

## CALENDRIER DE FIN D'ANNÉE

**04/12**

**Série exercices 2 sur Moodle**

**04/12**

**Class (Chapitre 10)**

**11/12**

**Session d'exercices**

**11/12**

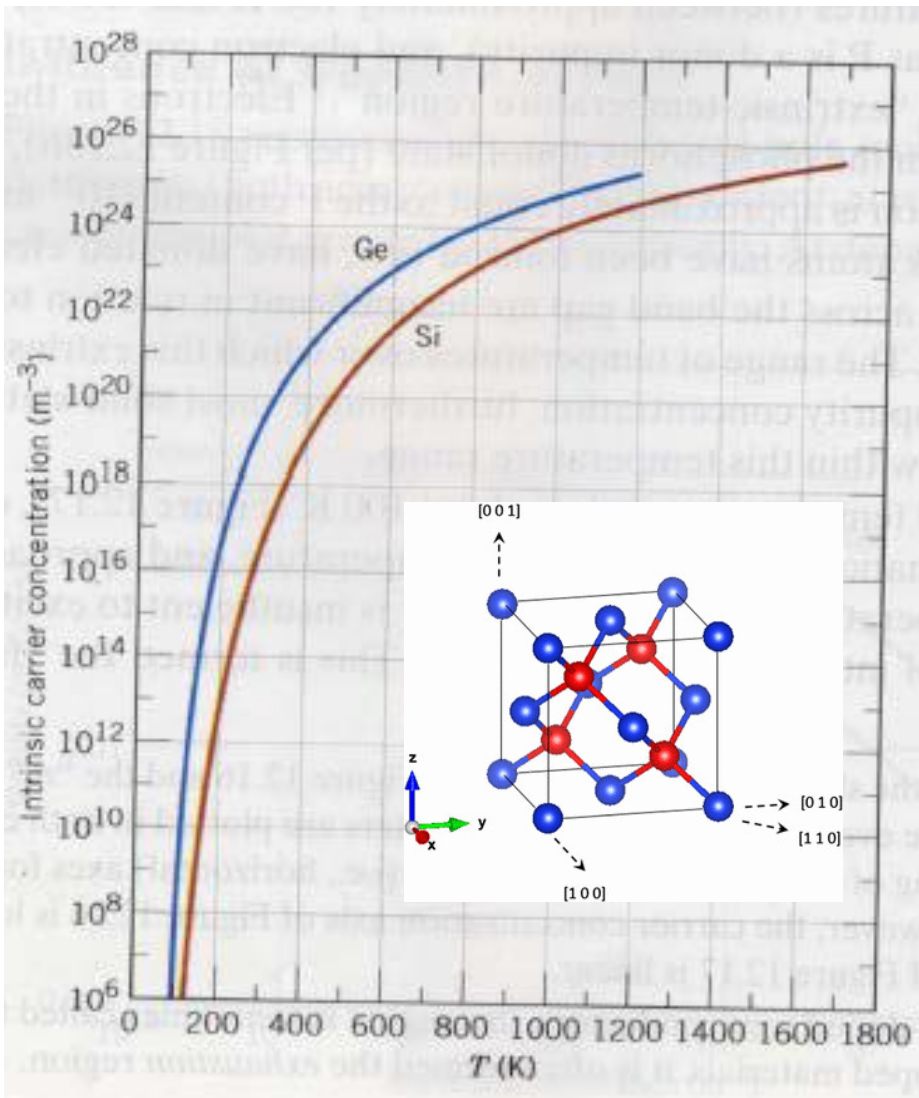
**Rendu d'exercices (sur Moodle)**

**[13h00]**

**18/12**

**Class (Exercices et Q&A Série 2)**

# Exercice dopage (10 minutes)

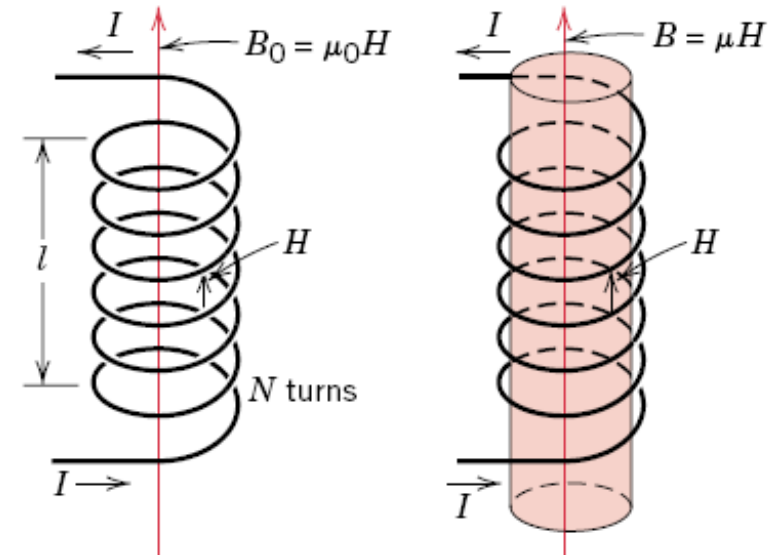


Le cellule primitive du silicium est cubique à faces centrées avec un taille de 0.54 nm. La concentration intrinsèque de porteur dans le Si est de  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$ .

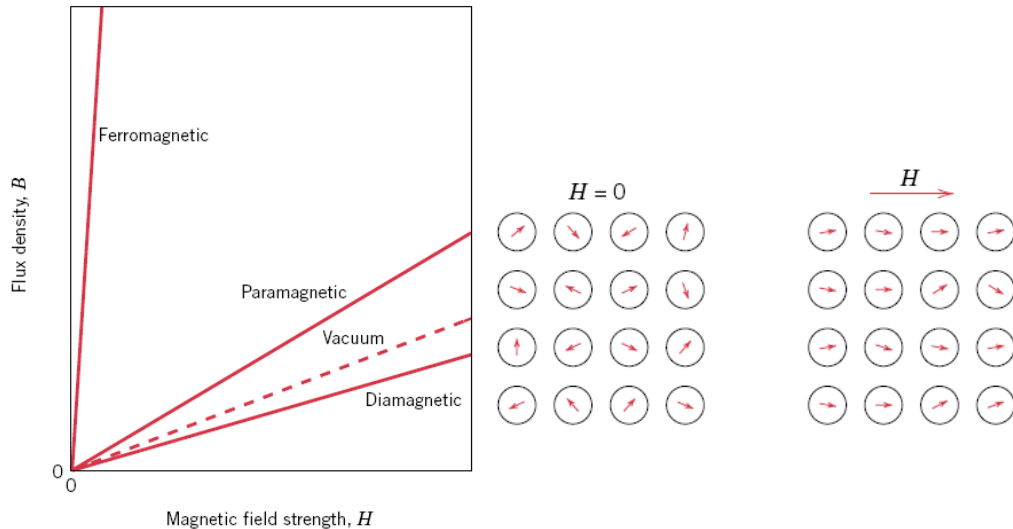
Calculez le degré de pureté d'un échantillon de Si dopé nécessaire pour augmenter la conductivité d'un factor 1'000'000.



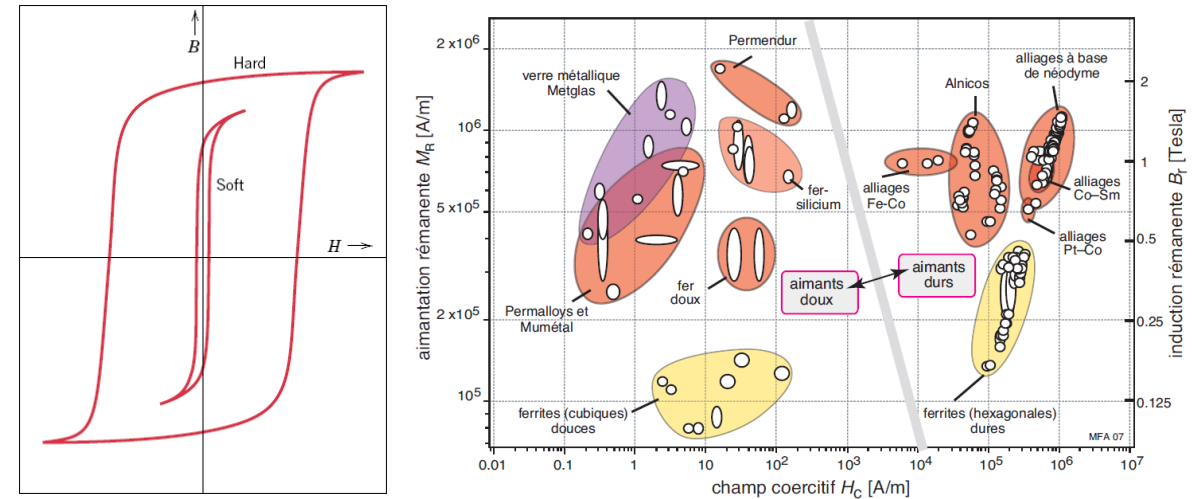
# Le cours de la semaine passée en bref



## Champs et induction magnétiques



## Dia-, para- et ferro- magnetisme



## Hystérèse et matériaux magnétiques mous et durs

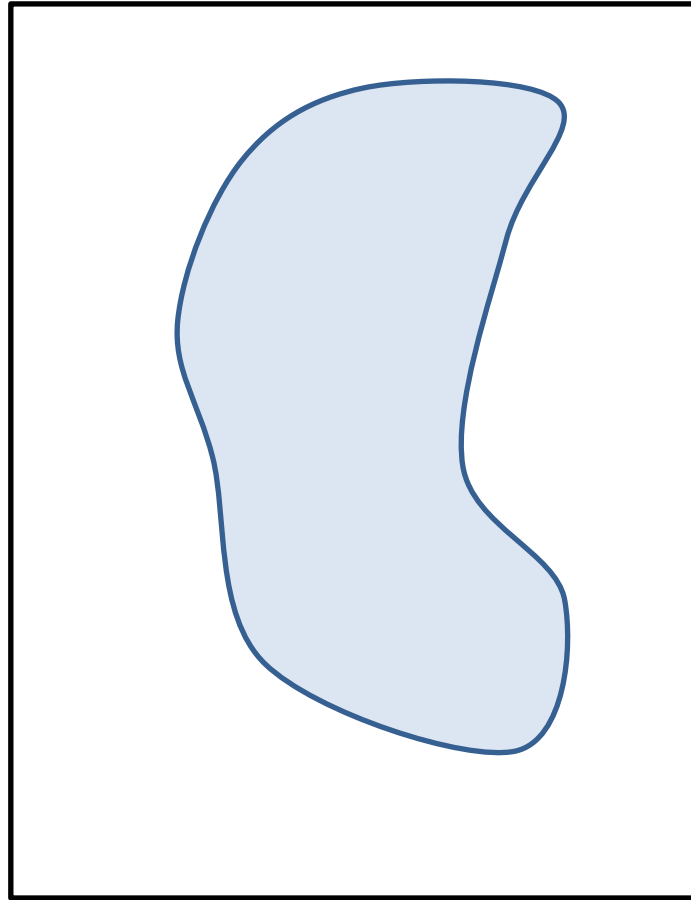
# Propriétés thermiques

- Energie et chaleur
- Capacité thermique
- Chaleur spécifique des matériaux
- Expansion thermique
- Conductivité thermique
- Application: Dissipation thermique dans l'électronique

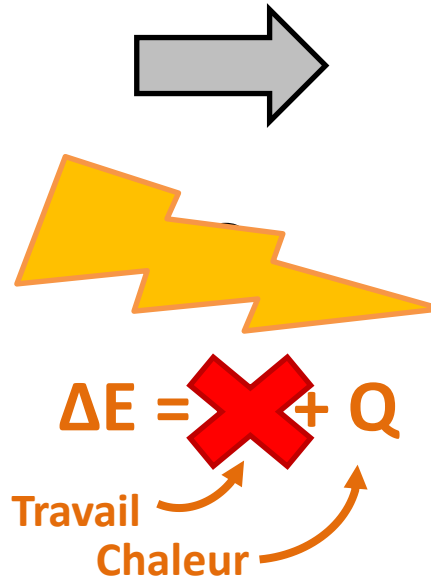
# Energie et chaleur

Les propriétés thermiques des matériaux sont importantes pour comprendre les variations de température dans un matériau.

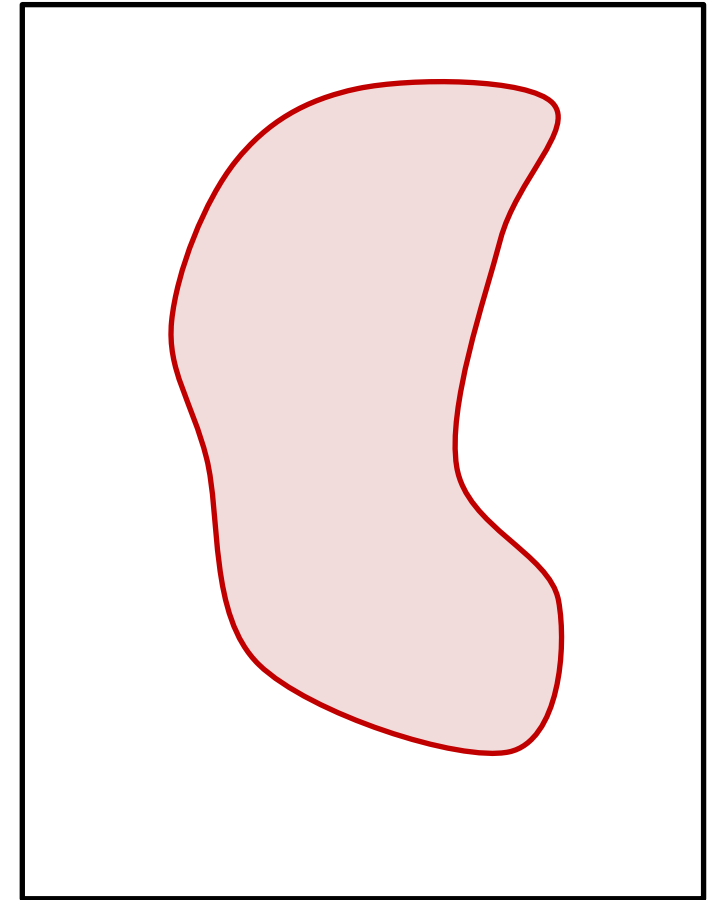
On va considérer system ou le travail sur le système est nul donc la variation d'énergie est lié aux échange de chaleur



Objet 1  
 $T_{1i}$



$= T_{\text{start}}$



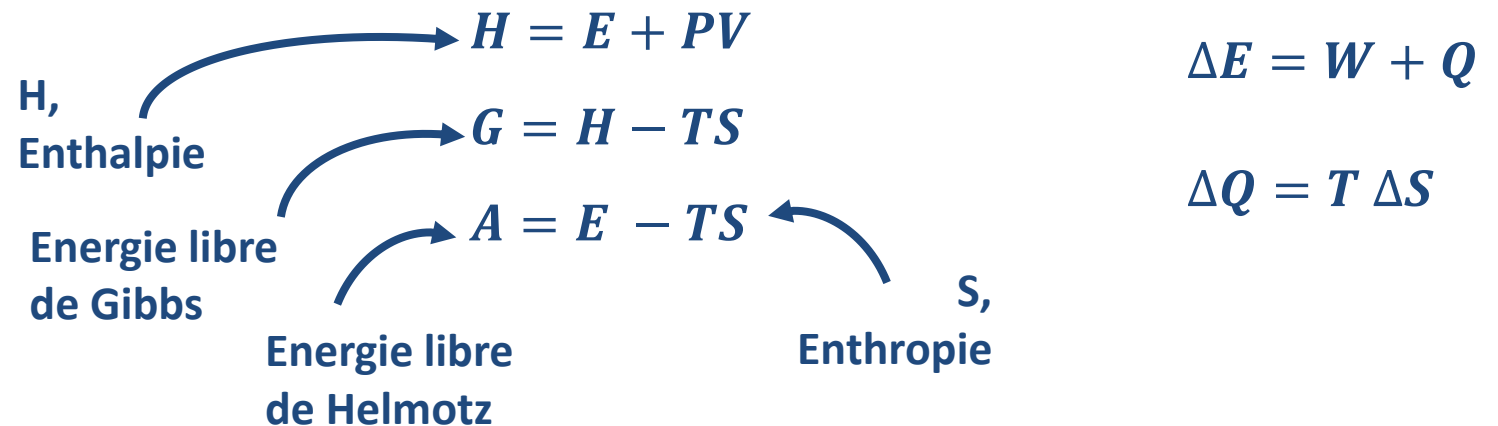
Objet 1  
 $T_{1f} \neq T_{\text{start}}$

# Considérations thermodynamiques

L'énergie d'un système peut se présenter sous différentes formes, et les échanges d'énergie avec ce système suivent les lois de la thermodynamique. En parallèle, la variation des variables d'état dépend de la nature du système.

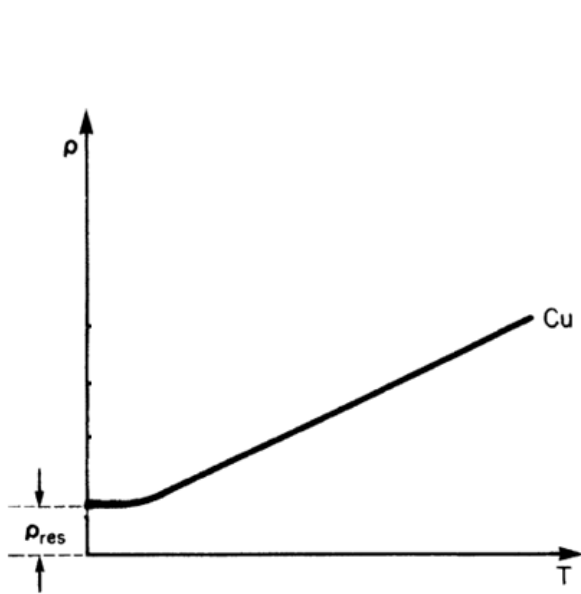
Par exemple, pour un gaz idéal:

*Ideal gas equation*  
 $PV = nRT$

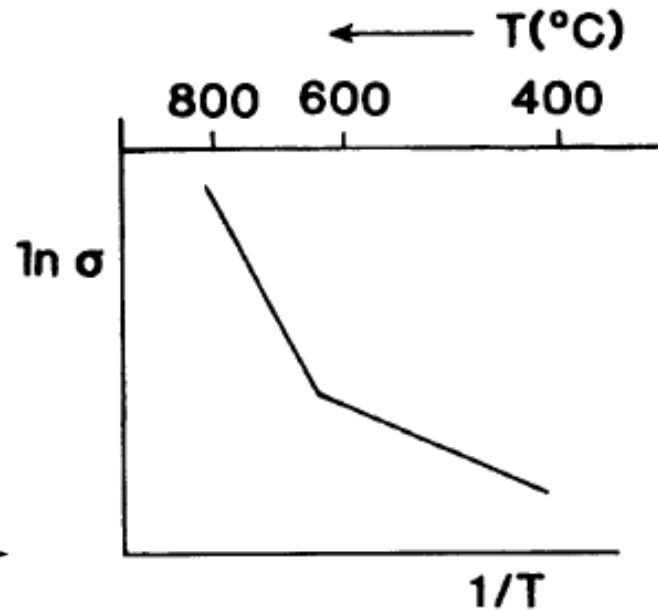


Au contraire de ce cas, on peut simplifier la description dans les solides en considérant que les variations de température se produisent toujours à pression constante.

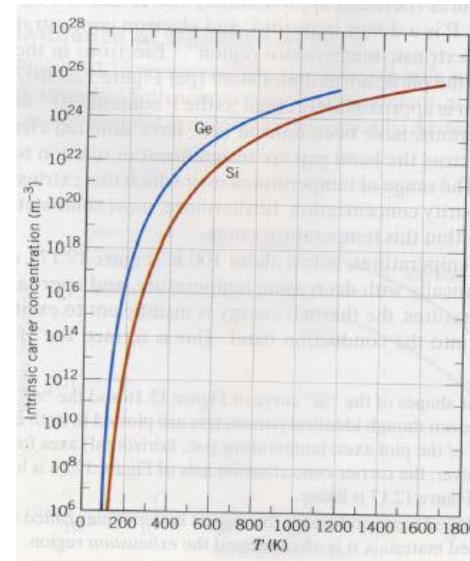
# Ou on a rencontré propriétés lié aux échange de chaleur?



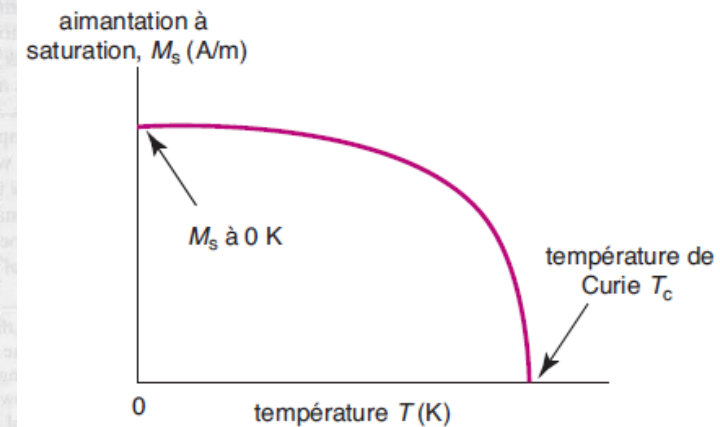
Chapitre 2-  
Conductivité des  
métaux



Chapitre 3-  
Conductivité des  
solides ioniques



Chapitre 6 -  
Semiconducteur



Chapitre 7 – Propriétés  
magnétiques

# Capacité thermique et chaleur spécifique

La température augmente comme conséquence de l'absorption d'énergie.

La **capacité thermique** est la propriété qui nous renseigne sur la facilité d'un objet d'absorber la chaleur.

$$C_p \sim C_v = \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_v = \frac{dQ}{dT}$$

Qu'utilisez-vous pour vous rafraîchir lors d'une chaude journée d'été ?



La quantité d'énergie liée à la variation de température dépend de la quantité de matière

La **chaleur spécifique** est la propriété qui nous renseigne sur la facilité du matériau d'absorber la chaleur.

$$c = \frac{C}{m}$$

$$\Delta E = Q = mc_v \Delta T$$

# Chaleur spécifique de matériaux

## *Chaleur spécifique*

Matériaux	$c_p$ [kJ/(kg*K)]
Borax	1.0
Brass	0.38
Calcite 32 - 100F	0.8
Calcite 32 - 212F	0.84
Calcium carbonat	0.76
Graphite	0.71
Charcoal	1
Chalk	0.9
Chromium	0.5
Cobalt	0.46
Water	4.19

Copper	0.39
Cotton	1.34
Diamond	0.63
Glass	0.84
Gold	0.13
Iron, 20°C	0.46
Limestone	0.91
Mercury	0.14
Porcelain	1.07
Silicon	0.75
Steel	0.49
Titanium	0.47
Tungsten	0.134
Zinc	0.38

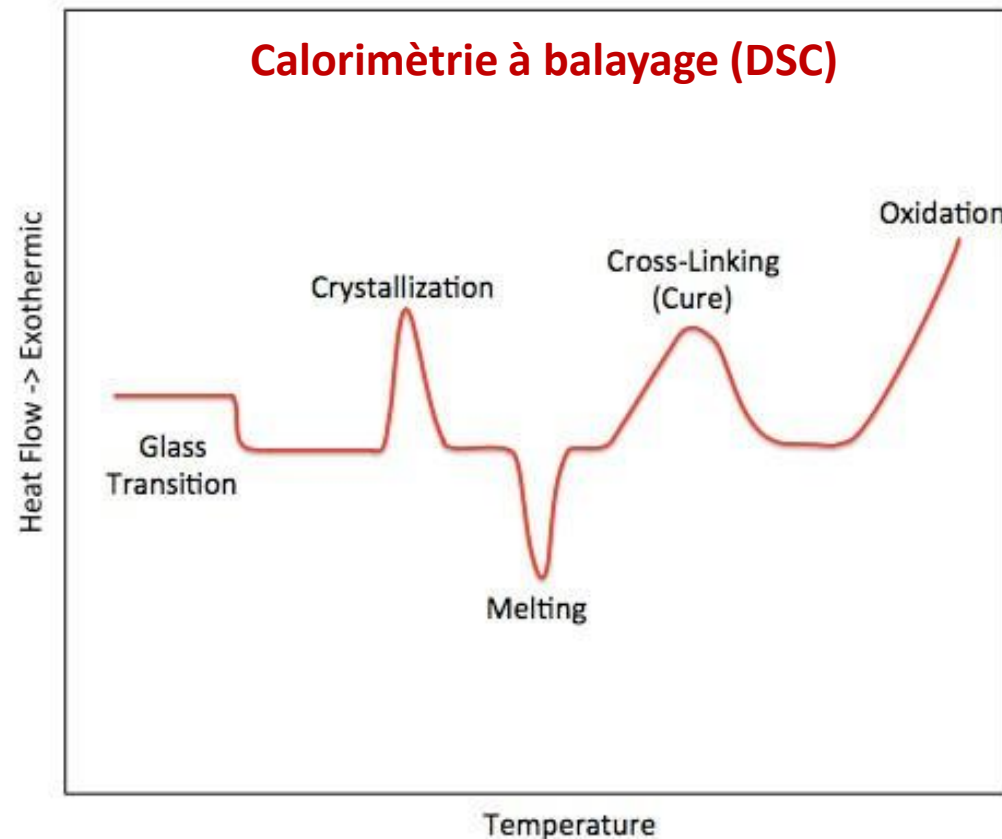
### **Exercices (10 minutes) [Considérez $c_p = c_v$ ]**

Quelle quantité de chaleur est nécessaire pour élever la température d'un bloc de cuivre de 0.5 kg de 0 °C à 100 °C ?

Quelle sera la température finale si une pièce d'or de 2 kg à 200°C est insérée dans un récipient contenant 10 kg d'eau à 50°C ?

# Transition de phase

La chaleur spécifique d'un matériau est définie pour chacune de ses phases. Lorsqu'une transition de phase se produit, un échange supplémentaire de chaleur avec l'environnement a lieu, et la nouvelle phase est caractérisée par une valeur de chaleur spécifique différente. La propriété qui décrit l'échange de chaleur lors d'une transition de phase est appelée la chaleur latente de transformation.



*Chaleur latente de transformation (fusion)*

Matériaux	$c_p$ [kJ/kg]
Brass	168
Chromium	394
Cobalt	275
Water	334
Copper	206
Gold	63
Mercury	11.4
Zinc	112

# La chaleur spécifique de Dulong- Petit

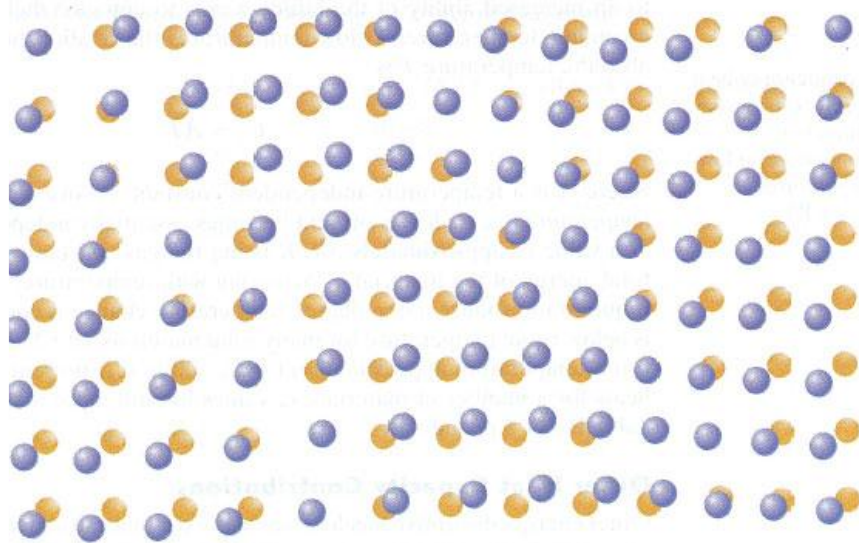
Table 19.1. Experimental Thermal Parameters of Various Substances at Room Temperature and Ambient Pressure.

Substance	Specific heat capacity ( $c_p$ )	Molar (atomic) mass
	$\left(\frac{J}{g \cdot K}\right)$	$\left(\frac{g}{mol}\right)$
Al	0.897	27.0
Fe	0.449	55.8
Ni	0.456	58.7
Cu	0.385	63.5
Pb	0.129	207.2
Ag	0.235	107.9
C (graphite)	0.904	12.0
Water	4.184	18.0

**Limite de  
Dulong- Petit**

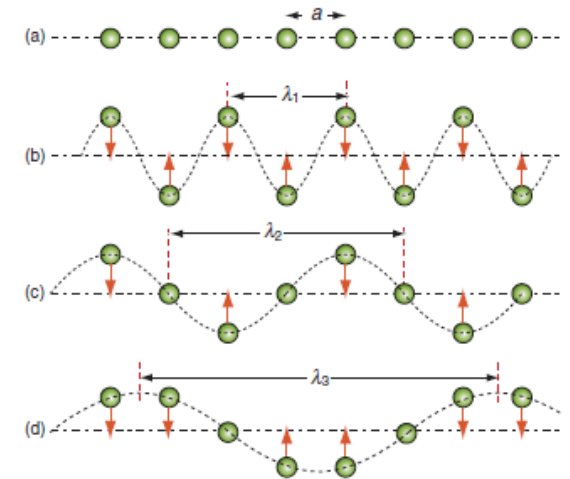
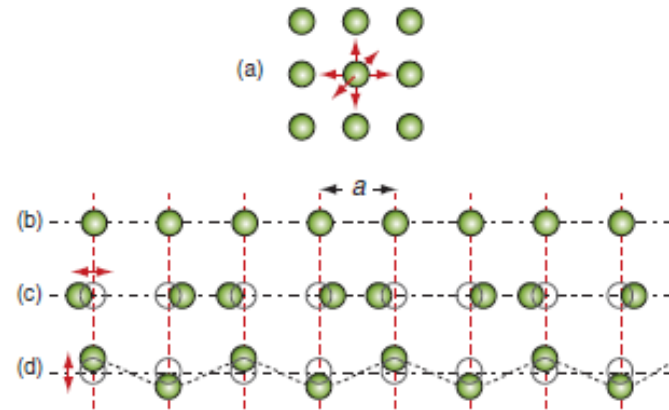
$$25 \frac{J}{mol * K}$$

# Contribution vibrationnelle à la chaleur spécifique



● Normal lattice positions for atoms  
● Positions displaced because of vibrations

Dans la majorité de matériaux, la manière principale pour acquérir l'énergie thermique est en augmentant l'énergie vibrationnelle des atomes.



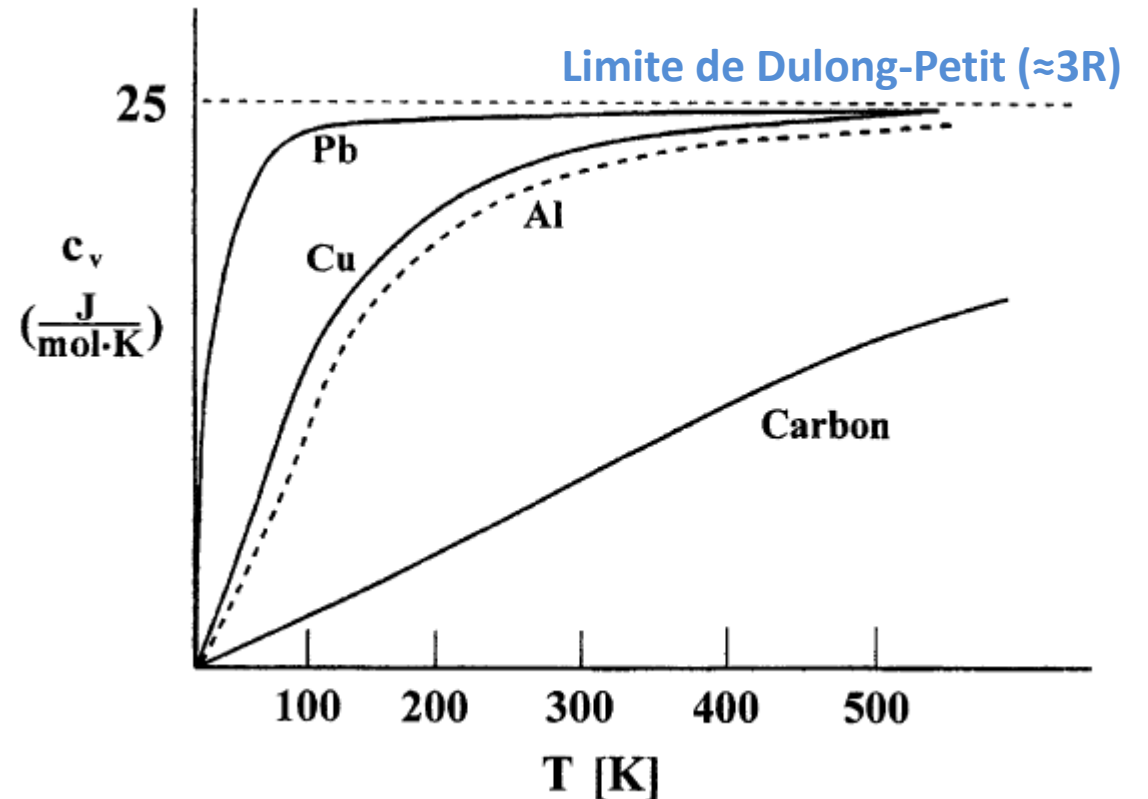
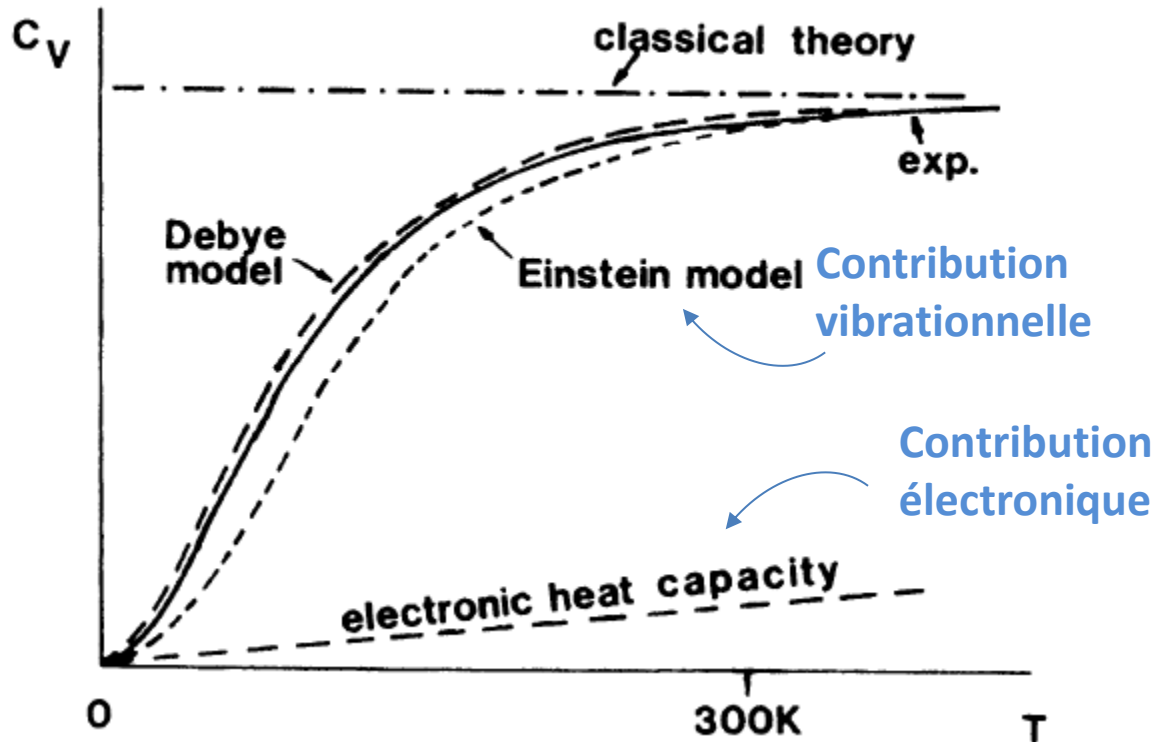
Dans les solides, les atomes oscillent autour de leur position moyenne avec une **amplitude qui augmente avec la température**.

Les liaisons interatomiques les empêchent de vibrer indépendamment les uns des autres et les vibrations sont comme des ondes élastiques stationnaires. **Il existe un mode de vibration longitudinal et deux modes transversaux**, un dans le plan de la page et l'autre perpendiculaire à ce dernier.

Certains modes ont une faible longueur d'onde et une énergie élevée alors que d'autres modes ont une grande longueur d'onde et une faible énergie. **Les particules quantiques qui correspondent à ces ondes vibrationnelles sont les phonons**.

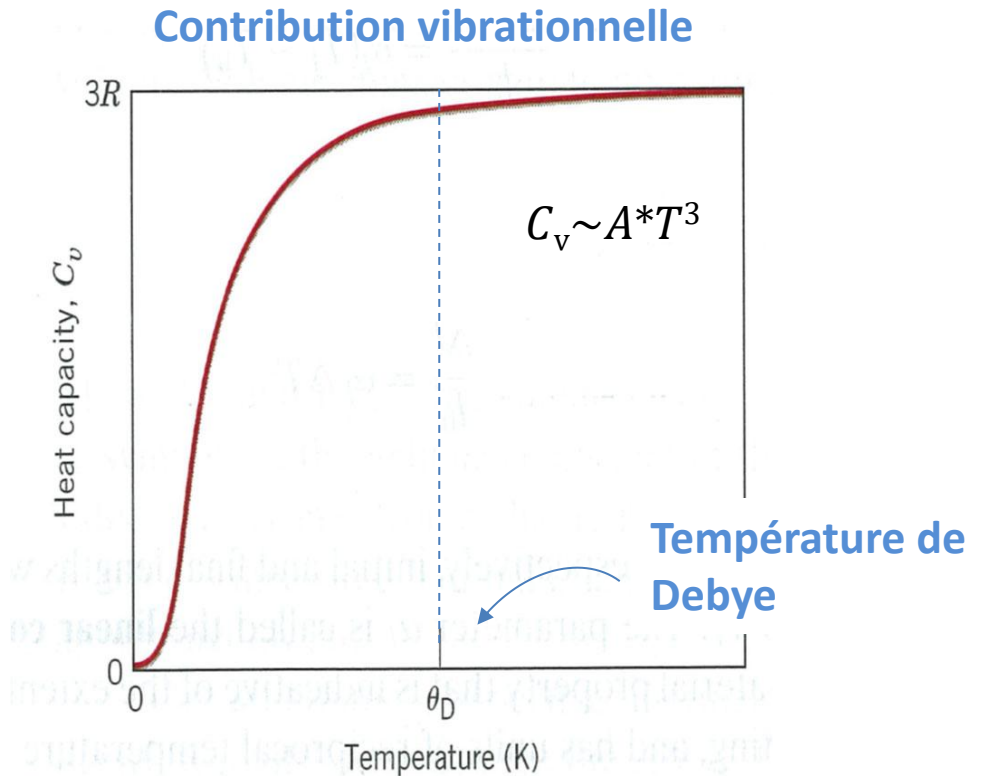
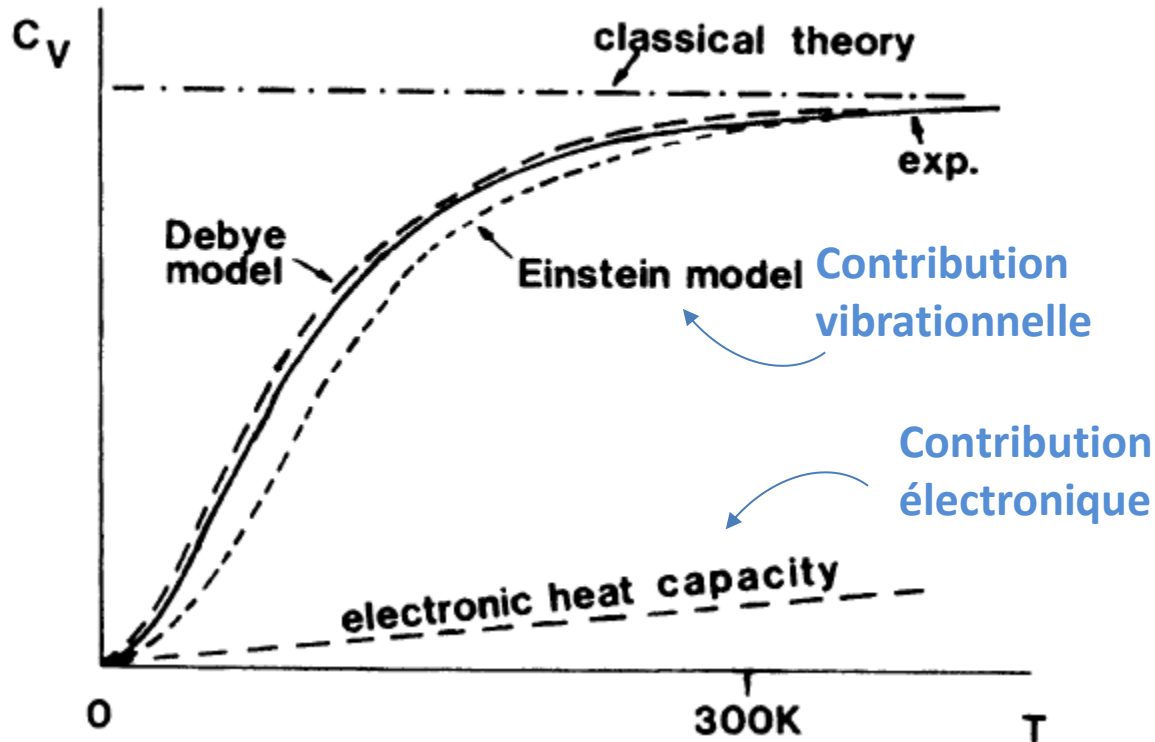
# Chaleur spécifique vs température

La capacité d'absorber la chaleur change avec la température.  
La manière dont elle change est caractéristique de la contribution principale à la chaleur spécifique.



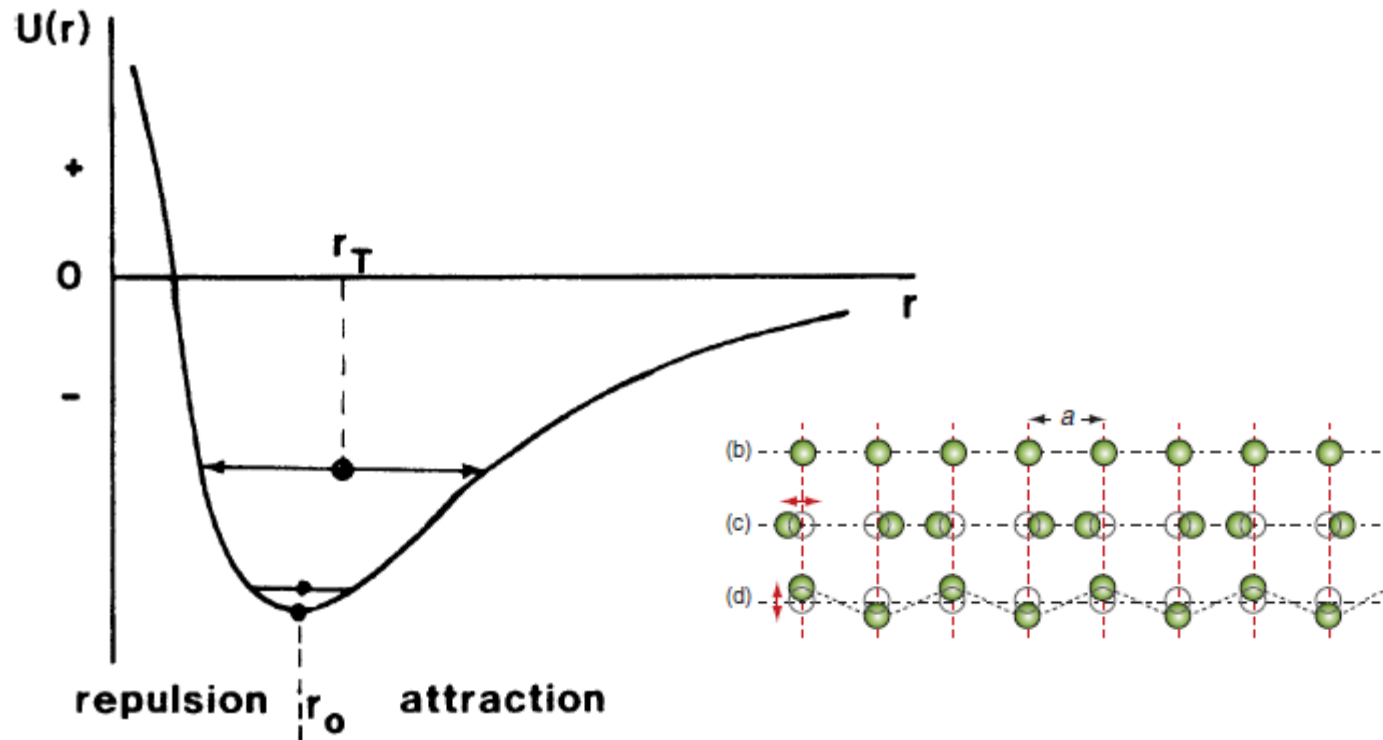
# Chaleur spécifique vs température

La capacité d'absorber la chaleur change avec la température.  
La manière dont elle change est caractéristique de la contribution principale à la chaleur spécifique.



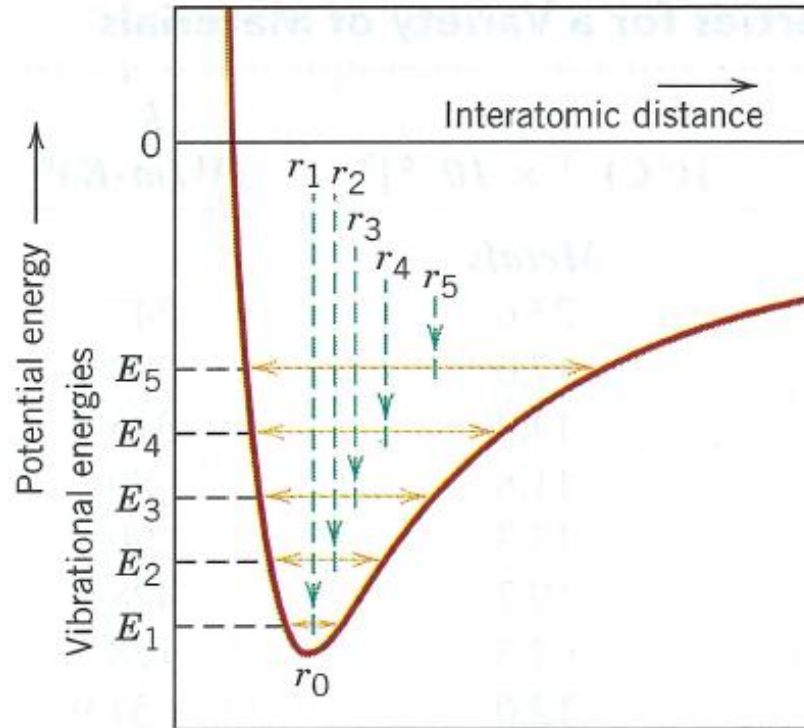
# Vibrations et distance atomique

Energie potentielle pour 2 atomes en fonction de leur distance

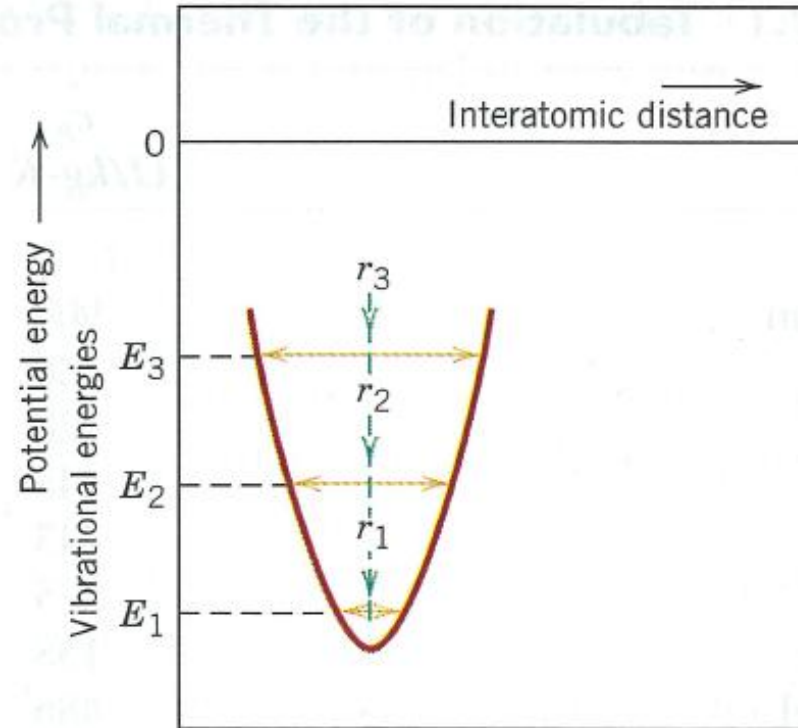


Si la température augmente, l'amplitude des vibrations de l'atome augmente également. Comme les amplitudes de l'atome en vibration sont symétriques par rapport à une position médiane et que la courbe de potentiel n'est pas symétrique, un atome donné s'éloigne davantage de son voisin, c'est-à-dire que la position moyenne d'un atome se déplace vers une distance plus grande.

# Vibrations et distance atomique



Exemple de courbe d'énergie potentielle dans les solides (asymétrique)



Exemple de courbe d'énergie potentielle symétrique

# Expansion thermique

Une augmentation de la distance interatomique est liée à une augmentation de volume.  
La majorité des matériaux augmentent leur volume lorsque la température augmente.

Le changement de longueur d'un matériau avec la température peut être exprimé comme :

$$\frac{l_f - l_i}{l_i} = \frac{\Delta l}{l_i} = \alpha_l (T_f - T_i) = \alpha_l * \Delta T$$

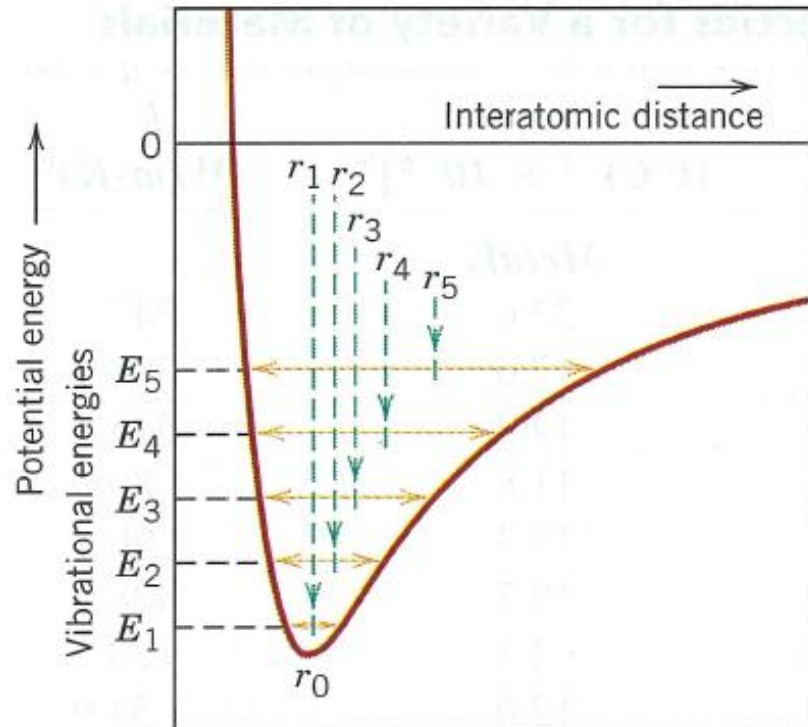
Où  $l_f$ ,  $l_i$ ,  $T_f$ ,  $T_i$ , sont les longueurs et températures finales et initiales et  $\alpha_l$  est le coefficient linéaire d'expansion [K<sup>-1</sup>].

Pour le changement de volume,  
 $\alpha_V$  est le coefficient d'expansion  
volumétrique.

$$\frac{\Delta V}{V_i} = \alpha_V * \Delta T$$

# Expansion thermique de matériaux

Lorsque l'énergie de cohésion est grande, la courbe de potentiel est plus étroite, ce qui donne un coefficient d'expansion plus petit.



Les **céramiques** sont les matériaux avec le coefficient d'expansion le plus petit, à cause de leur grande énergie de cohésion. Les valeurs du coefficient oscillent entre  $0.5$  et  $15 \cdot 10^6 \text{K}^{-1}$ .

Les **métaux** ont un coefficient d'expansion intermédiaire, avec des valeurs entre  $5$  et  $25 \cdot 10^6 \text{K}^{-1}$ .

Les **polymères** ont des coefficients d'expansions très grands, avec les types de polymères qui ont les liaisons les plus faibles avec les coefficients les plus élevés. Ils ont des valeurs entre  $50$  et  $400 \cdot 10^6 \text{K}^{-1}$ .

# Exercices (15 minutes)

Table 22.1. Linear Expansion Coefficients,  $\alpha_L$ , for Some Solids Measured at Room Temperature.

Substance	$\alpha_L$ in $10^{-5} [\text{K}^{-1}]$
Hard rubber	8.00
Lead	2.73
Aluminum	2.39
Brass	1.80
Copper	1.67
Iron	1.23
Soda-lime glass	0.90
Borosilicate glass	0.32
NaCl	0.16
Invar (Fe-36% Ni)	0.07
Quartz	0.05

## Exercices (15 minutes)

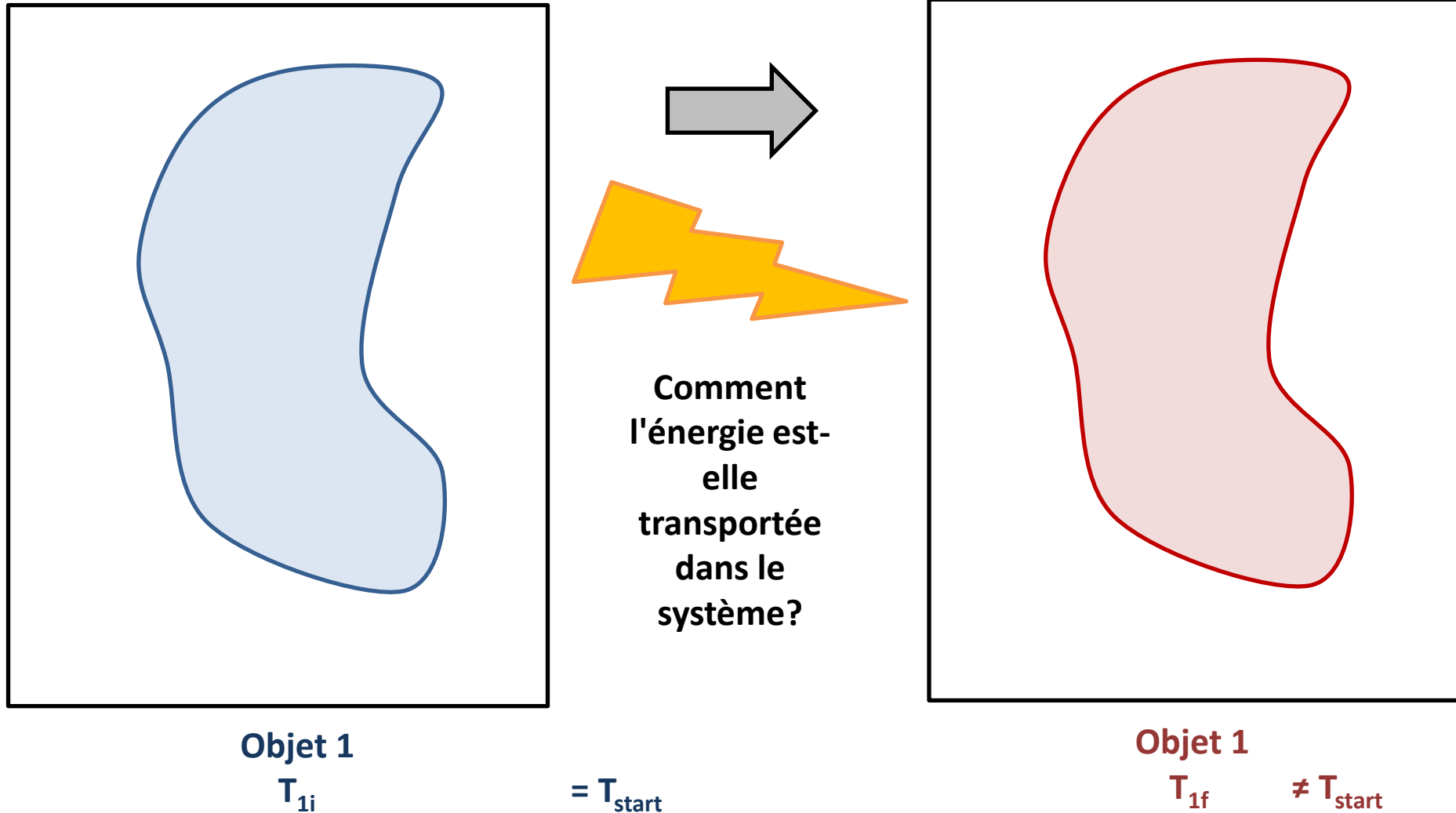
Une barre de fer de 15 cm de long et une barre de matériau inconnu de 45 cm de long sont fixées l'une à l'autre à 20 °C. Trouvez le matériau inconnu en sachant que la longueur totale augmente de 1.25 mm à 120 °C.

Un volume de matériau  $V = 16 \text{ cm}^3$  est chauffé de 12 °C et se dilate de  $10.4 \text{ mm}^3$ . Quel est ce matériau?

En considérant que sa densité à 20 °C est de  $8.6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ , calculez la densité à 150 °C

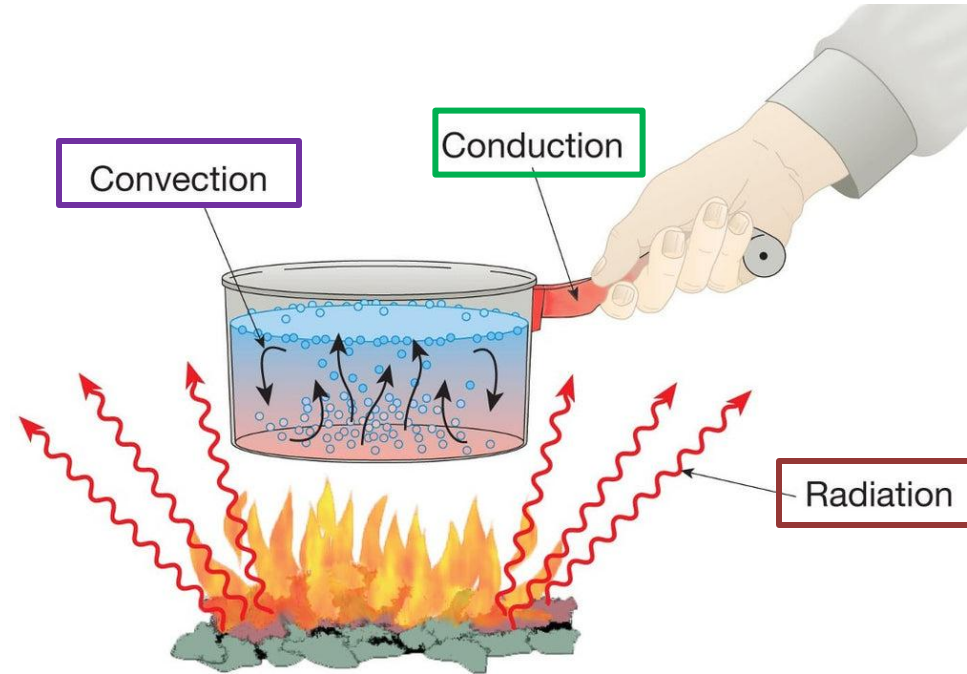
Pause (5 minutes)

# Mécanisme de transport de la chaleur



# Les mécanismes de transport de la chaleur

La **convection thermique** désigne le processus de transfert de chaleur causé par le déplacement relatif des parties d'un fluide en raison du mouvement macroscopique du fluide et du mélange entre les fluides chauds et froids. La convection de chaleur ne peut se produire que dans un fluide, étant liée aux mouvements relatifs des molécules du fluide.

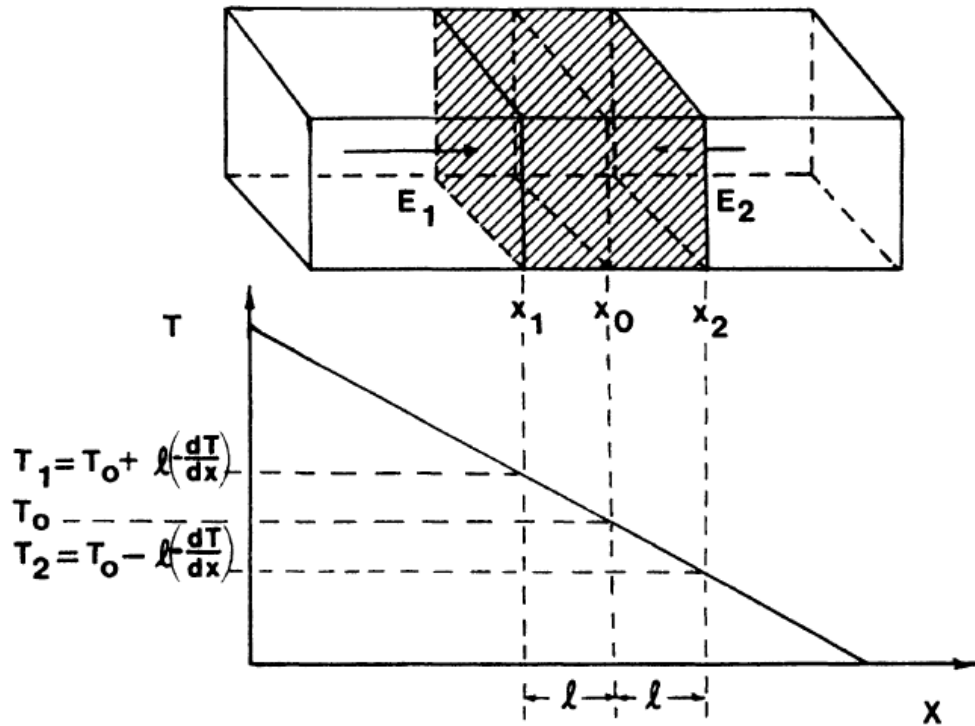


Le transfert de chaleur par **conduction** est le transfert de chaleur par l'excitation moléculaire au sein d'un matériau, sans mouvement global de la matière. Dans les gaz et les liquides, la conduction thermique est due aux collisions et à la diffusion des molécules lors de leur mouvement aléatoire.

La **radiation thermique** est un rayonnement électromagnétique émis par un matériau en raison de sa chaleur, dont les caractéristiques dépendent de sa température. Un exemple de radiation thermique est le rayonnement infrarouge émis par un radiateur domestique ou un chauffage électrique. La radiation thermique est générée lorsque la chaleur provenant du mouvement des charges dans le matériau (électrons et protons dans les formes courantes de matière) est convertie en rayonnement électromagnétique.

# Conductivité thermique

La conduction thermique est le phénomène par lequel la chaleur est transportée des régions plus chaudes aux plus froides d'un matériau.

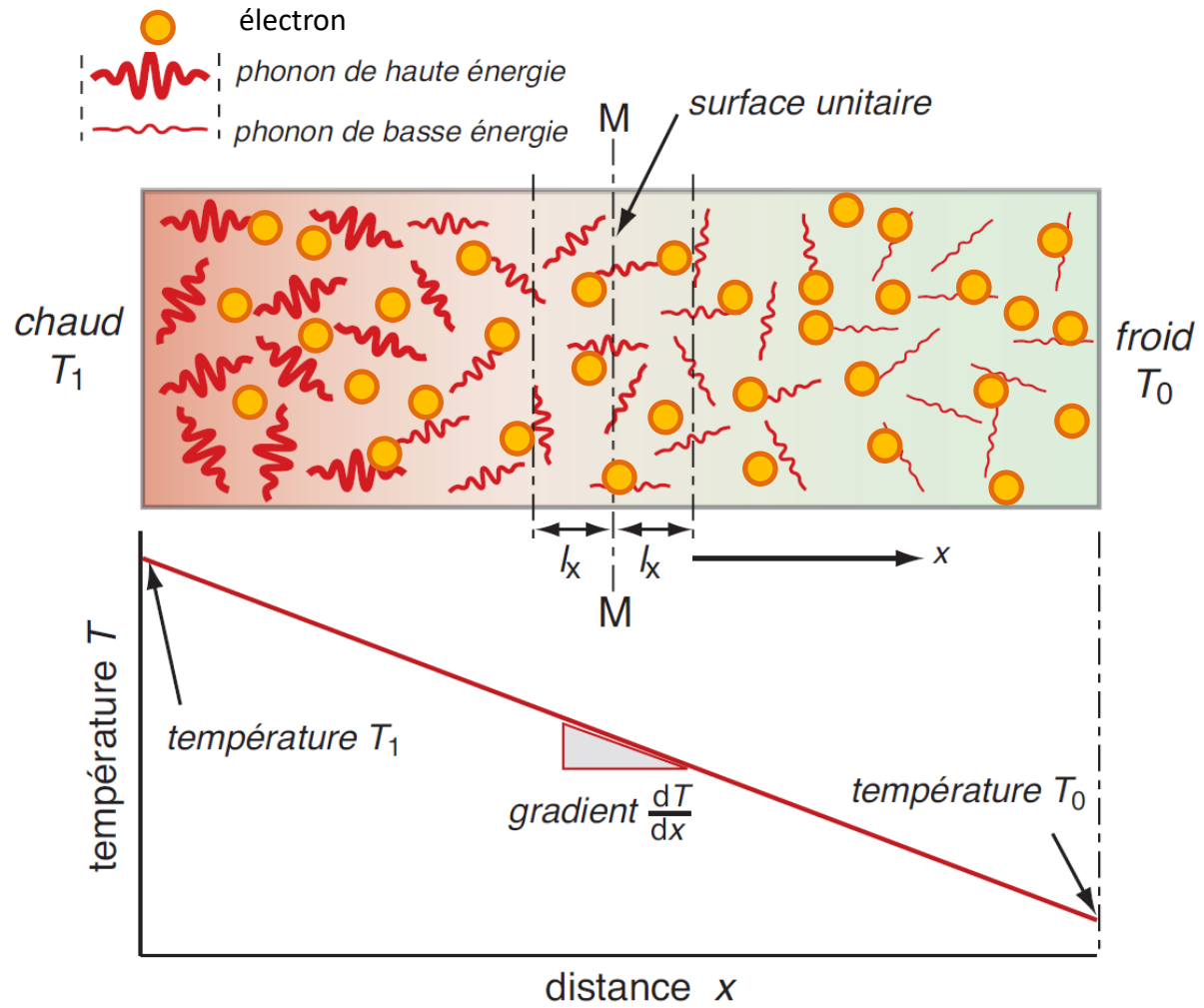


$q$  est le flux de chaleur (chaleur pour unité de surface et de temps)

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

$k$  est la conductivité thermique [W/m\*K]

# Mécanismes de conduction thermique

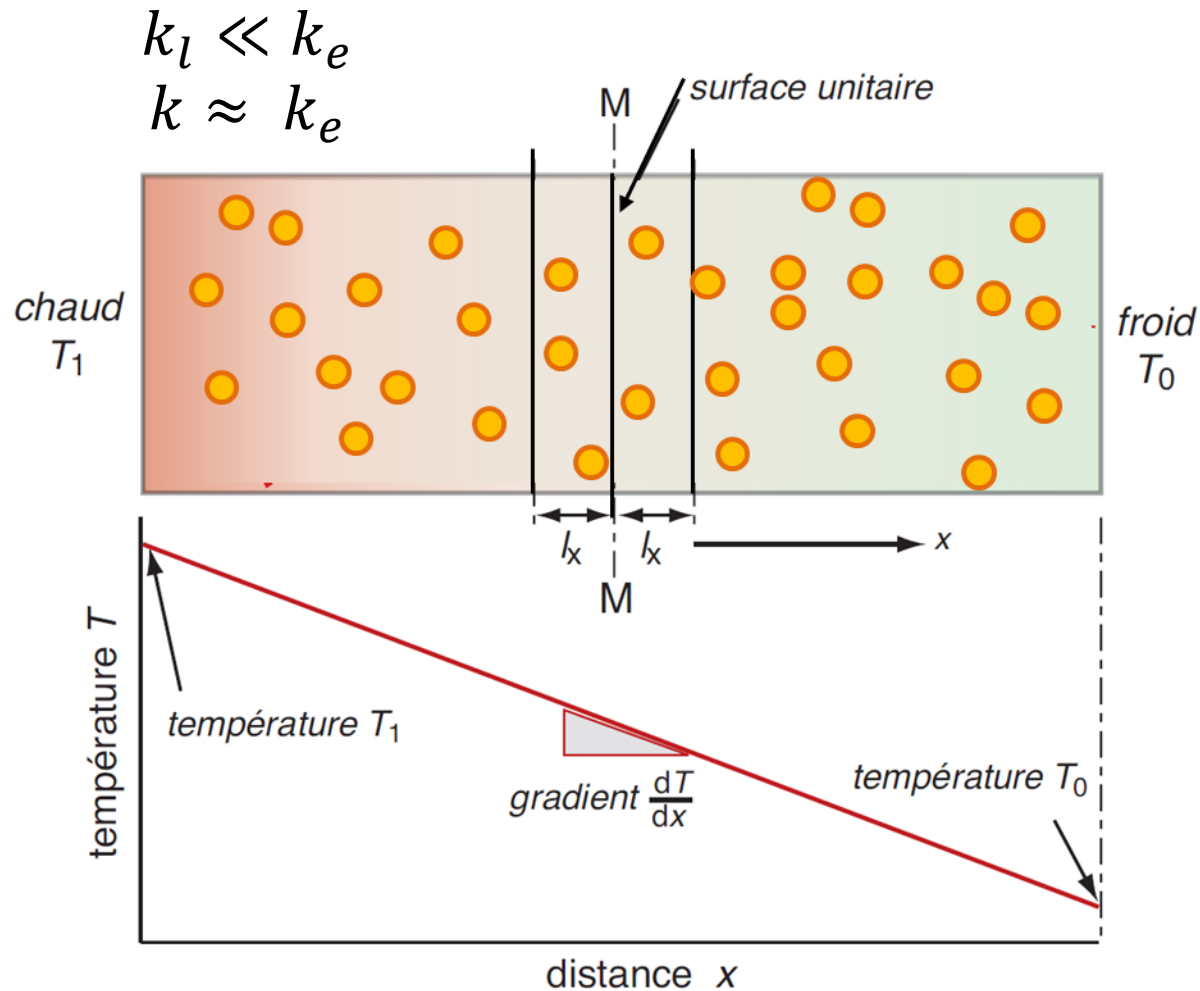


Le transfert de chaleur dans les solides est dû à la combinaison des vibrations du réseau cristallin des molécules et au transport d'énergie par les électrons libres.

$$k = k_l + k_e$$

Contribution vibrationnelle      Contribution électronique

# Conduction thermique dans le métaux



La chaleur est bien transporté si:

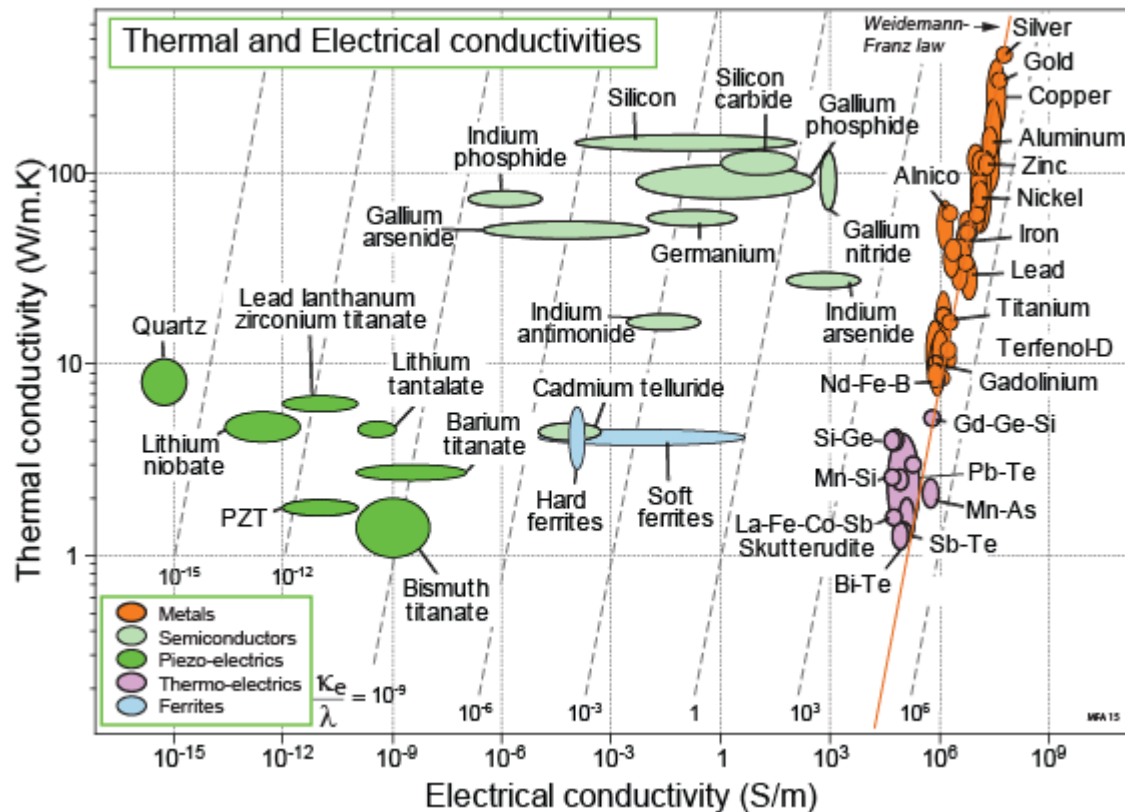
- Il y a une grand densité des électrons
- Les électrons bougent à grand vitesse
- Il y a peu des collisions (car les électrons perdent leur énergie)

Est-ce qu'il y a une autre propriété des métaux qui suit les mêmes principes

# Conduction thermique dans les métaux

Loi de Weidemann-Franz  $\frac{k}{\sigma T} = L$

Où  $L = 2.44 \times 10^{-8} \text{ } \Omega\text{W/K}^2$  est la constante de Lorentz



**Exercise (5 minutes)**  
 Calculez la conductivité thermique d'un métal, en supposant :  
 $\tau = 3 \times 10^{-14} \text{ s}$   
 $T = 300 \text{ K}$   
 $N = 2.5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$

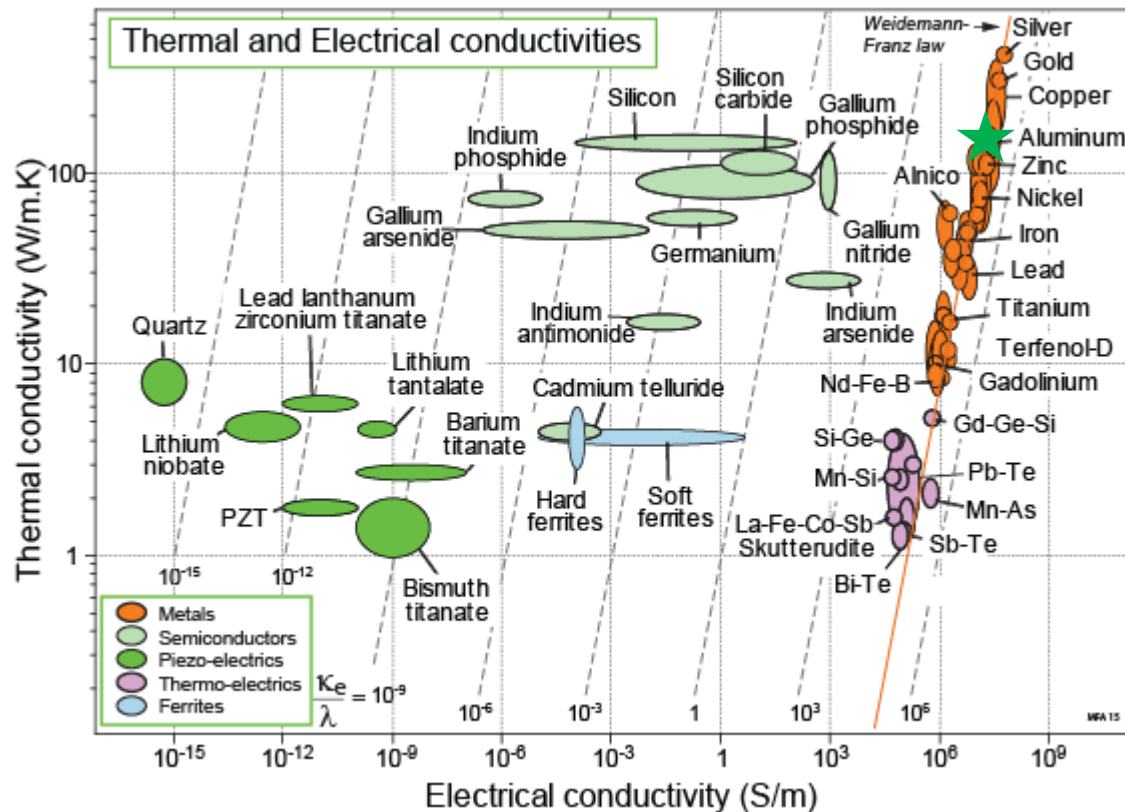
			Unité
Charge électron	e	$1.602 \times 10^{-19}$	C
Masse électron	m	$9.11 \times 10^{-31}$	kg

Est-ce qu'il y a une autre propriété des métaux qui suit les mêmes principes

# Conduction thermique dans les métaux

Loi de Weidemann-Franz  $\frac{k}{\sigma T} = L$

Où  $L = 2.44 \times 10^{-8} \text{ } \Omega\text{W/K}^2$  est la constante de Lorentz



## Exercice (5 minutes)

Calculez la conductivité thermique d'un métal, en supposant :

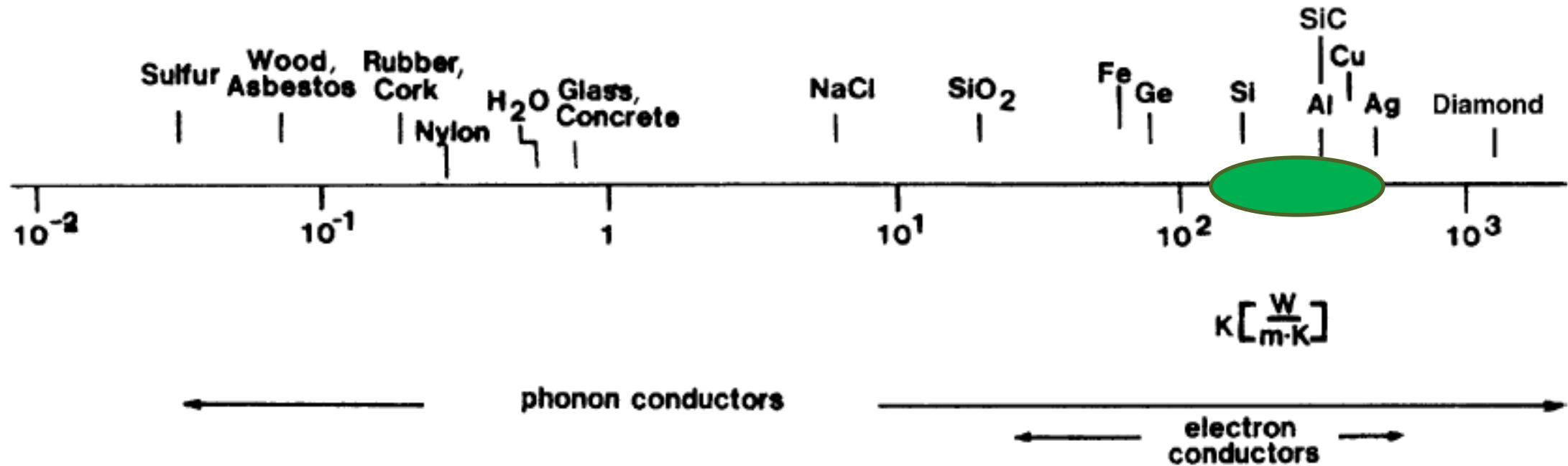
$$\tau = 3 \cdot 10^{-14} \text{ s}$$

$$T = 300 \text{ K}$$

$$N = 2.5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

			Unité
Charge électron	e	$1.602 \cdot 10^{-19}$	C
Masse électron	m	$9.11 \cdot 10^{-31}$	kg

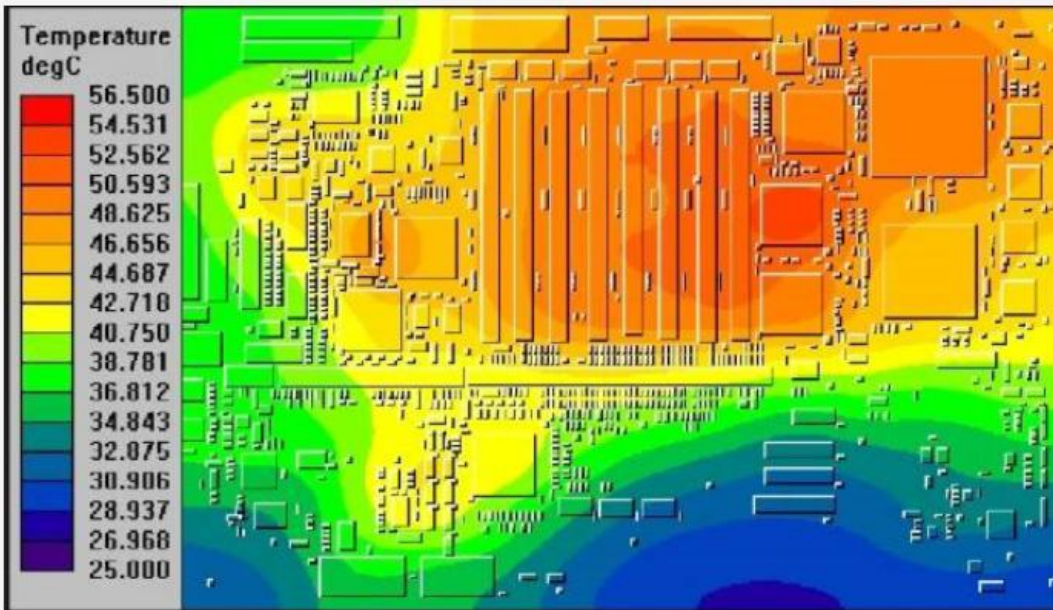
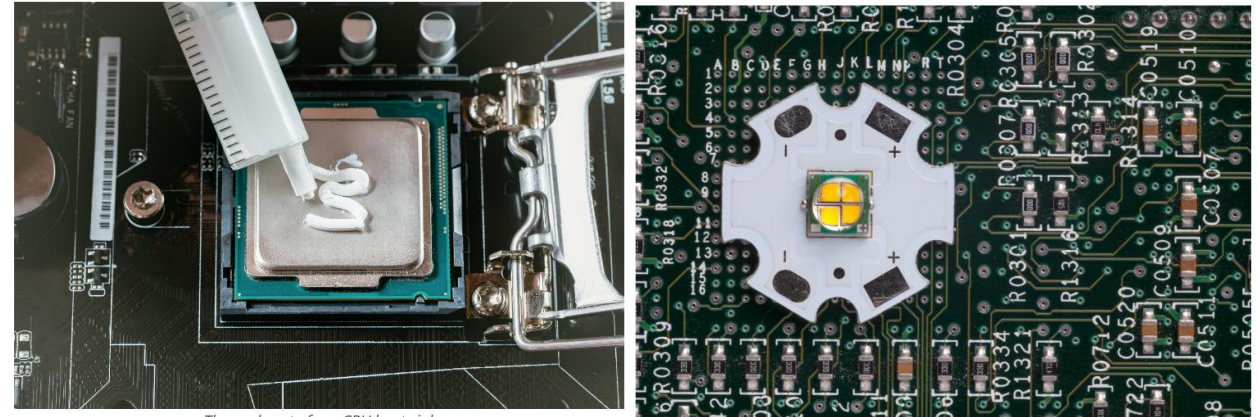
# Conductivité thermique de matériaux



# Application: Dissipation thermique passive

Les circuits électroniques très denses chauffent pendant leur utilisation, ce qui impacte leurs performances et leur durée de vie. Le défi de refroidir les composants électroniques est donc d'un grand intérêt dans le domaine des nanotechnologies.

1. Ajouter du métal (dissipateur thermique, PCB métallique, couche de cuivre plus épaisse)



2. Créer un flux d'air local

