

Université de Khemis-Miliana
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de la Technologie

Module: **Thermique du bâtiment**

Thermique du bâtiment

Enseignant : **ALI BENYAHIA**

1. Construction

Toute construction doit satisfaire aux critères suivants :

1.1. Stabilité et résistance structurelle

Une construction est conçue pour pouvoir être capable de **résister** :

- aux **actions statiques** (charges permanentes, charges d'exploitation, déformations thermiques,...)
- aux **actions dynamiques** (action du vent, efforts dus à l'utilisation, actions accidentelles, chocs de corps solides, séismes,...).

1.2. Sécurité au feu

Il s'agit de la réaction et **résistance au feu** provenant soit d'un feu intérieur soit d'un feu extérieur voisin.

1.3. Protections par rapport à l'eau

L'imperméabilité à l'eau des murs et des planchers **est capitale**. En effet, la pénétration de l'eau peut entraîner une **dégradation importante** de la construction. La fonction d'imperméabilité ne s'intéresse pas seulement la pluie mais aussi les remontées capillaires.

1.4. Protection acoustique

L'acoustique est une science qui traite la qualité d'un local du point de vue de la propagation du son.

Cette fonction est généralement bien remplie par les parties pleines des façades, celles-ci ayant une épaisseur et une densité suffisantes pour **affaiblir les bruits aériens extérieurs**. Les points faibles se situent au niveau des menuiseries car les vitrages possèdent un faible indice d'affaiblissement acoustique.

1.5. Protection thermique

En hiver, c'est l'isolation thermique qui a pour rôle de **limiter les déperditions calorifiques** à travers le mur, de l'intérieur chauffé vers l'extérieur froid par contre en été elle **conserve la fraîcheur** à l'intérieur du bâtiment.

2. Confort thermique à l'intérieur du bâtiment

Dans les conditions habituelles, l'homme assure le **maintien de sa température corporelle autour de $37\pm 0,8^{\circ}\text{C}$** . Alors, le corps réagit et lutte en permanence contre les variations de température ambiante. L'idéal pour l'occupant serait d'être dans une ambiance de **neutralité thermique** (ambiance adaptée aux usagés)

La figure 1 considère le sentiment de confort thermique. Il s'agit de **pourcentages prévisibles d'insatisfaits (PPD)**, exprimés sur l'axe vertical, pour des personnes au **repos en position assise**, ou pour des personnes effectuant un **travail léger** (= travail de bureau).

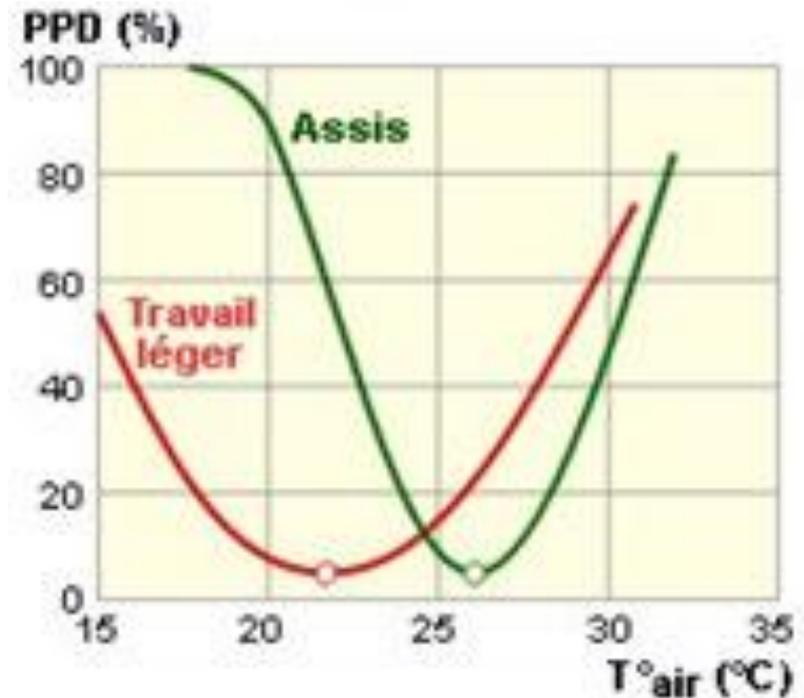


Fig.1. L'inconfort en fonction de la température ambiante

2.1. Le confort thermique dépend des paramètres suivants :

- Le **métabolisme**, qui est la production de chaleur interne au corps humain, pour lui permettre notamment de répondre aux stimulus de son environnement
- L'**habillement**, qui représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement,
- La **température ambiante de l'air** T_a ,
- La **température moyenne des parois** T_p ,
- L'**humidité relative** de l'air (HR), qui est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température T_a et la quantité maximale d'eau contenue à la même température .

L'inconfort n'apparaît que dans des situations extrêmes :

- soit une humidité relative inférieure à 30 %,
- soit une humidité relative supérieure à 70 %.

2.2. *Température opérative* :

est la température ressentie par l'occupant. C'est un indicateur simple du confort thermique. Elle prend en compte la **température de l'air dans la zone d'occupation** et les **effets de rayonnement** :

$$\text{Température opérative} = (T^{\circ}\text{air} + T^{\circ}\text{parois}) / 2$$

(Cette relation simple s'applique pour autant que la vitesse de l'air ne dépasse pas 0,2 m/s).

2.3. Quelques températures recommandées:

- Pour un travail intellectuel: 18 à 24 °C
- Pour un travail à forte sollicitation physique: 15 à 18°C

3. Isolation thermique

3.1. Définition et objectif de l'isolation thermique:

L'isolation thermique consiste à étudier les **méthodes** et les **techniques** pour pouvoir **mieux isoler thermiquement l'intérieur** d'une habitation à son **extérieur** et garantir un climat intérieur **sain** (limiter les échanges thermiques entre ces deux ambiances).

3.2. Utilité de l'isolation thermique :

Plus d'économies d'énergie :

L'isolation thermique permet à la fois de **réduire les consommations d'énergie** de **chauffage** et / ou de **climatisation** et par conséquent entraîne une réduction de la facture énergétique:

- En hiver, l'isolation permet de **réduire les déperditions de chaleur** à travers les parois (Fig.) (les besoins en chauffage sont diminués), (cout du chauffage divisé par 3 ou 4) (un exemple d'une construction de 120 m² très bien isolée a économisée de 50 à 70 % de la facture annuelle de chauffage par rapport à une même construction faiblement isolée),

3. Isolation thermique

- En été, elle fait **barrière à la chaleur** et au rayonnement solaire extérieur et elle **conserve la fraîcheur à l'intérieur** du bâtiment (les besoins de la climatisation sont diminués),

La majeure partie des déperditions thermiques d'un bâtiment a lieu par le haut car l'air chaud, plus léger, monte. L'isolation de la **toiture** est donc la priorité des travaux d'isolation. Viennent ensuite, dans l'ordre, les **façades opaques**, c'est-à-dire les murs, puis les menuiseries (**fenêtres, portes**) et enfin les **planchers bas**.

Après cela, il faut tenir compte des «fuites» de chaleur à travers les **ponts thermiques**, les **cheminées** et les **systèmes de ventilation**.

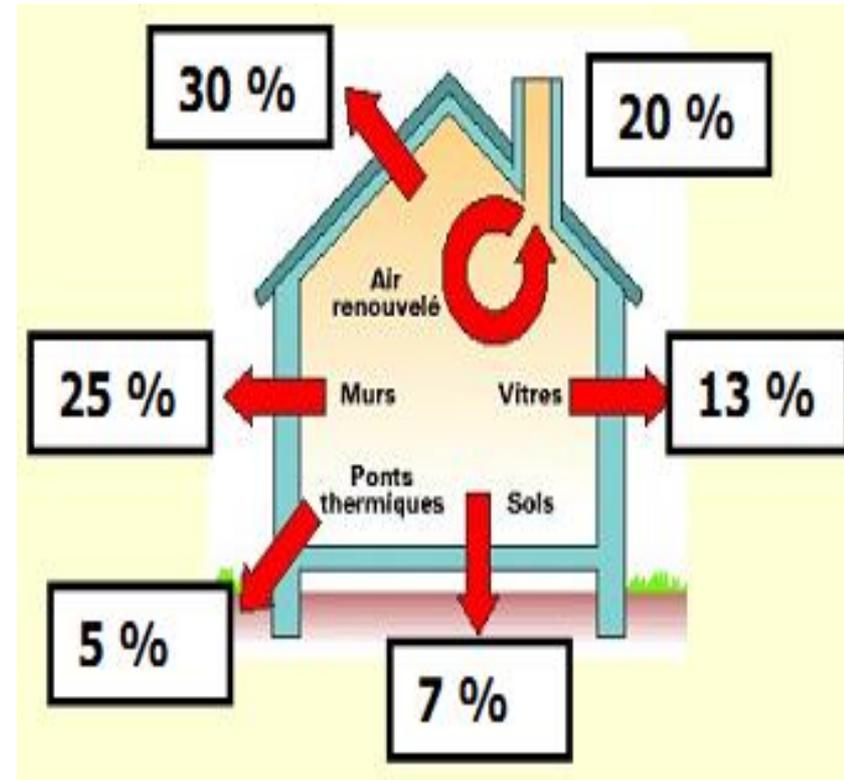


Fig. Pertes de chaleur d'une maison individuelle non isolée

3. Isolation thermique

Préserver les ressources énergétiques et de protéger l'environnement (limiter les émissions de gaz à effet de serre)

Plus de confort thermique et d'espace :

- Les parois non isolées, comme les murs et les fenêtres, sont **froides en hiver** (on ressent un frisson en passant devant une fenêtre simple vitrage) ou **chaudes en été** par « contact » avec l'air extérieur et elles provoquent des **sensations d'inconfort** (un écart de seulement 2 à 3° C entre la température de l'air et celle des parois suffit à générer un inconfort).
- Une bonne isolation supprime cet effet «**paroi froide**» ou «**paroi chaude** ». Les espaces à proximité des parois deviennent ainsi «**utilisables** ».
- Maintient une température agréable et égale à l'intérieur de l'espace habitable, ce qui offre un **plus grand confort** et une **meilleure qualité de vie**.

3. Isolation thermique

Améliorer le confort acoustique L'isolation thermique permet souvent d'améliorer l'isolation acoustique.

Une durée de vie plus longue pour la construction :

Une habitation bien isolée **vieillit mieux** et nécessite **moins de travaux d'entretien**. En effet, l'isolation (couplée à un système de ventilation performant) supprime les **risques de condensation** qui causent souvent de nombreux désordres (peinture, huisserie...).

4. matériaux isolants

Isolation thermique : a pour objet de **réduire le transfert de chaleur** au travers d'un système et elle peut être **réalisée** à l'aide d'un **matériau**, d'un **produit** ou d'un **système isolant**.

Matériau isolant thermique : **substance** ou **mélange de substances** dont les propriétés d'isolation résultent de sa nature chimique et/ou de sa structure physique.

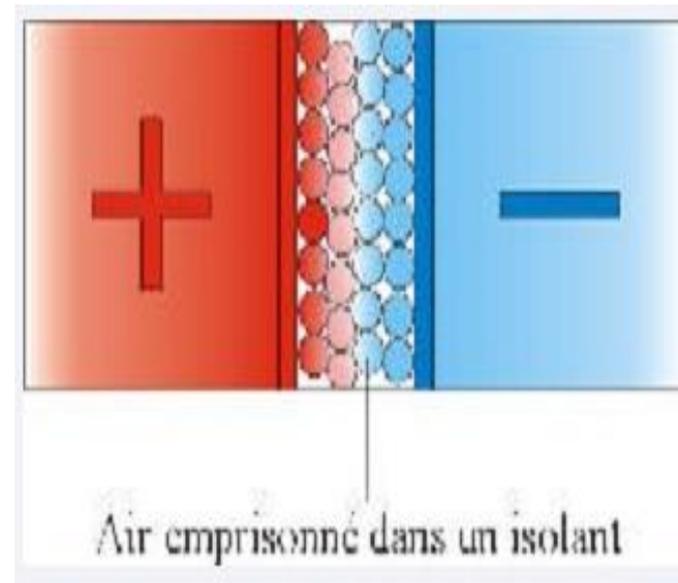
Produit isolant thermique : **matériau d'isolation** thermique **prêt à l'emploi** y compris **parements** ou **enduits**.

Système d'isolation thermique : **association** de deux ou plusieurs composants dont l'un au moins est un **produit** ou un **matériau** isolant. La performance du système est la performance de l'ensemble.

Isolant thermique : **matériau**, **produit** ou **système** qui **réduit** par sa présence le **transfert de chaleur** à travers la paroi sur, ou dans, laquelle il est placé. Il est caractérisé par sa **résistance thermique**.

Qu'est-ce qu'un bon matériau isolant ?

- Un bon isolant thermique est un matériau **ne conduisant pas la chaleur**
- Le principe d'un isolant consiste à **emprisonner l'air** sous forme de différentes manières (**milieux fibreux, milieux cellulaires, milieux pulvérulents ou granulaires**) avec un **grand nombre de cellules (alvéoles) les plus petites possibles**, afin de réduire au maximum les mouvements de convection et les transferts par conduction.
- Les matériaux isolants modernes sont dans leur grande majorité des **matériaux poreux, légers, de très faible densité** et comportant un **grand nombre de cellules les plus petites possibles**.
- L'air (**sec et statique**) est reconnu comme le meilleur des isolants.



5. Facteurs influençant sur un isolant thermique

- Si l'eau vient à remplacer l'air dans les pores d'un matériau isolant, (par condensation , par remontée capillaire, par infiltration accidentelle ou par pénétration de l'humidité environnante par exemple), elle réduit considérablement sa résistance thermique nominale, à l'état sec.
- La mobilité de l'air dans les pores d'un matériau isolant

6. Classification des matériaux isolants

Le critère de classification des isolants repose sur la **structure** de leur matrice solide et sur la **nature chimique** de la substance qui la constitue. Les isolants peuvent être classés en **trois grandes catégories** de nature minérale et organique :

- Isolants fibreux,
- Isolants cellulaires
- Isolants granulaires

6.1. Isolants fibreux

Ils sont commercialisés sous forme de feutres flexibles se présentant en rouleaux ou panneaux semi-rigides et de panneaux rigides.

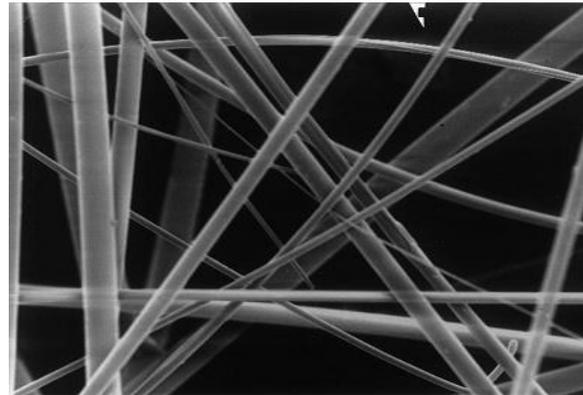


Fig. Matériau fibreux (Laine de verre : rouleau)

6. Classification des matériaux isolants



Fig. Fibres de bois
(panneaux rigide)



Fig. Laine de roche
(panneau rigide)

Les feutres et les panneaux peuvent être **recouverts** avec des **revêtements** de surface ayant un rôle fonctionnel (papier kraft-bitume ou kraft-aluminium formant **pare-vapeur**, voile de verre renforcé **améliorant la tenue mécanique**, feuille d'aluminium pour les **applications haute température**) ou **esthétique** (kraft-aluminium laqué de différentes couleurs pour les plafonds, etc.).

6. Classification des matériaux isolants

Tableau 1 – Matériaux isolants fibreux

	Isolant	Abréviation (1)	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Température limite (°C)
A1	Laine de roche	MW	18 à 180	≈ 600
A2	Laine de verre	MW	7 à 130	≈ 400
A3	Laine de silice		8 à 100	≈ 1 100
A4	Fibres de silice-alumine	RCF	40 à 200	≈ 1 260
A5	Fibres de bois	WF	200 à 250	≈ 100
A6	Fibres de polyester		10 à 35	≈ 95
A7	Laine de mouton		10 à 35	≈ 100

6.2. Isolants cellulaires

Ce sont des matériaux **poreux** avec des **cellules** contenant de **l'air** ou un **autre gaz** ayant servi à l'expansion du matériau initial.

Ces matériaux se présentent sous forme de panneaux semi-rigides ou rigides (les polystyrènes, par exemple) de plaques et de blocs et de coquilles et plus rarement sous forme de rouleaux.

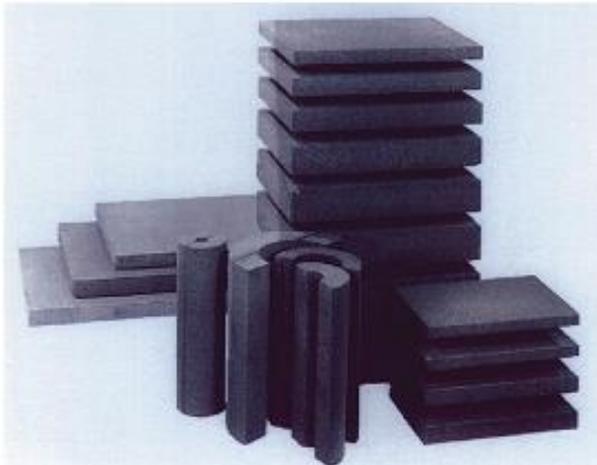
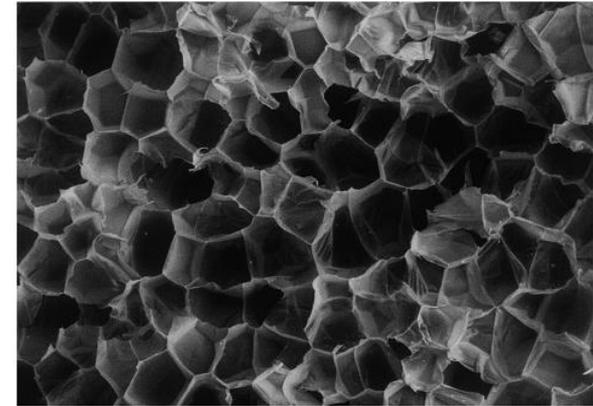


Fig. Verre expansé
(bloc, plaques et coquilles)



Fig. Polystyrène extrudé
(panneau)

6. Classification des matériaux isolants

Très souvent, les panneaux sont **recouverts** par des **revêtements de protection**, éventuellement **étanches** pour **préserver** le **gaz enfermé** dans les cellules

Tableau 2 - Matériaux isolants cellulaires

	Isolant	Abréviation	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Température limite (°C)
B1	Béton cellulaire.....		375 à 825	< 400
B2	Verre cellulaire	CG	110 à 140	- 260 à 430
B3	Polystyrène expansé.....	EPS	7 à 35	< 95
B4	Polystyrène extrudé.....	XPS	25 à 40	< 95
B5	Polyuréthane et polyisocyanurate	PUR ; PIR	27 à 60	- 200 à 100
B6	Polychlorure de vinyle.....		25 à 48	< 95
B7	Mousse phénolique	PF	30 à 100	- 200 à 120
B8	Mousse souple élastomère	FEF	40 à 100	- 180 à 105

6.3. Isolants pulvérulents, ou granulaires

Ils se présentent en général en vrac, emballés dans des sacs. Leur mise en œuvre in situ se fait soit manuellement, soit à l'aide d'équipements pneumatiques, dans des **espaces confinés** (cavité des murs) ou ouverts (combles) qui doivent être isolés.

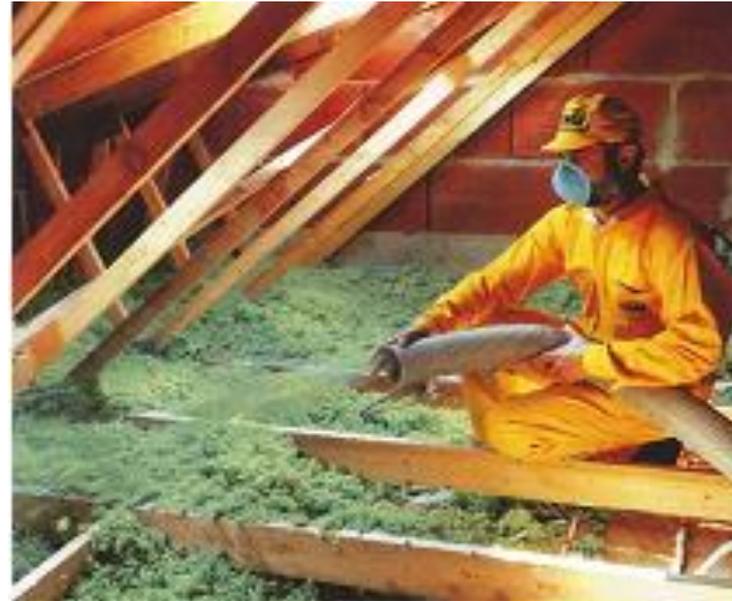


Fig. Laine minérale soufflée

6. Classification des matériaux isolants

Tableau 3 – Matériaux isolants pulvérulents, nodulaires ou granulaires

	Isolant	Abréviation	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Température limite (°C)
C1	Silicate de calcium (compacté en plaques ou coquilles)	CS	200 à 350	≤ 870
C2	Perlite expansé : — en vrac		32 à 176	- 272 à 760
	— agglomérée en plaques		140 à 200	
C3	Vermiculite (en vrac)		48 à 128 90 à 175	- 272 à 760
C4	Granulats de verre cellulaire (en vrac).....		115 à 175	- 260 à 430
C5	Laines minérales (en vrac) : — fibres de roche nodulées en flocons		30 à 50	≤ 600
	— fibres de verre nodulées en flocons.....		≈ 10	≤ 400
C6	Liège (aggloméré en panneaux)		100 à 250	- 165 à 100
C7	Fibres de cellulose (en vrac)		30 à 50	≤ 100
C8	Copeaux de mousse rigide de polychlorure de vinyle.....		30 à 50	< 95

7. Différents modes de diffusion de la chaleur:

Les échanges de chaleur entre le bâtiment et son environnement ont pour origine la tendance naturelle de la chaleur à transiter des zones chaudes vers les zones froides et ils s'effectuent suivant trois modes de transport :

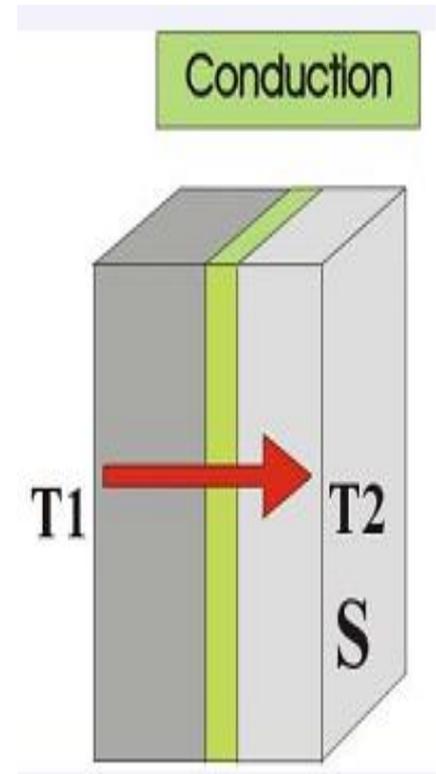
- conduction thermique
 - convection
 - Rayonnement
- Lorsque deux éléments sont à des températures différentes, un échange de chaleur s'établit jusqu'à ce que les températures des deux éléments soient **identiques**.
- La chaleur va toujours du corps chaud vers le corps froid.
- Il est impossible d'empêcher ce phénomène d'échange, le but de l'isolation est donc de le freiner fortement.
- Dans le domaine du bâtiment, les échanges de chaleur se font principalement selon 3 modes de transmission : la conduction (majoritaire), la convection et le rayonnement.

7.1. Conduction thermique :

La chaleur **se propage à travers la matière** (un **même** corps solide ou un **même** fluide « liquide ou gazeux ») de particule à particule. Les éléments qui constituent les matières **reçoivent** et **transmettent** la chaleur aux éléments voisins **par contact**.

Toutes les matières ne transmettent pas l'énergie de la même façon. Certains, comme les métaux, sont de bons conducteurs thermiques et d'autres, comme le bois ou les matières synthétiques, sont de médiocres conducteurs.

La chaleur se propage avec plus ou moins de facilité suivant la nature, les caractéristiques (résistances thermiques...) et la géométrie du matériau.



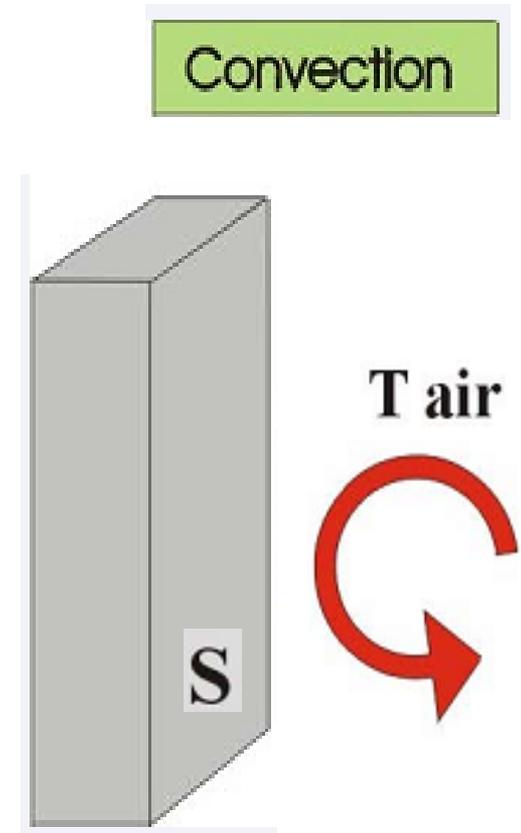
7.2. Convection :

Transfert entre l'air et la surface de la matière solide résultant du déplacement des particules (de l'air) au niveau de l'interface

Dans un bâtiment, les déperditions thermiques par convection peuvent être importantes au niveau des plafonds (flux de chaleur ascendant),

Au contact d'un élément chaud le liquide, de l'air par exemple, se met en mouvement et se déplace vers l'élément froid au contact duquel il perd sa chaleur créant ainsi un mouvement vertical qui accélère les échanges thermiques entre les 2 éléments.

Plus l'air est immobile moins il y a de convection.



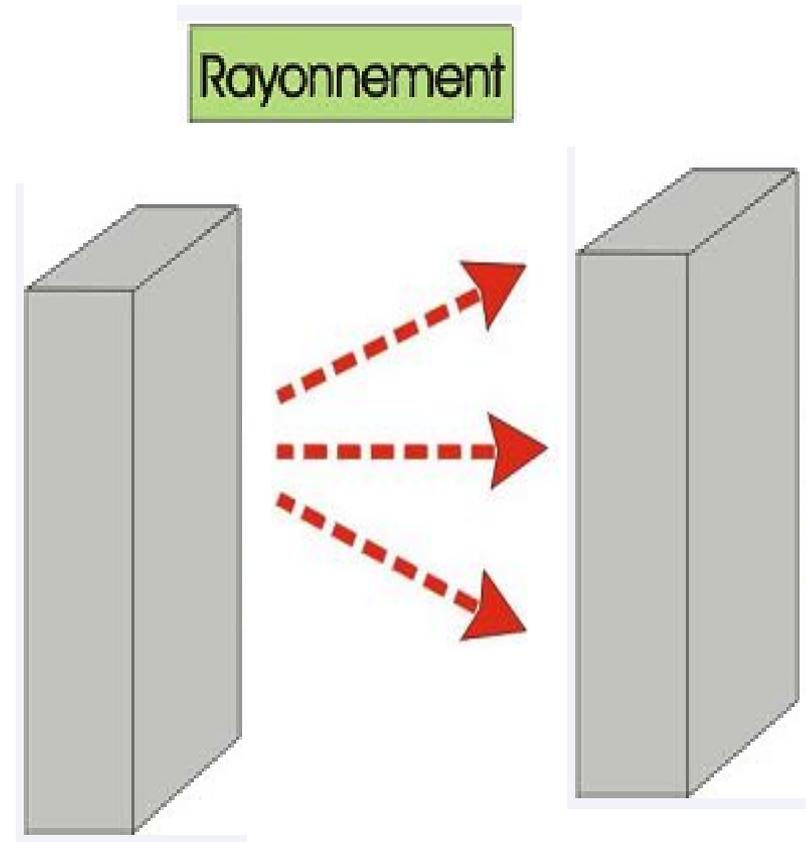
7.3. Rayonnement :

C'est le transfert de chaleur d'un corps à un autre par émission et absorption des **ondes électromagnétiques** sans contact direct.

Ce type de transfert **ne nécessite pas de support matériel** il peut se produire même dans le vide.

Le **transfert** de chaleur **par rayonnement** du aux **parois froides** (parois vitrées) (froides en hiver) peut être une **source d'inconfort important** pour les occupants et de **dépense thermiques**.

Plus **l'émissivité** du matériau est faible moins il y aura de transfert par rayonnement.



8. Propriétés thermiques à la conduction des matériaux isolants

Les matériaux isolants sont généralement **caractérisés** par les coefficients suivants :

- La conductivité thermique (λ)
- Le coefficient de transmission surfacique (K) ou (U)
- La résistance thermique (R)

Comprendre les valeurs thermiques qui caractérisent les matériaux et les systèmes est aujourd'hui indispensable pour choisir judicieusement ses produits à la fois d'un point de vue technique qu'économique.

8.1. La conductivité thermique du matériau (λ):

La conductivité thermique (λ) (lambda) est une **caractéristique physique, propre** à chaque matériau homogène (indépendant de sa forme) qui a pour unité le W/m.K (watt par mètre Kelvin).

Elle représente l'aptitude du matériau à se laisser traverser par la chaleur. C'est une caractéristique constante intrinsèque aux matériaux homogènes et elle caractérise uniquement ses performances isolantes.

$$T_K = T_C + 273.15$$

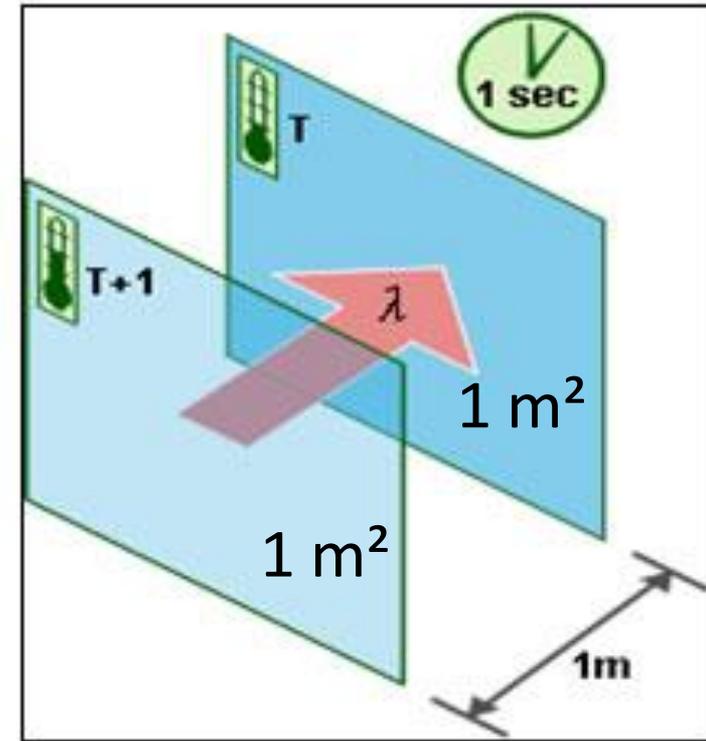
T_K : la température en kelvins (les températures en kelvins ne sont jamais négatives);

T_C : la température en degrés Celsius.

8. Propriétés thermiques à la conduction des matériaux isolants

La conductivité indique la **quantité de chaleur** traversant un matériau sur :

- 1 m² de surface,
- 1 m d'épaisseur,
- en 1 seconde,
- lorsque la différence de température entre les deux faces du matériau est de 1 K (1°C)
- Plus la **conductivité** thermique est élevée, plus le **matériau** est **conducteur** de la chaleur. Plus elle est faible, plus le produit est isolant.



- Le coefficient de conductivité thermique d'un matériau **varie en fonction de la température** et de **l'humidité** de celui-ci.
- Dans la pratique, la conductivité thermique est mesurée en laboratoire. Dans le cadre du marquage, les fabricants d'isolants thermiques sont tenus d'indiquer sa valeur sur leurs produits.

8. Propriétés thermiques à la conduction des matériaux isolants

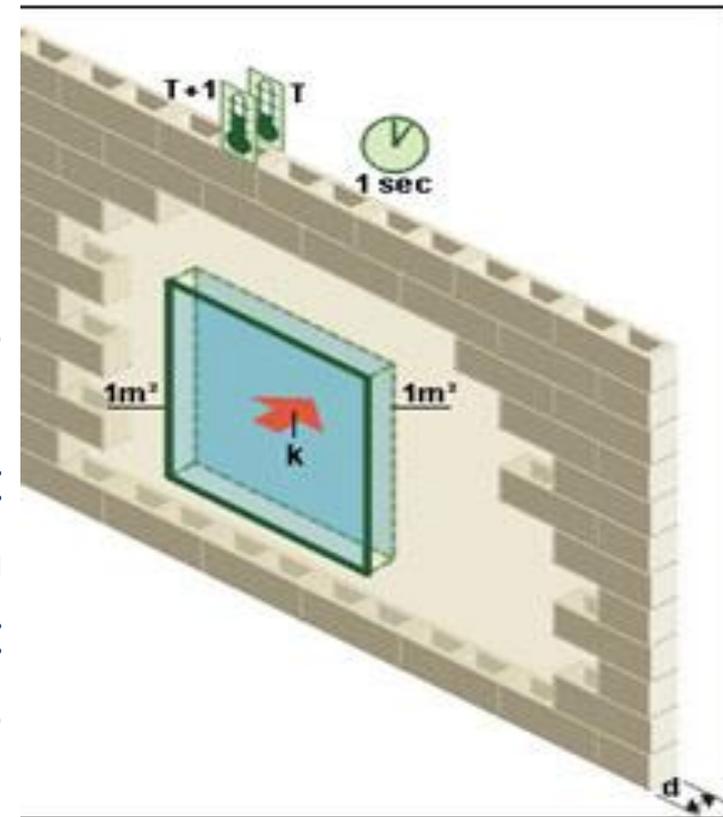
Tableau 4 : Conductivité thermique de quelques matériaux usuels

Matériaux	Conductivité thermique (W/m.K)	Matériaux	Conductivité thermique (W/m.K)
Cuivre	380	Plâtre	0.25
Aluminium	230	Bois dur (chêne)	0.23
Fer	72	Bois tendre (sapin)	0.12
Granit	3.5	Isolants	Isolants à base de fibres végétales
Béton armé	2.3		Polystyrène expansé
Calcaire ferme	1.7		Laines minérales
Verre	1.16		polyuréthane
			0.040 – 0.060
			0.030 – 0.040
			0.022 – 0.025

8.2. Le coefficient de transmission surfacique du matériau:

Le coefficient de **transmission surfacique** « K » ou « U » s'exprime en $W/m^2.K$ et traduit **la quantité de chaleur** s'échappant au travers d'un matériau sur :

- $1 m^2$ d'une couche de matériau,
 - d'une épaisseur déterminée,
 - en 1 seconde,
 - lorsque la différence de température entre les deux faces est de **1 K** ($1 K = 1^\circ C$).
- Le coefficient U sert à caractériser les déperditions thermiques d'une paroi.
- Plus Le coefficient de transmission est élevé, plus la couche laisse passer la chaleur. Par contre, Plus le coefficient est faible, moins il y a de déperdition et plus la paroi est performante thermiquement.



8. Propriétés thermiques à la conduction des matériaux isolants

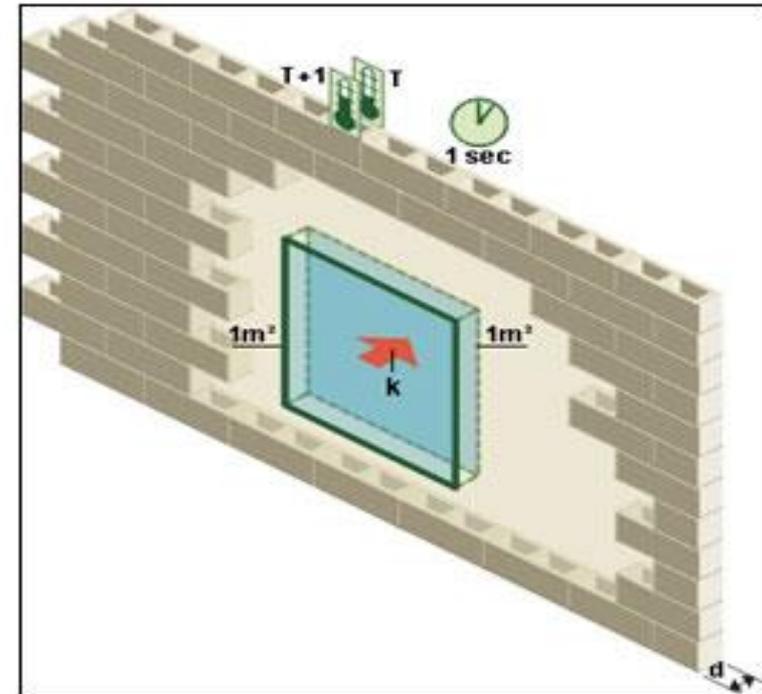
- Pour un matériau homogène :

$$K = \lambda/e$$

où e = épaisseur de la paroi.

Exemple:

$K = 0.4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, ceci représente une perte de **flux thermique** de **0.4 Watt** pour **1 m² de paroi** quand la **différence de température** entre les deux ambiances que sépare la paroi est de **1 Kelvin**.



8.3. La résistance thermique du matériau (R):

C'est la **résistance qui s'oppose au passage de la chaleur** au travers d'un matériau (elle caractérise la capacité d'un matériau à ralentir le transfert de chaleur réalisé par conduction) et elle s'exprime en $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$.

- Pour un matériau homogène :

$R = e/\lambda$: c'est **l'inverse** du coefficient de transmission : $R = 1 / K$

- Plus la **résistance thermique est élevée**, plus le **matériau est isolant**.
- Dans la pratique et dans le cadre du marquage, la résistance thermique des isolants thermiques doit être indiquée sur les produits par le fabricant. Il est aussi possible d'estimer la résistance thermique par le calcul.

Exemple:

$R = 2,5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$, ceci signifie que **2,5 m² de surface** sont **nécessaires** pour le **passage de 1 Watt** de flux de chaleur quand la **différence de température** entre les deux ambiances que sépare le système (généralement une paroi) est de **1 Kelvin** (ou 1 degré Celsius).

Exercice 1

Déterminer l'épaisseur nécessaire de chacun des matériaux suivants pour obtenir la même résistance thermique $R = 2,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ pour tous les matériaux.

Calculer le coefficient de transmission thermique pour chaque matériau avec une épaisseur de 10 cm

Tableau 5 : Conductivité thermique de quelques matériaux usuels

Matériaux	Conductivité thermique λ (W/m.K)	Epaisseur équivalente (cm) pour obtenir avec différent matériaux une résistance thermique $R= 2,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
Polyuréthane	0.022	
Polystyrène expansé	0.032	
Laine minérale		
Isolants à base de fibres naturelles	0.05	
Béton cellulaire	0.12	
Bois	0.22	
Plâtre	0.25	
Verre	1.16	
Béton	1.75	
Béton armé	2.3	
Granit	3.5	

Tableau 6 : Conductivité thermique de quelques matériaux usuels

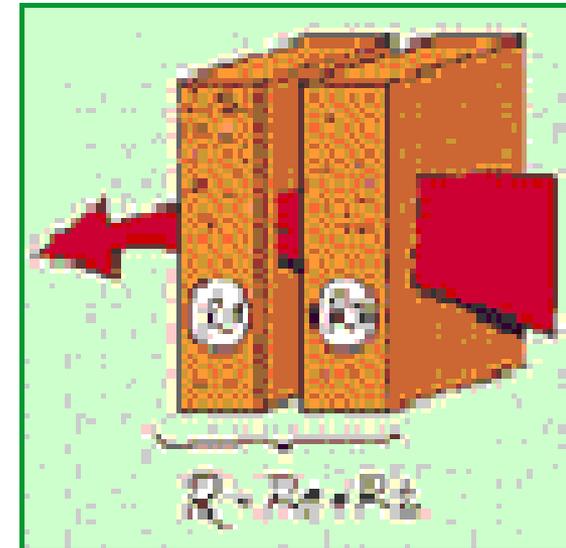
Matériaux	Conductivité thermique λ (W/m.K)	Epaisseur (cm)	Coefficient U (W/m ² .K)
Polyuréthane	0.022	10	
Polystyrène expansé	0.032		
Laine minérale			
Isolants à base de fibres naturelles	0.05		
Béton cellulaire	0.12		
Bois	0.22		
Plâtre	0.25		
Verre	1.16		
Béton	1.75		
Béton armé	2.3		
Granit	3.5		

9. Résistance thermique à la **conduction** pour un mur composé:

La résistance thermique à la **conduction** d'un mur constitué de plusieurs couches superposées, thermiquement homogènes et perpendiculaires au flux de chaleur, est la **somme des résistances thermiques individuelles** des différents matériaux (R_1, R_2, R_3, \dots) dues à la conduction :

$$R = \sum R_i = \sum e_i / \lambda_i$$

- Pour un mur composé de plusieurs couches superposées, il est à noter que **seules les résistances thermiques individuelles s'ajoutent**. Par contre, les coefficients de **transmission surfacique individuels ne s'ajoutent pas**.
- Dans la pratique, le calcul de la résistance thermique est un préalable au calcul du coefficient de transmission surfacique d'une paroi de plusieurs couches superposées.



Exercice 2

Soit un mur en béton de 15 cm d'épaisseur. Sur le coté intérieur, un isolant thermique et une plaque de plâtre préfabriqué de 1 cm d'épaisseur.

- Calculer le coefficient de transmission surfacique U (par conduction) obtenu avec 5 cm d'épaisseur de laine de verre utilisée comme isolant.
- Si on utilise la mousse de polyuréthane comme isolant, quelle est son épaisseur pour permettre d'obtenir le même coefficient de transmission surfacique U trouvé précédemment.
- Déterminer la conductivité thermique d'un isolant utilisé avec 6 cm d'épaisseur pour obtenir un coefficient de transmission thermique U (par conduction) = $0.5 \text{ W/m}^2.\text{K}$

Les données :

Matériaux	Conductivité thermique (W/m.K)
Béton	1.75
Plâtre	0.25
Laine de verre	0.039
Polyuréthane	0.022

Exercice 3

Pour améliorer l'isolation thermique d'un mur de façade constitué d'une maçonnerie de parpaing ($R = 0.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$) de 20 cm d'épaisseur recouvert du côté extérieur d'un enduit de mortier hydraulique ($\lambda = 1.15 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) de 2 cm d'épaisseur, on utilise par l'intérieur le complexe isolant Calibel SPV 13 de conductivité thermique = $0,034 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Ce produit est disponible dans les épaisseurs 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm, 80 mm, 100 mm.

- La conductivité de la laine de verre en rouleau est de $0,04 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Quelle épaisseur de laine de verre permettrait d'obtenir une résistance thermique (par conduction) équivalente à celle des panneaux Calibel 30 mm ? (le résultat sera donné en centimètre).
- Le maître d'œuvre exige que le coefficient de transmission surfacique K (par conduction) du mur soit inférieur ou égal à $0,37 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Déterminer l'épaisseur d'isolant Calibel qu'il faut choisir pour atteindre cette exigence.

10. Transmission de chaleur au travers d'une paroi plane homogène

Un bâtiment est un ensemble de volumes d'air séparés par des parois, sièges de transferts thermiques (couplage de différents flux de chaleur – **conductif, convectif, radiatif** – en provenance des environnements extérieur et intérieur).

La connaissance du **comportement thermique** d'une paroi en réponse à des sollicitations est donc utile à la compréhension du comportement thermique d'un bâtiment.

Une paroi homogène séparant deux volumes d'air thermiquement différents est le siège des trois modes de transfert de chaleur : **conduction dans la paroi, rayonnement et convection sur les deux faces** de la paroi.

10. Transmission de chaleur par trois modes au travers d'une paroi plane homogène

En thermique du bâtiment simplifiée, on s'intéresse quasiment toujours à des parois planes séparant un **volume intérieur** et un **milieu extérieur**, et on ne considère que le **régime permanent**. La figure 1 schématise ces échanges.

En **régime permanent**, les **températures** et les **flux** de chaleur sont **invariants** en tout point d'une paroi plane. Et le flux thermique **se conserve** : le flux thermique entrant par la surface intérieure est égal au flux qui traverse la paroi et est égal au flux sortant par la surface extérieure.

10. Transmission de chaleur par trois modes au travers d'une paroi plane homogène

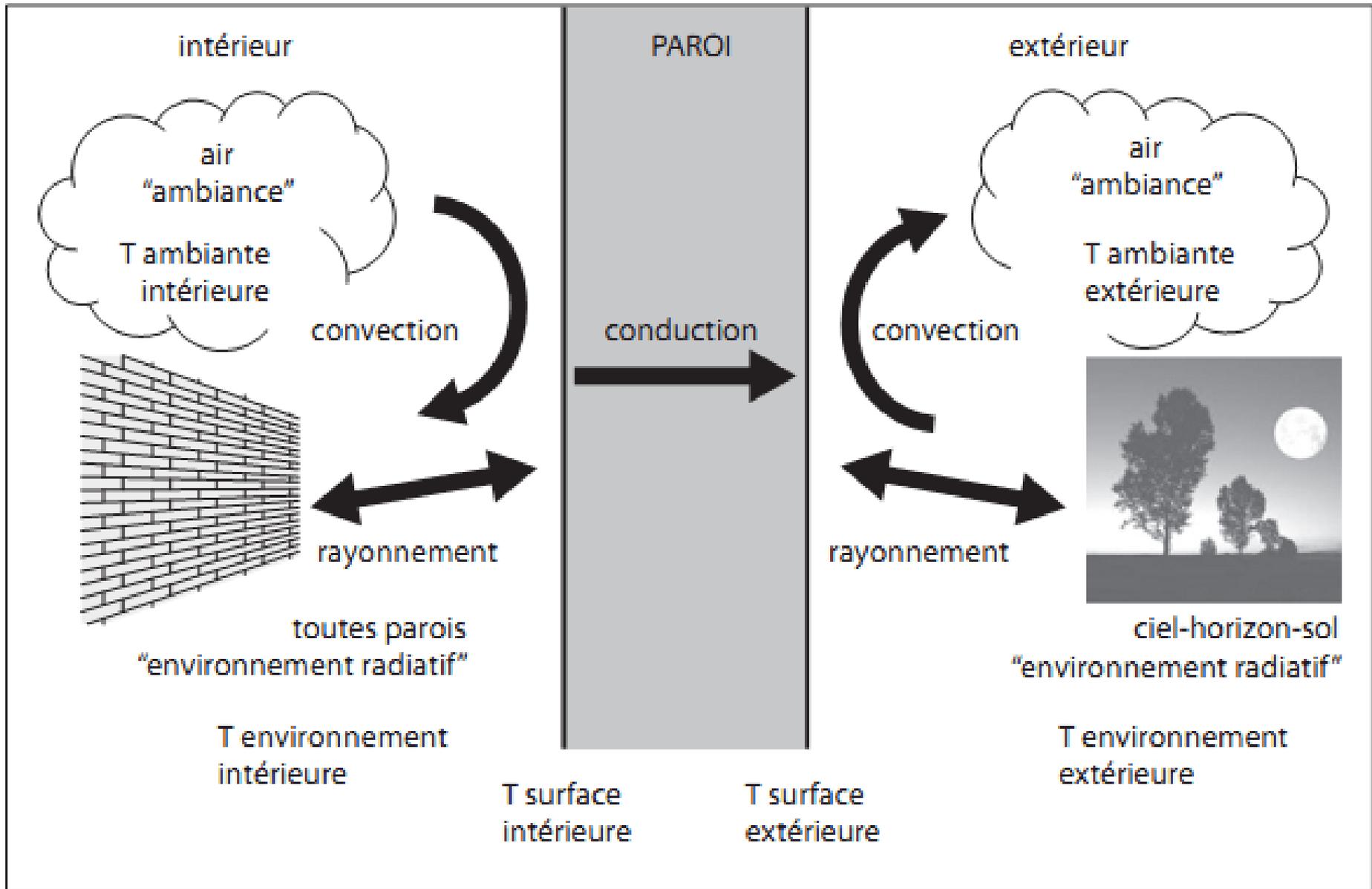


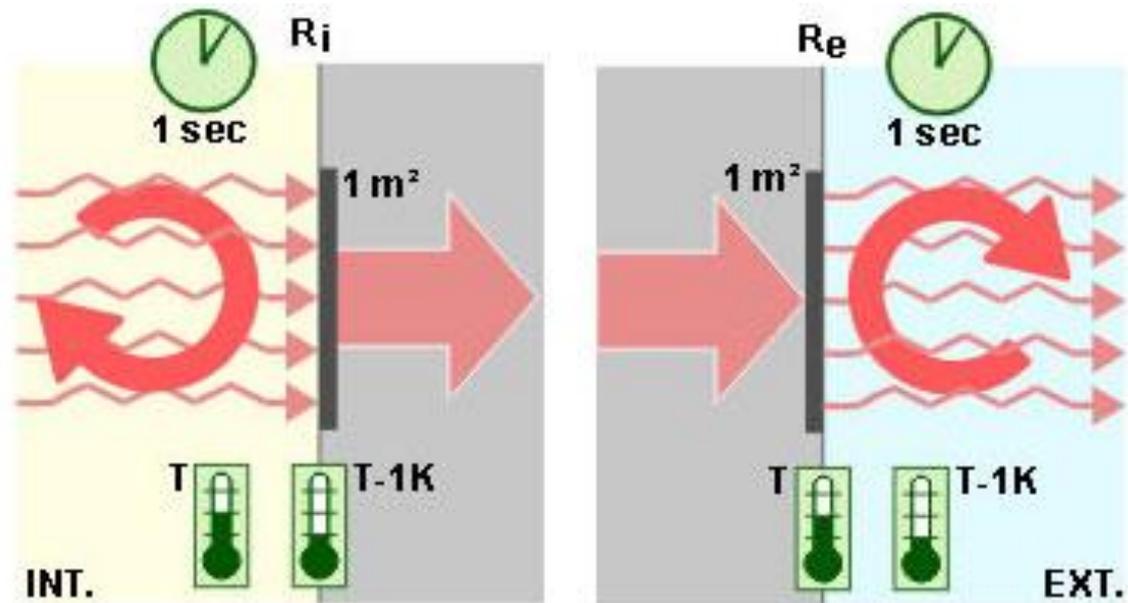
Figure 1. Les trois modes de transfert de chaleur sur une paroi

11. Échange thermique par convection et rayonnement d'une paroi plane homogène

11.1. Coefficient d'échange thermique convectif d'une paroi

le coefficient d'échange thermique convectif « h_c » est la quantité d'énergie ou de **chaleur transférée** par **convection** entre **1m²** de paroi et l'air environnant pendant **une seconde** lorsqu'il existe un écart de température de **1 k** (1 °C) entre la face de la **paroi** et **l'air** environnant. Il s'exprime en **W/m².K**

Le coefficient d'échange convectif « h_c » dépend, entre autres, de la **direction** du flux de chaleur, de la **rugosité** de la surface, de la **vitesse de l'air** le long de celle-ci, et de la **température ambiante**.



11. Échange thermique par convection et rayonnement d'une paroi plane homogène

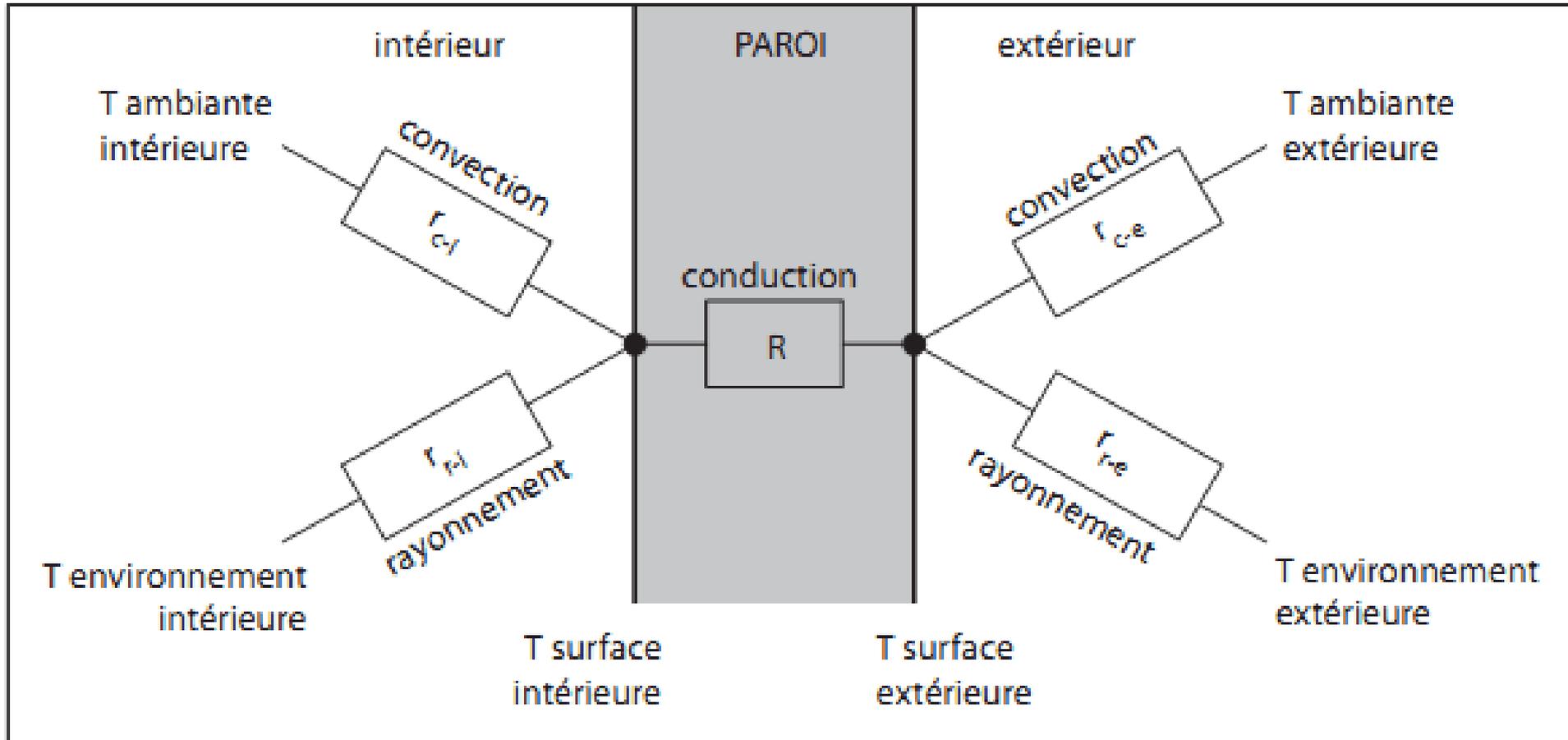


Figure.2 Représentations des transferts de chaleur sur une paroi

11.1.1. Coefficient d'échange convectif intérieur

Le coefficient d'échange convectif intérieur « h_{ci} » : si la chaleur passe de l'air intérieur vers la surface intérieure de la paroi

En première approximation, les valeurs suivantes (tableau 7) sont adoptées à l'intérieur du bâtiment :

Tableau 7 : Coefficient d'échange convectif intérieur « h_{ci} »

Type du flux de chaleur :	Coefficient d'échange Convectif intérieur « h_{ci} » (en $W/m^2.K$)
ascendant (à partir d'une dalle chauffante, par exemple)	5,0
horizontal (paroi verticale)	2,5
descendant (à partir d'un plafond chauffé, par exemple)	0,7

11.1.2. Coefficient d'échange convectif extérieur

Le coefficient d'échange convectif extérieur « h_{ce} » : si la chaleur passe de la **surface extérieure** de la paroi vers **l'air extérieur**.

À l'extérieur, l'effet du vent prédomine. L'approximation suivante est proposée :

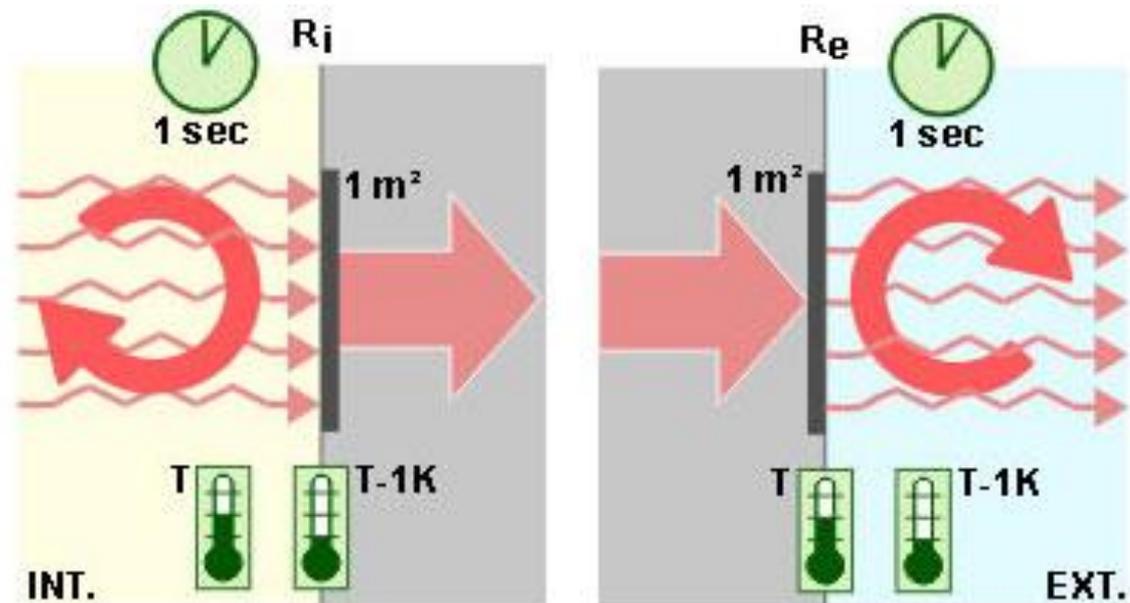
$$h_{ce} = 4 + 4 V$$

Où V est la **vitesse du vent près de la surface** en mètres par seconde.

11. Échange thermique par convection et rayonnement d'une paroi plane homogène

11.2. Coefficient d'échange thermique radiatif d'une paroi

Le coefficient d'échange thermique radiatif « h_r » est la quantité d'énergie ou de **chaleur** transmise par **rayonnement** entre **1m²** de paroi et **son environnement radiatif** (tout ce qui envoie du rayonnement sur la paroi) pendant **une seconde** lorsqu'il existe un écart de température de **1 k** (1 °C) entre la **face** de la paroi et son **environnement radiatif**. Il s'exprime en **W/m².K**



Échange thermique par convection et rayonnement d'une paroi plane homogène

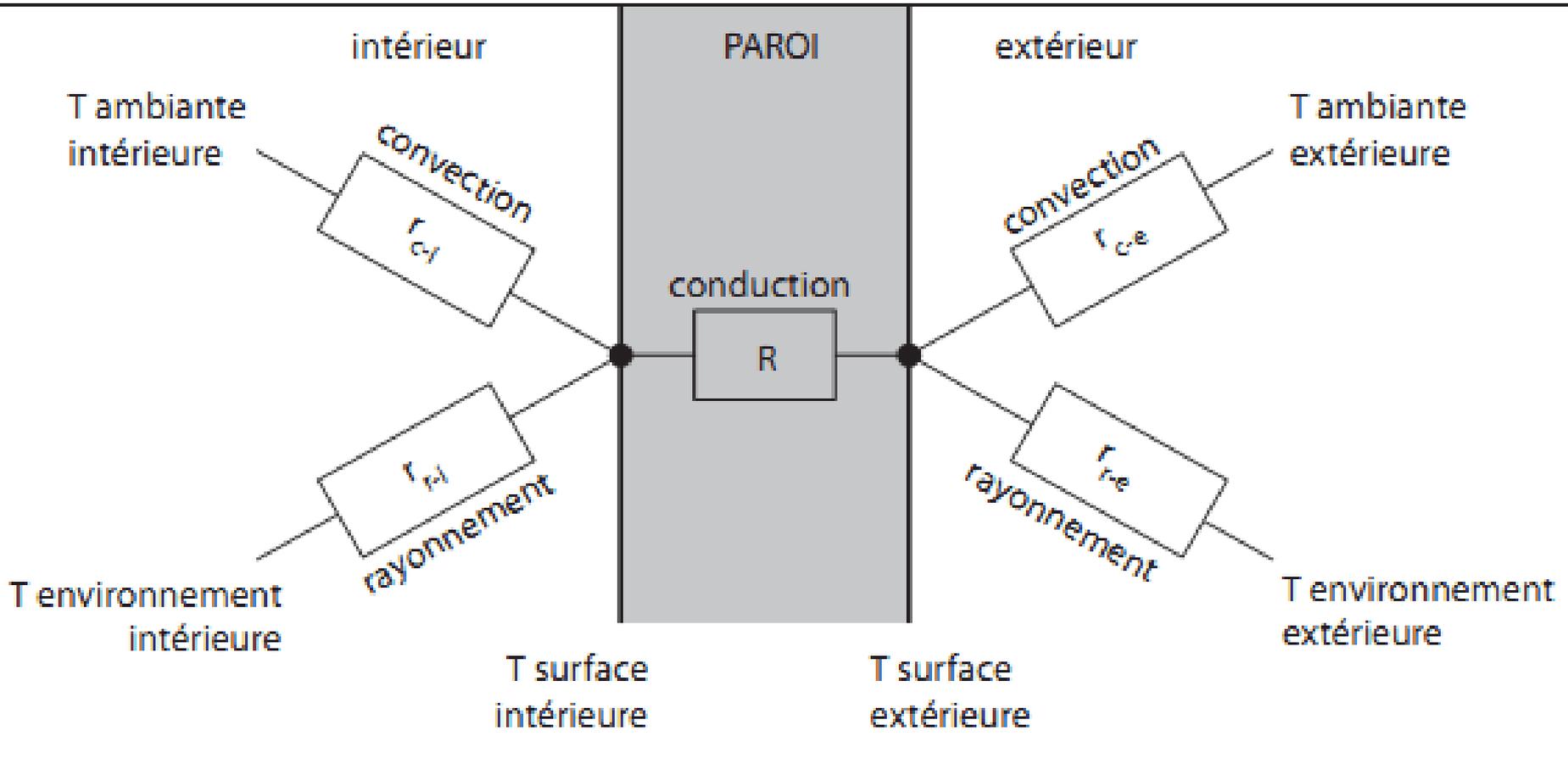


Figure.2 Représentations des transferts de chaleur sur une paroi

11.2. 1. Coefficient d'échange radiatif intérieur

Le coefficient d'échange radiatif intérieur « h_{ri} » : si la chaleur passe de l'**environnement radiatif intérieur** vers la **surface intérieure** de la paroi.

11.2. 2. Coefficient d'échange radiatif extérieur

Le coefficient d'échange radiatif extérieur « h_{re} » : si la chaleur passe de la **surface extérieure** de la paroi vers l'**environnement radiatif extérieur**.

11.3. Coefficient d'échange thermique superficiel d'une paroi

Pour la simplification et comme, les deux coefficients d'échange convectif et radiatif vont toujours en parallèle, ils sont réunis sous l'appellation de **coefficient d'échange thermique superficiel** noté « **h** ».

$$h = h_c + h_r$$

Le coefficient d'échange thermique superficiel «**h**» est la quantité d'énergie ou de **chaleur** transmise par **convection** et par **rayonnement à la fois** entre **1m²** de paroi et **son environnement** (convectif et radiatif) pendant **une seconde** lorsqu'il existe un écart de température de **1 k** (1 °C) entre la **face** de la paroi et **son environnement**. Il s'exprime en **W/m².K**.

Le coefficient d'échange thermique superficiel est en fonction à la fois des **caractéristiques intrinsèques de la paroi** et de **son environnement** (sol, vide sanitaire, sous-sol non chauffé ...) et il dépend aussi du **sens du flux** de chaleur et de l'**orientation** de la paroi.

11. Échange thermique par convection et rayonnement d'une paroi plane homogène

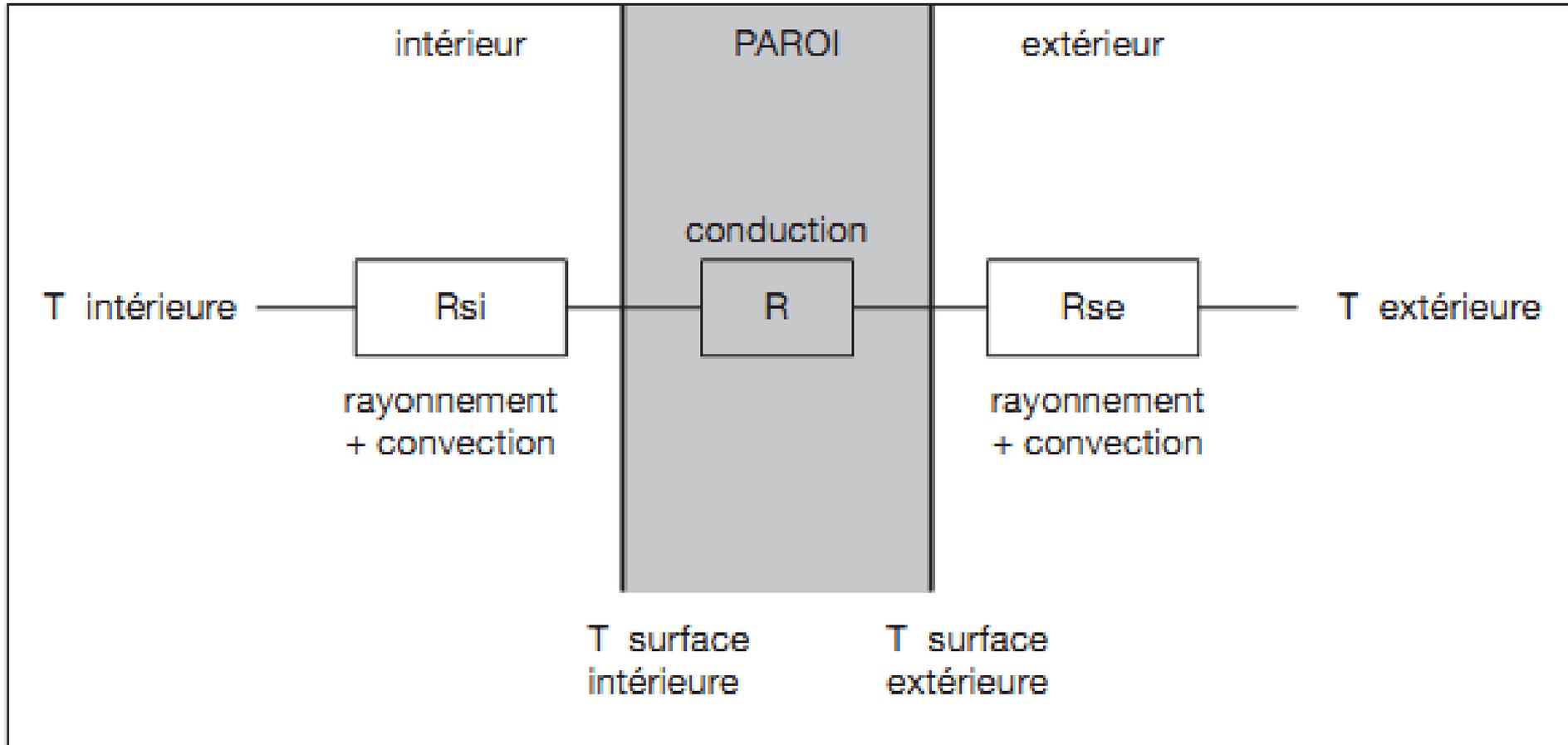


Figure 3. Représentation simplifiée des transferts de chaleur sur une paroi. Les températures intérieure et extérieure sont des températures opératives, c'est une approche simplifiée à l'extrême

11.3. 1. Coefficient d'échange superficiel intérieur

Le coefficient d'échange superficiel intérieur « h_i » : si la chaleur passe de l'**environnement intérieur** (convectif et radiatif) vers la **surface intérieure** de la paroi. Il représente la somme des coefficients d'échange intérieur **convectif** « h_{ci} » et **radiatif** « h_{ri} »

$$h_i = h_{ci} + h_{ri}$$

11.3. 2. Coefficient d'échange superficiel extérieur

Le coefficient d'échange superficiel extérieur « h_e » : si la chaleur passe de la **surface extérieure** de la paroi vers l'**environnement extérieur** (convectif et radiatif). Il représente la somme des coefficients d'échange extérieur **convectif** « h_{ce} » et **radiatif** « h_{re} »

$$h_e = h_{ce} + h_{re}$$

11.4. Résistance d'échange thermique superficiel d'une paroi

La résistance d'échange thermique superficiel « R_s » est égal à l'inverse du coefficient d'échange thermique superficiel « h ». Elle s'exprime en $m^2.K/W$

$$R_s = 1/h$$

Dans la pratique et pour des parois planes, les valeurs de résistances d'échange thermique superficiel « R_s » sont données dans le tableau 8, selon la réglementation thermique en vigueur.

11.4. 1. Résistance d'échange superficiel intérieur

La résistance d'échange thermique superficiel intérieur « R_{si} » est égal à l'**inverse** du coefficient d'échange thermique superficiel intérieur « h_i »

$$R_{si} = 1 / h_i$$

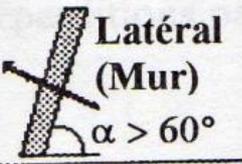
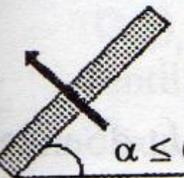
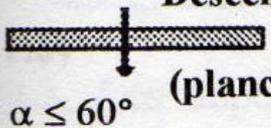
11.4. 2. Résistance d'échange superficiel extérieur

La résistance d'échange thermique superficiel extérieur « R_{se} » est égal à l'**inverse** du coefficient d'échange thermique superficiel extérieur « h_e »

$$R_{se} = 1 / h_e$$

11. Échange thermique par convection et rayonnement d'une paroi plane homogène

Tableau 8. Résistances d'échanges thermiques superficiels intérieur et extérieur d'une paroi opaque

l en $m^2 \cdot ^\circ C/W$ h	Paroi en contact avec :			Paroi en contact avec :		
	- l'extérieur, - un passage ouvert, - un local ouvert.			- un autre local, chauffé ou non chauffé, - un comble, - un vide sanitaire.		
	$1/h_i$	$1/h_e$	$1/h_i + 1/h_e$	$1/h_i$	$1/h_e$	$1/h_i + 1/h_e$
 Latéral (Mur) $\alpha > 60^\circ$	0,11	0,06	0,17	0,11	0,11	0,22
 Ascendant (toiture) $\alpha \leq 60^\circ$	0,09	0,05	0,14	0,09	0,09	0,18
 Descendant (plancher) $\alpha \leq 60^\circ$	0,17	0,05	0,22	0,17	0,17	0,34

11. Échange thermique par convection et rayonnement d'une paroi plane homogène

N.B

- Si la paroi donnant sur un local chauffé ou non chauffé, un comble, un vide sanitaire, R_{si} s'applique des 2 cotés.
- Un local est dit ouvert si le rapport de la surface totale de ses ouvertures permanentes sur l'extérieur, à son volume, est égal ou supérieur à $0,005 \text{ m}^2/\text{m}^3$

Exercice 4

Soit une chambre d'habitation, fait partie d'un appartement qui se situe au dernier étage d'un bâtiment de R+1. Le mur de façade, réalisé en brique creuse ($\lambda=0.50$ W/m.K) de 15 cm d'épaisseur recouverte d'un enduit de mortier hydraulique ($\lambda= 1.15$ W/m.K) de 2 cm d'épaisseur. Les planchers (bas et haut) sont composés de dalle pleine en béton ($\lambda=2.40$ W/m.K) (12 cm d'épaisseur), d'un revêtement en carrelage ($\lambda=1.05$ W/m.K) (2 cm d'épaisseur), posé sur un lit de sable ($\lambda=2.00$ W/m.K) (4 cm d'épaisseur), et sur la face inférieure un enduit en plâtre ($\lambda=0.25$ W/m.K) (2 cm d'épaisseur),

1. Calculer les coefficients de transmission surfacique du mur de façade et des planchers.
2. Déduire les coefficients d'échange thermique superficiel du mur de façade et des planchers.

12. Résistance thermique d'une lame d'air par trois modes

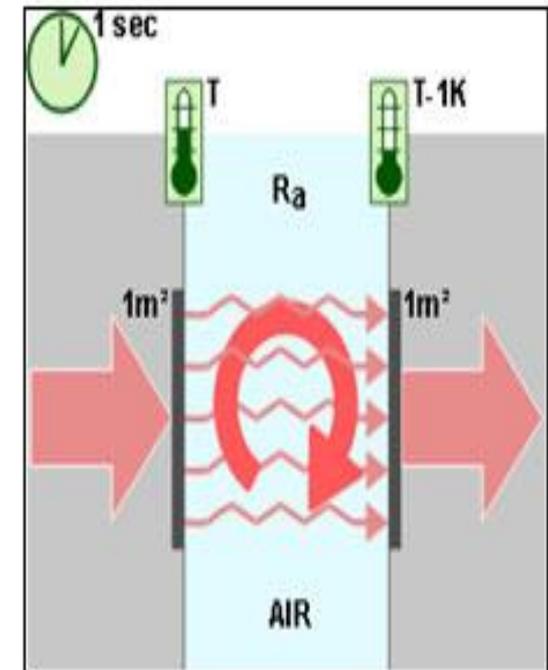
Lame d'air pour l'isolation thermique : est un espace **libre fermé** (**air immobile**) entre deux parois parallèles.



12. Résistance thermique d'une lame d'air (R_a)

La résistance thermique d'une lame d'air plane « R_a » est considérée comme l'inverse de la **quantité de chaleur transmise** en régime permanent de la face chaude de la couche d'air vers la face froide, par **conduction**, **convection** et **rayonnement**, par unité de temps, par unité de surface et pour un écart de 1 K entre les températures des faces chaudes et froides.

R_a s'exprime en $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$.



12. Résistance thermique d'une lame d'air par trois modes

12.1. Résistance thermique d'une lame d'air non ventilée

Une lame d'air peut être considérée comme **non ventilée** si les ouvertures **ne permettent pas un écoulement d'air** traversant (exemple, un double vitrage) et si elles **ne dépassent pas** :

- 500 mm² par m de longueur comptée horizontalement pour les lames d'air verticales,
- 500 mm² par m² de surface pour les lames d'air horizontales.

Tableau 9. Résistances thermiques d'une lame d'air non ventilée.

Epaisseur de la lame d'air (mm)	Résistance thermique Ra (m ² .K/W)		
	Flux ascendant	Flux horizontal	Flux descendant
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

12.2. Résistance thermique d'une lame d'air peu (faiblement) ventilée

Une lame d'air est dite **faiblement ventilée** quand l'écoulement de l'air extérieur est limité du fait de la **dimension des ouvertures** est **comprise dans les plages suivantes** :

- $>500 \text{ mm}^2$ mais $<1500 \text{ mm}^2$ par m de longueur comptée horizontalement pour les lames d'air verticales,
- $>500 \text{ mm}^2$ mais $<1500 \text{ mm}^2$ par m^2 de surface pour les lames d'air horizontales.

La résistance thermique d'une lame d'air **faiblement ventilée** est égale à **la moitié** de celle correspondant à une lame d'air **non ventilée**. Néanmoins, si la résistance thermique des couches situées entre la lame d'air et l'extérieur est supérieure à $0,15 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, cette résistance doit être remplacée par la valeur de $0,15 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

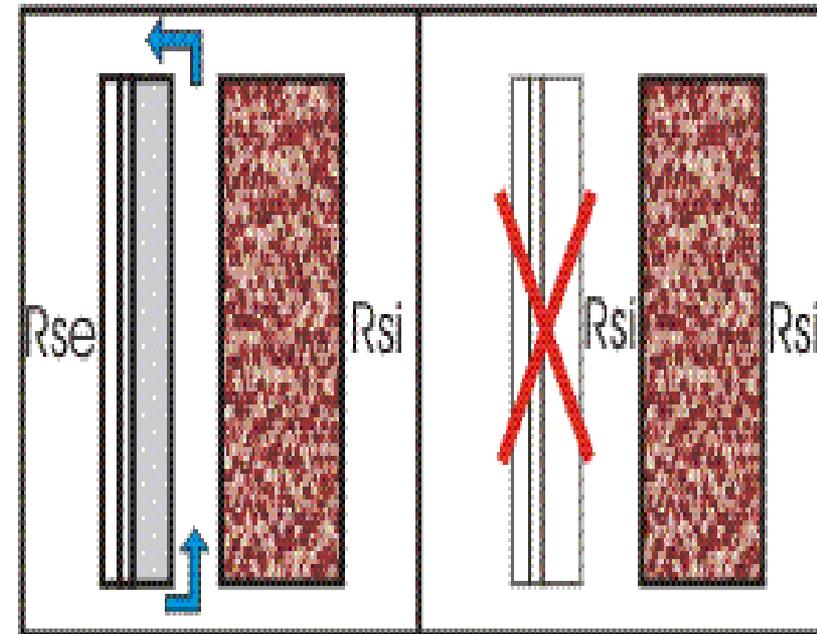
12.3. Résistance thermique d'une lame d'air très (fortement) ventilée

Il s'agit de lame d'air dont les **ouvertures vers l'extérieur excèdent** :

- 1500 mm² par m de longueur comptée horizontalement pour les lames d'air verticales,
- 1500 mm² par m² de surface pour les lames d'air horizontales.

Dans le cas d'une lame d'air **très ventilée**, on considère que :

- $R_a = 0$ m²K/W
- on **néglige** la **résistance** thermique de toutes les **couches situées** entre la lame d'air et l'extérieur
- La température dans la lame d'air **est égale** à la température extérieure.
- La **résistance thermique d'échange** entre la face chaude de la lame d'air et la lame d'air vaut R_i .



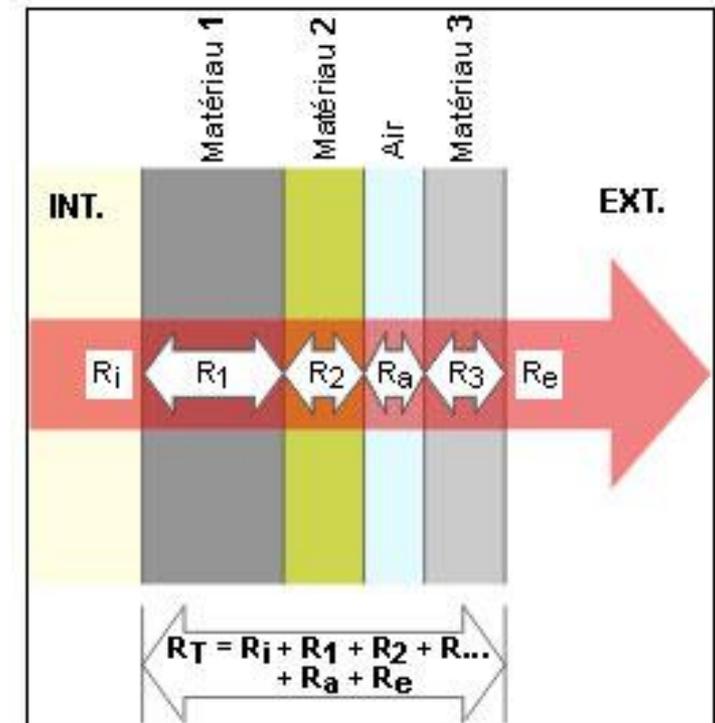
13. Résistance thermique totale par trois modes au travers d'un mur composé

13.1. Propagation de la chaleur à travers un mur

Un mur séparant deux ambiances de températures différentes, constitue un obstacle plus ou moins efficace au flux de chaleur qui va s'établir de la chaude vers la froide.

La chaleur va devoir :

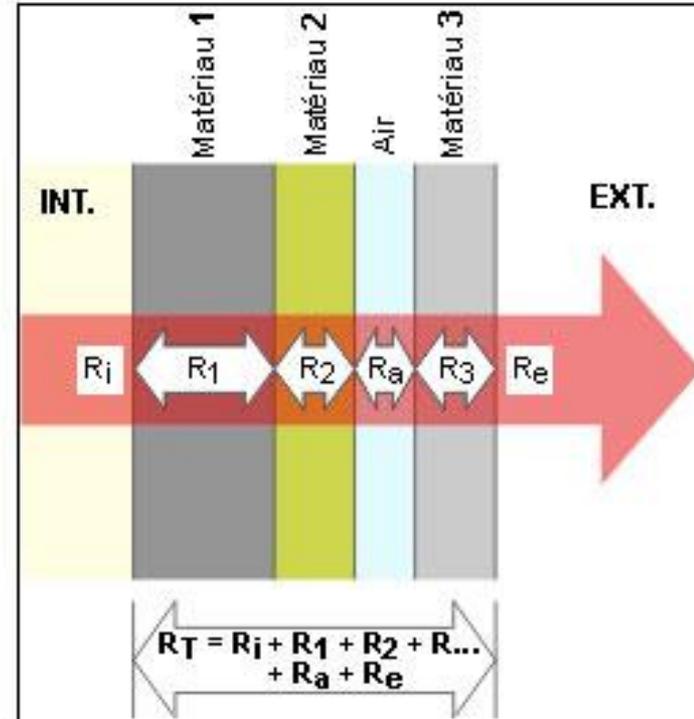
- pénétrer dans le mur,
- traverser les différentes couches de matériaux (parois) constituant le mur,
- traverser des couches d'air éventuelles,
- et sortir du mur.



13.2. Résistance thermique totale « R_T » d'un mur composé

La résistance thermique totale du mur « R_T » est égal à la **somme** :

- de l'ensemble des résistances des différents matériaux (R_1, R_2, R_3, \dots) due à la conduction,
- la résistance thermique d'échange superficiel intérieur et extérieur (R_{si} et R_{se}) due à la fois au rayonnement et à la convection,
- la résistance thermique d'une lame d'air (R_a) (le cas échéant) due à la fois à la conduction, à la convection et au rayonnement.



$$R_T = \sum R_i + R_{si} + R_{se} + R_a$$

13.3. Coefficient de transmission thermique total « U_T » d'un mur composé

Le coefficient de transmission thermique d'un mur composé en partie courante s'obtient par le calcul, c'est l'inverse de la résistance thermique totale du même mur.

$$U_T = 1/R_T$$

- Pour un mur composé de plusieurs couches superposées, il est à noter que **seules les résistances thermiques** (dues aux trois modes de transfert de chaleur) **s'additionnent**. Par contre, les coefficients de **transmission surfacique ne s'ajoutent pas**.
- Dans la pratique, le calcul de la résistance thermique totale est un préalable au calcul du coefficient de transmission surfacique total d'une paroi de plusieurs couches superposées.

Exercice N° 5 :

Soit un mur de façade, réalisé en béton de 15 cm ($\lambda = 1.75 \text{ w/m}^\circ\text{C}$), un isolant et une plaque de plâtre préfabriqué de 1 cm ($\lambda = 0.70 \text{ w/m}^\circ\text{C}$).

1. Quel est le coefficient K du mur, si on utilise laine de verre ($\lambda = 0.041 \text{ w/m}^\circ\text{C}$) ($e = 5 \text{ cm}$) comme isolant ?
2. Quelle épaisseur de l'isolant de mousse de polyuréthane ($\lambda = 0.029 \text{ w/m}^\circ\text{C}$) permettra d'avoir le même coefficient K obtenu précédemment?
3. Quelle valeur du coefficient de conductivité d'un isolant utilisé avec 6 cm d'épaisseur faut-il pour obtenir $K = 0.5 \text{ w/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$?

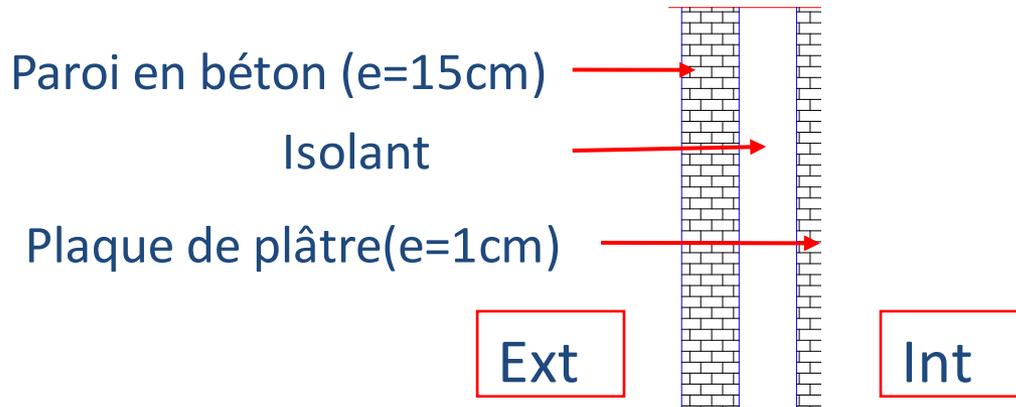


Fig.1. Mur composé

Exercice N° 6:

Soit un mur de façade, réalisé en béton de 15 cm ($\lambda = 1.75 \text{ w/m}^\circ\text{C}$), une lame d'air considérée non ventilée et une plaque de plâtre préfabriqué de 1 cm ($\lambda = 0.70 \text{ w/m}^\circ\text{C}$).

1. Quel est le coefficient K du mur avec une lame d'air de 5 cm d'épaisseur ?
2. Quelle épaisseur de la lame d'air (faiblement ventilée) permettra d'avoir le même coefficient K obtenu auparavant ?
3. Si on a une lame d'air fortement ventilée, quelle épaisseur de la plaque de plâtre permettra aussi d'obtenir le même coefficient K ?

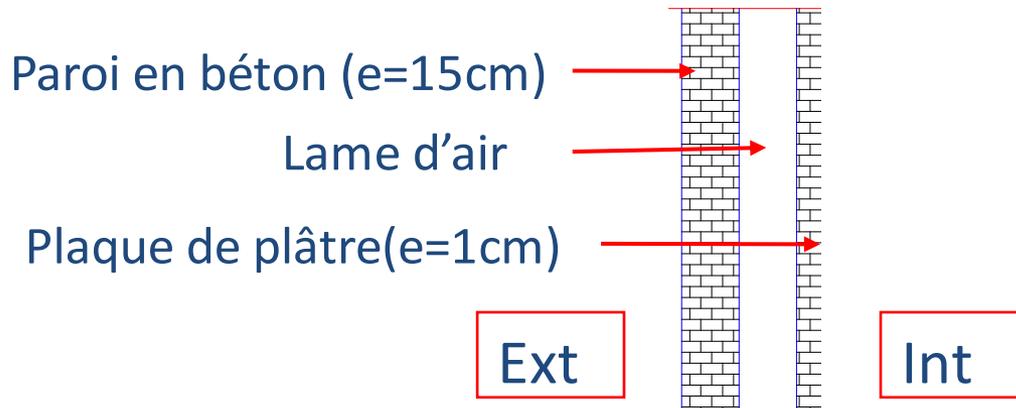


Fig.1. Mur composé

14.1. Flux thermique conductif (Fuite de la chaleur)

Le flux de chaleur conductif « ϕ_{cond} » (ϕ) est la quantité d'énergie ou de chaleur passant par conduction au travers de 1m^2 de paroi pendant une seconde lorsqu'il existe un **écart de température** entre ses 2 faces. Il s'exprime en W/m^2 .

$$\phi_{\text{cond}} = U \cdot \Delta T = (\lambda/e) \Delta T$$

Où

e : est la distance en mètres entre deux points du matériau entre lesquels a lieu ce transfert,

λ : la conductivité thermique du matériau (en $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$).

ΔT : l'écart de température entre les surfaces intérieure et extérieure de la paroi (en $^{\circ}\text{C}$ ou K),

$$\Delta T = (T_{\text{surface intérieure}} - T_{\text{surface extérieure}})$$

La température absolue est mesurée en Kelvin [K]. La relation de passage entre $^{\circ}\text{C}$ et K est : $T [\text{K}] = T [^{\circ}\text{C}] + 273,15$

Les écarts de température sont identiques en Kelvin et en degrés Celsius : $\Delta T [\text{K}] = \Delta T [^{\circ}\text{C}]$

14. Flux de chaleur par trois modes au travers d'une paroi plane homogène

La **quantité de chaleur** s'échappant par conduction à travers une paroi **diminue** lorsque :

- La **conductivité** thermique **décroit**,
- L'**écart de température** entre les 2 faces de la paroi **diminue**,
- L'**épaisseur** de la paroi **augmente**.

Dans le domaine du bâtiment, les leviers pour limiter la fuite de chaleur sont la diminution de la valeur de la conductivité thermique et l'optimisation de l'épaisseur des parois.

14.2. Flux thermique convectif (Fuite de la chaleur)

Le flux de chaleur convectif « ϕ_{conv} » (ϕ) est la quantité d'énergie ou de chaleur transférée par convection entre 1m^2 de paroi et l'air environnant pendant une seconde lorsqu'il existe un **écart de température** entre la face de la paroi et l'air environnant. Il s'exprime en W/m^2 .

$$\phi_{\text{conv}} = h_c \cdot \Delta T$$

Où

h_c : est le coefficient d'échange convectif (en $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$),

N.B. L'air, le plus souvent appelé ambiance, alors la température ambiante est la température de l'air.

14.2.1. Flux thermique convectif intérieur

Le flux passe de l'air intérieur vers la surface intérieure de la paroi

$$\phi_{\text{conv-int}} = h_{\text{ci}} \cdot \Delta T$$

Où

h_{ci} : est le coefficient d'échange convectif intérieur (en $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$),

ΔT : l'écart de température entre la surface intérieure de la paroi et l'ambiance intérieure ($^{\circ}\text{C}$ ou K),

$$\Delta T = (T_{\text{ambiance intérieure}} - T_{\text{surface intérieure}})$$

14.2.2. Flux thermique convectif extérieur

Le flux passe de la surface extérieure de la paroi vers l'air extérieur.

$$\phi_{\text{conv-ext}} = h_{\text{ce}} \cdot \Delta T$$

Où

h_{ce} : est le coefficient d'échange convectif extérieur (en $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$),

ΔT : l'écart de température entre la surface extérieure de la paroi et l'ambiance extérieure ($^{\circ}\text{C}$ ou K),

$$\Delta T = (T_{\text{surface extérieure}} - T_{\text{ambiance extérieure}})$$

14.3. Flux thermique radiatif (Fuite de la chaleur)

Le flux de chaleur radiatif « ϕ_{rad} » (phi) est la quantité d'énergie ou de chaleur transmise par rayonnement entre 1m^2 de paroi et son environnement radiatif pendant une seconde lorsqu'il existe un **écart de température** entre la face de la paroi et son environnement radiatif. Il s'exprime en W/m^2 .

$$\phi_{\text{rad}} = h_r \cdot \Delta T$$

Où

h_r : est le coefficient d'échange radiatif (en $\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$),

ΔT : l'écart de température entre les **deux milieux matériels** : température de la surface de la paroi et température de son environnement radiatif (tout ce qui envoie du rayonnement sur la paroi). Cette dernière température sera notée T_{ER} (température d'environnement radiatif) (en $^{\circ}\text{C}$ ou K).

14.3.1. Flux thermique radiatif intérieur

Le flux passe de l'environnement radiatif intérieur vers la surface intérieure de la paroi.

$$\phi_{\text{rad-int}} = h_{\text{ri}} \cdot \Delta T$$

Où

h_{ri} : est le coefficient d'échange radiatif intérieur (en $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$),

ΔT : l'écart de température entre la surface intérieure de la paroi et l'environnement radiatif intérieur (en $^{\circ}\text{C}$ ou K),

$$\Delta T = (T_{\text{ER intérieur}} - T_{\text{surface intérieure}})$$

14.3.2. Flux thermique radiatif extérieur

Le flux passe de la surface extérieure de la paroi vers l'environnement radiatif extérieur.

$$\phi_{\text{rad-ext}} = h_{\text{re}} \cdot \Delta T$$

Où

h_{re} : est le coefficient d'échange radiatif extérieur (en $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$),

ΔT : l'écart de température entre la surface extérieure de la paroi et l'environnement radiatif extérieur (en $^{\circ}\text{C}$ ou K),

$$\Delta T = (T_{\text{surface extérieure}} - T_{\text{ER extérieur}})$$

14.4. Flux thermique superficiel (Fuite de la chaleur)

Le flux de chaleur superficiel « ϕ_s » (phi) est la quantité d'énergie ou de chaleur transmise par convection et par rayonnement à la fois entre 1m^2 de paroi et son environnement (convectif et radiatif) pendant une seconde lorsqu'il existe **un écart de température** entre la face de la paroi et son environnement (). Il s'exprime en W/m^2 .

$$\phi_s = h \cdot \Delta T$$

Où

h : est le coefficient d'échange superficiel (en $\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$),

ΔT : l'écart de température entre la surface de la paroi et celle de son environnement (convectif et radiatif) (en $^{\circ}\text{C}$ ou K).

La température d'environnement (convectif et radiatif) est la température résultant d'une **sorte de moyenne** entre les deux températures: ambiante et d'environnement radiatif « T_{ER} ». Cette nouvelle température est la **température opérative**, ou résultante sèche.

14.4.1. Flux thermique superficiel intérieur

Le flux passe de l'environnement (convectif et radiatif) intérieur vers la surface intérieure de la paroi.

$$\phi_{s-int} = h_i \cdot \Delta T$$

Où

h_i : est le coefficient d'échange superficiel intérieur (en $W/m^2.K$),

ΔT : l'écart de température entre la surface intérieure de la paroi et l'environnement (convectif et radiatif) intérieur (en $^{\circ}C$ ou K),

$$\Delta T = (T_{\text{résultante intérieure}} - T_{\text{surface intérieure}})$$

14.4.2. Flux thermique superficiel extérieur

Le flux passe de la surface extérieure de la paroi vers l'environnement (convectif et radiatif) extérieur.

$$\phi_{s\text{-ext}} = h_e \cdot \Delta T$$

Où

h_e : est le coefficient d'échange superficiel extérieur (en $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$),

ΔT : l'écart de température entre la surface extérieure de la paroi et l'environnement (convectif et radiatif) extérieur (en $^{\circ}\text{C}$ ou K),

$$\Delta T = (T_{\text{surface extérieure}} - T_{\text{résultante extérieure}})$$

15.1. Coefficient de transmission surfacique des parois opaques

Si la *paroi est homogène sur toute sa surface*, le coefficient U ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) à utiliser est celui calculé pour la partie courante qui représente la quantité de chaleur s'échappant au travers d'une paroi homogène de 1m^2 pour un différentiel de 1 degré.

Le coefficient de transmission **surfacique** d'un mur composé en partie courante s'obtient par le calcul, c'est l'inverse de la résistance thermique totale du même mur.

$$U = 1 / R_T$$

$$R_T = \sum R + R_i + R_e + R_a$$

Avec : $\sum R$: la somme des résistances thermiques individuelles de plusieurs couches **thermiquement homogènes** et **perpendiculaires** au flux de chaleur,

R_i , R_e : les résistances thermiques d'échange superficiel intérieur et extérieur

R_a : la résistance thermique d'une lame d'air.

15. Déperdition par transmission thermique à travers les parois opaques

Si la *paroi est hétérogène sur sa surface*, le coefficient U à utiliser dans les calculs est le coefficient **U moyen de la paroi** U_{moy} ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) qui représente la quantité de chaleur moyenne s'échappant au travers d'une **paroi hétérogène** de 1m^2 pour un différentiel de 1 degré. . Celui-ci est donné par la formule ci-après :

$$U_{\text{moy}} = \frac{\sum (U_i \cdot A_i)}{\sum A_i}$$

Où :

A_i (en m^2) est la surface de paroi dont le coefficient de transmission est égal à U_i ;

$\sum A_i$ (en m^2) est la surface intérieure totale de la paroi.

La méthode de calcul consiste en fait à **décomposer la paroi en éléments homogènes** dont on sait calculer le coefficient U .

15.2. Déperditions surfaciques par transmission à travers les parois séparant deux ambiances

Les déperditions surfaciques par transmission « D_s » à travers une paroi, pendant **une seconde** et pour une différence de température de **1°C** entre les ambiances que sépare cette paroi, sont données par la formule :

$$D_s = U \times A$$

Où :

D_s : (en W/°C) représente les déperditions surfaciques par transmission ;

U (ou U_{moy} si la paroi est hétérogène) (en W/m².°C) est le coefficient de transmission surfacique;

A (en m²) est la **surface intérieure** de la paroi

15.3. Pont thermique.

Un pont thermique est une partie de l'enveloppe du bâtiment où la résistance thermique, par ailleurs uniforme, est **modifiée de façon sensible** (sources supplémentaires de déperditions) par :

- La pénétration totale ou partielle de l'enveloppe du bâtiment par des matériaux ayant une **conductivité thermique différente** comme par exemple les systèmes d'attaches métalliques qui traversent une couche isolante ;
- un changement local de l'**épaisseur** des matériaux de la paroi ce qui revient à changer localement la résistance thermique ;
- une **différence entre les surfaces intérieure et extérieure**, comme il s'en produit aux liaisons entre parois (entre deux parois extérieures, entre une paroi intérieure et une paroi extérieure) ;

15. Déperdition par transmission thermique à travers les parois opaques

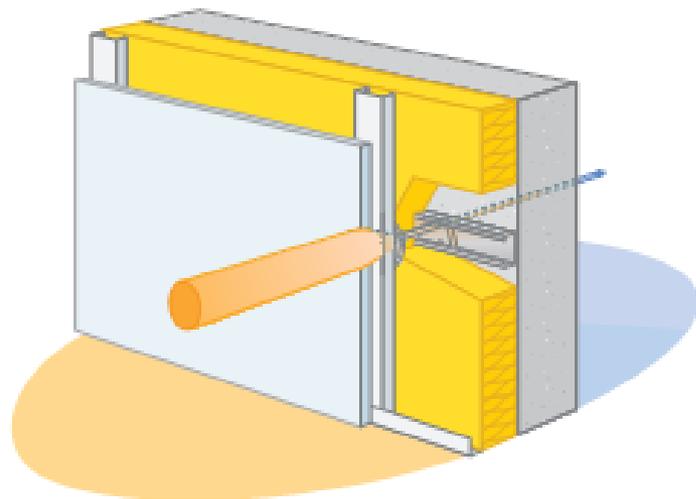
Les ponts thermiques points sont des faibles thermiques entraînent des déperditions supplémentaires qui peuvent dépasser, pour certains bâtiments, 40% des déperditions thermiques totales à travers l'enveloppe.

Un autre effet néfaste des ponts thermiques, souvent négligé, est le risque de condensation superficielle côté intérieur dans le cas où il y a abaissement des températures superficielles à l'endroit du pont thermique.

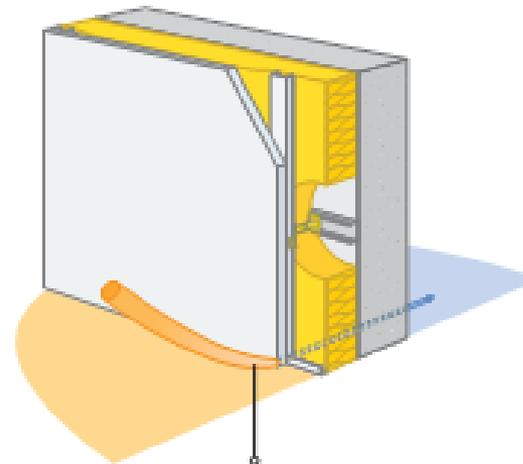
15.4. Ponts thermiques intégrés et ponts thermiques des liaisons

15.4.1. Pont thermique intégré : Élément intégré dans la paroi, donnant lieu à des déperditions thermiques supplémentaires, tels que les ossatures métalliques, appuis et autres accessoires.

Ponts thermiques intégrés

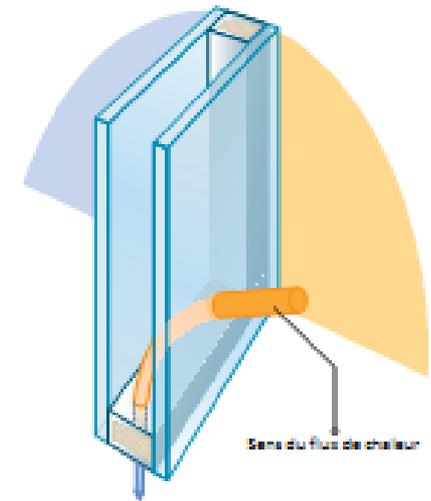


Appui métallique



Sens du flux de chaleur

Rail métallique

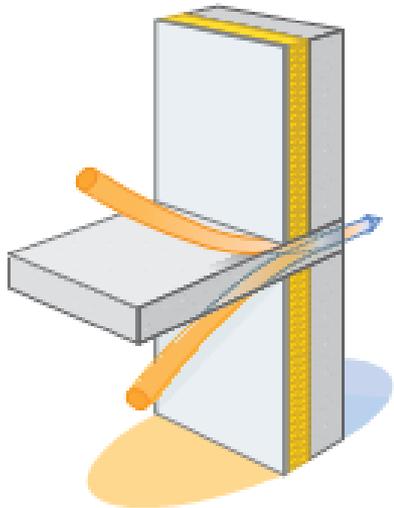


Sens du flux de chaleur

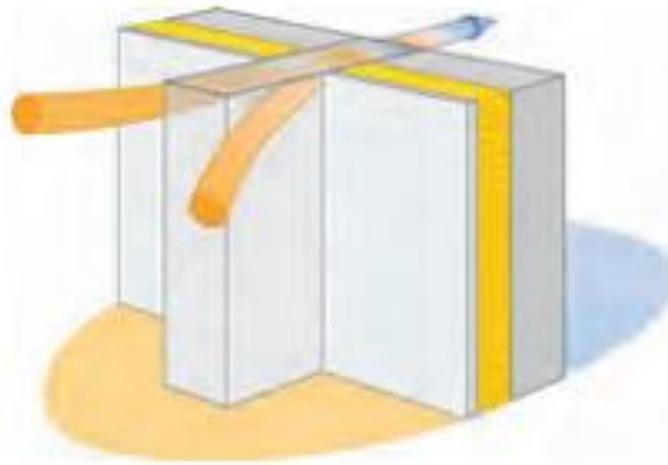
Espaceur de vitrage

15.4.2. Pont thermiques des liaisons

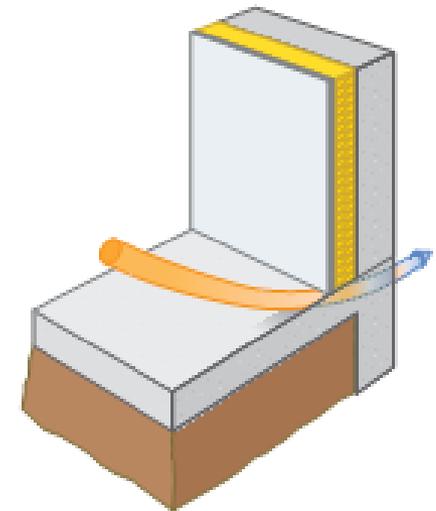
Ponts thermiques des liaisons caractérisent les liaisons à la jonction des parois.



Plancher intermédiaire



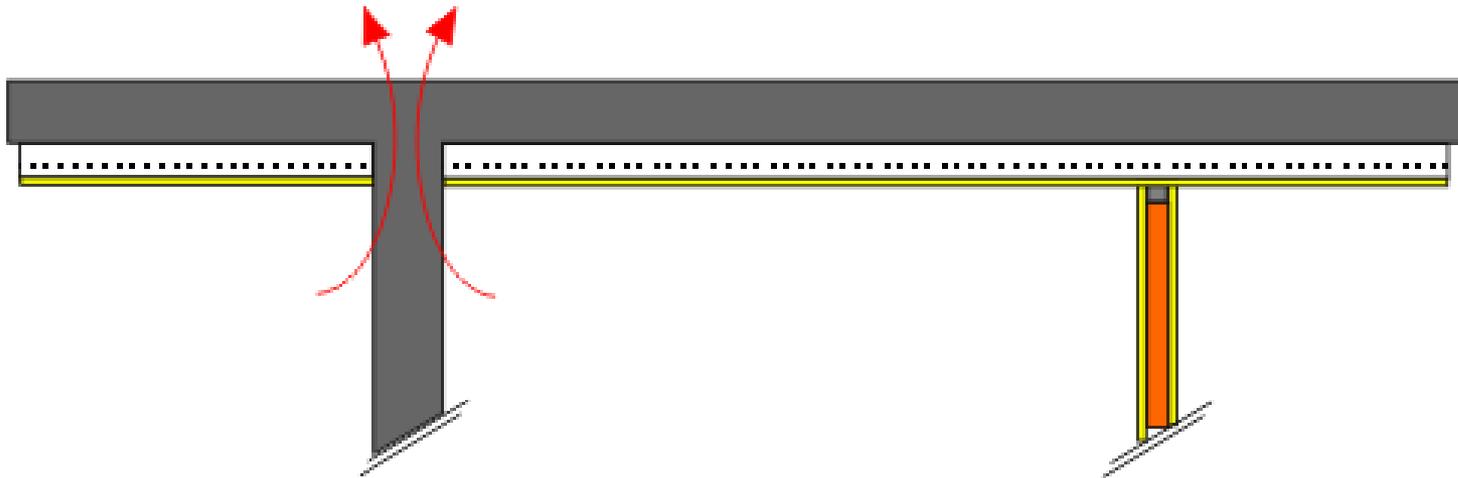
Mur de refend



Plancher bas

15. Déperdition par transmission thermique à travers les parois opaques

NOTE : On ne doit pas tenir compte des cloisons ou refends s'ils **n'altèrent pas** la résistance thermique des parois de l'enveloppe. Dans le cas contraire, la **pénétration dans l'isolant altère** la résistance thermique et crée un pont thermique qui doit être pris en compte dans le calcul des déperditions thermiques.



15.5. Déperditions à travers les ponts thermiques

Il existe principalement deux types de déperditions à travers les ponts thermiques :

15.5. 1. Déperditions linéaires par transmission

Caractérisées par un coefficient linéique Y exprimé en $W/m.K$ (exemple : liaison en partie courante entre un plancher et un mur extérieur).

La déperdition en W/K à travers un pont thermique linéaire « D_l » se calcule en multipliant le coefficient linéique par son linéaire exprimé en mètre.

$$D_l = \sum (Y_j \times L_j)$$

Y_j est le coefficient de transmission linéique de la liaison j en $W/m.K$ représente la déperdition en Watts pour 1 m de longueur de liaison quand la différence des 2 cotés de la paroi est de $1^\circ C$

L_j (en mètre) représente la longueur intérieure de la liaison j .

Note : La conductivité thermique (λ) s'exprime en W/m.K comme le coefficient de transmission linéique (Y), la différence réside dans le fait que pour la conductivité thermique, le **mètre caractérise l'épaisseur du matériau** et pour le coefficient de transmission linéique, le **mètre caractérise la longueur de la liaison**.

15.5. 2. Déperditions ponctuelles par transmission

Caractérisées par un **coefficient ponctuel X** exprimé en W/K (exemple : liaison entre un plancher et deux murs perpendiculaires de façade).

La déperdition en W/K à travers le pont thermique ponctuel pour une différence de température de 1°C entre les es deux cotés de la paroi :

$$D_{po} = \sum X_k$$

15.6. Déperditions par transmission dans une paroi

Le total des déperditions par transmission qu'il est possible d'associer à une paroi D_p (en $W/^\circ C$) est obtenu en effectuant la somme des pertes surfaciques à travers cette paroi avec l'ensemble des pertes linéiques et ponctuelles, soit :

$$D_p = D_s + D_l + D_{pp}$$

$$D_p = U \times A + \sum (Y_j \times L_j) + \sum X_k$$

Avec :

U (ou U_{moy} si la paroi est hétérogène) **et** A sont respectivement le coefficient de transmission surfacique (en $W/m^2 \cdot ^\circ C$) et la **surface intérieure** (en m^2) de la paroi,

$Y_j \times L_j$ sont respectivement le coefficient de transmission linéique (en $W/m \cdot ^\circ C$) et la **longueur intérieure** (en m) de chaque liaison.

X_k **est** le coefficient de transmission ponctuel (en $W/^\circ C$) de chaque point.

15. Déperdition par transmission thermique à travers les parois opaques

Parfois, on exprime aussi le total des déperditions d'une paroi en utilisant la notion du coefficient par transmission d'une paroi U_p , soit :

$$D_p = U_p \times A$$

Avec :

A : qui représente la surface intérieure totale de la paroi (en m^2),
 U_p : s'exprime en $W/m^2 \cdot ^\circ C$, le coefficient par transmission d'une paroi.

U_p est donc égal à :

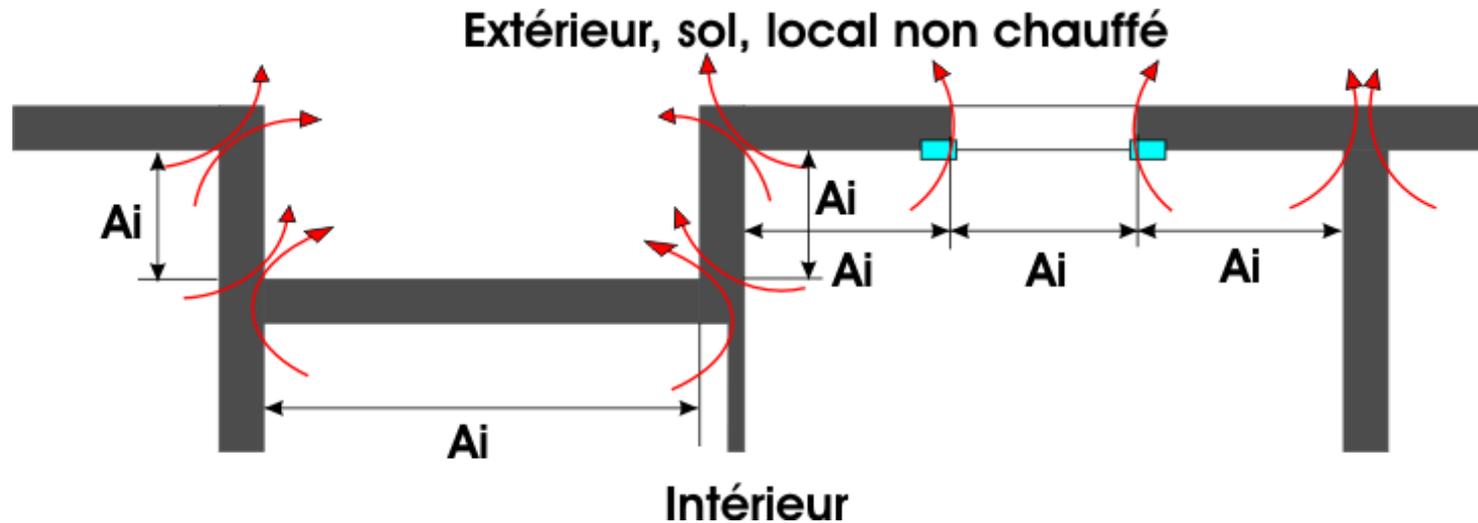
$$U_p = U + (\sum(Y_j \times L_j) + \sum X_k) / A$$

Le **coefficient de transmission thermique d'une paroi U_p** se calcule en additionnant le coefficient de transmission thermique de la paroi homogène U (ou U_{moy} si la paroi est hétérogène) et les fuites thermiques dues aux ponts thermiques intégrés (ponctuels X ou linéiques Y) rapportés à l'aire de la paroi.

15. Déperdition par transmission thermique à travers les parois opaques

N.B.

Les **dimensions** à utiliser pour les calculs doivent être les **dimensions intérieures qui donne sur l'extérieur, le sol, un local non chauffé**. Pour les ouvertures, les mesures seront à prendre en tableau. Le croquis ci dessous montre comment prendre les mesures. Les flèches courbes en rouge caractérisent les ponts thermiques (déperditions linéiques).



Exemple d'application

Calcul des déperditions par transmission dans une paroi

Mur à couches perpendiculaires au flux de chaleur

Admettons un mur donnant sur l'extérieur composé de différentes couches aux caractéristiques suivantes :

- longueur du mur = 5 m
- hauteur du mur = 2,5 m
- crépis extérieur en mortier, $\lambda = 1,3 \text{ W}/(\text{m.K})$, épaisseur = 0,015 m
- mur en béton plein, $\lambda = 2 \text{ W}/(\text{m.K})$, épaisseur = 0,2 m
- isolant intérieur, $\lambda = 0,04 \text{ W}/(\text{m.K})$, épaisseur = 0,1 m
- plaque de plâtre style "Placo", $\lambda = 0,25 \text{ W}/(\text{m.K})$, épaisseur = 0,01 m
- Y de chaque angle de mur = 0,02 W/(m.K)
- Y plancher haut = 0,05 W/(m.K) - Y plancher bas = 0,4 W/(m.K)
- température intérieure = 20°C - température extérieure de base = -7°C

15. Déperdition par transmission thermique à travers les parois opaques

Rappel des formules :

$$D_p = U \times A + \sum(Y_j \times L_j) + \sum X_k$$

$$U = 1/R \implies R = \sum(e_i / \lambda_i) + R_{si} + R_{se}$$

$$R = (0,01 / 0,25) + (0,1 / 0,04) + (0,2 / 2) + (0,05 / 1,3) + 0,11 + 0,06$$

$$R = 2.85 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} \implies U = 0,351 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$D_p = U \times A + \sum(Y_j \times L_j) + \sum X_k$$

$$D_p = (0,351 \times (2,5 \times 5)) + (0,02 \times (2,5 \times 2)) + (0,05 \times 5) + (0,4 \times 5) = 6,737 \text{ W/K}$$

Les déperditions totales dans les conditions extérieures de bases sont égales à : $D_B = 6,737 \times (20 - -7) = 181,90 \text{ W}$

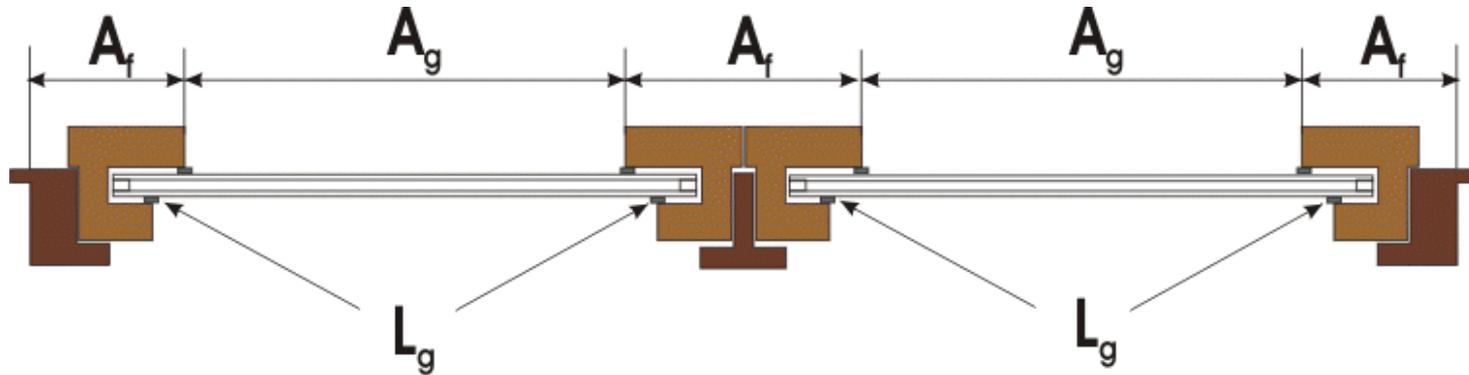
16.1. Coefficient de transmission thermique des parois vitrées

Principe

Une paroi vitrée est constituée de deux parties, la menuiserie (en bois, en plastique ou métallique de fabrication courante) et l'élément de remplissage (vitrage).

Pour le calcul des déperditions, la paroi vitrée est à décomposer en trois parties :

- La **surface** dite "**visible**" du **vitrage** (A_g), ce qui exclut les bords (jonction avec la menuiserie), caractérisée par un **coefficient de transmission surfacique**
- La **jonction** (les bords, L_g) entre la menuiserie et le vitrage, caractérisée par un **coefficient linéique** (pont thermique) (valeurs par défaut, Coefficient Y_g)
- La **menuiserie** (A_f), caractérisée par un **coefficient de transmission surfacique**



A_f = plus grande des surfaces projetées, prise sans recouvrement vue des deux cotés de la paroi, en m^2

A_g = plus petite surface visible du vitrage vue des deux cotés de la paroi sans prise en compte des joints de débordement, en m^2

L_g = plus grande somme des périmètres visible du vitrage, vus des deux cotés de la paroi, en m

16.2. Calcul du coefficient de transmission des parois vitrées

Les parois vitrées peuvent être une fenêtre fixe ou ouvrante, porte et porte-fenêtre.

Le coefficient de transmission thermique U_w , en $W/(m^2.K)$, des parois vitrées peut être calculé selon la formule suivante :

$$U_w = (U_g \times A_g + U_f \times A_f + Y_g \times L_g) / (A_g + A_f)$$

U_g : coefficient surfacique du vitrage en $W/(m^2.K)$ obtenu de la manière suivante :

$$U_g = 1 / (R_i + \sum(e_i / \lambda_i) + R_a + R_e)$$

e_i : épaisseur de verre ou de matériau translucide de la couche i , en m

λ_i : coefficient de conductivité thermique de la couche i de verre ou de matériau translucide. (λ du verre standard : 1,0 à 1,2 $W/(m.K)$)

R_i , R_e : résistances thermiques d'échange superficiel intérieur et extérieur (voir tableau 3).

16. Déperdition par transmission thermique à travers les parois vitrées

R_a : résistance thermique de la lame d'air ou de gaz isolant en $m^2.K/W$. Pour l'air, voir le tableau 2 (Résistances thermiques d'une lame d'air non ventilée). Pour un gaz isolant (argon, xénon, krypton) voir avis technique ou alors, avec le fabricant.

U_f : coefficient surfacique de la menuiserie en $W/(m^2.K)$ obtenu de la manière suivante (formule simplifiée) :

$$U_f = 1 / (R_i + e / \lambda + R_e)$$

e : épaisseur en m de la menuiserie

λ : coefficient de conductivité thermique de la menuiserie

Y_g : le coefficient linéique (pont thermique) dû à l'effet thermique de l'intercalaire du vitrage et du profilé, en $W/(m.K)$. (Valeurs par défaut, coefficient Y_g)

16. Déperdition par transmission thermique à travers les parois vitrées

Le tableau 10 ci-dessous donne les résistances superficielles à utiliser en fonction de l'inclinaison de la paroi vitrée et du sens du flux de chaleur

Tableau 10. Résistances thermiques d'échanges superficiels intérieur et extérieur des parois vitrées

Inclinaison	R_i	R_e
$\geq 60^\circ$ (paroi verticale et flux horizontal)	0,13	0,04
$< 60^\circ$ (paroi horizontale et flux ascendant)	0,10	0,04
$< 60^\circ$ (paroi horizontale et flux descendant)	0,17	0,04

17.1. Principes généraux

17.1.1. Méthodologie

Sur la base du dossier technique, le concepteur doit effectuer les opérations suivantes :

- Définir les **volumes thermiques**,
- Calculer pour chaque volume thermique les **pertes par transmission** et les **pertes par renouvellement d'air**,
- Vérifier que les **déperditions par transmission du logement** sont inférieures aux **déperditions de référence**,
- Calculer éventuellement les **déperditions de base** qui expriment les besoins de chauffage.

17.1.2. Définitions

Un volume thermique : est un volume d'air supposé homogène en température, susceptible d'être chauffé par un corps de chauffe dimensionné à cet effet.

Un local : peut être divisé en plusieurs volumes thermiques. Il peut être considéré comme :

- Un volume unique lorsqu'il est chauffé à partir d'une seule source de chaleur ;
- Plusieurs volumes thermiques si on dispose, par exemple, des radiateurs au niveau des pièces du logement (cas des systèmes de chauffage centralisés) ; dans ce cas, on effectue un calcul dit "pièce par pièce".

17.2. Expression générale des déperditions

17.2.1. Déperditions totales d'un logement

Les déperditions totales D ($W/^\circ C$) pour un **logement**, contenant plusieurs volumes thermiques, sont données par :

$$D = \sum D_i$$

où D_i (en $W/^\circ C$) représente les déperditions totales du **volume i**.

17.2.2. Déperditions totales d'un volume

Les déperditions totales D_i ($W/^\circ C$) d'un volume i (figure suivante) sont données par :

$$D_i = (D_T)_i + (D_R)_i$$

où :

$(D_T)_i$ (en $W/^\circ C$) représente les déperditions par **transmission du volume i**,

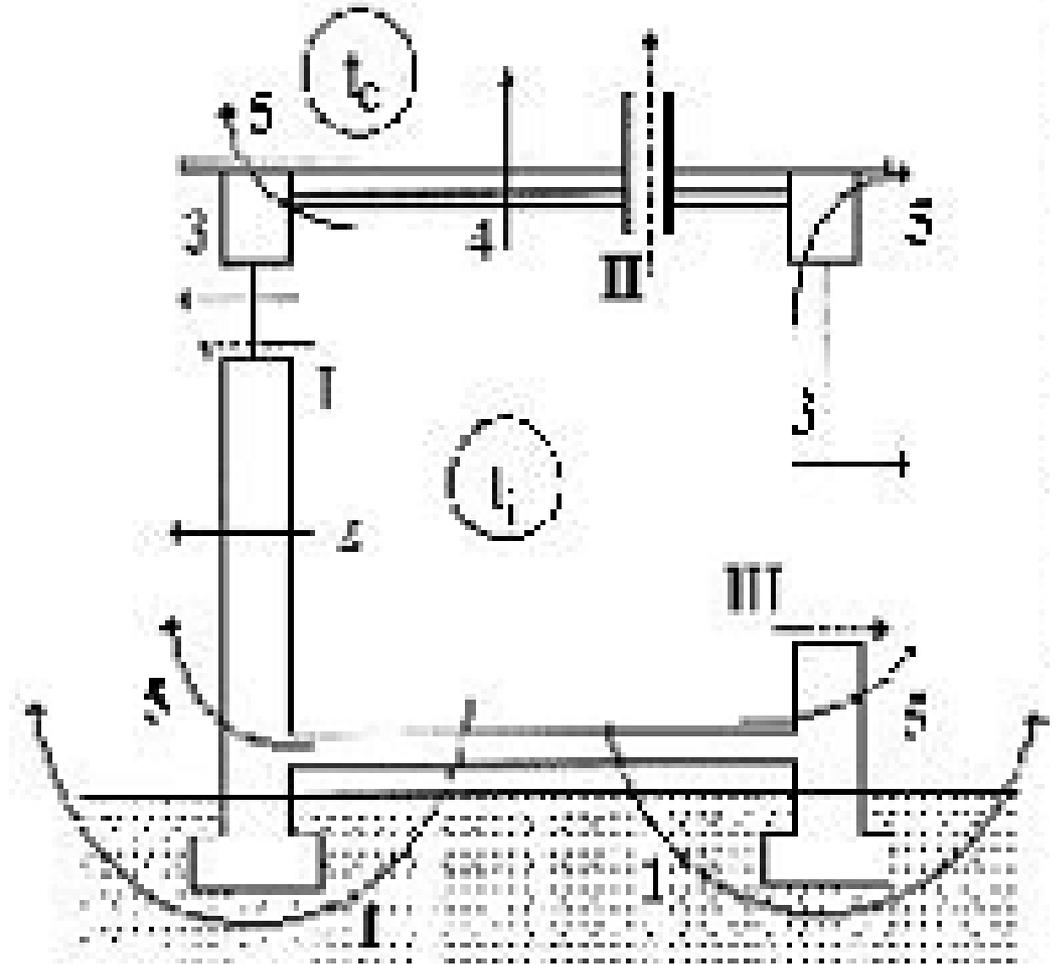
$(D_R)_i$ (en $W/^\circ C$) représente les déperditions par **renouvellement d'air du volume i**.

17. Bases de calcul de déperditions thermiques des bâtiments à usage d'habitation

Renouvellement d'air D_R
sorties d'air I, II, III

Transmission D_T

- sol1
- murs2
- baies3
- toiture4
- points singuliers5



17.2.3. Déperditions par transmission d'un volume

Les déperditions par transmission $(D_T)_i$ (en W/°C) d'un volume i sont données par :

$$(D_T)_i = (D_s)_i + (D_{li})_i + (D_{sol})_i + (D_{inc})_i$$

où

$(D_s)_i$ (en W/°C) représente les **déperditions surfaciques** à travers les parties courantes des parois en **contact avec l'extérieur**;

$(D_{li})_i$ (en W/°C) représente les **déperditions** à travers les **liaisons**;

$(D_{sol})_i$ (en W/°C) représente les **déperditions** à travers les **parois en contact avec le sol**;

$(D_{inc})_i$ (en W/°C) représente les **déperditions** à travers les **parois en contact avec les locaux non chauffés**.

17.2.4. Relation entre les déperditions du logement et les déperditions des volumes

Les déperditions par transmission D_T (en $W/^\circ C$) du logement sont égales à la somme des déperditions par transmission des différents volumes i , soit:

$$D_T = \sum (D_T)_i$$

Les déperditions par renouvellement d'air D_R (en $W/^\circ C$) du logement sont égales à la somme des déperditions par renouvellement d'air des différents volumes i , soit:

$$D_R = \sum (D_R)_i$$

17.3. Vérification et déperditions de référence

17.3.1. Vérification réglementaire

Les déperditions par transmission D_T du logement doivent vérifier:

$$D_T \leq 1,05 \times D_{réf}$$

où :

D_T (en $W/^\circ C$) représente les déperditions par transmission du logement,

$D_{réf}$ (en $W/^\circ C$) représente les déperditions de référence.

17.3.2. Calcul des déperditions de référence

Les déperditions de référence $D_{\text{réf}}$ (en W/°C) sont calculées par la formule suivante :

$$D_{\text{réf}} = a \times S_1 + b \times S_2 + c \times S_3 + d \times S_4 + e \times S_5$$

où :

les S_i (en m²) représentent les surfaces des parois en contact avec l'extérieur, un comble, un vide sanitaire, un local non chauffé ou le sol. Elles concernent respectivement:

S_1 la toiture,

S_2 plancher bas, y compris les planchers bas sur locaux non chauffés,

S_3 les murs,

S_4 les portes,

S_5 les fenêtres et les portes-fenêtres.

S_1 , S_2 , S_3 sont comptées de l'intérieur des locaux,

S_4 et S_5 sont comptées en prenant les dimensions du pourtour de l'ouverture dans le mur ;

17. Bases de calcul de déperditions thermiques des bâtiments à usage d'habitation

Les coefficients a , b , c , d et e , (en $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), sont donnés dans le tableau 11.

Ils dépendent de la **nature du logement** et de la **zone climatique** (annexe 1) et correspondent en fait à des coefficients U_p d'une paroi (ils représentent la **somme des pertes surfaciques** et l'ensemble des **pertes linéiques** et **ponctuelles** à travers une paroi)

Pour le calcul des **déperditions de référence**, n'ont pas été prises en **compte** les déperditions de référence par **renouvellement d'air**.

17. Bases de calcul de déperditions thermiques des bâtiments à usage d'habitation

Tableau 11 fixe les coefficients a, b, c, d et e, (en $W/m^2 \cdot ^\circ C$)

Zone	Logement individuel					Logement en immeuble collectif				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
A	1,10	2,40	1,40	3,50	4,50	1,10	2,40	1,20	3,50	4,50
B	1,10	2,40	1,20	3,50	4,50	0,90	2,40	1,20	3,50	4,50
B'	1,10	2,40	1,20	3,50	4,50	0,90	2,40	1,20	3,50	4,50
C	1,10	2,40	1,20	3,50	4,50	0,85	2,40	1,20	3,50	4,50
D	2,40	3,40	1,40	3,50	4,50	2,40	3,40	1,40	3,50	4,50
D'	2,40	3,40	1,40	3,50	4,50	2,40	3,40	1,40	3,50	4,50

17.4. Calcul des déperditions de base

17.4.1. Exigence réglementaire

Le calcul de la **puissance de chauffage d'un logement** doit comporter le calcul des **déperditions de base**. Pour cela, on doit prendre en compte un écart de température entre les ambiances intérieure et extérieure, dit **écart de température de base**.

17.4.2. Déperditions de base totales

Déperditions de base totales D_B est la **quantité de chaleur** passant au travers d'une paroi pendant **une seconde** en tenant compte **l'écart** entre la **température de base extérieure** et la **température intérieure souhaitée**. Il s'exprime en W.

Les déperditions de base totales pour un local D_B (W), contenant plusieurs volumes thermiques, ont pour expression :

$$D_B = \sum (D_B)_i$$

où $(D_B)_i$ (en W) représente les **déperditions de base** de chaque **volume thermique i**.

17.4.3. Déperditions de base pour un volume

Les déperditions de base pour un volume thermique $(D_B)_i$ (en W) ont pour expression :

$$(D_B)_i = D_i \times (T_{bi} - T_{be})$$

où :

D_i (en W/°C) représente les **déperditions totales du volume thermique i** ;

T_{bi} (en °C) est la **température intérieure de base** du volume considéré (température désirée à l'intérieur de la pièce (16°C à 18°C pour une chambre, 19°C à 22°C pour un salon, 22°C à 24°C pour une salle de bain));

T_{be} (en °C) est la **température extérieure de base** du lieu d'implantation de la construction (tableau 12) .

17.4.4. Température de base

Les déperditions calorifiques se calculent par rapport aux températures extrêmes dites températures de bases constatées minimum 5 jours dans l'année sur une période de 30 ans. La température extérieure de base est fonction de l'altitude et de la zone climatique où est implanté le projet.

17. Bases de calcul de déperditions thermiques des bâtiments à usage d'habitation

Tableau12 fixe les valeurs de la température extérieure de base

ZONE	Altitude (m)	t_{be} (en °C)	ZONE	Altitude (m)	t_{be} (en °C)
A	< 300	6	C	500 à 1000	- 2
	300 à 500	3		≥ 1000	- 4
	500 à 1000	1			
	≥ 1000	-1			
B	< 500	2	D	< 1000	5
	500 à 1000	1		≥ 1000	4
	≥ 1000	-1			
B'	<500 ≥ 500	0 voir Zone B	D'	< 1000	5