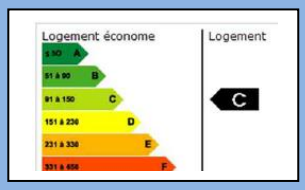
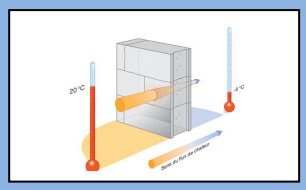


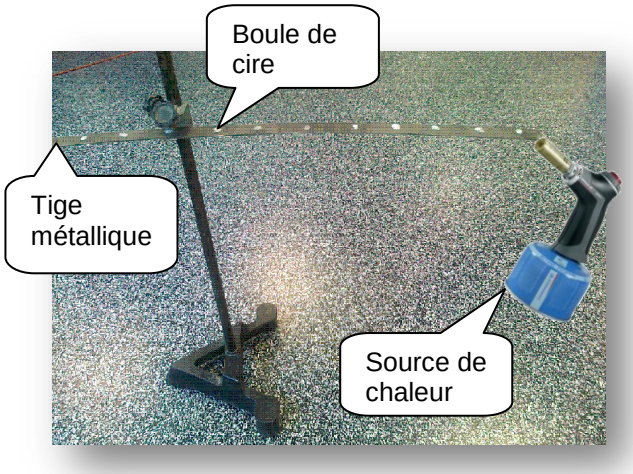
S8-Transfert thermique

La conduction



1- Protocole expérimental

Sur une tige métallique, fixée horizontalement, nous avons déposé de petites boules de cire de bougie. Nous allons chauffer l'extrémité de la barre à l'aide d'une flamme.

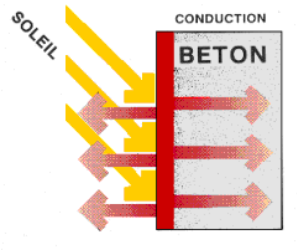


Observations :
Les boules de cire fondent les unes après les autres, à partir de l'extrémité chauffée.

Interprétation :
Le transfert thermique dans la barre se fait de proche en proche (sans transfert de matière) de la partie chaude vers la partie froide. Ce mode de transfert thermique s'appelle la **conduction**.

Conduction : la chaleur passe d'un corps à un autre, par contact. La chaleur se propage de proche en proche à travers la matière sans qu'il n'y ait transfert de cette dernière. La conduction se produit donc dans les solides, elle correspond à la propagation de l'énergie

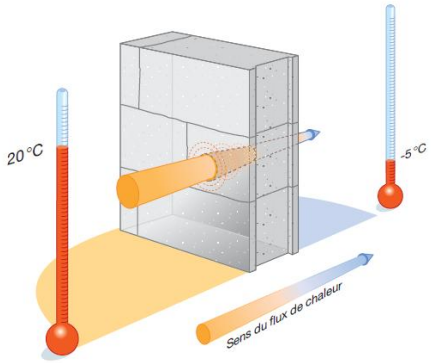
- **<u>Autres exemples de conduction</u> : Propagation de chaleur dans la matière**



Les rayons de soleil réchauffent une façade, la chaleur se propage par contact de proche en proche à travers la matière à l'intérieur des matériaux. La conduction correspond à la propagation de l'énergie cinétique d'agitation thermique des particules constituant la matière.

La vitesse de propagation de la chaleur dépend de la conductance du milieu (aptitude à transmettre la chaleur). Les transferts de chaleur dans les solides se font toujours par conduction.

La chaleur se propage en traversant la paroi de la face la plus chaude vers la face la plus froide. Nous verrons plus tard que le rôle d'un isolant est de freiner ce transfert. On parlera de la **résistance thermique** du matériau. Plus le matériau est isolant, moins il y a de conduction.



Ce transfert de chaleur sera d'autant plus important si :

- L'écart de température est grand. Pour une même température intérieure d'un local, l'échange de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur sera plus important lorsque la température extérieure est de -5°C que si il fait +5°C.
- Le mur a une faible épaisseur (pour un matériau donné).
- La surface d'échange est grande. Une chambre possédant un mur de 15m^2 en contact avec l'extérieur perd d'avantage de chaleur qu'une chambre n'ayant qu'un mur de 8m^2 en contact avec l'extérieur.

2- Définitions

Un matériau est homogène lorsque sa constitution est identique en tous ses points. Le contraire d'homogène est hétérogène.

Ex : le fer pur, mais le mélange "eau + huile" est hétérogène.

Un matériau est isotrope lorsqu'il possède les mêmes propriétés dans toutes les directions de l'espace.

Ex : les gaz sont isotropes, le verre est isotrope, mais le corps humain n'est pas isotrope.

Dans la suite, on ne considère que des matériaux homogènes et isotropes.

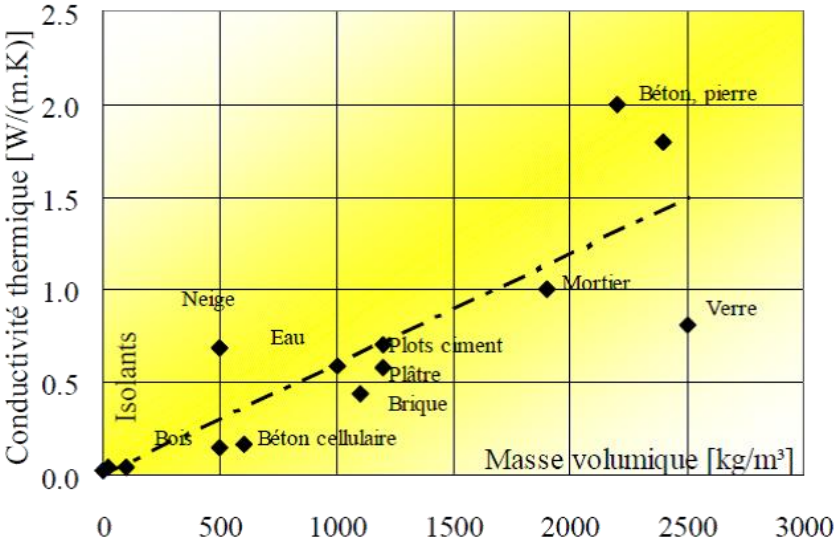
3- Le flux thermique ou puissance thermique

3.1- La conductivité thermique du matériau λ.

La conductivité thermique λ **(lambda)** mesure l'aptitude d'un matériau à transmettre la chaleur par conduction.
Unité de λ : W/m/K.

Plus le coefficient λ est élevé, plus le matériau est conducteur, et plus λ est faible, plus le matériau est isolant.
Plus un matériau est léger plus il est isolant.
Plus un matériau est chaud plus il est conducteur.
Plus le matériau est humide, plus il est conducteur

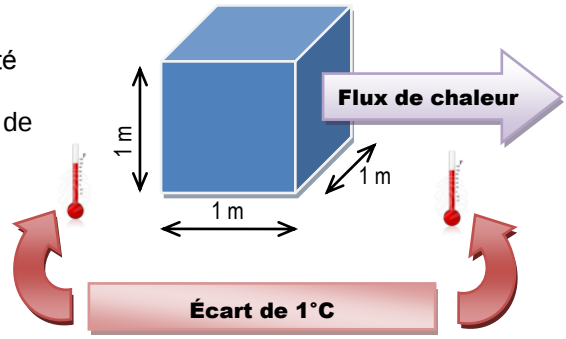
- Quelques valeurs : voir annexe .



Comment est obtenu ce coefficient de conductivité thermique (λ) ?

La conductivité thermique d'un matériau correspond à la quantité de flux de chaleur (en watt) qui traverse en 1 seconde 1 m² de paroi de ce matériau, pour 1 m d'épaisseur pour une différence de température entre les deux faces de 1°C.

λ s'exprime aussi en **W/m.°C** et il est fournit par le fabricant du matériau.



Ex. :

Dans le tableau ci-dessus relevez la valeur du coefficient de conductivité thermique $\lambda_{béton\ (plein)}$, celle du polystyrène expansé étant de 0,036 **W/m.K** .
Calculer l'épaisseur d'un mur en béton isolant autant que 10 cm de polystyrène.

$\lambda_{béton\ (plein)}$ = 2

$\lambda_{polystyrène}$ = 0,036

Le béton conduit 55,55 fois plus que le polystyrène : 2 / 0,036 = 55,55

Le mur en béton sera donc 55,55 fois plus épais : 10 x 55,55 = 555,5 cm ou 5,55 m

3.2- La résistance thermique R_{th}.

La résistance thermique R d'une paroi permet de connaître la résistance au passage de la chaleur
Plus un matériau est isolant, plus sa résistance thermique R est grande, plus Φ est petit.
Plus la différence de température est grande de chaque coté d'une paroi, plus Φ est grand.

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda . S}$$

R_{th} : K.W^{-1} ou ~~°C.W^{-1}~~ ; W.m^{-1}.K^{-1} ou W.m^{-1}.°C^{-1}

e : m ; S : m² ; λ : W.m^{-1}.K^{-1} ou W.m^{-1}.°C^{-1}

e : épaisseur du composant
S : surface du composant
λ : conductivité du composant

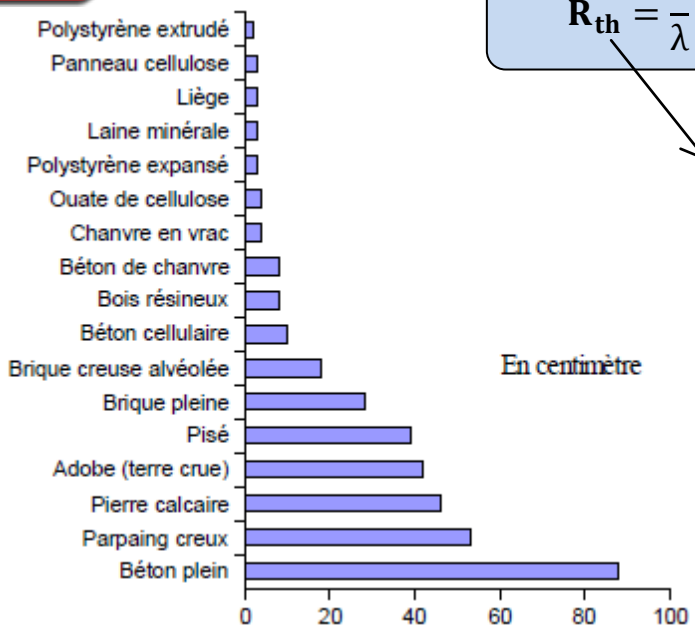
Ce calcul représente alors la résistance thermique de toute la paroi.

Il peut arriver que les fabricants ramènent la résistance thermique Rth à une surface de 1 m², dans ce cas :

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

nota : S = 1m²

R_{th} : K.W^{-1}/m²



3.3- Le Coefficient de transmission surfacique « U* » (*anciennement K)

Ce coefficient a pour but d'indiquer la performance thermique d'une surface, sa valeur correspond à la quantité de chaleur qui traverse une paroi. Il est noté :

U : **coefficient global de transmission thermique** de la paroi, appelé aussi **conductance**.

Il s'exprime en W.m^{-2}.K^{-1} ou W/m².K
et se calcule de la manière suivante :

$$U = \frac{1}{R_{th}}$$

Plus U est faible, plus la paroi est isolante.

Dans le cadre de la RT 2012, le calcul s'effectue de la même manière mais n'est plus un objectif en soi .Le coefficient Ubat est remplacé par U Bio.
Les valeurs de références U_{bat} ref sont définis en fonction des zones géographiques (montagne, mer,..) et de l'altitude.
Des indices U_j sont utilisés :

- U_P : déperdition par le plancher haut entre local chauffé et comble perdu.
- U_W : déperdition par l'ensemble (vitrage + châssis).
- U_{JN} : déperdition par l'ensemble (vitrage + châssis + volets).
- U_E : déperdition par le plancher bas entre local chauffé et sol ou vide sanitaire, ou sous-sol non chauffé.
- U_g : déperdition par les vitres.
- U_d : déperdition par la porte d'entrée donnant sur l'extérieur ……

3.4- Le flux thermique

Le **flux thermique** ou **puissance thermique** Φ, exprimée en **watt** (W), traduit une **vitesse de transfert d'énergie** (ΔE ou Q)**.** C'est la variation d'énergie transférée au cours d'une durée :

$$\Phi = \frac{\Delta Q}{t}$$

Watt : W — Joule : J — Seconde : s

Φ est toujours positif

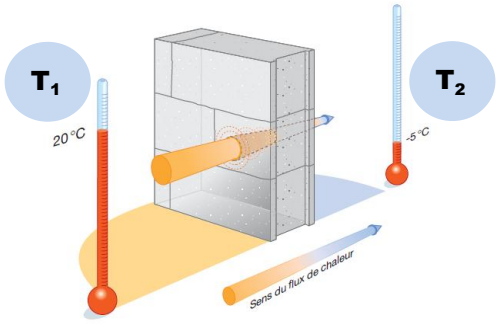
- Si on exprime le flux thermique par unité de surface, on obtient la **densité de flux** φ, ou flux **thermique surfacique** et s'exprime par la relation :

$$\varphi = \frac{\Phi}{S}$$

Watt : W — $W.m^{-2}$ ou W/m^2 — m^2

On se placera dans la situation du **régime permanent** pour le flux de chaleur, c'est-à-dire qu'on se place dans le cas où la propagation de la chaleur se fait **sans accumulation : tout le flux est transmis intégralement.**

Loi de Fourier



Cas d'un mur simple

Le flux thermique ou puissance thermique qui traverse une section **S** du milieu à l'instant t est donné par la loi de Fourier :

$$\Phi = \frac{1}{R_{th}}(T_1 - T_2) \Rightarrow \Phi = \frac{\lambda . S}{e}(T_1 - T_2)$$

La densité du flux sera :

$$\varphi = \frac{\Phi}{S} = \frac{1}{R_{th} . S}(T_1 - T_2) = \frac{\lambda}{e}(T_1 - T_2)$$

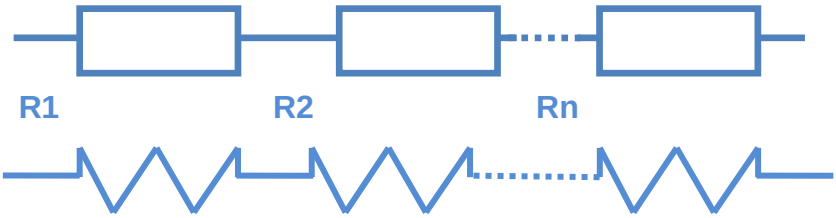
Analogie Thermique – Électrique

	Thermique	Électrique
Flux	flux de chaleur (**Φ**)	courant électrique (**i**)
Résistance	résistance thermique (**R_{th}**)	résistante électrique (**R**)
Conditions limites	différence de températures ($\Delta T = T_1 - T_2$)	différence de potentiel ($U = U_2 - U_1$)
Équation	**$\Delta T = R_{th} . \Phi$**	Loi d'Ohm : **U = R . i**
Schématisation	Conduction thermique $\Delta T = R_{th}\Phi = (e/\lambda S)\Phi$ T_A — R_{th} — T_B Φ	$\Delta U = RI$ U_1 — R — U_2 I

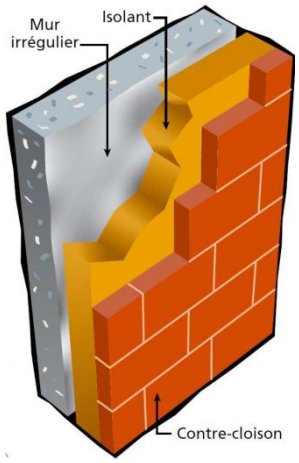
Cas des « murs multiples »

- **Cas 1**

Un mur est rarement constitué d'un matériau unique, il comporte le plus souvent, un matériau isolant, un enduit intérieur (plaque de plâtre par exemple) et un enduit extérieur. L'ensemble se comporte comme s'il y avait plusieurs murs accolés, chacun mur étant traversé par le **même flux de chaleur**.

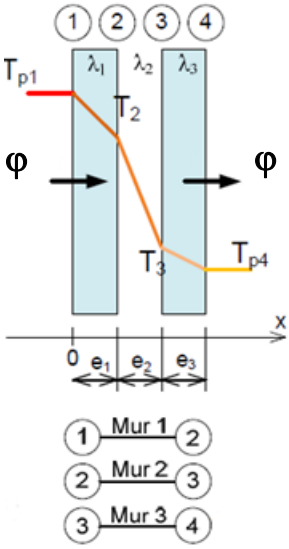


OU



Hypothèses :

- Pas de source interne de chaleur
- Toute la surface à la même température
- Régime permanent et propagation unidirectionnelle.



On a donc :

$$\varphi = \frac{(T_{p1} - T_2)}{R_1} = \frac{(T_2 - T_3)}{R_2} = \frac{(T_3 - T_{p4})}{R_3}$$

Si je fais l'addition :

Paroi 1 : $R_1.\varphi = (T_{p1} - T_2)$
Paroi 2 : $R_2.\varphi = (T_2 - T_3)$
Paroi 3 : $R_3.\varphi = (T_3 - T_{p4})$

$$(R_1 + R_2 + R_3).\varphi = (T_{p1} - T_{p4})$$

Si on fait la somme des numérateurs et la somme des dénominateurs, on trouve une fraction égale aux autres :

$$\varphi = \frac{(T_1 - T_{n+1})}{\sum_{i=1}^{n} R_i}$$

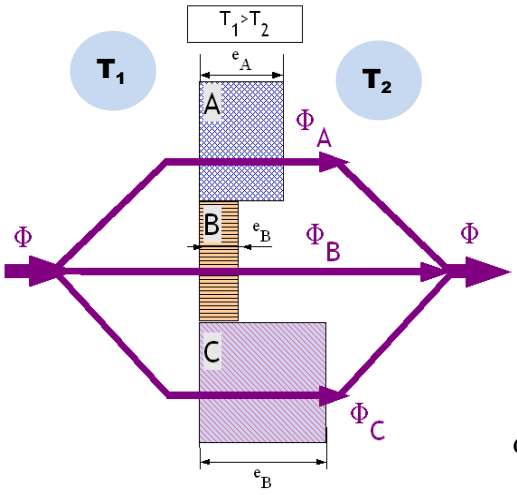
Si on désigne par R_{th} la résistance thermique par unité de surface du mur composé, alors :

$$R_{th} = \sum_{i=1}^{n} R_i = R_1 + R_2 + \cdots + R_n = \sum_{i=1}^{n} \frac{e_i}{\lambda_i} = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \cdots + \frac{e_n}{\lambda_n}$$

On voit donc que pour des matériaux accolés les uns aux autres, leurs résistances thermiques s'ajoutent, comme pour les résistances électriques associées en série.

- **Cas 2**

Si on se place maintenant dans le cas d'un mur composé de matériaux différents associés en « parallèle » (par exemple un mur avec une ouverture (vitrage + imposte bois)) :



Le flux total possède 3 composantes Φ_A, Φ_B et Φ_C tel que $\Phi = \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C$

Si on exprime les densités de flux, on a :

$$\varphi_A = \frac{(T_1 - T_2)}{R_A} \qquad \varphi_B = \frac{(T_1 - T_2)}{R_B} \qquad \varphi_C = \frac{(T_1 - T_2)}{R_C}$$

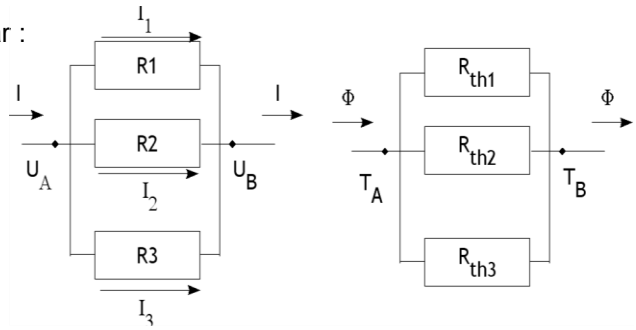
$$\varphi = \frac{(T_1 - T_2)}{R_A} + \frac{(T_1 - T_2)}{R_B} + \frac{(T_1 - T_2)}{R_C}$$

$$\varphi = \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}\right)(T_1 - T_2) \quad \text{et} \quad \boxed{\frac{1}{R_{th}} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}}$$

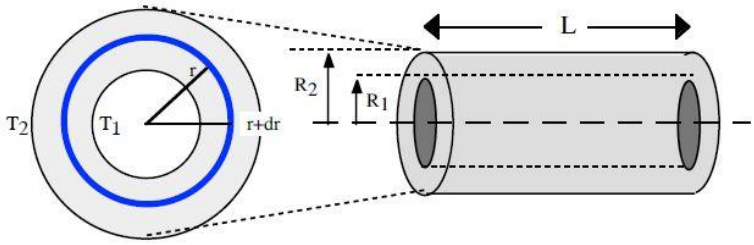
On voit donc que pour des matériaux associés en parallèles
la résistance thermique du mur par unité de surface s'exprime par :

$$\boxed{\frac{1}{R_{th}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}}$$

Analogie avec des résistances électriques placées en dérivation



- **Cas 3 : Dispositif à géométrie circulaire (exemple tuyau)**



Considérons un manchon homogène de rayon interne r_1, de rayon externe r_2 et de longueur L.
La surface interne est maintenue à une température T_1 et la surface externe à la température T_2.

A la distance r de l'axe, on définit le cylindre de rayon r, d'épaisseur élémentaire dr et de surface S tel que

$S = 2\pi.r.L$

Expression généralisée de la résistance thermique : $R_{th} = \frac{e}{\lambda . S}$

La résistance thermique élémentaire du cylindre s'exprime donc par : $dR_{th} = \frac{1}{\lambda}\frac{dr}{2\pi . r . L}$

En intégrant entre r_1 et r_2 on obtient la résistante thermique totale :

$$\boxed{R_{th} = \frac{1}{\lambda 2\pi . L}\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{r} = \frac{1}{\lambda . 2\pi . L}(\ln r_2 - \ln r_1) = \frac{1}{\lambda . 2\pi . L}\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

Conductivités thermiques utiles (λ) des matériaux de construction

Type	ρ (kg/m³)	λ W/(m·°C)
Pierres et terres comprimées		
Granites	2 750	3,50
Porphyres	2 500	3,50
Ardoise	2 700	2,10
Marbre	2 600	2,90
Grès	2 540	2,20
Meulières	2 250	1,70
Blocs de terre comprimée	1 800	1,05
Briques (terres cuites)		
alvéolées [5 - 10 - 15 - 20 cm]	1 800	0,50
pleines	1 900	1,15
Parpaings alvéolés [10 - 15 - 20 cm]		1,00
Bétons		
béton plein	2 300	1,75
béton plein avec sable de rivière	2 300	1,40
béton caverneux à 10 % de sable de rivière	1 800	0,70
Bétons de granulats légers		
béton de pouzzolane avec sable	1 500	0,44
béton de ponce naturelle	1 000	0,46
béton d'argile expansé avec sable de rivière	1 300	0,70
béton de perlite dosage 3/1	700	0,31
béton cellulaire traité à l'autoclave	800	0,33
béton cellulaire traité à l'autoclave	600	0,22
béton cellulaire traité à l'autoclave	400	0,16
Mortiers d'enduits	1 950	1,15
Plâtres		
gachés serré	1 200	0,70
avec granulats légers	800	0,34
carreaux de plâtres [5 - 7 cm]		0,35

Type	ρ (kg/m³)	λ W/(m·°C)
Bois		
chêne, hêtre, fruitiers	700	0,23
pin	500	0,15
sapin, épicéa	450	0,12
peuplier, oukoumé	450	0,12
balsa	90	0,05
Panneaux de particules		
pressés à plat	600	0,15
bois extrudés	650	0,16
particules de lin	500	0,10
liège comprimé	500	0,10
liège expansé	125	0,043
Polystyrène expansé		
moulage classe 4	25	0,039
thermo-comprimé	20	0,037
extrudé	38	0,029
mousse rigide polyuréthane expansée	35	0,029
Laine de verre	20 à 300	0,04
Verre	2 700	1,15
Métaux		
acier	7 780	52
fonte	7 500	56
cuivre	8 930	380
aluminium	2 700	230
laiton	8 340	110
plomb	11 340	35
zinc	7 130	112
Air immobile		
lame verticale		0,16
lame horizontale		0,14