

163

Norme internationale



6946/2

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION • МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ • ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION

**Isolation thermique — Règles de calcul —
Partie 2: Ponts thermiques en forme de poutre
rectangulaire en partie courante des structures**

Thermal insulation — Calculation methods — Part 2: Thermal bridges of rectangular sections in plane structures

Première édition — 1986-11-15

CDU 699.86.001.24

Réf. n° : ISO 6946/2-1986 (F)

Descripteurs : bâtiment, isolation thermique, règle de calcul.

Prix basé sur 10 pages

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour approbation, avant leur acceptation comme Normes internationales par le Conseil de l'ISO. Les Normes internationales sont approuvées conformément aux procédures de l'ISO qui requièrent l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

La Norme internationale ISO 6946/2 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 163, *Isolation thermique*.

L'attention des utilisateurs est attirée sur le fait que toutes les Normes internationales sont de temps en temps soumises à révision et que toute référence faite à une autre Norme internationale dans le présent document implique qu'il s'agit, sauf indication contraire, de la dernière édition.

Isolation thermique — Règles de calcul —

Partie 2: Ponts thermiques en forme de poutre rectangulaire en partie courante des structures

0 Introduction

La présence d'un pont thermique en partie courante d'une structure de bâtiment produit, en hiver et dans des conditions de régime stationnaire, deux phénomènes qui sont rattachés l'un à l'autre:

- a) la température de la surface interne à l'emplacement du pont thermique est plus basse que la température de la surface interne à d'autres endroits;
- b) la densité surfacique du flux thermique à l'emplacement du pont thermique est plus élevée qu'à d'autres endroits.

Pour juger les conséquences pratiques de ces deux phénomènes (risque de condensation et pertes supplémentaires de chaleur), il est nécessaire de faire une analyse quantitative. Cela peut se faire par des méthodes analytiques ou numériques à l'aide d'un ordinateur. Cependant dans les stades « d'ébauche » des calculs des structures, cette méthode a l'inconvénient que, dans beaucoup de cas, l'auteur du projet n'a ni le temps, ni l'habileté nécessaires pour utiliser des programmes d'ordinateur.

La présente partie de l'ISO 6946 présente des formules simples et fondamentales, qui peuvent facilement être utilisées pour déterminer dans le stade d'ébauche, si la performance d'une structure de bâtiment donnée satisfera ou non aux exigences en question. Dans ces formules, des grandeurs caractéristiques du pont thermique en question sont introduites. Pour la détermination numérique de ces grandeurs, on peut employer des méthodes différentes.

Une méthode de calcul simple et approximative est donnée dans l'annexe A. Cette méthode est basée sur les résultats de nombreux calculs par ordinateur.

Quelques exemples numériques sont donnés dans l'annexe B.

1 Objet et domaine d'application

La présente partie de l'ISO 6946 donne des formules fondamentales pour le calcul de

- a) la zone d'influence d'un pont thermique, c'est-à-dire l'aire dans laquelle le flux thermique a une composante parallèle aux surfaces de la structure perceptible;
- b) la température la plus basse de la surface interne à l'emplacement du pont thermique dans des conditions hivernales en régime stationnaire et dans des températures ambiantes internes et externes données;
- c) la valeur du coefficient de transmission thermique d'une structure de bâtiment contenant un pont thermique.

Elle est applicable uniquement aux ponts thermiques en forme de poutre rectangulaire en partie courante des structures.

2 Référence

ISO 7345, *Isolation thermique — Grandeurs physiques et définitions.*

3 Définitions et symboles

Dans le cadre de la présente partie de l'ISO 6946, les définitions et symboles donnés dans l'ISO 7345, ainsi que la définition suivante, sont applicables.

pont thermique (en partie courante d'une structure de bâtiment) (faisant partie d'une enveloppe de bâtiment): Emplacement où la composition est différente de celle des matériaux adjacents et où, en hiver et dans des conditions de régime stationnaire, la température de la surface interne est plus basse que celle des surfaces adjacentes.

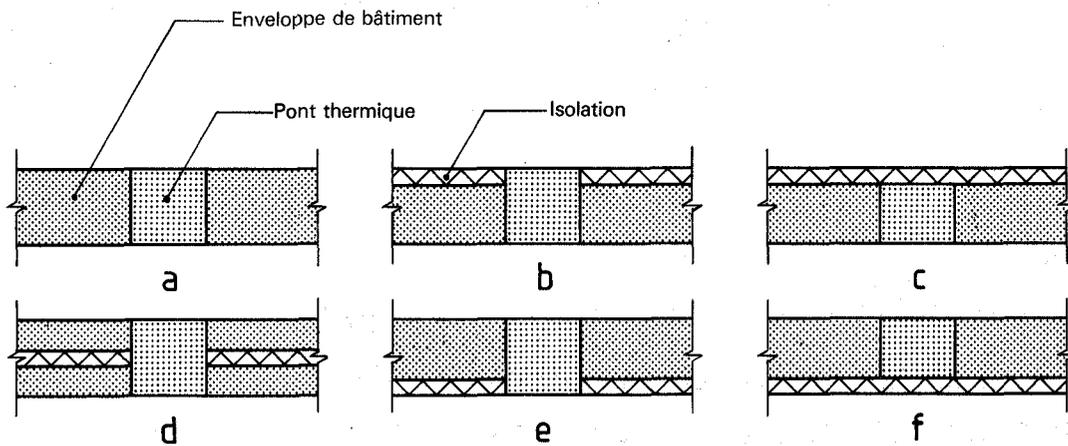


Figure 1 — Sections transversales des types fondamentaux de ponts thermiques¹⁾

4 Types de ponts thermiques

Dans le cadre des limites mentionnées au chapitre 1, on distingue six types fondamentaux de ponts thermiques, comme représenté sur la figure 1.

Les paramètres géométriques des ponts thermiques sont donnés sur la figure 2,

où

- l est la longueur de la structure et du pont thermique;
- b est la largeur du pont thermique;
- d est l'épaisseur de la structure;
- B est la largeur de la structure.

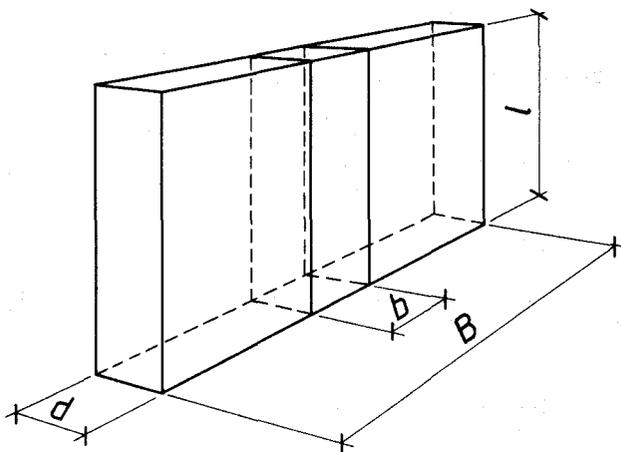


Figure 2 — Paramètres géométriques (vue)

L'aire totale A est égale à Bd et l'aire du pont thermique A_{TB} est égale à bl .

5 Mode de calcul

5.1 Grandeurs auxiliaires

Dans les formules données en 5.3 et 5.4, les grandeurs auxiliaires U_0 , U_{TB} et \bar{U} sont employées. Elles sont définies par les formules (1), (2) et (3) respectivement.

5.1.1 Grandeur auxiliaire U_0 [W/(m².K)]

$$U_0 = [(\sum R)_0 + R_i + R_e]^{-1} \quad \dots(1)$$

où

$(\sum R)_0$ est la somme des résistances thermiques, en mètres carrés kelvins par watt, de surface à surface, des couches subséquentes aux emplacements autres que le pont thermique;

R_i est la résistance thermique, en mètres carrés kelvins par watt, de la surface intérieure;

R_e est la résistance thermique, en mètres carrés kelvins par watt, de la surface extérieure.

5.1.2 Grandeur auxiliaire U_{TB} [W/(m².K)]

$$U_{TB} = [(\sum R)_{TB} + R_i + R_e]^{-1} \quad \dots(2)$$

où

$(\sum R)_{TB}$ est la somme des résistances thermiques, en mètres carrés kelvins par watt, de surface à surface, des couches subséquentes à l'emplacement du pont thermique;

R_i et R_e sont définies en 5.1.1.

1) Dans la présente partie de l'ISO 6946, lorsqu'on présente les sections transversales des structures qui font partie d'une enveloppe de bâtiment, l'ambiance extérieure est toujours supposée comme étant en haut (ou à gauche) et l'ambiance intérieure en bas (ou à droite).

5.1.3 Grandeur auxiliaire \bar{U} [W/(m².K)]

$$\bar{U} = \frac{A - A_{TB}}{A} U_0 + \frac{A_{TB}}{A} U_{TB} = \frac{B - b}{B} U_0 + \frac{b}{B} U_{TB} \quad \dots(3)$$

où

A est l'aire totale, en mètres carrés, de la structure;

A_{TB} est l'aire, en mètres carrés, du pont thermique;

B est la largeur, en mètres, de la structure;

b est la largeur, en mètres, du pont thermique.

5.2 Zone d'influence du pont thermique

La largeur, a , de la zone d'influence de chaque côté du pont thermique est définie comme la plus grande des deux valeurs obtenues à l'aide des formules suivantes (voir aussi figure 3) :

$$a_i = 2\sqrt{R_i d_i \lambda_i} \quad \dots(4a)$$

$$a_e = 2\sqrt{R_e d_e \lambda_e} \quad \dots(4b)$$

où

d_i est l'épaisseur de la couche (soit de l'enveloppe du bâtiment, soit de l'isolation) adjacente à l'environnement intérieur aux emplacements autres que le pont thermique;

λ_i est la conductivité thermique, en watts par mètre kelvin, du matériau de cette couche;

d_e est l'épaisseur de la couche (soit de l'enveloppe du bâtiment, soit de l'isolation) adjacente à l'environnement extérieur aux emplacements autres que le pont thermique;

λ_e est la conductivité thermique, en watts par mètre kelvin, du matériau de cette couche;

R_i et R_e sont définies en 5.1.1.

Pour les constructions homogènes, d_i et d_e sont égaux à la moitié de l'épaisseur de la construction.

Dans l'exemple représenté à la figure 3, a est égal à a_i .

Dans le cas où l'épaisseur, B , de la structure (ou la distance entre les axes de symétrie) ne couvre pas la zone complète d'influence de deux côtés du pont thermique (c'est-à-dire dans le cas où $B < 2a + b$), il n'y a pas de méthode approximative simple pour calculer soit la température surfacique interne la plus basse, soit la transmission thermique.

5.3 Température surfacique interne la plus basse

La température surfacique interne la plus basse, ϑ_{TB} , à l'emplacement du pont thermique, dans des conditions hivernales en régime stationnaire, est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\vartheta_{TB} = \vartheta_i - \zeta (\vartheta_i - \vartheta_e) \quad \dots(5)$$

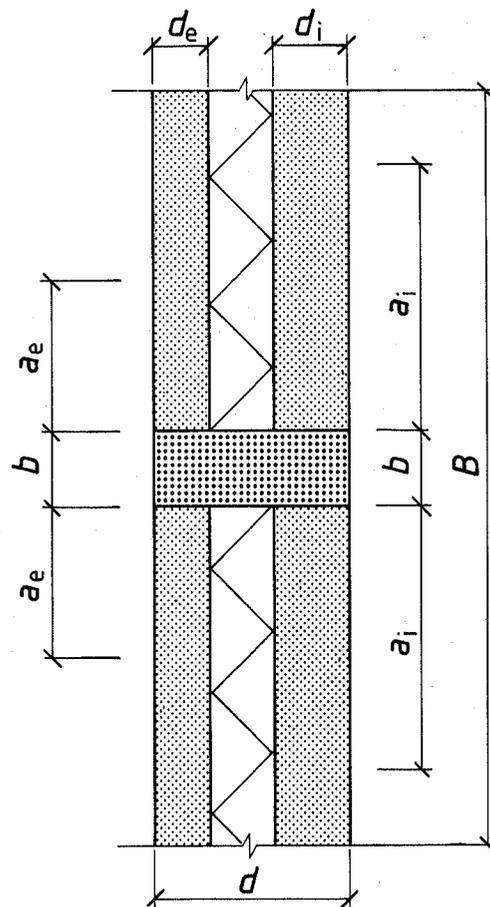


Figure 3 — Paramètres géométriques (section transversale)

où

ϑ_i est la température interne ambiante, en degrés Celsius;

ϑ_e est la température externe ambiante, en degrés Celsius;

et le rapport de la différence de température, ζ , exprimé explicitement comme

$$\zeta = \frac{\vartheta_i - \vartheta_{TB}}{\vartheta_i - \vartheta_e} \quad \dots(5a)$$

est donné par la formule suivante :

$$\zeta = R_i [U_0 + \eta(U_{TB} - U_0)] \quad \dots(6)$$

où

U_0 et R_i sont définis en 5.1.1;

U_{TB} est défini en 5.1.2;

η est un facteur caractéristique du pont thermique en question.

Dans le cas où $B < 2a + b$, la valeur de η change avec la valeur de B .

5.4 Coefficient de transmission thermique

Le coefficient de transmission thermique, U , d'une structure de bâtiment contenant un pont thermique doit être calculé à l'aide des formules suivantes [(7) ou (9)]:

$$U = \frac{(A - A_{TB}) U_0 + lU_1}{A} \quad \dots(7)$$

où

A est l'aire totale, en mètres carrés, de la structure;

A_{TB} est l'aire, en mètres carrés, du pont thermique;

U_0 est la grandeur auxiliaire définie en 5.1.1;

l est la longueur, en mètres, de la structure et du pont thermique;

U_1 est la transmission thermique linéaire, en watts par mètre kelvin, du pont thermique.

U_1 peut être exprimé comme suit:

$$U_1 = b U_{TB} + \xi U' \quad \dots(8)$$

où

b est la largeur, en mètres, du pont thermique;

$$U' = 1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K});$$

ξ est un facteur caractéristique du pont thermique en question.

Si l'on introduit dans la formule (7) la valeur de U_1 de la formule (8) ainsi que les valeurs de $A = Bl$ et $A_{TB} = bl$, et en prenant en considération la formule (3), on obtient la relation suivante:

$$U = \bar{U} + \xi \frac{U'}{B} \quad \dots(9)$$

où

\bar{U} est la grandeur auxiliaire définie en 5.1.3;

$$U' = 1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K});$$

B est la largeur, en mètres, de la structure;

ξ est un facteur caractéristique du pont thermique en question.

Dans le cas où $B < 2a + b$, la valeur de ξ change avec la valeur de B .

Annexe A

Méthode approximative pour calculer les valeurs des facteurs η et ξ

(Cette annexe ne fait pas partie intégrante de la norme.)

A.1 Symboles

En plus des grandeurs déjà définies au chapitre 4, en 5.1 et 5.2, les symboles suivants sont employés dans la présente annexe:

- d_{ins} : épaisseur, en mètres, de la couche d'isolation
 d' : 1 m
 λ_{ins} : conductivité thermique, en watts par mètre kelvin, du matériau d'isolation
 λ_c : conductivité thermique, en watts par mètre kelvin, du matériau de l'enveloppe du bâtiment
 λ_{TB} : conductivité thermique, en watts par mètre kelvin, du matériau du pont thermique
 λ : 1 W/(m.K)

A.2 Formules

Des formules approximatives sont données dans le tableau pour calculer les valeurs de η et ξ pour chaque type de pont thermique.

Ces formules sont basées sur les résultats de nombreux calculs par ordinateur effectués sur chaque type de pont thermique décrit au chapitre 4.

Pour les paramètres b , d , d_{ins} , λ_c , λ_{TB} et λ_{ins} , chaque combinaison de la matrice suivante a été considérée:

- b : 0,05 m – 0,10 m – 0,15 m – 0,20 m – 0,25 m
 d : 0,10 m – 0,20 m – 0,30 m – 0,40 m
 d_{ins} : 0,2 d – 0,6 d
 λ_c : 0,2 W/(m.K) – 1,1 W/(m.K) – 2,0 W/(m.K)
 λ_{TB} : 1,0 W/(m.K) – 2,0 W/(m.K)
 λ_{TB} : $> \lambda_c$
 λ_{ins} : 0,02 W/(m.K) – 0,07 W/(m.K)

En outre, les hypothèses suivantes ont été faites:

$$B = 1 \text{ m} \quad R_i = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad R_e = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Les formules données dans le tableau peuvent aussi être utilisées dans le cas où d'autres résistances thermiques surfaciques doivent être prises en considération, pourvu qu'elles ne diffèrent pas de plus de 0,01 m²·K/W des valeurs de R_i et R_e données ci-dessus.

L'hypothèse $B = 1$ m a pour conséquence que l'application des formules du tableau est réservée aux cas où $2a + b < 1$ m, la grandeur a étant la largeur de la zone d'influence du pont thermique définie en 5.2.

Quant aux ponts thermiques du type fondamental d , les formules pertinentes spécifiées dans le tableau ne peuvent être utilisées que si chacune des trois conditions suivantes est satisfaite (voir aussi figure 3):

- $d_i > 0,02$ m
- $d_e > 0,02$ m
- $2 > \frac{d_i}{d_e} > 0,5$

A.3 Précision

Les valeurs du rapport de la différence de température (ζ), calculées à l'aide des formules approximatives pour η données dans la présente annexe, diffèrent normalement de moins de 5 % des valeurs obtenues par des calculs par ordinateur.

Les valeurs du coefficient de transmission thermique (U), calculées à l'aide des formules approximatives pour ξ données dans cette annexe, ne diffèrent pas d'habitude de plus de 5 % des valeurs de U obtenues par des calculs par ordinateur.

Tableau — Formules approximatives pour calculer les valeurs de η et ξ

Type fondamental de pont thermique	Section transversale	Calcul de η	Calcul de ξ
	Haut = extérieur Bas = intérieur	Grandeurs auxiliaires $Z_1 = \frac{(d' - b) d}{d' b} \times \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_{TB}} \right)^{0,5}$ $Z_2 = \left[\frac{(d' - b) d}{d' b} \right]^{-0,75} \times \left(\frac{d}{d_{ins}} \right)^{0,5}$	$\xi = p \times \left(\frac{b}{d'} \right)^q \times \left(\frac{d}{d'} \right)^r \times \left(\frac{d_{ins}}{d'} \right)^s \times \left(\frac{\lambda_c}{\lambda'} \right)^t \times \left(\frac{\lambda_{TB}}{\lambda'} \right)^u \times \left(\frac{\lambda_{ins}}{\lambda'} \right)^v$
a		$\eta = [1 + 0,29 Z_1]^{-1}$	$\xi = 0$
b		$\eta = [1 + 0,59 Z_1]^{-1}$	$p = 0,1 \quad q = 0,38 \quad t = 0,65$ $r = 0,35 \quad u = 0,34$ $s = -0,33 \quad v = -0,26$
c		$\eta = 1 + 2,4 [Z_1 + Z_1^{-1}]^{-1}$	$\xi = 0$
d		$\eta = [1 + 0,33 Z_1]^{-1}$	$p = 0,1 \quad q = 0,39 \quad t = 0,71$ $r = 0,37 \quad u = 0,42$ $s = -0,29 \quad v = -0,24$
e		$\eta = 1 + 0,1 Z_1 Z_2$	$p = 0,04 \quad q = 0,15 \quad t = 0,34$ $r = 0,16 \quad u = 0,18$ $s = -0,21 \quad v = -0,14$
f		$\eta = [1 + 0,67 Z_1]^{-1}$	$\xi = 0$

Annexe B

Exemples numériques

(Cette annexe ne fait pas partie intégrante de la norme.)

B.0 Introduction

Dans les exemples donnés dans la présente annexe, les valeurs de U sont exprimées avec trois décimales, et les valeurs de ϑ avec deux décimales. En réalité, la troisième décimale dans la valeur de U et la deuxième décimale dans la valeur de ϑ sont sans importance.

B.1 Exemple 1

B.1.1 Description de la structure (voir aussi figure 4)

Structure murale qui consiste en des colonnes de béton massif espacées de 4 m l'une de l'autre. Largeur de chaque colonne: 0,2 m. Épaisseur: 0,26 m. Entre chaque colonne, des éléments de béton léger ayant une épaisseur de 200 mm et une conductivité thermique de 0,2 W/(m.K). Une couche d'isolation d'une épaisseur de 60 mm à l'extérieur du béton léger. Conductivité thermique de l'isolation: 0,04 W/(m.K). Sur la surface extérieure de la structure, il y a un crépissage de 4 mm de plâtre [$\lambda = 1,0$ W/(m.K)].

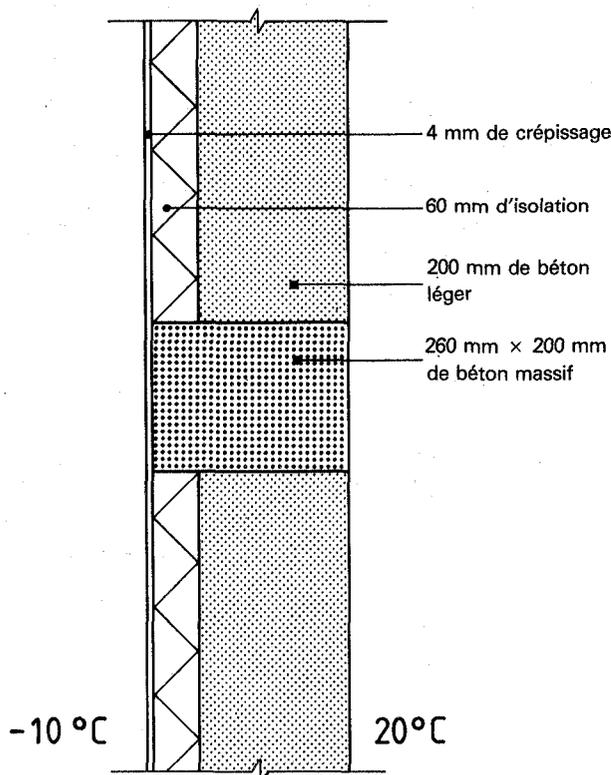


Figure 4 — Structure pour l'exemple 1

Le crépissage doit être tel que le flux thermique latéral à l'intérieur de celui-ci soit négligeable, de sorte qu'on puisse considérer la structure comme étant du type b. Les paramètres dont il est question peuvent être résumés ainsi:

$$\begin{aligned} B &= 4 \text{ m} & d &= 0,26 \text{ m} & d_{\text{ins}} &= 0,06 \text{ m} & b &= 0,2 \text{ m} \\ \lambda_c &= 0,2 \text{ W/(m.K)} & \lambda_{\text{TB}} &= 2 \text{ W/(m.K)} \\ \lambda_{\text{ins}} &= 0,04 \text{ W/(m.K)} & d_i &= 0,2 \text{ m} & \lambda_i &= 0,2 \text{ W/(m.K)} \\ d_e &= 0,06 \text{ m} & \lambda_e &= 0,04 \text{ W/(m.K)} \\ A &= 4 \text{ l m}^2 & A_{\text{TB}} &= 0,2 \text{ l m}^2 \end{aligned}$$

En outre, on suppose que R_i et R_e ont des valeurs de 0,13 m².K/W et 0,4 m².K/W, respectivement, et que les températures ambiantes sont $\vartheta_i = 20$ °C et $\vartheta_e = -10$ °C.

B.1.2 Calcul des grandeurs auxiliaires

$$(\Sigma R)_0 = \frac{0,2}{2,0} + \frac{0,06}{0,04} + \frac{0,004}{1,0} = 2,504 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$U_0 = (2,504 + 0,17)^{-1} = 0,374 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$(\Sigma R)_{\text{TB}} = \frac{0,26}{2,0} + \frac{0,004}{1,0} = 0,134 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$U_{\text{TB}} = (0,134 + 0,17)^{-1} = 3,289 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$\bar{U} = \frac{4,0 \text{ l} - 0,2 \text{ l}}{4,0 \text{ l}} \times 0,374 + \frac{0,2 \text{ l}}{4,0 \text{ l}} \times 3,289 = 0,520 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

B.1.3 Zone d'influence du pont thermique

$$a_i = 2 \sqrt{0,13 \times 0,2 \times 0,2} = 0,14 \text{ m}$$

$$a_e = 2 \sqrt{0,04 \times 0,04 \times 0,06} = 0,02 \text{ m}$$

$a = a_i = 0,14$ m; $2a + b = 0,48$ m < 1 m (par conséquent, les formules données dans le tableau peuvent être utilisées)

B.1.4 Calcul approximatif de η

$$Z_1 = \frac{(1,0 - 0,2) \times 0,26}{1,0 \times 0,2} \times \left(\frac{0,2}{2} \right)^{0,5} = 0,329$$

$$\eta = [1 + 0,59 \times 0,329]^{-1} = 0,838$$

B.1.5 Calcul de ζ et ϑ_{TB}

En se basant sur la valeur approximative de η

$$\zeta = 0,13 [0,374 + 0,838 (3,289 - 0,374)] = 0,366$$

et en conséquence

$$\vartheta_{TB} = 20 - 0,366 [20 - (-10)] = 9,02 \text{ }^\circ\text{C}$$

Un calcul par ordinateur pour cette structure a donné la valeur

$$\vartheta_{TB} = 8,97 \text{ }^\circ\text{C}$$

B.1.6 Calcul approximatif de ζ

$$\zeta = 0,1 \times (0,2)^{0,38} \times (0,26)^{0,35} \times (0,06)^{-0,33} \times (0,2)^{0,65} \times (2,0)^{0,34} \times (0,04)^{-0,26} = 0,088$$

B.1.7 Calcul de U à l'aide de la formule (9)

$$U = 0,520 + 0,088 \times 1 \times \frac{1,0}{4,0} = 0,542 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Un calcul par ordinateur pour cette structure a donné la valeur

$$U = 0,538 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

B.1.8 Commentaire

Il y a un excellent accord entre la valeur approximative et la valeur obtenue par ordinateur. Ceci est dû à l'influence minimale des colonnes sur la transmission thermique, résultant du petit rapport de b à B .

B.2 Exemple 2

B.2.1 Description de la structure (voir aussi figure 5)

Structure murale du type sandwich, qui consiste en deux dalles de béton séparées par une couche d'isolation. Les dalles en béton sont unies par des poutres en béton, à une distance de 1 m l'une de l'autre. Les différentes dimensions sont les suivantes:

- dalle externe, épaisseur 70 mm;
- couche d'isolation 80 mm;
- dalle interne 100 mm;
- largeur de la poutre 100 mm.

C'est un exemple du pont thermique du type d. La conductivité thermique du béton est de $2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ et celle du matériau d'isolation est de $0,04 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Les valeurs des résistances surfaciques (R_i et R_e) et les températures ambiantes sont les mêmes que celles de l'exemple 1.

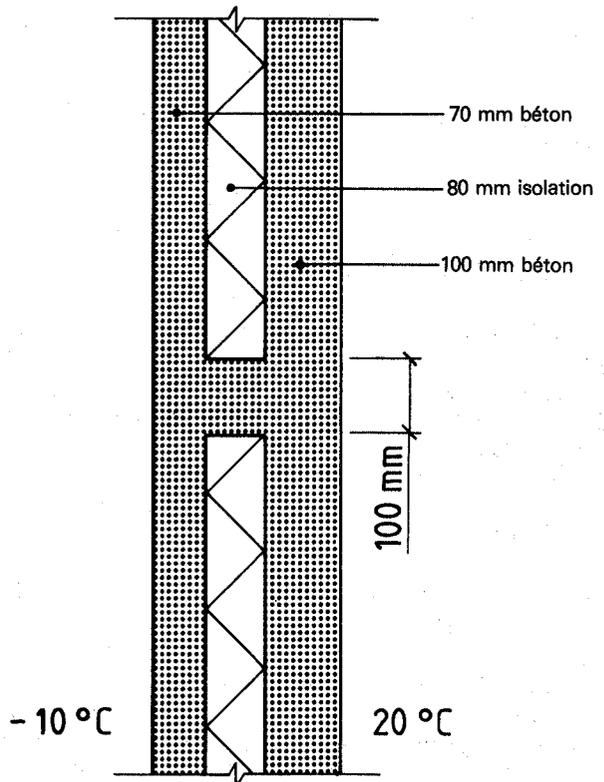


Figure 5 — Structure pour l'exemple 2

Les paramètres dont il est question peuvent être résumés ainsi:

$$\begin{aligned}
 B &= 1 \text{ m} & d &= 0,25 \text{ m} & d_{\text{ins}} &= 0,08 \text{ m} & b &= 0,1 \text{ m} \\
 \lambda_c &= \lambda_{TB} = 2,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) & \lambda_{\text{ins}} &= 0,04 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \\
 d_i &= 0,1 \text{ m} & \lambda_i &= 2,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) & d_e &= 0,07 \text{ m} \\
 \lambda_e &= 2,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) & R_i &= 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \\
 R_e &= 0,04 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) & \vartheta_i &= 20 \text{ }^\circ\text{C} & \text{et } \vartheta_e &= -10 \text{ }^\circ\text{C} \\
 A &= 1 \text{ m}^2 & A_{TB} &= 0,1 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

B.2.2 Calcul des grandeurs auxiliaires

$$(\Sigma R)_0 = \frac{0,07}{2,0} + \frac{0,08}{0,04} + \frac{0,10}{2,0} = 2,085 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$U_0 = (2,085 + 0,17)^{-1} = 0,443 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$(\Sigma R)_{TB} = \frac{0,25}{2} = 0,125 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$U_{TB} = (0,125 + 0,17)^{-1} = 3,390 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$\bar{U} = \frac{1,0 - 0,1}{1,0} \times 0,443 + \frac{0,1}{1,0} \times 3,390 = 0,738 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$