

TRANSFERT THERMIQUE

1. Analyse du transfert de chaleur

1.1. Sens de transfert

Dès qu'il existe une différence de température entre deux milieux, il apparaît un flux de chaleur s'écoulant **du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid**.



Par exemple, en hiver, la chaleur est transmise depuis **l'intérieur** d'un local vers **l'extérieur**.

1.2. Expression de la puissance transmise

La puissance transmise est proportionnelle à :

- Un coefficient de transmission qui dépend de la nature de la paroi : U ,
- La surface de paroi séparant les deux milieux : A ,
- L'écart de température entre les deux milieux : Δt .

$$P = U \cdot A \cdot (t_i - t_e)$$

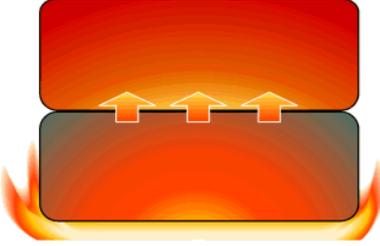
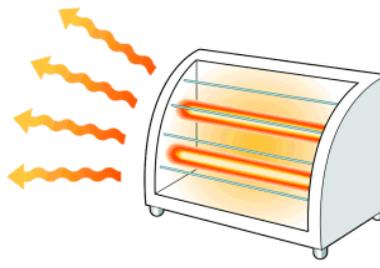
ou plus généralement $P = K \cdot S \cdot \Delta t$

P	puissance transmise	W
U (ou K)	coefficient de transmission thermique	W / m².°C
A	surface	m²
t	température	°C

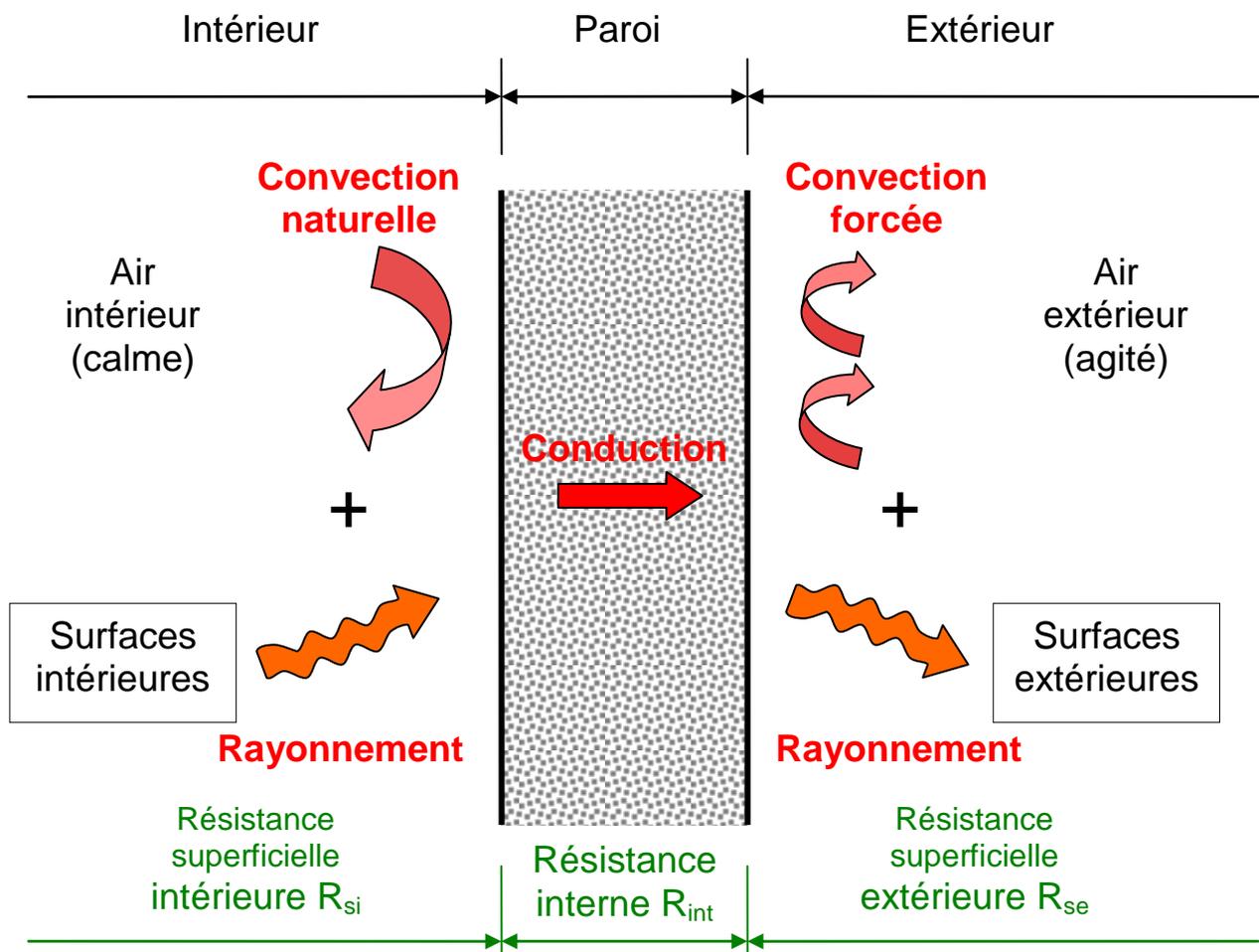
1.3. Les modes de transfert de la chaleur dans un mur

La propagation de la chaleur se fait, de l'intérieur vers l'extérieur, selon trois modes de transfert :

- par **conduction** dans le mur,
- par **convection** entre l'air et les surfaces du mur,
 - Convection **naturelle** à l'intérieur,
 - Convection **forcée** à l'extérieur,
- par **rayonnement** entre les surfaces environnantes et les surfaces du mur.

conduction	convection	rayonnement
<p>la chaleur se transmet à l'<u>intérieur</u> d'un corps solides (ou entre deux corps solides en contact)</p>	<p>la chaleur se transmet par les <u>mouvements</u> d'un fluide (liquide ou gaz)</p>	<p>la chaleur se transmet par une <u>onde</u> électromagnétique (elle n'utilise aucun support matériel)</p>
		

1.4. Analyse du transfert de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur

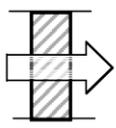
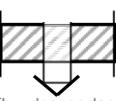


2. Détail du calcul du transfert de chaleur

2.1. Résistance thermique superficielle

La résistance thermique superficielle caractérise les échanges par convection et rayonnement, entre la surface de la paroi et son environnement (air et autres surfaces).

notation	unité	symbole de l'unité
R_{si} ou R_{se}	mètre carré degré Celsius par Watt	$m^2 \cdot ^\circ C / W$

Paroi donnant sur : - l'extérieur - un passage ouvert - un local ouvert ⁽²⁾	R_{si} $m^2 \cdot K/W$	$R_{se}^{(1)}$ $m^2 \cdot K/W$	$R_{si} + R_{se}$ $m^2 \cdot K/W$
Paroi verticale Flux horizontal 	0.13	0.04	0.17
Flux ascendant 	0.10	0.04	0.14
Paroi horizontale Flux descendant 	0.17	0.04	0.21

(1) Si la paroi donne sur un autre local non chauffé, un comble ou un vide sanitaire, R_{si} s'applique des deux côtés.

(2) Un local est dit ouvert si le rapport de la surface totale des ses ouvertures permanentes sur l'extérieur, à son volume, est égal ou supérieur à $0.005 m^2/m^3$. Ce peut être le cas, par exemple, d'une circulation à l'air libre, pour des raisons de sécurité contre l'incendie.

- données relevées dans la RT2012 -

R_{si} : résistance superficielle **intérieure**

R_{se} : résistance superficielle **extérieure**

2.2. Résistance thermique interne

La résistance thermique interne caractérise l'échange par conduction dans la paroi. Elle exprime la capacité de la paroi à s'opposer au passage de la chaleur.

notation	unité	symbole de l'unité
R_{int}	mètre carré degré Celsius par Watt	$m^2 \cdot ^\circ C / W$

2.2.1. Calcul des résistances thermiques internes

Dans le cas où les **matériaux sont homogènes**, il est possible de calculer directement la résistance thermique de conduction grâce à la lecture, dans les tables de la RT2005, des **conductivités thermiques** des matériaux.

2.2.2.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique exprime la capacité d'un matériau à conduire la chaleur.

notation

λ

unité

Watt par mètre et par degré Celsius

symbole de l'unité

W / m.°C

Remarques :

- la conductivité thermique d'un matériau **varie** avec son **humidité**,
- la conductivité thermique d'un matériau **varie très peu** avec la **température**.

matériau	λ en W / m.°C	matériau	λ en W / m.°C
air	0,026	béton	1,75
isolant	0,04	acier	50
plâtre	0,35	aluminium	200
verre	1,1	cuivre	400

2.2.2.2. Résistance thermique interne



$$R_{int} = \frac{e}{\lambda}$$

R_{int}

résistance thermique interne de la couche

m².°C / W

e

épaisseur de la couche

m

λ

conductivité thermique de la couche

W / m.°C

2.2.2. Lecture des résistances thermiques internes

Dans le cas où les **matériaux ne sont pas homogènes (hétérogènes)**, il est possible de lire directement la résistance thermique de conduction dans des tableaux de la RT2012.

exemple :

a – Blocs en béton de granulats courants, destinés à rester apparents et conformes à la norme NF P 14-102 et répondant aux spécifications suivantes : (masse volumique apparente du béton constitutif : 1900 à 2100 kg/m³, vides : 35 à 45 %, épaisseur des parois extérieures : 30 à 32 mm, épaisseur des parois intérieures : 30 mm environ)

Blocs creux Profil	Caractéristiques géométriques					Résistance thermique (m ² .K/W)
	Dimensions de coordination modulaire	Épaisseur (cm)	Hauteur (cm)	Longueur (cm)	Nombre de rangées d'alvéoles	
	5 x 20 x 50	5 ± 0,4	19 ± 0,4	49,4 ± 0,5	1	0.07
	7,5 x 20 x 50	7,5 ± 0,4	19 ± 0,4	49,4 ± 0,5	1	0.10
	10 x 20 x 50	10 ± 0,4	19 ± 0,4	49,4 ± 0,5	1	0.12
	12,5 x 20 x 50	12,5 ± 0,5	19 ± 0,4	49,4 ± 0,5	1	0.13
	15 x 20 x 50 15 x 25 x 50	15 ± 0,5 15 ± 0,5	19 ± 0,4 24 ± 0,4	49,4 ± 0,5 49,4 ± 0,5	1	0.14
	15 x 20 x 50 15 x 25 x 50	15 ± 0,5 15 ± 0,5	19 ± 0,4 24 ± 0,4	49,4 ± 0,5 49,4 ± 0,5	2 2	0.18
	17,5 x 20 x 50	17,5 ± 0,5	19 ± 0,4	49,4 ± 0,5	2	0.21
	20 x 20 x 50 20 x 25 x 50	20 ± 0,5 20 ± 0,5	19 ± 0,4 24 ± 0,4	49,4 ± 0,5 49,4 ± 0,5	2 2	0.23 (0.21)
	20 x 20 x 50	20 ± 0,5	19 ± 0,4	49,4 ± 0,5	3	0.29 (0.26)
	22,5 x 20 x 50	22,5 ± 0,5	19 ± 0,4	49,4 ± 0,5	2	0.24

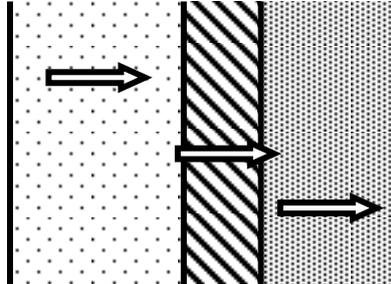
Dans le cas des lames d'air, la chaleur est transmise par convection naturelle et rayonnement. La résistance thermique d'une lame d'air n'est pas proportionnelle à son épaisseur. Elle est donnée par le tableau de la RT2012.

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

- Ces valeurs correspondent à une température moyenne de la lame d'air de 10 °C.
- Les valeurs intermédiaires peuvent être obtenues par interpolation linéaire.

2.2.3. Cas de parois multicouches

2.2.3.1. Couches en série



Dans le cas d'une paroi composée de plusieurs couches en **serie**, il est possible de calculer la résistance thermique de conduction de la paroi par la formule :

$$R_{\text{intemeglobale}} = \sum (R_i) = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

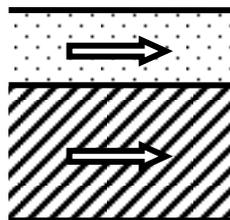
En série, les résistances thermiques sont additionnées.

remarque :

Les résistances thermiques des différentes couches sont :

- soit déterminées dans des tableaux lorsque les matériaux sont hétérogènes,
- soit calculées lorsque les matériaux sont homogènes.

2.2.3.2. Couches en parallèle



Dans le cas d'une paroi composée de plusieurs couches en **parallèle**, il n'est pas possible de calculer directement la résistance thermique de conduction de la paroi.

Le calcul se fait de façon globale (en tenant compte des résistances superficielles et des résistances de conduction), comme s'il s'agissait de deux parois.

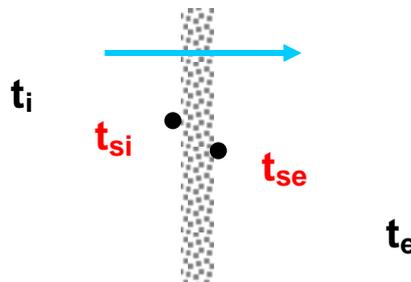
3. Calcul du coefficient U

La puissance transmise de l'intérieur vers l'extérieur est donnée par :

$$P = U \cdot A \cdot (t_i - t_e)$$

Le calcul du coefficient U découle de la **conservation de l'énergie** :

- en régime permanent, la **puissance** transférée est **constante**,
- il n'y a pas d'accumulation de chaleur dans les parois,
- ce qui se traduit par le fait que les températures sont constantes dans le temps.



- transmission de la puissance de l'intérieur vers la surface intérieure de la paroi : $P = \frac{1}{R_{si}} \cdot A \cdot (t_i - t_{si})$ $(t_i - t_{si}) = \frac{P}{A} \cdot R_{si}$
- transmission de la puissance de la surface intérieure vers la surface extérieure : $P = \frac{1}{R_{int}} \cdot A \cdot (t_{si} - t_{se})$ $(t_{si} - t_{se}) = \frac{P}{A} \cdot R_{int}$
- transmission de la puissance de la surface extérieure de la paroi vers l'extérieur : $P = \frac{1}{R_{se}} \cdot A \cdot (t_{se} - t_e)$ $(t_{se} - t_e) = \frac{P}{A} \cdot R_{se}$

remarque : en sommant les 3 équations, nous obtenons : $P = \frac{1}{R_{se} + R_{int} + R_{si}} \cdot A \cdot (t_i - t_e)$

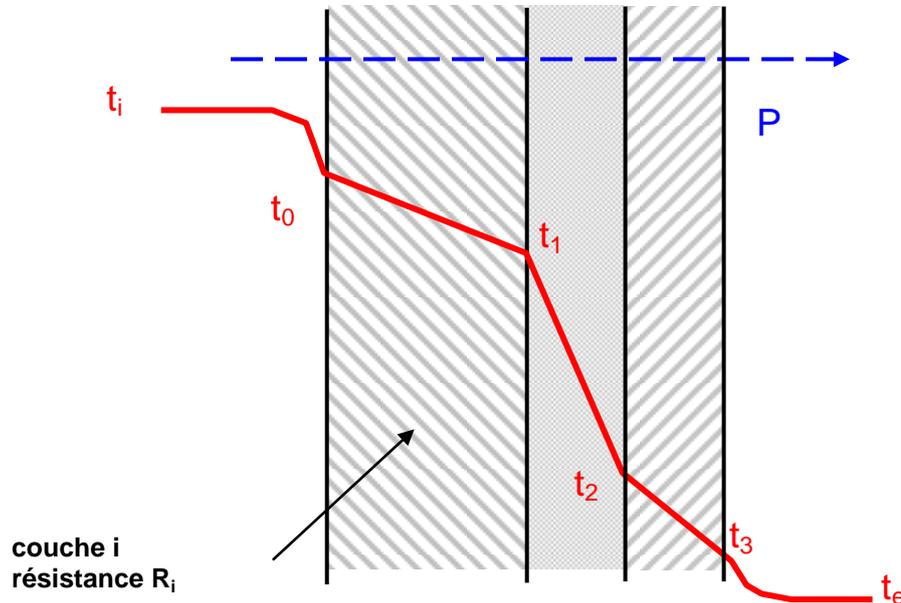
Par analogie avec l'équation donnant la puissance transmise, nous avons :

$$\frac{1}{U} = R_{se} + R_{int} + R_{si} = R_{globale}$$

La résistance globale de la paroi est égale à la somme des résistances rencontrées par la chaleur pour passer de l'intérieur vers l'extérieur.

4. Profil des températures

Il existe un **profil des températures** : c'est l'évolution des températures dans la paroi.



remarques :

- dans un matériau, l'évolution des températures est **linéaire**,
- chacune des températures aux **interfaces** des matériaux peut être déterminée,
- chacun des **écarts** de températures de chaque couche peut être déterminé par :

$$\Delta t_i = \frac{R_i}{R_{\text{globale}}} \cdot \Delta t_{\text{global}}$$

Δt_i
Δt_{global}
R_i
R_{globale}

écart de température de la couche (i)
écart de température global
résistance de la couche (i)
résistance globale de la paroi

°C
°C
$\text{m}^2 \cdot \text{°C} / \text{W}$
$\text{m}^2 \cdot \text{°C} / \text{W}$

- l'**air intérieur** et **extérieur** sont des **couches** de résistances superficielles : R_{Si} et R_{Se} ,
- les **matériaux** de la **paroi** sont des **couches** de résistances internes : R_{int} .

5. Application à un exemple

Soit un mur séparant un local à 18 [°C] de l'extérieur à -5 [°C], composée de :

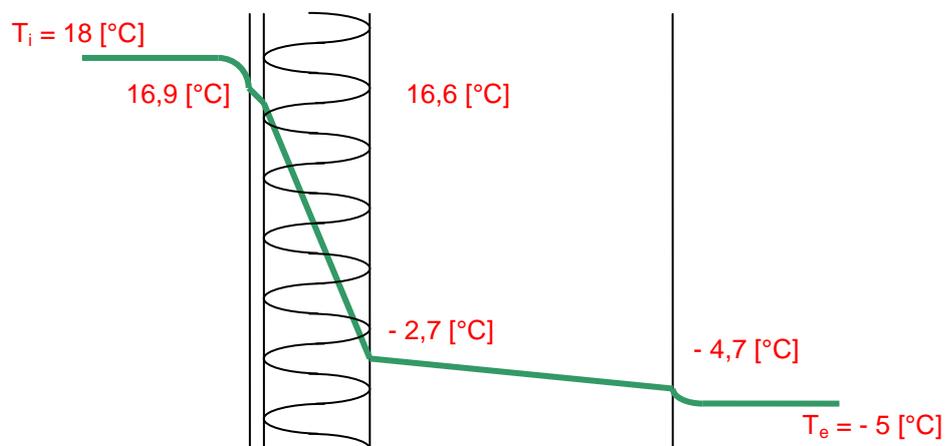
- 20 [cm] de bloc de béton de granulats courants, 2 alvéoles, de résistance thermique $R = 0,23$ [m².°C / W],
- 10 [cm] de mousse de polystyrène expansé, conductivité thermique $\lambda = 0,044$ [W/m.°C],
- 1 [cm] de plaque de plâtre cartonné, de résistance thermique $R = 0,04$ [m².°C / W].

Il est demandé de calculer le coefficient de transmission surfacique U de la paroi et de tracer le profil des températures dans cette paroi.

5.1. Calcul des résistances et des écarts de température des différentes couches

	e	λ	R _{couche}	R _{couche} / R _{global}	ΔT _{couche}	t _{début} couche	t _{fin} couche
	m	W / m.°C	m ² .°C / W	%	°C	°C	°C
air int. (R _{si})	-	-	0,13	4,8	1,10	18	16,90
placoplâtre	0,01	-	0,04	1,5	0,34	16,90	16,56
polystyrène	0,10	0,044	2,27	83,8	19,27	16,56	-2,71
bloc béton	0,20	-	0,23	8,5	1,95	-2,71	-4,66
air ext. (R _{se})	-	-	R _{se} = 0,04	1,5	0,34	-4,66	-5,00
			R_{global}	2,713	m ² .°C / W	23	Δt_{global}
			U	0,37	W / m ² .°C		

5.2. Tracé du profil des températures



Remarques :

- les températures dans la paroi **dépendent** de l'emplacement des matériaux,
- les températures superficielles **ne dépendent pas** de l'emplacement des matériaux.