
iu	Intérieur vers local non chauffé
ue	Local non chauffé vers extérieur
a	Par convection, par conduction
r	Par rayonnement
m	Moyen
p	Relatif à la paroi
g	Relatif au sol
c	Partie courante

### 1.3.2.2 Facteur solaire

Tableau III : Nomenclature pour le facteur solaire

$A_p$	Coefficient d'absorption solaire de la paroi opaque	-
$U_{p-C}$	Coefficient de transmission thermique de la paroi opaque en conditions C, déterminé selon les règles Th-Bat et les normes associées	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$U_{p-E}$	Coefficient de transmission thermique de la paroi opaque en conditions E	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$R_{se-C}$ $R_{se-E}$	Résistances thermiques superficielles extérieures (convection et rayonnement) en conditions C et E	$m^2.K.W^{-1}$
$R_{si-C}$ $R_{si-E}$	Résistances thermiques superficielles intérieures (convection et rayonnement) en conditions C et E	$m^2.K.W^{-1}$
$U_{p-C, non-ventilée}$ $U_{p-E, non-ventilée}$	Coefficient de transfert thermique dans l'hypothèse d'une lame d'air horizontale non-ventilée en conditions C et E	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$R_i$	Résistance thermique de la partie de la paroi opaque en contact avec l'intérieur	$m^2.K.W^{-1}$
$R_e$	Résistance thermique de la partie de la paroi opaque en contact avec l'extérieur	$m^2.K.W^{-1}$
$R_{la}$	Résistance thermique de la lame d'air de la paroi opaque, en supposant celle-ci fermée et non-ventilée	$m^2.K.W^{-1}$
$U_{p-C, eq-très-ventilée}$ $U_{p-E, eq-très-ventilée}$	Coefficient de transfert thermique équivalent dans l'hypothèse d'une lame d'air horizontale très fortement ventilée en conditions C et E	$m^2.K.W^{-1}$
$K_{qs}$	Coefficient caractéristique des interactions entre le vent et la lame d'air verticale	-
$H_{IA}$	Hauteur de la lame d'air verticales ventilées	m
$S_{EA}$	Surface de la plus petite des différentes sections latérales d'ouverture de la lame d'air ventilée horizontale	$m^2$
$A_{e,k}$	Surface totale de la face intérieure de la partie en contact avec l'extérieur de la paroi opaque dans le cas d'une lame d'air ventilée horizontale	$m^2$

Les deux jeux de conditions aux limites sont distingués par les exposants suivants :

- **C** : conditions pour le calcul des consommations d'énergie, à retenir à la fois pour les locaux climatisés et non-climatisés
- **E** : conditions pour le calcul du confort thermique d'été et le dimensionnement des systèmes de refroidissement.

## 2. Caractéristiques thermiques utiles des parois opaques

Les propriétés thermiques utiles des matériaux et produits de construction servant au calcul du coefficient de transmission surfacique des parois opaques sont déterminées selon le chapitre 2 du fascicule (Matériaux).

Les propriétés thermiques utiles ( $R_u$ ,  $U_u$ ) des parois doivent être déterminées selon le présent fascicule (Parois opaques) à partir des propriétés thermiques utiles des matériaux et produits déterminées selon le chapitre 2 du fascicule (Matériaux).

### 3. Méthodes de calcul bâtiments neufs

Ce chapitre donne les méthodes de calcul du coefficient de transmission surfacique utile  $U_o$  et de la résistance thermique utile  $R$  des parois opaques mise en œuvre dans des ouvrages neufs.

Une alternative aux méthodes de calcul décrites ci-après est la mesure de la paroi à la boîte chaude gardée conformément à la norme NF EN ISO 8990. Toutefois, les résultats de mesure ne valent que pour l'échantillon mesuré.

La détermination du coefficient de transmission surfacique « équivalent »  $U_o$  des parois en contact avec le sol ou donnant sur un vide sanitaire ou un sous-sol non chauffé, fait l'objet d'un calcul spécifique détaillé aux paragraphes 3.1.2.2 et 3.1.2.3.

Les coffres de volets roulants installés dans la baie doivent être intégrés dans le calcul de la baie vitrée, les autres doivent être calculés comme des parois opaques. La méthode générale de calcul des coffres de volets roulants est donnée dans le fascicule Parois vitrées.

Dans le cas où une caractéristique thermique déclarée de la paroi est disponible, par référence aux normes européennes harmonisées ou aux Évaluations Techniques Européennes, se reporter au fascicule 1 (Généralités) pour la détermination de la caractéristique thermique utile correspondante.

#### 3.1 Méthodes générales

##### 3.1.1 Résistance thermique $R$

La résistance thermique  $R$  d'une paroi est l'inverse du flux thermique à travers un mètre carré de paroi pour une différence de température de un kelvin entre les deux faces de la paroi.  $R$  s'exprime en  $m^2.K/W$  et elle est fonction des caractéristiques géométriques et thermiques des matériaux constituant la paroi.

À l'exception des résistances superficielles arrondies à deux décimales, les valeurs des résistances thermiques utilisées dans les calculs intermédiaires doivent être calculées avec au moins trois décimales.

##### 3.1.1.1 Couches thermiquement homogènes

###### 3.1.1.1.1 Couches solides

Il s'agit de couches d'épaisseur constante, à hétérogénéités faibles et régulières pouvant être assimilées à des couches homogènes.

La résistance thermique d'une couche homogène se calcule d'après la formule suivante :

$$R_i = \frac{e_i}{\lambda_i} \text{ (Formule 1) ;}$$

où

$R_i$  est la résistance thermique de la couche  $i$ , en  $m^2.K/W$  ;

$e_i$  est l'épaisseur de la couche  $i$ , mesurée d'après sa mise en œuvre dans la paroi, en mètres ;

$\lambda_i$  est la conductivité thermique utile de la couche  $i$  déterminée conformément au fascicule « Matériaux », en  $W/m.K$ .

La résistance thermique d'un composant de bâtiment constitué de plusieurs couches thermiquement homogènes, superposées perpendiculaires au flux de chaleur, est la somme des résistances thermiques individuelles de chacune des couches :

$$R = \sum R_i \text{ (Formule 2).}$$

### 3.1.1.1.2 Espaces d'air

Certains espaces d'air peuvent être considérés comme des couches thermiquement homogènes. Cependant, leur résistance thermique doit faire l'objet d'un calcul spécifique tenant compte des phénomènes convectifs et radiatifs.

Les espaces d'air sont traités comme des milieux ayant une « résistance thermique » parce que la transmission de chaleur par convection et par rayonnement y est à peu près proportionnelle à l'écart de température des faces qui les limitent.

Sont traitées dans ce chapitre :

1. Les lames d'air qui ont une largeur et une longueur toutes deux supérieures à 10 fois l'épaisseur mesurée dans le sens du flux de chaleur.
2. Les cavités d'air qui ont une longueur ou une largeur comparable à leur épaisseur.
3. Certains espaces non chauffés (combles perdus, garages, buanderies, etc.) lorsque leur enveloppe extérieure n'est pas isolée.

Si l'épaisseur d'une lame d'air varie, il convient d'utiliser sa valeur moyenne pour calculer sa résistance thermique.

Un traitement spécifique des espaces d'air, rencontrés dans les vitrages isolants et dans les profilés de menuiserie, est décrit dans le fascicule « Parois vitrées ».

#### 3.1.1.1.2.1 Lames d'air

La méthode de calcul donnée ci-après s'applique aux lames d'air dont l'épaisseur mesurée dans la direction du flux de chaleur n'excède pas 0,3 m. Dans le cas où cette épaisseur dépasse 0,3 m, le calcul de la déperdition doit être effectué en établissant un bilan thermique (coefficient  $b$ ) comme décrit dans le fascicule « Généralités » des règles Th-Bat.

##### 3.1.1.1.2.1.1 Lames d'air non ventilées

Une lame d'air peut être considérée comme non ventilée s'il n'y a pas de disposition spécifique pour un écoulement d'air la traversant.

Une lame d'air non séparée de l'ambiance extérieure par une couche isolante mais comportant de petites ouvertures vers l'ambiance extérieure peut aussi être considérée comme une lame d'air non ventilée, si ces ouvertures ne sont pas disposées de façon à permettre un écoulement d'air traversant et si elles ne dépassent pas :

- 500 mm<sup>2</sup> par mètre de longueur comptée horizontalement pour les lames d'air verticales ;
- 500 mm<sup>2</sup> par m<sup>2</sup> de superficie pour les lames d'air horizontales.

La résistance thermique d'une lame d'air non ventilée se calcule d'après la formule suivante :

$$R_g = \frac{1}{h_a + h_r} \text{ (Formule 3) ;}$$

où

$R_g$  est la résistance thermique de la lame d'air, en m<sup>2</sup>.K/W ;

$h_a$  est le coefficient de convection/conduction, il s'exprime en W/(m<sup>2</sup>.K) et se calcule d'après le tableau II :

Tableau IV : Calcul de  $h_a$

Sens du flux de chaleur	$h_a$ W/(m <sup>2</sup> .K)	
	$\Delta T \leq 5$	$\Delta T > 5$
Horizontal	Max (1,25 ; 0,025/d)	Max (0,73 ( $\Delta T$ ) <sup>1/3</sup> ; 0,025/d)
Ascendant	Max (1,95 ; 0,025/d)	Max (1,14 ( $\Delta T$ ) <sup>1/3</sup> ; 0,025/d)
Descendant	Max (0,12 $d^{-0,44}$ ; 0,025/d)	Max (0,09 ( $\Delta T$ ) <sup>0,187</sup> $d^{-0,44}$ ; 0,025/d)

où

$d$  est l'épaisseur de la lame, en mètre, dans la direction du flux de chaleur ;

$\Delta T$  est la différence de température dans la lame d'air entre les deux faces en vis-à-vis, en K ;

$h_r$  est le coefficient de rayonnement. Il s'exprime en  $W/(m^2.K)$  et se calcule comme suit :

$$h_r = E h_{r0} ;$$

où

$E$  est l'émissivité entre les deux surfaces limitant la lame d'air :

$$E = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \text{ (Formule 4) ;}$$

où

$\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$  sont les émissivités hémisphériques (corrigées) des surfaces limitant la lame d'air. La valeur utile de l'émissivité doit tenir compte de l'effet de ternissement des surfaces et d'accumulation de poussière avec le temps. À défaut de valeurs utiles déterminées selon le présent fascicule ou données dans un document d'Avis Technique, prendre :

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,9.$$

$h_{r0}$  est le coefficient de rayonnement du corps noir (cf. formule 10 et tableau V).

Des valeurs par défaut de la résistance thermique sont données au tableau III pour des lames d'air non ventilées dont les émissivités des deux faces sont au moins égales à 0,8. Les valeurs de la colonne « horizontal » s'appliquent également à des flux thermiques inclinés jusqu'à  $\pm 30\%$  par rapport au plan horizontal.

Tableau V : Valeurs de la résistance thermique R

Épaisseur de la lame d'air (mm)	Résistance thermique R ( $m^2.K/W$ )		
	Flux ascendant	Flux horizontal	Flux descendant
0	0,00	0,00	0,00
5	0,11	0,11	0,11
7	0,13	0,13	0,13
10	0,15	0,15	0,15
15	0,16	0,17	0,17
25	0,16	0,18	0,19
50	0,16	0,18	0,21
100	0,16	0,18	0,22
300	0,16	0,18	0,23

Note 1 : ces valeurs correspondent à une température moyenne de la lame d'air de 10 °C.  
 Note 2 : les valeurs intermédiaires peuvent être obtenues par interpolation linéaire.

#### 3.1.1.1.2.1.2 Lames d'air fortement ventilées

Il s'agit de lames d'air dont les orifices d'ouverture vers l'ambiance extérieure sont supérieures ou égales à :

- 1 500 mm<sup>2</sup> par mètre de longueur comptée horizontalement pour les lames d'air verticales ;
- 1 500 mm<sup>2</sup> par m<sup>2</sup> de superficie pour les lames d'air horizontales.

La résistance thermique totale d'une paroi contenant une lame d'air fortement ventilée s'obtient en négligeant la résistance thermique de la lame d'air et de toutes les couches situées entre la lame d'air et l'ambiance extérieure, et en appliquant une résistance thermique superficielle égale à  $R_{si}$  sur la surface intérieure de la lame d'air.

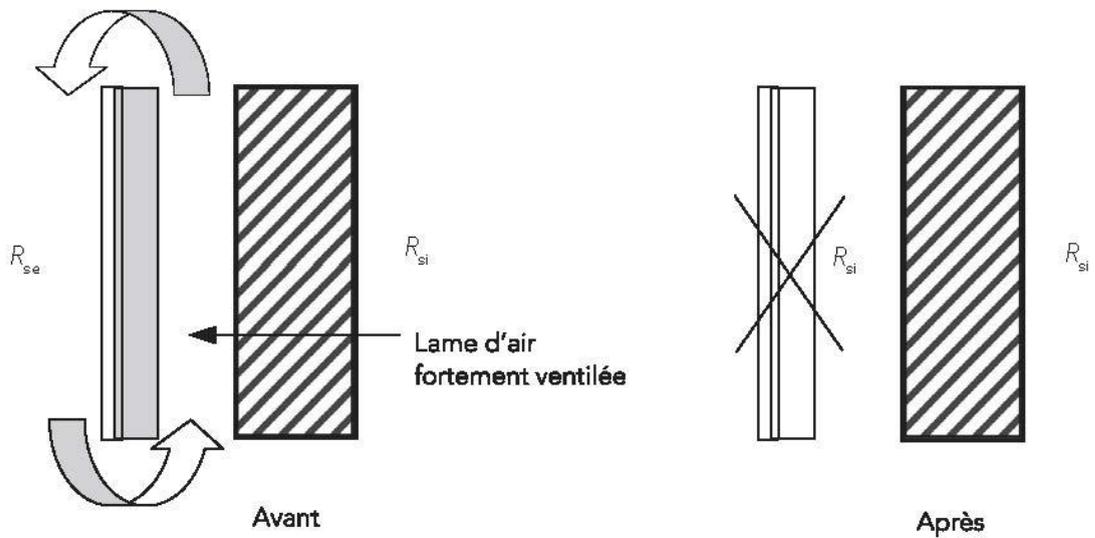


Figure 1 : Traitement des parois contenant une lame d'air fortement ventilée

#### 3.1.1.1.2.1.3 Lames d'air faiblement ventilées

Il s'agit de lames d'air dans lesquelles il y a un écoulement d'air limité du fait d'ouvertures communiquant avec l'ambiance extérieure, comprises dans les plages suivantes :

- $> 500 \text{ mm}^2$  mais  $< 1\,500 \text{ mm}^2$  par m de longueur comptée horizontalement pour les lames d'air verticales ;
- $> 500 \text{ mm}^2$  mais  $< 1\,500 \text{ mm}^2$  par  $\text{m}^2$  de superficie pour les lames d'air horizontales.

L'effet de la ventilation de la lame d'air dépend de la taille et de la répartition des orifices de ventilation.

La résistance thermique totale d'une paroi contenant une lame d'air faiblement ventilée peut être calculée comme suit :

$$R_T = \frac{1500 - A_v}{1000} R_{T,n} + \frac{A_v - 500}{1000} R_{T,v} ;$$

où

$R_{T,n}$  est la résistance thermique totale de la paroi contenant une lame d'air supposée non ventilée (cf. *paragraphe 3.1.1.1.2.1.1* (Lames d'air non ventilées)) ;

$R_{T,v}$  est la résistance thermique totale de la paroi contenant une lame d'air supposée fortement ventilée (cf. *paragraphe 3.1.1.1.2.1.2* (Lames d'air fortement ventilées)).

#### 3.1.1.1.2.2 Cavités d'air

##### 3.1.1.1.2.2.1 Cavités d'air non ventilées

Il s'agit de petits espaces d'air dont la largeur est inférieure à 10 fois l'épaisseur ( $b < 10 d$ ).

La résistance thermique  $R_g$  d'une cavité d'air est donnée par la formule suivante

$$R_g = \frac{1}{h_a + h_r} ;$$

avec

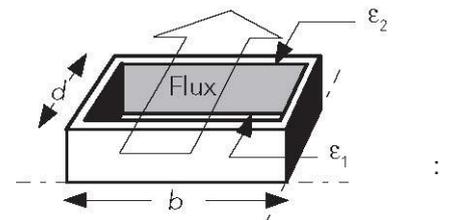


Figure 2

$$h_r = \frac{h_{ro}}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 2 + \frac{2}{\left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{b}\right)^2} - \frac{d}{b}\right)}} \quad (\text{Formule 5});$$

où

$d$  est l'épaisseur de la cavité, mesuré dans la direction du flux de chaleur, en mètre ;

$b$  est la largeur de la cavité prise sur la plus petite section transversale, en mètre ;

$\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$  sont les émissivités hémisphériques des surfaces, côtés chaud et froid de l'espace d'air ;

$h_{ro}$  est le coefficient de rayonnement du corps noir (cf. formule 10 et tableau VII) ;

$h_a$  est le coefficient de convection/conduction, il s'exprime en W/(m<sup>2</sup>.K) et se calcule d'après le tableau IV.

Pour une cavité de forme non rectangulaire, prendre la résistance thermique d'un vide rectangulaire ayant la même superficie et le même rapport de forme ( $b/d$ ) que la cavité réelle.

#### 3.1.1.1.2.2 Cavités d'air ventilées

Pour une cavité d'air fortement ventilée telle que définie au paragraphe 2.1.1.2.1.2, suivre la procédure spécifiée au paragraphe 2.1.1.2.1.2.

Pour une cavité d'air faiblement ventilée telle que définie au paragraphe 2.1.1.2.1.3, suivre la procédure spécifiée au paragraphe 2.1.1.2.1.3.

#### 3.1.1.1.2.3 Espaces non chauffés

Lorsque l'enveloppe extérieure de certains espaces non chauffés n'est pas isolée, les méthodes simplifiées suivantes peuvent s'appliquer en assimilant l'espace non chauffé à une résistance thermique équivalente (une méthode plus détaillée pour la prise en compte des déperditions à travers les espaces non chauffés est donnée au fascicule « Généralités » des règles Th-Bat).

##### 3.1.1.1.2.3.1 Combles non aménagés

En cas d'un plancher haut isolé situé sous un comble non aménagé, l'espace d'air du comble ainsi que la toiture peuvent être assimilés à une couche d'air thermiquement homogène dont la résistance thermique est donnée ci-dessous :

Tableau VI : Résistance thermique équivalente des combles

Caractéristiques du toit		$R_u$
1	Toit à tuiles sans écran, panneaux ou équivalents	0,06
2	Toiture à base de longues feuilles mécaniques, ou toiture en tuiles avec écran ou panneaux équivalents sous les tuiles	0,2
3	Idem que 2, mais avec un revêtement à faible émissivité en sous-face de la toiture	0,3
4	Toit doublé de panneaux et écran	0,3

Note :  $R_u$  comprend la résistance thermique de l'espace d'air et la résistance de la toiture en pente. Elle ne comprend pas la résistance superficielle  $R_{se}$  de la toiture et elle ne doit pas être prise en compte pour le calcul des caractéristiques intrinsèques du plancher sous comble.

##### 3.1.1.1.2.3.2 Autres espaces

Lorsque le bâtiment a un petit espace non chauffé contigu (garages, abris, buanderies, etc.), l'ensemble, constitué de l'espace non chauffé et des composants de construction externes peut être assimilé à une couche homogène ayant une résistance thermique  $R_u$  donnée par :

$$R_u = \frac{A_i}{\sum_k (A_{e,k} U_{e,k}) + 0,33 \times nV} \quad (\text{Formule 6});$$

où

$A_i$  est la surface totale des composants séparant l'intérieur du local non chauffé, en m<sup>2</sup> ;

$A_{e,k}$  est la surface de l'élément  $k$  séparant le local non chauffé de l'environnement extérieur à

l'exception des planchers bas en contact avec le sol, en  $m^2$  ;

$U_{e,k}$  est le coefficient de transmission thermique de l'élément  $k$  entre l'espace non chauffé et l'environnement extérieur, en  $W/(m^2.K)$  ;

$n$  est le taux de renouvellement d'air du local non chauffé, en volume d'air par heure ;

$V$  est le volume du local non chauffé, en  $m^3$ .

Si les détails constructifs des parois extérieures du local non chauffé ne sont pas connus, prendre :

$U_{e,k} = 2 W/(m^2.K)$  et  $n = 3$  volumes d'air par heure.

### 3.1.1.2 Couches thermiquement hétérogènes

Il s'agit de couches présentant une forte hétérogénéité due principalement à la présence simultanée de deux ou de plusieurs matériaux ayant des conductivités thermiques différentes.

Le transfert de chaleur par conduction à travers une couche thermiquement hétérogène est généralement de nature bidimensionnelle sauf cas particuliers où l'hétérogénéité est régulière et le transfert est monodimensionnel.

La résistance thermique  $R$  d'une couche hétérogène se calcule d'après la formule suivante :

$$R = \frac{1}{U_p} - R_{si} - R_{se} \text{ (Formule 7) ;}$$

où

$R_{si}$  et  $R_{se}$  sont les résistances superficielles de la paroi côtés intérieur et extérieur, déterminées selon le paragraphe 3.1.3.3, en  $m^2.K/W$  ;

$U_p$  est le coefficient de transmission surfacique en  $W/(m^2.K)$  de la couche, déterminé d'après le paragraphe 3.1.2.

### 3.1.1.3 Résistance superficielle

#### 3.1.1.3.1 Surfaces planes

La résistance superficielle  $R_s$  se calcule d'après la formule suivante :

$$R_s = \frac{1}{h_a + h_r} \text{ (Formule 8) ;}$$

où

$h_r$  est le coefficient d'échanges par rayonnement, en  $W/(m^2.K)$  ;

avec :

$$h_r = \varepsilon h_{r0} \text{ (Formule 9) ;}$$

$$h_{r0} = 4 \sigma T_m^3 \text{ (Formule 10) ;}$$

où

$\varepsilon$  est l'émissivité hémisphérique (corrigée) de la surface qui tient compte de l'effet de ternissement des surfaces et d'accumulation de poussière avec le temps. À défaut de valeurs données dans les documents d'Avis Techniques ou déterminées selon le présent fascicule, prendre  $\varepsilon = 0,9$  ;

$h_{r0}$  est le coefficient de rayonnement d'un corps noir (cf. tableau VII) ;

$\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} W/(m^2.K^4)$ ) ;

$T_m$  est la température moyenne de la surface et des surfaces environnantes, en K ;

Tableau VII : Valeurs de  $h_{ro}$ 

Température moyenne $T_m$ °C	$h_{ro}$ W/(m <sup>2</sup> .K)
-10	4,1
0	4,6
10	5,1
20	5,7
30	6,3

$h_a$  est le coefficient d'échanges par convection, en W/(m<sup>2</sup>.K) :

- sur les faces intérieures d'une paroi ou les faces extérieures adjacentes à une lame d'air fortement ventilée :

Tableau VIII : Valeurs de  $h_a$  sur les faces intérieures

Flux de chaleur	$h_a$ W/(m <sup>2</sup> .K)
Ascendant	5,0
Horizontal	2,5
Descendant	0,7

- sur les faces extérieures :  $h_a = 4 + 4v$  (Formule 11) ;

où

$v$  est la vitesse du vent à proximité de la surface en m/s.

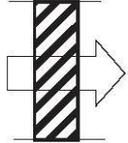
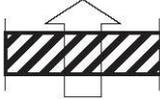
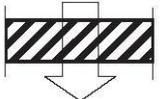
Des valeurs de la résistance superficielle côté extérieur  $R_{se}$  sont données dans le tableau suivant en fonction de la vitesse  $v$  du vent.

Tableau IX : Valeurs de  $R_{se}$  en fonction de la vitesse du vent

Vitesse du vent m/s	$R_{se}$ m <sup>2</sup> .K/W
1	0,08
2	0,06
3	0,05
4	0,04
5	0,04
7	0,03
10	0,02

les valeurs des résistances superficielles intérieures  $R_{si}$  et extérieures  $R_{se}$ , données dans le tableau I, ont été calculées avec une émissivité corrigée  $\varepsilon = 0,9$  et  $h_{ro}$  calculé à 20 °C côté intérieur et à 0 °C côté extérieur pour une vitesse de vent de 4 m/s. En absence d'informations spécifiques sur les conditions aux limites des surfaces planes ces dernières devront être utilisées.

Tableau X : Résistances superficielles

Paroi donnant sur : – l'extérieur – un passage ouvert – un local ouvert <sup>(1)</sup>	$R_{si}$ m <sup>2</sup> .K/W	$R_{se}^{(2)}$ m <sup>2</sup> .K/W	$R_{si} + R_{se}$ m <sup>2</sup> .K/W	
Paroi verticale  Inclinaison $\geq 60^\circ$   Flux horizontal	0,13	0,04	0,17	
Paroi horizontale  Inclinaison $< 60^\circ$	 Flux ascendant	0,10	0,04	0,14
	 Flux descendant	0,17	0,04	0,21
<p>1. Un local est dit « ouvert » si le rapport de la surface totale de ses ouvertures permanentes sur l'extérieur, à son volume, est égal ou supérieur à 0,005 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Ce peut être le cas, par exemple, d'une circulation à l'air libre, pour des raisons de sécurité contre l'incendie.</p> <p>2. Si la paroi donne sur un autre local non chauffé, <math>R_{si}</math> s'applique des deux côtés.</p>				

Nota : La valeur de  $R_{si}$  pour le flux ascendant s'applique aux planchers dotés d'un système de chauffage intégré et aux entrepôts frigorifiques.

### 3.1.1.3.2 Surfaces non planes

Les parties en saillie par rapport au plan des parois, telles que des poteaux de structure, peuvent être ignorées pour le calcul de la résistance thermique totale si elles sont constituées d'un matériau dont la conductivité thermique n'excède pas 2,5 W/(m.K).

Si la partie saillante est constituée d'un matériau de conductivité thermique supérieure à 2,5 W/(m.K), et n'est pas isolée, la résistance superficielle, à appliquer à l'aire projetée  $A_p$  de la paroi, doit être corrigée dans le rapport de l'aire projetée de la partie saillante à son aire développée réelle  $A$  :

$$R_{sp} = R_s \frac{A_p}{A} \text{ (Formule 12) ;}$$

où

$R_s$  est la résistance superficielle d'un composant plan ;

$A_p$  est l'aire projetée de la partie saillante ;

$A$  est l'aire développée réelle de la partie saillante.

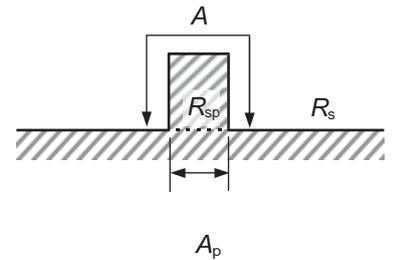


Figure 3

### 3.1.2 Coefficient de transmission surfacique $U$

Le coefficient de transmission surfacique d'une paroi  $U_p$  est le flux thermique en régime stationnaire par unité de surface, pour une différence de température de un kelvin entre les milieux situés de part et d'autre de cette paroi. Il s'exprime en  $W/(m^2.K)$  et il est fonction des caractéristiques géométriques et thermiques des matériaux et des résistances superficielles.

Les valeurs des coefficients surfaciques utilisées dans des calculs intermédiaires de parois opaques doivent être calculées avec au moins trois décimales. Les valeurs de  $U$  servant au calcul de la consommation d'énergie dans le bâtiment doivent être exprimées avec deux chiffres significatifs.

#### 3.1.2.1 Parois donnant sur l'extérieur ou sur un local non chauffé

Une paroi qui donne sur l'extérieur ou sur un local non chauffé (à l'exception des vides sanitaires et des sous-sols non chauffés) est caractérisée par son coefficient de transmission surfacique intrinsèque  $U_p$ .

Les déperditions à travers les parois en contact avec le sol ou donnant sur un vide sanitaire ou un sous-sol non chauffé, sont exprimées à l'aide d'un coefficient de transmission surfacique « équivalent »  $U_e$  calculé en fonction des caractéristiques intrinsèques de la paroi et de son environnement (cf. paragraphes 2.2.2 et 2.2.3).

### 3.1.2.1.1 Paroi comportant des couches d'épaisseur uniforme

Le coefficient de transmission surfacique global des parois courantes,  $U_p$  en  $W/(m^2.K)$ , se calcule d'après la formule suivante :

$$U_p = U_c + \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 \text{ (Formule 13);}$$

où

$U_c$  est le coefficient de transmission surfacique en partie courante de la paroi :

$$U_c = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} \text{ (Formule14);}$$

où

$R_{si}$ ,  $R_{se}$  sont les résistances superficielles côtés intérieur et extérieur de la paroi, déterminées selon le paragraphe 1.3.3 du présent fascicule ;

$R$  est la résistance thermique de la paroi, en  $m^2.K/W$ , déterminée comme étant la somme des résistances thermiques des couches composant la paroi y compris celles des lames d'air éventuelles :

$$R = \sum R_i;$$

$\Delta U_1$  est l'impact des ponts thermiques intégrés à la paroi :

$$\Delta U_1 = \frac{\sum_i \Psi_i L_i + \sum_j \chi_j}{A} \text{ (Formule15);}$$

où

$\Psi_i$  est le coefficient linéique du pont thermique intégré  $i$ , déterminé selon le présent fascicule, exprimé en  $W/(m.K)$  ;

$\chi_j$  est le coefficient ponctuel du pont thermique intégré  $j$ , exprimé en  $W/K$  ;

$L_i$  est le linéaire du pont thermique intégré  $i$ , en mètres ;

$A$  est la surface totale de la paroi, en  $m^2$ .

Les ponts thermiques intégrés  $\Psi_i$  et  $\chi_j$  peuvent être déterminés d'après les valeurs tabulées dans le présent fascicule, données par type de procédé.

En l'absence de valeurs tabulées, l'impact des ponts thermiques intégrés peut être déterminé par calcul numérique, conformément à la méthode suivante :

$$\Delta U_1 = \frac{\phi}{A \times \Delta T} - U_c \text{ (Formule16);}$$

où

$\phi$  est le flux total exprimé en  $W$  (calcul 3D) ou en  $W/m$  (calcul 2D) ;

$A$  est la dimension du modèle représentant un élément répétitif de la paroi, traversée par le flux, en  $m^2$  (3D) ou en  $m$  (2D) ;

$\Delta T$  est la différence de température entre les ambiances intérieure et extérieure, en  $K$ .

Cette formule s'applique à toutes les parois notamment à celles où la distinction entre partie courante et ponts thermiques intégrés est difficile (paroi à forte hétérogénéité thermique).

Dans le cas particulier d'une paroi comportant des fixations ponctuelles sans contact direct entre ces fixations et un ou des parement(s) métallique(s) situés de part et d'autre de la fixation, la correction du coefficient de transmission thermique de la paroi concernée peut être déterminée selon la formule suivante :

$$\Delta U_1 = 0,8 \times \frac{d_1}{d_0} \times \frac{\lambda_f A_f n_f}{d_0} \times \left( \frac{R_1}{R_{T,h}} \right)^2 \text{ (Formule 17);}$$

où

$d_1$  est la longueur de la fixation, mesurée dans la couche isolante, en mètres ;

$d_0$  est l'épaisseur de la couche d'isolation pénétrée par la fixation, en mètres ;

$\lambda_f$  est la conductivité thermique de la fixation, en W/(m.K) ;

$n_f$  est le nombre de fixations par  $m^2$  ;

$A_f$  est l'aire de la section droite de la fixation, en  $m^2$  ;

$R_1$  est la résistance thermique de la couche isolante pénétrée par les fixations, en  $m^2.K/W$  ;

$R_{T,h}$  est la résistance thermique totale de la paroi, déterminée sans tenir compte des ponts thermiques intégrés, en  $m^2.K/W$  ;

$\Delta U_2$  est l'impact des circulations d'air au sein des parois ventilées sur l'extérieur :

$$\Delta U_2 = \Delta U''' \left( \frac{R_1}{R_{T,h}} \right)^2 ;$$

où

$R_1$  est la résistance thermique de la couche isolante contenant les cavités, en  $m^2.K/W$  ;

$R_{T,h}$  est la résistance thermique totale de la paroi, déterminée sans tenir compte des ponts thermiques intégrés, en  $m^2.K/W$  ;

$\Delta U'''$  est la correction relative à la présence de cavités et de lames d'air dans la paroi, obtenue d'après le tableau ci-dessous, en W/( $m^2.K$ ).

Trois niveaux de correction sont identifiés :

Niveau	Configuration des cavités et des lames d'air parasites dans la paroi ventilée sur l'extérieur	$\Delta U'''$
1	Aucune cavité <sup>(1)</sup> ou lame d'air <sup>(2)</sup> n'est présente dans la paroi	0,00
2	Seules des cavités d'air ponctuelles ou linéaires, traversant la totalité ou une partie de l'épaisseur de l'isolation, sont présentes dans la paroi	0,01
3	Des cavités d'air (niveau 2) communiquant avec une ou plusieurs lames d'air, parallèles à la paroi et située dans l'épaisseur et/ou en contact avec la face chaude de l'isolation	0,04

1. Une cavité d'air est perpendiculaire au plan de l'isolation. Elle pénètre dans l'épaisseur de la couche isolante.  
2. Une lame d'air est parallèle au plan de l'isolation. Elle se situe à l'interface entre deux couches de la paroi.

Exemples :

1. Exemples de procédés constructifs concernés par la correction  $\Delta U_2$

Rampants de toitures, bardages extérieurs ventilés, couvertures double peau, vêtues et vêtages.

2. Exemples de niveau 1

La surface intérieure de l'isolation est en contact intime avec la couche adjacente située côté intérieur (membrane pare-vapeur, parement, panneau de contreventement, ossature, etc.). Les joints entre panneaux isolants sont soit faibles ( $e < 5$  mm) soit traités (tenons mortaise, remplissage mastic) :

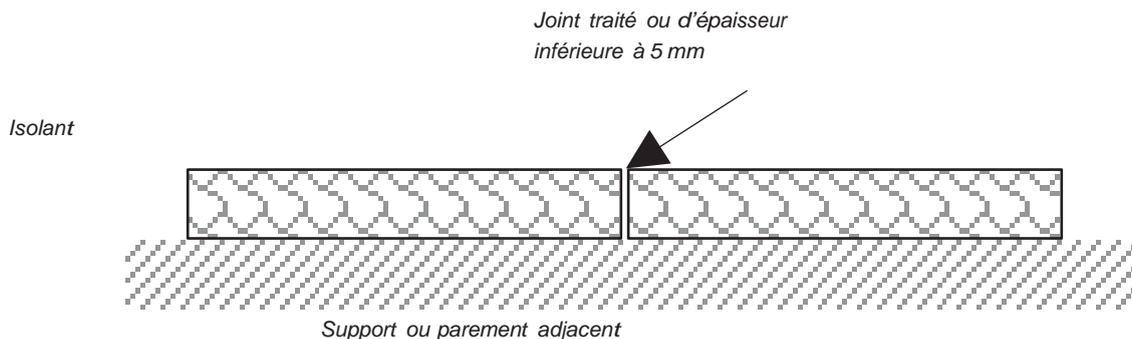


Figure 4

## 3. Exemples de niveau 2

La surface intérieure de l'isolation est en contact intime avec la couche intérieure adjacente (membrane, parement, panneau de contreventement, ossature). Les joints entre panneaux isolants sont supérieurs à 5 mm.

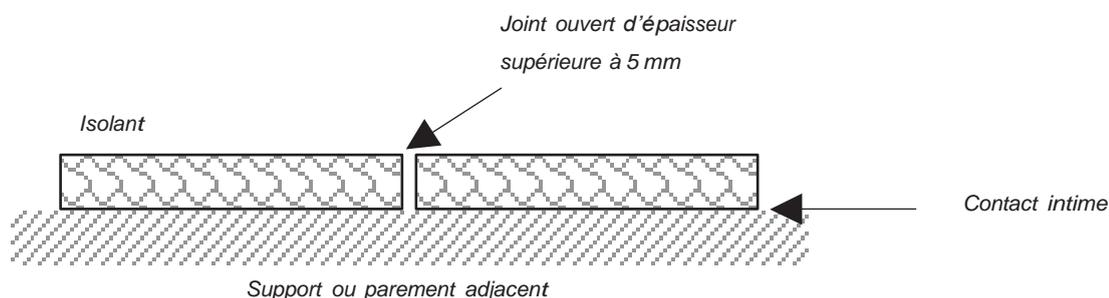


Figure 5

## 4. Exemples de niveau 3

La surface intérieure de l'isolation a un contact irrégulier avec la couche adjacente située côté intérieur (membrane, parement, panneau de contreventement, ossature, etc.). Des cavités entre panneaux isolants communiquent avec les lames d'air parasites et permettent ainsi la circulation de l'air entre les côtés chaud et froid de l'isolation.

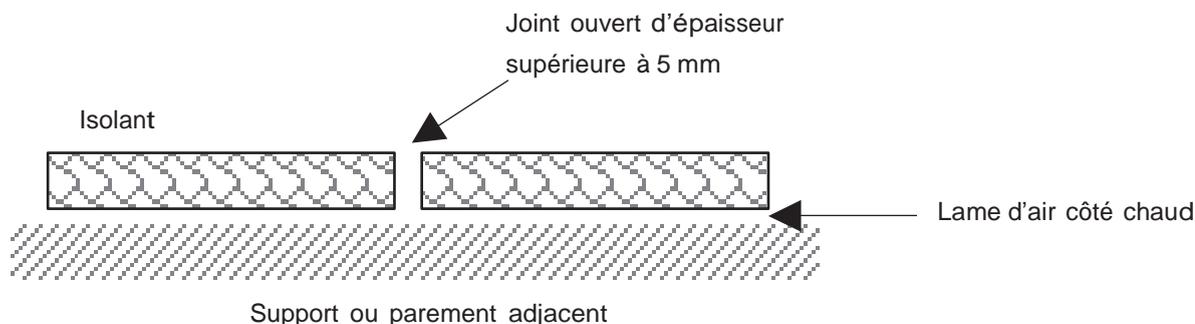


Figure 6

$\Delta U_3$  est l'impact de l'écoulement des eaux de pluie entre l'isolant et la membrane d'étanchéité pour les toitures-terrasses avec isolation inversée :

$$\Delta U_3 = p f x x \left( \frac{R_1}{R_T} \right) \text{ (Formule 18) ;}$$

où

$p$  est l'intensité moyenne des précipitations pendant la saison de chauffage, en mm/jour (cf. tableau VIII) ;

$f$  est le coefficient d'écoulement donnant la fraction de  $p$  atteignant la membrane d'étanchéité ;

$x$  est le coefficient d'augmentation de la déperdition de chaleur provoquée par l'écoulement des eaux de pluie sur la membrane ;

$R_1$  est la résistance thermique de la couche isolante située au-dessus de la membrane d'étanchéité ;

$R_T$  est la résistance thermique totale de la toiture avant l'application de la correction, en  $m^2.K/W$ .

*Nota 1* : pour les toitures-terrasses avec couche unique d'isolation comportant des joints secs avec protection lourde ouverte à l'extérieur prendre  $f x = 0,04$ . Pour d'autres configurations se référer aux Avis Techniques correspondants.

*Nota 2* : le calcul de la résistance thermique de l'isolant en toiture inversé doit tenir compte d'une majoration de sa conductivité thermique due à un taux d'humidité généralement supérieur à celui couramment rencontré dans les autres techniques. Le mode de détermination du facteur de conversion correspondant est donné dans le fascicule « Matériaux ».

Tableau XI : Précipitations moyennes en mm/jour

Département		p	Département		p	Département		p
n°	Nom	mm/j	n°	Nom	mm/j	n°	Nom	mm/j
01	AIN	2,12	33	GIRONDE	2,90	65	HAUTES-PYRÉNÉES	3,33
02	AISNE	1,89	34	HÉRAULT	2,31	66	PYRÉNÉES-ORIENTALES	1,87
03	ALLIER	1,84	35	ILLE-ET-VILAINE	1,93	67	BAS-RHIN	1,33
04	ALPES-DE-HAUTE-PROVENCE	2,03	36	INDRE	2,06	68	HAUT-RHIN	1,31
05	HAUTES-ALPES	2,03	37	INDRE-ET-LOIRE	1,98	69	RHÔNE	2,12
06	ALPES-MARITIMES	2,74	38	ISÈRE	2,58	70	HAUTE-SAÔNE	2,86
07	ARDÈCHE	2,62	39	JURA	2,21	71	SAÔNE-ET-LOIRE	2,21
08	ARDENNES	1,89	40	LANDES	2,87	72	SARTHE	1,99
09	ARIÈGE	2,85	41	LOIR-ET-CHER	1,99	73	SAVOIE	2,91
10	AUBE	1,81	42	LOIRE	1,56	74	HAUTE-SAVOIE	2,91
11	AUDE	2,22	43	HAUTE-LOIRE	1,56	75	VILLE DE PARIS	1,69
12	AVEYRON	2,19	44	LOIRE-ATLANTIQUE	2,48	76	SEINE-MARITIME	2,24
13	BOUCHES-DU-RHÔNE	1,81	45	LOIRET	1,78	77	SEINE-ET-MARNE	1,81
14	CALVADOS	2,09	46	LOT	2,50	78	YVELINES	1,69
15	CANTAL	1,93	47	LOT-ET-GARONNE	1,99	79	DEUX-SÈVRES	1,86
16	CHARENTE	2,40	48	LOZÈRE	1,56	80	SOMME	2,04
17	CHARENTE-MARITIME	2,42	49	MAINE-ET-LOIRE	1,86	81	TARN	1,83
18	CHER	1,94	50	MANCHE	1,84	82	TARN-ET-GARONNE	1,99
19	CORRÈZE	1,93	51	MARNE	1,58	83	VAR	2,42
20	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	CÔTES-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
32	GERS	1,99	64	PYRÉNÉES-ATLANTIQUES	3,42			

### 3.2.1.2 Paroi comportant des couches d'épaisseur variable

Il s'agit notamment des formes de pente présentes en toitures terrasses. Les formules ci-après ne sont valables que pour des pentes ne dépassant pas 5 %. Pour des pentes supérieures des méthodes numériques peuvent être utilisées

Pour calculer le coefficient de transmission surfacique d'une paroi comportant différentes parties élémentaires à épaisseurs variables, procéder comme suit :

1. calculer le coefficient  $U_i$  de chaque partie élémentaire de surface  $A_i$  en utilisant la formule correspondante donnée dans les sections (a) à (d) ci-dessous ;
2. calculer le coefficient de transmission surfacique global pour la paroi en utilisant la formule suivante :

$$U = \frac{\sum U_i A_i}{\sum A_i} ;$$

a – surface rectangulaire :

$$U = \frac{1}{R_1} \ln \left( 1 + \frac{R_1}{R_0} \right) ;$$

b – surface triangulaire ayant l'épaisseur maximale à la pointe :

$$U = \frac{2}{R_1} \left[ \left( 1 + \frac{R_0}{R_1} \right) \ln \left( 1 + \frac{R_1}{R_0} \right) - 1 \right] ;$$

c – surface triangulaire ayant l'épaisseur minimale à la pointe :

$$U = \frac{2}{R_1} \left[ 1 - \frac{R_0}{R_1} \ln \left( 1 + \frac{R_1}{R_0} \right) \right] ;$$

d – surface triangulaire ayant une épaisseur différente à chaque sommet :

$$U = 2 \frac{\left[ R_0 R_2 \ln \left( 1 + \frac{R_1}{R_0} \right) - R_0 R_1 \ln \left( 1 + \frac{R_2}{R_0} \right) + R_1 R_2 \ln \left( \frac{R_0 + R_1}{R_0 + R_2} \right) \right]}{R_1 R_2 (R_1 - R_2)}$$

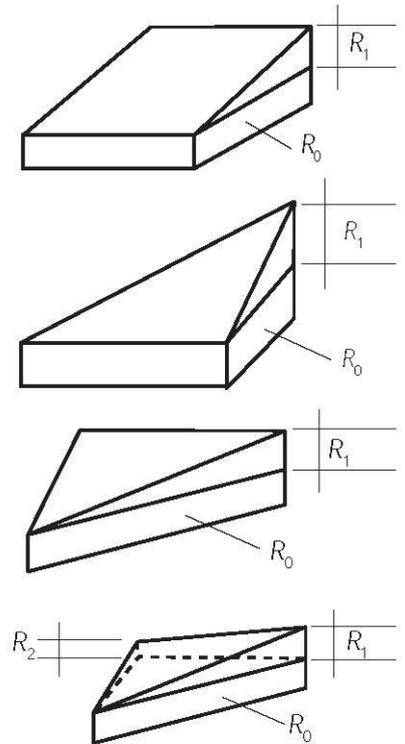


Figure 7

où

$R_0$  est la résistance thermique totale des autres couches inférieures d'épaisseurs homogènes, y compris les résistances superficielles de la paroi, en  $m^2.K/W$  ( $R_0 \neq 0 m^2.K/W$ ) ;

$R_1$  est la résistance thermique maximale de la couche d'épaisseur variable comme montré sur les figures ci-dessus, en  $m^2.K/W$  ( $R_1 \neq 0 m^2.K/W$ ) ;

$R_2$  est la résistance thermique située au niveau du troisième sommet en cas d'une surface triangulaire ayant une épaisseur différente à chaque sommet comme montré sur la figure 7 en (d), en  $m^2.K/W$ .

### 3.1.2.2 Parois en contact avec le sol

Les déperditions à travers les parois en contact avec le sol ne dépendent pas uniquement des caractéristiques intrinsèques de la paroi, mais aussi du flux de chaleur à travers le sol. Elles sont exprimées au moyen d'un coefficient surfacique « équivalent » dont la méthode de calcul est donnée ci-après (pour plus d'information se référer à la norme NF EN ISO 13370).

Des valeurs tabulées du coefficient surfacique équivalent  $U_e$  de planchers bas sur terre-plein sont données dans les documents d'application.

### 3.1.2.2.1 Paramètres de calcul

#### 3.1.2.2.1.1 Dimension caractéristique du plancher

$$B' = \frac{A}{\frac{1}{2}P} \text{ (Formule 19) ;}$$

où

$B'$  est la dimension caractéristique du plancher, en mètres ;

$A$  est l'aire du plancher bas en contact avec le sol, en mètres carrés ;

$P$  est le périmètre du plancher bas mesuré du côté intérieur, en mètres.

#### 3.1.2.2.1.2 Épaisseur équivalente du plancher en contact avec le sol

$$d_t = w + \lambda_s (R_{si} + R_f + R_{se}) \text{ (Formule 20) ;}$$

où

$d_t$  est l'épaisseur « équivalente » du plancher, égale à l'épaisseur du sol ayant la même résistance thermique totale que ce plancher, en mètres ;

$w$  est l'épaisseur totale du mur, toutes couches comprises, en mètres ;

$\lambda_s$  est la conductivité thermique du sol non gelé déterminée selon le fascicule « matériaux », en  $W/(m.K)$  ;

$R_f$  est la résistance thermique du plancher en contact avec le sol y compris l'effet des ponts thermiques intermédiaires (un exemple de calcul de  $R_f$  est donné au paragraphe 3.1.2.2.1.5) en  $m^2.K/W$  ;

$R_{si}, R_{se}$  sont les résistances superficielles de la paroi côtés intérieur et extérieur, déterminées selon le paragraphe 3.1.1.4, en  $m^2.K/W$ .

#### 3.1.2.2.1.3 Épaisseur équivalente des murs enterrés

$$d_w = \lambda_s (R_{si} + R_w + R_{se}) \text{ (Formule 21) ;}$$

où

$d_w$  est l'épaisseur « équivalente » du mur enterré, égale à l'épaisseur du sol ayant la même résistance thermique totale que le mur, en mètres ;

$R_w$  est la résistance thermique du mur enterré toutes couches comprises, en  $m^2.K/W$ .

#### 3.1.2.2.1.4 Autres paramètres

$D$  est la largeur ou la profondeur de l'isolation périphérique respectivement horizontale ou verticale, en mètres ;

$R_n$  est la résistance thermique de l'isolation périphérique horizontale ou verticale (ou du mur de fondation) en  $m^2.K/W$  ;

$d_n$  est l'épaisseur de l'isolation périphérique (ou du mur de fondation en cas d'isolation répartie), en mètres ;

$z$  est la profondeur moyenne au-dessous du sol de la face inférieure du plancher bas du sous-sol chauffé, en mètres.

#### 3.1.2.2.1.5 Calcul de $R_f$

$R_f$  doit tenir compte des ponts thermiques des liaisons éventuelles avec le plancher bas.

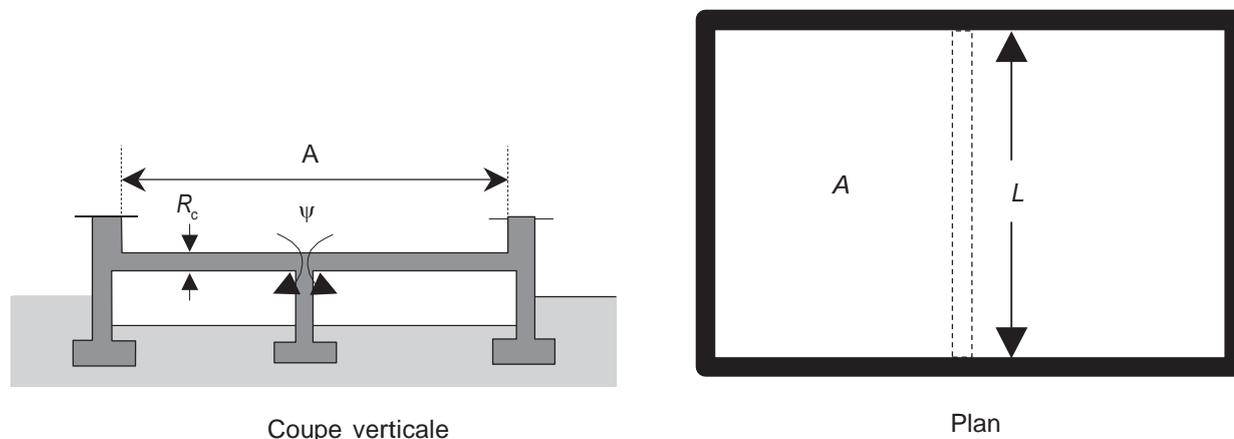


Figure 8

Soit un plancher bas de surface  $A$  donnant sur un vide sanitaire, un sous-sol non chauffé ou en contact avec le sol et supporté par un refend intermédiaire de longueur  $L$  (cf. figure 8 ci-dessus) et où :

$R_p$  est la résistance thermique du plancher ;

$U_p$  est le coefficient surfacique correspondant ;

$\psi$  est le coefficient linéique de la liaison plancher bas-refend ;

$R_f$  est la résistance thermique globale du plancher incluant l'effet de tous les ponts thermiques situés entre le local chauffé et le vide sanitaire, et  $U_f$  le coefficient surfacique correspondant.

$R_f$  se calcule par la formule suivante :

$$R_f = \frac{1}{U_f} - 2R_{si}$$

où

$$U_f = U_p + \frac{\psi \cdot L}{A} ;$$

$$U_p = \frac{1}{R_p + 2R_{si}} ;$$

$R_{si}$  est la résistance superficielle côté intérieur et côté vide sanitaire.

### 3.1.2.2.2 Planchers

#### 3.1.2.2.2.1 Planchers sur terre-plein

Le coefficient de transmission surfacique « équivalent »  $U_e$  d'un plancher bas sur terre-plein s'exprime en  $W/(m^2.K)$  et se calcule d'après les formules suivantes :

1. Plancher à isolation continue (cf. figure 9)

$$U_e = U_c \text{ (Formule 22) ;}$$

2. Plancher à isolation périphérique (cf. figure 10)

$$U_e = U_c + 2 \frac{\Delta\psi}{B'} \text{ (Formule 23) ;}$$

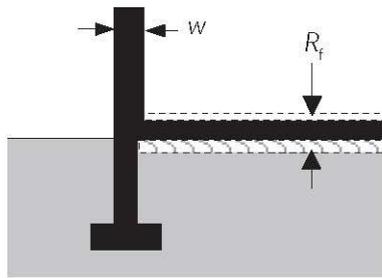


Figure 9

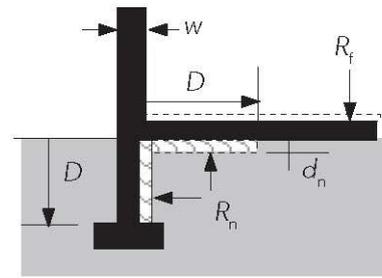


Figure 10

où

$U_c$  est le coefficient surfacique « équivalent » du plancher sans l'effet de l'isolation périphérique :

$$\text{Si } d_t < B', \quad U_c = \frac{2\lambda_s}{\pi B' + d_t} \ln\left(\frac{\pi B'}{d_t} + 1\right) \text{ (Formule 24) ;}$$

$$\text{Si } d_t \geq B', \quad U_c = \frac{\lambda_s}{0,457B' + d_t} \text{ (Formule 25) ;}$$

$\Delta\psi$  est un terme correctif qui tient compte de la présence d'une isolation périphérique :

$$\text{horizontale, } \Delta\psi = -\frac{\lambda_s}{\pi} \left[ \ln\left(\frac{D}{d_t} + 1\right) - \ln\left(\frac{D}{d_t + d'} + 1\right) \right] \text{ (Formule 26) ;}$$

$$\text{verticale } \Delta\psi = -\frac{\lambda_s}{\pi} \left[ \ln\left(\frac{2D}{d_t} + 1\right) - \ln\left(\frac{2D}{d_t + d'} + 1\right) \right] \text{ (Formule 27) ;}$$

où

$d'$  est l'épaisseur supplémentaire « équivalente » résultant de la couche d'isolant périphérique, elle s'exprime en mètre et se calcule d'après la formule suivante :

$$d' = \lambda_s R_n - d_n \text{ (Formule 28).}$$

### 3.1.2.2.2 Planchers bas de sous-sol chauffé

Le coefficient de transmission surfacique « équivalent »  $U_e$  d'un plancher bas en sous-sol chauffé s'exprime en  $W/(m^2.K)$  et se calcule d'après les formules suivantes :

$$\text{Si } \left(d_t + \frac{z}{2}\right) < B', \quad U_e = \frac{2\lambda_s}{\pi B' + d_t + \frac{z}{2}} \ln\left(\frac{\pi B'}{d_t + \frac{z}{2}} + 1\right) \text{ (Formule 29) ;}$$

$$\text{Si } \left(d_t + \frac{z}{2}\right) \geq B', \quad U_e = \frac{\lambda_s}{0,457B' + d_t + \frac{z}{2}} \text{ (Formule 30).}$$

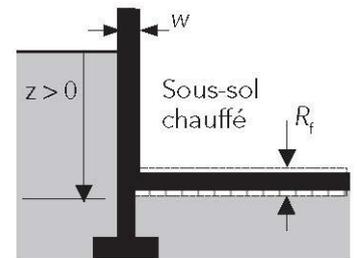


Figure 11

## 3.1.2.2.3 Planchers hauts enterrés

Le coefficient de transmission surfacique « équivalent »  $U_e$  d'un plancher haut enterré s'exprime en  $W/(m^2.K)$  et se calcule d'après la formule suivante :

$$U_e = \frac{1}{R_{si} + \sum_i R_i + R_{se}} \quad (\text{Formule 31});$$

où

$\sum_i R_i$  est la somme des résistances thermiques de toutes les couches  $i$  comprises entre la face inférieure du plancher et la face supérieure du sol (cf. figure 12), déterminée selon le paragraphe 3.1.1.

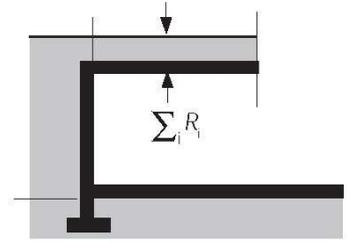


Figure 12

## 3.1.2.2.3 Murs enterrés

Le coefficient de transmission surfacique « équivalent »  $U_e$  d'un mur enterré s'exprime en  $W/(m^2.K)$  et se calcule d'après la formule suivante :

$$\text{si } d_w \geq d_t, \quad U_e = \frac{2\lambda_s}{\pi z} \left( 1 + \frac{0,5d_t}{d_t + z} \right) \ln \left( \frac{z}{d_w} + 1 \right) \quad (\text{Formule 32});$$

$$\text{si } d_w < d_t, \quad U_e = \frac{2\lambda_s}{\pi z} \left( 1 + \frac{0,5d_w}{d_w + z} \right) \ln \left( \frac{z}{d_w} + 1 \right) \quad (\text{Formule 33}).$$

## 3.1.2.3 Parois donnant sur vide sanitaire ou sur un sous-sol non chauffé

Les déperditions à travers les parois donnant sur vide sanitaire ou sur un sous-sol non chauffé ne dépendent pas uniquement des caractéristiques intrinsèques de la paroi, mais aussi du flux de chaleur à travers le sol et à travers l'espace non chauffé. Elles sont exprimées au moyen d'un coefficient surfacique « équivalent » dont la méthode de calcul est donnée ci-après (une méthode numérique alternative est décrite dans la norme NF EN 10211).

Des valeurs tabulées du coefficient surfacique équivalent  $U_e$  de planchers bas donnant sur vide sanitaire sont données dans le fascicule *paroi opaque - application*.

## 3.1.2.3.1 Paramètres de calcul

Les paramètres de calcul donnés au paragraphe 3.1.2.2.1 et les paramètres suivants sont utilisés pour le calcul de  $U_e$ .

$d_g$  est l'épaisseur « équivalente » de toute isolation posée sur le sol, exprimée en mètres et calculée d'après la formule suivante :

$$d_g = w + \lambda_s (R_{si} + R_g + R_{se}) \quad (\text{Formule 34});$$

où

$R_g$  est la résistance thermique de toute isolation posée sur le sol, en  $m^2.K/W$ .

$U_i$  est le coefficient de transmission surfacique total du plancher bas donnant sur l'espace non chauffé, il tient compte de l'effet des liaisons intermédiaires du plancher (un exemple de calcul de  $U_i$  est donné au paragraphe 2.2.2.1) :

$$U_f = U_p + \frac{\sum_k \Psi_k L_k + \sum_k \chi_k}{A} \quad (\text{Formule 35});$$

où

$U_p$  est le coefficient surfacique du plancher bas exprimé en  $W/(m^2.K)$  et calculé selon le paragraphe 3.1.2.

$\psi_k$  est le coefficient linéique de la liaison intermédiaire  $k$  du plancher bas, exprimé en  $W/(m.K)$  et déterminé selon le fascicule - Ponts thermiques ;

$\chi_k$  est le coefficient ponctuel  $k$  lié à un élément déperditif ponctuel, exprimé en  $W/K$  et déterminé selon le fascicule - Ponts thermiques ;

$L_k$  est le linéaire de la liaison intermédiaire (cf. Définitions au *paragraphe 1.3*), en mètres ;

$A$  est la surface intérieure du plancher bas, en  $m^2$ .

$h$  est la hauteur moyenne de la face supérieure du plancher au-dessus du niveau du sol extérieur, en mètres.

$z$  est la profondeur moyenne du sol du vide sanitaire au-dessous du niveau du sol extérieur, en mètres.

$p$  est le périmètre du vide sanitaire ou du sous-sol non chauffé, en mètres.

$U_w$  est le coefficient surfacique global du mur du vide sanitaire situé au-dessus du niveau du sol, exprimé en  $W/(m^2.K)$  et calculé selon le *paragraphe 3.1.2*.

$\varepsilon$  est l'aire des ouvertures de ventilation divisée par le périmètre du vide sanitaire en  $m^2/m$ .

$f_w$  est le facteur de protection contre le vent.

$v$  est la vitesse moyenne du vent à 10 m de hauteur, en  $m/s$ .

En l'absence de valeur mesurée, prendre :  $v = 4 m/s$ .

### 3.1.2.3 2 Planchers sur vide sanitaire

La méthode de calcul ci-dessous traite du cas classique de vide sanitaire dans lequel l'espace sous plancher est ventilé naturellement par l'extérieur. En cas de ventilation mécanique, ou si le taux de renouvellement d'air est spécifié, se reporter à la norme NF EN ISO 13370.

Le coefficient de transmission surfacique « équivalent »  $U_e$  d'un plancher donnant sur un vide sanitaire s'exprime en  $W/(m^2.K)$  et se calcule d'après la formule suivante :

$$\frac{1}{U_e} = \frac{1}{U_f} + \frac{1}{U_g + U_x} \quad (\text{Formule 36}) ;$$

où

$U_f$  est le coefficient de transmission surfacique global du plancher bas déterminé selon la *formule 35* et exprimé en  $W/(m^2.K)$  ;

$U_g$  est le coefficient de transmission thermique correspondant au flux de chaleur à travers le sol, exprimé en  $W/(m^2.K)$  :

si  $z \leq 0,5 m$ ,  $U_g$  se calcule d'après la *formule 24* en remplaçant  $d_t$  par  $d_g$  ;

si  $z > 0,5 m$ ,  $U_g = U_{bf} + \frac{z p}{A} U_{bw}$  (*Formule 37*) ;

où

$U_{bf}$  correspond aux déperditions par le sol du vide sanitaire et calculé d'après la *formule 29* en remplaçant  $d_t$  par  $d_g$  ;

$U_{bw}$  correspond aux déperditions à travers la partie enterrée du mur de soubassement et calculé d'après la *formule 32* ou la *formule 33* en remplaçant  $d_t$  par  $d_g$  ;

$U_x$  est un coefficient de transmission surfacique équivalent correspondant au flux de chaleur à travers les murs du vide sanitaire et aux déperditions par renouvellement d'air résultant de la ventilation du vide sanitaire, exprimé en  $W/(m^2.K)$  et calculé d'après la formule suivante :

$$U_x = \frac{2hU_w}{B'} + \frac{1450\varepsilon v f_w}{B'} \quad (\text{Formule 38}) ;$$

Si  $h$  varie le long du périmètre du plancher, il convient d'utiliser sa valeur moyenne.

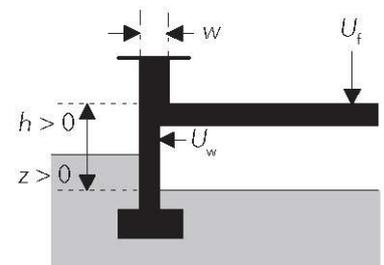


Figure 13

Des valeurs forfaitaires de  $f_w$  sont données dans le *tableau IX* :

*Tableau XII* : Valeurs forfaitaires de  $f_w$

Situation	Exemple	$f_w$
Abritée	Centre ville	0,02
Moyenne	Banlieue	0,05
Exposée	Milieu rural	0,10

### 3.1.2.3.3 Planchers sur sous-sol non chauffé

Les formules indiquées dans ce paragraphe s'appliquent aux sous-sols non chauffés ventilés depuis l'extérieur.

Le coefficient de transmission surfacique « équivalent »  $U_e$  d'un plancher donnant sur un sous-sol non chauffé s'exprime en  $W/(m^2.K)$  et se calcule d'après la *formule* :

$$\frac{1}{U_e} = \frac{1}{U_f} + \frac{1}{U_g + U_x} ;$$

où

$U_f$  est le coefficient de transmission surfacique global du plancher bas déterminé selon la *formule 35* et exprimé en  $W/(m^2.K)$  ;

$U_g$  est le coefficient de transmission thermique correspondant au flux de chaleur à travers le sol, exprimé en  $W/(m^2.K)$  et calculé d'après la *formule* :

$$U_g = U_{bf} + \frac{zP}{A} U_{bw} ;$$

où

$U_{bf}$  correspond aux déperditions par le sol du sous-sol non chauffé et calculé d'après les *formules 29* ou *30*, en remplaçant  $d_t$  par  $d_g$  ;

$U_{bw}$  correspond aux déperditions à travers la partie enterrée du mur de soubassement et calculé d'après la *formule 32* ou la *formule 33*, en remplaçant  $d_t$  par  $d_g$  ;

$U_x$  est un coefficient de transmission surfacique équivalent correspondant au flux de chaleur à travers les murs du sous-sol non chauffé et à celui résultant de la ventilation du sous-sol, exprimé en  $W/(m^2.K)$  et calculé d'après la *formule* suivante :

$$U_x = \frac{2hU_w}{B} + \frac{0,33nV}{A} \text{ (Formule 39) ;}$$

où

$V$  est le volume d'air du sous-sol, en  $m^3$  ;

$n$  est le taux de renouvellement d'air du sous-sol, en nombre de renouvellements d'air par heure.

Si  $h$  varie le long du périmètre du plancher, il convient d'utiliser sa valeur moyenne.

### 3.1.2.3.4 Murs

Le coefficient de transmission surfacique « équivalent »  $U_e$  d'un mur donnant sur un vide sanitaire ou sur un sous-sol non chauffé peut être calculé d'après les *formules 34* à *39* en remplaçant les caractéristiques

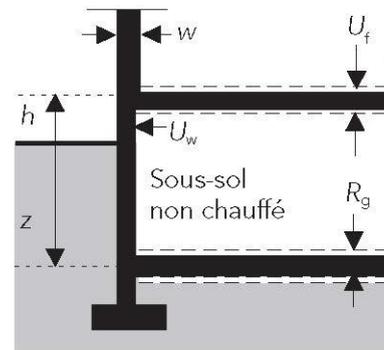


Figure 14

thermiques du plancher par celles du mur.

$B'$  étant toujours la dimension caractéristique du plancher séparant l'espace non chauffé du sol.

### 3.1.2.4 Parois en contact avec le sol et donnant sur un volume non chauffé

Le coefficient de transmission surfacique « équivalent »  $U_e$  d'une paroi dont la face froide est à la fois en contact avec le sol et donnant sur un volume non chauffé (local ou vide sanitaire) est calculé comme suit :

$$U_e = \frac{\sum U_{ei} A_i}{\sum A_i};$$

où

$U_{ei}$  est le coefficient de transmission équivalent de la paroi calculé comme si toute la paroi était en contact avec le sol, ou donnant sur un local non chauffé ou donnant sur un vide sanitaire ;

$A_i$  est la superficie de la partie  $i$  de la paroi en contact avec le sol, ou donnant sur un local non chauffé ou donnant sur un vide sanitaire.

Exemple :

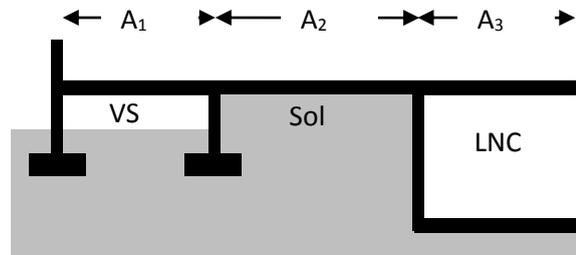


Figure 15

### 3.1.3 Facteur Solaire S

La définition du facteur de transmission solaire d'une paroi opaque ne fait pas l'objet d'un contexte normatif spécifique. Le présent document propose donc une méthode générale de calcul à partir du coefficient de transmission thermique  $U_p$  de la paroi opaque considérée.

#### 3.1.3.1 Méthode de calcul dans le cas général

Le facteur de transmission solaire de la paroi opaque est déterminé pour les conditions aux limites C et E. Il n'est pas fait de distinction entre les incidences directe du soleil, diffuse du ciel ou réfléchi par le sol, ni sur les composante à l'intérieur des locaux : on ne considère qu'un facteur de transmission solaire global.

Incidence	Composante intérieure	Résultat de l'application de la méthode	
		C	E
Toutes incidences	Global	$S_{p-C}$	$S_{p-E}$

Tableau XIII :facteurs solaires calculés pour les parois opaques

Les résultats sont calculés de la manière suivante :

$$\begin{aligned} S_{p-C} &= \alpha_p \cdot U_{p-C} \cdot R_{se-C} \\ S_{p-E} &= \alpha_p \cdot U_{p-E} \cdot R_{se-E} \end{aligned} \quad (\text{Formule 40})$$

Où :

- $\alpha_p$  est le coefficient d'absorption solaire de la paroi opaque,
- $U_{p-C}$  est le coefficient de transmission thermique de la paroi opaque en conditions C, déterminée selon le §3.1.2 et les normes associées en  $W.m^{-2}.K^{-1}$ ,
- $U_{p-E}$  est le coefficient de transmission thermique de la paroi opaque en conditions E (voir formule xx) en  $W.m^{-2}.K^{-1}$ ,
- $R_{se-C}$  et  $R_{se-E}$  sont les résistances thermiques superficielles extérieures (convection et rayonnement) en conditions C et E, exprimées en  $m^2.K.W^{-1}$ ,

En l'absence de valeurs de  $\alpha_p$  mesurées, les valeurs par défaut suivantes peuvent être utilisées :

Catégorie	Couleurs	Valeur de $\alpha_p$ par défaut
Clair	Blanc, jaune, orange, rouge clair	0,4
Moyen	Rouge sombre, vert clair, bleu clair, gris clair	0,6
Sombre	Brun, vert sombre, bleu vif, gris moyen	0,8
Noir	Noir, brun sombre, bleu sombre, gris sombre	1,0

Tableau XIV : valeurs de  $\alpha_p$  par défaut pour les parois opaques

Les valeurs des résistances superficielles extérieures utilisées dans le cadre du présent chapitre sont les suivantes :

Inclinaison de la paroi $\beta$	$R_{se-C}$ ( $m^2.K.W^{-1}$ )	$R_{se-E}$ ( $m^2.K.W^{-1}$ )
Toute inclinaison	0,04	0,07

Tableau XV : résistances superficielles extérieures en conditions C et E utilisées dans les règles Th-S

Le coefficient de transmission thermique en conditions E,  $U_{p-E}$ , est calculé de la manière suivante :

$$\frac{1}{U_{p-E}} = \frac{1}{U_{p-C}} - (R_{se-C} + R_{si-C}) + (R_{se-E} + R_{si-E}) \quad (\text{formule 41})$$

$$\text{Soit } \frac{1}{U_{p-E}} = \frac{1}{U_{p-C}} + 0,03$$

Où  $R_{si-C}$  et  $R_{si-E}$  sont les résistances thermiques superficielles intérieures (convection et rayonnement) ( $W/m^2.K$ ), en conditions C et E.

Les valeurs des résistances superficielles intérieures utilisées dans le cadre du présent chapitre sont les suivantes :

Inclinaison de la paroi $\beta_k$	$R_{si-C}$ ( $m^2.K.W^{-1}$ )	$R_{si-E}$ ( $m^2.K.W^{-1}$ )
-----------------------------------	-------------------------------	-------------------------------

0° (horizontale, flux ascendant)	0,10	0,10
90° (verticale)	0,13	0,13
180° (horizontale, flux descendant)	0,17	0,17

Tableau XVI :résistances superficielles intérieures en conditions C et E

L'impact d'éventuelles protections rapportés, masques proches ou brise-soleils n'est pas pris en compte.

### 3.1.2.2 Facteur solaire des parois opaques avec lame d'air ventilées

Les méthodes ci-dessous ne s'appliquent pas si l'une des deux faces de la lame d'air ventilée est revêtue d'une face possédant une émissivité thermique inférieure à 0,5 (barrières radiantes), ou si plusieurs lames d'air ventilées interviennent.

#### Paroi opaque avec lame d'air extérieure ventilée d'inclinaison $\beta$ supérieure à 60° (verticale ou fortement inclinée)

Le présent paragraphe est valable pour une lame d'air extérieure munie d'ouvertures en position hautes et basses, supposée fortement ventilée, telle que représentée sur la figure ci-dessous :

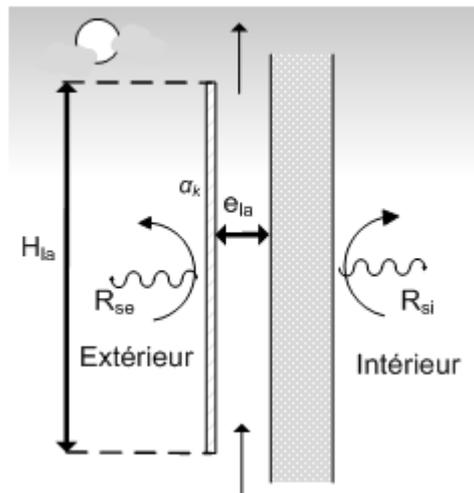


Figure 16: représentation d'une paroi opaque verticale à lame d'air extérieure ventilée

La circulation d'air dans la lame d'air est supposée n'avoir pour moteur que le tirage thermique.

Les facteurs solaires de la paroi deviennent les suivants :

$$\begin{aligned} S_{C,p} &= \alpha_p \cdot R_{se,C} \cdot K_{corr\_la,C} \cdot U_{p-C} \\ S_{E,p} &= \alpha_p \cdot R_{se,E} \cdot K_{corr\_la,E} \cdot U_{p-E} \end{aligned} \quad \text{(Formule 42)}$$

Où :

- $\alpha_p$  est le coefficient d'absorption solaire de la paroi opaque (voir Tableau XIV).
- $R_{se-C}$  et  $R_{se-E}$  sont les résistances thermiques superficielles extérieures (convection et rayonnement, en  $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ), en conditions C et E.
- $U_{p-C}$  est le coefficient de transmission thermique de la paroi opaque en conditions C, déterminée selon §3.1.2 et les normes associées en  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ,
- $U_{p-E}$  est le coefficient de transmission thermique de la paroi opaque en conditions E (voir équation xxx) en  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ,

-  $K_{corr\_la,C}$  et  $K_{corr\_la,E}$  sont des coefficients de corrections associés à la prise en compte de la lame d'air extérieure ventilée. On retient la même valeur pour les deux coefficients, à partir du tableau suivant. Soit  $e_{la}$  la largeur minimale des ouvertures en parties hautes et basses de la lame d'air et  $H_{la}$  sa hauteur :

$e_{la}$ (m)	$H_{la}$ (m)			
	2 ou moins		10 ou plus	
	$\alpha_k = 0,4$	$\alpha_k = 0,8$	$\alpha_k = 0,4$	$\alpha_k = 0,8$
0	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>
0,05	<b>0,70</b>	<b>0,65</b>	<b>0,70</b>	<b>0,70</b>
0,1	<b>0,65</b>	<b>0,60</b>	<b>0,65</b>	<b>0,60</b>
0,5	<b>0,60</b>	<b>0,55</b>	<b>0,55</b>	<b>0,50</b>

Tableau XVII : cas des lames d'air verticales ventilées sur l'extérieur, valeurs du coefficient  $K_{corr\_la,E}$

**Paroi opaque avec lame d'air extérieure ventilée d'inclinaison  $\beta$  inférieure ou égale à  $30^\circ$  (horizontale ou faiblement inclinée)**

La circulation d'air dans la lame d'air, ayant pour moteur le vent, a pour effet d'augmenter les échanges thermiques de la paroi opaque avec l'extérieur et de diminuer son facteur solaire.

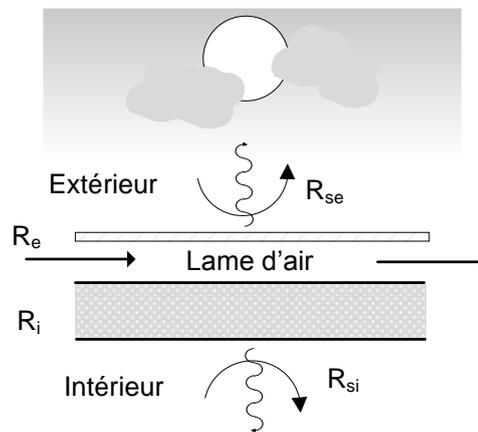


Figure 17 : représentation d'une paroi opaque horizontale à lame d'air extérieure ventilée

La valeur des facteurs solaires  $S_{C,p}$  et  $S_{E,p}$  est obtenue par interpolation entre les valeurs obtenues dans le cas d'une lame d'air non-ventilée, et d'une lame d'air très fortement ventilée.

Les facteurs de transmission solaire de la paroi sont déterminés par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} S_{C,p} &= \alpha_p \cdot R_{se,C} \cdot \left[ K_{qs} \cdot U_{p-C,non-ventilée} + (1 - K_{qs}) \cdot U_{p-C,eq\_tres\_ventilée} \right] \\ S_{E,p} &= \alpha_p \cdot R_{se,E} \cdot \left[ K_{qs} \cdot U_{p-E,non-ventilée} + (1 - K_{qs}) \cdot U_{p-E,eq\_tres\_ventilée} \right] \end{aligned} \quad \text{(Formule 43)}$$

Où :

- $\alpha_p$  est le coefficient d'absorption solaire de la paroi opaque (voir tableau XIV).
- $R_{se-C}$  et  $R_{se-E}$  sont les résistances thermiques superficielles extérieures (convection et rayonnement, en  $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ), en conditions C et E.
- $U_{p-C,non-ventilée}$  et  $U_{p-E,non-ventilée}$  les conductivités thermiques dans l'hypothèse d'une lame d'air non-ventilée en conditions C et E, sont obtenues par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} U_{p-C,non-ventilée} &= \frac{1}{R_e + R_i + R_{la} + R_{se,C} + R_{si,C}} \\ U_{p-E,non-ventilée} &= \frac{1}{R_e + R_i + R_{la} + R_{se,E} + R_{si,E}} \end{aligned} \quad \text{(Formule 44)}$$

Avec :

- $R_i$  est la résistance thermique de la partie de la paroi en contact avec l'intérieur, en  $m^2.K.W^{-1}$ ,
- $R_e$  est la résistance thermique de la partie de la paroi en contact avec l'extérieur, en  $m^2.K.W^{-1}$ ,
- $R_{ia}$  est la résistance thermique de la lame d'air, en supposant celle-ci fermée et non-ventilée,  $m^2.K.W^{-1}$ .

-  $U_{p-C,eq-très-ventilée}$  et  $U_{p-E,eq-très-ventilée}$  les conductivités thermiques équivalents dans l'hypothèse d'une lame d'air très fortement ventilée en conditions C et E, sont obtenues par les relations empiriques suivantes :

$$U_{p-C,eq-très-ventilée} = \frac{1}{(R_e + R_{se-C} + 0,06) \times (R_i + R_{si-C} + 0,06) \times \left( \frac{1}{R_e + R_{se-C} + 0,06} + \frac{1}{R_i + R_{si-C} + 0,06} + 30 \right)}$$

$$U_{p-E,eq-très-ventilée} = \frac{1}{(R_e + R_{se-E} + 0,06) \times (R_i + R_{si-E} + 0,06) \times \left( \frac{1}{R_e + R_{se-E} + 0,06} + \frac{1}{R_i + R_{si-E} + 0,06} + 30 \right)}$$

(Formule 45)

-  $K_{qs}$ , coefficient caractéristique des interactions entre le vent et la lame d'air est déterminé à partir du tableau suivant, à partir de :

- $S_{EA}$ , surface de la plus petite des différentes sections latérales d'ouverture, en  $m^2$ ,
- $A_{e,p}$ , surface totale de la face intérieure de la partie en contact avec l'extérieur de la paroi opaque, en  $m^2$ ,

Rapport $\frac{S_{EA}}{A_{e,p}}$	Situation de la lame d'air	
	Site ouvert (exposé aux vents), et lame d'air traversante <sup>1</sup>	Autres cas
0,0%	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
0,1%	<b>0,80</b>	<b>1,00</b>
0,2%	<b>0,65</b>	<b>0,85</b>
0,5%	<b>0,50</b>	<b>0,70</b>
1,0%	<b>0,35</b>	<b>0,55</b>
2,0%	<b>0,20</b>	<b>0,45</b>
5,0%	<b>0,05</b>	<b>0,25</b>
10,0%	<b>0,00</b>	<b>0,10</b>
20,0% ou plus	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>

Tableau XVIII :valeurs du coefficient caractéristique  $K_{qs}$  pour le cas des lames d'air ventilées sur l'extérieur et proches de l'horizontale,

### 3.1.2.3 Facteur solaire d'une paroi opaque végétalisée

**Paroi opaque d'inclinaison  $\beta$  supérieure à  $60^\circ$  (verticale ou très fortement inclinée) :**

L'impact de la végétalisation pour ce type de paroi peut être négligé, ou traité par une procédure particulière.

**Paroi opaque d'inclinaison  $\beta$  inférieure ou égale à  $60^\circ$  (horizontale ou inclinée autour de  $45^\circ$ ) :**

<sup>1</sup> La lame d'air est considérée traversante si pour chaque orientation la surface d'ouverture latérale est inférieure à 75% de la surface totale d'ouverture latérale de la lame d'air.

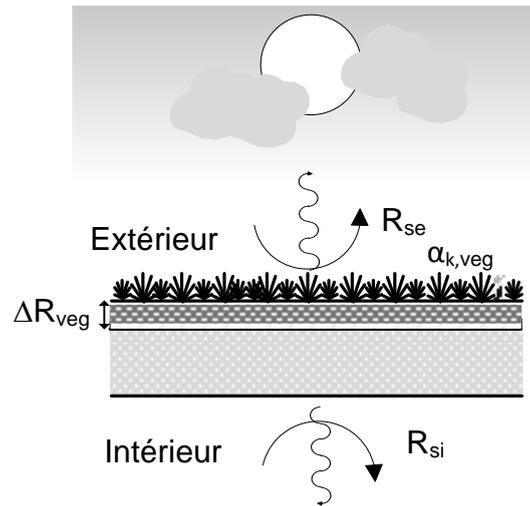


Figure 18 : paroi opaque horizontale végétalisée

La méthode s'applique aux parois végétalisées horizontale ou faiblement inclinées, de type élément porteur lourd (béton) ou sur éléments porteurs légers (bac acier ou bois). Elle se limite aux végétalisations extensive et semi-intensive.

Tout autre type de végétalisation (toitures jardins,...) doit être traité par une procédure spécifique.

Le facteur de transmission solaire de la paroi végétalisée en conditions C et E sont déterminés par les relations suivantes :

$$S_{E,p} = \alpha_{p,veg} \cdot U_{p-E,veg \text{ sec}} \cdot R_{se,E} \cdot [100 - \Delta t_{hum}]$$

$$S_{C,p} = \frac{1}{2} \times S_{E,p} \quad \text{(Formule 46)}$$

Avec :

- $\alpha_{p,veg}$  est le coefficient d'absorption solaire de la paroi opaque en prenant en compte la couche végétalisée. Il est déterminé à l'aide du tableau suivant :

	Type de végétalisation	
	Extensive	Semi-intensive
$\alpha_{p,veg}$	<b>0,70</b>	<b>0,40</b>

Tableau XIX : Coefficient d'absorption énergétique équivalent de la paroi végétalisée

- $U_{p-E,veg \text{ sec}}$  est le coefficient de transmission thermique de la paroi opaque en conditions E, en prenant en compte les résistances thermiques additionnelles dues à la couche de drainage et au substrat sec (voir formule xxx) en  $W.m^{-2}.K^{-1}$ . Il peut être déterminé par la relation suivante :

$$\frac{1}{U_{p-E,veg \text{ sec}}} = \frac{1}{U_{k-C}} - (R_{se-C} + R_{si-C}) + (R_{se-E} + R_{si-E}) + \Delta R_{veg} \quad \text{(Formule 47)}$$

Avec :

- $U_{p-C}$  est le coefficient de transmission thermique de la paroi opaque en conditions C, sans prendre en compte la végétalisation, déterminée selon les règles Th-Bat et les normes associées, en  $W.m^{-2}.K^{-1}$
- $\Delta R_{veg}$  est la résistance thermique additionnelle associée à la couche de drainage et au substrat sec, en  $m^2.K.W^{-1}$ . A défaut de valeur, le tableau suivant peut être utilisé :

Type de végétalisation	Drainage en matériau polystyrène		Drainage d'autre type	
	Extensive	Semi-intensive	Extensive	Semi-intensive
Epaisseur de substrat	6 cm	14 cm	6 cm	14 cm
$\Delta R_{veg}$ (m <sup>2</sup> .K.W-1)	<b>0,30</b>	<b>0,45</b>	<b>0,15</b>	<b>0,30</b>

Tableau XX : Gains en résistance thermique associé au substrat sec et au drainage, en fonction des caractéristiques de la toiture végétalisée

- $R_{se-E}$  est la résistance thermique superficielle extérieure (convection et rayonnement) en conditions E, exprimée en m<sup>2</sup>.K.W-1.
- $\Delta t_{hum}$  représente le pourcentage de temps durant lequel le substrat reste humide lors de la saison estivale, exprimé en %. A défaut de valeurs, le tableau suivant peut être utilisé :

Type de végétalisation	Extensive		Semi-intensive	
Zone climatique (ville)	Sans irrigation	Avec irrigation automatique de 20mm d'eau par semaine	Sans irrigation	Avec irrigation automatique de 20mm d'eau par semaine
H1a (Trappes) H1b (Nancy) H1c (Macon)	<b>25</b>	<b>75</b>	<b>20</b>	<b>50</b>
H2a (Rennes) H2b (la Rochelle) H2c (Agen)	<b>10</b>	<b>35</b>	<b>10</b>	<b>20</b>
H2d (Carpentras) H3 (Nice)	<b>5</b>	<b>20</b>	<b>5</b>	<b>15</b>

Tableau XXI : Pourcentage de temps durant lequel le substrat est humide en période estivale, en fonction des caractéristiques de la toiture et de la zone climatique

### Valeurs par défaut :

A défaut de valeurs calculées selon les paragraphes précédents, les facteurs solaires des toitures végétalisées s'expriment en fonction de la résistance thermique de l'isolant de la toiture, du type de végétalisation employée et de la zone climatique.

Le tableau suivant donne les facteurs solaires des toitures végétalisées ne possédant pas de système d'irrigation automatisé :

Type de végétalisation	Zone climatique	Facteur solaire en condition estivale $S_{f-E,v}$				Facteur solaire en condition de consommation $S_{f-C,v}$			
		R isolant toiture, en m <sup>2</sup> .K/W				R isolant toiture, en m <sup>2</sup> .K/W			
		0	2	5	7	0	2	5	7
Extensive	H1a / H1b / H1c	<b>0,115</b>	<b>0,020</b>	<b>0,010</b>	<b>0,010</b>	<b>0,055</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>
	H2a / H2b / H2c	<b>0,120</b>	<b>0,020</b>	<b>0,010</b>	<b>0,010</b>	<b>0,060</b>	<b>0,010</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>
	H2d / H3	<b>0,130</b>	<b>0,025</b>	<b>0,010</b>	<b>0,010</b>	<b>0,060</b>	<b>0,010</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>
Semi-intensive	H1a / H1b / H1c	<b>0,050</b>	<b>0,010</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>0,020</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>
	H2a / H2b / H2c	<b>0,050</b>	<b>0,010</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>0,025</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>
	H2d / H3	<b>0,055</b>	<b>0,015</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>0,025</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>

Tableau XXII : valeurs par défaut de facteurs de transmission solaire pour les parois opaques végétalisées

## 3.2 Eléments de méthodes complémentaires

Ce chapitre contient des compléments de méthodes spécifiques à des procédés particuliers.

### 3.2.1 Etalement sur plancher haut de matériaux en vrac

Sont visées ici les utilisations des matériaux en vrac sur les planchers hauts sous combles perdus. Lorsque les matériaux relèvent pour cette utilisation de la procédure de l'Avis Technique, on se reportera à ces Avis et aux « Règles générales de mise en œuvre des procédés et produits d'isolation thermique rapportée sur planchers de greniers et combles perdus faisant l'objet d'un Avis Technique » en ce qui concerne la mise en œuvre et les limites d'emploi.

Les matériaux sont déposés sur les planchers par déversement manuel ou par soufflage à la machine.

Dans le cas général, le coefficient de transmission thermique  $U_p$  d'un plancher haut isolé avec des matériaux en vrac, doit être calculé conformément au paragraphe 3.1.2.1 du présent fascicule.

Sachant que la résistance thermique  $R$  de la couche isolante, en  $m^2.K/W$  est déterminée de la manière suivante :

$$R = \frac{e \times (1 - s)}{\lambda} \quad (\text{formule 48})$$

Où :

- $R$  est la résistance thermique en  $m^2.K/W$  ;
- $e$  est l'épaisseur de la couche déposée (mesurée après sa mise en œuvre) en mètres ;
- $\lambda$  est la conductivité thermique utile déterminée conformément au fascicule « matériaux » en  $W/(m.K)$  ;
- $s$  est le tassement sans unité :

$$s = \frac{e - e_f}{e} \quad (\text{formule 49})$$

Où :

- $e_f$  est l'épaisseur après tassement en mètres ;

Dans la suite de ce paragraphe on donne, à titre d'exemple, pour quelques matériaux et pour chacune de ces mises en œuvre :

- pour les planchers plats, la résistance thermique ( $R$ ) de la couche déposée,
- pour les planchers à solives industrialisées, les valeurs de ponts thermiques intégrés associés.

Les deux modes d'application : déversement manuel et soufflage, font l'objet de deux paragraphes différents.

Pour l'ensemble des matériaux visés, sont précisées dans les tableaux ci-après, la valeur de tassement, la conductivité thermique par défaut et la plage de masse volumique du matériau mis en œuvre.

#### 3.2.1.1 Soufflage à la machine sur plancher plat

Matériaux	Masse volumique en œuvre ( $\rho$ ) kg/m <sup>3</sup>	Tassement (s) Sans unité	Conductivité thermique utile ( $\lambda$ ) W/(m.K)
Ouate de cellulose	30 ≤ $\rho$ ≤ 45	0,30	0,046
Fibres de bois	20 ≤ $\rho$ ≤ 40	0,35	0,051
Fibres de coton	10 ≤ $\rho$ ≤ 20	0,35	0,055

Chanvre et lin	$10 \leq \rho \leq 20$	0,35	0,058
Laines minérales	$10 \leq \rho \leq 25$	0,05	0,056

### 3.2.1.2 Déversement manuel sur plancher plat

Matériaux	Masse volumique en œuvre ( $\rho$ ) kg/m <sup>3</sup>	Tassement (s) Sans unité	Conductivité thermique utile ( $\lambda$ ) W/(m.K)
Ouate de cellulose	$60 \leq \rho \leq 80$	0,30	0,049
Chanvre et lin	$15 \leq \rho \leq 25$	0,35	0,060
Laines minérales	$30 \leq \rho \leq 60$	0,05	0,065
Vermiculite : classe granulaire 0.5/5	$80 \leq \rho \leq 110$	0	0,085

### 3.2.1.3 Soufflage à la machine ou déversement manuel sur plancher à solives

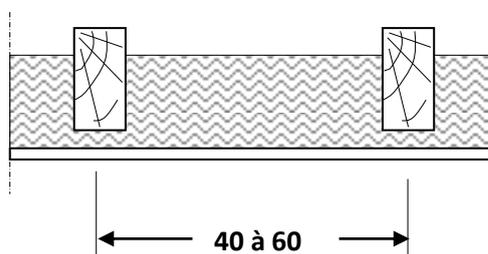


Figure 19

Le coefficient  $U_p$  d'un plancher haut à solive isolé avec des matériaux en vrac, doit être calculé conformément au paragraphe 2.2.1.1 du présent fascicule en tenant compte des ponts thermiques intégrés induits par les solives de plancher.

Les valeurs de ponts thermiques intégrés doivent être déterminées numériquement conformément au fascicule – ponts thermiques. Des valeurs tabulées sont fournies dans le fascicule parois opaques - applications.

## 3.2.2 Produits réfléchissants

Le coefficient de transmission thermique utile des parois intégrant un produit réfléchissant dépend des paramètres suivants :

- nature (à bulles, multicouches, etc.) et épaisseur du produit ;
- émissivités des deux faces et effet du vieillissement sur l'émissivité (dépôt de poussière, altération de la surface, etc.) ;
- nombre de lames d'air adjacentes au produit (0, 1 ou 2 lames d'air), leur étanchéité à l'air vis-à-vis de l'ambiance extérieure, la température moyenne de la lame d'air et la différence de température entre les faces en vis-à-vis ;
- sens du flux traversant la paroi (horizontal, vertical ascendant, vertical descendant) ;
- ponts thermiques intégrés générés par les systèmes de fixation du produit (agrafes, solives, etc.).

*Nota* : une attention particulière doit être portée lors de la mise en œuvre du produit pour éviter les risques de pathologies liés notamment à la dégradation de la charpente en bois.

À défaut de valeurs fournies dans les Avis Techniques, le coefficient de transmission surfacique utile  $U_p$  se calcule d'après la formule suivante :

$$U_p = U_c + \Delta U \quad (\text{Formule 50}) ;$$

où

$U_c$  est le coefficient de transmission surfacique en partie courante en  $W/(m^2.K)$ , déterminé selon la formule suivante :

$$U_c = 1/(R_r + \sum R_L + R_p) \text{ (Formule 51) ;}$$

où

$R_r$  est la résistance thermique intrinsèque du produit réfléchissant, donnée soit dans un Agrément Technique Européen, soit dans un Avis Technique ou équivalent, ou si un tel Avis ou Agrément n'existe pas, elle est déterminée selon le tableau ci-après (interpolation possible) :

Tableau XXIII : Résistance thermique des produits réfléchissants en  $m^2.K/W$

Type	Épaisseur du produit réfléchissant (mm)				
	0	5	10	20	40
À bulles	0	0,06	0,10	0,20	0,48
Multicouches	0	0,10	0,20	0,40	0,80

$R_L$  est la résistance thermique de la lame d'air  $L$ . À défaut de valeur calculée conformément à ce fascicule,  $R_L$  doit être déterminée selon le tableau ci-dessous (calculs effectués pour  $T_e = 0$ ,  $T_i = 20$  °C). Si l'émissivité utile n'est pas donnée dans un Avis Technique, prendre  $\varepsilon = 0,5$  (si lame non ventilée) et  $\varepsilon \geq 0,8$  (si lame faiblement ou fortement ventilée).

Tableau XXIV : Résistance thermique d'une lame d'air d'épaisseur minimale  $\geq 2$  cm intégrant une face peu émissive, en  $m^2.K/W$

Lame d'air	Émissivité	Flux horizontal	Flux vertical ascendant	Flux vertical descendant
Non ventilée	0,05	0,53	0,37	0,92
	0,1	0,47	0,34	0,74
	0,2	0,39	0,29	0,54
	0,5	0,34	0,21	0,31
	$\geq 0,8$	0,19	0,17	0,22
Faiblement ventilée	0,05	0,27	0,19	0,46
	0,1	0,24	0,17	0,37
	0,2	0,20	0,15	0,27
	0,5	0,17	0,11	0,16
	$\geq 0,8$	0,10	0,09	0,11
Fortement ventilée	$0 \leq \varepsilon \leq 1$	0,0		

Note : interpolation linéaire possible pour des émissivités intermédiaires.

$R_p$  est calculée en ajoutant les résistances thermiques superficielles à la résistance thermique des parements et de l'isolation complémentaire éventuelle ;

$\Delta U$  est la majoration de  $U_c$  due à l'effet des ponts thermiques intégrés, en  $W/(m^2.K)$  :

$$\Delta U = \sum \psi_i/E_i + \sum n_i \chi_j \text{ (Formule 52) ;}$$

où

$\psi_i$  est le coefficient de transmission linéique du pont thermique intégré  $i$ , en  $W/(m.K)$  ;

$\chi_j$  est le coefficient ponctuel du pont thermique intégré  $j$ , en  $W/K$  ;

$E_i$  est l'entraxe entre ponts thermiques linéaires de type  $i$ , en m ;

$n_j$  est la densité par mètre carré de paroi des ponts thermiques ponctuels.

En cas d'une ossature bois, et en absence de valeurs calculées de  $\psi_i$  et de  $\chi_j$  prendre  $\Delta U = 0,08 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ .

## 1 Exemples

### 1. Calcul d'un rampant intégrant un produit réfléchissant

Rampant de toiture incliné à  $45^\circ$  intégrant un produit réfléchissant multicouches de 2 cm d'épaisseur ayant une émissivité utile validée par un Avis Technique de 0,05 sur la face intérieure et de 0,4 sur la face extérieure et aménageant deux lames d'air de 3 cm d'épaisseur chacune de part et d'autre du produit. La lame située côté intérieur est considérée comme non ventilée et celle côté extérieur est considérée comme fortement ventilée. La résistance thermique du parement intérieur est de  $0,05 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ .

$$U_p = U_c + \Delta U ;$$

$$U_c = 1/(R_r + \sum R_l + R_p) ;$$

$$R_r = 0,4 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W} ;$$

$$R_{\text{lame intérieure}} = 0,37 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W} ;$$

$$R_{\text{lame extérieure}} = 0,0 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W} ;$$

$$\sum R_l = 0,37 + 0,0 = 0,37 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W} ;$$

$$R_p = 0,05 + R_{si} + R_{se} = 0,25 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W} \quad (R_{se} = R_{si} = 0,1 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}) ;$$

$$U_c = 0,98 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K}) \quad U_p = 0,98 + 0,08 = 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K}).$$

### 2. Calcul d'un mur intégrant un produit réfléchissant

Un mur en béton intégrant un produit réfléchissant multicouches de 2 cm d'épaisseur ayant une émissivité utile validée par un Avis Technique, de 0,05 sur les deux faces et aménageant deux lames d'air non ventilées de 3 cm d'épaisseur chacune, de part et d'autre du produit (cette configuration nécessite une mise en œuvre soignée). La résistance thermique du mur et du parement intérieur est de  $0,25 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ .

$$U_p = U_c + \Delta U ;$$

$$U_c = 1/(R_r + \sum R_l + R_p) ;$$

$$R_r = 0,4 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W} ;$$

$$R_{\text{lame intérieure}} = 0,53 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W} ;$$

$$R_{\text{lame extérieure}} = 0,53 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W} ;$$

$$\sum R_l = 0,53 + 0,53 = 1,06 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W} ;$$

$$R_p = 0,15 + R_{si} + R_{se} = 0,32 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W} \quad (R_{se} + R_{si} = 0,17 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}) ;$$

$$U_c = 0,562 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K}) \quad U_p = 0,562 + 0,08 = 0,64 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K}).$$