6 - Méthode originale de calcul de coefficients K

6.1 IMPORTANCE DES COEFFICIENTS K :

Dans les chapitres précédents, nous avons défini les coefficients λ et k.

λ caractérise la conductivité* de la chaleur à travers un matériau et K la transmission à travers une paroi (on dit : coefficient de transmission car, outre la conductivité dans la paroi elle-même, on trouve les 2 autres modes de transmission — convection et rayonnement — dans les échanges superficiels de la paroi avec l'air environnant).

Certains esprits non avertis peuvent être égarés par l'expression «construction isolée»... accompagnée de la désignation d'un isolant au coefficient λ prometteur.

Un λ très petit c'est bien... oui mais quelle est l'épaisseur utilisée et puis surtout quelles sont les parois de la construction où cet isolant a réellement été mis en œuvre ?

Seule la connaissance des coefficients K de toutes les parois nous renseigne utilement.

Tout le monde sait qu'il y a une grande différence entre «cuisine au beurre» et «cuisine tout au beurre» : dans le 1er cas il peut y avoir 10 grammes de beurre... et 100 grammes de margarine, dans le second cas il n'y a que du beurre.

Sous prétexte de réduire au minimum les échanges thermiques, il ne peut être question d'imaginer une construction où n'interviendraient que des matériaux isolants.

Nous avons pu observer en effet, (voir chapitre 2) que la conductivité thermique d'un matériau diminue (et donc devient intéressante) en même temps que diminue aussi la densité et par là, la « tenue mécanique » : ainsi on ne saurait utiliser par exemple des fibres minérales ou des mousses plastiques comme « supports de structure ».

Dans le domaine de «l'isolation-bâtiment» la cuisine «tout au beurre» n'est pas concevable...
aussi faut-il porter toute l'attention sur la «cuisine au beurre»... et les coefficients K seuls peuvent nous renseigner sur les proportions utilisées.

* Il s'agit en fait de conductivité apparente : en effet, dans un matériau solide c'est la conductivité qui domine largement mais en fonction de l'importance plus ou moins grande des pores dans le matériau, il y a aussi des courants de convection qui s'établissent dans l'air contenu dans ces pores ainsi que des échanges par rayonnement. La conductivité du matériau indiqué dans le D.T.U. tient compte de tous ces échanges.

6.2 LES TROIS FONCTIONS D'UNE PAROI :

En séparant 2 ambiances une paroi assure en fait 3 fonctions (figure 6.1) :

- 1 — Support de structures
- 2 — Étanchéité
- 3 — Isolation

Or, en pratique aucun matériau de construction ne peut assumer à lui seul l'ensemble des 3 fonctions.

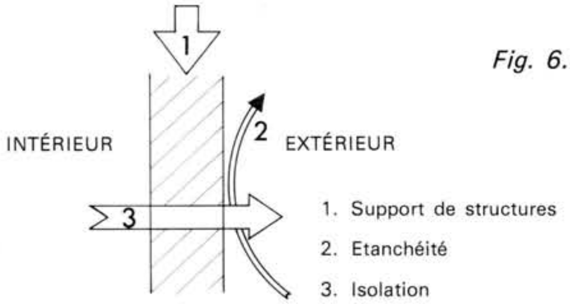


Fig. 6.1

C'est pourquoi en définitive on choisit :

- 1 — pierre, béton, brique, bois, métal... pour la tenue mécanique
- 2 — enduits, revêtements... pour l'étanchéité (et l'aspect esthétique de surface)
- 3 — matériaux isolants : fibres minérales, mousses plastiques... pour l'isolation.

6.3 ISOLATION REPARTIE :

Il ne viendrait à l'esprit de personne de penser que les enduits par exemple, sont réalisés pour assumer dans la paroi la «fonction isolation». Le calcul montre cependant qu'ils y contribuent un tout petit peu.

Ainsi, 1,5 cm d'enduit plâtre intérieur et 2 cm d'enduit extérieur ciment offrent à eux deux une résistance aux échanges thermiques de :

$$\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} = \frac{0{,}015}{0{,}46} + \frac{0{,}02}{1{,}16} \simeq 0{,}049 \text{ m}^2.°\text{C/W}$$

La même que celle assurée par la laine minérale ($\lambda = 0{,}041$ W/m.°C) d'une épaisseur x telle que :

$$0{,}049 = \frac{x}{0{,}041} \longrightarrow x \simeq 0{,}002 \text{ mètre}$$

soit $\longrightarrow$ 2 mm

De même, 15 cm de béton banché offrent une résistance :

$$\frac{e}{\lambda} = \frac{0{,}15}{1{,}4} \simeq 0{,}1 \text{ m}^2.°\text{C/W}$$

équivalente à celle présentée par une épaisseur x' de laine minérale telle que :

$$0,1 = \frac{x'}{0,041} \longrightarrow x' \simeq 0,004 \text{ mètre} \quad \text{soit} \longrightarrow 4 \text{ mm.}$$

Ainsi l'ensemble «béton + enduits» en plus de leurs fonctions respectives essentielles de supports de structure et d'étanchéité présentent une isolation répartie équivalente à 6 millimètres de laine minérale.

6.4 ISOLATION PAR L'INTÉRIEUR ET ISOLATION PAR L'EXTÉRIEUR :

Pour renforcer thermiquement une paroi dont l'isolation répartie est faible, on est amené à mettre en œuvre des matériaux isolants côté intérieur ou côté extérieur : la place de l'isolant n'influe en rien dans la résistance thermique totale de la paroi (cette position par contre joue un rôle important dans le «volant thermique» de cette paroi).

Notons que lorsqu'un matériau isolant est mis en jeu dans une paroi, sa résistance thermique est très supérieure à celles des autres matériaux en présence, et en particulier, les gradients de température, montrent qu'en conséquence c'est dans l'isolant que s'opère l'essentiel de la chute des températures.

Par contre, lorsqu'il n'y a pas de matériaux isolants les composants de la paroi ont des résistances thermiques du même ordre de grandeur et les gradients de température n'accusent pas de brusques variations. C'est sur ces critères que l'on différencie en fait les parois à isolation répartie* des parois isolées par l'intérieur ou l'extérieur.

6.5 MÉTHODE ORIGINALE DE CALCUL DES COEFFICIENTS K :

6.5.1 Base de la méthode :

Elle repose sur le choix arbitraire d'un matériau isolant auquel on compare tous les composants de la résistance thermique d'une paroi.

L'isolant retenu est en fait le matériau isolant le plus utilisé en France dans le bâtiment : c'est la laine de verre dont le λ utile donné par le D.T.U. est $\lambda = 0,041$ W/m.°C.

6.5.2 Recherche systématique des épaisseurs équivalentes :

Chaque composant de la résistance thermique d'une paroi a son «équivalent thermique» sous forme d'une épaisseur caractéristique de laine de verre.

● C'est vrai pour les matériaux homogènes caractérisés par les coefficients de conductivité et les épaisseurs.

Ainsi par exemple, 1,5 cm de plâtre utilisé en enduit a pour équivalent thermique 1,3 millimètre de laine de verre. En effet :

La résistance thermique est :

$$\frac{e}{\lambda} = \frac{0,015}{0,46} = 0,033 \text{ m}^2.°\text{C/W}.$$

* Dans les parois à « isolation répartie » on classe les murs de pierre, béton, briques... les planchers en béton, hourdis ciment ou céramique sans matériaux isolants.
On classe aussi dans cette rubrique les bétons cellulaires et les panneaux de façade.

L'épaisseur équivalente de laine de verre est celle qui oppose, dans les mêmes conditions, la même résistance. On a donc :

$$0,033 = \frac{x}{0,041}$$

d'où $x \simeq 0,0013$ m
soit 1,3 mm

● C'est vrai aussi pour les matériaux non homogènes pour lesquels le D.T.U. donne des résistances thermiques utiles.

Ainsi, par exemple, la résistance thermique utile d'un m² de mur réalisé en briques creuses de 20 cm à 3 rangées d'alvéoles est d'après le D.T.U. en tenant compte et de l'hétérogénéité du matériau et aussi des joints :

$R_u = 0,33$ m².°C/W

L'épaisseur équivalente de laine de verre est celle qui oppose dans les mêmes conditions la même résistance. On a donc dans ce cas :

$$0,33 = \frac{x}{0,041}$$

d'où $x \simeq 0,0135$ m
soit 13,5 mm.

● C'est vrai, enfin, pour la somme des résistances superficielles qui fait partie intrinséquement de la résistance thermique de la paroi.

Cette somme dépend et de la situation de la paroi (mur, plafond, plancher) et des ambiances qu'elle sépare (parois intérieures, parois extérieures).

Dans chaque cas de figure, la somme des résistances superficielles définie dans le D.T.U. a son équivalent thermique en millimètres de laine de verre.

Ainsi pour un mur séparant intérieur et extérieur (paroi dite «extérieure»), le D.T.U. indique :

somme des résistances superficielles = 0,17 m².°C/W

Cette somme est équivalente à la résistance qu'oppose aux échanges thermiques une épaisseur de 7 mm de laine de verre.

En effet :

$$0,17 = \frac{x}{0,041}$$

d'où $x \simeq 0,007$ m
soit 7 mm.

Par contre, s'il s'agit d'un mur séparant deux ambiances intérieures (par exemple mur séparant la partie habitée d'un local fermé non chauffé tels : cellier, garage...) le D.T.U. indique comme somme des résistances superficielles : 0,24 m².°C/W et l'épaisseur équivalente est alors :

$$0,24 = \frac{x}{0,041}$$

$x \simeq 0,0098$ m
soit 9,8 mm.

6.5.3 **Démarche logique pour une application pratique de la méthode :**

Le calcul d'un coefficient K est la réponse aux 3 questions suivantes :

● 1 — La paroi concernée a quelle position (mur, plafond, plancher ?) et quelles ambiances sépare-t-elle ?

● 2 — Les matériaux qui assument dans la paroi des fonctions essentielles autres que l'isolation (étanchéité, support de structures...)
quelle « isolation répartie » représentent-ils ?

● 3 — Le renfort thermique est assuré par quel matériau isolant ? (valeur qualitative λ) et en quelle épaisseur ? (valeur quantitative e).

En consultant les tableaux d'équivalence qui suivent on peut apporter à chacune de ces questions une réponse sous forme de « millimètres de laine de verre équivalents ».

En additionnant dans chaque cas tous les millimètres équivalents obtenus, on obtient l'épaisseur totale équivalente... en regard de laquelle il suffit ensuite de lire (sur les échelles page 46) la valeur du coefficient K recherché (en $W/m^2.°C$).

6.5.4 **Exemple d'application de la méthode :**

Recherche du coefficient K d'un mur extérieur 20 cm de briques creuses + enduit 2 faces (Fig 6.2).

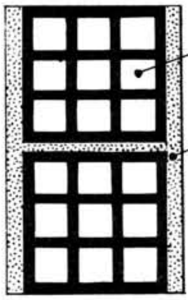


Fig. 6.2

1 — *Position de la paroi et ambiances séparées :*

Il s'agit d'une paroi verticale séparant intérieur et extérieur (paroi « extérieure »).

somme des résistances superficielles :

Le tableau I donne l'équivalence ⟶ 7 mm laine de verre.

2 — *Isolation répartie :*

Le tableau II donne :

enduit plâtre (1,5 cm)	⟶	1,3 mm	laine de
enduit ciment (2 cm)	⟶	0,7	verre
brique creuse (20 cm)	⟶	13,5	

L'épaisseur totale équivalente est 22,5 mm

En consultant à la page 46 la 1ère échelle (de 0 à 50 mm), nous lisons directement en regard de 22,5 mm la valeur de K (= 1,82 $W/m^2.°C$).

Cet exemple indique bien la démarche à suivre pour appliquer en pratique cette méthode.

Après les tableaux d'équivalences et les échelles de lecture indispensables pour toutes applications pratiques (paragraphes 6.5.5 et 6.5.6), vous trouverez tout un ensemble d'applications concrètes de la méthode.

Pratique de la méthode des épaisseurs équivalentes

Dans les 6 pages qui suivent vous trouverez *tout ce qui est nécessaire et suffisant pour appliquer cette méthode.* Elle vous fera gagner du temps et surtout elle vous permettra de vous familiariser très vite avec les ordres de grandeur des coefficients K que vous devez évaluer. En outre elle vous permettra de *comparer* entre eux les matériaux de construction sur le plan thermique.

6.5.5 **Les tableaux d'équivalence**

Les 4 tableaux d'équivalences représentent en fait un «condensé» des matériaux analysés dans le D.T.U.

● Une paroi séparant toujours deux ambiances un calcul de K commence obligatoirement par la recherche des résistances superficielles. Au *tableau I* figurent les équivalences : pour le calcul de K il suffit de *repérer directement la somme des résistances superficielles* (les équivalences des valeurs partielles rsi et rse sont utilisées pour construire les gradients de température dans une paroi).

Coefficient K d'une paroi verticale

Après le tableau I consulter le tableau II et ensuite le tableau IV s'il y a un matériau isolant dans la paroi.

Coefficient K d'une paroi horizontale

Après le tableau I consulter les tableaux III et IV.

LES QUATRE TABLEAUX D'ÉQUIVALENCE

Les équivalences en mm de laine de verre apparaissent dans les tableaux en bleu

Tableau I Résistances superficielles

Position de la paroi	La paroi sépare quelles ambiances?					
	extérieure et intérieure «paroi extérieure»			deux ambiances intérieures «paroi intérieure»		
	rsi	rse	somme	rsi	rse	somme
verticale	4,5	2,5	7	4,9	4,9	9,8
horizontale flux ascendant (comble-terrasse)	3,7	2,05	5,75	4,1	4,1	8,2
horizontale flux descendant (plancher)	7	2,05	9,05	7	7	14

cas particuliers

1) lame d'air verticale fortement ventilé
somme des résistances sup. = 8,2
2) comble faiblement ventilé
somme des résistances sup. = 8,2
3) Comble fortement ventilé
somme des résistances sup. = 7,4
4) Plancher sur vide sanitaire
somme des résistances sup. = 11,9

Tableau II **Parois verticales** (isolation répartie)

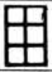
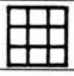
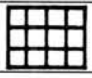
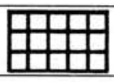
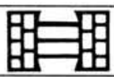
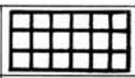
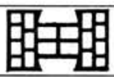
Enduits

ep : (cm)	ciment	plâtre
1,0	0,35	0,87
1,5	0,50	1,30
2,0	0,70	1,75

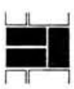
Murs de pierres

ep : (cm)	granit	calcaire ferme	calcaire 1/2 ferme	calcaire tendre
30				11,5
35			10,0	13,5
40		9,75	11,5	15,5
45	5,5	10,5	13,5	17,0
50	5,8	11,5	14,5	
55	6,5	12,8		

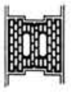
Briques creuses

ep : (cm)								
5,0	3,7							
7,5		6,1						
10,0		8,1						
12,5			10,25					
15,0			11,00					
17,5			11,90	13,5				
20,0			13,50	14,7				
22,5				16,0	17,6	18,4	19,3	19,7
25,0				17,2	19,3	21,0	21,0	21,3
27,5					20,5	21,3	21,7	23,0
30,0							23,4	24,2

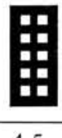
Briques pleines (épaisseurs en cm)

ep : 5,5	10,5	21,5	33	44,5
				
eq : 2,1	3,8	8	12	16,5

Blocs perforés de grand format
à alvéoles, verticaux ép : (cm)

ep :	17,5	20	22,5	25	27,5
	14,7	16,8	18,4	20,5	22,1

Briques de parement
(épaisseurs en cm)

ep : 4	10,5
	
1,2	4,5

Blocs creux béton (parpaings-agglos)

Nombre de lames par bloc		1			2			3		4		5
ep : (cm)		7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5
béton de sable	paroi épaisse	2,8	3,5	4,1	5,7	6,5	7,7	9,8	10,6	12,7	13,9	16,4
et gravillons	paroi mince	3,7	4,5	5,2	7,3	8,4	9,0	11,5	12,7	15,0	16,1	18,4
béton de granulats légers (pouzzolane ou laitier expansé)		7,0	8,6	9,8	14,0	15,6	16,8	19,3	20,5	21,7		
béton de laitier concassé paroi épaisse		5,3	6,5	7,8	9,0	11,9	13,1	16,0	17,2	20,5	21,7	25,4

Parois épaisses (35 à 45% de vide) parois minces (45 à 55% de vide)

Béton banché ou parpaings pleins

ep : (cm)	10	15	20	22	24	26	28	30
	2,9	4,4	5,8	6,4	7	7,5	8,2	8,7

Parois en bois résineux (chalets)

ep : (cm)	2,2	3,2	6,5	17,5
	7,7	11	22,8	61,0

Blocs en béton cellulaire autoclavé

Masse volumique	Épaisseur des blocs (cm)	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0
450 Kg/m³	Blocs maçonnés	27,4	32,0	36,5	41,0	45,5	50,0	54,0
	Blocs collés	32,4	37,7	43,0	48,4	53,7	59,4	64,8
550 Kg/m³	Blocs maçonnés	24,0	28,3	32,4	36,0	40,2	44,3	48,4
	Blocs collés	27,8	32,4	37,3	41,8	46,7	51,2	55,8
650 Kg/m³	Blocs maçonnés	21,0	24,6	27,8	31,6	35,2	38,5	42,2
	Blocs collés	23,8	27,8	31,6	35,6	39,7	43,4	47,5
750 Kg/m³	Blocs maçonnés	18,0	21,3	24,2	27,0	30,3	33,2	36,0
	Blocs collés	20,0	23,4	26,6	30,0	33,2	36,4	40,2

Lame d'air non ventilée

(maçonnerie sans revêtement particulier à l'intérieur de la lame d'air) lame de 3 à 10 cm : 6,3

Contre cloisons (épaisseurs en cm)

brique pleine	5,5	2,10
brique creuse	3,0	2,30
brique creuse	4,0	3,10
brique creuse	5,0	3,80
brique creuse	7,5	6,30
2 rangées d'alvéoles	10,0	8,00
amiante ciment	0,5	0,35

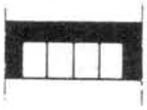
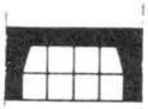
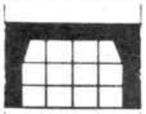
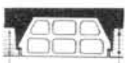
frise sapin 1 cm	3,50
carreau de plâtre 7 (alvéole)	9,00
carreau de plâtre 4 (plein)	3,50
carreau de plâtre 5 et mâchefer	4,20
plâtre cartonné 1	0,87
plâtre cartonné 1,3	1,20
isorel dur 0,35	1,00

panneaux de particules de bois extrudés (à alvéoles parallèles aux faces des panneaux) Type Fontex	
ep : 3	6,30
ep : 5	9,00
ep : 7	12,50
contreplaqué : 0,5	1,70
0,8	2,80
1,0	3,50
1,5	5,25

panneaux de particules de bois agglo.	
ep : 1,2	3,1
ep : 1,5	3,5
ep : 1,9	4,5
ep : 2,2	7,7

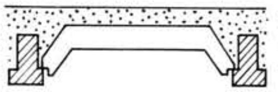
Tableau III Parois horizontales

Hourdis — terre cuite — béton

	terre cuite						béton					
												
entr'axes : cm	inf. à 40	sup. à 40	inf. à 40	sup. à 40	inf. à 40	sup. à 40	inf. à 50	entre 50 et 70	sup. à 70	inf. à 50	entre 50 et 70	sup. à 70
8	3,15	3,85										
12	4,20	4,90	5,25	6,65			4,2	4,55	4,9			
16			6,30	7,70	7,0	9,45	4,9	5,25	5,6			
20			7,35	8,75	8,4	10,50	5,9	6,30	6,6	8,05	8,75	9,4
			8,75	10,00	9,8	11,90	6,3	6,65	7,0	9,10	9,80	10,5

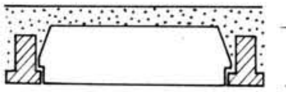
équivalence comprenant la dalle de compression

Planchers à entrevous en polystyrène (entr'axes = 60 cm)



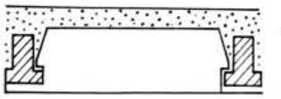
voutains sans talon isolant

ep : (cm)	
5,0	24,6



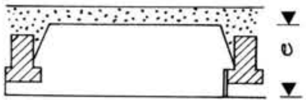
entrevous plein sans talon isolant

ep : (cm)	
12,5	32,8
15,0	34,8
17,5	39,0
20,0	43,0
22,5	45,1



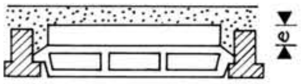
entrevous plein avec talon polystyrène 2 cm

ep : (cm)	
12,5	69,7
15,0	77,9
17,5	84,0
20,0	90,2
22,5	96,3



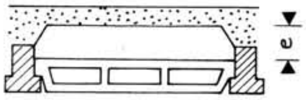
entrevous plein avec talon polystyrène 4 cm

ep : (cm)	
12,5	90,2
15,0	102,5
17,5	110,7
20,0	121,0
22,5	129,1



plaque sur hourdis céramique largeur liaison béton 13 cm

ep : (cm)	
5,0	20,5
7,5	26,6
10,0	30,7



entrevous plein largeur liaison béton : 6 cm

ep : (cm)	
7,5	41,0
10,0	47,1
12,5	53,3
15,0	57,4
17,5	61,5

Dalles béton plein

ep (cm)	4	6	8	10	12	14	16	20
	1,1	1,75	2,3	2,9	3,5	4,1	4,7	5,8

Parquets

ep (mm)	chêne	pin	sapin
8 collé	1,4		
16	2,8	4,2	5,6
22	3,8	6,0	7,7

Carrelage

ep (cm)	0,6	1	1,5
	0,18	0,3	0,4

Moquette

ep(mm)	5	10	15
	4,35	8,15	13,12

Dalles armées en béton cellulaire autoclavé

	ep : (cm)	10	12	14	16	18	20
masse volumique	800 kg m^3	12,4	15,0	17,4	20,0	22,3	24,8
	700 kg m^3	15,2	18,2	21,2	24,3	27,3	30,4
	600 kg m^3	18,6	22,4	26,0	29,8	33,5	37,2
	500 kg m^3	22,7	27,3	31,8	36,4	41,0	45,4
	400 kg m^3	25,6	30,7	35,8	41,0	46,1	51,2

Étanchéité

ep (cm)	1	1,5	2
carton bitumé	1,75	2,6	3,5
asphalte sablé	0,35	0,52	0,7

Enduit

ep. (cm)	ciment	plâtre
1	0,35	0,87
1,5	0,5	1,3
2	0,7	1,75

Plafonds

plâtre cartonné 13 mm	1
brique suspendue + plâtre 1 cm	4,4
plâtre sur lattis 1 cm	1,3
1,5	1,75
2	2,1

lame d'air non ventilée (ep = 3 à 10 cm)

flux ascendant	5,95
flux descendant	7,7

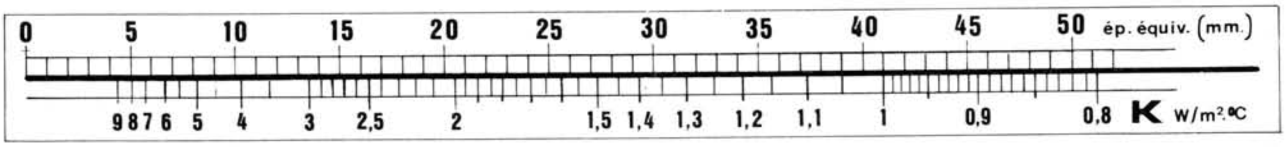
Tableau IV équivalence des isolants

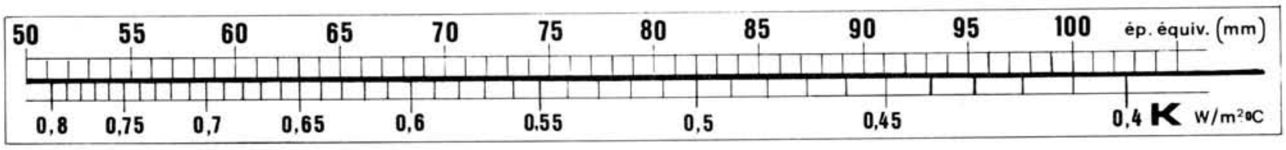
(W/m °C)	Désignation des isolants	Épaisseurs (mm) mises en œuvre								
		20	25	30	35	40	45	50	55	60
0.120	– Fibragglos (500 kg/m³) – Panneaux particules lin 950 kg/m³	6,8	8,5	10,3	12	13,7	15,4	17,1	18,8	20,5
0.100	– Panneaux particules lin 770 kg/m³ – Plaques vermiculite aggl. aux silicates	8,2	10,2	12,3	14,3	16,4	18,4	20,5	22,5	24,6
0.085	– Panneaux particules lin 620 kg/m³	9,6	12,1	14,5	16,9	19,3	21,7	24,1	26,5	28,9
0.078	– Panneaux particules lin 470 kg/m³	10,5	13,1	15,8	18,4	21,0	23,7	26,3	28,9	31,5
0.065	– Panneaux fibres de bois asphaltés	12,6	15,8	18,9	22,1	25,2	28,4	31,5	34,7	37,8
0.063	– Verre cellulaire (140 < ρ < 180)	13,0	16,3	19,5	22,8	26,0	29,3	32,5	35,8	39,0
0.058	– Plaques perlite expansé aggl. liant bitume – Panneaux fibres de bois (200 < ρ < 250)	14,1	17,7	21,2	24,7	28,3	31,8	35,3	38,9	42,4
0.055	– Verre cellulaire (130 < ρ < 140)	14,9	18,6	22,4	26,1	29,8	33,5	37,3	41,0	44,9
0.050	– Verre cellulaire 120 < ρ < 130	16,4	20,5	24,6	28,7	32,8	36,9	41,0	45,1	49,2
0.048	– Liège expansé aggl. brai ou résines 150 < ρ < 250	17,1	21,4	25,6	29,9	34,2	38,4	42,7	47,0	51,3
0.044	– Polystyrène expansé Cl I (9 < ρ < 13) – Mousse formo-phénolique	18,6	23,3	28,0	32,6	37,3	41,9	46,6	51,2	55,9
0,043	– Liège expansé pur (ou aggl. brai) ou résines avec 100 < ρ < 150)	19,1	23,8	28,6	33,4	38,1	42,9	47,7	52,4	57,2
0.042	– Polystyrène expansé Cl II (13 < ρ < 16)	19,5	24,4	29,3	34,2	39,0	43,9	48,8	53,7	58,6
0.041	– Fibres minérales – Polystyrène Thermo-comprimé en continu 12 < ρ < 15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
0,039	– Polystyrène expansé Cl III et IV (16 < ρ < 30)	21,0	26,3	31,5	36,8	42	47,3	52,6	57,8	63,1
0.038	– Polystyrène Thermo-comprimé en continu 15 < ρ < 20	21,6	27,0	32,4	37,8	43,2	48,6	53,9	59,3	64,7
0.036	– Polystyrène Thermo-comprimé en continu 20 < ρ < 35	22,8	28,5	34,2	39,9	45,6	51,3	56,9	62,6	68,3
0.035	– Polystyrène extrudé (28 < ρ < 32)	23,4	29,5	35,1	41,0	46,9	52,7	58,6	64,4	70,3
0.034	– Mousse polychlorure vinyle Cl II (35 < ρ < 48)	24,1	30,1	36,2	42,2	48,2	54,3	60,3	66,3	72,4
0.033	– Mousse polyuréthane expansé en discontinu 40 < ρ < 60	24,8	31,1	37,3	43,5	49,7	55,9	62,1	68,3	74,5
0.031	– Mousse polychlorure vinyle Cl I (25 < ρ < 35)	26,5	33,0	39,7	46,3	52,9	59,5	66,1	72,7	79,4
0.030	– Mousse polyuréthane expansé en discontinu 30 < ρ < 40	27,3	34,2	41,0	47,8	54,7	61,5	68,3	75,2	82,0
0.029	– Mousse polyuréthane expansé en continu 30 < ρ < 40 – Polystyrène extrudé (35 < ρ < 40)	28,3	35,3	42,4	49,5	56,6	63,6	70,7	77,8	84,8

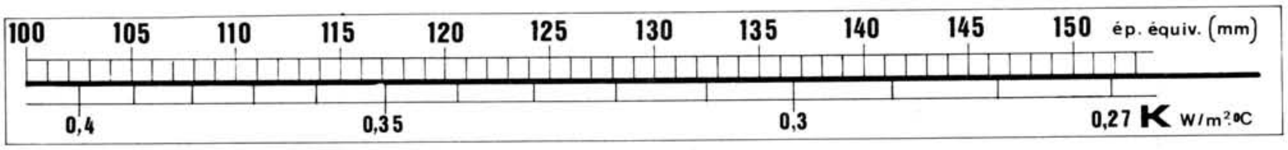
Remarque : La partie hachurée de ce tableau est celle qui correspond à une résistance thermique égale ou inférieure à 0,5 m^2 °C/W.

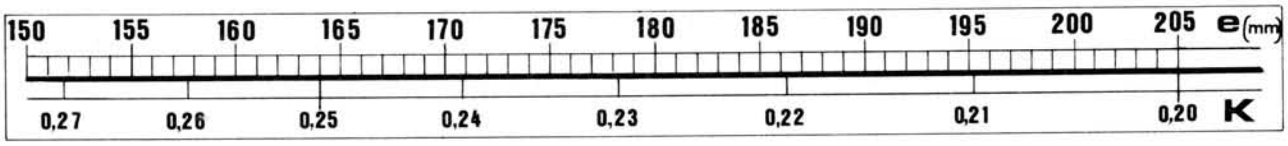
6.5.6 **Les échelles directes de lecture**

La somme des équivalences étant faite il suffit de repérer sur une des 4 échelles de ce paragraphe en regard de cette somme (millimètres équivalents) la valeur du coefficient K cherché (en W/m². °C).









Exemples de lecture :

– Épaisseur totale équivalente =	$\boxed{20{,}5 \text{ mm}}$	K =	$\boxed{2{,}0}$ W/m².°C
	31,5 mm	≃	1,30
	39,0 mm	=	1,05
	$\boxed{41{,}0 \text{ mm}}$	=	$\boxed{1{,}00}$
	50,0 mm	=	0,82
	70,0 mm	≃	0,585
	$\boxed{82{,}0 \text{ mm}}$	=	$\boxed{0{,}50}$
	100,0 mm	=	0,41
	130,0 mm	=	0,315
	$\boxed{164{,}0 \text{ mm}}$	=	$\boxed{0{,}25}$
	205,0 mm	=	0,20

Les valeurs encadrées sont des repères facilitant l'appréciation des ordres de grandeur

6.5.7 **Applications de la méthode**

Il est très facile et rapide de se familiariser avec cette méthode.

Nous vous proposons maintenant toute une série d'exercices d'application. Leur présentation vous permet — si vous le désirez — un auto-contrôle des connaissances acquises. En effet dans la moitié gauche de chaque page affectée à ces exercices figure la structure dont on désire connaître le coefficient K et parfois des questions. Dans la moitié droite, *que vous pouvez cacher pendant vos recherches,* figurent la façon d'obtenir le coefficient K — sa valeur numérique — et éventuellement les réponses à des interrogations.

Application 1
Mur de pierre

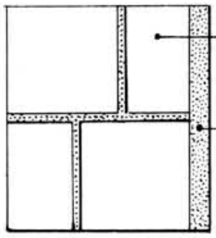


fig. 6.3

Tableau I
Paroi extérieure verticale
Somme des résist. superf. éq : 7,00 mm

Tableau II

granit	5,50 mm
plâtre	1,75 mm
	14,25 mm

Lecture :
14,25 mm correspondent à
K ≃ 2,85 W/m^2. °C

Application 2
Mur de pierre

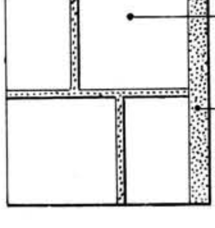


fig. 6.4

Tableau I
Paroi extérieure verticale
Somme des résist. superf. 7,00 mm

Tableau II

calcaire	9,75 mm
plâtre	1,75 mm
	18,50 mm

Lecture :
K ≃ 2,2 W/m^2. °C

Application 3
Mur de briques pleines

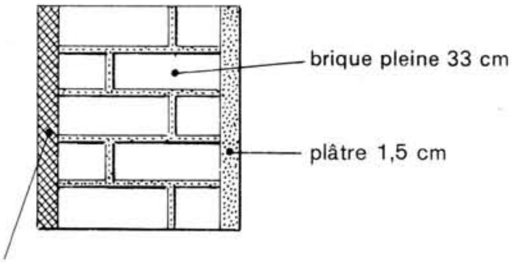


fig. 6.5

Tableau I	
Paroi extérieure verticale	
Somme des résist. superf.	7 mm
Tableau II	
brique	12 mm
enduits	2 mm
	21 mm

Lecture :
K $\simeq$ 1,95 W/m^2. °C

Application 4
Mur de briques creuses

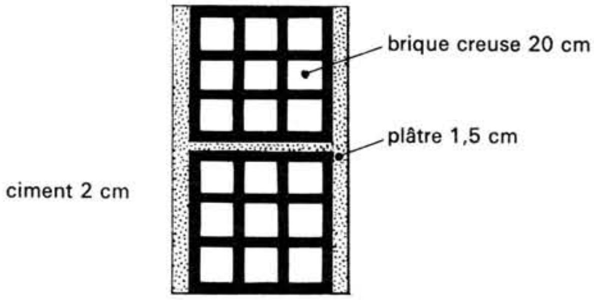


fig. 6.6

Tableau I	
Paroi extérieure verticale	
Somme des résist. superf.	7,0 mm
Tableau II	
brique	13,5 mm
enduits	2,0 mm
	22,5 mm

Lecture :
K $\simeq$ 1,82 W/m^2. °C

Application 5
Mur de parpaings creux entre cuisine et cellier

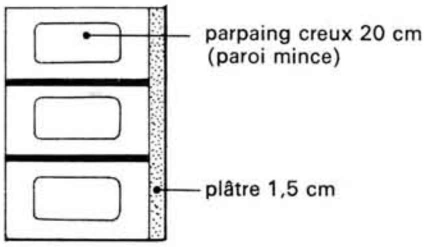


fig. 6.7

Tableau I	
Paroi intérieure verticale	
Somme des résist. superf.	9,8 mm
Tableau II	
parpaing	9,0 mm
plâtre	1,3 mm
	20,1 mm

Lecture :
K $\simeq$ 2,05 W/m^2. °C

Application 6
Mur béton banché

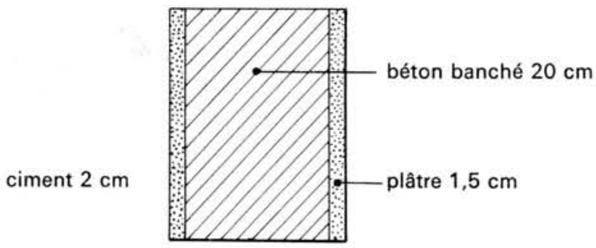


fig. 6.8

Tableau I	
Paroi extérieure verticale	
Somme des résist. superf.	7,0 mm
Tableau II	
béton	5,8 mm
enduits	2,0 mm
	14,8 mm

Lecture :
K $\simeq$ 2,75 W/m^2. °C

Application 7
Mur intérieur

Garage
fermé
non
chauffé

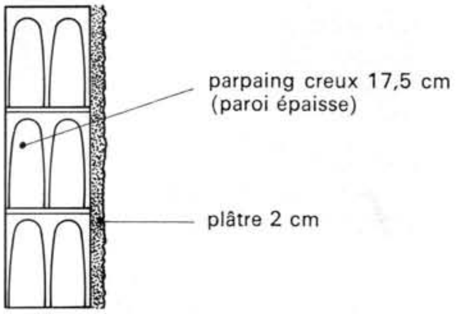


fig. 6.9

Tableau I	
Paroi intérieure verticale	
Somme des résist. superf.	9,80 mm
Tableau II	
parpaing	6,50 mm
enduit	1,75 mm
Lecture :	18,05 mm

K ≃ 2,3 W/m^2. °C

Application 8
Mur intérieur

Cellier
fermé
non
chauffé

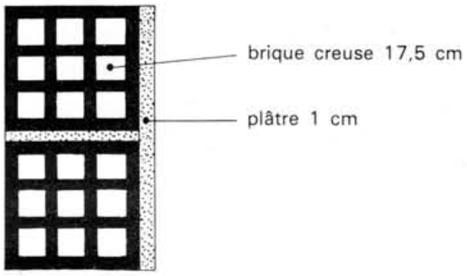


fig. 6.10

Tableau I	
Paroi intérieure verticale	
Somme des résist. superf.	9,80 mm
Tableau II	
brique	11,90 mm
enduit	0,87 mm
	22,57

Lecture :
K ≃ 1,85 W/m^2. °

Application 9
Mur avec lame d'air non ventilée

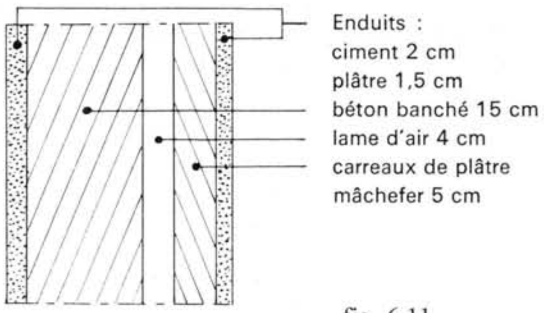


fig. 6.11

Tableau I	
Paroi extérieure verticale	
Somme des résist. superf.	7,0 mm
Tableau II	
béton	4,4 mm
contre-cloison	4,2 mm
enduits	2,0 mm
lame d'air	6,3 mm
	23,9 mm

Lecture :
K ≃ 1,7 W/m^2. °C

Application 10 Mur isolé avec contre-cloison

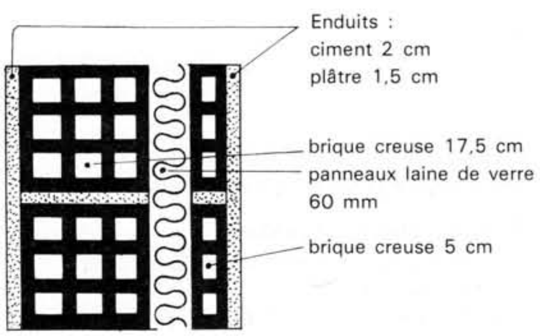


fig. 6.12

Tableau I	
Paroi extérieure verticale	
Somme des résist. superf.	7,0 mm
Tableau II	
brique 17,5 cm	11,9 mm
brique 5 cm	3,8 mm
enduits	2,0 mm
Tableau IV	
60 mm laine de verre	60,0 mm
	84,7 mm

Lecture :
K ≃ 0,482 W/m^2. °C

Application 11

Même structure
que n° 10

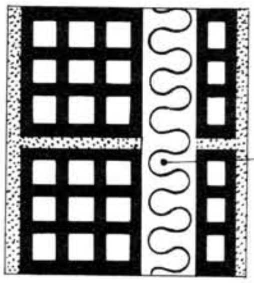


fig. 6.13

Les résist. superf.	7,0 mm
briques 17,5	11,9 mm
brique 5	3,8 mm
enduits	2,0 mm
Tableau IV 50 mm de polyuréthane expansé en continu	70,7 mm
	95,4 mm

Lecture :
K $\simeq$ 0,43 W/m^2. °C

Application 12

Même structure
que n° 10

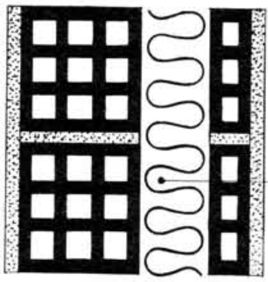


fig. 6.14

Les résist. superf.	7,0 mm
briques 17,5	11,9 mm
briques 5	3,8 mm
enduits	2,0 mm
Tableau IV 60 mm Polystyrène expansé (Cl II)	58,6 mm
	83,3 mm

Lecture :
K $\simeq$ 0,49 W/m^2. °C

Application 13

Un mur AVANT isolation

comprend : brique creuse ——→ 17,5 cm

doublage brique creuse ——→ 5 cm

enduits : 2,0 cm ciment (extérieur)

1,5 cm plâtre (intérieur)

Épaisseur équivalente avant isolation

les résist. superf.	7,0 mm
brique creuse 17,5	11,9 mm
brique de 5	3,8 mm
enduits	2,0 mm
	24,7 $\simeq$ **25**

Quelle épaisseur **minimale** devront avoir des panneaux de laine de verre pour que K = 0,5 W/m^2.°C

Épaisseur après isolation
K = 0,5 → **82,0 mm**

L'épaisseur minimale de laine de verre nécessaire 82 - 25 = **57 mm**

Il faudra choisir l'épaisseur commerciale fabriquée immédiatement supérieure : 60 mm.
(qui donnera un K $\simeq$ 0,48 W/m^2. °C)

Application 14

Un mur comprend :

parpaing creux (paroi épaisse)	20,0 cm
doublage carreaux plâtre mâchefer	5,0 cm
enduits : ciment (extérieur)	2,0 cm
plâtre (intérieur)	1,5 cm

Quelle épaisseur **minimale** devront avoir des panneaux de polystyrène expansés (Cl II) pour que :

$K = 0{,}45\ W/m^2.°C$

Équivalence avant isolation

les résist. superf.	7,0 mm
parpaing	7,7 mm
doublage plâtre	4,2 mm
enduits	2,0 mm
	20,9 ≃ **21**

Équivalence après isolation

K = 0,45 — 91 mm de laine de verre

L'épaisseur minimale de laine de verre nécessaire est donc

91 - 21 = 70 mm. Ce qui correspond à

$\frac{42}{41}$ x 70 mm de

polystyrène expansé Cl II ($\lambda = 0{,}042\ W/°C$)

soit ≃ **72 mm**

Il faudra choisir l'épaisseur commerciale fabriquée immédiatement supérieure

Application 15

Un mur comprend :

béton banché	15	cm
doublage : panneaux de particules de bois agglomérés	15	mm
enduit : ciment (extérieur)	2	cm

Quelle épaisseur **minimale** devront avoir les panneaux de mousse de polychlorure de vinyle (Cl II) pour que :

$K = 0{,}4\ W/m^2.°C$

Épaisseur équivalente avant isolation :

les résist. superf.	7,0 mm
béton	4,4 mm
panneaux de bois	3,5 mm
enduits	0,7 mm
	15,6 mm

Équivalence nécessaire après isolation

k = 0,4 → 102,5

En laine de verre ($\lambda = 0{,}041$) il faudrait donc :

102,5 − 15,6 = 86,9 mm

En polychlorure de vinyle (Cl II)

$\lambda = 0{,}034$ − il faudra :

$\frac{34}{41}$ x 86,9 = **72 mm au minimum**

Application 16

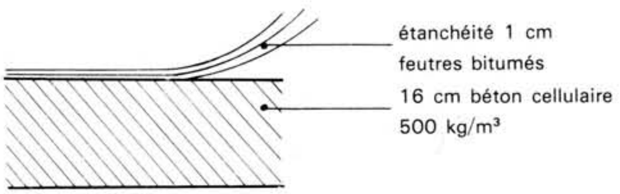


fig. 6.15

Tableau I

Résist. superf.	5,75 mm

Tableau III

béton cellulaire	36,4 mm
étanchéité	1,75 mm
	43,90 mm

Lecture :

$K \simeq 0{,}93 W/m^2.°C$

Application 17

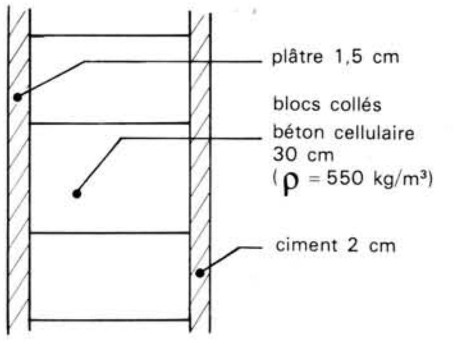


fig. 6.16

Tableau I

Résist. superf.	7 mm

Tableau II

enduits	2 mm
béton cellulaire	55,8 mm
	64,8 mm

Lecture :

K $\simeq$ 0,63W/m^2.°C

Application 18

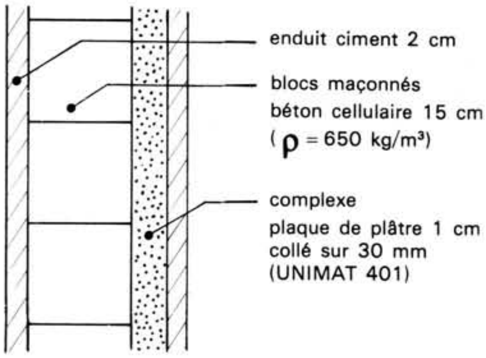


fig. 6.17

Tableau I

Résist. superf.	7 mm

Tableau II

enduit ciment (2 cm)	0,7 mm
béton cellulaire	21, mm
plaque de plâtre	0,87 mm

Tableau IV

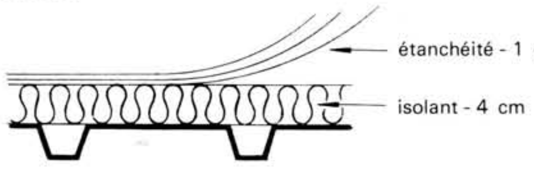
3 cm polystyrène thermocomprimé en continu (15 < ρ < 20)	32,4 mm
	61,97 mm

Lecture :

K $\simeq$ 0,66 W/m^2.°C

Application 19

Bac acier



Calculer K avec les isolants suivants :
1. laine de verre (110 kg/m^3)
2. Panneaux de perlite expansé aggl. liant bitume

fig. 6.18

Tableau I

les résist. superf.	5,75 mm

Tableau III

bac acier	$\simeq$ 0,00 mm
étanchéité	1,75 mm
	7,50 mm

1. avec 40 mm de laine de verre
7,5 + 40 = 47,5 → K $\simeq$ 0,86 W/m^2. °C

2. avec 40 mm Perlite expansée agglomérée avec liant bitumé

Tableau IV → équivalence : 28,3
7,5 + 28,3 = 35,8 K $\simeq$ 1,15 W/m^2.°C

Application 20 Isolation sous forme de pente

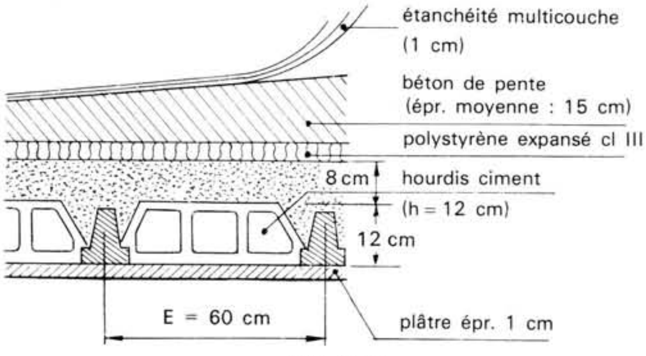


Fig. 6.19

Tableau I

les résist. superf.	5,75 mm

Tableau III

hourdis	4,55 mm
forme de pente	4,40 mm
plâtre	0,87 mm
étanchéité	1,75 mm

Tableau IV

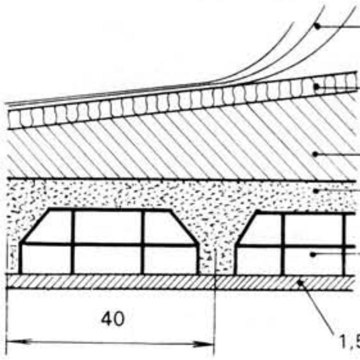
4 cm Polystyrène expansé (Cl III)	42,00 mm
	59,32

Lecture :

K $\simeq$ 0,69 W/m^2. °C

Application 21

Isolation sur forme de pente



ISOLATION directement sous étanchéité

fig. 6.20

Tableau I	
les résist. superf.	5,75 mm
Tableau III	
hourdis	5,25 mm
forme de pente	4,40 mm
plâtre	1,30 mm
étanchéité	1,75 mm
Tableau IV	
polystyrène thermo-comprimé en continu (UNIMAT 801)	45,6 mm
	64,05 mm

Lecture:
K $\simeq 0{,}64$ W/m^2.°C

Application 22

Coefficient K équivalent « plafond – comble – toit »

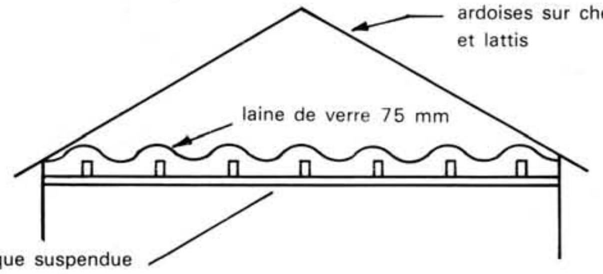


fig. 6.21

Tableau I	
Résist. superf. :	
comble **fortement** ventilé	7,4 mm
influence de la toiture (négligeable dans ce cas)	
Tableau III	
brique suspendue + plâtre	4,4 mm
Tableau IV	
Isolant	75 mm
	86,8 mm

Lecture:
K $\simeq 0{,}475$W/m^2.°C

Application 23

K équivalent plafond – comble – toit
comble **faiblement** ventilé
isolant 120 mm laine de verre

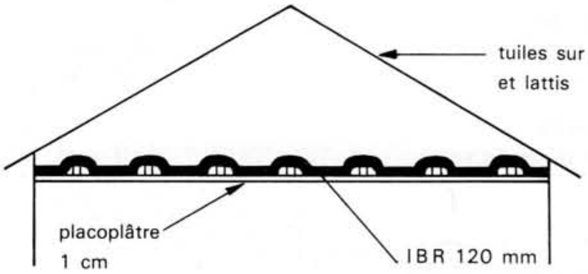


fig. 6.22

Méthode simplifiée (voir paragraphe 5.21).
si le comble est **faiblement** ventilé

on prendra **l'équivalent d'une résistance de 0,29 soit** ⟶ 12 mm

Il faut ajouter dans ce cas:

plâtre	0,87 mm
isolant	120 mm
	132,87 mm

Lecture
K $\simeq 0{,}31$W/m^2.°C

Application 24

K équivalent « plafond – comble – toit »

comble faiblement ventilé

isolation : 100 mm laine de verre

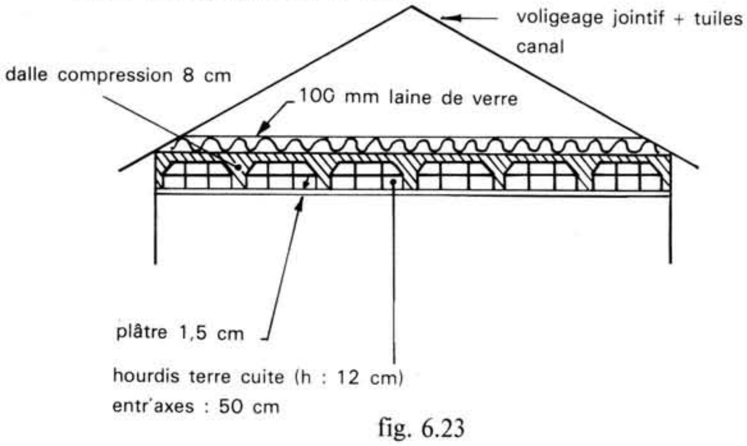


fig. 6.23

Comme dans le cas précédent équivalence des résist. superf. + comble + toit — 12 mm

Il faut ensuite ajouter :

hourdis	6,65 mm
plâtre	1,3 mm
isolant	100 mm
	119,95 mm

Lecture :

K ≃ 0,342 $W/m^2.°C$

Application 25

Plancher sur passage ouvert

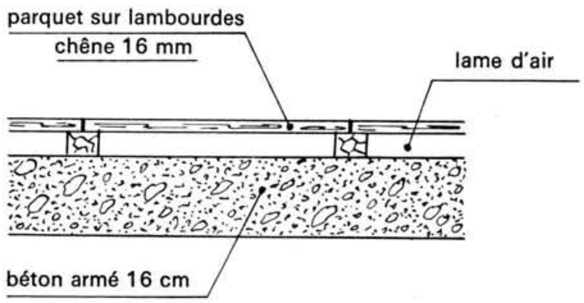


fig. 6.24

Tableau I

les résist. superf.	9,05 mm

Tableau III

béton	4,70 mm
lame d'air	7,70 mm
parquet	2,80 mm
	24,25 mm

Lecture :

K ≃ 1,85 $W/m^2.°C$

Application 26

Plancher sur vide sanitaire ventilé

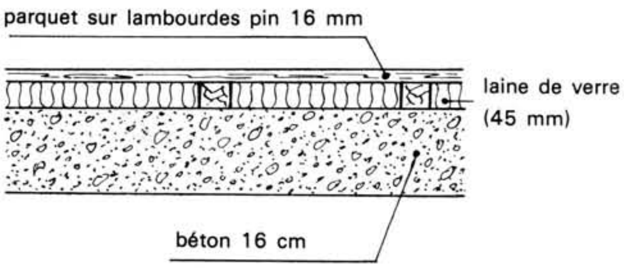


fig. 6.25

Tableau I

paroi intérieure (cas particulier) résist. superf.	11,9 mm

Tableau III

béton	4,7 mm
parquet	4,2 mm

Tableau IV

45 mm laine de verre	45,0 mm
	65,8 mm

Lecture :

K ≃ 0,62 $W/m^2.°C$

Application 27

Plancher sur cave

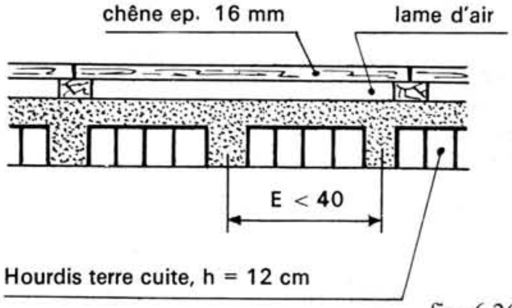


fig. 6.26

Tableau I	
paroi intérieure	
résist. superf.	14,0 mm
Tableau III	
hourdis	4,2 mm
lame d'air	7,7 mm
plancher	2,8 mm
	28,7 mm

Lecture :
K ≃ 1,42 W/m^2.°C

Application 28

Plancher sur vide sanitaire

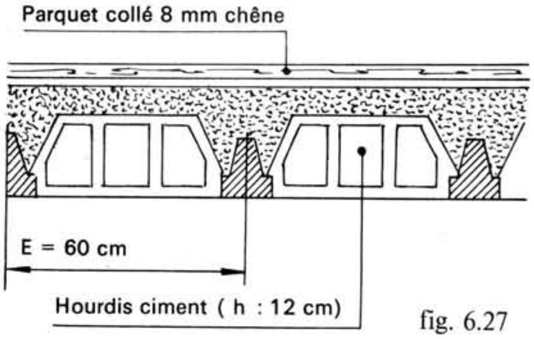


fig. 6.27

Tableau I	
paroi intérieure	
(cas particulier)	
résist. superf	11,9 mm
Tableau III	
hourdis	4,55 mm
parquet	1,40 mm
	17,85 mm

Lecture :
K ≃ 2,4 W/m^2.°C

Application 29

Plancher sur garage

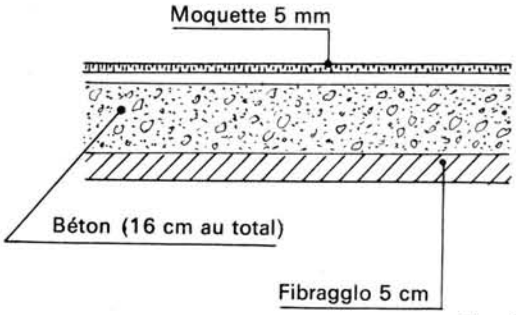


fig. 6.28

Tableau I	
paroi intérieure	
résist. superf.	14,00 mm
Tableau III	
béton	4,70 mm
moquette	4,35 mm
Tableau IV	
Fibragglo (5 cm)	17,10 mm
	40,15 mm

Lecture :
K ≃ 1,02 W/m^2.°C

Application 30

plancher sur vide sanitaire
(plancher à entrevous
en polystyrène)

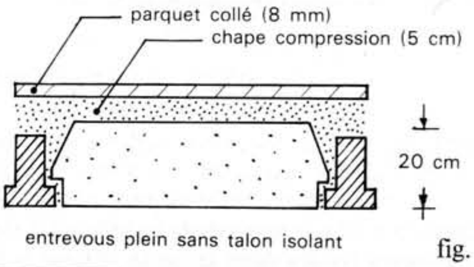


fig. 6.29

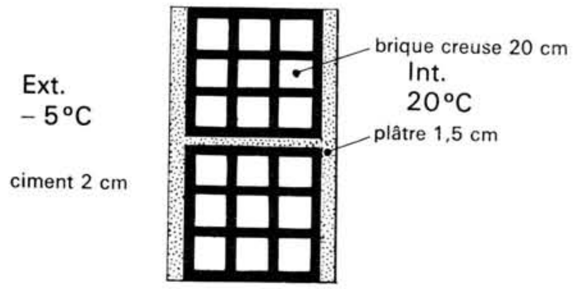
Tableau I	
Résist. superf. (vide sanitaire)	11,9 mm
Tableau III	
chape compression	
et	
entrevous polystyrène	43 mm
parquet colle 8 mm	1,4 mm
	56,3 mm

Lecture : pour le plancher seul
K_{pl} ≃ 0,73W/m^2.°C

6.5.8 **Construction des gradients de température dans une paroi**

Au chapitre 4 (paragraphe 4.4) nous avons montré que les chutes de température dans une paroi sont proportionnelles aux résistances thermiques des composants de la paroi. Elles peuvent s'établir par le calcul. La connaissance des épaisseurs équivalentes permet d'obtenir une solution graphique rapide.

Prenons comme premier exemple un mur extérieur en briques creuses de 20 avec enduits deux faces. En consultant les tableaux d'équivalences les résistances thermiques en présence ont pour équivalents respectifs :



Equivalences :

- résist. superf. interne 4,5
- enduit plâtre 1,3
- brique 13,5
- enduit ciment 0,5
- résist. superf. externe 2,5
- Equival. totale 22,3

Fig. 6.30

Pour obtenir graphiquement comment se répartissent les températures de l'intérieur (20°C) à l'extérieur (–5°C) il suffit de porter sur un axe vertical cet écart (25°C) et sur un axe horizontal les résistances en présence *représentées proportionnellement à leurs épaisseurs équivalentes.*

La répartition est obtenue en joignant par une droite les deux valeurs extrêmes figurant sur chaque axe (figure 6.31).

On lit ainsi facilement toutes les valeurs intermédiaires significatives, par exemple :

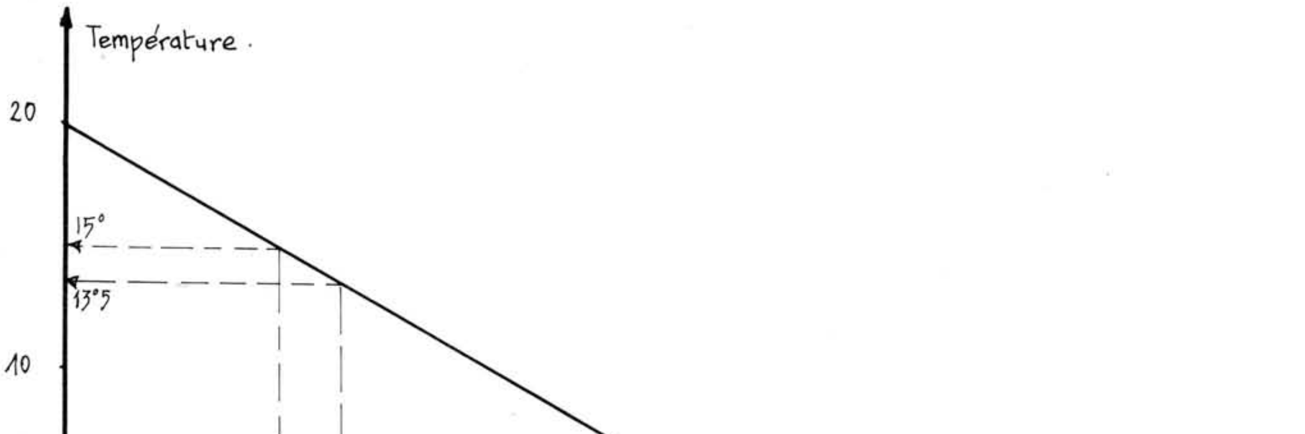


Fig. 6.31

— température de la face interne du mur : 15°C
— température moyenne de la brique :

$$\frac{13{,}5 + (-2)}{2} = 5{,}75°C$$

Connaissant ces valeurs on peut représenter alors le gradient des températures sous la forme usuelle : les matériaux en présence ne sont plus représentés proportionnellement aux épaisseurs équivalentes mais à leurs épaisseurs réelles dans la paroi (figure 6.32).

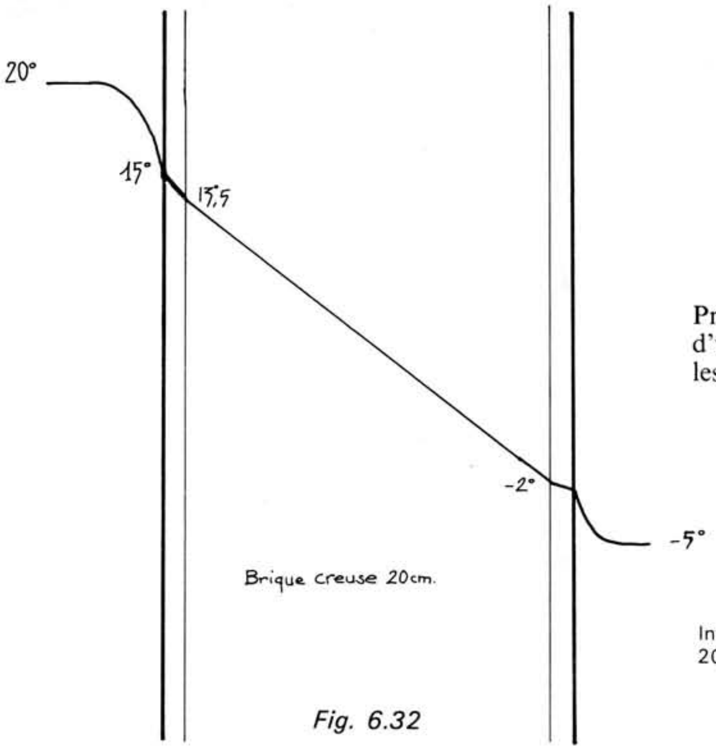


Fig. 6.32

Prenons maintenant comme 2ème exemple le cas d'un mur à isolation par l'extérieur et recherchons les épaisseurs équivalentes.

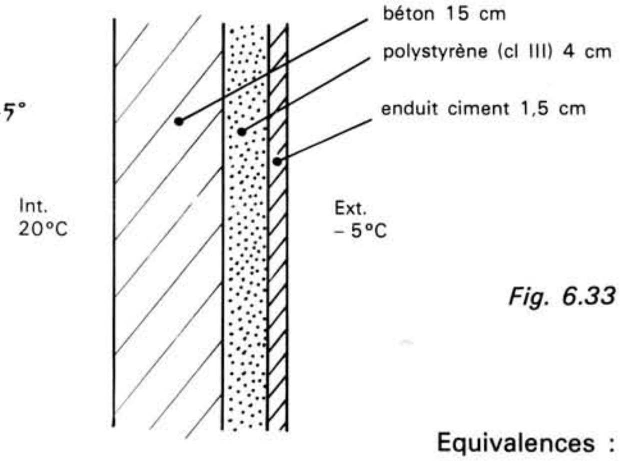


Fig. 6.33

Equivalences :

- résist. superf. interne 4,5
- béton 4,4
- polystyrène (cl III) 42
- enduit ciment 0,5
- résist. superf. externe 2,5
- Equival. totale 53,9

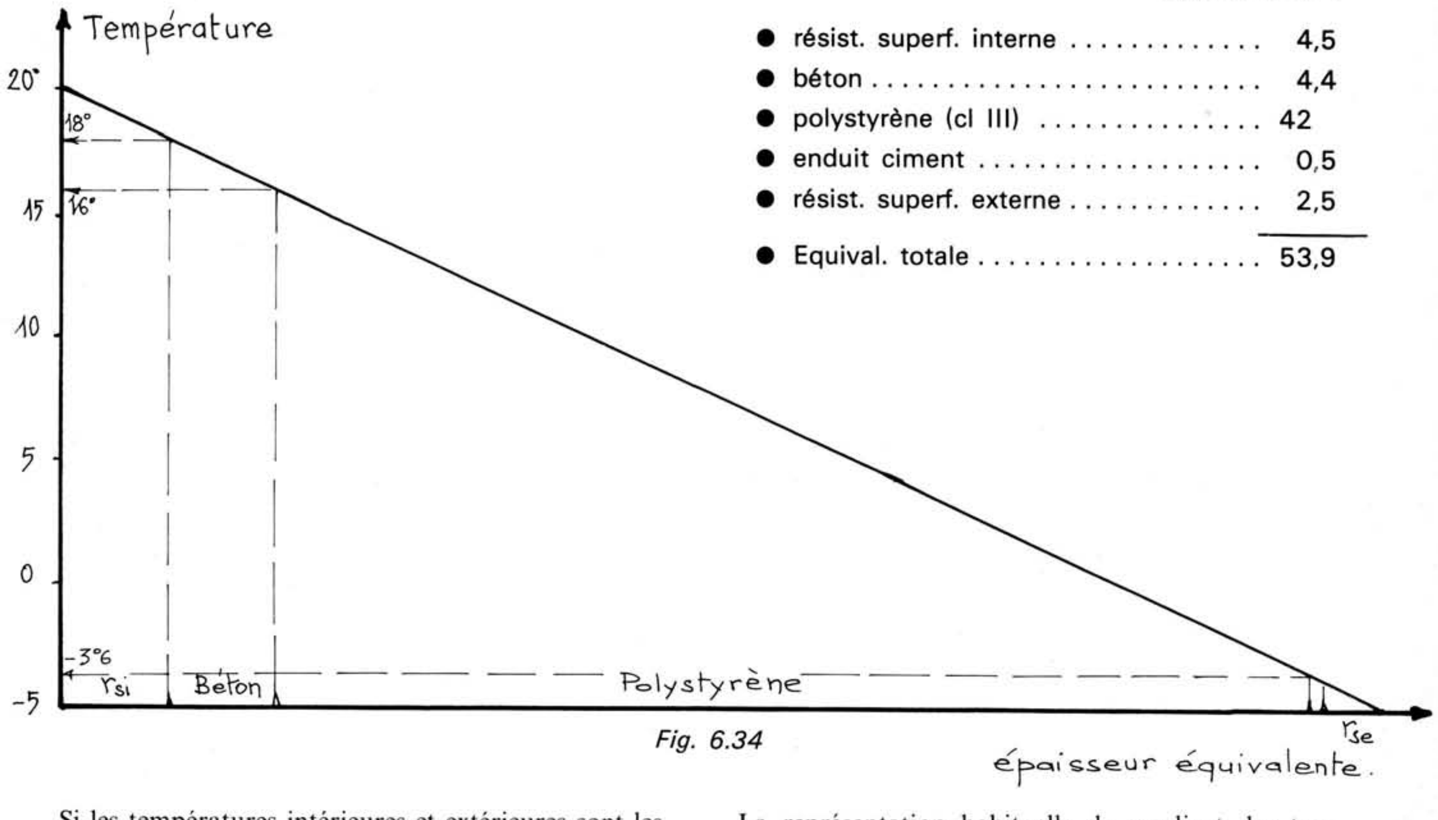


Fig. 6.34

Si les températures intérieures et extérieures sont les mêmes que dans l'exemple précédent la construction graphique (figure 6.34) montre que:

— la température de la face *interne* du mur est 18°C
— la température moyenne du béton est

$$\frac{18 + 16}{2} = 17°C.$$

La représentation habituelle du gradient des températures est facile à réaliser ensuite (figure 6.35).

Elle montre en particulier la chute brusque des températures dans l'isolant.

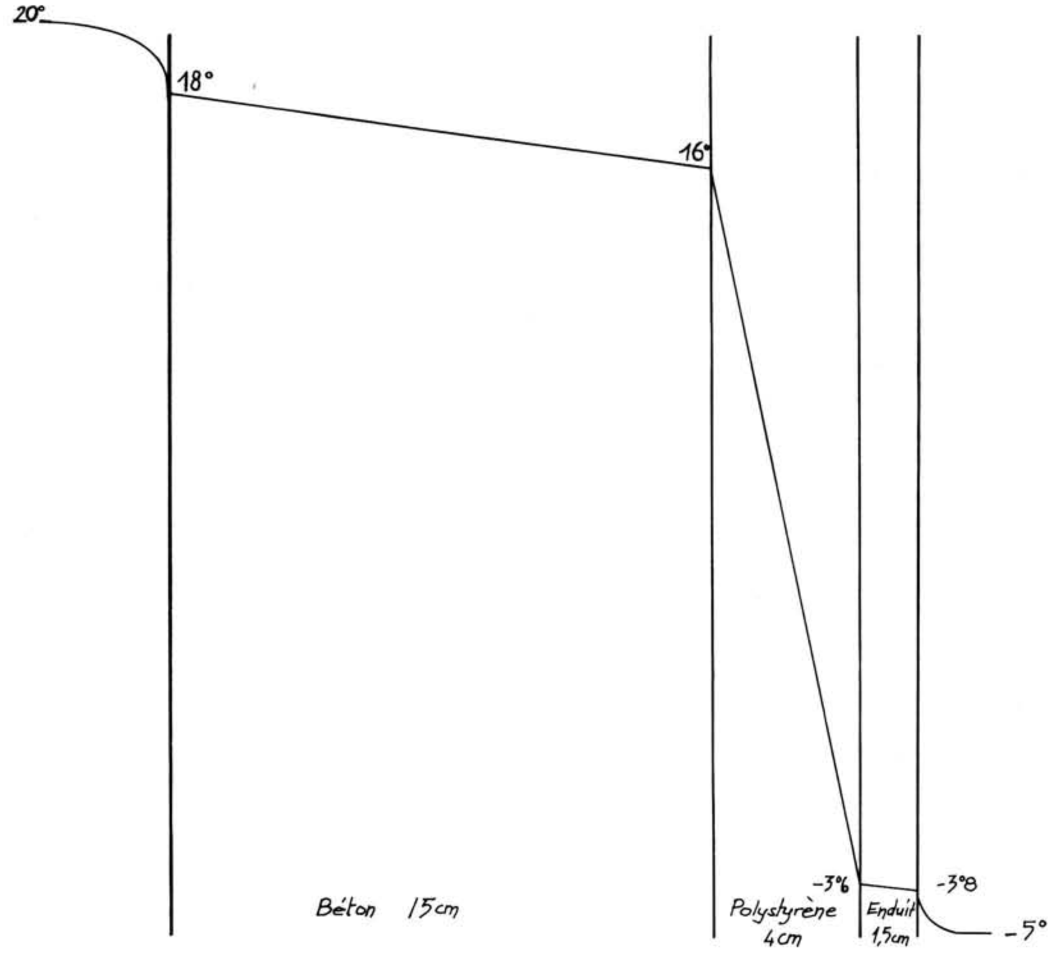
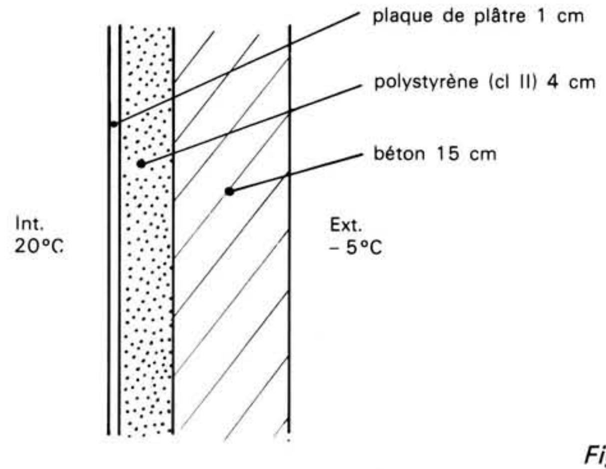


Fig. 6.35

Enfin, comme 3ᵉ exemple, nous choisissons le cas d'une isolation par l'intérieur : un même mur de 15 cm de béton isolé par l'intérieur avec 4 cm de polystyrène Cl II collé sur du plâtre cartonné de 1 cm d'épaisseur.



Equivalences :

- résist. superf. interne 4,5
- plâtre cartonné 0,8
- polystyrène (cl II) 39
- béton 4,4
- résistance superf. externe 2,5
- Equival. totale 51,2

Fig. 6.36

La construction graphique (figure 6.37) montre que :

— la température de la face *interne* du mur est 18°C.

— la température moyenne du béton est cette fois

$$\frac{-1,4 + (-3,6)}{2} = -2,5°C$$

La représentation habituelle du gradient des températures est dans ce cas la figure 6.38.

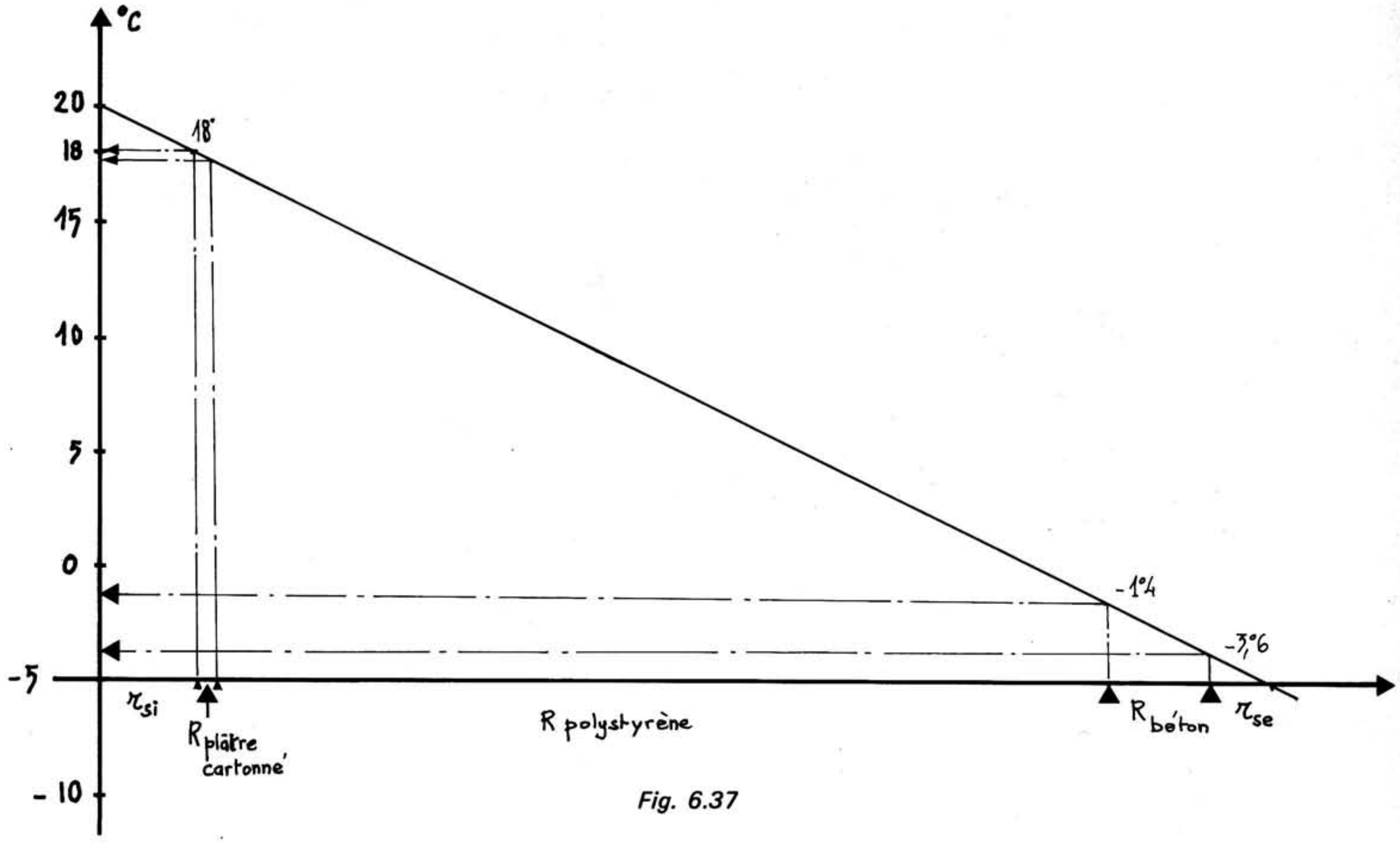


Fig. 6.37

Fig. 6.38

7 - Coefficients de transmission linéique k des liaisons

Les abaques de calcul indiqués dans ce chapitre sont publiés dans le chapitre des annexes à une dimension qui permet de les utiliser en pratique pour effectuer les calculs.

7.1 DÉFINITION DU COEFFICIENT Kg.

Comme nous l'avons défini au chapitre 4, le coefficient K de transmission thermique surfacique ne tient compte que des échanges entre les surfaces internes et externes parallèles c'est-à-dire des échanges caractérisés par des lignes de flux perpendiculaires aux faces.

Au niveau de la liaison de deux parois (toutes deux extérieures, ou une intérieure et une extérieure), au niveau des pourtours de baies, se produisent des échanges thermiques (par la surface A_3 par exemple sur la Fig. 7.1) qui ne sont pas intégrés dans les calculs de déperditions utilisant uniquement les K surfaciques. Seule la notion de coefficient K_g de transmission global permettra de tenir compte des déperditions K_i par les surfaces A et des déperditions k_iL_i par les liaisons.

Le coefficient K_g de transmission global, que nous calculerons plus en détail au chapitre 8, peut donc être défini par :

$$K_g = \frac{\Sigma(KA) + \Sigma(kL)}{A_i} \quad (W/m^2.°C)$$

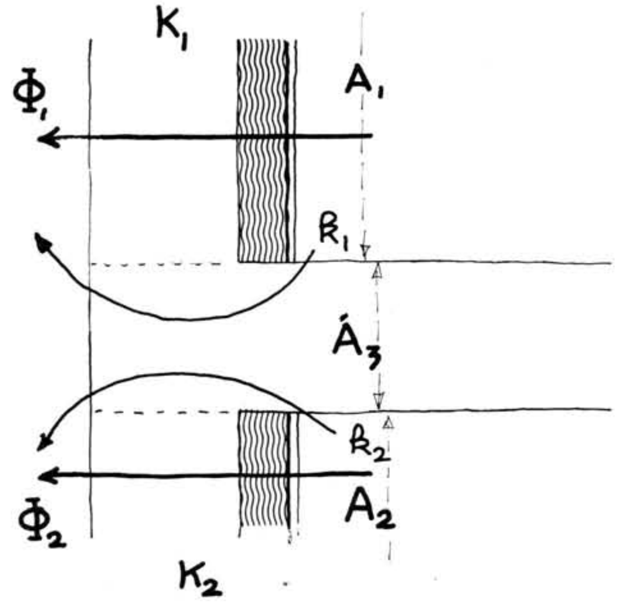


Fig. 7.1

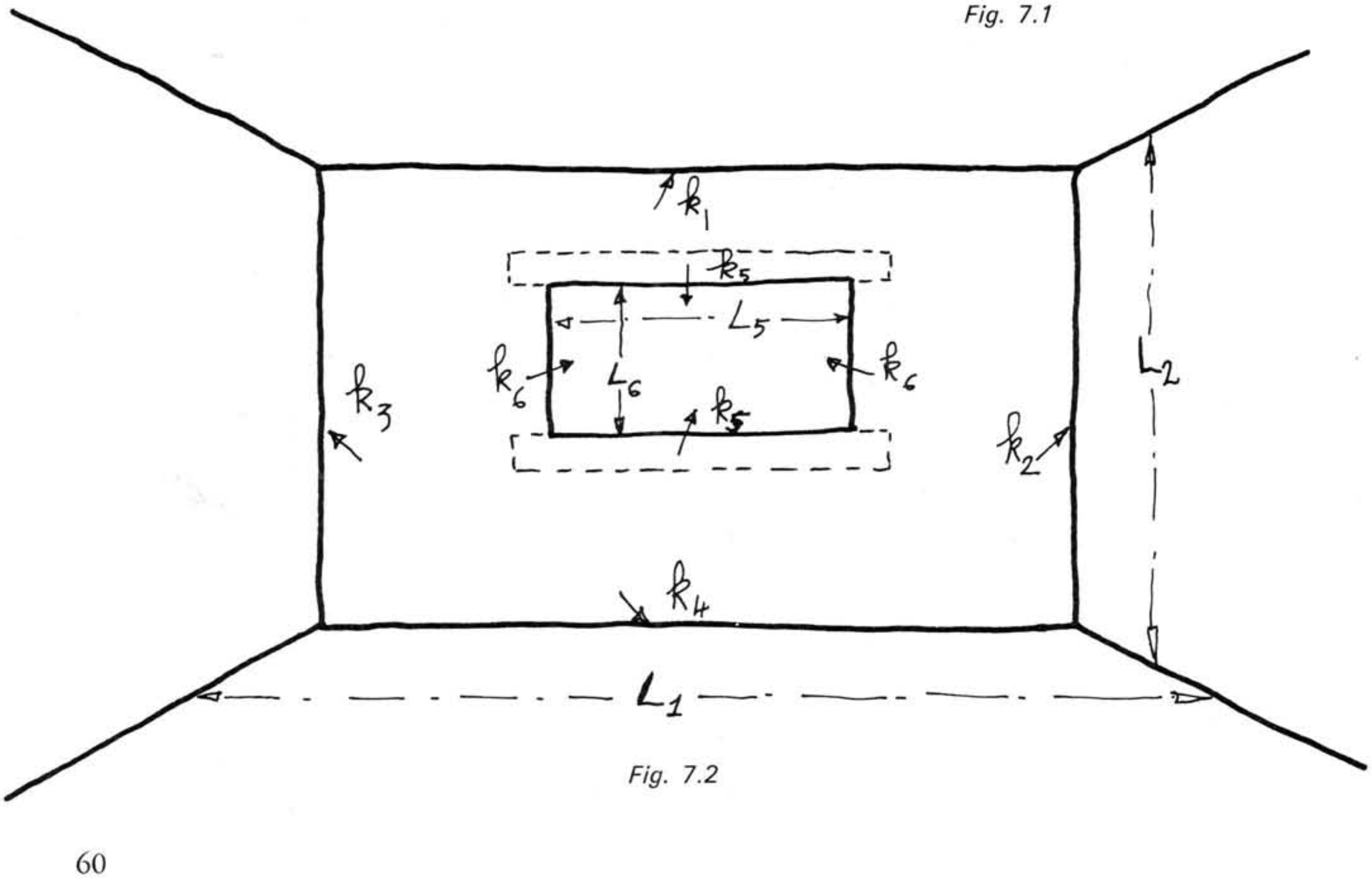


Fig. 7.2

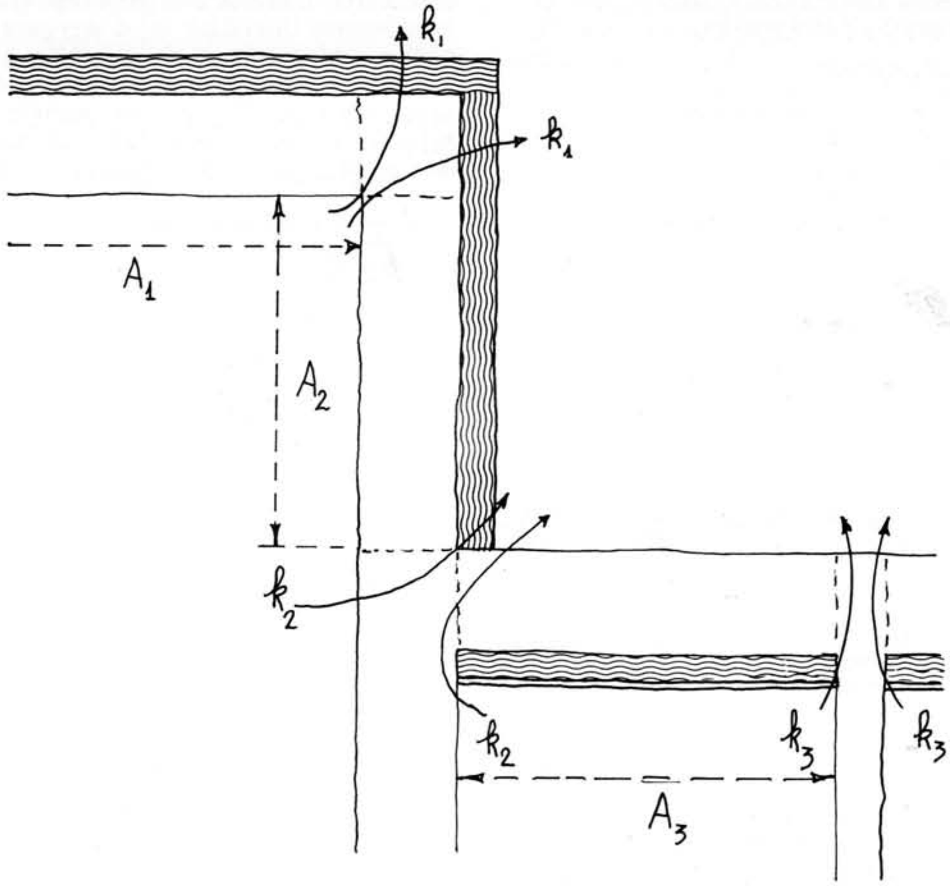


Fig. 7.3

Par exemple, considérons la façade représentée par la Fig. 7.2, constituée d'un mur en briques avec linteau et pièce d'appui en béton, compris entre une cloison, un refend, un plancher haut et un plancher bas. La déperdition par la surface opaque sera, si A_1 est la surface de la partie en brique du mur et K_1 son coefficient, A_2 et K_2 la surface et le coefficient de la partie en béton, égale à $K_1A_1 + K_2A_2$;
le coefficient K_{moyen} de la partie opaque est donc :

$$K_m = \frac{K_1A_1 + K_2A_2}{A_1 + A_2}$$

On notera $A_i = A_1 + A_2$.

Les déperditions par les liaisons sont données par :

$$\Sigma kL = k_1L_1 + k_4L_1 + k_2L_2 + k_3L_2 + 2k_5L_5 + 2k_6L_6$$

Le coefficient K_g de transmission global de cette paroi sera :

$$K_g = \frac{K_1A_1 + K_2A_2 + k_1L_1 + k_4L_1 + k_2L_2}{A_i} + \frac{k_3L_2 + 2k_5L_5 + 2k_6L_6}{A_i}$$

En fait, il s'agit donc de rapporter à chaque surface les déperditions supplémentaires par les points singuliers. Cette notion est nouvelle au niveau des calculs thermiques ; elle a été uniquement introduite dans la 5e mise à jour du D.T.U. de novembre 1974. Cela s'explique par le fait que les parois doivent être de plus en plus isolées et qu'en conséquence, les «fuites latérales» prennent proportionnellement plus d'importance. Par le passé, soit on les négligeait quand les liaisons étaient bien isolées (isolation continue), soit on prenait les surfaces extérieures comme surface d'échange.

7.2 DÉFINITIONS DES «POINTS SINGULIERS».

Il s'agit sous ce terme très général de «points singuliers» de surfaces d'échanges qui, du fait même de leur position ne sont pas prises en compte dans le calcul du coefficient K surfacique. Parfois au niveau de ces surfaces, l'isolation est interrompue. C'est ce que nous appelons couramment «ponts thermiques», du fait même de la structure du bâtiment. Les Fig. 7.1, 7.2 et 7.3 schématisent quelques-uns de ces points singuliers.

Dans une première catégorie, nous pouvons mettre :

- les liaisons de deux parois extérieures :
  - Mur-Mur (angle de deux parois verticales)
  - Mur-Plancher sur passage ouvert, cave, garage
  - Mur-Toit Terrasse ou plafond de comble
- les pourtours de baie.

Dans une deuxième catégorie, nous pouvons classer les liaisons de parois où l'isolant est interrompu. C'est souvent le cas des liaisons paroi intérieure — paroi extérieure, de la liaison d'une paroi isolée avec une paroi non isolée ou d'une paroi isolée par l'extérieur et d'une paroi isolée par l'intérieur.

Dans une troisième catégorie, nous étudierons les liaisons de parois intérieure et extérieure où l'isolation est continue.

7.3 HYPOTHÈSES DE CALCUL DES COEFFICIENTS k LINÉIQUES.

7.3.1 Les Types d'isolation.

Le D.T.U. distingue trois types de parois :
- paroi à isolation répartie
- paroi isolée par l'intérieur
- paroi isolée par l'extérieur.

Une paroi à isolation répartie est une paroi dont la résistance thermique est à peu près la même de la face intérieure à la face extérieure de la paroi, c'est-à-dire essentiellement une paroi constituée du même matériau. Il s'agit par exemple de parois en briques, en blocs creux de béton, en béton cellulaire, de panneaux de façade (à parement non métallique).

MATÉRIAU
Panneaux de fibres de bois définis conformément au projet de norme B 51-100
– Panneaux « tendres » dits aussi « isolants »
– Panneaux « tendres spéciaux » asphaltés dans la masse, dits aussi « isolants spéciaux »
Fibragglos
Panneaux de particules de lin
Masse volumique nominale 600
500
400
300
Liège
– Comprimé
– Expansé pur
– Expansé aggloméré au brai ou aux résines synthétiques
Fibres minérales
Matières plastiques alvéolaires
Polystyrène expansé
Obtenu par moulage, défini conformément à la norme NF T 56-201 Classe I
Classe II
Classe III
Classe IV
Thermo-comprimé en continu par voie sèche
Extrudé
(Dans le cas où cette deuxième classe de densité est utilisée en toiture-terrasse au-dessus de l'étanchéité, on se reportera pour le calcul des déperditions à travers la toiture au document d'Avis Technique.)
Mousse rigide à base de polychlorure de vinyle, définie conformément à la norme NF T 56-202
Classe I
Classe II
Mousse rigide de polyuréthane expansée au trichloromonofluorométhane et (ou) au dichlorodifluorométhane.
(On ne donne ici que les caractéristiques des matériaux fabriqués en usine sous forme de blocs ou de plaques. En ce qui concerne les matériaux injectés dans des panneaux, in situ ou en usine, on se reportera aux documents d'Avis Techniques ; si les parements de ces panneaux sont étanches (métal, verre...), la conductivité thermique du matériau est généralement inférieure aux valeurs données ci-dessous) :
– plaques et blocs expansés en continu
– blocs expansés en discontinu
Mousse formo-phénolique
Les connaissances actuelles ne permettent pas de distinguer les différentes fabrications (obtention en continu ou en discontinu, plaques ou blocs, densités différentes) ; aussi on adoptera provisoirement la valeur unique suivante
Autres matières plastiques alvéolaires
Plaques à base de vermiculite ou de perlite expansée, fabriquées en usine
Plaques à base de vermiculite agglomérées aux silicates
Plaques à base de perlite expansée agglomérées avec un liant bitumineux
Verre cellulaire
Matériaux en vrac
Les caractéristiques thermiques de ces matériaux, étant fonction de leur utilisation, ne peuvent être données ici.

Une paroi sera à isolation intérieure ou extérieure si elle possède sur l'une de ses faces un isolant c'est-à-dire un matériau ayant un coefficient de conductivité $\lambda < 0,12$ W/m.°C et une résistance thermique

$$R = \frac{e}{\lambda} > 0,5 \text{ m}^2.°\text{C. / W}$$

Le tableau ci-dessous donne les épaisseurs minimales d'isolant nécessaires pour pouvoir considérer que la paroi est à isolation intérieure ou extérieure :

ρ compris entre	ρ_e (Kg/m³)	λ (W/m. °C)	Epaisseur en mm pour R = 0,5 m². °C/W	Epaisseur commerciale en mm
200 - 250	380	0,058	29	30
250 - 300	470	0,065	32,5	35 - 40
	500	0,12	60	60
500 - 600	950	0,12	60	60
410 - 500	770	0,10	50	50
320 - 410	620	0,085	42,5	45 - 50
230 - 320	470	0,078	39	40
500	850	0,10	50	50
100 - 150	210	0,043	21,5	25
150 - 250	340	0,048	24	25
100 - 150	210	0,043	21,5	25
20 - 300	20/300	0,041	20,5	25
9 - 13	11	0,044	22	25
13 - 16	15	0,042	21	25
16 - 20	18	0,039	19,5	20
20 - 30	25			
12 - 15	14	0,041	20,5	25
15 - 20	18	0,038	19	20
20 - 25	23	0,036	18	20
25 - 35	30			
28 - 32	30	0,035	17,5	20
35 - 40	38	0,029	14,5	20
25 - 35	30	0,031	15,5	20
35 - 48	42	0,034	17	20
30 - 40	35	0,029	14,5	15
30 - 40	35	0,030	15	15
40 - 60	50	0,033	16,5	20
30 - 100	30/100	0,044	22	25
10 - 60	10/60	0,046	23	25
200 - 300	360	0,10	50	50
170 - 190	180	0,058	29	30
120 - 130	125	0,050	25	25
130 - 140	135	0,055	27,5	30
140 - 180	160	0,063	31,5	35

Les exemples courants d'isolation par l'extérieur sont :

- Toiture Terrasse : isolant support d'étanchéité ou sur étanchéité, isolant sous forme de pente.
- Comble perdu : isolant déroulé sur le plafond.
- Plancher : isolant en fond de coffrage.
- Mur : il existe différents procédés d'isolation par l'extérieur utilisant donc un isolant situé à l'extérieur de l'élément porteur et protégé par une peau extérieure.

Les exemples courants d'isolation par l'intérieur sont :

- Plancher : isolant sous chape et sur la table de compression du plancher.
- Mur : doublage thermique associant un matériau isolant ($\lambda < 0{,}12$ et $R > 0{,}5$) à une contre-cloison, une plaque de plâtre cartonnée, un enduit épais de plâtre, un lambris posé sur ossature bois...

Les techniques de planchers utilisant des coffrages perdus en mousse isolante (voutains en polystyrène expansé) sont à rapprocher du point de vue calcul des panneaux sandwiches béton + isolant thermique léger.

7.3.2 Interprétation du coefficient k de transmission linéique

Cette notion est utilisée pour toute surface d'échange thermique qui n'est pas intégrée dans les déperditions $d_e = \Sigma K.A$, c'est-à-dire pour les surfaces où les lignes de flux ne sont pas perpendiculaires aux faces.

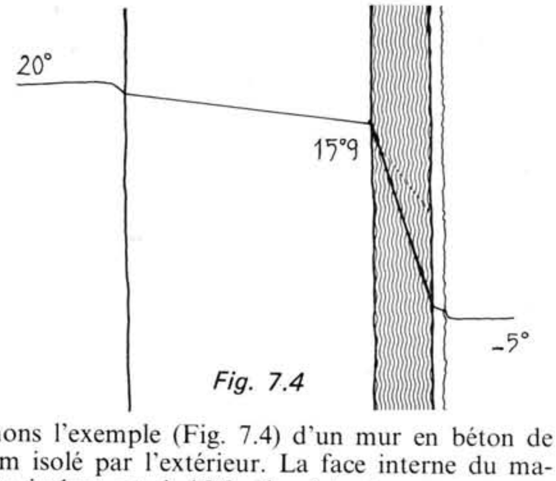


Fig. 7.4

Prenons l'exemple (Fig. 7.4) d'un mur en béton de 15 cm isolé par l'extérieur. La face interne du matériau isolant est à 15°9. Il existe donc entre cette face et l'extérieur un écart de température de 20°9. Il va donc se créer un flux de chaleur, dû à cet écart de température. Considérons maintenant (Fig. 7.5) un angle saillant de cette paroi isolée par l'extérieur. D'après la méthodologie de calcul des déperditions, l'élément en béton constituant l'angle de deux parois n'est pas inclus dans les surfaces d'échange. Par contre, (nous venons de le voir), la température sur la face interne de l'isolant est voisine de 16°C. Il existe donc des déperditions à ce niveau que l'on peut écrire :

$D = K' \times A \times \Delta t'$

Si nous considérons une longueur de liaison de 1m, la surface d'échange sur la face interne de l'isolant sera :

$A = L \times 1 = L \times 2e = 1(0{,}15 + 0{,}15) = 0{,}30\ m^2$

Au niveau des liaisons des parois les surfaces d'échanges ne sont pas toujours faciles à évaluer, pas plus d'ailleurs que les coefficients K'. Par contre, la longueur intérieure des liaisons est toujours cotée sur un plan car il s'agit des dimensions des différents locaux (hauteur, longueur, largeur). Il va donc être plus simple de ramener ces déperditions à chaque mètre linéaire de liaison. C'est pourquoi la notion de coefficient k de transmission linéique va être introduite.

D'autre part, comme on considère séparément les deux surfaces A_1 et A_2, de coefficients K_1 et K_2, situées de part et d'autre de la liaison, on va augmenter les déperditions K_1A_1 et K_2A_2 de chacune des 2 parois d'une moitié des déperditions de la liaison que l'on notera : k.L. Enfin, comme tous les calculs sont faits pour un degré d'écart entre l'intérieur et l'extérieur, on évaluera k pour $\Delta t = t_i - t_e$.
On peut donc écrire :

$D = K'.A.\Delta t' = 2kL(t_i - t_e)$

ou $\quad k = \dfrac{K'.A.\Delta t'}{2.L(t_i - t_e)} \quad$ (W/m°C)

Le coefficient k de transmission linéique est donc, en fait, la pondération d'un coefficient K surfacique au niveau de la liaison. Le D.T.U. «Règles Th» donne avec précision les formules permettant de calculer les k linéiques dans tous les cas de figures. Notre approche consistera fréquemment à traduire en abaque ces formules, à étudier quelques cas-types et à donner des solutions pour essayer de limiter ces «fuites latérales».

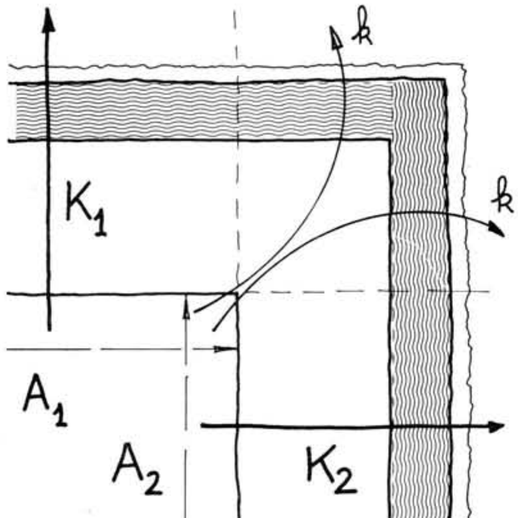


Fig. 7.5

7.4 CALCULS DES COEFFICIENTS k DE TRANSMISSIONS LINÉIQUES.

7.4.1 Pourtour de baie

La menuiserie peut être :
- à l'intérieur ou à mi-épaisseur
- à l'extérieur.

La paroi peut être :
- à isolation répartie
- isolée par l'intérieur
- isolée par l'extérieur.

7.4.1.1 *Mur à isolation répartie*

En fonction de la position de la menuiserie, le rapport $\frac{k}{e}$ est donné par l'abaque de la Fig. 7.7, k est le coefficient cherché, e est l'épaisseur du mur.

Ce coefficient k n'est pas forcément le même sur les quatre côtés de la fenêtre. C'est fréquemment le cas lorsque l'appui et le linteau sont en béton alors que le mur est dans un autre matériau (brique, par exemple). En effet, la valeur de la résistance thermique R_m n'est pas la même.

D'après l'abaque 7.7, connaissant la nature et l'épaisseur du mur porteur, on déduit facilement sa résistance R_m. On lit alors la valeur de $\frac{k}{e}$ et donc on obtient facilement le coefficient k linéique.

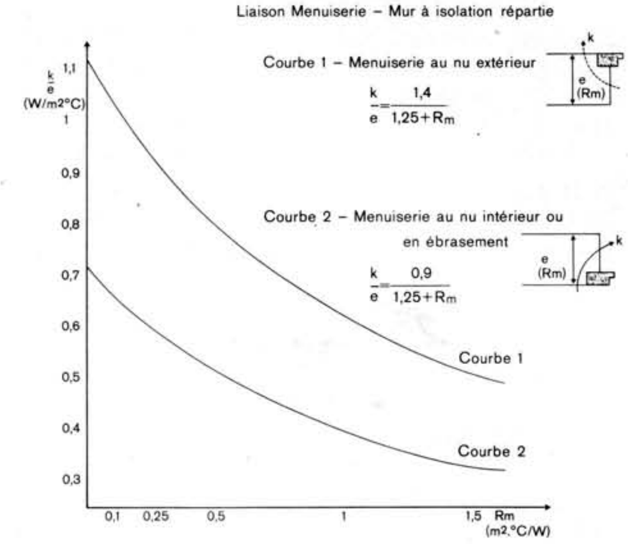


Fig. 7.7

Mur	Épaisseur du mur enduit (cm)	Rm $m^2.^oC/W$	k (W/m.°C) Menuiserie int.	Menuiserie ext.
Béton (λ = 1,4)	20 25 30	0,14 0,18 0,21	0,13 0,16 0,18	0,20 0,24 0,29
Blocs creux à parois minces (béton)	20 25 30	0,25 0,35 0,45	0,12 0,14 0,16	0,19 0,22 0,25
Blocs creux de terre cuite	20 25 30	0,4 0,5 0,6	0,11 0,13 0,15	0,17 0,20 0,23
Béton cellulaire 500 Kg/m^3 (λ = 0,18)	17 27 32	0,95 1,45 1,73	0,07 0,09 0,11	0,11 0,14 0,16

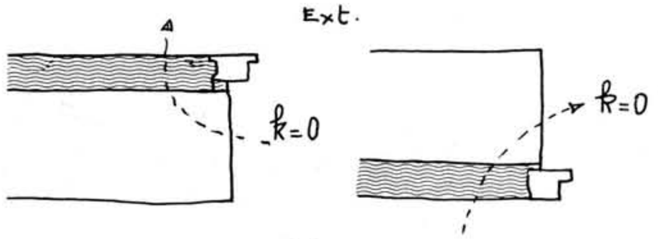


Fig. 7.8

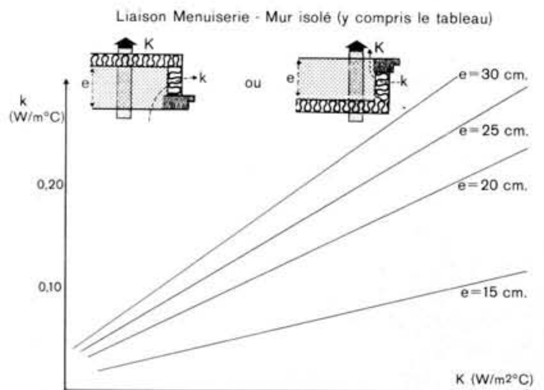


Fig. 7.9

7.4.1.2 *Mur isolé par l'intérieur ou par l'extérieur.*

- Si la menuiserie est du même côté que l'isolant k = 0 (Fig.7.8)
- Si la menuiserie n'est pas du même côté que l'isolant, le tableau peut — être isolé
  — ne pas être isolé.

Les courbes de la figure 7.9 donnent les valeurs de k lorsque le tableau est isolé.

Les courbes de la Fig. 7.10 donnent les valeurs de k lorsque le tableau de la menuiserie n'est pas isolé. e et R_m sont les épaisseurs et résistances thermiques de la partie porteuse du mur, K est le coefficient de transmission surfacique au droit de l'isolant.

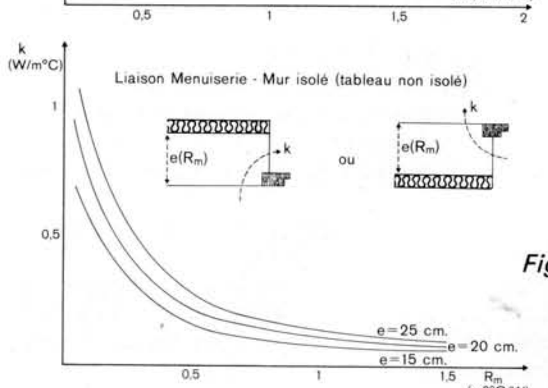


Fig. 7.10

Exemple : Mur en béton de 20 cm ($R_m = 0{,}15$) isolé par l'extérieur avec 40 mm de laine minérale :
$K = 0{,}75$ W/m².°C
si le tableau est isolé $k = 0{,}09$ W/m.°C
si le tableau n'est pas isolé $k = 0{,}62$ W/m.°C

N.B. Fermetures extérieures
Si la fenêtre est équipée de fermetures extérieures situées à 15 cm minimum du vitrage, le coefficient k' sera alors :

$$k' = 0{,}7 \times k$$

k étant calculé sur les abaques précédents

Fig. 7.11

7.4.1.3 *Cas des encadrements de baie métalliques.*

Si l'encadrement de baie ne recouvre que l'extérieur du mur (Fig. 7.11).

$$k' = k$$

calculé comme précédemment.

Si l'encadrement métallique recouvre toute l'épaisseur du mur on aura une bonne approximation en prenant

$$k' = k + 0{,}3 \quad \text{W/m.°C}$$

0,3 W/m.°C représentant l'augmentation de la déperdition linéique due à l'encadrement de baie apparent à l'intérieur.

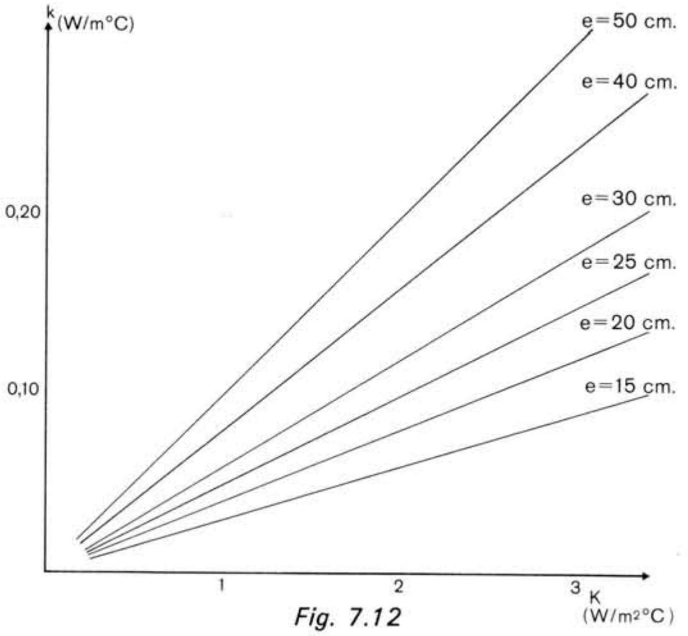


Fig. 7.12

Remarques importantes.
Des résultats trouvés ci-dessus, on peut tirer quelques enseignements pratiques :

- Il faut que l'isolation et la menuiserie soient du même côté.
- Si l'isolation est à l'opposé de la menuiserie, il faudra isoler les retours de tableau.
- Pour permettre l'isolation de la pièce d'appui, la meilleure solution thermique et technique semble être l'utilisation d'une pièce d'appui métallique, fixée, à l'extérieur, sur la menuiserie en bois.

7.4.2. **Angle de deux parois extérieures.**

Les deux parois extérieures peuvent être :

- deux parois verticales
- un plancher et une paroi verticale
- une toiture terrasse et une paroi verticale

Les parois peuvent être :

- à isolation répartie
- isolées par l'intérieur ou par l'extérieur.

7.4.2.1 *Parois à isolation répartie* .

- si les deux parois sont identiques (épaisseur e, coefficient K) le coefficient k linéique est donné par la formule :

$$k = 0{,}2 \times K \times e$$

La Fig. 7.12 donne les valeurs de k.

- si l'angle est formé par un poteau d'angle en béton, le coefficient k linéique est égal à :

$$k = 0{,}45 \times e$$

soit $e = 20$ cm $k = 0{,}09$ W/m.°C
soit $e = 30$ cm $k = 0{,}135$ W/m.°C

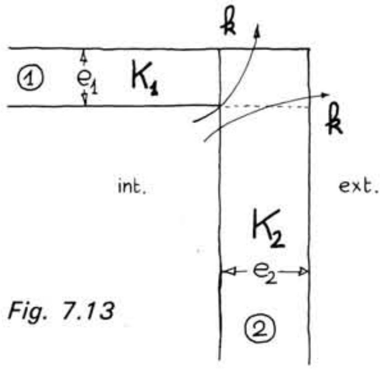


Fig. 7.13

- si les deux parois sont différentes (Fig. 7.13) et si l'une d'entre elles constitue l'angle, le coefficient k est donné par la formule :

$$k = \frac{0{,}2 \times e}{0{,}2 + \frac{e_1}{e_2} \times R_2} \quad \text{avec } e = \frac{e_1 + e_2}{2}$$

Le tableau de la fig. 7.14 donne les valeurs de :

$\frac{k}{e}$ en fonction de la résistance thermique R_2 de la paroi constituant l'angle et du rapport $\frac{e_1}{e_2}$

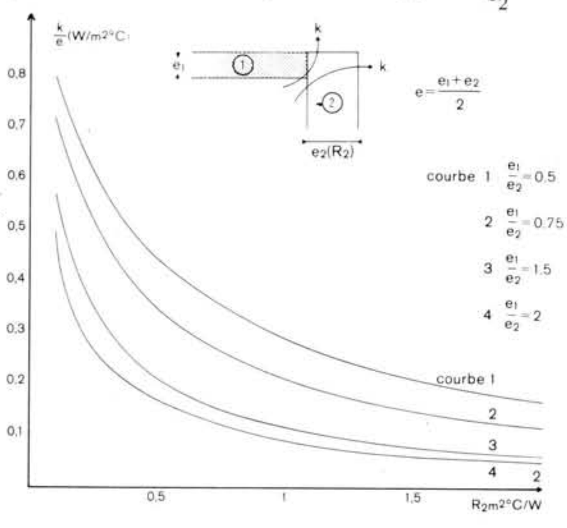


Fig. 7.14

Exemple : Le mur constituant l'angle est réalisé avec une brique de 27,5 cm enduite 2 faces donc $e_2 = 30$ cm. $R_2 = 0{,}56$ m².°C/W. La paroi 1 est un voile de béton armé de 15 cm $= e_1$

donc $e = \dfrac{e_1 + e_2}{2} = 22{,}5$ cm $\quad \dfrac{e_1}{e_2} = \dfrac{15}{30} = 0{,}5$

donc $\dfrac{k}{e} = 0{,}42$

soit $k = 0{,}42 \times 0{,}225 = 0{,}095$ W/m.°C

7.4.2.2 *Angle d'une paroi à isolation répartie et d'une paroi isolée*

● C'est le cas de l'angle saillant d'une paroi isolée par l'extérieur ou de l'angle rentrant d'une paroi isolée par l'intérieur avec une paroi à isolation répartie (Fig. 7.15). Le coefficient k est alors donné par la formule :

$$k = \frac{0{,}3 \, . \, e_1}{0{,}06 + R_1 + R'}$$

e_1 et R_1 sont les épaisseurs et résistance de la paroi 1 R' étant la résistance thermique de la partie porteuse constituant l'angle.

Les abaques de la Fig. 7.15 donnent les valeurs de $\dfrac{k}{e_1}$ en fonction des différentes valeurs de R'.

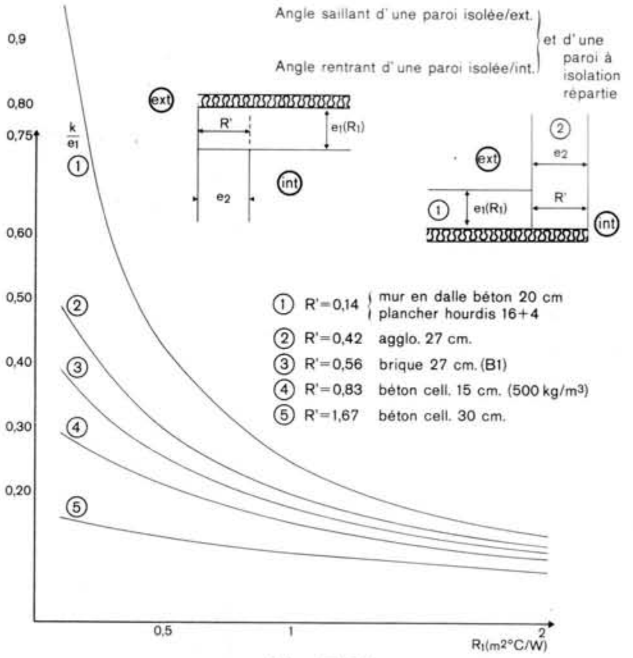


Fig. 7.15

Exemple 1. Cas d'un plancher hourdis béton 16 + 4 isolé par l'extérieur par 7 cm de polystyrène, reposant sur un mur de 20 cm.

$R' = 0{,}14 = R_1$ (courbe 1)

$\dfrac{k}{e_1} = 0{,}84$ d'où $k = 0{,}2 \times 0{,}84 = 0{,}168$ W/m.°C.

Exemple 2. Cas de l'angle rentrant d'une loggia constituée d'un mur en briques de 27 cm $= e_2$ et d'un mur en briques de 10 cm ($= e_1$) isolé thermiquement avec un doublage de 6 cm.

$R' = 0{,}56$ (courbe 3 de la Fig. 7.15)

$e_1 = 0{,}10 \quad R_1 = 0{,}20$

$\dfrac{k}{e_1} = 0{,}36$ donc $k = 0{,}1 \times 0{,}36 = 0{,}036$ W/m.°C

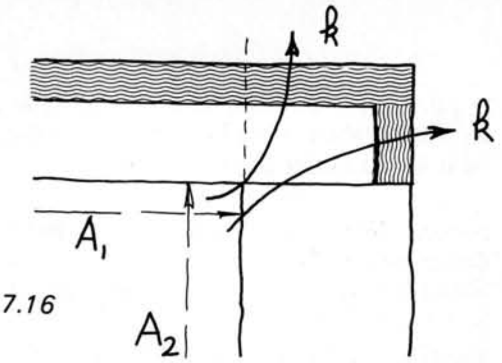


Fig.7.16

N.B.

● si les deux faces de l'angle sont isolées (Fig. 7.16), on est ramené du point de vue calcul et k linéique au cas où les deux parois sont isolées du même côté (voir Fig. 7.19).

● s'il s'agit d'un angle saillant avec 1 paroi isolée par l'intérieur ou d'un angle rentrant avec une paroi isolée par l'extérieur et l'autre paroi à isolation répartie, le coefficient k sera donné par la formule

$$k = 0{,}2 \times K \times e$$

e est l'épaisseur moyenne de la partie porteuse des parois $\dfrac{e_1 + e_2}{2}$. K est égal au coefficient K de la paroi constituant l'angle au niveau de l'angle soit

$K = K_2$ dans le cas de la Fig. 7.17.1

$K = \dfrac{1}{0{,}2 + R_1}$ dans le cas de la Fig. 7.17.2

Les abaques de la Fig. 7.12 donnent les valeurs de k.

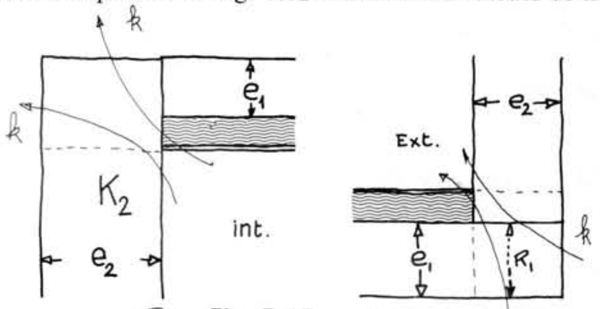


Fig. 7.17

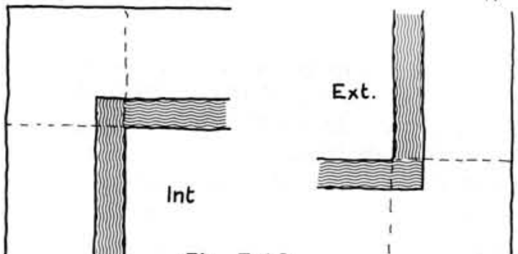


Fig. 7.18

7.4.2.3 *Deux parois isolées du même côté.*

● s'il s'agit d'un angle saillant isolé par l'intérieur ou d'un angle rentrant isolé par l'extérieur (Fig. 7.18)

$$k = 0$$

Cela s'explique très bien par le fait que dans le cas d'un angle saillant isolé par l'intérieur, toutes les surfaces d'échanges sont prises en compte dans le calcul des déperditions K.A. L'angle est à une température voisine de la température extérieure donc $\Delta t'$ tend vers 0 donc $K.A.\Delta t' = 0$ d'où $k = 0$

Dans le cas d'un angle rentrant isolé par l'extérieur, le poteau d'angle est à une température très voisine de la température intérieure mais sa surface d'échange est très faible : A tend vers 0 donc $K.A.\Delta t' = 0$ ou $k = 0$.

● s'il s'agit d'un angle rentrant isolé par l'intérieur ou d'un angle saillant isolé par l'extérieur, le coefficient k sera donné par la formule :

$$k = 0,6 \times K_2 \times e$$

e étant l'épaisseur moyenne de la partie porteuse des parois, et K_2 le coefficient K de la paroi constituant l'angle. Les courbes de la Fig. 7.19 donnent les valeurs de k.

Exemple : angle saillant, isolé par l'extérieur, par 6 cm de laine minérale, d'un mur pignon en béton de 20 cm constituant l'angle et de la façade (10 cm de béton).

$$\left.\begin{array}{l} e = \dfrac{e_1 + e_2}{2} = 0,15 \text{ m} \\ K_2 = 0,5 \text{ W/m}^2.°\text{C} \end{array}\right\} \text{d'où } k = 0,045 \text{ W/m.°C}$$

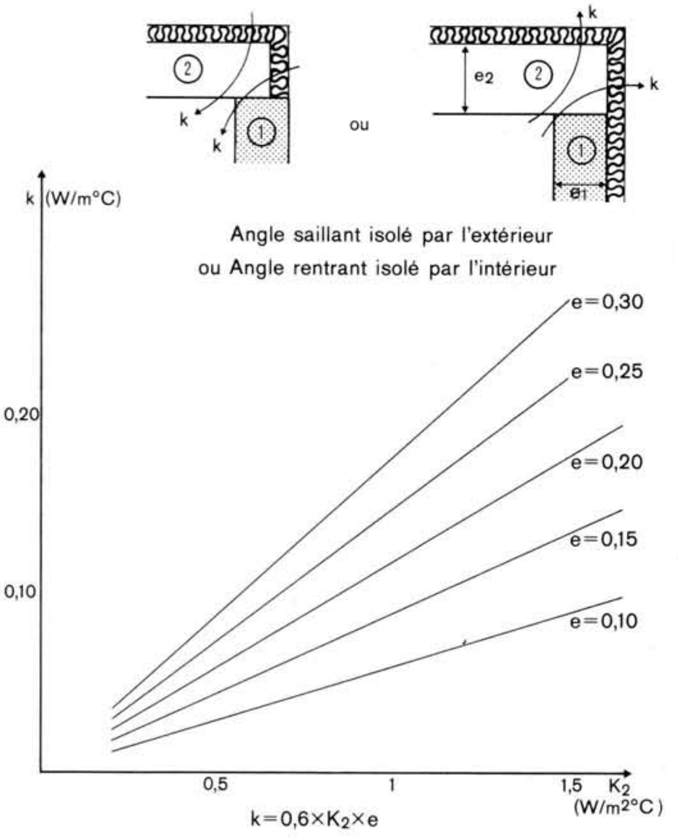


Fig. 7.19

7.4.3 **Les ponts thermiques**

On dit qu'il y a «pont thermique» lorsqu'il y a discontinuité de l'isolation. Il faut donc pour cela que les parois soient isolées. Les cas les plus fréquents sont :

— Les angles de parois lorsqu'une paroi est isolée par l'intérieur et l'autre par l'extérieur.

— Les abouts de plancher, murs de refend, ... lorsque l'isolation est intérieure ou extérieure mais interrompue au droit des refends des abouts.

— Les semelles de cloisons lorsque le plancher est isolé sous chape, pièce par pièce.

7.4.3.1 **Angle de deux parois extérieures dont l'une est isolée par l'intérieur et l'autre par l'extérieur.**

● *Cas où une des faces de l'angle est isolée* (fig. 7.20) le coefficient k est donné par la formule :

$$k = \frac{0,3 \cdot e_1}{0,06 + R_1 + R'_2}(1 + \alpha)$$

Cette formule se rapproche de celle déjà trouvée au paragraphe 7.4.2.2 (Fig. 7.15) — Cependant il y a un accroissement du coefficient k linéique du fait de la présence de matériaux isolants sur les deux parois et donc d'un phénomène de concentration de flux au niveau du pont thermique.

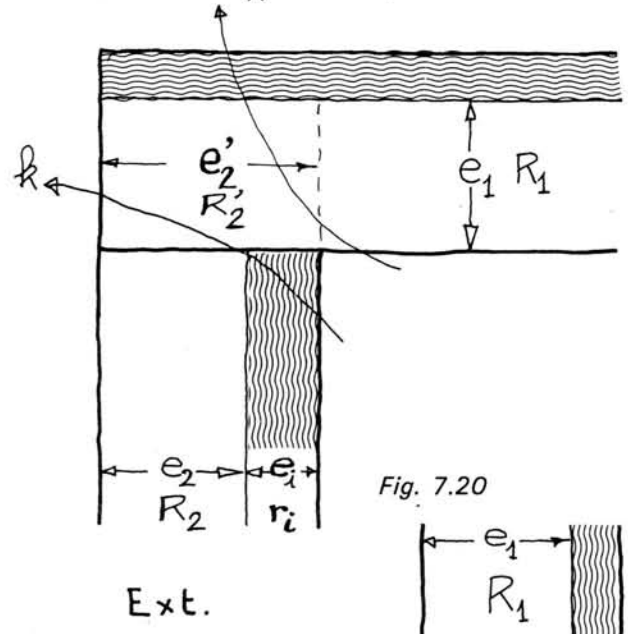


Fig. 7.20

R'_2 est donc fonction de la nature de la paroi 1 constituant l'angle et de l'épaisseur totale de la paroi 2

$$R'_2 = \frac{e'_2}{\lambda_1}$$

On rencontre fréquemment pour R'_2 les valeurs suivantes

$R'_2 = 0,15$ → 20 cm Béton
0,25 → 35 cm Béton
0,4 → 33 cm Bloc de béton creux
0,5 → 33 cm de Brique

R_1 dépend de la nature de la paroi 1.

On a fréquemment $R_1 = 0,15$ 20 cm Béton, plancher 16 + 4 béton,
$R_1 = 0,30$ pour Bloc creux de béton 22 cm
$R_1 = 0,45$ pour Brique 22 cm.

	Résistance thermique de l'isolation extérieure (r_e) ou de l'isolation intérieure (r_i) ($m^2.°C/W$)										
Coefficient K de la paroi extérieure, K_e ($W/m^2.°C$)	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2.5	2,75	3,0
1,5	0,31	0,60	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,3	0,15	0,60	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,2	0,07	0,60	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,0	0	0,32	0,60	—	—	—	—	—	—	—	—
0,9	0	0,19	0,60	—	—	—	—	—	—	—	—
0,8	0	0,07	0,41	0,60	—	—	—	—	—	—	—
0,7	0	0	0,23	0,56	0,60	—	—	—	—	—	—
0,6	0	0	0,07	0,32	0,60	0,60	—	—	—	—	—
0,5	0	0	0	0,11	0,32	0,56	0,60	—	—	—	—
0,45	0	0	0	0,02	0,19	0,38	0,60	—	—	—	—
0,4	0	0	0	0	0,07	0,23	0,41	0,60	0,60	—	—
0,35	0	0	0	0	0	0,09	0,23	0,38	0,56	0,60	—
0,3	0	0	0	0	0	0	0,07	0,29	0,32	0,46	0,60

NOTA : Pour les valeurs de K_e et de r_i (ou de r_e) intermédiaires on interpolera linéairement.

Tableau 7.21

Les valeurs de α dépendent :
— du coefficient K_2 de la paroi 2
— de la résistance r_i de l'isolant de cette paroi.
(Voir le tableau ci-dessus).

si $R_2 \geqslant 0{,}80$ $m^2.°C/W$, $\alpha = 0$. Dans ce cas on se reporte aux abaques de la figure 7, 15.

Nous pouvons donc tracer l'abaque donnant la valeur de $\frac{k}{e_1}$ en fonction de $R = R_1 + R'_2$ et des valeurs les plus courantes de α (Fig. 7.22).

Exemple : La paroi 1 est composée de 20 cm de béton isolé par l'extérieur.

$$(R_1 = \frac{0{,}20}{1{,}4} = 0{,}143)$$

La paroi 2 est composée d'une brique de 22,5 cm enduite, d'un panneau de laine de verre de 6 cm, d'une contre-cloison en brique de 5 cm enduite : K = 0,5 $W/m^2.°C$. L'épaisseur totale de ce mur isolé enduit est donc de 36 cm. On aura donc

$$R'_2 = \frac{0{,}36}{1{,}4} = 0{,}257$$

$$R_1 + R'_2 = 0{,}143 + 0{,}257 = 0{,}40.$$

La résistance thermique r_i de l'isolant de la paroi 2 est

$$r_i = \frac{e_i}{\lambda_i} = \frac{0{,}060}{0{,}041} = 1{,}47$$

pour $K_2 = 0{,}5$ et $r_i = 1{,}5$ on lit $\alpha = 0{,}32$
$r_i = 1{,}25$ on lit $\alpha = 0{,}11$
donc pour $K_2 = 0{,}5$ et $r_i = 1{,}47 \longrightarrow \alpha = 0{,}30$

Sur les abaques pour R = 0,4 et α = 0,30 nous lisons

$$\frac{k}{e_1} = 0{,}85 \text{ soit } k = 0{,}2 \times 0{,}85$$

$$k = 0{,}17 \text{ W/m.°C}$$

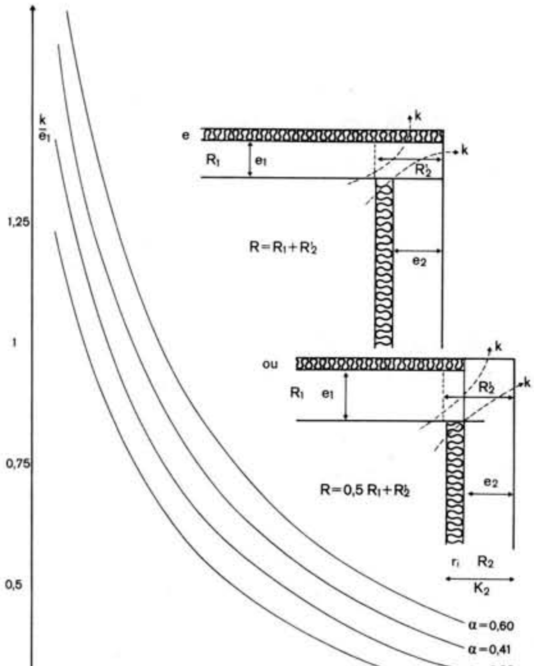


Fig. 7.22

● *Cas où aucune des faces de l'angle n'est isolé* (Fig. 7.23).

Le coefficient k est alors donné par la formule :

$$k = \frac{0{,}3\ e_1}{0{,}06 + 0{,}5R_1 + R'_2}(1 + \alpha)$$

Le coefficient α est défini par le tableau 7.21.

R'_2 est fonction de la nature des matériaux constituant l'angle (Parois 1 et 2) et de l'épaisseur de la paroi 2.

Le cas de l'angle saillant est le plus fréquemment rencontré dans le bâtiment ; en effet, il peut s'agir de :

● l'angle d'une toiture-terrasse ou d'un plafond de comble perdu isolé et d'un mur isolé par l'intérieur.

● l'angle d'un plancher isolé en sous face et d'un mur isolé par l'intérieur.

Il est, cependant, parfois très difficile de dire qu'elle est celle des deux parois qui forme l'angle. En fait :

— si une des faces de l'angle est isolée, on prendra la formule précédente sinon on prendra la formule ci-dessus.

— il faut ensuite tenir compte de tous les éléments présents dans l'épaisseur R'_2 car ce sont les matériaux constituant l'angle qui sont importants. En effet, on n'en a pas tenu compte au niveau des déperditions $K.A_i$!

Nous calculerons le rapport $\frac{k}{e_1}$ en utilisant l'abaque 7.22 et en prenant :

$R = 0{,}5\ R_1 + R'_2$.

Exemple : il s'agit de calculer le coefficient k linéique (dessin) d'une liaison Toiture-Terrasse — Mur. La Toiture-Terrasse (paroi 1) est constituée d'une dalle de béton de 20 cm ($\lambda = 1{,}4$, $R_1 = 0{,}14$), de 40 mm de mousse de polystyrène thermocomprimée supportant une étanchéité et une protection lourde. La périphérie de la dalle de béton est traitée avec une brique de 5 cm. Le mur (paroi 2) est constitué d'un mur en briques de 22,5 cm enduit, d'un panneau de laine minérale de 75 mm et d'une contre-cloison en brique de 5 cm enduite. L'épaisseur e'_2 de ce mur est donc de 38 cm.

La résistance r_i de l'isolant est égale à : $\frac{0{,}075}{0{,}041} = 1{,}83$

et le coefficient K_2 de cette paroi est égal à :

$K_2 = 0{,}46\ W/m^2.{}^{\circ}C$

R'_2 est égal à :

$R_{\text{brique de 5}} + R_{\text{enduit 2 cm}} + R_{\text{béton 31 cm}}$

$= 0{,}09 + 0{,}02 + \frac{0{,}31}{1{,}4} = 0{,}33 = R'_2$

Déterminons α par extrapolation sur le tableau 7.21 :

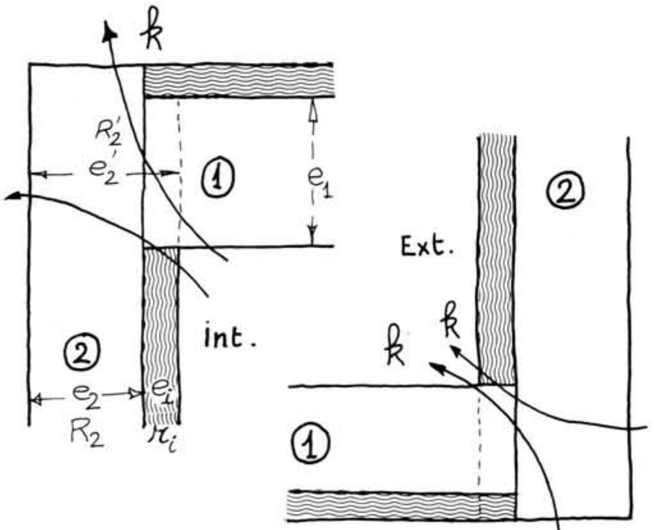
	r_i	⟶	$r_i = 1{,}83$	
	1,75	2	↓	
K_2 0,50	0,56	0,60	0,57	
			$\alpha = 0{,}47$	←$K_2 = 0{,}46$
0,45	0,38	0,60	0,45	

donc $\alpha = 0{,}47$

$R = 0{,}5R_1 + R'_2 = 0{,}5 \times 0{,}14 + 0{,}33$ soit $R = 0{,}40$

Nous lisons sur l'abaque 7.22 $\frac{k}{e_1} = 0{,}98$

soit $k = 0{,}98 \times 0{,}2 \longrightarrow k = 0{,}196\ W/m.{}^{\circ}C$



● Sans brique de 5 cm en about de dalle, R'_2 aurait été égal à :

$R'_2 = 0{,}02 + \frac{0{,}36}{1{,}4} = 0{,}26$

$R = R'_2 + 0{,}5\ R_1 = 0{,}26 + 0{,}07 = 0{,}33$

$\alpha = 0{,}47$

On lit sur l'abaque 7.22 $\frac{k}{e_1} = 1{,}16$

soit $k = 0{,}2 \times 1{,}16$

$\longrightarrow k = 0{,}232\ W/m.{}^{\circ}C$

7.4.3.2 *Angle d'une paroi intérieure et d'une paroi extérieure isolée avec interruption de l'isolation au droit de la paroi intérieure.*

La paroi extérieure peut être :

— un mur

— un plancher

— un plafond ou toit-terrasse

La paroi intérieure peut être :

— un plancher

— une cloison

— un mur de refend.

L'isolation peut être intérieure ou extérieure (Fig. 7.24). D'une manière générale, le coefficient k linéique de la liaison paroi intérieure — paroi extérieure sera donné par la formule :

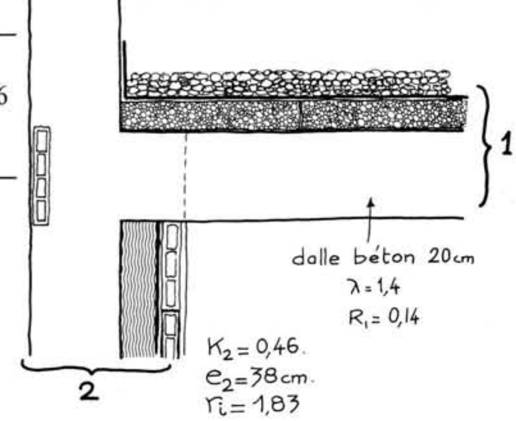
$$k = 0{,}4 \times K_i \times e_i\,(1 + \alpha)$$

e_i est l'épaisseur de la paroi intérieure

K_i est le coefficient K au droit de la liaison

α est déterminé sur le tableau 7.21 en fonction de la résistance r_i de l'isolant et du coefficient K de la paroi extérieure.

Dessin de l'exemple de liaison toiture - terrasse - mur



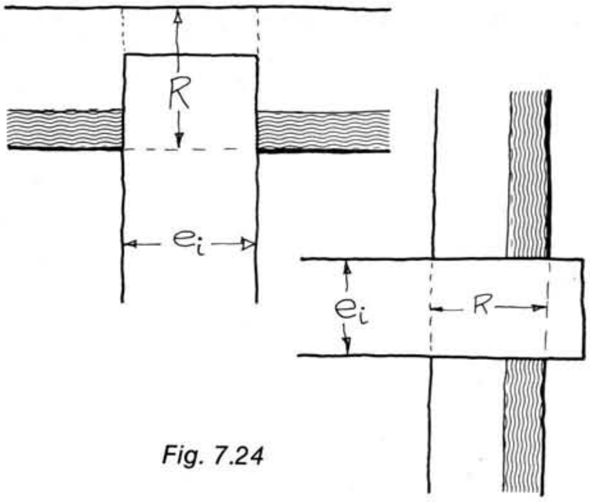


Fig. 7.24

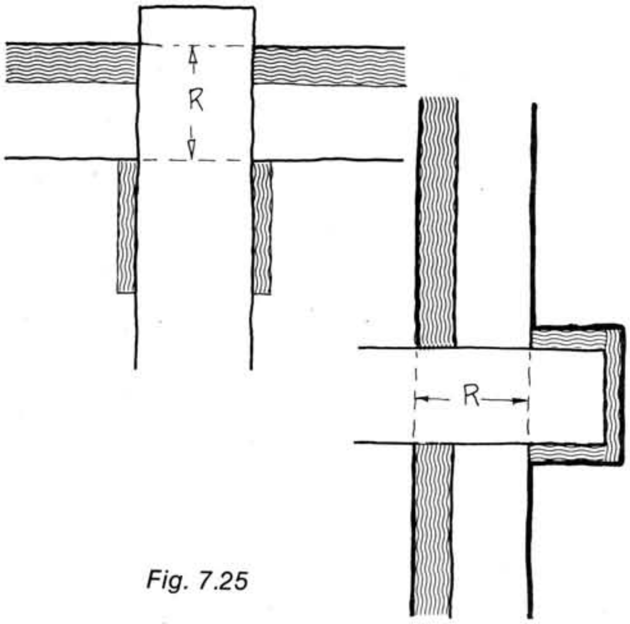


Fig. 7.25

Le coefficient K_i est égal à : $K_i = \dfrac{1}{R + r_s}$

R est la résistance thermique au droit de la liaison
r_s est une résistance thermique additionnelle égale à 0,15 m².°C/W :

— si l'extrémité de la paroi intérieure n'est pas isolée (absence d'un matériau ayant $\lambda < 0{,}12$ et $R > 0{,}5$).

— si une des faces de la paroi intérieure est isolée (c'est le cas, par exemple, d'un plancher intermédiaire isolé sous chape flottante ou le cas d'un refend séparatif de logement doublé d'un complexe laine de verre + plaque de plâtre ou cloison de doublage.

Remarques importantes
Dans le cas d'une isolation intérieure, le fait d'isoler l'extrémité saillante (Fig. 7.25) ou dans le cas d'une isolation extérieure, le fait d'isoler les deux faces de la paroi interne, ne modifient en rien le résultat. Ce sont des traitements inutiles !

Cela s'explique très bien, tout comme le choix de K_i et donc de R — que l'isolation soit intérieure ou extérieure, seule la surface de déperdition compte et elle correspond dans les deux cas ci-dessus à la surface d'interruption de l'isolation.

Par contre, si l'isolation est intérieure et si les deux faces de la paroi intérieure sont isolées ou si l'isolation est extérieure et si les deux faces extérieures de la saillie de la paroi intérieure sont isolées (Fig. 7.26) la valeur de r_s va dépendre de la longueur l de l'isolation et de la résistance thermique r'_i de l'isolant posé sur les deux faces : le tableau suivant donne les valeurs de r_s en fonction de l et de r'_i.
(Tableau D.T.U.)

Résistance thermique de l'isolation intérieure r'_i ou extérieure r'_i (m².°C/W)	Longueur de l'isolation l (m) 0,2	0,3	0.4	0,5	0,6
0,45	0,24	0,25	0,25	0,25	0,26
0,75	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27
1,0	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27
1,25	0,27	0,27	0,28	0,29	0,29
1,5	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31
1,75	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32
2,0	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33
2,5	0,30	0,32	0,33	0,35	0,36
3,0	0,32	0,34	0,36	0,37	0,38

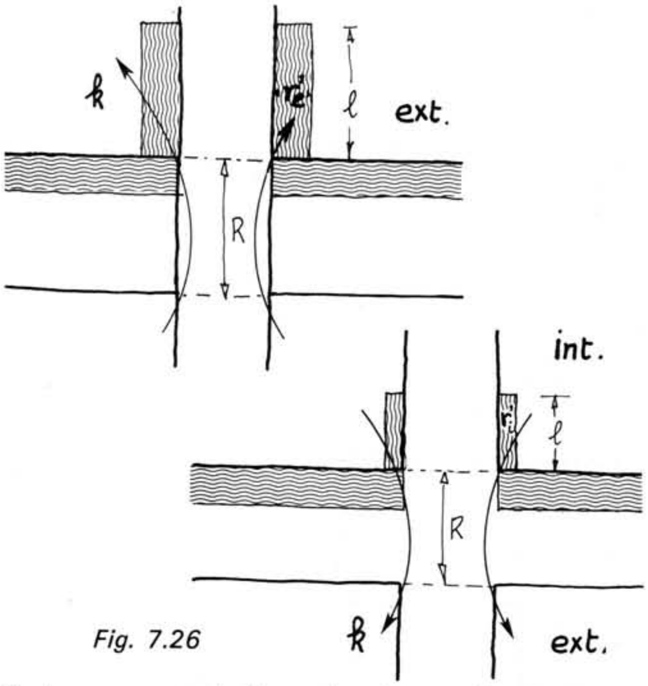


Fig. 7.26

On trouve ce cas de figure dans les combles perdus lorsque l'isolant est remonté le long des refends porteurs.

Nous allons donc tracer un faisceau de courbes

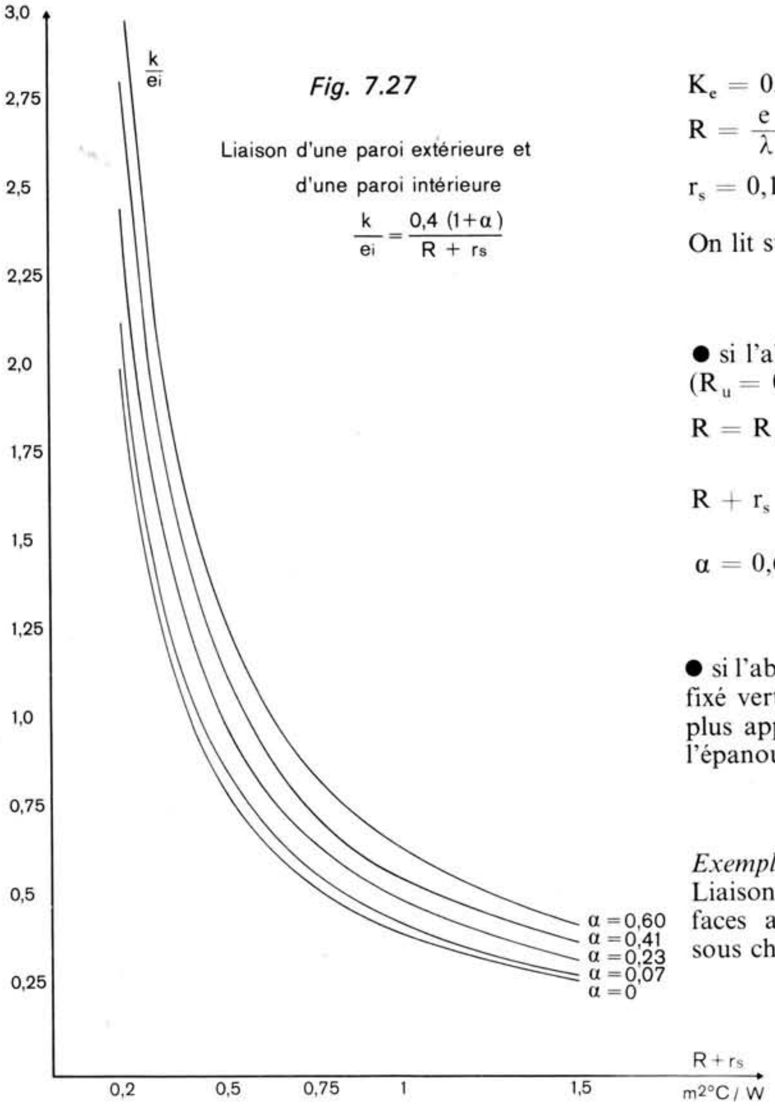


Fig. 7.27

Liaison d'une paroi extérieure et d'une paroi intérieure

$\frac{k}{ei} = \frac{0,4\ (1+\alpha)}{R + rs}$

(Fig. 7.27) qui donnera le rapport $\frac{k}{e_i}$ en fonction :

- du coefficient α
- de la somme des résistances $R + r_s$.

On peut écrire

$$\frac{k}{e_i} = \frac{0,4}{R + r_s}(1 + \alpha)\ .$$

Nous étudierons 5 valeurs de α :
$\alpha = 0 \quad \alpha = 0,07 \quad \alpha = 0,23 \quad \alpha = 0,41$ et $\alpha = 0,60$

Comme nous l'avons écrit plus haut, $r_s = 0,15$ très fréquemment. Il est donc aisé de connaître la valeur $R + r_s$, d'autant plus que la liaison paroi intérieure — paroi extérieure est souvent en béton.

Exemple N°1
Calcul du coefficient k linéique d'un about de plancher intermédiaire (Fig. 7.28)

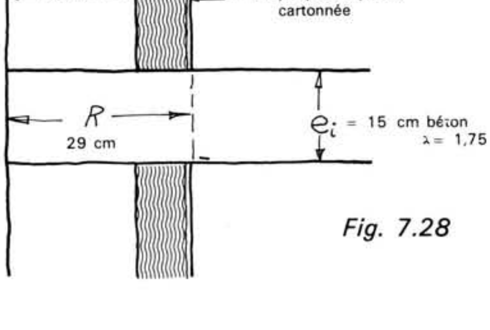


Fig. 7.28

$K_e = 0,45\ W/m^2.°C$, $r_i = 2\ m^2.°C/W$ donc $\alpha = 0,6$

$$\left.\begin{array}{l} R = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,29}{1,75} = 0,17 \\ r_s = 0,15 \end{array}\right\} R + r_s = 0,32$$

On lit sur l'abaque $\frac{k}{e_i} = 2 \qquad e_i = 0,15$ m

donc $k = 0,30\ W/m.°C$

- si l'about avait été traité avec une brique de 5 cm ($R_u = 0,09\ m^2.°C/W$), nous aurions

$$R = R_u + \frac{e}{\lambda} = 0,09 + \frac{0,24}{1,75} = 0,23$$

$$\left.\begin{array}{l} R + r_s = 0,38 \\ \alpha = 0,6 \end{array}\right\} \text{donc } \frac{k}{e_i} = 1,65$$

soit $k = 0,25\ W/m°.C$

- si l'about avait été traité avec 20 mm de polystyrène fixé verticalement dans le béton, nous pourrions plus appliquer la formule ; on estime, en raison de l'épanouissement du flux que :

$$k = 0,25\ W/m.°C$$

Exemple N°2
Liaison d'une cloison en brique de 5 cm enduite 2 faces avec un plancher sur passage ouvert isolé sous chape. (Fig.7.29).

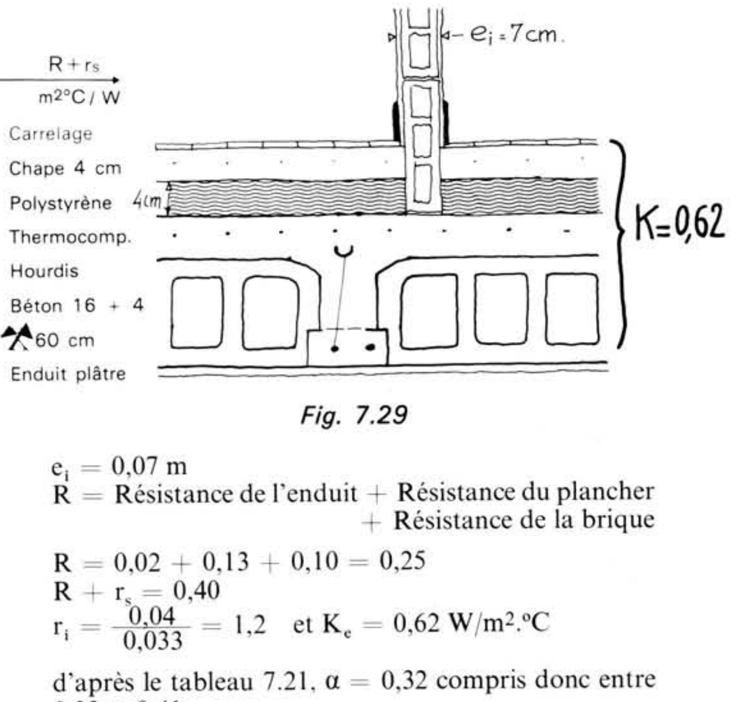


Fig. 7.29

$e_i = 0,07$ m
R = Résistance de l'enduit + Résistance du plancher + Résistance de la brique

$R = 0,02 + 0,13 + 0,10 = 0,25$
$R + r_s = 0,40$
$r_i = \frac{0,04}{0,033} = 1,2$ et $K_e = 0,62\ W/m^2.°C$

d'après le tableau 7.21, $\alpha = 0,32$ compris donc entre 0,23 et 0,41.

D'après l'abaque 7.27 : $\frac{k}{e_i} = 1,325$

donc $k = 0,07 \times 1,325$

$\longrightarrow k = 0,093\ W/m.°C$

Il est intéressant de retenir ce chiffre pour faire un calcul rapide du K_g d'un plancher : la liaison d'une cloison sur un plancher (vide sanitaire ventilé, passage ouvert) entraîne une fuite de chaleur de l'ordre de 0,2 W/m°.C par mètre linéaire de cloison (0,2 = 2 k). Ajoutée aux fuites par les refends porteurs et par la liaison périphérique (chaînage), cette fuite peut modifier le coefficient K d'une manière importante.

- supposons maintenant que nous mettions sous la cloison une semelle de fibres de bois asphalté ($\lambda = 0{,}065$) de 8 mm. La résistance thermique de la

semelle est $r = \frac{0{,}008}{0{,}065} = 0{,}12$

soit $R = 0{,}37$ $R + r_s = 0{,}52$
$\alpha = 0{,}32$ on lit

$\frac{k}{e_i} = 1{,}04$

$\rightarrow k = 0{,}07$ W/m.°C

- Supposons que nous ayons un plancher isolant à entrevous en polystyrène expansé de 16 + 5 sur poutrelle à talon bois (procédé KLS) entraxe 69 cm. (Fig. 7.30)

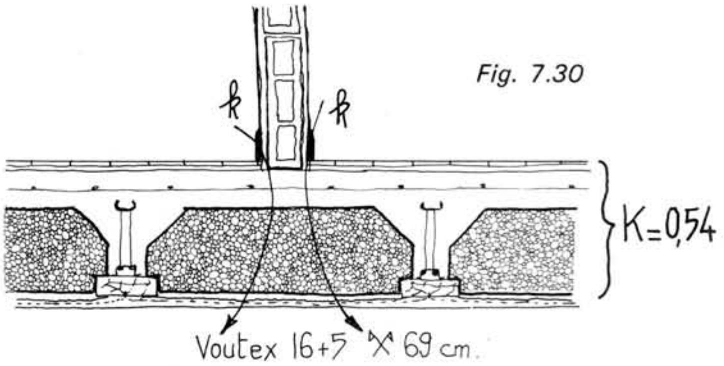


Fig. 7.30

La résistance thermique moyenne utile d'un tel plancher est $R_u = 1{,}65$ m².°C/W (Cf. Avis Technique CSTB N° 3/74.17) et donc le coefficient $K_e = 0{,}54$ W/m².°C sur passage ouvert.

Sur un tel plancher, il est évident que les cloisons peuvent être localement au droit des poutrelles mais comme la résistance thermique R_u est une résistance moyenne, on peut négliger ce fait. On va supposer que la résistance moyenne de l'isolant est $r_i = 1{,}5$ m².°C/W avec $K_e = 0{,}54$, on lit sur le tableau 7,21

$$\alpha = 0{,}43.$$

Nous avons $R_u + r_s = 1{,}65 + 0{,}15 = 1{,}80$.

Donc $\frac{k}{e_i} = 0{,}3$ soit $k = 0{,}3 \times 0{,}07$

$\rightarrow k = 0{,}02$ W/m.°C

Un tel procédé permet donc de réduire considérablement les fuites au niveau des liaisons cloison-plancher (0,04 W/m.°C au lieu de 0,20 W/m.°C). Par ailleurs, ce type de procédé permet de réduire de plus de 50 % les fuites au niveau du chaînage.

7.4.4 Liaison d'une paroi intérieure et d'une paroi extérieure isolée d'une manière continue.

L'isolation de la paroi extérieure est continue essentiellement lorsque la paroi est isolée par l'extérieur. On pourrait rapprocher de ce cas les parois extérieures à isolation répartie.

7.4.4.1. *Liaison d'une paroi intérieure et d'une paroi extérieure isolée d'une manière continue.*

1. *Cas où la paroi intérieure ne fait pas saillie à l'extérieur* (Fig. 7.31).

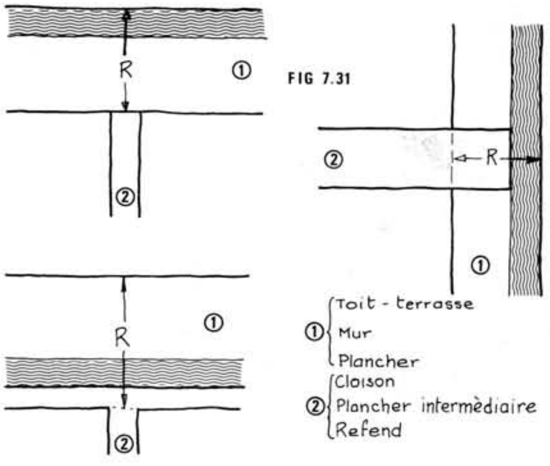


Fig. 7.31

C'est un cas très fréquent :

— liaison de cloison ou refend avec un plafond sous comble perdu fortement isolé et ventilé ou avec un toit-terrasse isolé.

— liaison de cloison avec une dalle de plancher isolé en fond de coffrage.

— liaison d'un plancher ou refend avec un mur isolé par l'extérieur.

La formule reste la même que celle donnée au paragraphe 7.4.3.2. lorsque l'isolation était discontinue :

$$\frac{k}{e_i} = \frac{0{,}4}{R + 0{,}15}(1 + \alpha)$$

Les valeurs du rapport $\frac{k}{e_i}$ sont donc données par l'abaque 7.27.

Remarque importante :

Ce qui va changer par rapport aux résultats trouvés dans le cas d'interruption de l'isolation, c'est la valeur de R.

La formule peut s'écrire :

$$k = 0{,}4\,(1 + \alpha) \times \frac{1}{0{,}15 + R} \times e_i$$

Compte tenu de la valeur de R, les valeurs de k seront faibles ($0{,}01 \leqslant k \leqslant 0{,}10$) surtout lorsque la résistance thermique r_i de l'isolant est supérieure à 1 m².°C/W (soit plus de 40 mm pour les isolants courants). C'est le cas évidemment pour les combles perdus, très souvent le cas en vertical ou en isolation en fond de coffrage.

D'autre part $0{,}4\,(1 + \alpha)$ est très voisin de 0,5 donc :

$\frac{0{,}4\,(1 + \alpha)}{0{,}15 + R}$ est très voisin de $\frac{K_i}{2}$ (W/m².°C) (Fig. 7.31) surtout lorsque la paroi 1 est continue au droit de la paroi intérieure ou que la résistance thermique de l'isolant est élevée, ce qui minimise l'écart entre la résistance thermique de l'about de la paroi intérieure 2 et celle de l'élément porteur de la paroi 1.

Dans ces cas de figure, on pourra prendre comme déperditions sur une longueur L de liaison :

$$d_e = 2.k.L = 2 \times \frac{K_i}{2} \times e_i \times L = K_i.e_i \times L$$

C'est-à-dire qu'il suffira d'ajouter aux surfaces d'échanges A_i, les surfaces des liaisons et donc on n'aura plus ainsi à calculer les coefficients k correspondants.

C'est une simplification très intéressante. Cela permet d'alléger considérablement les calculs.

On peut également appliquer cette méthode aux planchers isolants à entrevous en polystyrène.

Exemple :

Prenons un pavillon rectangulaire de 8 × 12 m (intérieur) avec un refend central, isolé verticalement par l'intérieur (k = 0 aux 4 angles verticaux), les menuiseries étant posées au nu intérieur (k = 0 pour la liaison Baie - Mur) — Au niveau des parois verticales, il faudra calculer uniquement les coefficients k linéiques des liaisons Mur-Refend
Mur-Plafond
Mur-Plancher

Bien qu'il existe encore des solutions pour ramener à k = 0 la liaison Mur - Plafond et parfois la liaison Mur-Plancher.

2. *Cas où la paroi intérieure fait saillie à l'extérieur.*

C'est le cas fréquent des abouts de plancher, des refends. (Fig. 7.32).

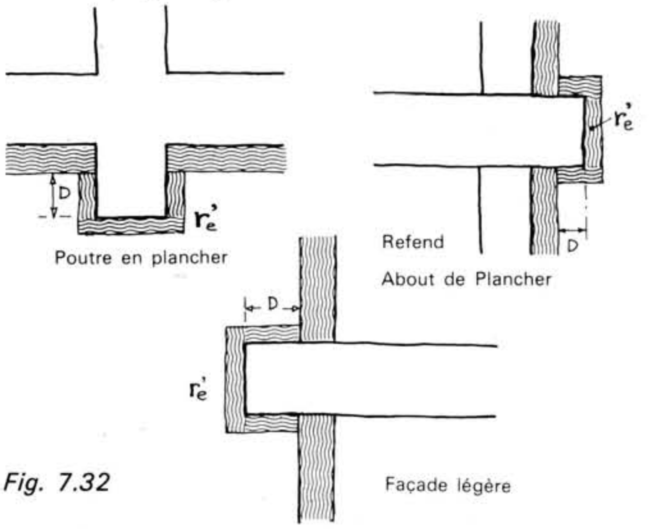


Fig. 7.32

La formule permettant de calculer le coefficient k linéique de la liaison reste la même. On lira donc le rapport $\frac{k}{e_i}$ sur l'abaque 7.27.

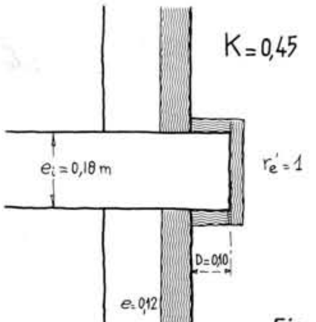


Fig. 7.34

Cependant la valeur de r_s va varier et dépendre :
— de la longueur D de la saillie
— de la résistance thermique r'_e de l'isolant revêtant les trois faces de la saillie.

Le tableau 7.33 ci-dessous donne les valeurs de r_s en fonction de ces deux variables :

		Longueur de la saillie D (m)				
		0,05	**0,10**	**0,15**	**0,20**	**0,25**
Résistance thermique de l'isolation extérieure r'_e (m².°C/W).	0,5	0,44	0,37	0,33	0,30	0,28
	0,75	0,57	0,47	0,40	0,36	0,33
	1,0	0,71	0,57	0,48	0,43	0,39
	1,25	0,84	0,67	0,56	0,49	0,44
	1,5	0,98	0,77	0,64	0,56	0,50
	1,75	1,11	0,87	0,71	0,62	0,55
	2,0	1,25	0,97	0,79	0,69	0,61
	2,5	1,52	1,17	0,94	0,82	0,72
	3,0	1,79	1,37	1,10	0,95	0,83

Exemple : Fig. 7.34

Pour une saillie D = 10 cm et une résistance thermique de l'isolant la revêtant sur les trois faces r'_e = 1 m².°C/W.

$$\left.\begin{array}{l} r_s = 0{,}57 \text{ m}^2.°\text{C/W} \\ R = \frac{0{,}20}{1{,}75} = 0{,}11 \text{ m}^2.°\text{C/W} \end{array}\right\} R + r_s = 0{,}68 \text{ m}^2.°\text{C/W}$$

$r_i = 2$ et $K = 0{,}45$ W/m².°C donc $\alpha = 0{,}60$ (Tableau 7.21)

Sur l'abaque 7.27 on lit $\frac{k}{e_i} = 0{,}94$

soit $k = 0{,}94 \times 0{,}18$

$$\rightarrow k = 0{,}17 \text{ W/m.°C}$$

Si l'about n'avait pas été isolé $R + r_s = 0{,}11 + 0{,}15$
Pour $R + r_s = 0{,}26$ et $\alpha = 0{,}6$, on lit sur l'abaque 7.27 $\frac{k}{e_i} = 2{,}55$ soit $k = 2{,}55 \times 0{,}18$

$$k = 0{,}46 \text{ W/m.°C}$$

N.B.

Lorsque la longueur de la saillie augmente, la valeur de r_s diminue à isolation constante, c'est-à-dire qu'il y a augmentation du coefficient K_i, autrement dit augmentation du coefficient k linéique. Cela s'explique simplement par le fait qu'il y a alors augmentation de la surface d'échange.

Cette constatation est très importante et entraînera peut-être des modifications des techniques de construction (dans le cas des façades légères) ou de l'architecture. En effet s'il n'y avait pas de saillie et si l'isolant était continu nous aurions un coefficient k linéique égal à 0,04 W/m.°C.

Par contre, si nous avions un collectif constitué sur sa façade de loggia de 5 × 2,5 et de 1,2 m de profondeur. (Fig. 7.35) :

— si les refends ne sont pas isolés côté loggia

$$k = 0{,}46 \text{ W/m.°C}$$

— si les refends sont isolés sur 1,2 m de large des 2 côtés avec 40 mm de polystyrène derrière un lambris

$$\left.\begin{matrix} r_i = 1{,}25 \\ l = 1{,}2 \end{matrix}\right\} \quad \begin{matrix} r_s = 0{,}30 \\ \text{(Tableau 7,33)} \end{matrix} \qquad R + r_s = 0{,}41$$

Pour $\alpha = 0{,}6$ $\quad \dfrac{k}{e_i} = 1{,}54$ soit $k = 0{,}28$ W/m.°C

On a réduit les déperditions au niveau de la liaison de 40% mais on a posé 6 m² d'isolant en 40 mm et 6 m² de revêtement. D'autre part le problème de la liaison balcon - mur reste entier !...

Dans de tels cas, il faut se demander si une autre technique ne permettrait pas d'éviter ces déperditions ?...

7.4.5 Cas des liaisons métalliques entre deux parois extérieures (Fig. 7.36).

Le coefficient k est donné par la formule :

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_i\, l_i} + \frac{L}{\eta \lambda_m} + \frac{1}{h_e\, l_e},$$

l_i et l_e sont les longueurs développées intérieures et extérieures des ossatures.

$$L = e + \frac{l_i + l_e}{8}$$

λ_m = Coefficient de conductivité du métal de l'ossature

$\eta = \varepsilon$ épaisseur de l'ossature en I ou en T
$= 2\varepsilon$ pour un tube.

Cette formule ne s'applique pas aux panneaux à parements conducteurs (= métalliques) ni aux ossatures partiellement isolées.

Exemple :

Cas des panneaux sandwiches 2 faces glasal + Mousse PVC de 50 mm d'épaisseur, de 1,20 m de large et ayant un coefficient K = 0,75 W/m².°C et reliés par un profilé aluminium (schéma 7.36.1) tous les 1,23 m à l'axe.

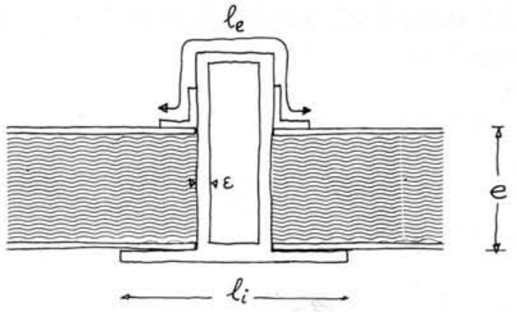
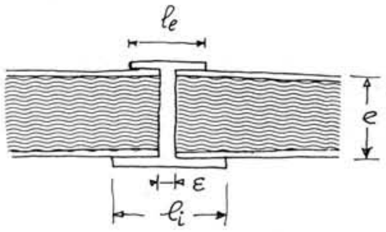


Fig. 7.36



$\varepsilon = 3$ mm $\qquad$ donc $\eta = 2\varepsilon = 6 \times 10^{-3}$m

$l_i = 9$ cm $l_e = 16$ cm donc $L = 5 + \dfrac{9+16}{8} = 8{,}1$ cm

$e = 50$ mm $\quad \lambda_m = 230$ W/m.°C

donc

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_i} \times \frac{1}{l_i} + \frac{1}{h_e} \times \frac{1}{l_e} + \frac{L}{2\varepsilon\lambda_m}$$

$$= 0{,}11 \times \frac{1}{0{,}09} + 0{,}06 \times \frac{1}{0{,}16} + \frac{0{,}081}{0{,}006 \times 230}$$

$$= 1{,}22 + 0{,}375 + 0{,}059 = 1{,}65$$

$$\text{soit } k = 0{,}6 \text{ W/m.°C}$$

Il y a un mètre de liaison pour 1,2 m² de panneaux. Le coefficient K_g (sans tenir compte des autres liaisons éventuelles : abouts de plancher, refend...) d'une telle façade serait

$$K_g = \frac{KA + kL}{A} = \frac{0{,}75 \times 1{,}20 + 0{,}6 \times 1}{1{,}23}$$

$$K_g = 1{,}22 \text{ W/m}^2\text{.°C}$$

Le fait que l'ossature soit en acier ($\lambda = 52$) ou en duralumin ($\lambda = 160$) aurait changé peu de chose car ce sont les surfaces d'échange l_i et l_e qui sont prédominantes.

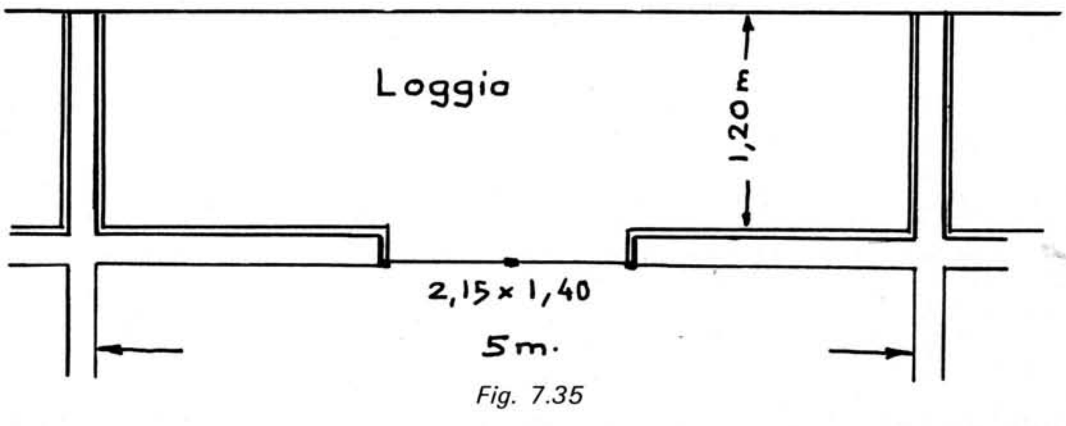


Fig. 7.35

7.5 PANNEAU SANDWICH BÉTON + ISOLANT LÉGER.

(Fig. 7.37).

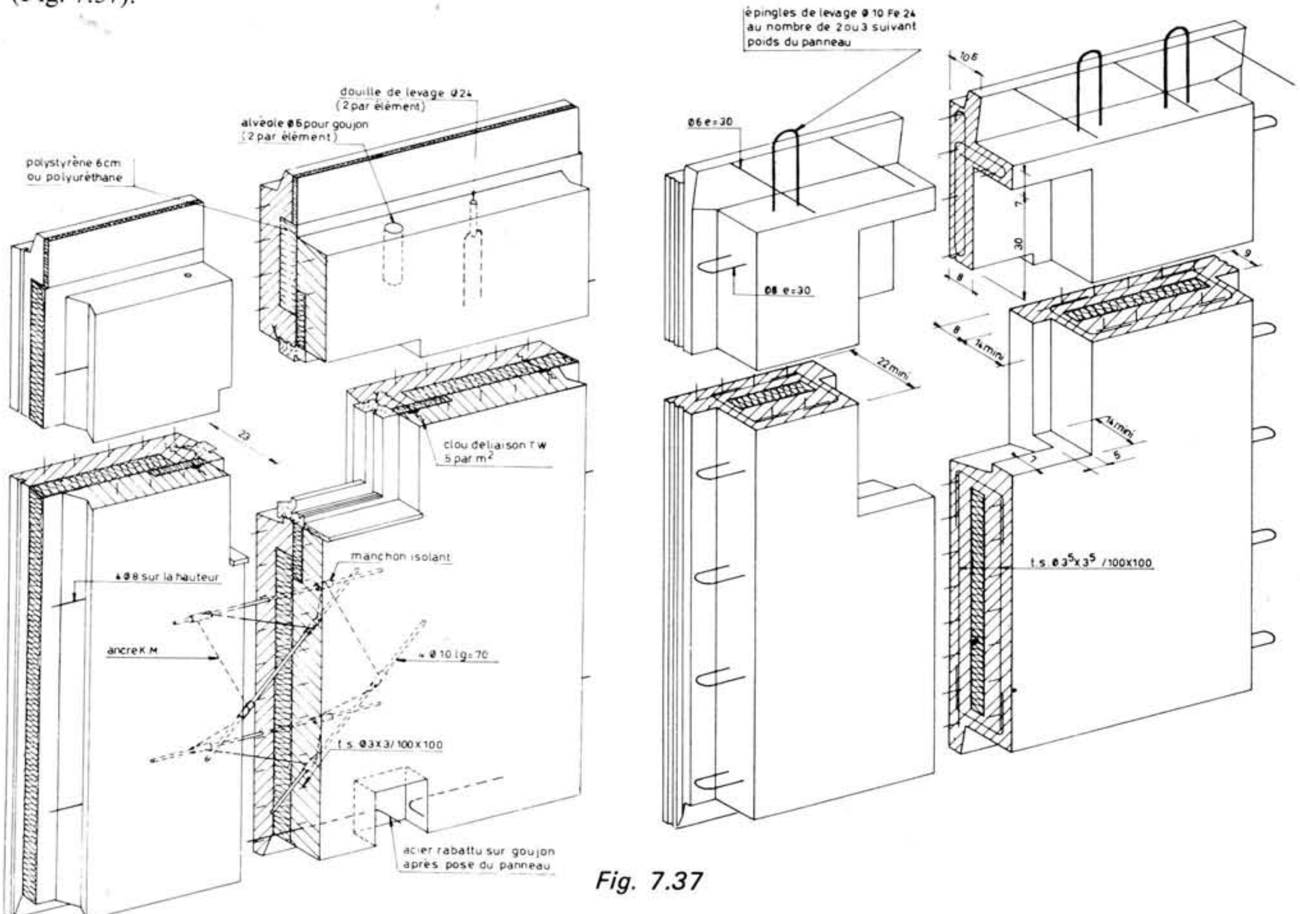


Fig. 7.37

Le calcul du coefficient K d'abord, puis des coefficients k linéiques des liaisons entre panneaux sandwiches et enfin le calcul du coefficient K_g d'une paroi (façade, pignon, plancher) est plus complexe que pour les parois traditionnelles du fait même de l'hétérogénéité de ces parois industrialisées. Elles sont, en général, composées de deux voiles de béton séparés par une âme en isolant thermique léger (polystyrène en général, parfois polyuréthane ou laine minérale). Pour des raisons mécaniques les deux voiles sont reliés :

— par des nervures continues en béton
— par des plots en béton
— par des liaisons métalliques nues.

Les liaisons linéaires ou nervures seront caractérisées par leur longueur L ; les plots en béton armé et les liaisons métalliques seront caractérisées par leur nombre n.

7.5.1. **Calcul du coefficient K moyen.**

Le calcul des déperditions peut être effectué, soit pour des panneaux type (ex : panneau baie, panneau pignon,...) soit pour un ensemble de panneaux. Nous appelerons : A_i la surface intérieure de déperdition totale du panneau ou de l'ensemble de panneaux et K. A_i les déperditions sur toute la surface du panneau. (Fig. 7.38).

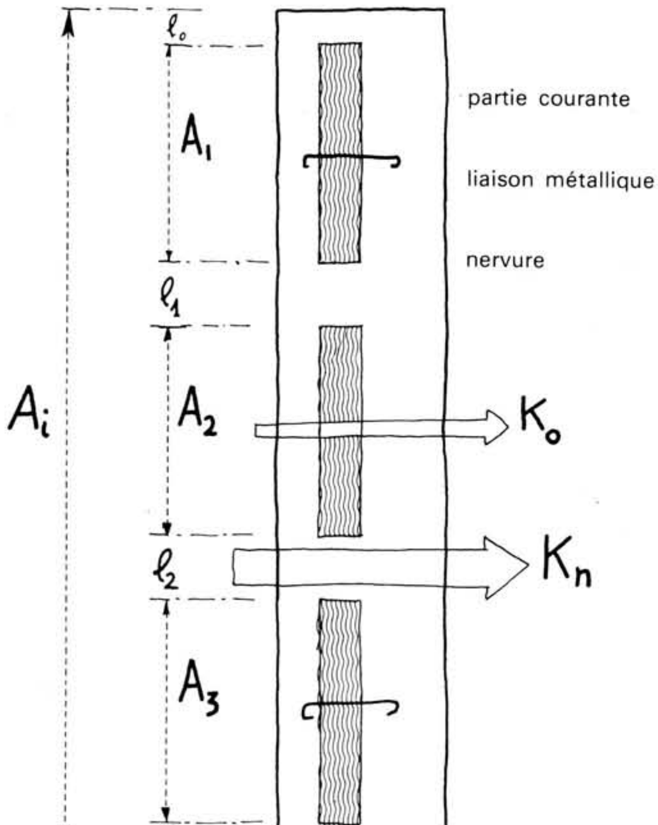


Fig. 7.38

Les déperditions $K.A_i$ sont égales :

— aux déperditions par les parties courantes isolées A, de coefficient K_0 soit Σ (K_0 A) (il peut y avoir des épaisseurs d'isolant différentes sur un même panneau).

— aux déperditions par les nervures de largeur l, de longueur L. On les traduira par une somme de produits : Σ (k l), k étant le coefficient de transmission linéique de la nervure.

— aux déperditions par les n plots en béton traversant l'isolant ou les n liaisons métalliques que l'on notera ζ que l'on note Σ (ζ.n). ζ est un coefficient de transmission ponctuel dont les valeurs sont données par le tableau ci-dessous.

Tableau ζ D.T.U.

Nature des plots ou des liaisons	Côté (en cm)	Valeur de ζ (en W/°C)
Plots en béton (armés) :	4 à 6	0,035
	Diamètre (en mm)	
Liaisons métalliques (nues) :		
- Ronds en acier galvanisé ...	2 à 4	0,005
	5 à 8	0,007
	10 à 15	0,010
- Ronds en acier inoxydable ..	2 à 4	0,0035
	5 à 8	0,006
	10 à 15	0,008

Le coefficient K moyen de la paroi de surface totale A_i sera donc :

$$K = \frac{\Sigma(K_0 A) + \Sigma(kL) + \Sigma(\zeta.n)}{A_i} \quad (W/m^2.°C)$$

Le coefficient k linéique de la nervure est la traduction d'un K surfacique. Il va dépendre des déperditions $\Sigma K_n \times l_i \times L$ par les nervures elles-mêmes et des déperditions supplémentaires de part et d'autre de la nervure (sur une largeur $\frac{x}{2}$ de chaque côté) du fait de l'épanouissement du flux. x va dépendre de l'épaisseur des voiles de béton interne et externe. La valeur de x est donnée par l'abaque de la Fig. (7.39) extraite du D.T.U.

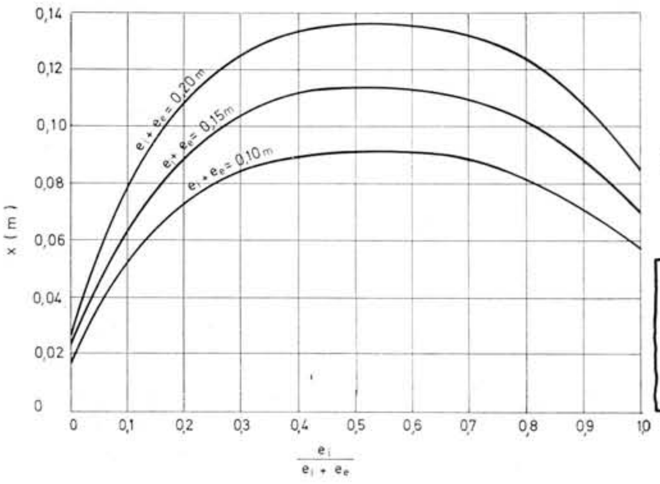
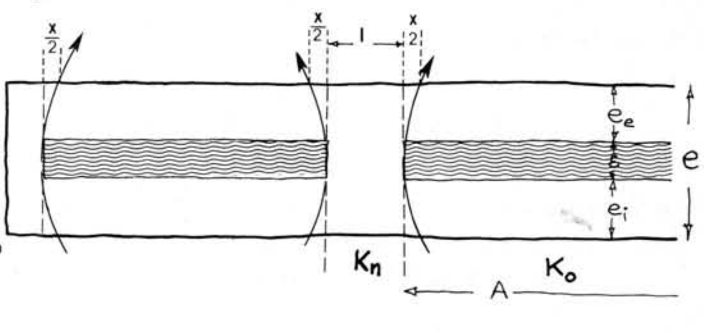


Fig. 7.39



Les déperditions dues à l'épanouissement de flux sont : $K_n.x.L$.

Dans le produit $K_0.A$, on a déjà introduit la surface x.L. Il faut donc retrancher $K_0.x.L$ du chiffre précédent.

Les déperditions par les nervures sont donc :
$k.L = K_n.l.L + (K_n - K_0).x.L$

d'où le coefficient k de transmission linéique de la nervure :

$$k = K_n \,.\, l + (K_n - K_0)\, x. \qquad (W/m.°C)$$

Pour les nervures périphériques du panneau, on ne tiendra compte que d'un épanouissement égal à $\frac{x}{2}$.

Pour le calcul du K_g de la paroi, il faut faire intervenir les coefficients k linéiques des liaisons :
— d'angles de 2 panneaux
— des pourtours de baie
— des parois intérieures et extérieures.

7.5.2 **Coefficient k de transmission linéique des liaisons.**

7.5.2.1 *Pourtour de baie*

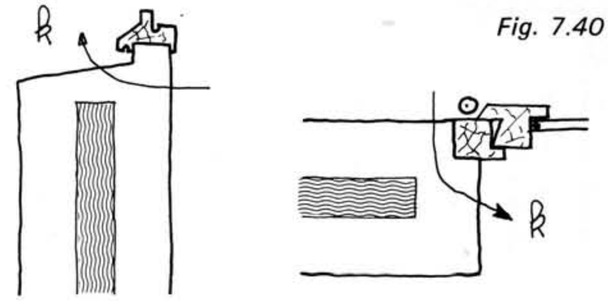


Fig. 7.40

● *Nervure en béton :* (Fig. 7.40) — On considère dans ce cas que tout se passe comme si on était en présence d'un mur à isolation répartie. Les valeurs de $\frac{k}{e}$ sont données par les abaques de la Fig. 7.7 en fonction de la position de la menuiserie et du coefficient K_n de la nervure.

Pour un béton caverneux de granulats lourds, le coefficient k (W/m.°C) sera :

Épaisseur totale en cm	k Menuiserie intérieure	k Menuiserie extérieure
20	0,14	0,20
25	0,17	0,24
30	0,20	0,28

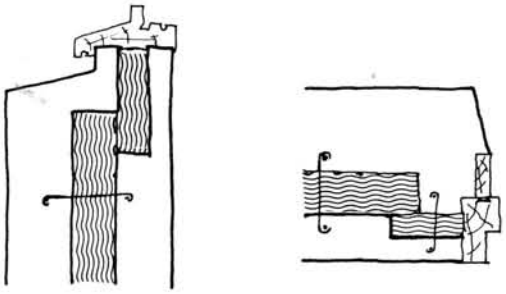


Fig. 7.41

● *Menuiserie du même côté* que l'isolant (Fig. 7.41)

$$k = 0$$

● *Menuiserie à l'opposé de l'isolation* mais avec recouvrement du tableau :

$$k = 0{,}6\,K\;e \qquad (W/m.°C)$$

e étant l'épaisseur du voile intérieur à l'isolation. Les valeurs de $\frac{k}{e}$ sont données par la courbe II de la Fig. 7.10.

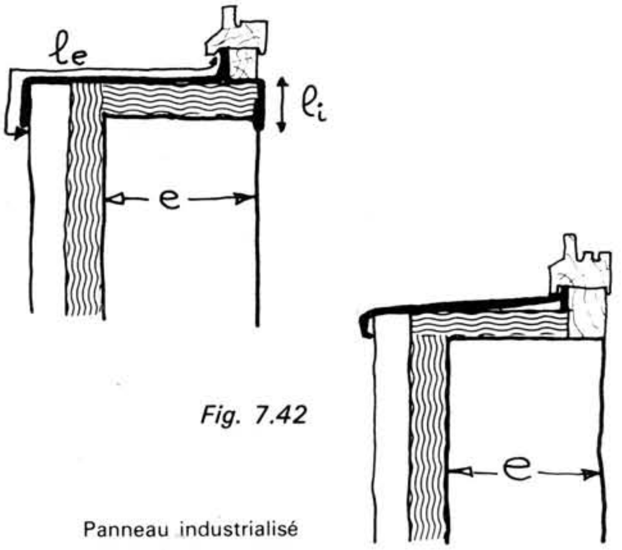


Fig. 7.42

Panneau industrialisé

● *Cas particulier des menuiseries à encadrement de baie métallique* (Fig. 7.42).

— si l'encadrement métallique ne recouvre que la partie extérieure du mur et si l'encadrement est en bois, le coefficient k sera celui déterminé par l'un des calculs précédents selon le cas :

— si l'encadrement métallique recouvre toute l'épaisseur du mur :
$k' = k + k_m$.

k étant calculé selon les méthodes précédentes et k_m étant le coefficient de transmission linéique de la liaison métallique entre la fenêtre et le panneau mur (cf. paragraphe 7.45).

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{h_i\,l_i} + \frac{1}{h_e\,l_e} + \frac{e + \dfrac{l_i + l_e}{8}}{\varepsilon\,\lambda_m}$$

Dans la plupart des cas, k_m est voisin de 0,3 W/m.°C donc on peut prendre, en première approximation :

$$k' = k + 0{,}3 \qquad (W/m.°C)$$

N.B. Si une fermeture est prévue, à 15 cm au moins du vitrage, on prendra :

$$k' = 0{,}7 \times k$$

pour tenir compte de la protection apportée par la fermeture.

7.5.2.2 *Angle de deux panneaux.*

En fonction de la nature de la liaison d'angle, le coefficient k linéique à appliquer à chacune des parois peut être différent. Il s'agit par exemple sur la Fig. 7.43 de deux panneaux identiques assemblés par un poteau d'angle coulé sur chantier, avec un panneau de polystyrène d'épaisseur ε en fond de coffrage.

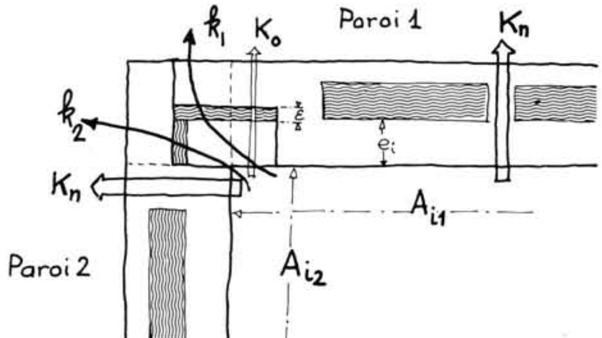
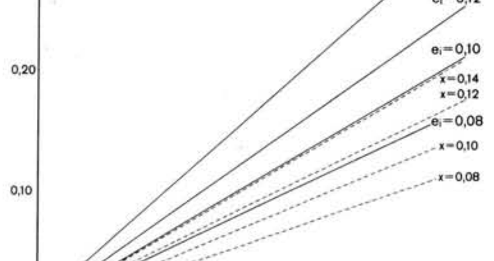


Fig. 7.43

Paroi 1. La surface de déperdition A_{i1} n'est pas limitée à l'angle par une nervure ; les lignes de flux sont donc perpendiculaires aux faces et il n'y a pas d'épanouissement de flux. On se retrouve dans le cas d'un angle saillant isolé par l'extérieur en ne considérant que le voile intérieur e_i donc :

$$k_1 = 0{,}6.K_0.e_i$$

l'abaque de la Fig. 7.44 donne le coefficient k_1



Angle de deux panneaux sandwiches

Paroi 2. La surface de déperdition A_{i2} est limitée par une nervure. Au coefficient k_1 précédent va donc s'ajouter un phénomène d'épanouissement de flux, limité à une largeur $\frac{x}{2}$, puisque l'autre largeur $\frac{x}{2}$ a déjà été intégrée dans le calcul du coefficient K_{moyen} du panneau. On écrira donc :

$$k_2 = k_1 + 0{,}85\,(K_n - K_0)\,\frac{x}{2}$$

$$\text{soit}\quad k_2 = 0{,}85\,[0{,}7 \times K_0 \times e_i + (K_n - K_0)\,\frac{x}{2}]$$

x est obtenu sur l'abaque 7.34.

k_2 peut encore s'écrire : $k_2 = k_1 + 0{,}4.x.\Delta K$

ΔK étant égal à l'écart entre le coefficient K_n de la nervure et le coefficient K_0 au niveau de l'angle. On peut donc tracer les courbes donnant k_1 et celles donnant $k'_1 = 0{,}4.x.\Delta K$ dû à l'épanouissement de flux en fonction de x et de ΔK. Il suffit alors d'ajouter k_1 et k'_1 pour obtenir k_2.

Exemple

Reprenons l'exemple schématisé par la Fig. 7.43.

Paroi 1. Au niveau de l'angle, l'épaisseur de polystyrène est $\varepsilon = 3$ cm.

$K_0 = 1{,}06$ W/m².°C au niveau de l'angle.

En partie courante, l'épaisseur du polystyrène est de 6 cm et le coefficient K_0 est égal à :
$K_0 = 0{,}6$ W/m².°C.

$e_i = 11$ cm $\quad e_e = 7$ cm $\quad$ épaisseur totale : 24 cm
au niveau de l'angle $e_e = 10$ cm.

Sur la Fig. 7.44, on lit :

$$k_1 = 0{,}070 \text{ W/m.°C}$$

Paroi 2. On va calculer la largeur d'épanouissement de flux.

D'après la Fig. 7.39 pour $e_i + e_e = 11 + 10 = 21$ cm

$$\text{et } \frac{e_i}{e_i + e_e} = \frac{11}{21} \simeq 0{,}5 \rightarrow x = 0{,}14 \text{ m.}$$

$$K_n = \frac{1}{0{,}17 + \frac{0{,}24}{1{,}75}} = \frac{1}{0{,}31} = 3{,}2 \text{ W/m}^2.°\text{C}$$

donc $\Delta K = K_n - K_0 = 2{,}14$ W/m².°C
on lit sur la Fig. 7.44 :
$k'_1 = 0{,}4 . x . \Delta K = 0{,}120$ W/m.°C

donc $k_2 = k_1 + k'_1 = 0{,}190$ W/m.°C

7.5.2.3 *Liaison entre une paroi intérieure et une paroi extérieure.*

Quatre cas de figure sont possibles. Tout dépendra s'il y a ou non un phénomène d'épanouissement de flux au droit de la paroi intérieure.

● si l'isolation est continue au droit de la paroi intérieure ou s'il y a une nervure en béton de part et d'autre de l'about non isolé de la paroi intérieure,

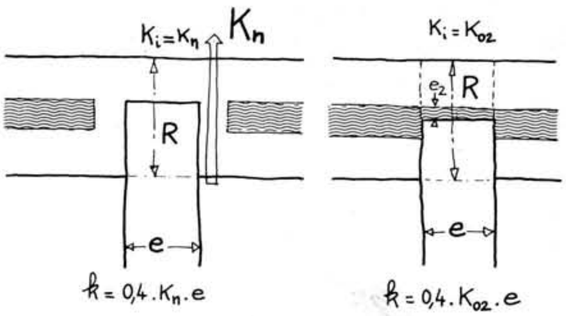


Fig. 7.45

(Fig. 7.45) il n'y aura pas épanouissement de flux au droit de la paroi intérieure. On revient alors à la formule générale :

$$k = 0{,}4.K_i.e \quad \text{avec } \frac{1}{K_i} = 0{,}17 + R$$

Les courbes de la Fig. 7.46 donnent les valeurs de K en fonction de e et de K_i.

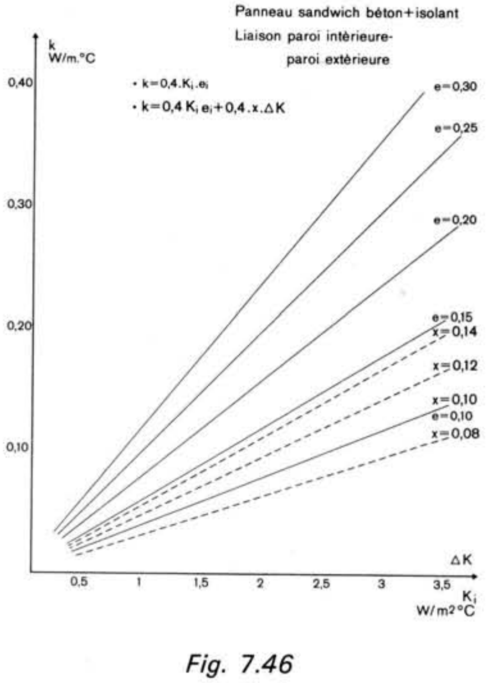


Fig. 7.46

● si l'isolation est interrompue uniquement au droit de la paroi intérieure ou si l'extrémité de la paroi intérieure est isolée et comprise entre deux nervures en béton, (Fig. 7.47) il va y avoir épa-

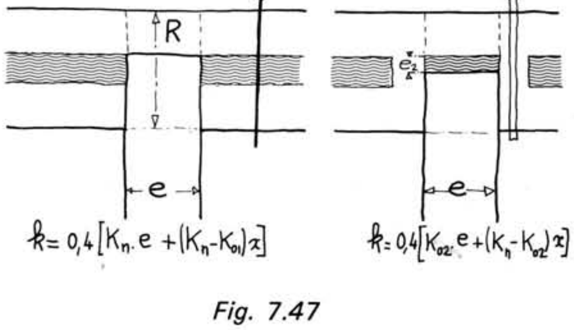


Fig. 7.47

nouissement de flux. Le coefficient k sera donc donné par sa somme des deux phénomènes :

$$k = 0{,}4K_i e + 0{,}4x.\Delta K$$

ΔK est l'écart entre le coefficient K_i fictif au droit de la paroi intérieure et le coefficient K de la paroi extérieure de part et d'autre de la liaison.

Pour obtenir ce coefficient k linéique, il suffira d'ajouter les 2 valeurs trouvées sur l'abaque 7.46. En effet $k = k_l + k_e$

k_l = coefficient dû à la liaison $= 0{,}4.K_i.e$

k_e = coefficient dû à l'épanouissement de flux $= 0{,}4.x.\Delta K$

Exemple

Calcul du k linéique de la liaison paroi intérieure, paroi extérieure illustré par la Fig. 7.48.

Dans ce cas, il va y avoir épanouissement de flux.

La formule à appliquer est donc :
$k = 0{,}4.K_n.e + 0{,}4\,(K_n - K_{01})\,x$

Déterminons x sur la Fig. 7.39.

$$e_i = 12 \text{ cm},\ e_i + e_e = 20,\quad \frac{e_i}{e_i + e_e} = 0{,}6$$

$$\rightarrow x = 0{,}135$$

$$K_n = \frac{1}{0{,}17 + R} = \frac{1}{0{,}17 + \dfrac{0{,}26}{1{,}75}} = \frac{1}{0{,}32}$$

$$= 3{,}10 \text{ W/m}^2.°\text{C}$$

D'après les données $K_0 = 0{,}6$ donc $\Delta K = 2{,}5$
D'après l'abaque 7.46.

$k_l = 0{,}4 \times K_i \times e$ avec $K_i = 3{,}10$ et $e = 0{,}20$

$k_2 = 0{,}248$ W/m.°C

$k_e = 0{,}4.x.\Delta K$ avec $x = 0{,}135$ et $\Delta K = 2{,}5$

$k_e = 0{,}135$ W/m.°C

d'où $k = k_l + k_e = 0{,}38$ W/m.°C

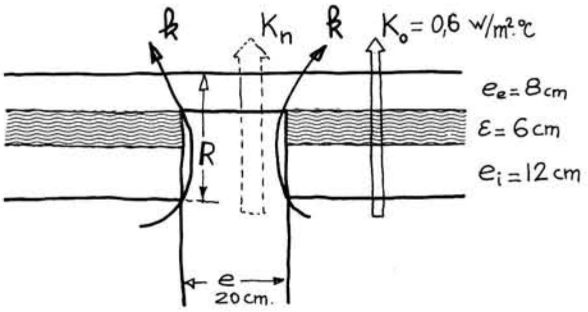


Fig. 7.48