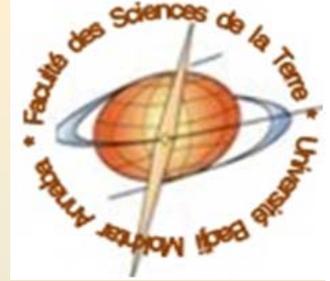




**UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA**  
**FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE**  
**DEPARTEMENT D'ARCHITECTURE**



**UET1, Matière : Physique du bâtiment**

**Enseignante : A. HARAT**

e-mail : aharat@gmail.com

**Cours 2 :**

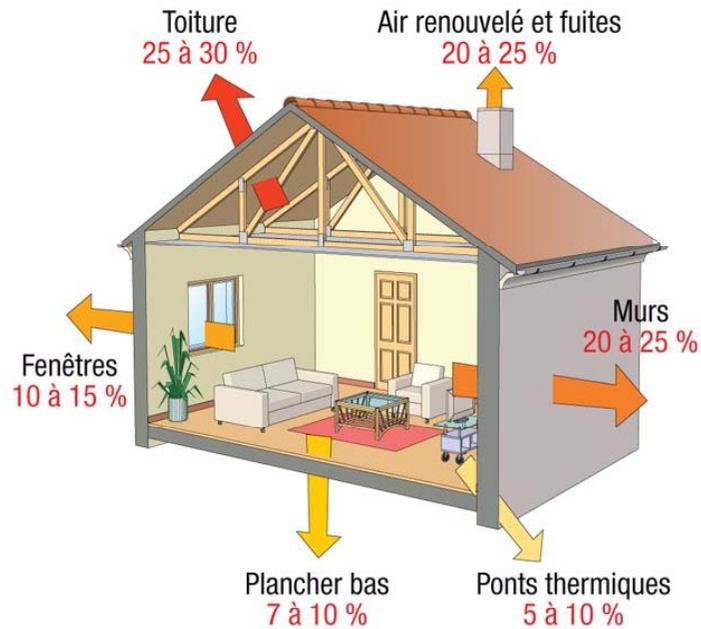
**THERMIQUE**

**الحرارة**

**Année universitaire 2019 / 2020**

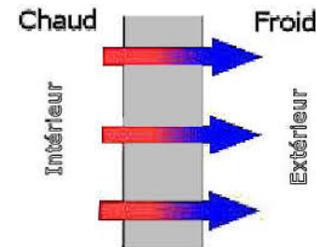
**Semestre 2**

# La thermique



## Qualité thermique d'un logement

### Bilan thermique des bâtiments



- La thermique :
- ⇒ chaleur
  - ⇒ température
  - ⇒ lois de transfert de chaleur
  - ⇒ calcul des déperditions (circuit équivalent)

## II- Thermique

### II-1 Définitions, Notions de base

#### ➤ Notion de température

La notion de « température » est issue de la sensation de froid ou de chaud que l'on éprouve en touchant les corps qui nous entourent.

Ainsi, cette appréciation se fait par rapport à la température de notre corps.

Les physiciens ont créé des échelles de température  $\Rightarrow$  températures de référence caractéristiques, exemples :

- le « zéro absolu » appelé également « repos de la matière »  $\rightarrow 0 \text{ K}^\circ$
- la température de fusion de la glace  $\rightarrow 0 \text{ C}^\circ$
- la température d'ébullition de l'eau  $\rightarrow 100 \text{ C}^\circ$



## II- Thermique

### Conversion d'unités de température

Pour transformer une température relative  $\theta$  en  $^{\circ}\text{C}$  en température absolue  $T$   
en degrés Kelvin :

Unité utilisée dans le  
système international

$$T(\text{K}^{\circ}) = \theta(\text{C}^{\circ}) + 273$$

↑

Exemple :  $\theta = 20^{\circ}\text{C}$

$$T = 20^{\circ}\text{C} + 273 = 293 \text{ K}$$

Pour transformer une température relative  $\theta$  en  $^{\circ}\text{C}$  en température relative  $T$   
en degrés Fahrenheit (utilisée aux USA, Canada, ..) :

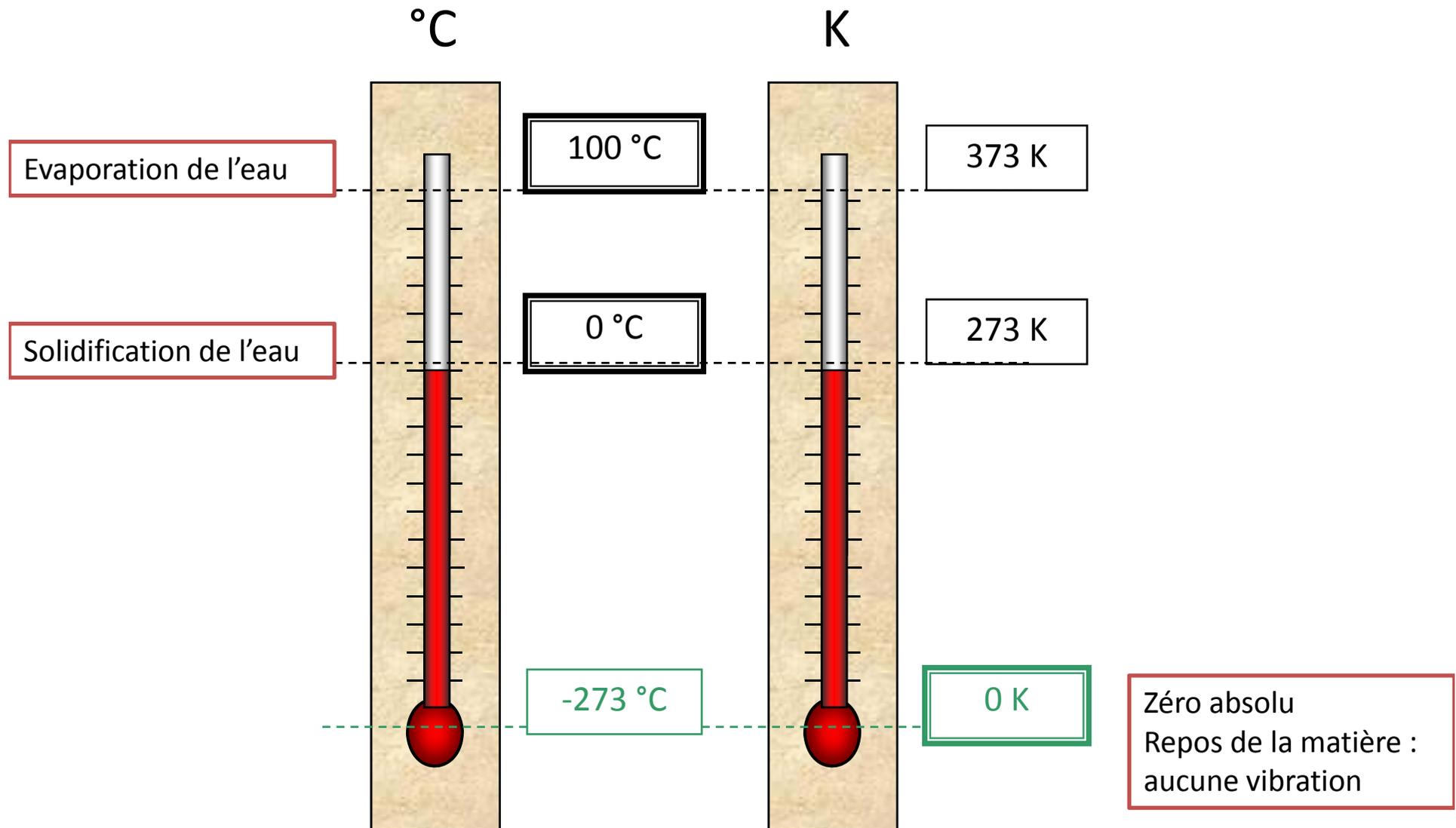
$$T (\text{F}^{\circ}) = 9/5 .\theta (\text{C}^{\circ}) + 32$$

Exemple :  $\theta = 100^{\circ}\text{C}$

$$T = ( 1,8 . 100^{\circ}\text{C} ) + 32 = 212^{\circ}\text{F}$$

## II- Thermique

### Conversion d'unités de température





## II- Thermique

### II-2 - Notion de capacité thermique et chaleur latente

La quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un corps dépend :

- de la masse de corps à « chauffer »,
- de la nature du corps à « chauffer »,
- de l'élévation de température désirée.

$$\Delta Q = m \cdot C \cdot \Delta T$$

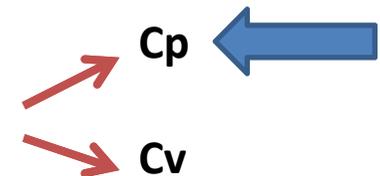
$\Delta Q$  : quantité de chaleur en Joules ou kilojoules (kJ)

$m$  : masse du corps en kilogramme (kg)

$C$  : chaleur spécifique ou chaleur massique du corps en J/kg.K ou kJ/kg.K

$\Delta T$  : élévation de température en kelvins (K)\*

*\*Les écarts de températures s'expriment en kelvins.*



## II- Thermique

- $\Delta Q$  correspond à l'énergie nécessaire à élever la température d'un corps sans changement d'état
- La chaleur se transmet du corps le plus chaud vers le corps le moins chaud
- Le premier cède et le second reçoit la même quantité de chaleur
- C (généralement  $C_p$ ) est constante sur une faible intervalle de température (approximation)
  - variation linéaire de la température en fonction de la chaleur

## II- Thermique

### Transmission de la chaleur

On distingue trois types de transmission de la chaleur :

➤ La conduction qui nécessite un contact entre les corps donneur et récepteur de chaleur.

*Plaque chauffante, thermoplongeur, échangeur à plaque, échangeur tubulaire, bain-Marie...*

➤ La convection où la chaleur est véhiculée par de l'air.

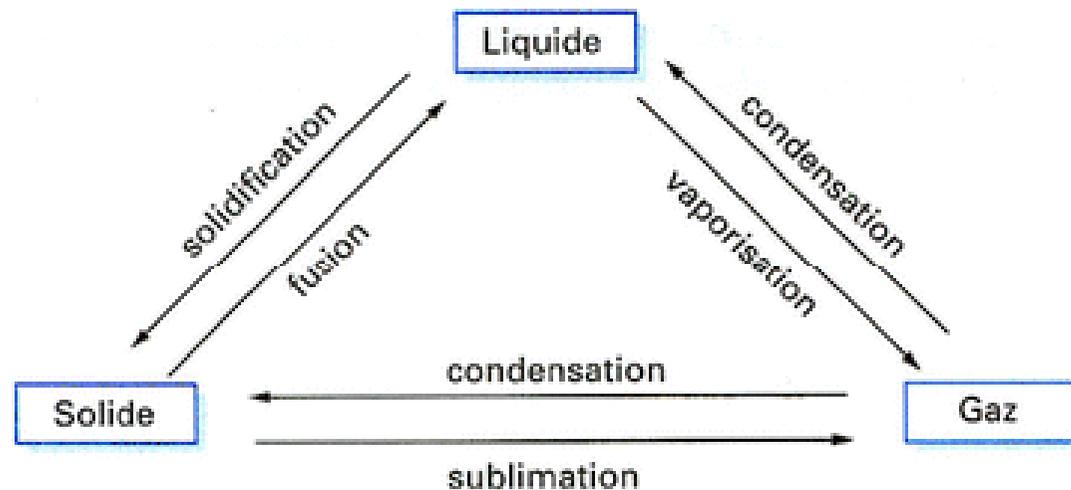
*Convecteur, ventilo-convecteur, aérotherme, radiateur...*

➤ Le rayonnement où la chaleur est transmise sans contact ni médium entre l'émetteur et le récepteur de chaleur.

*Soleil, panneau rayonnant, radiateur, plafond chauffant, cheminée de salon, foyer d'une chaudière...*

### II-3 – Changement d'état d'un corps

#### II-3-1 transition de phase



- Dilatation
- Compression
- Changement de propriétés mécanique, chimiques, magnétiques, électriques....

## II- Thermique

### ➤ Chaleur latente

La quantité de chaleur nécessaire pour changer l'état d'un corps à température constante dépend :

- de la masse de corps,
- de la nature du corps.

$$\Delta Q = m \cdot L$$

$\Delta Q$  : quantité de chaleur en joules (J) ou kilojoules (kJ) ou Kcal

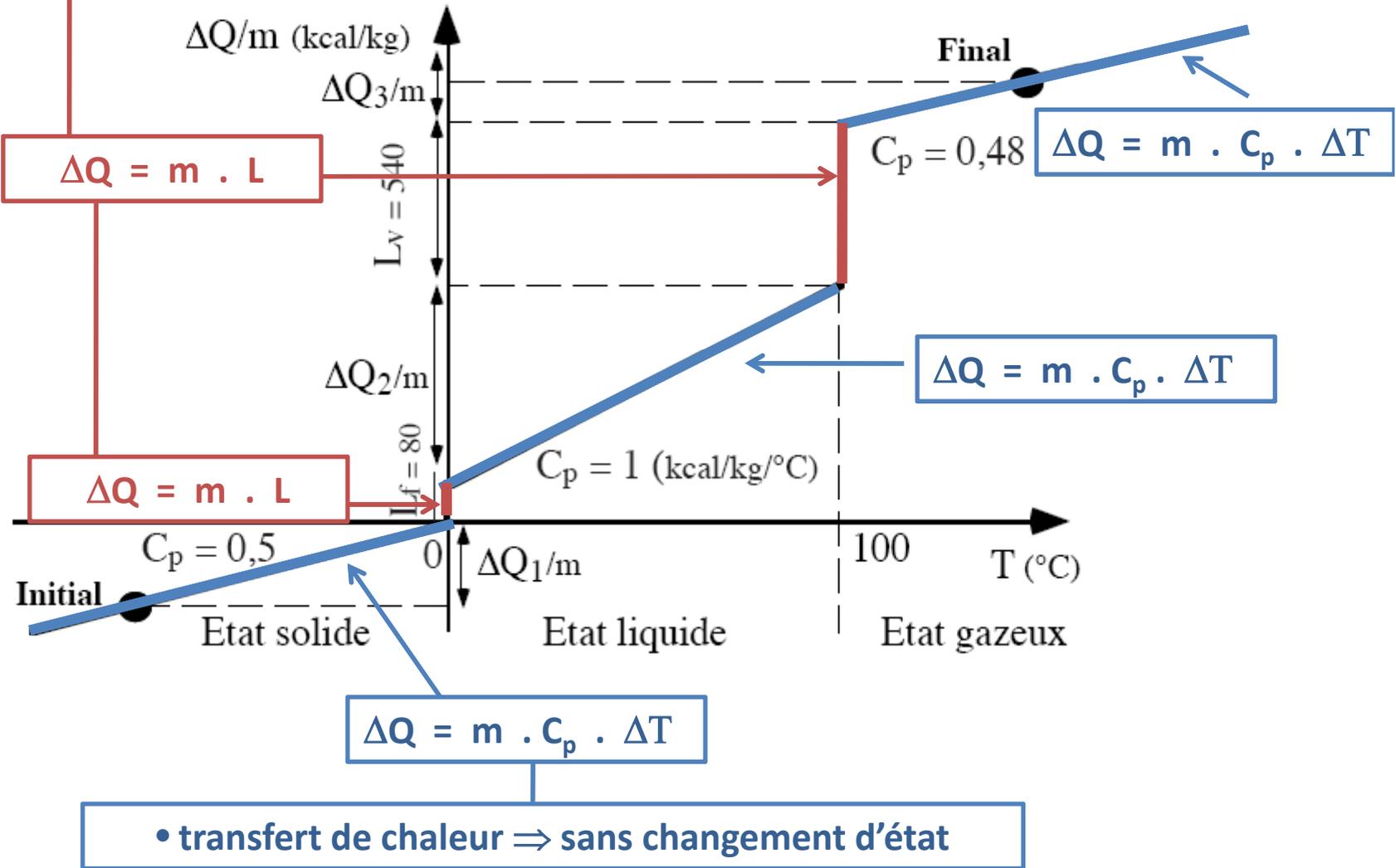
m : masse du corps en kilogramme (Kg)

L : chaleur latente du corps en J/Kg ou kJ/Kg

## II- Thermique

- transformation isotherme : à température constante  $\Rightarrow$  changement d'état

Diagramme de transformation de l'eau



## II- Thermique

### Diagramme de transformation de l'eau

Quantités de chaleur échangées dans chaque segment du diagramme sont égales à :

$$\Delta Q_{ss} = m \cdot C_{m(s)} \cdot \Delta T$$

(  $C_{m(s)}$  : chaleur massique solide )

$$\Delta Q_{lf} = m \cdot L_f$$

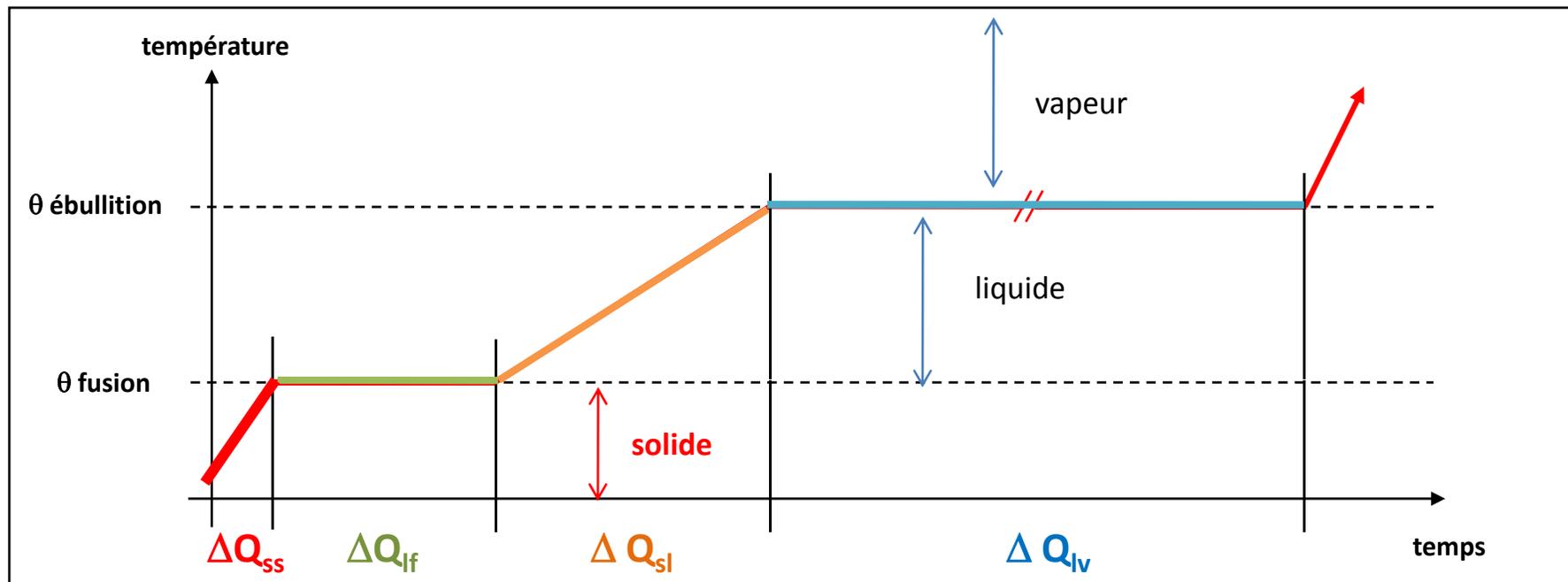
(  $L_f$  : chaleur latente de fusion )

$$\Delta Q_{sl} = m \cdot C_{m(l)} \cdot \Delta T$$

(  $C_{m(l)}$  : chaleur massique liquide )

$$\Delta Q_{lv} = m \cdot L_v$$

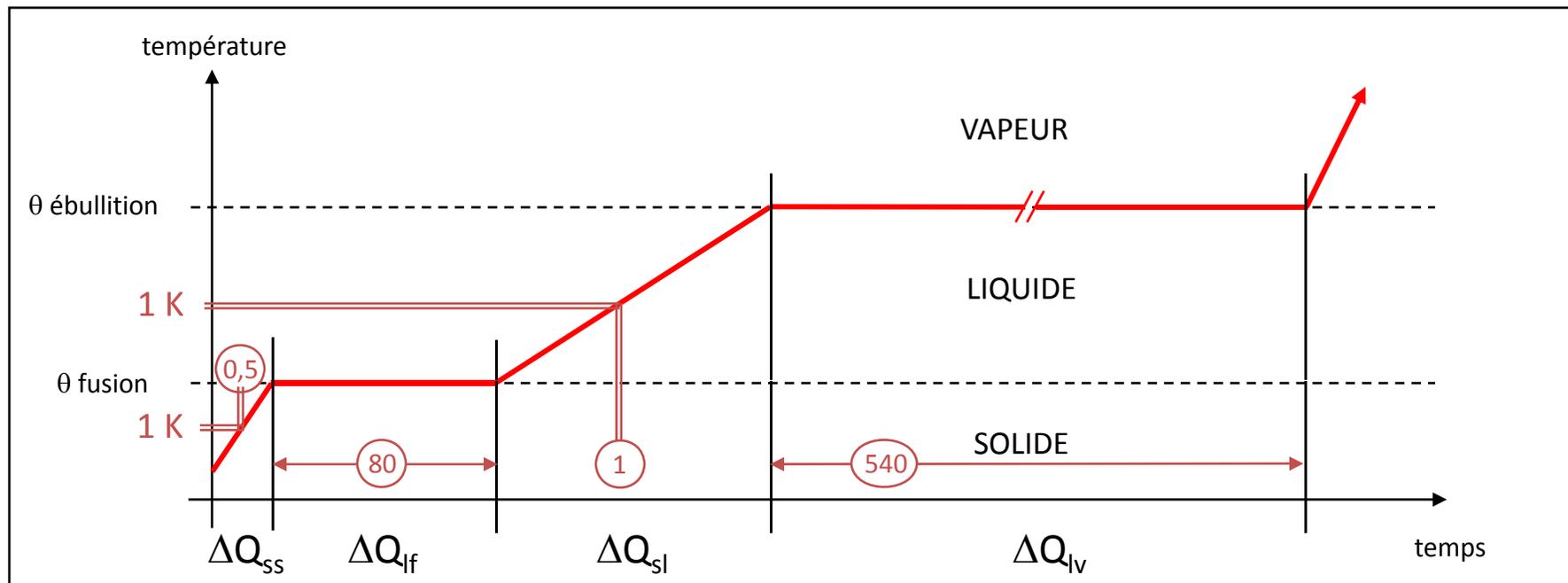
(  $L_v$  : chaleur latente de vaporisation )



## II- Thermique

### Valeurs pour l'eau :

$C_{m(s)}$ :	0,5 kcal/kg.K	2,04 kJ/kg.K	0,58 Wh/kg.K
$C_{lf}$ :	80 kcal/kg	335 kJ/kg	93 Wh/kg
$C_{m(l)}$ :	1 kcal/kg.K	4,18 kJ/kg.K	1,163 Wh/kg.K
$C_{lv}$ :	540 kcal/kg	2260 kJ/kg	628 Wh/kg



## II- Thermique

Caractéristiques thermiques de quelques corps :

Corps	T de fusion	T de vaporisation	$C_{lf}$ Wh/kg	$C_m$ Wh/kg.K	$C_{lv}$ Wh/kg
Oxygène	- 219	- 183	3,84	-	59,7
Mercure	- 38,9	357	3,3	(l) 0,038	79.9
Eau	0	100	93	(s) 0,58 (l) 1,163	628
Plomb	327	1750	6,36	(s) 0,036	256
Fer	1535	2450	57,45	(s) 0.126	-

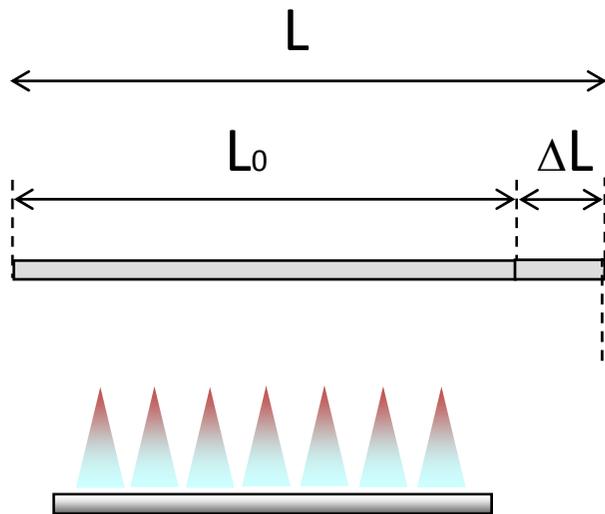
## II- Thermique

### II-3-2- Dilatation et compression

#### ➤ Dilatation linéaire des solides

Si l'on prend une tige en métal de longueur  $L_0$ , et qu'on la chauffe, la tige s'allonge de  $\Delta L$ ,

$$L = L_0 + \Delta L$$



$$\Delta L / L_0 = k \Delta T$$

$$L = L_0 + (L_0 \cdot k \cdot \Delta T)$$

$$L = L_0 \cdot (1 + k \cdot \Delta T)$$

$$k = \varepsilon = (\Delta L / L_0) / \Delta T$$

$k$  ou  $\varepsilon$  est le coefficient linéaire de dilatation thermique en  $K^{-1}$

## II- Thermique

### Dilatation linéaire des solides

Valeurs de «  $k$  ou  $\varepsilon$  en  $K^{-1}$  »

fer	$11,5 \cdot 10^{-6}$
cuivre	$16,5 \cdot 10^{-6}$
plomb	$28 \cdot 10^{-6}$
zinc	$29 \cdot 10^{-6}$

#### Exercice d'application :

Un tube de chauffage en fer de 10 m de longueur a été monté en plein hiver alors qu'il était à la température de 0 °C. Quelle sera sa longueur, lorsqu'en fonctionnement sa température montera à 90 °C ?

## II- Thermique

$$L = L_0 \cdot ( 1 + k \cdot \Delta T )$$

$$L_{90} = 10 \text{ m} \cdot [ 1 + 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot ( 90 \text{ °C} - 0 \text{ °C} ) ] = \underline{10,010 \text{ m}}$$

Soit un allongement d'environ 1 cm / 10 m

*Ceci est une donnée capitale pour le montage des canalisations qui seront soumises à de fortes variations de température.*

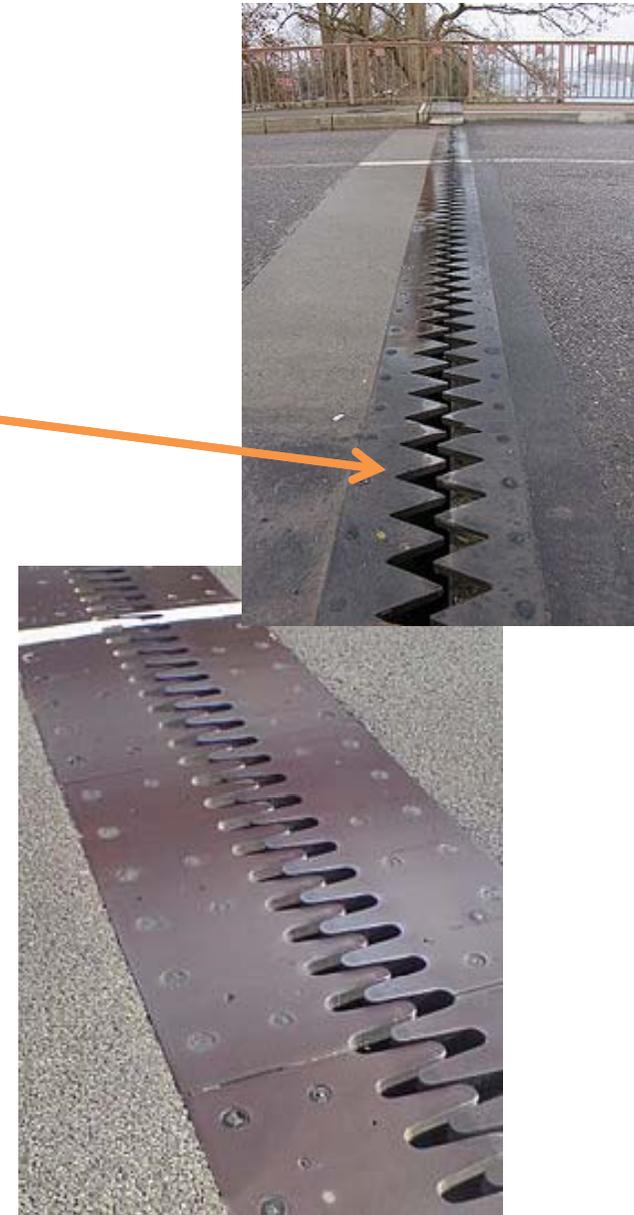
### ➤ Déformation volumique

$$\Delta V / V_0 = \theta \cdot \Delta T$$

Pour les corps isotropes (mêmes propriétés dans toutes les directions, alors  $\theta \approx 3 \varepsilon$ )

## II- Thermique

La dilatation des solides est compensée sur certaines structures par des joints de dilatation. Par exemple dans le cas des ponts, des «rainures» appelées **joints de chaussée** permettent de compenser les effets dus aux différences d'exposition au soleil et d'échauffement de l'atmosphère, pouvant allonger de quelques centimètres un solide long de plusieurs dizaines de mètres. Sans l'espace laissé par ces joints de dilatation, le pont subirait des contraintes internes supplémentaires.



### II-4- Transfert de chaleur

➤ Déperdition thermique globale :

Flux de chaleur qui s'échappe d'un local

$$\Phi = \Delta Q / \Delta t$$

unité



$$[\Phi] = \text{J/s} = \text{W}$$

Cette grandeur a donc la dimension d'une puissance. Elle s'exprime donc en Watt (W) dans le S.I. Le kcal/h est couramment utilisé.

➤ Densité de flux

Déperdition thermique par unité de surface

$$\varphi = \Phi / S \rightarrow \text{W m}^{-2}$$

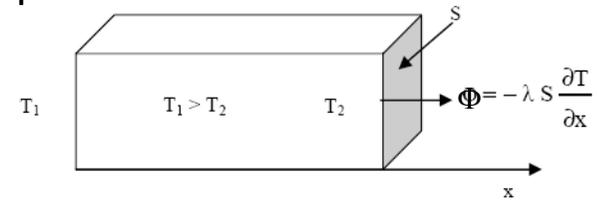
Définit les caractéristiques thermiques d'une parois de 1m<sup>2</sup> de surface  
Pour déduire la déperdition totale ⇒ multiplier par la surface totale des locaux d'une construction

## II- Thermique

### II-4-1- Loi de Fourier

Lors d'un transfert de chaleur par conduction, sous l'influence d'une différence de température, le flux est proportionnel au gradient de température :

$$\Phi = - \lambda . S . \Delta T / \Delta x \rightarrow W$$



avec  $\Delta T / \Delta x$  : gradient de température sur  $\Delta x$  ( $^{\circ}\text{C m}^{-1}$ )  
 $S$  : Surface traversée par le flux ( $\text{m}^2$ )  
 $\lambda$  : coefficient de conductivité ( $\text{W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

↳ dépend du matériau : **conducteurs** ou **isolants thermiques**

**Métaux : cuivre,  
fer ...**

**Bois, béton,  
liège ....**

Pour la densité de flux, la loi s'écrit :

$$\varphi = - \lambda . \Delta T / \Delta x \rightarrow W \text{ m}^{-2}$$

## II- Thermique

### ➤ Resistance et conductivité thermique

$$\Phi = - \Delta T / R_{th} \quad \xrightarrow[\text{en électricité}]{\text{Analogie avec la loi d'Ohm}} \quad I = \frac{V}{R}$$

Resistance  
thermique  
 $K^{\circ} \cdot W^{-1}$  ou  
 $C^{\circ} \cdot W^{-1}$

$$\longrightarrow R_{th} = \Delta x / \lambda S$$

Inversement  
proportionnelle à la  
conductivité thermique

Si on utilise la densité de flux  $\varphi = \Phi / S$  alors on écrit  $R_{th} = \Delta x / \lambda$

Coefficient de  
transmission  
thermique

$$\longleftarrow K = 1/R$$

Son unité dans le système SI est le  $W \ m^{-2} \ ^{\circ}C^{-1}$ .

## II- Thermique

### Coefficients de conductivité thermiques de quelques matériaux conducteurs et isolants

Matériau	$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> . °C <sup>-1</sup> )	Matériau	$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> . °C <sup>-1</sup> )
Argent	419	Plâtre	0,48
Cuivre	386	Amiante	0,16
Aluminium	204	Bois (feuillu-résineux)	0,12-0,23
Acier doux	45	Liège	0,044-0,049
Acier inox	15	Laine de roche	0,038-0,041
Glace	1,88	Laine de verre	0,035-0,051
Béton	1,4	Polystyrène expansé	0,036-0,047
Brique terre cuite	1,1	Polyuréthane (mousse)	0,030-0,045
Verre	1,0	Polystyrène extrudé	0,028
Eau	0,60	Air	0,026

*D'après le manuscrit de Yves Jannot, Transferts thermiques,  
Ecole des Mines , Nancy, 2012*

## II- Thermique

### II- 4- 2 Lois de Fourier et Parois d'un mur

#### ➤ Parois simple

On a :  $\varphi = -\lambda \Delta T / \Delta x$  ..... eq(1)

$$\varphi = \lambda \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{e}$$

Eq ....2

Soit en utilisant la résistance thermique,

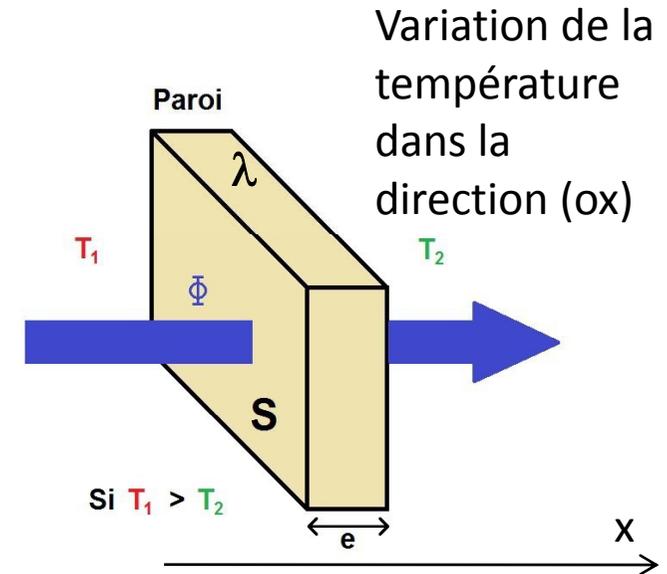
$$\varphi = (T_1 - T_2) / R \quad \text{avec } R = e/\lambda$$

En régime permanent : le même flux circule, en supposant qu'il n'y a pas de source de chaleur supplémentaire alors  $\varphi = \text{cte}$

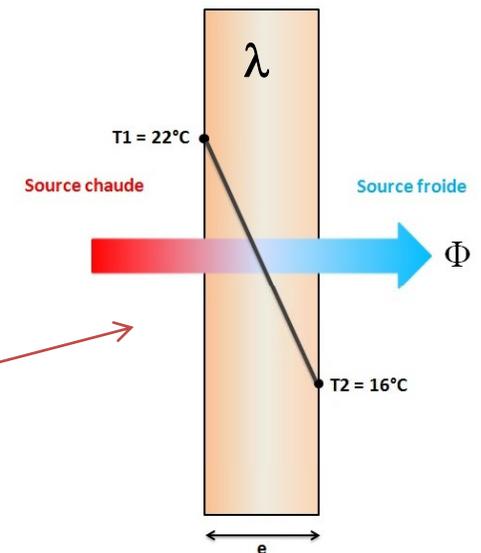
En intégrant la formule (1) on obtient le profil de température qui est linéaire :

$$T(x) = T_1 - \frac{x}{e} (T_1 - T_2)$$

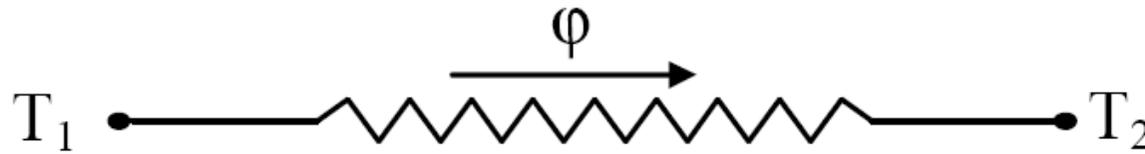
Eq ....3



Cas d'un mur



## II- Thermique

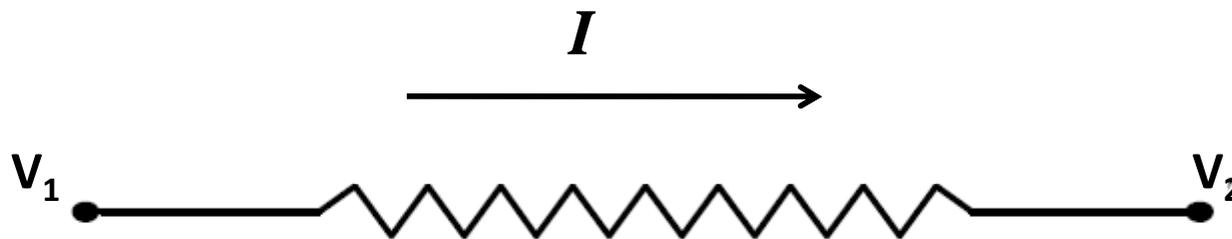


$$R = \frac{e}{\lambda}$$

$$\phi = \frac{\phi}{S} = -\frac{\Delta T}{R}$$

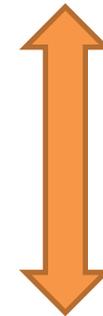
Loi de Fourier  
thermique

*Schéma électrique équivalent d'un mur simple*



$$I = \frac{\Delta V}{R}$$

Loi d'ohm  
Electrique



## II- Thermique

comment limiter le flux de chaleur transféré de l'intérieur vers l'extérieur d'un mur d'habitation l'hiver ( $T_{\text{int}} > T_{\text{ext}}$ ) par exemple ?

comment réaliser un mur isolé thermiquement?

- augmenter son épaisseur ( $e$ )
- diminuer la conductivité ( $\lambda$ ) du matériau constituant le mur ; on intercale par exemple, de l'isolant thermique entre deux parois rigides en briques ; on peut aussi utiliser du bois au lieu de béton ....etc

### ➤ Mur à multi couches

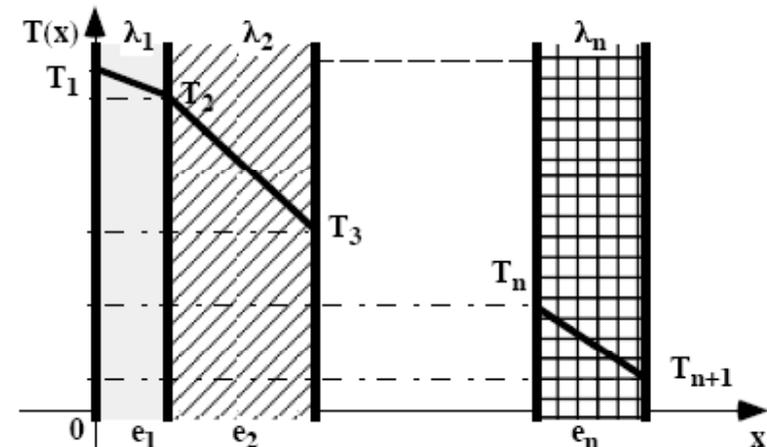
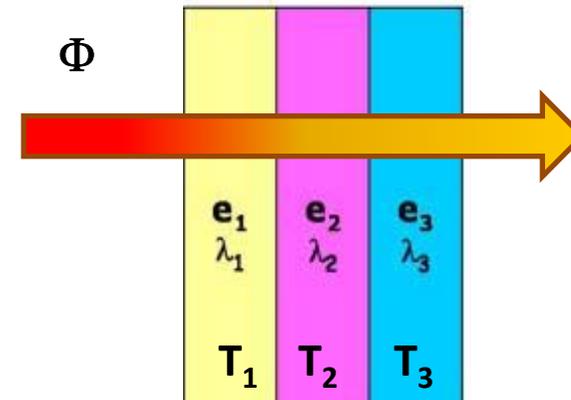
Comme on a  $\varphi_1 = \varphi_2 = \dots \varphi_n$

D'après eq2 : on a :  $T_1 - T_2 = (e_2 / \lambda_2) \cdot \varphi = \dots \dots$   
 $T_{n+1} - T_n = (e_n / \lambda_n) \cdot \varphi$

En additionnant, on obtient :

$$\varphi = (T_1 - T_{n+1}) / R_t$$

$$\text{avec } R_t = \sum R_i = \sum e_i / \lambda_i$$



## II- Thermique

$$\varphi = (T_1 - T_2)/R_1 = (T_2 - T_3)/R_2 = \dots = (T_n - T_{n+1})/R_n$$

avec :  $R_n = e_n / \lambda_n$

$$\varphi = (T_i - T_f) / R_t$$

Avec  $R_t = \sum R_i = \sum e_i / \lambda_i$

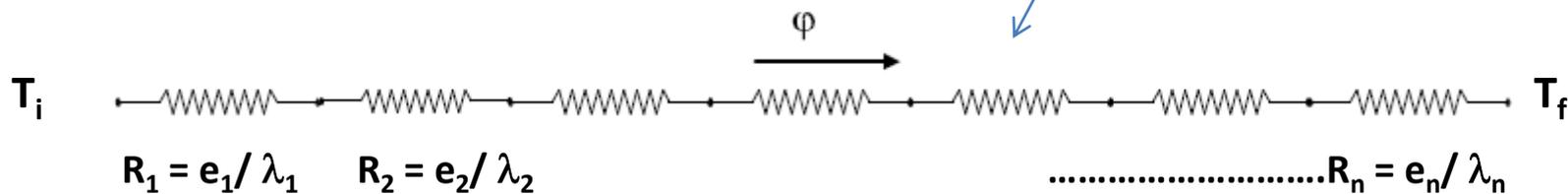
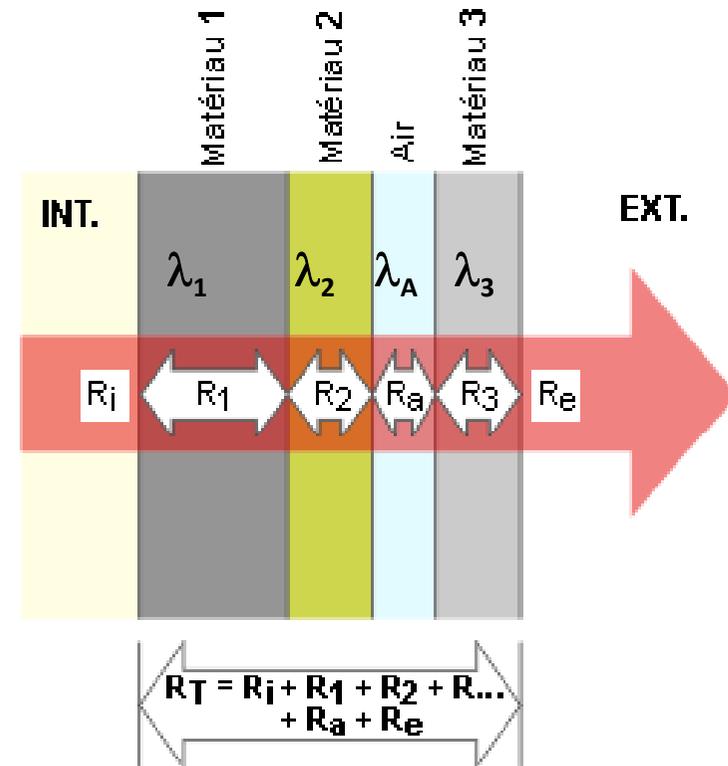


schéma ou circuit électrique équivalent

## II- Thermique

### II- 4- 3- Lois de Newton

Lors du transfert de chaleur **par convection** : entre un solide et un fluide comme par exemple entre l'air et la paroi d'un mur, le flux de chaleur est donné par la loi de Newton qui est analogue à la loi de Fourier :

$$\Phi = h S \Delta T$$

où  $h$  est le coefficient d'échange thermique. Il a pour unité:  $\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$   
ou coefficient de transfert de chaleur par convection

Rapportée à la densité de flux, cette loi s'écrit

$$\varphi = h \Delta T$$

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection  $h$  est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

La résistance thermique dans ce cas s'écrit :

$$R = 1/h$$

## II- Thermique

### II- 4- 4- Flux global

Dans le cas de transfert de chaleur par conduction et par convection, le flux total s'écrira alors :

$$\varphi = \frac{\phi}{S} = - \frac{\Delta T}{\sum R_i} \quad \text{avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} R_i = \frac{e_i}{\lambda_i} \quad \rightarrow \text{Transfert par conduction} \\ R_i = \frac{1}{h_i} \quad \rightarrow \text{Transfert par convection} \end{array} \right.$$

Faire un schémas équivalent avant de résoudre les exercices

exemple Mur composé

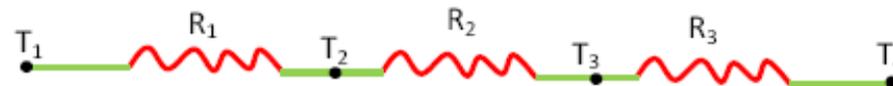
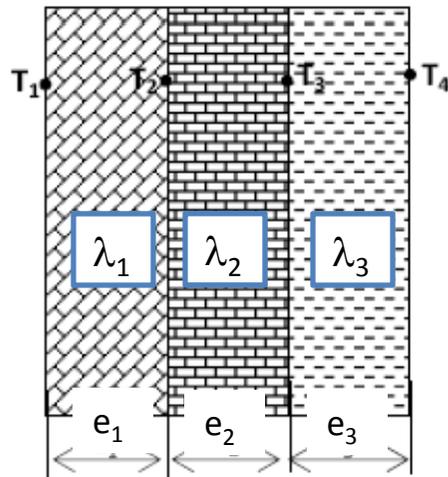


Schéma électrique équivalent

## II- Thermique

### Exemple 1

Calculer les pertes de chaleur par conduction à travers un mur de pierre de 35 cm d'épaisseur, de hauteur 3,5 m et de largeur 5,7 m. Les températures des faces sont respectivement de 22°C et 7°C.

On donne  $\lambda_{\text{pierre}} = 0,8 \text{ cal.h}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{(}^\circ\text{C)}^{-1}$ .

### Solution

- Les **pertes de chaleur** correspondent au flux de chaleur  $\Phi$  allant de la surface intérieure à  $T_1 = 22^\circ\text{C}$  vers la surface extérieure à  $T_2 = 7^\circ\text{C}$ . On a :  $\Phi = (T_1 - T_2) / R$

- **R** est la résistance thermique du mur de pierre définie par :  $R = e / \lambda.S$  avec **e** épaisseur du mur, **S** surface des faces du mur et  $\lambda$  conductivité thermique du constituant, c'est à dire de la pierre.

- Dans cette expression  **$\lambda$  doit être exprimé dans le S.I**, alors qu'ici il l'est dans un autre système d'unités. La méthode de conversion dans le S.I consiste alors à remplacer les unités utilisés par leur valeur dans le S.I :

$$\lambda = (0,8.10^3 \text{ cal}) / (1\text{h} \cdot 1\text{m} \cdot 1^\circ\text{C}) = (0,8.10^3 \cdot 4,18 \text{ J}) / (3600\text{s} \cdot 1\text{m} \cdot 1^\circ\text{C}) = (0,8.10^3 \cdot 4,18) / 3600 = \mathbf{0,93 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}}$$

- $R = e / \lambda.S = 0,35 / (3,5 \times 5,7 \times 0,93) = 0,019 \text{ K.W}^{-1}$

- $\Phi = (T_1 - T_2) / R = (22 - 7) / 0,019 = \mathbf{794\text{W}}$

**Remarque : on peut faire le calcul en degrés Celsius ou degrés Kelvin**

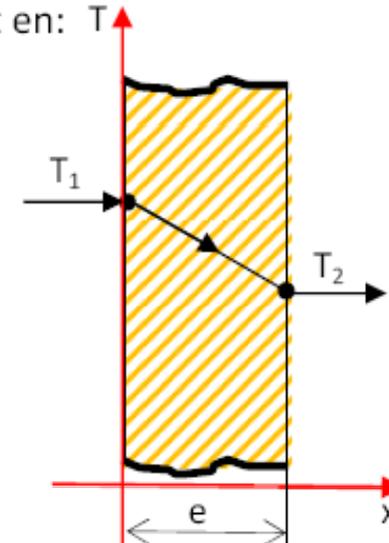
## II- Thermique

### Exemple 2 : tiré du polycopie de M. Mustapha Bordjane , Université d'Oran

Considérant le mur plan d'épaisseur 60mm représenté sur la figure ci-dessous. Si la densité de flux thermique à travers ce mur est de  $66.5 \text{ W/m}^2$ , calculer la différence de température aux surfaces et les valeurs numériques du gradient de température dans celui-ci si ce mur est en:

1. Laiton ( $\lambda=115 \text{ W/m.K}$ );
2. Granit ( $\lambda=3,5 \text{ W/m.K}$ );
3. Bois ( $\lambda=0,20 \text{ W/m.K}$ ).

Interpréter les résultats obtenus pour les trois matériaux



#### Solution

1. Mur en Laiton ( $k=115 \text{ W/m.K}$ )

$$\varphi = \frac{\phi}{S} = \frac{\lambda}{e} \Delta T \Rightarrow \Delta T = \frac{\varphi \cdot e}{\lambda} = \frac{66.5 \text{ W/m}^2 \cdot 0,06 \text{ m}}{115 \text{ W/m.K}} = 0,0347 \text{ K};$$

$$|\overline{\text{Grad}T}| = \left| \frac{dT}{dx} \right| = \frac{\Delta T}{e} = \frac{0,0347 \text{ K}}{0,06 \text{ m}} = 0,578 \text{ K/m};$$

## II- Thermique

2. Mur en Granit ( $k=3,5 \text{ W/m.K}$ )

$$\varphi = \frac{\phi}{S} = \frac{\lambda}{e} \Delta T \Rightarrow \Delta T = \frac{\varphi \cdot e}{\lambda} = \frac{66.5 \text{ W/m}^2 \cdot 0,06 \text{ m}}{3,5 \text{ W/m.K}} = 1,14 \text{ K};$$

$$|\overrightarrow{\text{Grad}T}| = \left| \frac{dT}{dx} \right| = \frac{\Delta T}{e} = \frac{1,14 \text{ K}}{0,06 \text{ m}} = 19 \text{ K/m};$$

3. Mur en Bois ( $k=0,20 \text{ W/m.K}$ )

$$\varphi = \frac{\phi}{S} = \frac{\lambda}{e} \Delta T \Rightarrow \Delta T = \frac{\varphi \cdot e}{\lambda} = \frac{66.5 \text{ W/m}^2 \cdot 0,06 \text{ m}}{0,20 \text{ W/m.K}} = 19,95 \text{ K};$$

$$|\overrightarrow{\text{Grad}T}| = \left| \frac{dT}{dx} \right| = \frac{\Delta T}{e} = \frac{19,95 \text{ K}}{0,06 \text{ m}} = 332,5 \text{ K/m};$$

On remarque que le bois présente une grande capacité d'isolation suivi par le granit puis du Laiton. Ce dernier ne fait descendre la température que de (0,578 K) par mètre d'épaisseur, comparé aux (19K) et (332,5K) du granit et du bois respectivement. Donc, pratiquement, le bois est le plus utilisé comme isolant thermique dans tous les domaines construction bâtiment, outils et appareils électroménagers...etc.

## II- Thermique

### Références Bibliographiques

- Transferts thermiques, Yves Jannot, Ecole des Mines, Nancy, 2012
- Physique pour l'architecte, Hassen Ghalila, Université de Tunis, 2007
- Modes de transferts thermiques, polycopie de Mostapha Bordjane, université d'Oran 2017
- Transferts thermique, Sophie Mergui, UPMC, Sorbonne Universités