

**!!!!!! ATTENTION !!!!!**

**Interdiction Formelle de reproduire**

**(Désolé , je n'ai pas eu le temps de mettre la bibliographie utilisée!!)**

**- Ce document est un support du cours que je donne et non pas un cours en lui-même.**

# Les propriétés thermiques



# Les propriétés thermiques

1. La température de fusion
2. La capacité thermique
3. La chaleur spécifique
4. L'expansion thermique
5. La contrainte thermique
6. La conductibilité thermique
7. Les isolants
8. Le choc thermique
9. La diffusivité
10. La résistance thermique
11. L'effusivité
12. L'émissivité
13. Rigidité diélectrique
14. ....

Quel sont les éléments dont la température de fusion est la plus élevée?

# 1. Température de Fusion

H -259																He -272	
Li 181	Be 1 287											B 2 075	C 3 500	N -210	O -219	F -219	Ne -249
Na 98	Mg 650											Al 660	Si 1 414	P 44	S 115	Cl -102	Ar -189
K 64	Ca 842	Sc 1 541	Ti 1 668	V 1 910	Cr 1 907	Mn 1 246	Fe 1 538	Co 1 495	Ni 1 455	Cu 1 085	Zn 420	Ga 30	Ge 938	As 817	Se 221	Br -7	Kr -157
Rb 39	Sr 777	Y 1 522	Zr 1 855	Nb 2 477	Mo 2 623	Tc 2 157	Ru 2 333	Rh 1 964	Pd 1 555	Ag 962	Cd 321	In 157	Sn 232	Sb 631	Te 450	I 114	Xe -112
Cs 29	Ba 727	*	Hf 2 233	Ta 3 017	W 3 422	Re 3 185	Os 3 033	Ir 2 446	Pt 1 768	Au 1 064	Hg -39	Tl 304	Pb 327	Bi 271	Po 254	At 302	Rn -71
Fr 27	Ra 696	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo
*	La 920	Ce 799	Pr 931	Nd 1 016	Pm 1 042	Sm 1 072	Eu 822	Gd 1 313	Tb 1 359	Dy 1 412	Ho 1 472	Er 1 529	Tm 1 545	Yb 824	Lu 1 663		
**	Ac 1 050	Th 1 750	Pa 1 572	U 1 135	Np 644	Pu 640	Am 1 176	Cm 1 345	Bk 986	Cf 900	Es 860	Fm 1 527	Md 827	No 827	Lr 1 627		

# 1. Température de Fusion

Relation entre **température de fusion**

et

- Type de **liaison atomique?**
- **Classe** des matériaux?

## 2. Capacité Thermique

La **capacité thermique** est l'énergie requise pour augmenter la température d'une mole d'un matériau de 1°K.

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

Cette dernière peut être réalisée à volume constant et est alors représentée par la dérivé de la variation de l'énergie interne du matériau,  $\Delta E$ , en fonction de la température:

$$C_v = \left( \frac{dE}{dT} \right)_v$$

La capacité thermique peut aussi être réalisée à pression constante et est alors représentée par la dérivé de l'enthalpie en fonction de la température:

$$C_p = \left( \frac{dH}{dT} \right)_p$$

La **capacité thermique** d'un matériau est utilisée pour indiquer qu'il faut une quantité de chaleur différente pour augmenter la température de différents matériaux d'une quantité donnée.

**Exemple :**

-4.18J pour chauffer 1g d'eau à 1 °C.

-la même énergie chauffe 1 g de cuivre à 11 °C.

La valeur exacte de la capacité calorifique dépend des conditions dans lesquelles vous la mesurez

A température ambiante, la différence pour les solides est d'environ 5%

	$c_p$ (J/gK)	$C_p$ (J/mol.K)
<b>Al</b>	<b>0.899</b>	<b>24.3</b>
<b>Fe</b>	<b>0.460</b>	<b>25.7</b>
<b>Ni</b>	<b>0.456</b>	<b>26.8</b>
<b>Cu</b>	<b>0.385</b>	<b>24.4</b>
<b>Pb</b>	<b>0.130</b>	<b>26.9</b>
<b>Ag</b>	<b>0.236</b>	<b>25.5</b>
<b>C</b>	<b>0.904</b>	<b>10.9</b>
<b>Water</b>	<b>4.184</b>	<b>75.3</b>

### 3. Chaleur Spécifique

En règle générale, la **chaleur spécifique** est plus souvent employée en ingénierie que la capacité thermique. Ces deux paramètres sont reliés par la relation suivante:

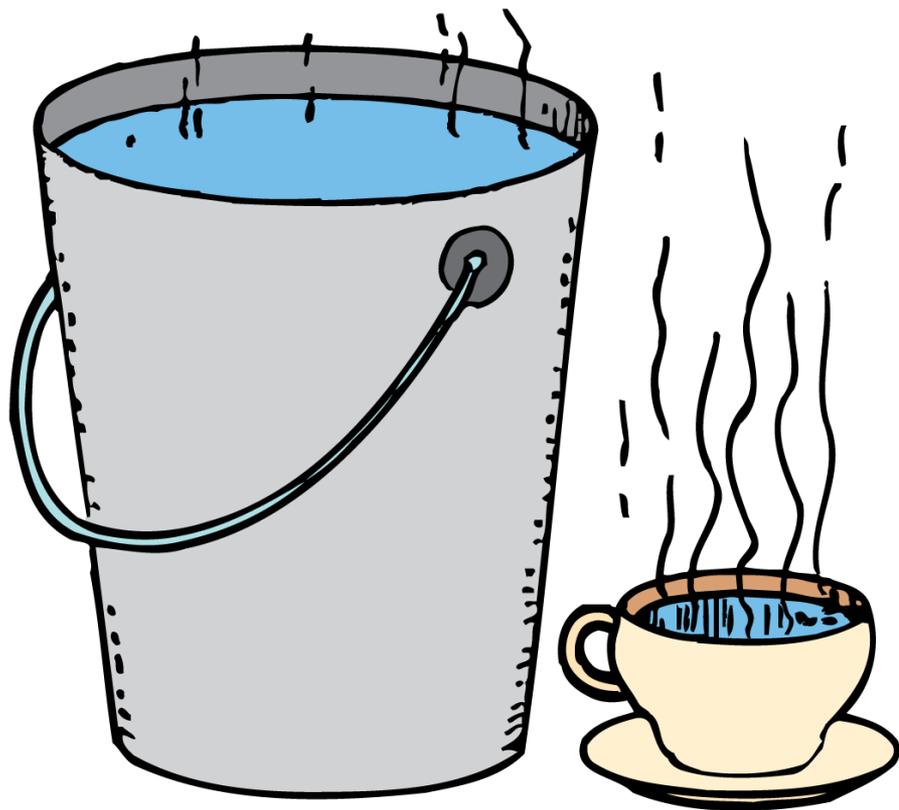
$$\text{chaleur spécifique} = c = \frac{\text{capacité thermique}}{\text{masse atomique}}$$

**Donc, plus la valeur de 'C' est élevée**

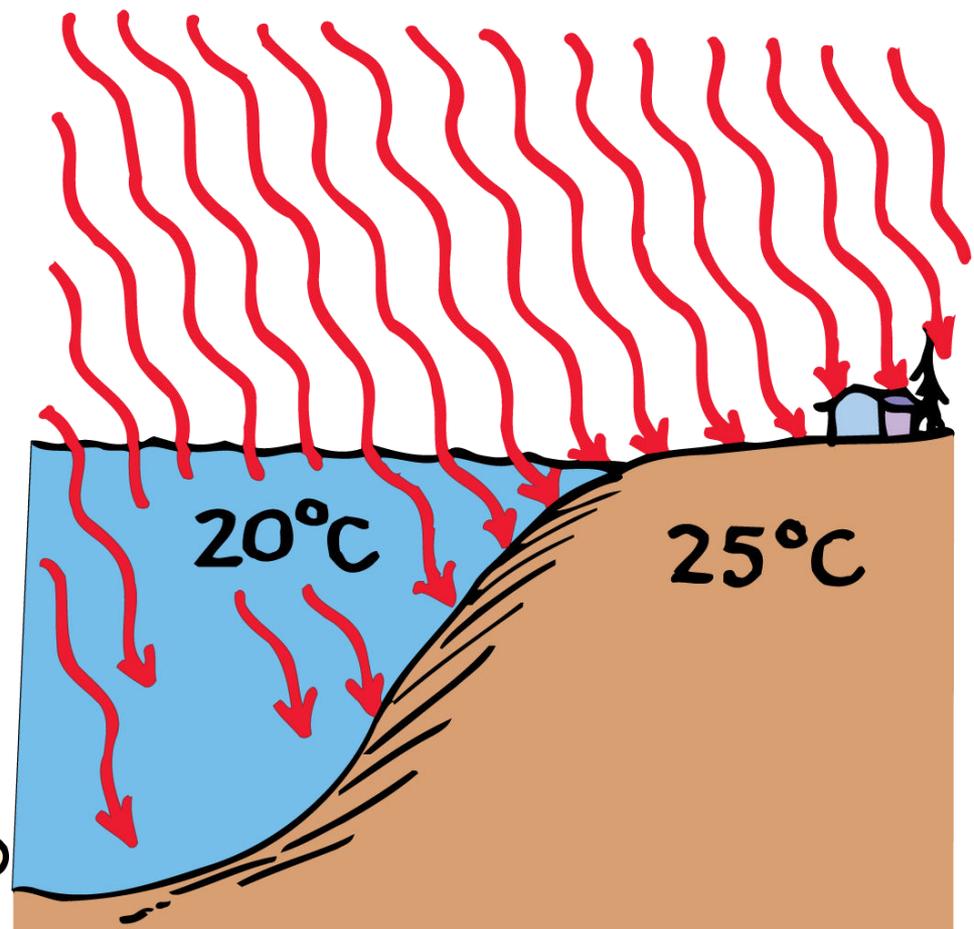


**plus il est difficile de chauffer le matériau**

Il y a plus d'énergie cinétique moléculaire dans le seau d'eau chaude que dans le petit verre d'eau à température plus élevée (**Vrai ou Faux?**).



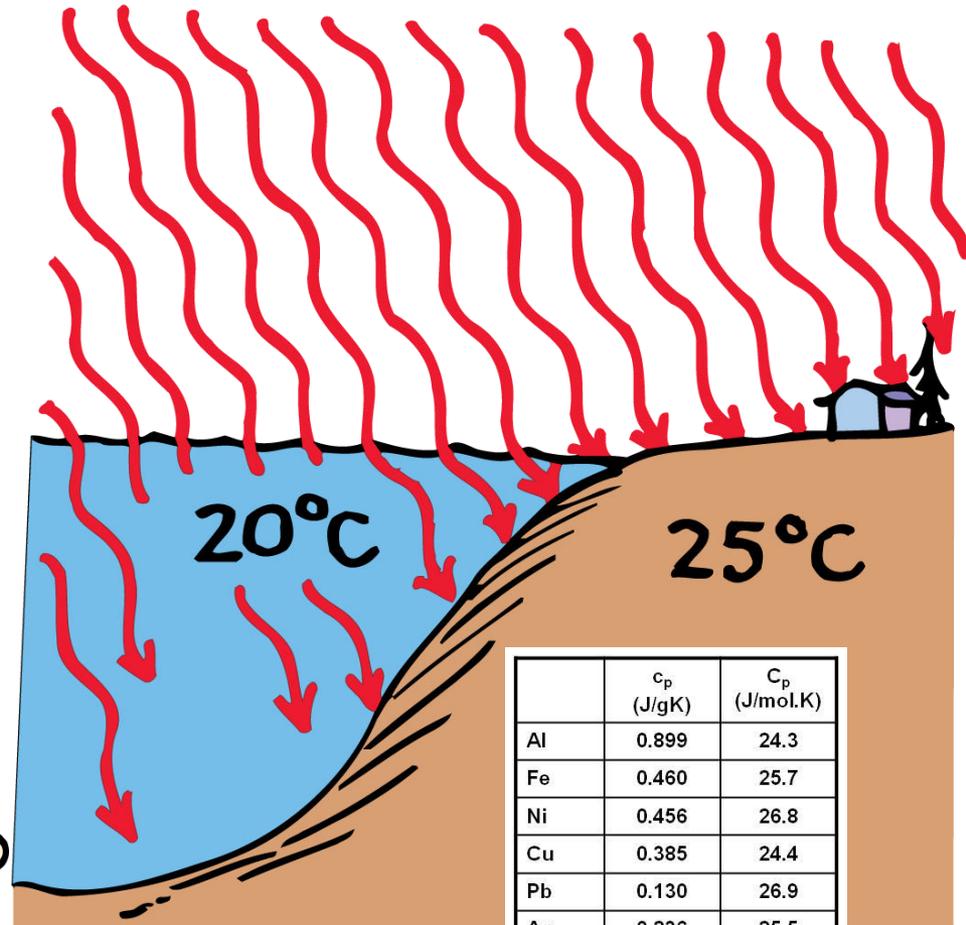
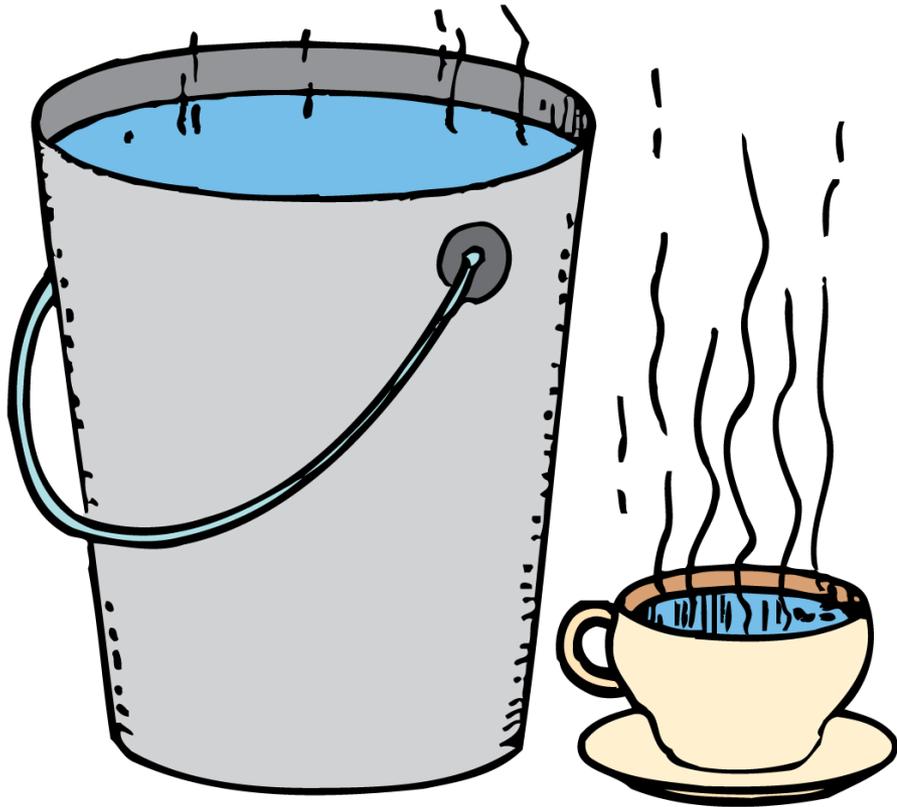
Il est plus difficile de chauffer l'eau ou la terre?



Il est plus difficile de chauffer l'eau ou la terre?

L'eau a une chaleur spécifique élevée et est transparente, il faut donc plus d'énergie pour se réchauffer que la terre

Il y a plus d'énergie cinétique moléculaire dans le seau d'eau chaude que dans le petit verre d'eau à température plus élevée (**Vrai ou Faux?**).



	$c_p$ (J/gK)	$C_p$ (J/mol.K)
Al	0.899	24.3
Fe	0.460	25.7
Ni	0.456	26.8
Cu	0.385	24.4
Pb	0.130	26.9
Ag	0.236	25.5
C	0.904	10.9
Water	4.184	75.3

## Exemple1

Quelle quantité de chaleur doit être fournie à **1kg** d'aluminium pour augmenter sa température de **20°C** à **500°C**?

## Chaleur spécifique de certains matériaux à 27°C

Material	Specific Heat (cal/g · K)	Material	Specific Heat (cal/g · K)
<b>Metals:</b>		<b>Ceramics:</b>	
Al	0.215	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.20
Cu	0.092	Diamond	0.124
B	0.245	SiC	0.25
Fe	0.106	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0.17
Pb	0.038	SiO <sub>2</sub> (silica)	0.265
Mg	0.243	<b>Polymers:</b>	
Ni	0.106	High-density polyethylene	0.44
Si	0.168	Low-density polyethylene	0.55
Ti	0.125	Nylon-6,6	0.40
W	0.032	Polystyrene	0.28
Zn	0.093	<b>Other:</b>	
		Water	1.00
		Nitrogen	0.249

Note: 1 cal/g · K = 4184 J/kg · K

## Exemple 1

Quelle quantité de chaleur doit être fournie à **1kg** d'aluminium pour augmenter sa température de **20°C** à **500°C**?

## Solution

$$\begin{aligned}\text{Chaleur requise} &= (\text{chaleur spécifique})(\text{masse})(\Delta T) \\ &= (0,215 \text{ cal/g}\cdot\text{K})(1000 \text{ g})(500-20) \\ &= 103\,200 \text{ calories} \quad (1 \text{ cal} = 4,184 \text{ J}) \\ &= 431.8 \text{ KJ}\end{aligned}$$

## 4. Dilatation (Expansion) Thermique

Le changement de dimension du matériau par unité de longueur suite à un changement de température est donné par le **coefficient de dilatation thermique**:

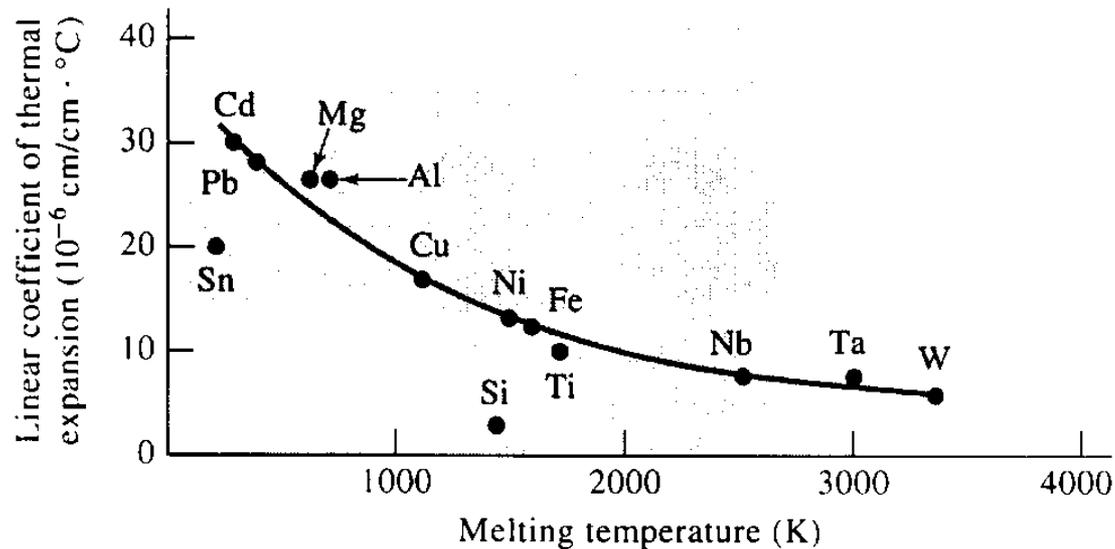
$$\alpha = \frac{l_f - l_0}{l_0 (T_f - T_0)}$$

Suivant si le matériau est anisotrope ou non, le coefficient de dilatation thermique varie ou non selon la direction de mesure.

**Relation entre  $\alpha$  et  $T_f$  ?**

(L'équation du coefficient de dilatation en fonction de la température étant souvent très complexe à exprimer, on considère souvent le coefficient de dilatation constant et valide uniquement pour une certaine portée de température)

De même, plus le **point de fusion** d'un matériau est élevé, plus son coefficient **de dilatation thermique** est faible.



Le **coefficient de dilatation**  
change  
continuellement **avec la**  
**température.**

# Dilatation thermique

- Coeff. de dilatation thermique linéaire

$$\frac{l_f - l_0}{l_0} = \alpha_l (T_f - T_0)$$

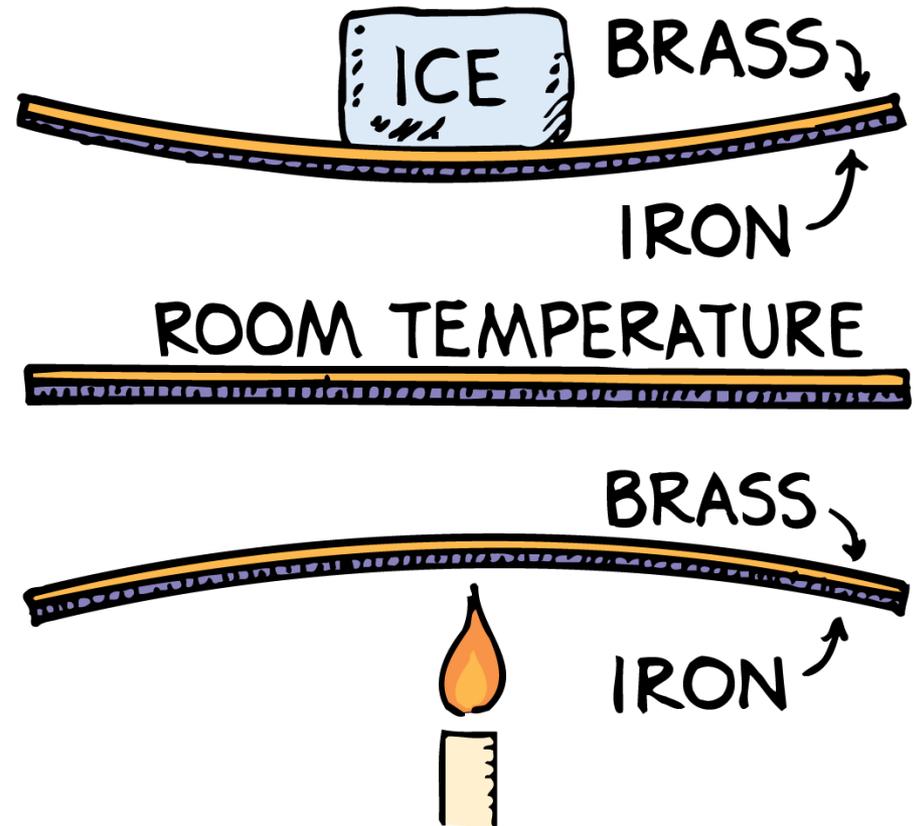
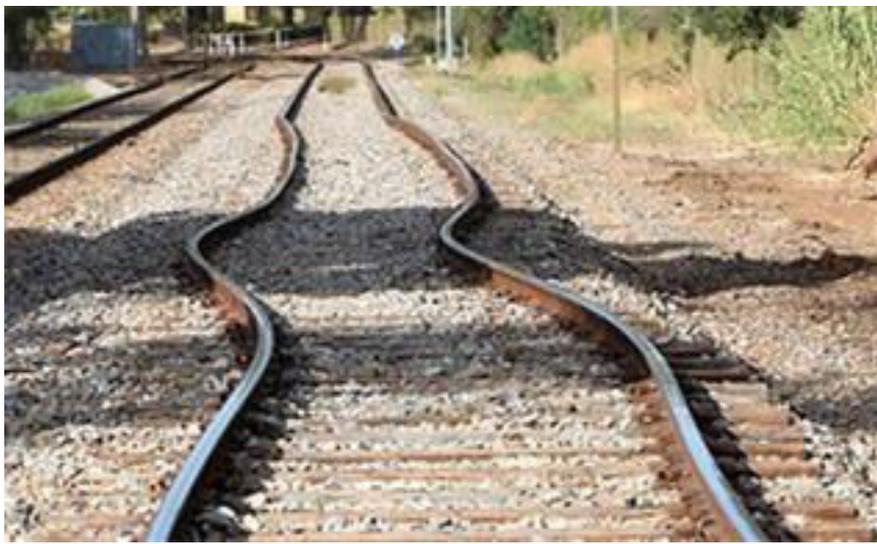
- Ou  $\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha_l \Delta T$

- Coeff. de dilatation thermique volumique

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \alpha_v \Delta T$$

- Pour un matériaux isotrope  $\alpha_v = 3 \alpha_l$

Material	$\alpha$ [ $^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$ ]
Al	23.6
Cu	17.0
Fe	11.8
Ag	19.7
W	4.5
stainless steel	16.0
glass	9.0
polyethylen	~150
nylon	144



Dans une bande bimétallique, le laiton se dilate (ou se contracte) davantage lorsqu'il est chauffé (ou refroidi) que le fer, de sorte que la bande se plie comme illustré.

	<b>Coefficient de dilatation moyen K<sup>-1</sup></b>	<b>Valeur la + faible</b>	<b>Valeur la + élevée</b>
<b>Céramiques</b>	$5 \times 10^{-6}$	Silice = $0.54 \times 10^{-6}$	Verres = $12 \times 10^{-6}$
<b>Métaux</b>	$20 \times 10^{-6}$	Tungstène = $4.5 \times 10^{-6}$	Alcalins = $80 \times 10^{-6}$
<b>Polymères</b>	$80 \times 10^{-6}$	PMMA (plexi) = $5 \times 10^{-6}$	PE (p.éthylène) = $5 \times 10^{-6}$

<i>Material</i>	$c_p$ (J/kg-K) <sup>a</sup>	$\alpha_l$ [(°C) <sup>-1</sup> × 10 <sup>-6</sup> ] <sup>b</sup>	$k$ (W/m-K) <sup>c</sup>	$L$ [Ω · W/(K) <sup>2</sup> × 10 <sup>-8</sup> ]
<b>Metals</b>				
Aluminum	900	23.6	247	2.20
Copper	386	17.0	398	2.25
Gold	128	14.2	315	2.50
Iron	448	11.8	80	2.71
Nickel	443	13.3	90	2.08
Silver	235	19.7	428	2.13
Tungsten	138	4.5	178	3.20
1025 Steel	486	12.0	51.9	—
316 Stainless steel	502	16.0	15.9	—
Brass (70Cu-30Zn)	375	20.0	120	—
Kovar (54Fe-29Ni-17Co)	460	5.1	17	2.80
Invar (64Fe-36Ni)	500	1.6	10	2.75
Super Invar (63Fe-32Ni-5Co)	500	0.72	10	2.68
<b>Ceramics</b>				
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	775	7.6	39	—
Magnesia (MgO)	940	13.5 <sup>d</sup>	37.7	—
Spinel (MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	790	7.6 <sup>d</sup>	15.0 <sup>e</sup>	—
Fused silica (SiO <sub>2</sub> )	740	0.4	1.4	—
Soda-lime glass	840	9.0	1.7	—
Borosilicate (Pyrex) glass	850	3.3	1.4	—
<b>Polymers</b>				
Polyethylene (high density)	1850	106–198	0.46–0.50	—
Polypropylene	1925	145–180	0.12	—
Polystyrene	1170	90–150	0.13	—
Polytetrafluoroethylene (Teflon)	1050	126–216	0.25	—
Phenol-formaldehyde, phenolic (Bakelite)	1590–1760	122	0.15	—

## 5. Contrainte Thermique

Lorsqu'un matériau est chauffé ou refroidi lentement, il se dilate uniformément sans contrainte résiduelle. Toutefois, si le déplacement du matériau est **restreint**, le **changement de volume** causé par la température peut ne pas être possible et des **contraintes thermiques** pourront alors se développer (exemple: joints d'expansion sur les ponts).

$$\sigma_{thermique} = \alpha \cdot E \cdot \Delta T$$

-Des contraintes thermiques se développent aussi à l'**interface** de deux matériaux avec des coefficients de dilatation thermique différents sous l'effet d'un changement de température (exemples: matériaux composite, peinture).

-Des contraintes thermiques se produisent aussi lors de **changements rapides de température** (exemple: verre trempé).

## Exemple2



Un revêtement doit être appliqué sur une plaque d'acier de sorte à ralentir la corrosion. Le revêtement présente un coefficient de dilatation thermique de  **$10 \times 10^{-6} \text{ cm/cm}\cdot^{\circ}\text{C}$** , une résistance de **25 MPa** et un module élastique de **100 GPa**.

-Calculer le changement de température admissible de sorte qu'il n'y ait pas fissuration du revêtement si le coefficient de dilatation thermique de l'acier est de  **$12 \times 10^{-6} \text{ cm/cm}\cdot^{\circ}\text{C}$** ?

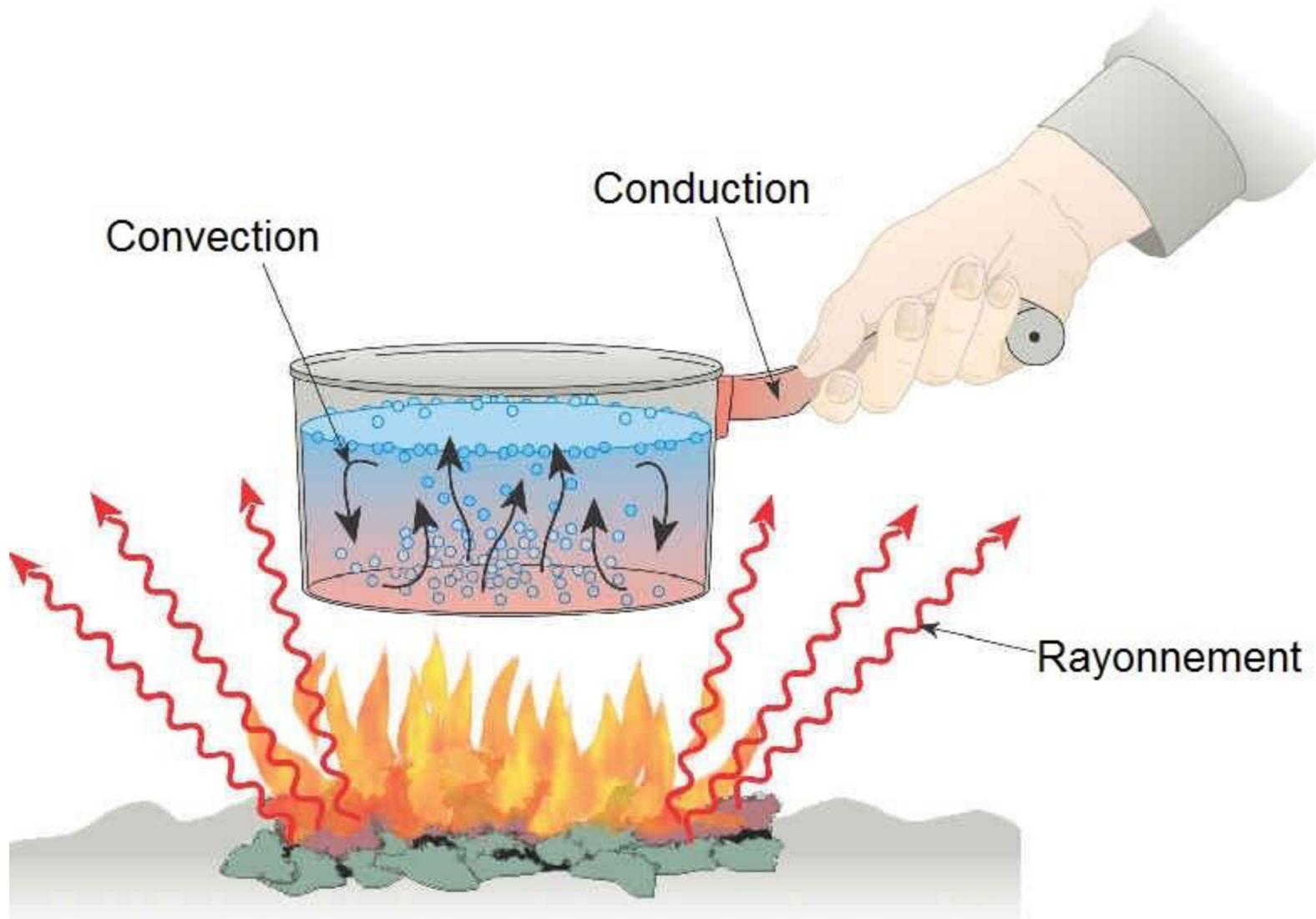
$$\sigma_{thermique} = \alpha \cdot E \cdot \Delta T = R_m$$

$$\alpha = 12 - 10 = 2 \times 10^{-6} \text{ cm/cm}\cdot^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T = \frac{R_m}{E \alpha} = \frac{25}{100000 \times 2 \times 10^{-6}} = 125^{\circ}\text{C}$$

# Quels sont les Mécanismes d'échange thermiques?

# Mécanismes d'échange thermique



# Il existe trois types de transfert de la chaleur :

## La convection :

Le fluide transporte de la chaleur lors de son mouvement.

La convection n'est donc valable que dans les fluides (liquides ou gaz) et suppose un mouvement d'ensemble macroscopique du fluide.

**Exemple :** Rouleaux de convection dans l'atmosphère ou dans la casserole.

## Le rayonnement :

Tout corps chaud émet des ondes électromagnétiques, qui propagent de l'énergie.

Le rayonnement ne dépend que de la température du corps émetteur : rayonnement du corps noir (physique statistique et quantique) et l'énergie se propage même dans le vide.

**Exemple :** Le Soleil rayonne dans le visible et chauffe la Terre à travers le vide interstellaire, l'homme rayonne dans l'infrarouge et est visible avec des lunettes adaptées.

## La diffusion : (appelée aussi conduction de la chaleur )

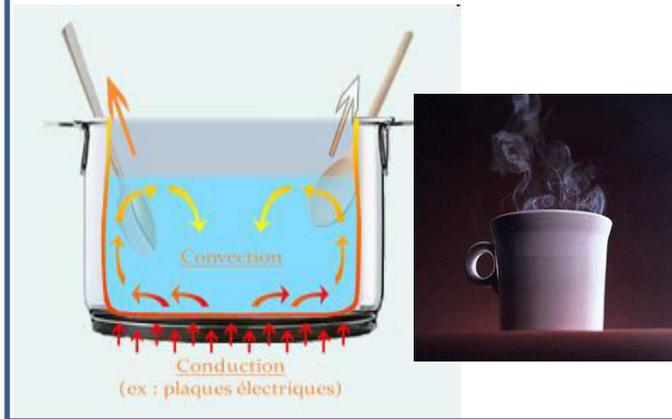
L'inhomogénéité des températures du milieu entraîne des vibrations différentes des molécules du milieu qui se propagent de proche en proche, sans mouvement d'ensemble du milieu. La diffusion est le mode de transfert de la chaleur à travers les solides et aussi les fluides (sur les petites échelles spatiales.)

**Exemple :** Pertes de chaleur à travers les murs et fenêtres.

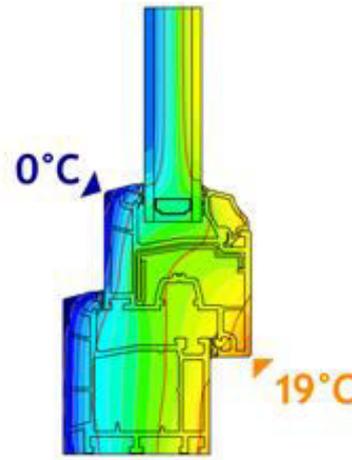
# Transferts Thermiques

3 modes de transferts thermiques :

## convection



## conduction



$$\delta Q_r = \Phi \cdot dt \text{ ou } P \cdot dt$$

## rayonnements

Un corps chauffé émet de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique.

$$P_{ray} = S \cdot \sigma \cdot T^4$$

$$(\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$$

Le rayonnement thermique se déplace vers les courtes longueurs d'ondes quand la température du corps augmente

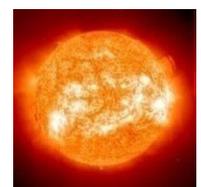
$$\lambda_{\max} \cdot T \approx 3 \text{ mm} \cdot \text{K}$$

300K



10  $\mu\text{m}$  (IR)

6000K



0,5  $\mu\text{m}$

Conductivité thermique des éléments à 27 °C en  $W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$  <sup>8</sup> :

## 6. Conductivité thermique

H																	He						
Li 0,847	Be 2																	B	C	N	O	F	Ne
Na 1,41	Mg 1,56																	Al 2,37	Si 1,48	P	S	Cl	Ar
K 1,024	Ca 2	Sc 0,158	Ti 0,219	V 0,307	Cr 0,937	Mn 0,0782	Fe 0,802	Co 1	Ni 0,907	Cu 4,01	Zn 1,16	Ga 0,406	Ge 0,599	As 0,5	Se	Br	Kr						
Rb 0,582	Sr 0,353	Y 0,172	Zr 0,227	Nb 0,537	Mo 1,38	Tc 0,506	Ru 1,17	Rh 1,5	Pd 0,718	Ag 4,29	Cd 0,968	In 0,816	Sn 0,666	Sb 0,243	Te	I 0,45	Xe						
Cs 0,359	Ba 0,184	*	Hf 0,23	Ta 0,575	W 1,74	Re 0,479	Os 0,876	Ir 1,47	Pt 0,716	Au 3,17	Hg 0,0834	Tl 0,461	Pb 0,353	Bi 0,0787	Po 0,2	At	Rn						
Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo						
*	La 0,134	Ce 0,113	Pr 0,125	Nd 0,165	Pm 0,15	Sm 0,133	Eu 0,139	Gd 0,105	Tb 0,111	Dy 0,107	Ho 0,162	Er 0,145	Tm 0,169	Yb 0,385	Lu 0,164								
**	Ac	Th 0,54	Pa	U 0,276	Np 0,063	Pu 0,0674	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr								

# Les Echanges Thermiques

Les échanges de chaleur s'effectuent en général par **conduction**, **convection** et **rayonnement**.

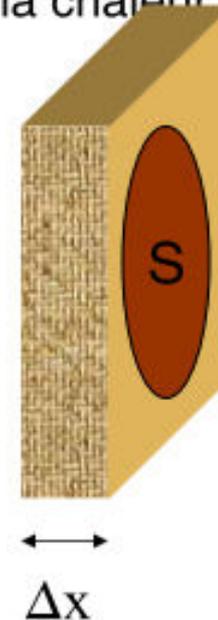
## 1. Conduction

Transmission de chaleur de particule à particule dans les corps solides, liquides ou gazeux sans déplacement global de la matière.

- Conductibilité thermique : l'aptitude à transmettre la chaleur.  
(loi de Fourier)

$$J = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{régime permanent ou stationnaire})$$

J : flux de chaleur	(W)
$\lambda$ : coeff. de conductibilité thermique	(W/m°K)
S : surface	(m <sup>2</sup> )
$\Delta T / \Delta x$ : gradient de température	(K/m)



## 2 Mécanismes de conduction de chaleur

- Dans les solides la chaleur est transportée par la vibration de ondes de réseau (**phonons**) et par les **électrons libres**:

$$\lambda = \lambda_p + \lambda_e$$

$\lambda_p$  mouvement des **phonons** de la région de haute température à la région de basse température dans un corps sous l'effet d'un gradient de température

$\lambda_e$  les **électrons libres** ou conducteurs d'une région chaude se voient leur énergie cinétique augmenté , ils migrent vers les régions froides

Métaux:  $\lambda_p \ll \lambda_e$

Céramiques:  $\lambda_p \gg \lambda_e$

Polymères:  $\lambda_p \gg \lambda_e$

# Choisir un radiateur en Aluminium ou en acier?



	conductivité thermique:
Al	226 W/m.k
Acier	13.4 W/m.k.

# Fibre de silice

- Le transfert de chaleur de la surface est relativement rapide; cependant, la conductivité de ce matériau est si petite que la **conduction thermique** de l'intérieur [température maximale environ 1250 °C] est extrêmement lent.
- Ce matériel a été développé surtout pour les carreaux qui recouvrent les orbites de la navette spatiale et les protéger et les isoler pendant leur rentrée dans l'atmosphère.
- Autres fonctionnalités attrayantes que l'isolation de surface à haute température (HRSI) faible densité et faible coefficient de dilatation thermique.



### 3 Résistance thermique

Dans la pratique du bâtiment on désire des matériaux isolants , on introduit la notion de la résistance thermique.

$$\Delta T = \frac{d}{\lambda} \cdot \frac{J}{S} = \frac{d}{\lambda} \Phi$$

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

*Résistance thermique* ( $m^2K/W$ )

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

*Densité de flux* ( $W/m^2$ )

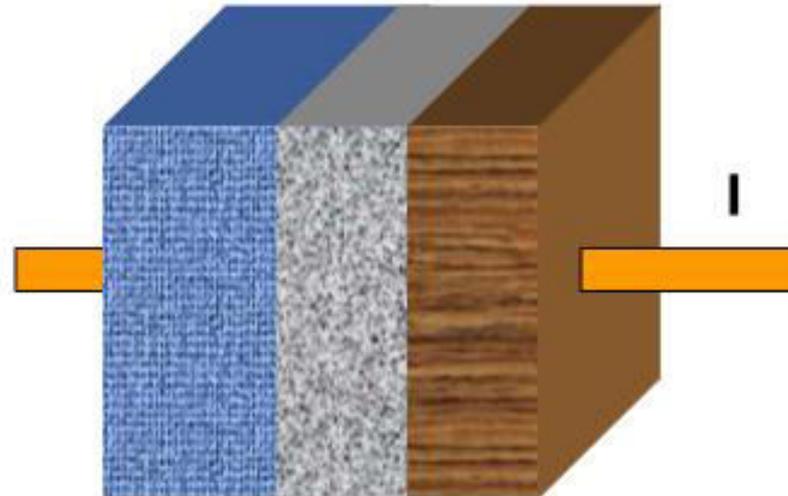
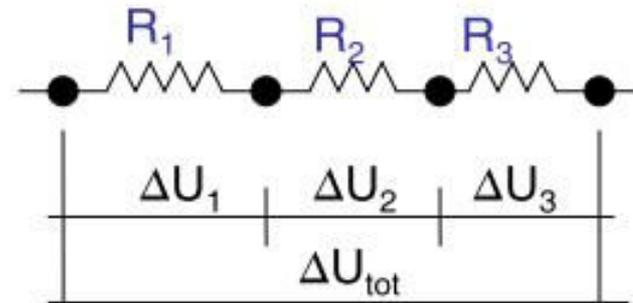
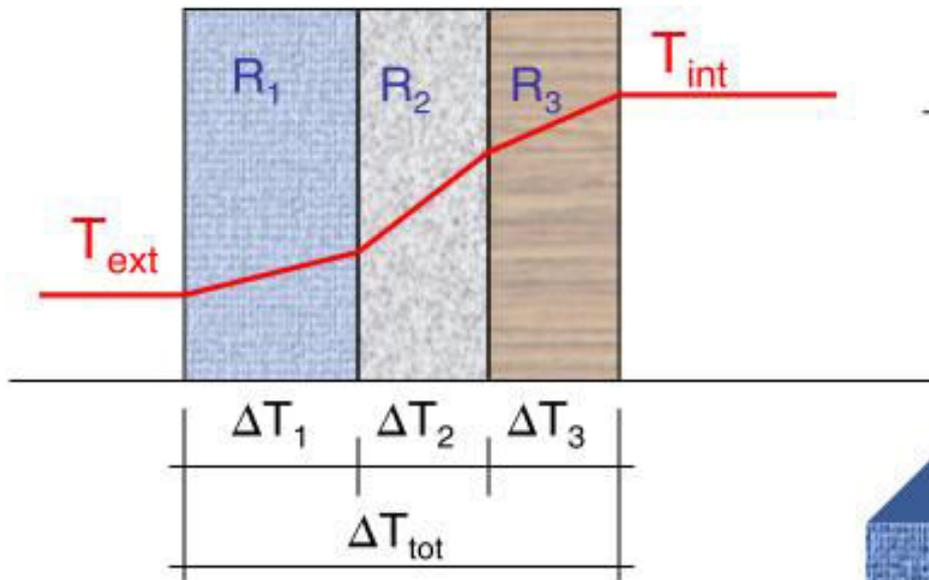
Par analogie électrique : loi d'Ohm

$$\Delta T = R \cdot \Phi \quad \Leftrightarrow \quad \Delta U = R \cdot I$$

Conduction de chaleur à travers d'un mur en composites  
(éléments en série)

$$\Delta T = R \cdot \Phi$$

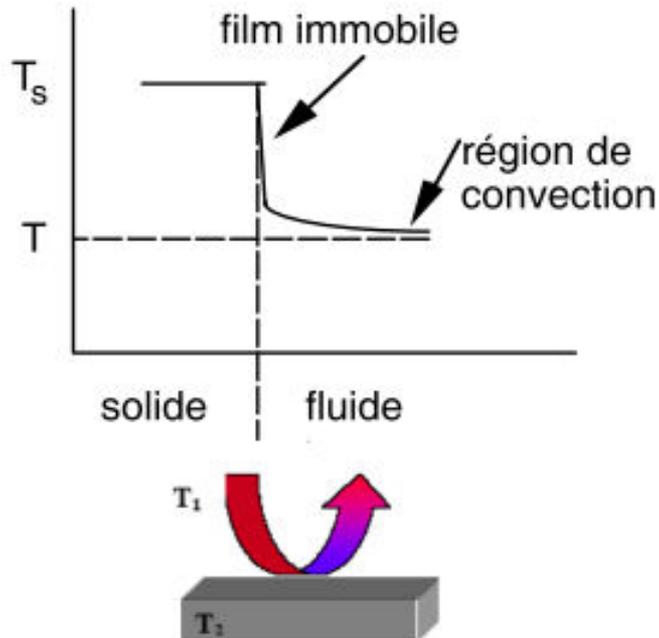
$$\Delta U = R \cdot I$$



Composé	Phase	$\alpha$ ( $10^{-6}.K^{-1}$ )	$\lambda$ ( $W/m^{-1}.K^{-1}$ )
Azote	gaz	-	0.03
Eau	Liquide	200	0.050
Aluminium	Solide	24	350
Fer	solide	12	120
granite	polycristal	7-9	3
Verre de silice	Solide amorphe et inorganique	0.5	1
Polystyrène	Solide amorphe et organique	$\approx 150$	0.15

## 4 Convection

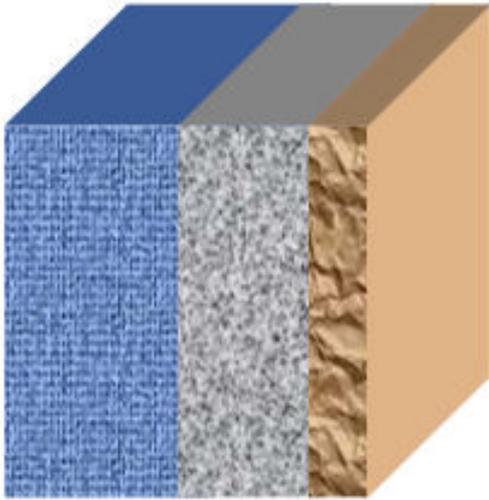
- Dans les fluides, la transmission de la chaleur a lieu principalement par transfert de matière entre les zones froides et les zones chaudes. Dans le cas d'un échange entre un fluide et un solide, il se forme à la surface de séparation un film immobile dont l'épaisseur dépend de l'importance de la convection et de l'état de la surface.



$$\Phi = h(T_s - T_\infty)$$

$h$  : coefficient de convection ( $W/m^2K$ )  
 $T_s$  : température à la surface du solide  
 $T_\infty$  : température du fluide loin de la surface

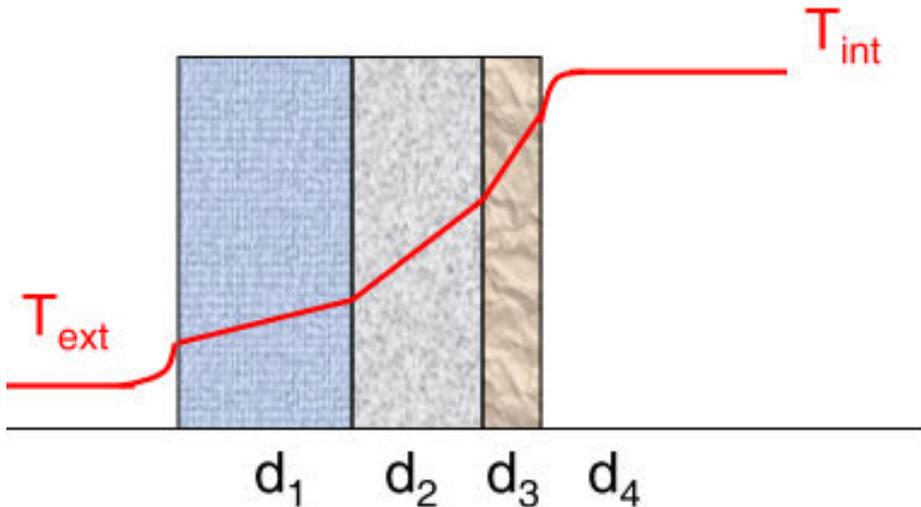
# Résistance thermique d'un élément de construction avec couches limites



$$R_{tot} = \frac{1}{h_{int}} + \sum_{j=1}^n R_j + \frac{1}{h_{ext}}$$

« Valeur K » (W/m<sup>2</sup>.K) :

$$K = \frac{1}{R_{tot}}$$



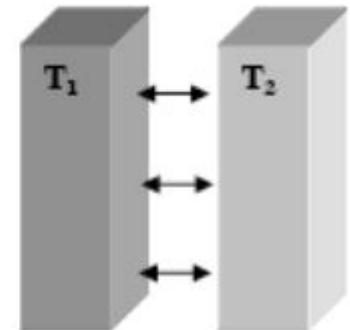
## 5 Rayonnement

- A toute température ( $> -273^{\circ}\text{C}$ ), un corps matériel émet de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique dû aux fluctuations des charges électriques provoquées par l'agitation thermique des molécules.

$$\Phi = \varepsilon_{12} k_B S (T_2^4 - T_1^4)$$

$k_B$  = constante de Boltzmann

$\varepsilon_{12}$  = facteur d'émission équivalente de l'ensemble paroi 1 - paroi 2

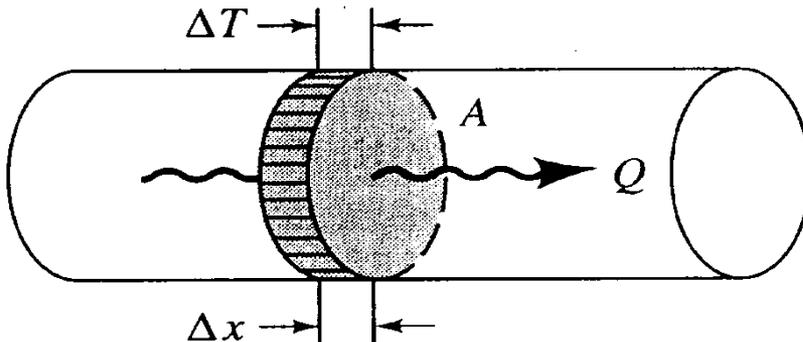


## Conductibilité thermique

La **conductibilité thermique**,  $k$ , c'est une mesure du transfert de chaleur à travers un matériau.

$$J = -k \frac{dT}{dx}$$

$J$  étant le **flux de chaleur** soit la quantité d'énergie qui traverse une unité de surface par unité de temps,  $dT$  la différence de température et  $dx$  la distance parcourue. Le signe négatif indique que le flux passe de la zone de haute température à la zone de basse température.



### Exemple3

On vous demande de déterminer l'épaisseur d'une vitre de **1,5 m<sup>2</sup>** qui sépare une salle à **25 °C** d'une chambre à **40 °C** et qui ne devra pas permettre l'entrée de plus de **20 000 kJ** de chaleur par jour. Le verre en question possède une conductivité thermique de **0,837 J/m·s·°C**.

$$J = \frac{Q}{A \cdot s} = -k \frac{dT}{dx}$$

1 jour = 86400 secondes et A = 1,5 m<sup>2</sup>

$$\frac{20 \times 10^6 \text{ J}}{86400 \text{ s} \times 1,5 \text{ m}^2} = \frac{-0,837 \text{ J/s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C} (25 - 40)^\circ\text{C}}{\Delta x}$$

$$\Delta x = 0,081 \text{ m} = 8,1 \text{ cm}$$

# Choc thermique

Lorsqu'un matériau est refroidi rapidement, un gradient thermique se produit dans le matériau. Ce gradient peut être la source de contraction différente à divers endroits dans le matériau. Si la contrainte résultante est suffisamment élevée, les défauts peuvent alors se propager et entraîner la rupture du matériau. On dit alors que le matériau a subi un **choc thermique**. Les principaux facteurs influençant les chocs thermiques sont:

- Le coefficient de dilatation thermique
- La conductibilité thermique
- Le module de Young
- La sévérité des défauts
- Les transformations allotropiques

Matériau	Rigidité diélectrique (MV/m)
air	3
quartz	8
néoprène	12
Nylon	14
Pyrex	14
huile silicone	15
papier	16
Bakelite	24
polystyrène	24
Teflon	60

## Résister au claquage

Lorsqu'un isolant — appelé dans ce contexte « diélectrique » — sépare deux conducteurs, il est soumis à une tension électrique.

Lorsque cette tension devient trop forte, il se produit un claquage : la matière s'ionise et il se produit un courant électrique qui dégrade l'isolant. La tension de claquage dépend de la distance séparant les deux conducteurs ;

on caractérise donc la résistance au claquage de la matière par le champ électrique limite, en volt par mètre (V/m), appelé « champ disruptif » ou « **rigidité diélectrique** ».



<i>Material</i>	$c_p$ (J/kg-K) <sup>a</sup>	$\alpha_l$ [(°C) <sup>-1</sup> × 10 <sup>-6</sup> ] <sup>b</sup>	$k$ (W/m-K) <sup>c</sup>	$L$ [Ω-W/(K) <sup>2</sup> × 10 <sup>-8</sup> ]
<i>Metals</i>				
Aluminum	900	23.6	247	2.20
Copper	386	17.0	398	2.25
Gold	128	14.2	315	2.50
Iron	448	11.8	80	2.71
Nickel	443	13.3	90	2.08
Silver	235	19.7	428	2.13
Tungsten	138	4.5	178	3.20
1025 Steel	486	12.0	51.9	—
316 Stainless steel	502	16.0	15.9	—
Brass (70Cu–30Zn)	375	20.0	120	—
Kovar (54Fe–29Ni–17Co)	460	5.1	17	2.80
Invar (64Fe–36Ni)	500	1.6	10	2.75
Super Invar (63Fe–32Ni–5Co)	500	0.72	10	2.68
<i>Ceramics</i>				
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	775	7.6	39	—
Magnesia (MgO)	940	13.5 <sup>d</sup>	37.7	—
Spinel (MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	790	7.6 <sup>d</sup>	15.0 <sup>e</sup>	—
Fused silica (SiO <sub>2</sub> )	740	0.4	1.4	—
Soda–lime glass	840	9.0	1.7	—
Borosilicate (Pyrex™) glass	850	3.3	1.4	—

<i>Material</i>	$c_p$ (J/kg-K) <sup>a</sup>	$\alpha_I$ [(°C) <sup>-1</sup> × 10 <sup>-6</sup> ] <sup>b</sup>	$k$ (W/m-K) <sup>c</sup>	$\frac{L}{\Omega \cdot W / (K)^2}$ × 10 <sup>-8</sup>
		<i>Polymers</i>		
Polyethylene (high density)	1850	106–198	0.46–0.50	—
Polypropylene	1925	145–180	0.12	—
Polystyrene	1170	90–150	0.13	—
Polytetrafluoroethylene (Teflon™)	1050	126–216	0.25	—
Phenol-formaldehyde, phenolic	1590–1760	122	0.15	—
Nylon 6,6	1670	144	0.24	—
Polyisoprene	—	220	0.14	—

Matériau	Coefficient de dilatation linéaire ( $10^{-6}/K$ )	Capacité thermique massique ( $kJ/kg \cdot K$ )	Conductivité thermique ( $W/m \cdot K$ )
<b>Métaux</b>			
Acier au carbone	10 à 15	0,48	47
Acier allié	12	0,51	13 à 48
Acier inoxydable	11 à 16	0,51	16 à 26
Aluminium	24	0,90	220 à 230
Aluminium, alliages	20 à 24	0,84	120 à 200
Cuivre	17	0,39	370
Cuivre, alliages	16 à 20	0,39	30 à 160
Étain	23	0,23	67
Fer	12	0,44	81
Fonte	10 à 11	0,27 à 0,46	44 à 53
Magnésium et alliages	25 à 27	1,02	80 à 156
Nickel	13	0,44	92
Nickel, alliages	10 à 19	0,48 à 0,50	11 à 30
Titane	8	0,52	22
Zinc	40	0,39	116

Matériau	Coefficient de dilatation linéaire ( $10^{-6}/K$ )	Capacité thermique massique (kJ/kg · K)	Conductivité thermique (W/m · K)
<b>Céramiques et minéraux</b>			
Alumine $Al_2O_3$	8 à 9	0,7	20 à 40
Carbone diamant	0,8 à 1,2	0,5	200 à 400
Carbone graphite	0,5 à 6,5	0,7 à 1,1	5 à 250
Carbures	4 à 6	0,2 à 1	40 à 120
Glace $H_2O$ (à 0 °C)	50 à 60	2,1	2,1
Verres	3 à 9	0,5 à 0,7	0,5 à 2
Zircone $ZrO_2$	2,3 à 12,2	0,42 à 0,54	1,7 à 2,7
<b>Polymères et élastomères</b>			
Caoutchouc naturel	22	1,9	0,18
Nylon (Polyamide 6-6)	80 à 150	1,6	0,17 à 0,25
Polychlorure de Vinyle (PVC)	50 à 250	0,8 à 1,7	0,12 à 0,30
Polyéthylène (PE)	110 à 200	1,9 à 2,3	0,25 à 0,35
Polyméthacrylate de méthyle (PMMA)	50 à 90	1,46	0,17 à 0,25
Polytétrafluoréthylène (PTFE)	100	1,05	0,25
Résine époxyde (EP)	60	1,1	0,17
<b>Composites</b>			
Béton	7 à 14	3,3	0,1 à 2
Bois (perpendiculaire au fil)	14 à 21	1,6 à 1,7	0,04 à 0,06
Bois (parallèle au fil)	2 à 11	1,6 à 1,7	0,2 à 0,4
Époxyde – Fibre de carbone	5 à 20	1,2 à 1,5	0,4 à 1,2
Polyester – Fibre de verre	12 à 25	1 à 1,4	0,4 à 1,2



- **La conductivité thermique:** exprimée en  $W/m.K$ , caractérise le comportement du matériau lors du transfert de chaleur par conduction : elle désigne la quantité de chaleur qui traverse un mètre d'épaisseur de ce matériau par seconde. Plus le  $\lambda$  est faible, plus le matériau présente des qualités isolantes.
- **La capacité thermique :** exprimée en  $J/m^3.K$ , qui représente la capacité d'un matériau à stocker de la chaleur rapportée à son volume.
- **La densité :** exprimée en  $kg/m^3$ . Afin de favoriser une bonne inertie thermique, d'assurer une bonne isolation thermique d'été et de concourir également à une bonne isolation phonique, il faut privilégier une densité élevée.
- **La chaleur spécifique :** exprimée en  $J/kg.K$ . La chaleur spécifique d'un matériau est sa capacité à stocker de la chaleur par rapport à son poids.

**La diffusivité thermique** est une grandeur physique qui caractérise la capacité d'un matériau continu à transmettre un signal de température d'un point à un autre de ce matériau. Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et de sa capacité à accumuler la chaleur (capacité thermique volumique).

$$D = \frac{\lambda}{\rho c} \text{ en [m}^2\text{/s].}$$

**L'effusivité thermique** d'un matériau caractérise sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. Donc indique la vitesse à laquelle la température de surface d'un matériau varie et exprime la capacité d'un matériau à absorber (ou restituer) de la chaleur. Elle est donnée par :

$$E = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \text{ en [W K}^{-1}\text{ m}^{-2}\text{ s}^{1/2}\text{ ]}$$

**Effusivité thermique et diffusivité thermique** sont les grandeurs essentielles pour quantifier l'inertie thermique.

**L'inertie thermique** d'un matériau représente sa résistance au changement de température lorsque intervient une perturbation de son équilibre thermique.

**La résistance thermique** quantifie l'opposition à un flux thermique entre deux isothermes (T1 et T2) entre lesquels s'échange un flux thermique .

Selon le type de flux on a : la résistance thermique de conduction, pour un flux de conduction thermique ; la résistance thermique de convection, pour un flux convectif ; la résistance thermique de rayonnement, pour un flux par rayonnement thermique.

**L'émissivité** correspond au flux radiatif du rayonnement thermique émis par un élément de surface à température donnée, rapporté à la valeur de référence qu'est le flux émis par un corps noir à cette même température. Cette dernière valeur étant la valeur maximale possible, l'émissivité est un nombre inférieur ou égal à l'unité.

L'émissivité est le rapport de la luminance du corps réel sur la luminance du corps noir porté à la même température.

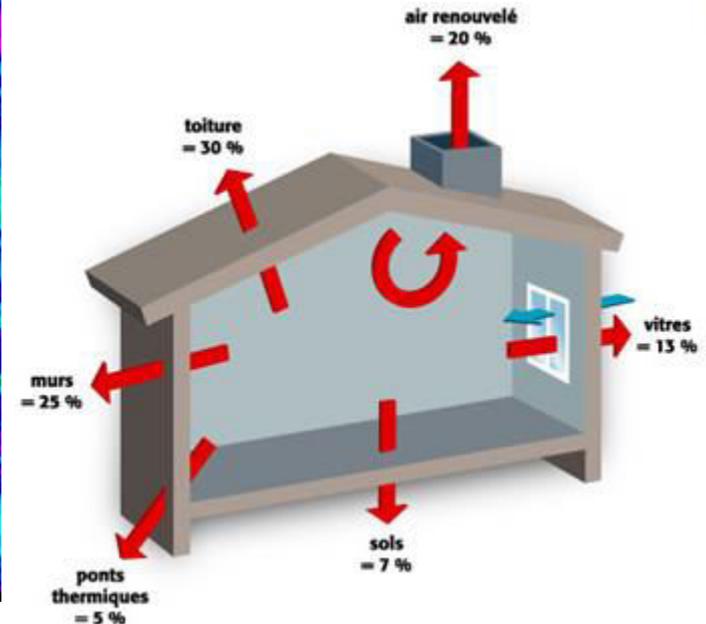
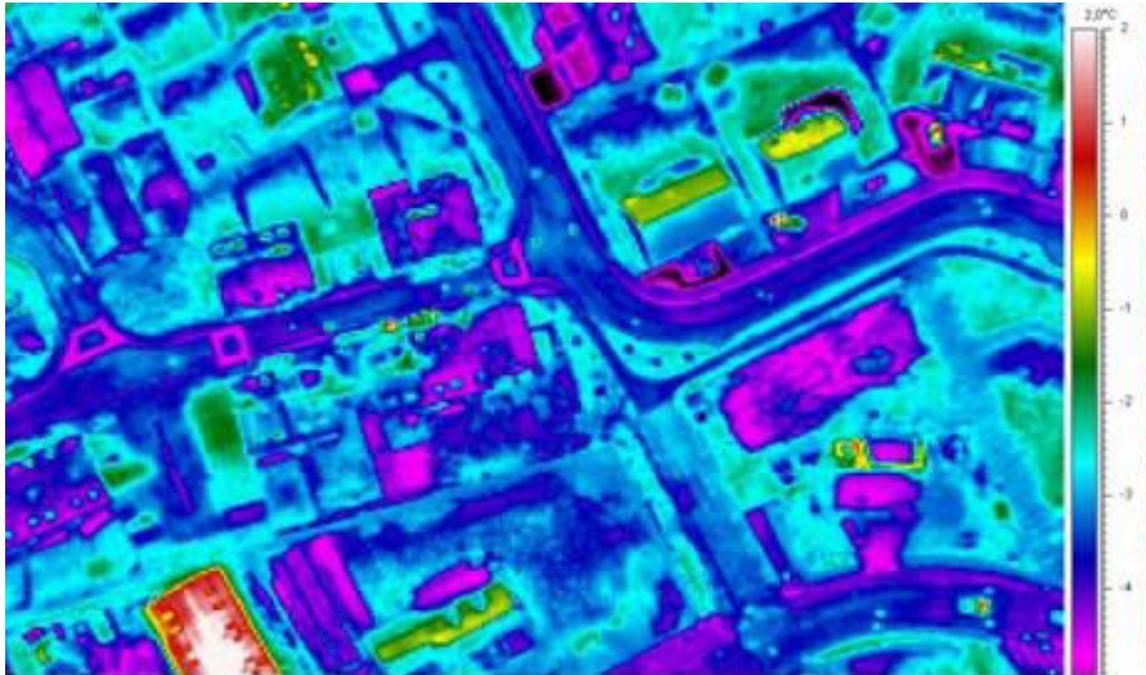
# **Les Matériaux Isolants**

## Exemple:

# Thermique de l'habitat : bilan thermique sur un local

Maîtrise des dépenses énergétiques

Survol des habitations avec une caméra infrarouge afin d'identifier les déperditions d'énergie des bâtiments



Quelle est la maison possédant la meilleure  
« **isolation thermique** » par le toit?



## Effusivité des matériaux de construction

Rang	Matériau	Conductivité W/mK	Masse volumique kg/m <sup>3</sup>	Chaleur spécifique J/kgK	Effusivité J/m <sup>2</sup> ·K·s <sup>1/2</sup>
1	<b>Cuivre</b>	<b>380</b>	<b>8900</b>	<b>380</b>	<b>35 849</b>
2	Aluminium	230	2700	880	23 377
3	Acier	50	7800	450	13 248
4	<b>Béton plein</b>	<b>1,8</b>	<b>2300</b>	<b>1000</b>	<b>2 035</b>
5	Pierre	1,7	2000	1000	1 844
6	Brique pleine	0,74	1800	1000	1 154
7	Bois Chêne	0,29	870	1600	635
8	Plaque de plâtre	0,25	825	1000	454
9	Plâtre carreaux	0,25	820	1000	453
10	Bois Sapin	0,15	500	1600	346
11	Panneau OSB	0,12	600	1150	288
12	Laine de bois	0,1	400	1700	261
13	<b>Béton cellulaire</b>	<b>0,09</b>	<b>350</b>	<b>1000</b>	<b>177</b>
14	Fibre de bois SteicoTherm	0,04	160	2100	116
15	Liège	0,05	120	1560	97
16	Laine de roche	0,044	100	1030	67
17	PSE extrudé	0,04	34	1450	44
18	Laine de verre	0,04	25	1700	41
19	PSE expansé	0,04	26	1450	39
20	<b>Polyuréthane</b>	<b>0,03</b>	<b>34</b>	<b>1400</b>	<b>38</b>

## Diffusivité des matériaux de construction

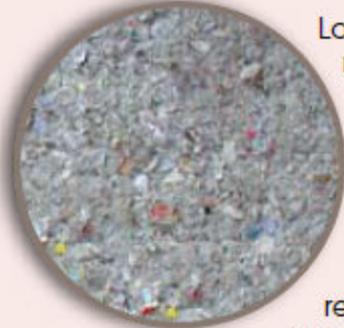
Rang	Matériau	Conductivité W/mK	Masse volumique kg/m <sup>3</sup>	Chaleur spécifique J/kgK	Diffusivité x 10 <sup>8</sup> m <sup>2</sup> /s
1	<b>Fibre de bois SteicoTherm</b>	<b>0,04</b>	<b>160</b>	<b>2100</b>	<b>12</b>
2	Laine de bois	0,1	400	1700	15
3	Panneau OSB	0,12	600	1150	17
4	Bois Sapin	0,15	500	1600	19
5	Bois Chêne	0,29	870	1600	21
6	Béton cellulaire	0,09	350	1000	26
7	Liège	0,05	120	1560	27
8	Plaque de plâtre	0,25	825	1000	30
9	Plâtre carreaux	0,25	820	1000	30
10	Brique pleine	0,74	1800	1000	41
11	Laine de roche	0,044	100	1030	43
12	Polyuréthane	0,03	34	1400	63
13	<b>Béton plein</b>	<b>1,8</b>	<b>2300</b>	<b>1000</b>	<b>78</b>
14	PSE extrudé	0,04	34	1450	81
15	Pierre	1,7	2000	1000	85
16	Laine de verre	0,04	25	1700	94
17	PSE expansé	0,04	26	1450	106
18	Acier	50	7800	450	1 425
19	Aluminium	230	2700	880	9 680
20	<b>Cuivre</b>	<b>380</b>	<b>8900</b>	<b>380</b>	<b>11 236</b>

## Conductivité des matériaux de construction

Rang	Matériau	Conductivité W/mK
1	<b>Polyuréthane</b>	<b>0,022</b>
2	Fibre de bois SteicoTherm	0,04
3	PSE extrudé	0,04
4	Laine de verre	0,04
5	PSE expansé	0,04
6	Laine de roche	0,044
7	Liège	0,05
8	Béton cellulaire	0,09
9	Laine de bois	0,1
10	Panneau OSB	0,12
11	Bois Sapin	0,15
12	Plaque de plâtre	0,25
13	Plâtre carreaux	0,25
14	Bois Chêne	0,29
15	Brique pleine	0,74
16	Pierre	1,7
17	<b>Béton plein</b>	<b>1,8</b>
18	Acier	50
19	Aluminium	230
20	<b>Cuivre</b>	<b>380</b>

# Les isolants végétaux

## • La cellulose



La cellulose provient du papier recyclé, qui lui-même vient du bois. Ce recyclage demande peu d'énergie. Le papier est broyé afin d'être défibré, puis floconné et enfin il est mélangé à du sel de bore afin de l'ignifuger et de le rendre résistant aux insectes.

Les matériaux se présentent soit sous forme de flocons en vrac, soit sous forme de panneaux isolants semi-rigides.

**Le coefficient de conductivité thermique est compris entre 0,038 et 0,044 W/m.K.**

### Avantages

- *Provient de produit recyclé*
- *Sans effet négatif sur la santé.*

### Inconvénients

- *Produit plus onéreux que les laines minérales mais qui présente, pour une isolation performante, un bon compromis technique, économique et environnemental.*

## • La laine de coton



Le coton est originaire de Chine. La fibre de coton est utilisée comme matériau isolant depuis une quinzaine d'années. Les fibres ne reçoivent aucun traitement chimique, elles sont simplement cardées et reçoivent un traitement ignifugeant au sel de bore.

Les matériaux se présentent sous forme de flocons en vrac, de rouleaux ou de panneaux en feutre.

**Le coefficient de conductivité thermique est en moyenne de 0,04 W/m.K.**

### Avantages

- *Bon pouvoir hygroscopique*
- *Matériau renouvelable, réutilisable ou compostable.*
- *En cas d'incendie, pas de dégagements toxiques.*

### Inconvénients

- *Coût plus élevé que les autres isolants végétaux (chanvre, lin), mais qui, eux, sont issus d'une agriculture locale.*

## • Le chanvre



Le chanvre est utilisé depuis plusieurs siècles dans un certain nombre de domaines, comme la conception de textile ou la fabrication de papier. Mais plus récemment (courant des années 1970 en France) le chanvre est devenu également un matériau de construction et d'isolation.

Comme isolant, le chanvre se présente sous différentes formes : en vrac, en rouleaux ou bien encore en panneaux.

**Son coefficient de conductivité thermique est compris entre 0,039 et 0,042 W/m.K suivant sa forme et sa composition.**

### Avantages

- Peut être utilisé à la fois pour les travaux de construction ou de rénovation (béton de chanvre...) et les travaux d'isolation (laine de chanvre).
- Résistance aux insectes, aux rongeurs et aux champignons.
- Sans effet négatif sur la santé.
- En cas d'incendie, pas de dégagements toxiques.

### Inconvénients

- Produit plus onéreux que les laines minérales, mais qui présente, pour une isolation performante, un bon compromis technique, économique et environnemental.

## • Le bois



Le bois comme isolant se présente également sous différentes formes : laine de bois (panneau semi-rigide, en vrac...), panneau de fibres de bois rigides ou encore des fibraglos (fibres de bois avec enrobage de plâtre et ciment).

Les déchets des scieries sont la matière première du panneau de bois. Les fibres sont pressées et séchées pour donner des produits à fibres tendres ou dures. La fabrication se fait naturellement, sans produit ajouté. Ces panneaux peuvent être posés pour la toiture, les murs (le plus souvent comme isolant complémentaire), les cloisons intérieures et pour l'isolation acoustique et thermique des planchers.

**Son coefficient de conductivité thermique est compris entre 0,042 à 0,070 W/m.K selon la forme utilisée.**

### Avantages

- Facilité de pose.
- Assure une bonne isolation acoustique.
- Matériau renouvelable de grande disponibilité.

### Inconvénients

- Coût élevé.

## • La laine de coco



La laine de coco est issue de la bourre entourant le péricarpe des noix de coco. Cette matière première est utilisée depuis plus d'un siècle dans la fabrication de meubles, de tapis ou de sièges. Utilisées depuis une trentaine d'années pour l'isolation, les fibres de coco sont cardées et reçoivent un traitement

ignifugeant au sel de bore.

La laine de coco peut se présenter en vrac, en rouleaux ou bien encore en panneaux semi-rigides.

**Le coefficient de conductivité thermique de la laine de coco est compris entre 0,047 à 0,050 W/m.K suivant la forme employée.**

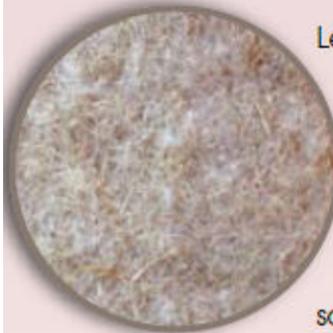
### Avantages

- *Sans effet négatif sur la santé.*
- *Matériau naturel, renouvelable et réutilisable ou compostable.*
- *En cas d'incendie, pas de dégagements toxiques.*

### Inconvénients

- *Coût supérieur à celui des autres isolants végétaux (chanvre, lin), qui, eux, sont couramment issus d'une agriculture locale, voire biologique dans certains cas.*

## • Le lin



Le lin est utilisé dans les textiles depuis l'Antiquité. Le lin est la fibre naturelle la plus résistante et la plus légère qui existe, elle isolait autrefois les maisons romaines. Aujourd'hui, le lin est cultivé principalement dans le nord de la France, et est un sous-produit de l'industrie textile.

L'utilisation du lin comme isolant se présente sous différentes formes suivant les applications : en vrac, en rouleaux, en panneaux semi-rigides, en panneaux plus rigides pour les cloisons, en feutre (acoustique) ou en paillettes (béton de lin).

**Le coefficient de conductivité thermique est de 0,035 (en vrac) à 0,05 (rouleaux) W/m.K.**

### Avantages

- *Bon pouvoir hygroscopique.*
- *Sans effet négatif sur la santé.*
- *En cas d'incendie, pas de dégagements toxiques.*
- *Ressource renouvelable ; matériau réutilisable.*

### Inconvénients

- *Coût élevé.*

## • Le liège



Le liège pur expansé est issu de l'arbre chêne-liège. Le liège est résistant à la compression et indéformable. Ni les rongeurs ni les insectes ne l'apprécient. Le liège est également un très bon isolant phonique. Les plaques de liège expansé se posent et se découpent facilement.

Le liège est utilisé sous différentes formes : en vrac, en panneaux ou bien encore en éléments composites préfabriqués.

**Le coefficient de conductivité thermique du liège est de 0,032 à 0,045 W/m.K.**

### Avantages

- Sans effet négatif sur la santé.
- Matériau renouvelable, naturel, et réutilisable.
- Non consommable par les prédateurs, mais les rongeurs peuvent s'en servir pour nidifier.

### Inconvénients

- Coût élevé supérieur à celui des autres isolants végétaux (chanvre, lin), qui, eux, sont couramment issus d'une agriculture locale, voire biologique dans certains cas.
- Matériau renouvelable mais de faible disponibilité.

## Les isolants d'origine animale

### • La laine de mouton



La laine de mouton a des qualités d'isolation thermique et de régulation naturelle liées à la constitution de ses fibres. Les produits de tonte sont d'abord lavés au savon et à la soude pour éliminer les impuretés et surtout le suint. Ensuite la laine reçoit un traitement insecticide et un traitement contre le feu,

à base de sel de bore.

**Le coefficient de conductivité thermique varie de 0,032 à 0,045 W/m.K, selon la densité et les formes proposées.**

### Avantages

- Facile et rapide à poser partout.
- Peut se découper à la main, comme un tissu.
- Bon pouvoir hygroscopique.
- Ressource renouvelable ; Matériau durable et réutilisable.
- En cas d'incendie, pas de dégagements toxiques.

### Inconvénients

- Coût élevé au regard de cette matière première de proximité !

# Les isolants minéraux

## • La laine de verre et la laine de roche



La laine de verre est fabriquée au moyen de verre de récupération et de sable siliceux et obtenue par fusion de ces matières à environ 1 500 °C.

La fabrication de la laine de roche nécessite, quant à elle, des roches volcaniques comme le basalte.

**Leur coefficient de conductivité thermique est en moyenne de 0,032 à 0,04 W/m.K.**

### Avantages

- *Imputrescibles.*
- *Non consommables par les rongeurs.*
- *Coût faible de ce matériau.*

### Inconvénients

- *Matériau qui se tasse dans le temps.*
- *Ressource non renouvelable mais de grande disponibilité.*
- *Énergie grise importante (énergie nécessaire pour la production du matériau).*
- *Difficilement recyclable.*
- *Dégradable par les rongeurs.*
- *Risques connus ou non liés à la santé : irritation de la peau et des voies respiratoires supérieures (inflammations, trachéites...).*

# Les isolants synthétiques

## • Les polystyrènes



Le polystyrène expansé est fabriqué au moyen d'hydrocarbure (styrène) expansé à la vapeur d'eau et présente donc une structure à pores ouverts.

Le polystyrène extrudé est soumis à un agent gonflant sous pression qui lui confère une structure à pores fermés.

Il se présente sous différentes formes : en vrac, en panneaux ou élément préfabriqués.

**Le coefficient de conductivité thermique pour le polystyrène expansé est en moyenne de 0,035 W/m.K et de 0,028 W/m.K pour le polystyrène extrudé.**

### Avantages

- *Coût faible de ce matériau.*
- *Bonne performance thermique.*
- *Imputrescible.*

### Inconvénients

- *Aucune capacité de respiration.*
- *Ressource non renouvelable.*
- *Énergie grise importante (énergie nécessaire pour la production du matériau).*
- *Non recyclable.*
- *Dégradable par les rongeurs.*

## • Le polyuréthane



Fabriqué au départ sous forme de mousses. Celles-ci sont obtenues à l'aide de catalyseurs et d'agents propulseurs à base d'isocyanates, avec des adjuvants pour stabiliser ou pour ignifuger. Ce sont des mousses à cellules fermées et peu compressibles.

Il se présente sous différentes formes : en panneaux, élément préfabriqués, mousses.

**Le coefficient de conductivité thermique pour le polyuréthane est en moyenne de 0,025 W/m.K pour les panneaux et de 0,03 W/m.K pour les mousses.**

### Avantages

- *Coût faible de ce matériau.*
- *Bonne performance thermique.*
- *Imputrescible.*

### Inconvénients

- *Aucune capacité de respiration.*
- *Ressource non renouvelable.*
- *Énergie grise importante (énergie nécessaire pour la production du matériau).*
- *Non recyclable.*
- *Dégradable par les rongeurs.*

## BASIC TYPES OF INSULATION

TABLE 1.A LOW TEMPERATURE

-75 °C → +15°C

Type	Form	Temp. Range	K-Factor* Metric/ Imperial	Mean Temp. C (F)	Notes
GLASS CELLULAR	Pipe Covering Block	-268°C to 427°C -450°F to 800°C	.048 (.33) @	4° (40°)	Good strength, water and vapour resistant, non-combustible, poor abrasion resistance.
GLASS FIBER	Pipe Covering Board Blanket	to 455°C to (850°F) to 538°C to (1000°F) to 538°C to (1000°F)	.035 (.24) @ .032 (.22) @ .030 (.21) @	4° (40°) 4° (40°) 4° (40°)	Good workability, non-combustible, water absorbent. Readily available. Vapour retarder required. Low compressive strength.
ELASTOMERIC FOAM	Pipe Sheet Roll	-40°C to 104°C -40°F to 220°F	.038 (.27) @	10° (50°)	Closed cell good workability, finish not required. Limited thickness to meet flame spread/smoke. Required UV protection.
POLYSTYRENE (Extruded)	Pipe Covering Board	-183°C to 74°C -297°F to 165°F	.035 (.24) @	4° (40°)	Lightweight, good, workability. Check manufacturers' data. Combustible. Some are treated for fire retardancy. All are closed cell except polystyrene expanded.
POLYSTYRENE (Expanded)	Pipe Covering Board	-40°C to 80°C -40°F to 175°F	.036 (.25) @	4° (40°)	
POLYURETHANE	Pipe Covering Sheet	-40°C to 107°C -40°F to 212°F	.025 (.18) @	4° (40°)	K-value may change as these materials age. Combustible. High flame spread and smoke.
POLYURETHANE	Pipe Covering Sheet Roll	-70° C to 100°C -94°C to 212°F	.036 (.25) @	10° (50°)	
POLYISOCYANURATE	Pipe Covering Sheet	-183°C to 140°C -297°F to 300°F	.025 (.18) @	4° (40°)	Lightweight, good workability. Check manufacturers' data. Some are treated for fire retardancy. K Values may change with age.

NOTE: Special attention must be given to installation and vapour seal.

\*K-Factor Metric = W/m.K (Imperial = Btu.in./h.ft<sup>2</sup>. °F)

TABLE 1.B INTERMEDIATE TEMPERATURES

**+15 °C → +315°C**

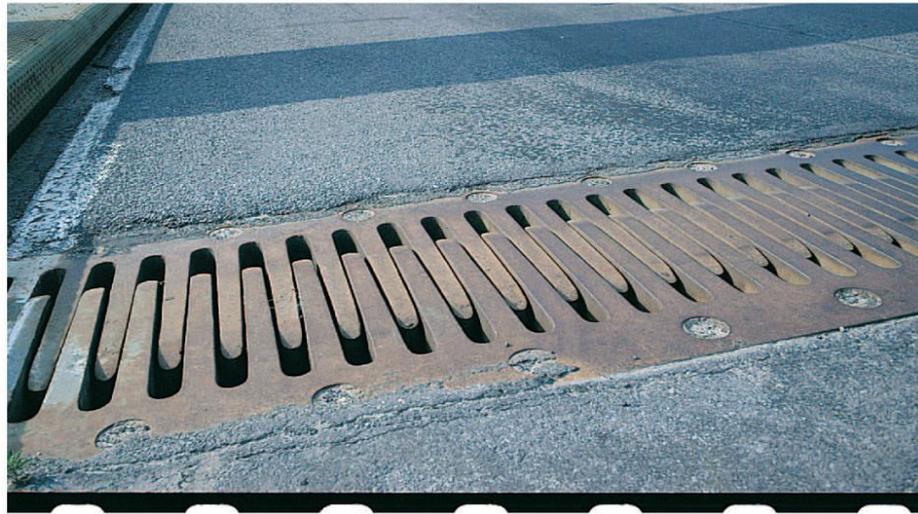
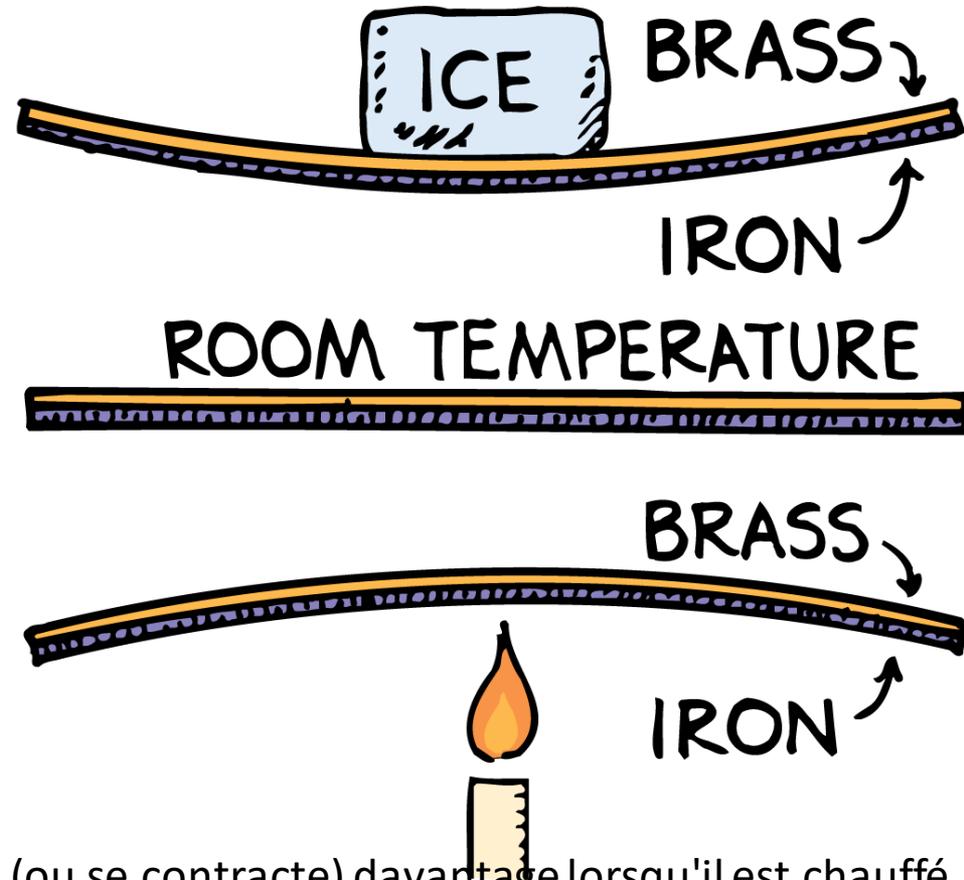
Type	Form	Temp. Range	K-Factor* Metric/ Imperial	Mean Temp. C (F)	Notes
CALCIUM SILICATE	Pipe Covering Block Segments Type I	to 649°C (1200°F)	.065 (.45) @	93° (200°)	High compression strength, good workability, water absorbent, non-combustible. High flexural strength. Resistant to abrasion. See manufacturers' data for shrinkage factors.
GLASS CELLULAR	Pipe Covering Block Segments	to 427°C (800°F)	.050 (.35) @ .063 (.44) @	24° (75°) 93° (200°)	Good strength, water and vapour resistant, non-combustible, poor abrasion resistance. Subject to thermal shock. For applications over 204°C (400°F) see manufacturers' specifications.
GLASS FIBER	Pipe Covering Board	to 455°C (850°F) to 538°C (1000°F)	.037 (.26) @ .033 (.23) @	24° (75°) 24° (75°)	Good workability, non-combustible, water absorbent. Low compression resistance.
GLASS FIBER	Blanket	to 538°C (1000°F)	.033 (.23) @	24° (75°)	General purpose material, many facings available.
MINERAL FIBER	Pipe Covering Block Board Blanket	to 649°C (1200°F) to 1035°C (1895°F) to 649°C (1200°F) to 649°C (1200°F)	.037 (.26) @ .037 (.26) @ .037 (.26) @ .048 (.33) @	24° (75°) 24° (75°) 24° (75°) 24° (75°)	Good workability, non-combustible. Water absorbent. Low compression resistance.
PERLITE (Expanded)	Pipe Covering Board	to 649°C (1200°F)	.076 (.53) @	93° (200°)	Good workability, non-combustible. Poor abrasion resistance. Special packaging required to protect materials. Corrosion inhibitor.
ELASTOMERIC FOAM	Pipe Covering-I Sheet-II Roll	-40°C to 105°C -40°F to 220°F	.043 (.30) @	24° (75°)	Closed cell, finish not required, good workability. May require UV protection. Flame spread/smoke limited)
POLYSTYRENE (Extruded)	Pipe Covering Board	-183°C to 74°C -297°F to 165°F	.037 (.26) @	24° (75°)	Lightweight, excellent workability, combustible although some are treated for fire retardancy (check manufacturers' data sheet for properties) High flame spread/smoke. Check manufacturers' data sheets for values. K value may change as these materials age.
POLYSTYRENE (Expanded)	Pipe Covering Board	-40°C to 80°C -40°F to 175°F	.039 (.27) @	24° (75°)	
POLYURETHANE	Pipe Covering	-40°C to 105°C -40°F to 225°F	.027 (.19) @	24° (75°)	
POLYETHYLENE	Pipe Covering	-70°C to 100°C -94°F to 212°F	.037 (.26) @	24° (75°)	
POLYISOCYANURATE	Pipe Covering Board	-183°C to 149°C -297°F to 300°F	.027 (.19) @	24° (75°)	Lightweight, good workability. Check manufacturers' data sheets. Some are treated for fire retardancy. K values may change with age

TABLE 1.C HIGH TEMPERATURE

**+315 °C → +815°C**

Type	Form	Temp. Range	K-Factor* Metric/ Imperial	Mean Temp. C (F)	Notes
CALCIUM SILICATE	Pipe Covering Block Segments Type I Type II	to 649°C (1200°F) to 871°C (1600°F)	.087 (.60) @ .101 (.70) @	260° (500°) 260° (500°)	High compressive strength, good cutting characteristics, water absorbent, non-combustible. High flexural strength. Resistant to abrasion. See manufacturers' data for shrinkage factors.
CLASS CELLULAR HIGH TEMP	Pipe Covering Block Segments	to 427°C (800°F)	.103 (.72) @	260° (500°)	Good strength, water and vapour resistant, non-combustible, poor abrasion resistance. Subject to thermal shock. For application over 204°C (400°F), see manufacturers' specifications.
GLASS FIBER	Pipe Covering Board Blanket	to 455°C (850°F) to 538°C (1000°F) to 538°C (1000°F)	.083 (.58) @ .086 (.60) @ .086 (.60) @	260° (500°) 260° (500°) 260° (500°)	Good workability, water absorbent, non-combustible. Check manufacturers' data for specific properties. Low compression resistance.
MINERAL FIBER	Pipe Covering Block Board Blanket	to 649°C (1200°F) to 1035°C (1895°F) to 649°C (1200°F) to 649°C (1200°F)	.072 (.50) @ .092 (.64) @ .101 (.70) @ .101 (.70) @	260° (500°) 260° (500°) 260° (500°) 260° (500°)	Good workability, non-combustible. Low compressive resistance. Water absorbent.
PERLITE (Expanded)	Pipe Covering Block	to 649°C (1200°F)	.106 (.74) @	260° (500°)	Good workability, non-combustible, friable. Check manufacturers' data for specific properties. Poor abrasion resistance. Special packaging required to protect material. Corrosion inhibitor.
CERAMIC FIBER (Refractory Fiber)	Blanket Board	to 1260°C (2300°F) to 1260°C (2300°F)	.086 (.60) @ .080 (.56) @	260° (500°) 260° (500°)	Temperature range varies with manufacturer, style and type.
CEMENTS Hydraulic Setting Cement High Temperature Mineral Wool Finishing Cement (Mineral Fiber or Vermiculite)	Type I Type II Type III	38-649°C (100-1200°F) 38-870°C (100-1600°F) 38-980°C (100-1800°F)	.180 (1.05) @ .160 (1.12) @ .150 (1.26) @	250° (482°) 250° (482°) 250° (482°)	One coat application – insulating and finishing. Slow drying, rough texture – Pointing and insulating and filling. Used over basic insulation – Smooth finish usually 1/8" or ¼" thick application.

**FIN**



Dans une bande bimétallique, le laiton se dilate (ou se contracte) davantage lorsqu'il est chauffé (ou refroidi) que le fer, de sorte que la bande se plie comme illustré.

Material	Thermal conductivity (W/m°C)		
	At 25°C	At 125°C	At 225°C
Iron	80	68	60
Low carbon steel	54	51	47
Stainless steel	16	17.5	19
Tungsten	180	160	150
Platinum	70	71	72
Aluminium	250	255	250
Gold	310	312	310
Silver	420	418	415
Copper	401	400	398



# Thermal Properties

Molar and Specific Heat Capacities

Coefficients of Thermal Expansion

Volume Expansion on Melting

Thermal Shock Resistance

Heat Transfer Processes

Thermal Conductivity

Thermal Diffusivity

Spectral Emissivity

Temperature and Latent Enthalpies of Fusion, Vaporization, and Sublimation

Order of Magnitude of Thermal Properties of Materials

## Propriétés thermiques

Capacités calorifiques

Coefficients de dilatation

Expansion du volume

Résistance aux chocs

Processus de transfert

Conductivité thermique

Diffusivité thermique

Emissivité spectrale

Température et enthalpie

et de sublimation

Ordre de grandeur d

## Propriétés thermiques

Capacités calorifiques molaires et spécifiques

Coefficients de dilatation thermique

Expansion du volume à la fusion

Résistance aux chocs thermiques

Processus de transfert de chaleur

Conductivité thermique

Diffusivité thermique

Emissivité spectrale

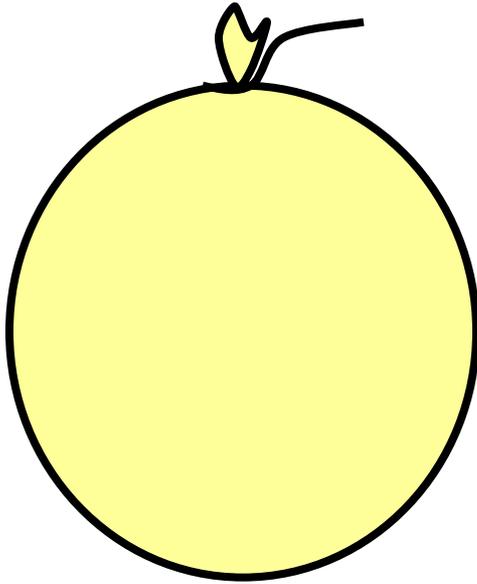
Température et enthalpies latentes de fusion, de vaporisation et de sublimation

Ordre de grandeur des propriétés thermiques des matériaux

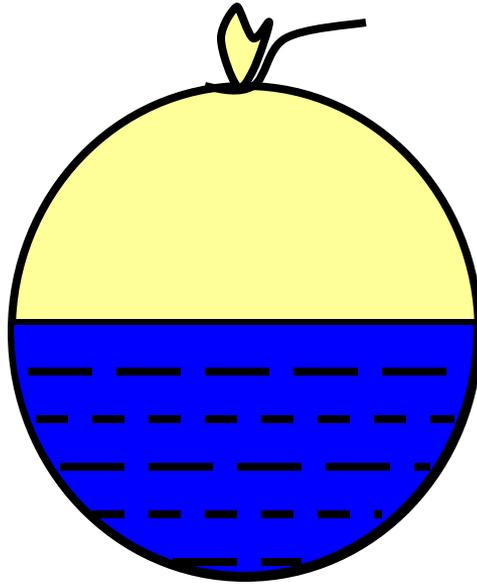
**Table 1.8.** Order of magnitude of thermal properties of selected materials

Material	Melting point ( $mp/^\circ\text{C}$ )	Thermal conductivity ( $k/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Specific heat capacity ( $c_p/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Linear thermal expansion ( $\alpha_L/10^{-6}\text{K}^{-1}$ )
Diamond	3500	900	506	2.2
Tungsten	3414	174	132	4.6
Molybdenum	2620	138	251	5.3
Silicon carbide	2400	42.5	690	4.5
Alumina	2054	36	796	8
Titanium	1668	22	538	8.4
Iron	1535	80	447	12
Nickel	1452	91	471	13
Stainless 304	1400	15	477	17
Concrete	1100	1.4	880	10
Steel 1010	1200	64	434	19
Copper	1084	401	494	17
Glass (sodalime)	780	1.4	835	89
Aluminum	660	237	903	23
Magnesium	649	156	1025	26
Zinc	420	121	389	29
Lead	327	35	129	30
Nylon	255	0.25	1670	40
Tin	232	67	229	21
Polyvinylchloride	198	0.13	1339	190
Lithium	181	85	3548	56
Wood (oak)	decomp	0.19	2385	n.a.

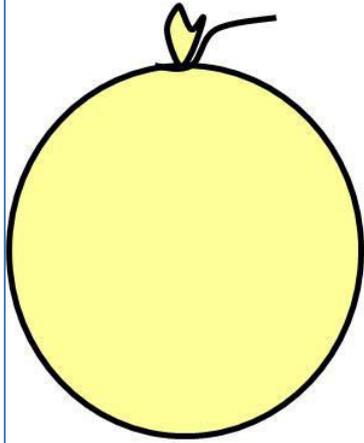
A



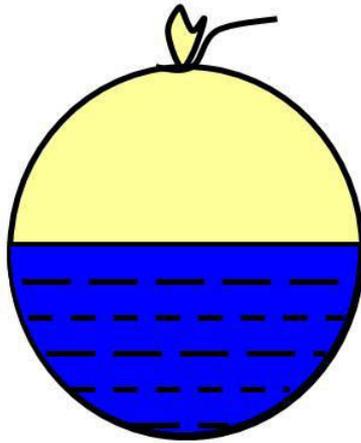
B



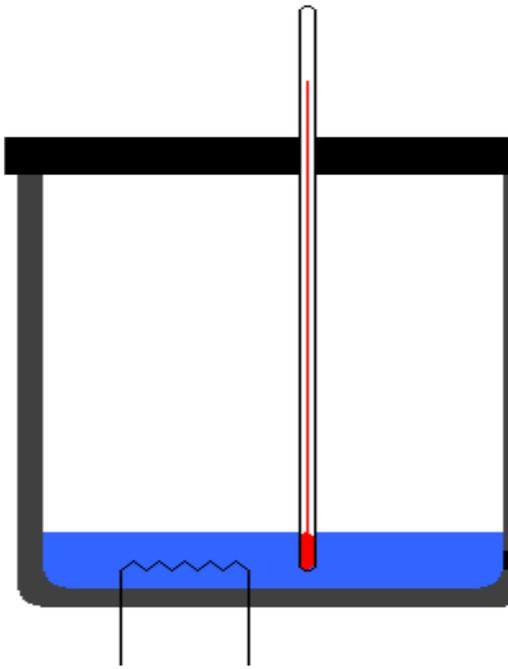
A



B

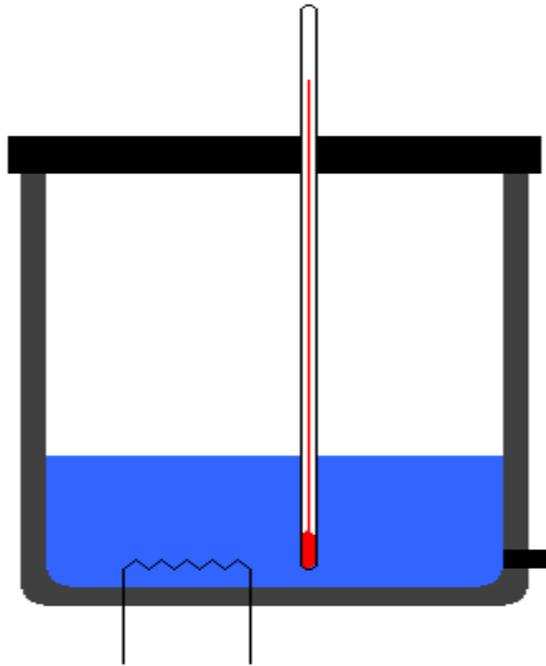


A

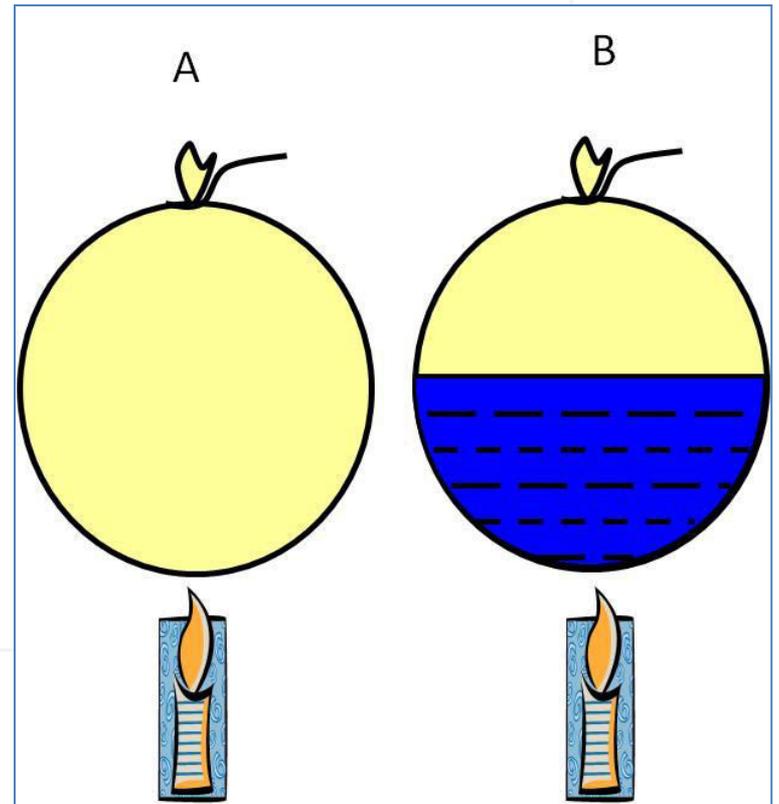
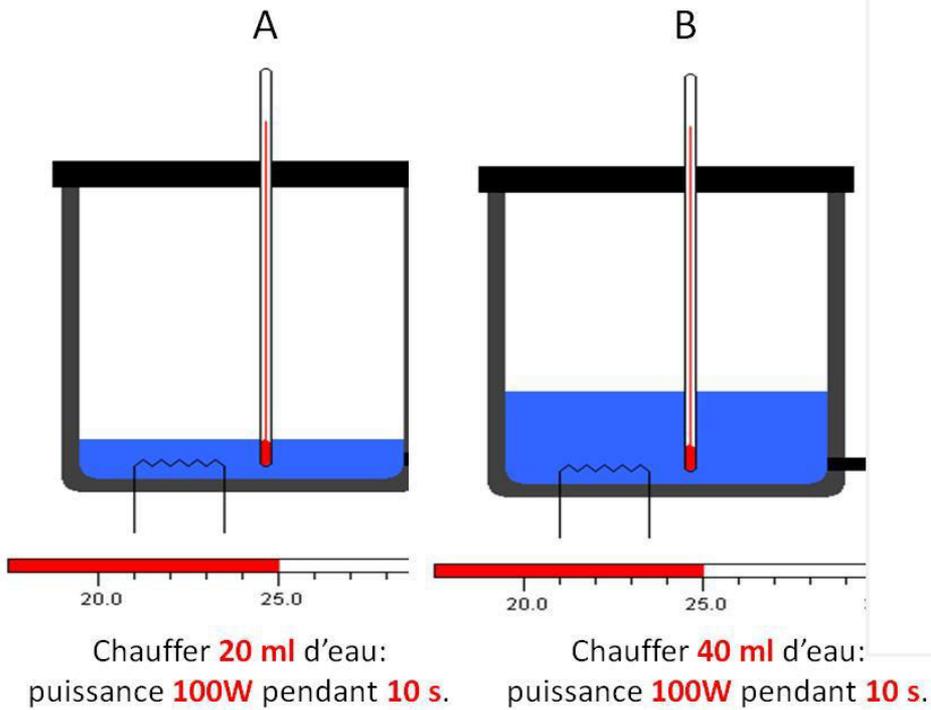


Chauffer **20 ml** d'eau:  
puissance **100W** pendant **10 s.**

B



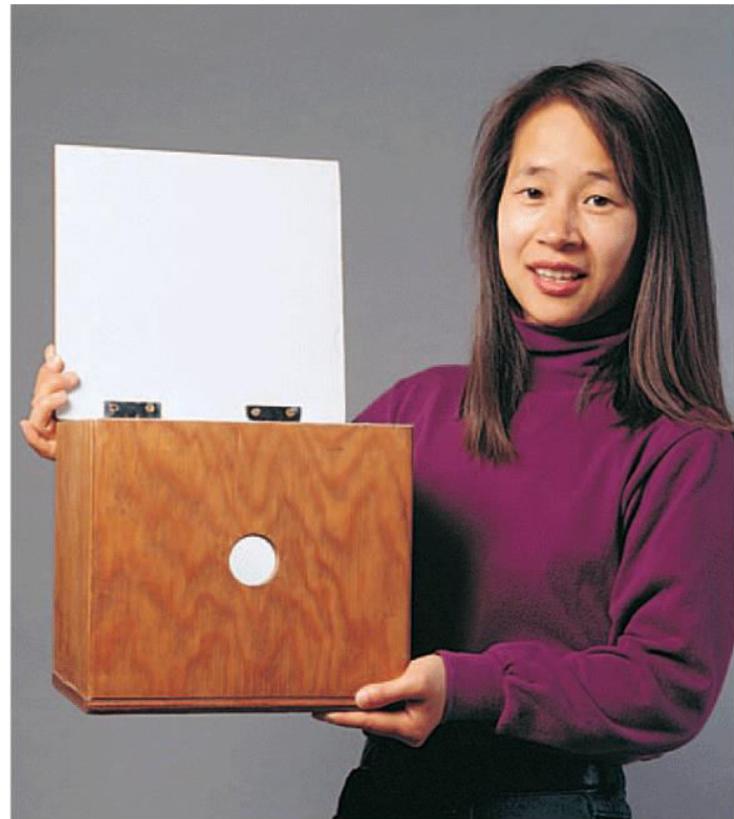
Chauffer **40 ml** d'eau:  
puissance **100W** pendant **10 s.**



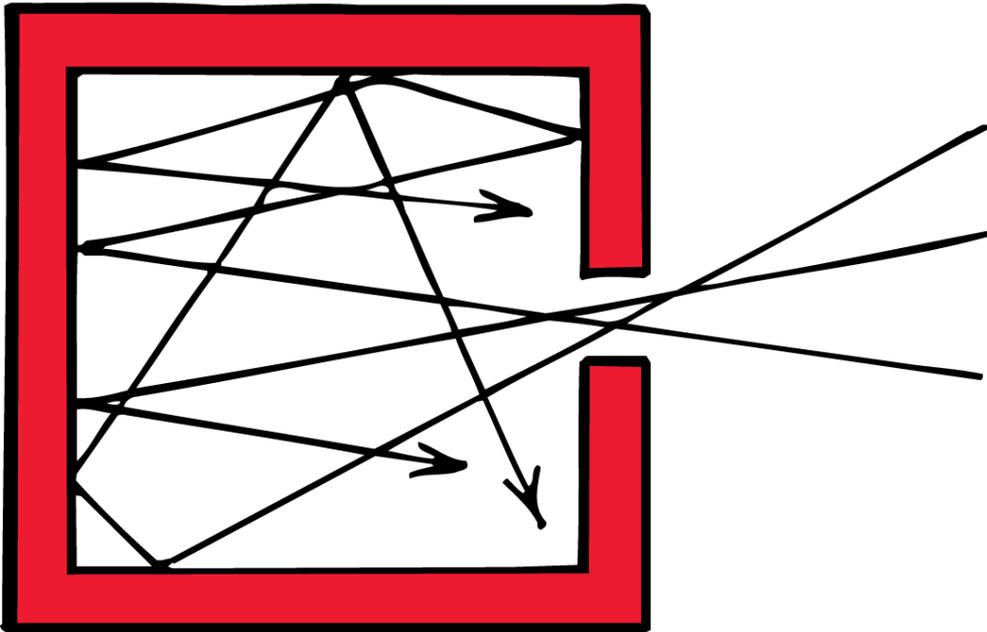
Comme observé à partir des exceptions 1A et 1B, étant donné que la capacité thermique de l'eau dépend de la quantité d'eau, il est plus significatif d'examiner la capacité thermique par unité de masse d'une substance.

La capacité thermique de 1 g de la même substance (dans ce cas, l'eau) est toujours la même. C'est ce qu'on appelle sa capacité thermique spécifique.

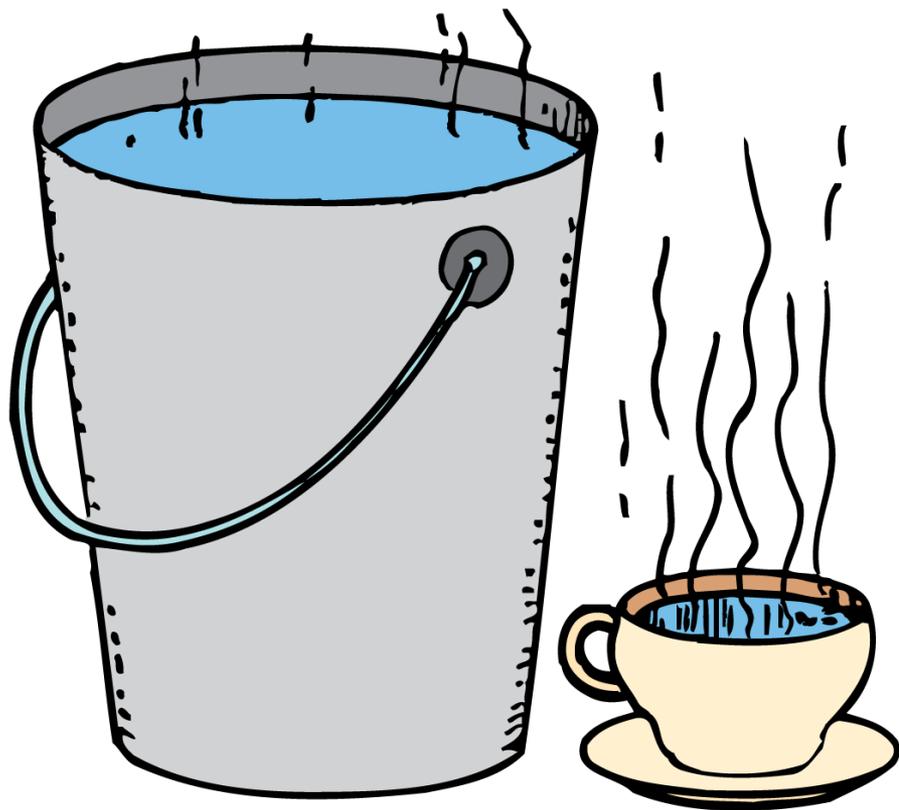
EXPLIQUER! Même si l'intérieur de la boîte a été peint en blanc, le trou semble noir.



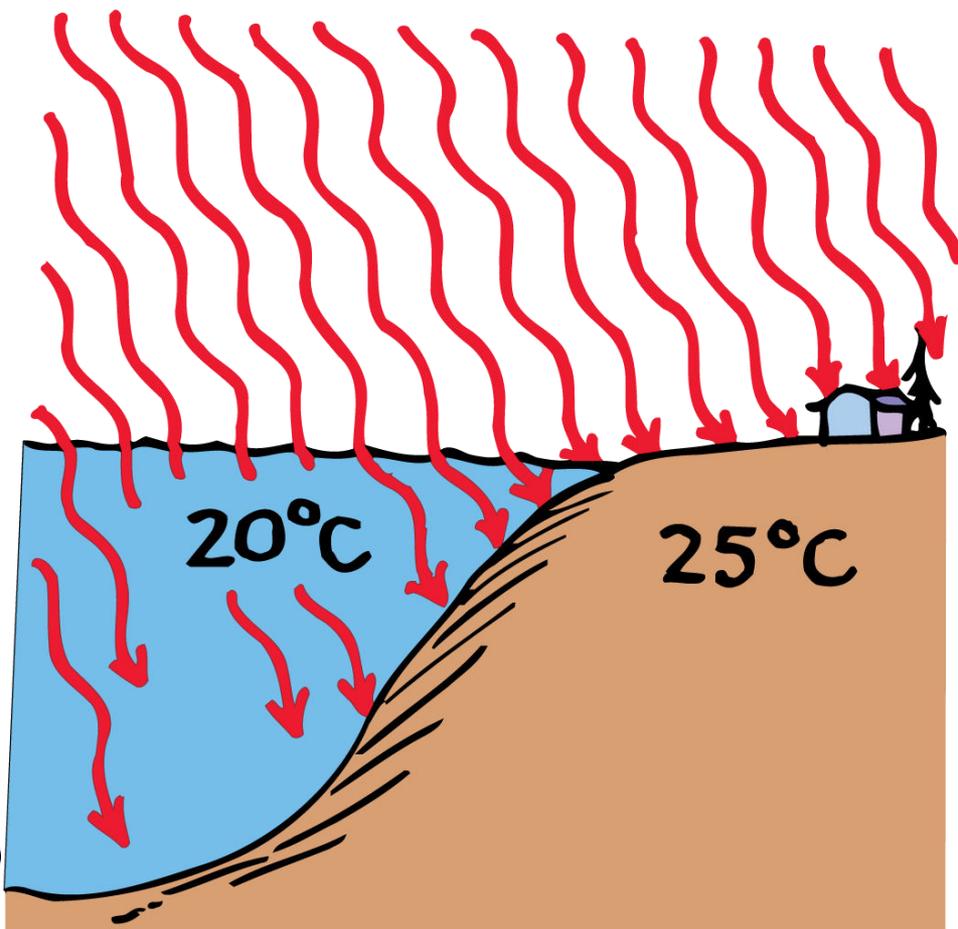
L'énergie rayonnante qui pénètre dans une ouverture a peu de chances de sortir avant d'être complètement absorbée.



Il y a plus d'énergie cinétique moléculaire dans le seau d'eau chaude que dans le petit verre d'eau à température plus élevée (**Vrai ou Faux?**).

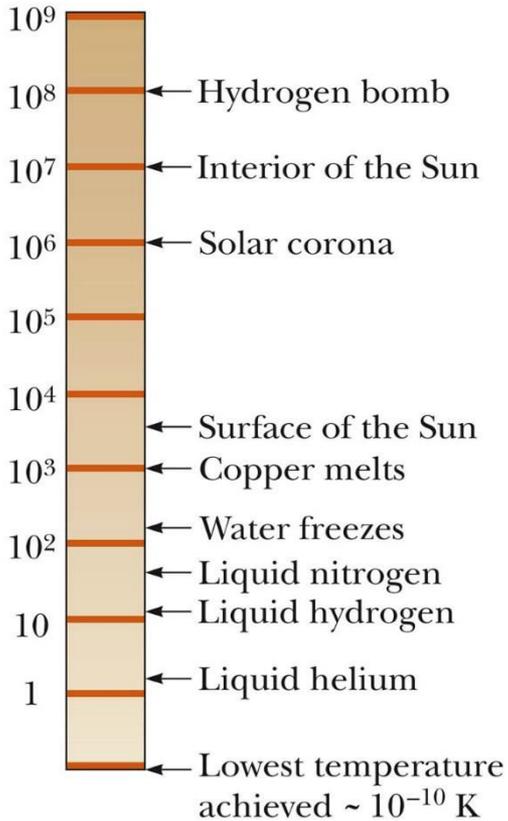


L'eau a une chaleur spécifique élevée et est transparente, il faut donc plus d'énergie pour se réchauffer que la terre

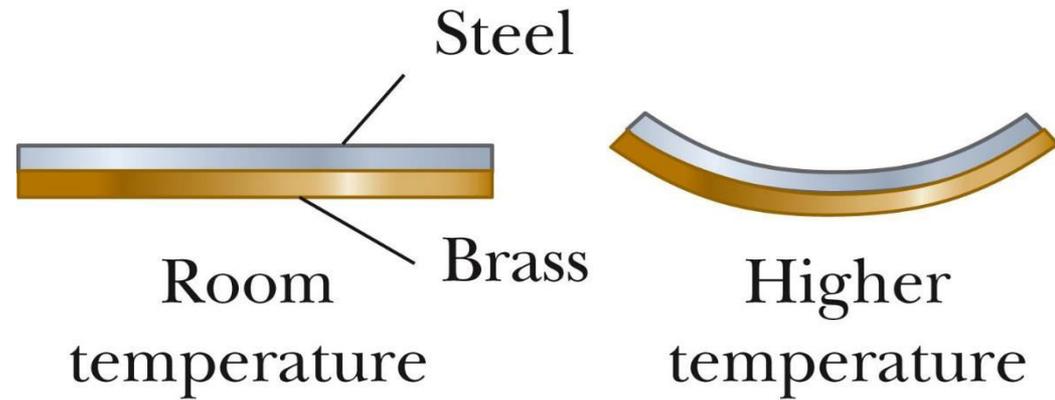


Note that the scale is logarithmic.

Temperature (K)

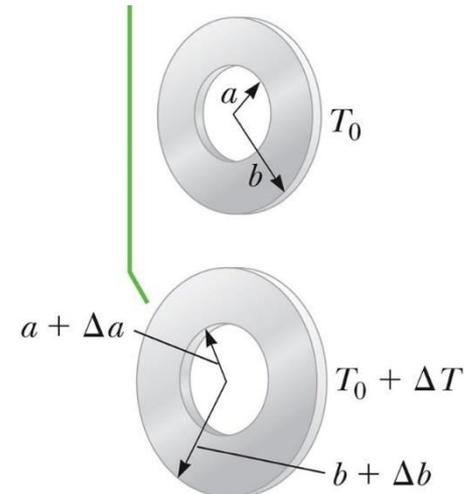


© Cengage Learning. All Rights Reserved.



a

© Cengage Learning. All Rights Reserved.



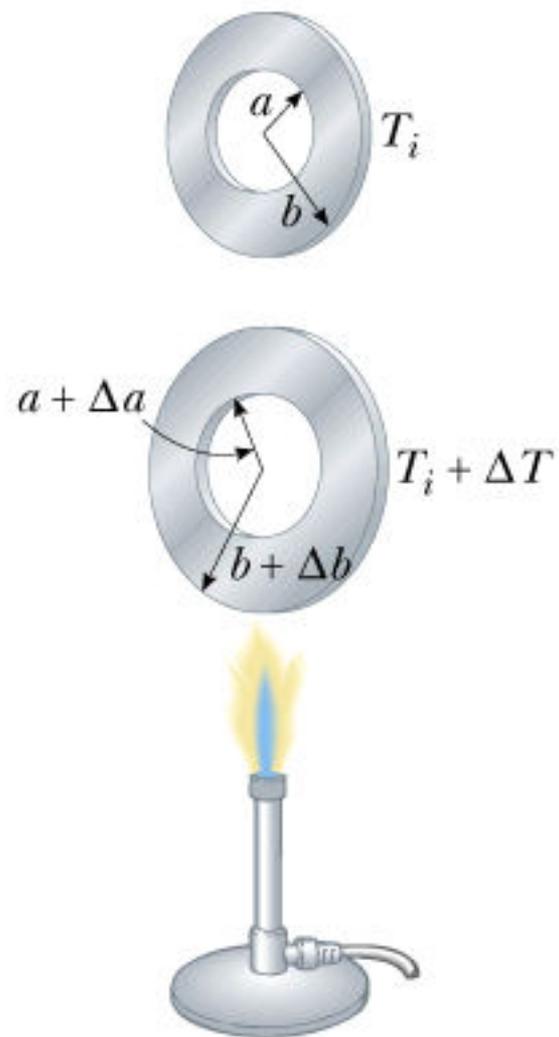
© Cengage Learning. All Rights Reserved.



- Thermal expansion joints like these in the Auckland Harbour Bridge in New Zealand allow bridges to change length without buckling. (credit: Ingolfson, Wikimedia Commons)



Serway, Physics for Scientists and Engineers, 5/e  
Figure 19.8



# Figure 13.13

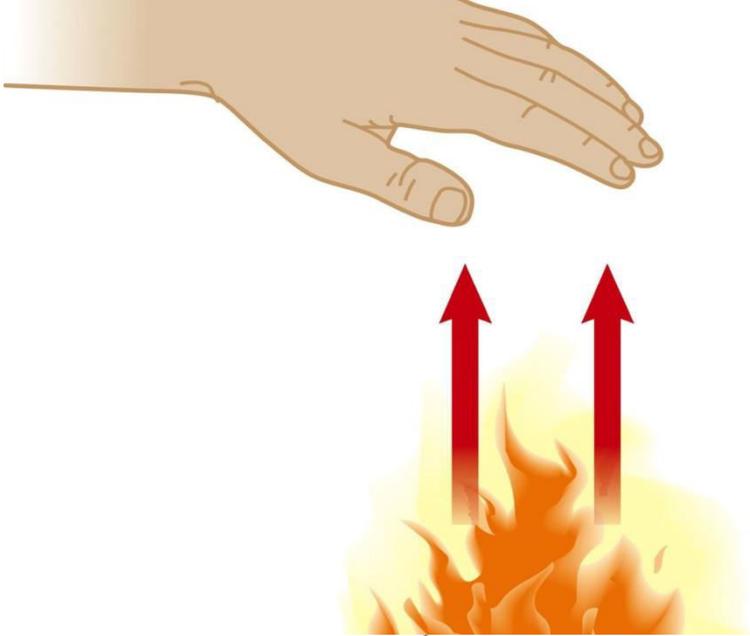


- Because the gas expands more than the gas tank with increasing temperature, you can't drive as many miles on "empty" in the summer as you can in the winter. (credit: Hector Alejandro, Flickr)

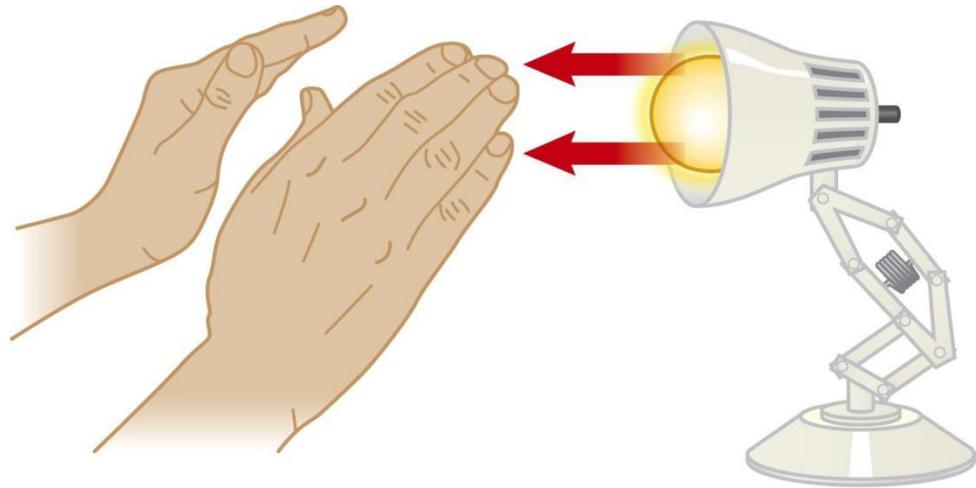
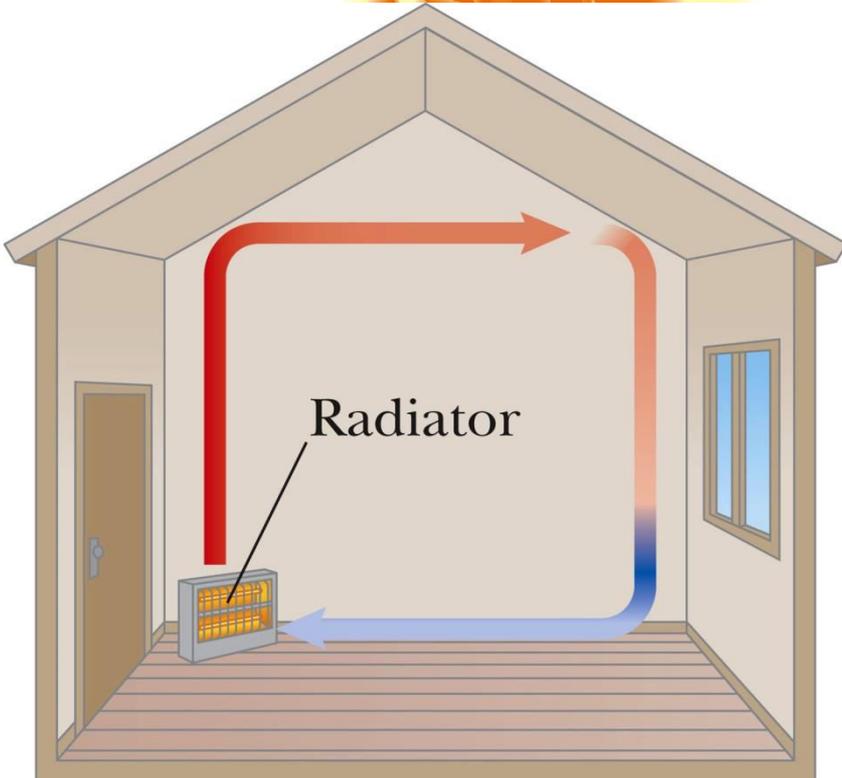
# Figure 13.14



- Thermal stress contributes to the formation of potholes. (credit: Editor5807, Wikimedia Commons)



© Cengage Learning/George Semple



© Cengage Learning. All Rights Reserved.

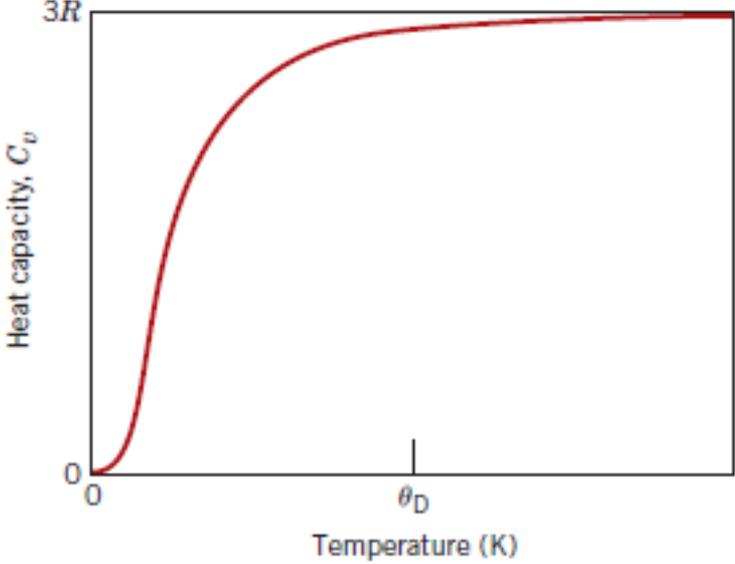


# Dépendance à la température de la capacité calorifique

La variation avec la température de la contribution vibratoire à la capacité calorifique à volume constant pour de nombreux solides cristallins relativement simples est représenté sur la figure

$$C_v = AT^3$$

Est nul à 0 K, mais il augmente rapidement avec la température; cela correspond à une capacité accrue des ondes de réseau pour améliorer leur énergie moyenne avec température ascendante. Aux basses températures, la relation entre et la température absolue T es+



**Table 19.1** Tabulation of the Thermal Properties for a Variety of Materials

<i>Material</i>	$c_p$ (J/kg-K) <sup>a</sup>	$\alpha_l$ [(°C) <sup>-1</sup> × 10 <sup>-6</sup> ] <sup>b</sup>	$k$ (W/m-K) <sup>c</sup>	$L$ [Ω-W/(K) <sup>2</sup> × 10 <sup>-8</sup> ]
<b>Metals</b>				
Aluminum	900	23.6	247	2.20
Copper	386	17.0	398	2.25
Gold	128	14.2	315	2.50
Iron	448	11.8	80	2.71
Nickel	443	13.3	90	2.08
Silver	235	19.7	428	2.13
Tungsten	138	4.5	178	3.20
1025 Steel	486	12.0	51.9	—
316 Stainless steel	502	16.0	15.9	—
Brass (70Cu–30Zn)	375	20.0	120	—
Kovar (54Fe–29Ni–17Co)	460	5.1	17	2.80
Invar (64Fe–36Ni)	500	1.6	10	2.75
Super Invar (63Fe–32Ni–5Co)	500	0.72	10	2.68
<b>Ceramics</b>				
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	775	7.6	39	—
Magnesia (MgO)	940	13.5 <sup>d</sup>	37.7	—
Spinel (MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	790	7.6 <sup>d</sup>	15.0 <sup>e</sup>	—
Fused silica (SiO <sub>2</sub> )	740	0.4	1.4	—
Soda–lime glass	840	9.0	1.7	—
Borosilicate (Pyrex™) glass	850	3.3	1.4	—
<b>Polymers</b>				
Polyethylene (high density)	1850	106–198	0.46–0.50	—
Polypropylene	1925	145–180	0.12	—
Polystyrene	1170	90–150	0.13	—
Polytetrafluoroethylene (Teflon™)	1050	126–216	0.25	—
Phenol-formaldehyde, phenolic	1590–1760	122	0.15	—
Nylon 6,6	1670	144	0.24	—
Polyisoprene	—	220	0.14	—

Material	Thermal conductivity (W/m°C)		
	At 25°C	At 125°C	At 225°C
Iron	80	68	60
Low carbon steel	54	51	47
Stainless steel	16	17.5	19
Tungsten	180	160	150
Platinum	70	71	72
Aluminium	250	255	250
Gold	310	312	310
Silver	420	418	415
Copper	401	400	398

# Choisir un radiateur en Aluminium ou en acier?



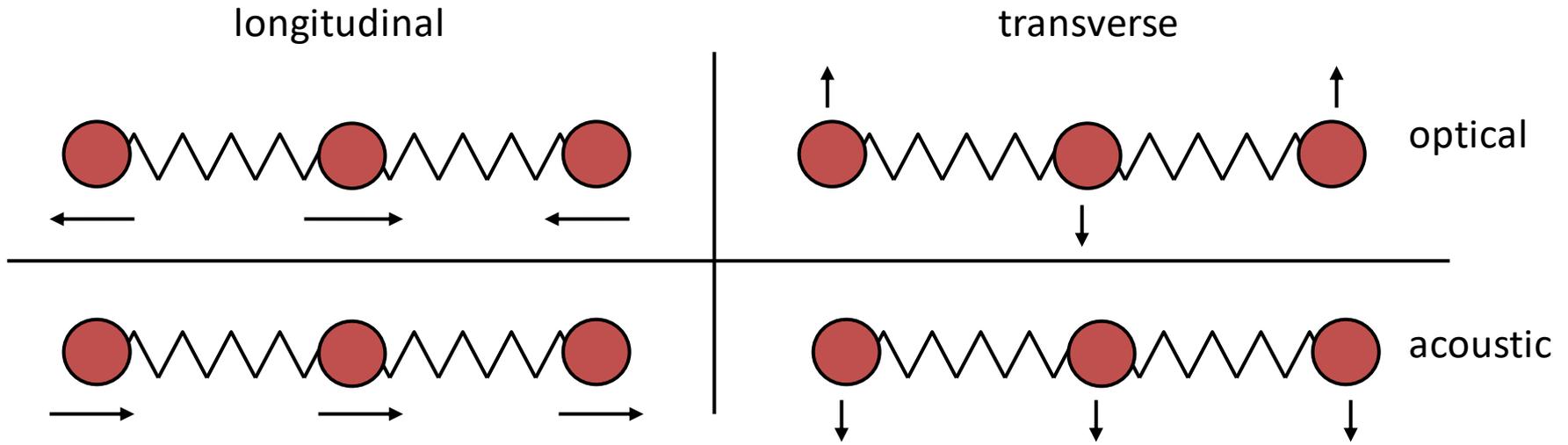
	conductivité thermique:
Al	226 W/m.k
Acier	13.4 W/m.k.

## En résumé :

- Un matériau est considéré isolant s'il a une conductivité inférieure à  $0,05\text{W/mK}$ .
- Les isolants classiques ont des conductivités de l'ordre de  $0,04\text{W/mK}$ .
- Les meilleurs isolants ont des conductivités de l'ordre de  $0,022\text{W/mK}$ .
- La fibre de bois est un des matériaux les moins diffusifs.
- La fibre de bois est un des matériaux qui présente la plus grande efficacité d'inertie par transmission.
- Le béton est un des matériaux les plus effusifs.
- Le béton est un des matériaux qui présente la plus grande efficacité d'inertie par absorption



## There are 4 kinds of waves



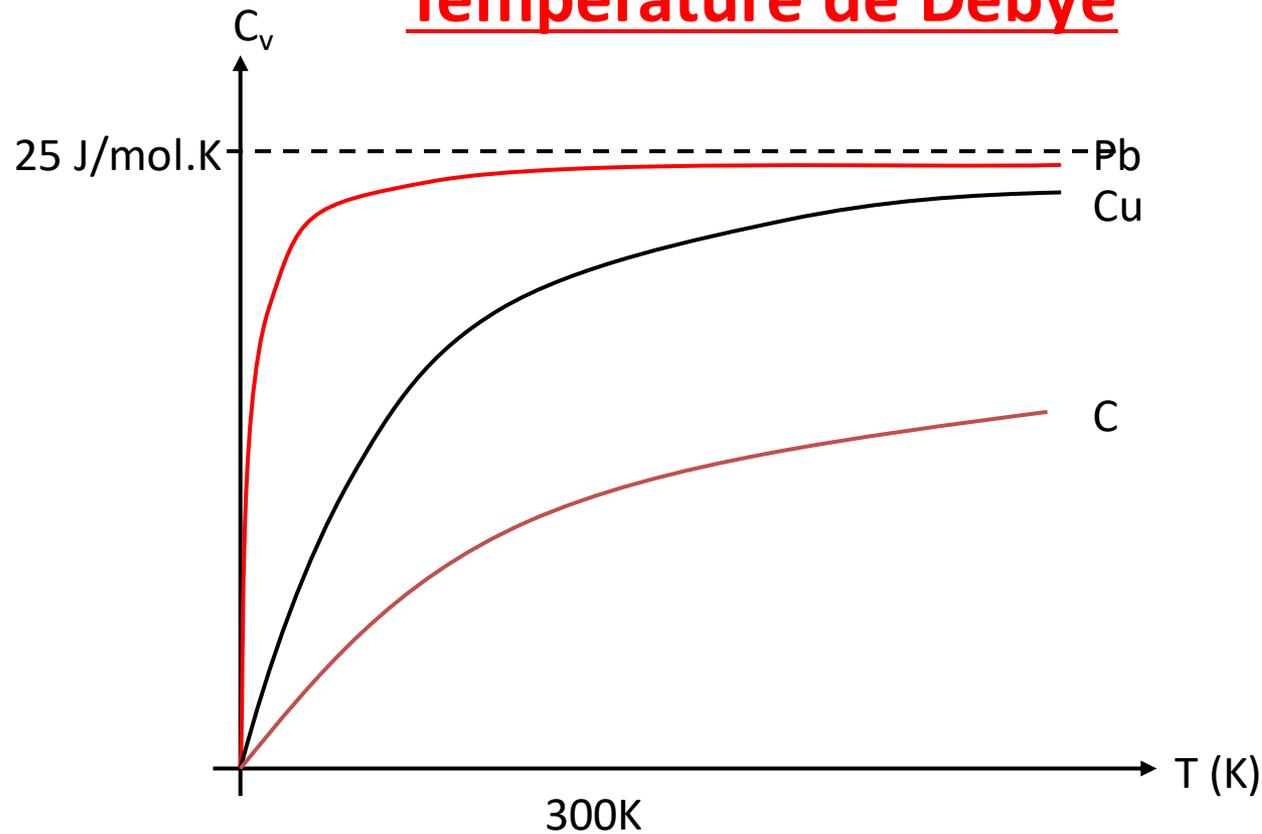
- Using wave-particle duality, we can say that these waves can also act like particles
  - these are called phonons
  - they can scatter etc. just like particles

# Summary

- Not surprisingly, the thermal properties of materials are intimately connected with atomic bonding and electronic effects
- We found that energy is stored in ‘atomic oscillators’
  - classical treatments lead to an approximate value for the heat capacity
  - a full treatment involves phonons
- Phonons are quantised units of lattice vibration
  - effectively heat particles
- Thermal conductivity takes place either by electrons or phonons, depending on the material
- Thermal expansion is related to atomic bonding



## Température de Debye



• La température à laquelle  $C_v$  atteint 96% de sa valeur finale est connue comme la **température de Debye**

**Pb: 95K**

**Cu: 340K**

**C: 1850K**

• À température ambiante, la théorie classique peut expliquer les capacités calorifiques, mais à basse température, des théories quantiques sont nécessaires.











L'énergie thermique, **dans les solides**, est transférée par **deux mécanismes** importants:

**-transfert d'électrons libres**

**-et la vibration des atomes.**

Suite à l'augmentation de température (un gain d'énergie cinétique des électrons) , les électrons de valence se déplacent vers les régions plus froides du matériau et transfèrent leur énergie aux autres atomes par de multiples **collisions**. La vibration atomique agite les électrons de la zone froide qui à leur tour migrent dans la zone plus chaude et le processus se poursuit de façon continue. La quantité d'énergie transmise est fonction du nombre d'électrons excités et de leur mobilité relative qui eux sont fonctions du type de matériau, des imperfections dans la maille et de la température.

De même, la vibration provenant de l'agitation thermique des atomes transfert elle aussi de l'énergie à travers le matériau.

Dans le **cas des métaux**, les électrons de valence peuvent se déplacer librement sous l'action d'une faible augmentation de chaleur. La mobilité des électrons libres est la cause principale de la conductibilité thermique chez ces matériaux ( $k_e \sim 100k_p$ ). On peut donc s'attendre à une relation entre la conductibilité thermique et la conductibilité électrique.

$$L = \frac{k_e}{\sigma T} \cong 2,44 \times 10^{-8} \Omega \cdot W / K^2$$

où  $k_e$  est la conductibilité thermique due au mouvement des électrons,  $\sigma$  est la conductibilité électrique et  $L$  est la constante de Lorentz. Cette relation est respectée jusqu'à une certaine limite pour plusieurs métaux.

L'augmentation de température augmente l'énergie cinétique des électrons mais augmente aussi la proportion de défauts et la vibration des atomes qui à leur tour réduisent la mobilité des électrons libres. Par conséquent, la conductibilité thermique des **métaux** diminuent souvent avec l'augmentation de la température mais l'inverse peut aussi se produire à température élevé lorsque le mécanisme de vibration des atomes devient dominant.

Dans le cas des **matériaux à liaisons ioniques** et des **matériaux amorphes**, la contribution des électrons libres est très faible et la conductibilité thermique est due essentiellement à l'agitation thermique des atomes qui augmente avec la température.

Pour ce qui est des **céramiques à structure cristalline ordonnée** le mouvement des électrons est possible mais moindre que dans les métaux. La liberté de mouvement décroît avec l'augmentation de température. À température élevée la conductibilité thermique peut présenter une hausse suite à un transfert de chaleur par radiation.

Les isolants thermiques sont des matériaux qui contiennent beaucoup d'obstacles réduisant ou empêchant la propagation des phonons et des électrons.

Les phonons et les électrons ne se propagent pratiquement pas dans les gaz.

C'est pourquoi, on a le plus souvent recours à des matériaux poreux comme isolant (brique, laine, mousse, etc.)

## AUTRES MODES DE CONDUCTION THERMIQUE

- Radiation
- Convection

# Mécanismes d'échange thermique

