
Propriétés des matériaux à basse température

Jean-Pierre Thermeau

Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

Bâtiment 102

Université de Paris-Sud

91406 Orsay Cedex

thermeau@ipno.in2p3.fr

Plan

- **Propriétés thermiques**
 - Capacité calorifique
 - Conductivité thermique
 - Dilatation thermique

- **Propriétés électriques**
 - Résistivité électrique
 - RRR
 - Propriétés d'isolation

- **Propriétés mécaniques**
 - Traction
 - Matériaux

Introduction

Cette présentation donne un résumé des propriétés des matériaux les plus utilisés dans la conception des cryostats, ...

Les descriptions sont pratiques et pour plus de détails...

- Variation importante des propriétés en fonction de la température
- Différence entre les matériaux
- Utilisation de l'ensemble des propriétés mécaniques, thermiques et électriques

Propriétés thermiques : Capacité Calorifique (1/4)

- La capacité calorifique est une des propriétés fondamentales de la matière,
- Quantité d'énergie nécessaire pour augmenter la température d'un matériau de 1 K,
- Capacité d'un matériau à stocker ou à céder de l'énergie.

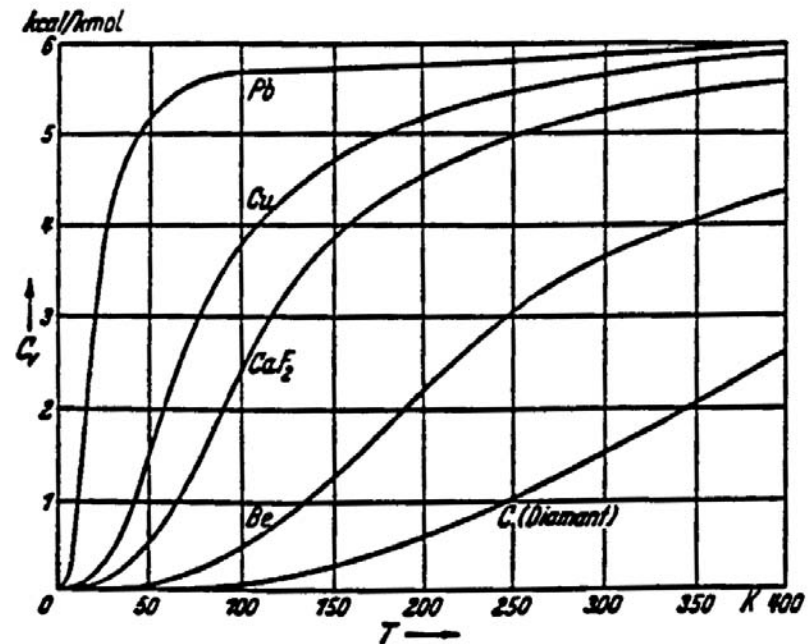
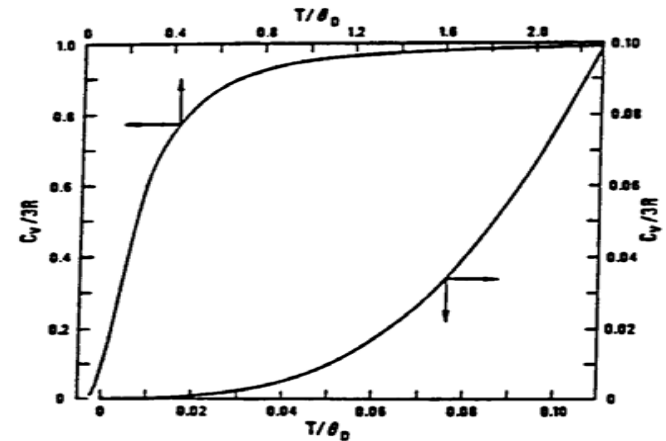
- La capacité calorifique par unité de masse ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) est souvent appelée :
chaleur spécifique ou capacité thermique massique C
- La capacité calorifique peut être donnée à pression C_p ou à volume constante C_v .
- La différence $C_p - C_v$ est généralement négligeable pour les solides.

- La chaleur spécifique a un impact important sur les calculs en transitoire pour le refroidissement de système, le stockage d'énergie et le transfert de la chaleur
- La chaleur spécifique C d'un corps peu être donnée par la relation :

$$E = m.C.\Delta T \text{ (J)}$$

Propriétés thermiques : Capacité Calorifique (2/4)

- A basse température, C varie en fonction de la température et suivant la nature du matériau.
- Le comportement de différents matériaux peut se ramener à une fonction unique selon le modèle de DEBYE.
- En dessous de 100 K, C chute très rapidement (peu d'énergie à extraire ou à apporter pour descendre ou monter en température)
- Pour les métaux $C \propto T$ pour $T < 30$ K
- Pour les isolants $C \propto T^3$

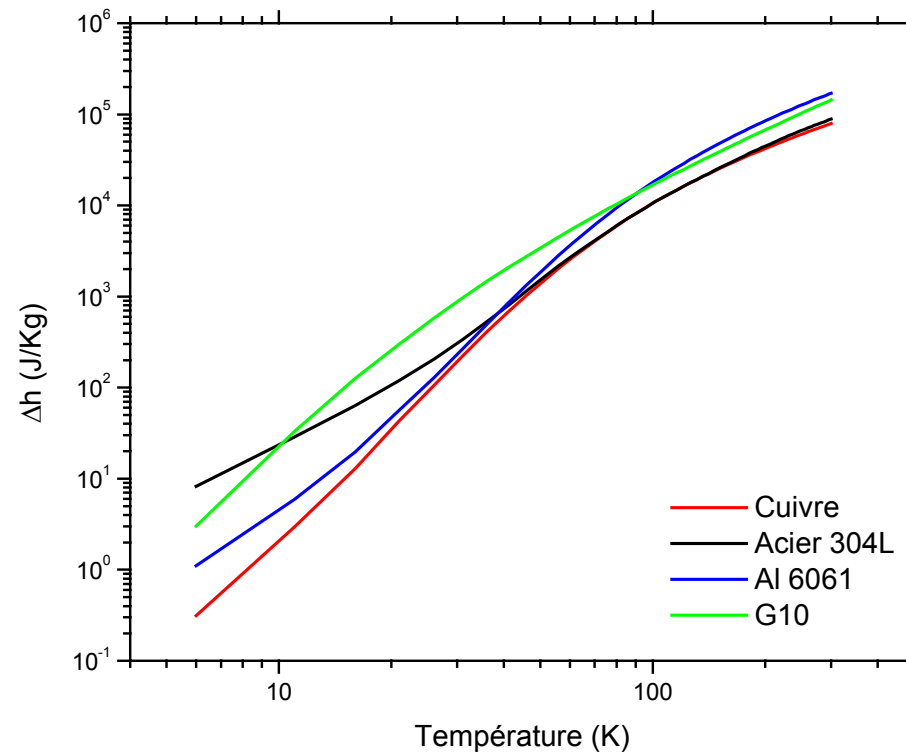


Propriétés thermiques : Capacité Calorifique (3/4)

- La variation d'enthalpie Δh d'un corps représente l'intégrale de la chaleur spécifique en fonction de la température dans un domaine de température fixé

$$\Delta h = \int_{T_1}^{T_2} Cp dT$$

- L'énergie s'exprime par $E = m \cdot \Delta h$
- Δh est une réserve "calorique" ($J \cdot kg^{-1}$)
- Le G10 et l'alliage d'aluminium 6061 présentent des valeurs supérieures à l'acier et au cuivre à haute température
- L'acier présente des valeurs les plus élevées à basse température



Propriétés thermiques : Capacité Calorifique (4/4)

| Temp. (K) | Acier inox 18/8 | | Cuivre | | Laiton Cu-Zn 70-30 % | | K - Monel recuit | | Inconel 718 recuit | | Aluminium | | Titane | | PTFE (Téflon) | | Epoxy verre G 10 | |
|-----------|------------------------|----------|------------------------|---------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|---------|------------------------|---------|------------------------|---------|------------------------|----------|
| | c _p (J/g K) | h (J/g) | c _p (J/g K) | h (J/g) | c _p (J/g K) | h (J/g) | c _p (J/g K) | h (J/g) | c _p (J/g K) | h (J/g) | c _p (J/g K) | h (J/g) | c _p (J/g K) | h (J/g) | c _p (J/g K) | h (J/g) | c _p (J/g K) | h (J/g) |
| 4 | 1,88 E-3 | 0 | 9,1 E-5 | 0 | 1,42 E-4 | 0 | 4,73 E-4 | 0 | 1,53 E-3 | 0 | 2,61 E-4 | 0 | 3,2 E-4 | 0 | 2,62 E-3 | 0 | 5,38 E-4 | 0 |
| 6 | 2,86 E-3 | 2,11 E-3 | 2,3 E-4 | 3,1 E-4 | 3,64 E-4 | 3,09 E-4 | 7,84 E-4 | 1,19 E-3 | 2,23 E-3 | 3,68 E-3 | 5,0 E-4 | 7,5 E-4 | 5,4 E-4 | 8,5 E-4 | 6,33 E-3 | 8,3 E-3 | 2,09 E-3 | 2,52 E-3 |
| 8 | 3,90 E-3 | 0,0114 | 4,7 E-4 | 1,0 E-3 | 7,80 E-4 | 1,35 E-3 | 1,18 E-3 | 3,12 E-3 | 2,94 E-3 | 8,82 E-3 | 8,8 E-4 | 2,1 E-3 | 8,4 E-4 | 2,2 E-3 | 0,0114 | 0,0256 | 4,76 E-3 | 9,19 E-3 |
| 10 | 5,02 E-3 | 0,0204 | 8,6 E-4 | 2,3 E-3 | 1,47 E-3 | 3,79 E-3 | 1,70 E-3 | 6,06 E-3 | 3,70 E-3 | 0,0156 | 1,4 E-3 | 4,4 E-3 | 1,26 E-3 | 4,3 E-3 | 0,018 | 0,0554 | 8,47 E-3 | 0,0222 |
| 15 | 8,12 E-3 | 0,0515 | 2,7 E-3 | 0,0106 | 4,97 E-3 | 0,0168 | 3,65 E-3 | 0,018 | 5,89 E-3 | 0,0367 | 4,0 E-3 | 0,018 | 3,3 E-3 | 0,0150 | 0,445 | 0,220 | 0,0227 | 0,101 |
| 20 | 0,0126 | 0,104 | 7,7 E-3 | 0,034 | 0,0119 | 0,0591 | 7,1 E-3 | 0,045 | 0,0100 | 0,062 | 8,9 E-3 | 0,048 | 7,0 E-3 | 0,040 | 0,076 | 0,509 | 0,0415 | 0,257 |
| 25 | 0,0196 | 0,181 | 0,016 | 0,090 | 0,0244 | 0,150 | 0,0129 | 0,0937 | 0,0183 | 0,147 | 0,0175 | 0,112 | 0,0134 | 0,090 | 0,102 | 0,953 | 0,0625 | 0,519 |
| 30 | 0,0293 | 0,305 | 0,027 | 0,195 | 0,0407 | 0,309 | 0,021 | 0,178 | 0,030 | 0,267 | 0,0315 | 0,232 | 0,0245 | 0,182 | 0,125 | 1,52 | 0,0846 | 0,884 |
| 40 | 0,0578 | 0,730 | 0,060 | 0,61 | 0,0814 | 0,916 | 0,045 | 0,500 | 0,063 | 0,724 | 0,0775 | 0,755 | 0,0571 | 0,581 | 0,165 | 2,98 | 0,126 | 1,94 |
| 50 | 0,100 | 1,51 | 0,099 | 1,40 | 0,121 | 1,93 | 0,078 | 1,11 | 0,100 | 1,54 | 0,142 | 1,85 | 0,0992 | 1,358 | 0,202 | 4,81 | 0,170 | 3,42 |
| 60 | 0,128 | 2,66 | 0,137 | 2,58 | 0,160 | 3,33 | 0,110 | 2,05 | 0,130 | 2,69 | 0,214 | 3,64 | 0,1467 | 2,592 | 0,238 | 7,01 | 0,213 | 5,33 |
| 80 | 0,197 | 5,95 | 0,205 | 6,02 | 0,221 | 7,15 | 0,180 | 5,00 | 0,190 | 5,95 | 0,357 | 9,37 | 0,230 | 6,37 | 0,312 | 12,5 | 0,288 | 10,4 |
| 100 | 0,250 | 10,5 | 0,254 | 10,6 | 0,267 | 12,1 | 0,240 | 9,20 | 0,240 | 10,2 | 0,481 | 17,76 | 0,300 | 11,69 | 0,386 | 19,5 | 0,355 | 16,8 |
| 120 | 0,290 | 15,9 | 0,288 | 16,1 | 0,298 | 17,7 | 0,285 | 14,4 | 0,282 | 15,4 | 0,580 | 28,4 | 0,352 | 18,24 | 0,453 | 27,8 | 0,420 | 24,5 |
| 140 | 0,329 | 22,1 | 0,313 | 22,1 | 0,321 | 23,9 | 0,314 | 20,4 | 0,315 | 21,4 | 0,654 | 40,7 | 0,391 | 25,69 | 0,517 | 37,5 | 0,481 | 33,5 |
| 160 | 0,364 | 29,1 | 0,332 | 28,5 | 0,337 | 30,5 | 0,336 | 27,0 | 0,347 | 28,1 | 0,713 | 54,4 | 0,422 | 33,84 | 0,589 | 48,7 | 0,539 | 43,7 |
| 180 | 0,395 | 36,7 | 0,346 | 35,3 | 0,349 | 37,4 | 0,355 | 33,9 | 0,379 | 35,4 | 0,760 | 69,2 | 0,446 | 42,54 | 0,668 | 61,3 | 0,595 | 55,1 |
| 200 | 0,419 | 44,8 | 0,356 | 42,4 | 0,357 | 44,5 | 0,370 | 41,2 | 0,405 | 43,2 | 0,797 | 84,8 | 0,465 | 51,66 | 0,741 | 75,2 | 0,648 | 67,5 |
| 220 | 0,431 | 53,3 | 0,364 | 49,6 | 0,365 | 51,7 | 0,385 | 48,7 | 0,416 | 51,3 | 0,826 | 101,0 | 0,480 | 61,11 | 0,785 | 90,3 | 0,698 | 80,9 |
| 240 | 0,437 | 62,0 | 0,371 | 56,9 | 0,370 | 59,0 | 0,399 | 56,6 | 0,422 | 59,8 | 0,849 | 117,8 | 0,493 | 70,84 | 0,832 | 107 | 0,745 | 95,4 |
| 260 | 0,440 | 70,7 | 0,376 | 64,4 | 0,373 | 66,5 | 0,410 | 64,7 | 0,429 | 68,3 | 0,869 | 135 | 0,504 | 80,82 | 0,901 | 124 | 0,791 | 111 |
| 280 | 0,449 | 79,6 | 0,381 | 72,0 | 0,376 | 74,0 | 0,420 | 73,0 | 0,438 | 77,0 | 0,886 | 152,5 | 0,514 | 91,01 | 0,973 | 143 | 0,836 | 127 |
| 300 | 0,477 | 88,8 | 0,386 | 79,6 | 0,380 | 81,5 | 0,430 | 81,5 | 0,444 | 85,8 | 0,902 | 170,4 | 0,522 | 101,4 | 1,010 | 163 | 0,880 | 144 |

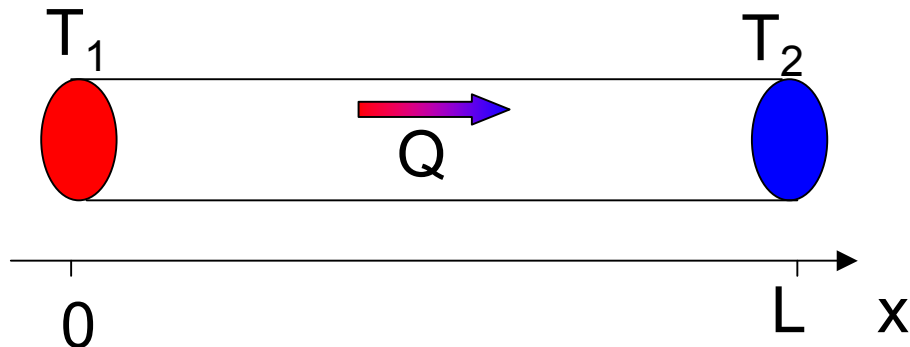
Propriétés thermiques : Conductivité thermique (1/4)

- C'est la facilité qu'aura un matériau à laisser circuler la chaleur
- La conductivité thermique k peut s'exprimer par la relation de Fourier

$$\vec{q} = -k \overrightarrow{\text{grad}T}$$

- Pour le cas monodimensionnel d'un matériau à section constant

$$Q = -k \frac{dT}{dx} S$$



- S en m^2 est la section offerte au passage de la chaleur
- L la longueur en m à parcourir pour passer de T_1 à T_2
- Q en W la puissance échangée traversant S .

k s'exprime en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

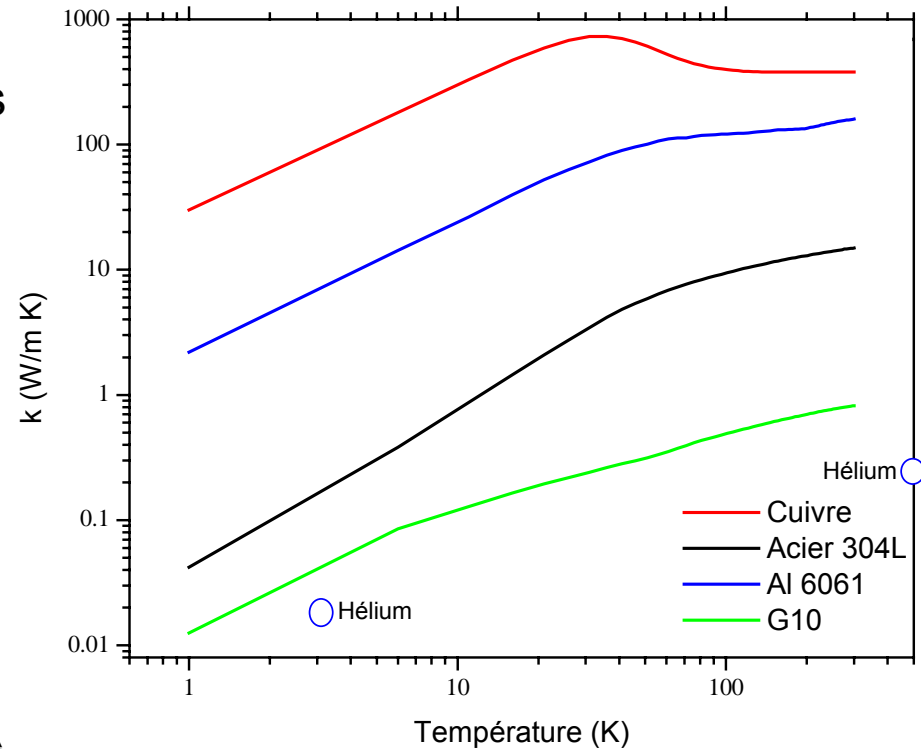
Propriétés thermiques : Conductivité thermique (2/4)

Pour les métaux

- $k \propto T$ à très basse T
- maximum à basse température
- Plus le matériau est pur et plus le maximum est élevé et se décale vers les basses températures

Pour les isolants

- $k \propto T^3$ (Isolants cristallisés)
- k est de plusieurs ordres inférieurs à celle des métaux
- A basse température leur conductivité décroît plus rapidement
- La conductivité de l'hélium à 4 K (liquide) et à 300 K (gazeux), inférieure à la conductivité d'un mauvais conducteur thermique tel que le G10



En général, $k_{\text{solide}} > k_{\text{liquide}} > k_{\text{gaz}}$

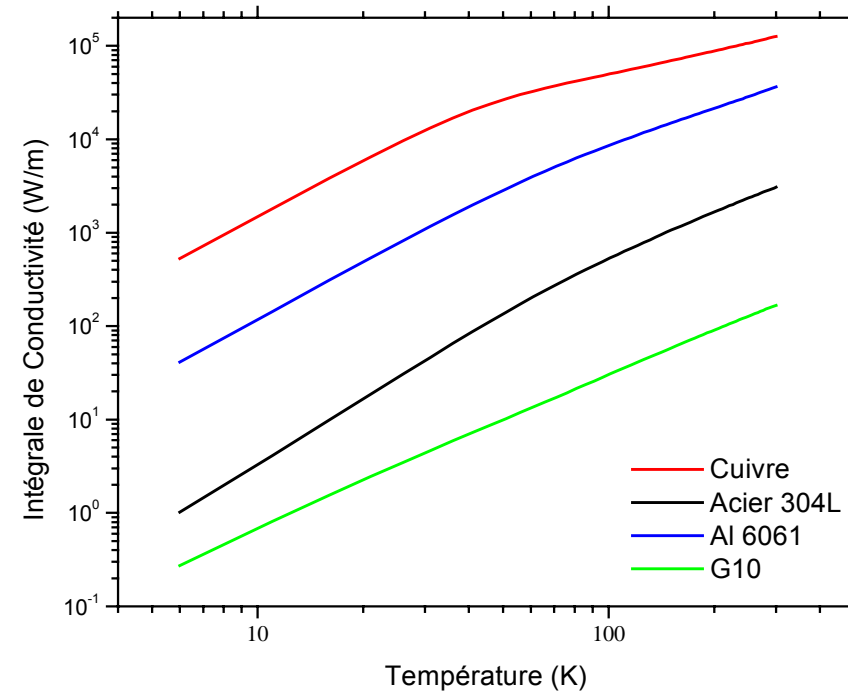
Propriétés thermiques : Intégrale de conductivité (3/4)

- Si la conductivité thermique n'est pas constante, Il faut alors intégrer la loi de Fourier en fonction de la température

$$\int_0^L \frac{Q}{S} dx = - \int_{T_1}^{T_2} k dT$$

$$\frac{Q}{S} L = - \int_{T_1}^{T_2} k dT \quad \text{Si } S \text{ reste constant}$$

- Intégrale de conduction donnée couramment dans la littérature sous forme de table ou de courbes
- Calculs rapides pour évaluer des puissances échangées à travers des objets soumis à des gradients de température



Propriétés thermiques : Intégrale de conductivité (3/4)

| Temp. K | Conductivité thermique W/(K.cm) | | | | Intégrale des conductivités thermiques W/cm | | | |
|------------|------------------------------------|---------------------------|-------------|--------------------|------------------------------------------------|---------------------------|-------------|--------------------|
| | Cuivre RRR = 30 | Constantan CuNi, 57/43 | Inox 304 | Manganin CuMnNi | Cuivre RRR = 30 | Constantan CuNi, 57/43 | Inox 304 | Manganin CuMnNi |
| 1 | 0.46 | 0.001 | 0.00042 | 0.0007 | | | | |
| 4 | 1.8 | 0.0088 | 0.0023 | 0.0048 | 3.5 | 0.013 | 0.004 | 0.00773 |
| 6 | 2.8 | 0.164 | 0.0038 | 0.0085 | 8.1 | 0.039 | 0.0102 | 0.0212 |
| 8 | 3.7 | 0.0252 | 0.0057 | 0.0126 | 14.5 | 0.08 | 0.0196 | 0.0422 |
| 10 | 4.6 | 0.035 | 0.0077 | 0.0170 | 22.7 | 0.139 | 0.0328 | 0.0715 |
| 15 | 6.7 | 0.061 | 0.0133 | 0.0286 | 51.3 | 0.382 | 0.0851 | 0.186 |
| 20 | 8.5 | 0.087 | 0.195 | 0.0410 | 81.0 | 0.748 | 0.167 | 0.319 |
| 25 | 9.6 | 0.11 | 0.026 | 0.0461 | 96.0 | 1.24 | 0.281 | 0.597 |
| 30 | 10 | 0.13 | 0.033 | 0.0660 | 184 | 1.84 | 0.428 | 0.896 |
| 35 | 9.8 | 0.144 | 0.040 | 0.0766 | 233 | 2.52 | 0.612 | 1.25 |
| 40 | 9.0 | 0.155 | 0.047 | 0.0860 | 280 | 3.28 | 0.829 | 1.66 |
| 50 | 7.3 | 0.181 | 0.058 | 0.1010 | 362 | 4.97 | 1.36 | 2.6 |
| 60 | 6.0 | 0.183 | 0.068 | 0.1120 | 429 | 6.79 | 1.99 | 3.67 |
| 70 | 5.1 | 0.188 | 0.076 | 0.1200 | 484 | 8.65 | 2.71 | 4.83 |
| 77 | 4.8 | 0.19 | 0.081 | 0.1260 | 518 | 9.97 | 3.26 | 5.69 |
| 80 | 4.7 | 0.19.1 | 0.083 | 0.1290 | 533 | 10.5 | 3.50 | 6.07 |
| 90 | 4.4 | 0.19.5 | 0.089 | 0.1350 | 578 | 12.5 | 4.36 | 7.39 |
| 100 | 4.2 | 0.20 | 0.094 | 0.1400 | 620 | 14.4 | 5.27 | 8.77 |
| 120 | 4.0 | 0.20.8 | 0.104 | 0.1480 | 703 | 18.5 | 7.25 | 11.8 |
| 140 | 4.0 | 0.214 | 0.112 | 0.1550 | 782 | 22.7 | 9.40 | 14.8 |
| 160 | 3.9 | 0.219 | 0.119 | 0.1600 | 861 | 27.0 | 11.7 | 18.0 |
| 180 | 3.9 | 0.224 | 0.125 | 0.1660 | 940 | 26.9 | 14.1 | 21.2 |
| 200 | 3.9 | 0.228 | 0.13 | 0.1720 | 1020 | 36.0 | 16.7 | 24.6 |
| 250 | 3.9 | 0.238 | 0.141 | 0.1960 | 1210 | 47.6 | 23.5 | 33.8 |
| 300 | 3.9 | 0.249 | 0.149 | 0.2200 | 1410 | 59.7 | 30.8 | 44.0 |

Propriétés thermiques : Dilatation thermique (1/3)

- Variation de température conduit à une variation de dimensions physiques
- Lorsque la température d'un matériau décroît, en général, ces dimensions diminuent et l'on parle couramment de rétreint thermique
- Dans les constructions en cryogénie, les éléments vont être soumis à des ΔT élevés lors du refroidissement ou en fonctionnement nominal
- Dans un système cryogénique les éléments internes froids sont reliés mécaniquement aux éléments externes chauds (non homogène en température)
- La dilatation thermique affecte la stabilité dimensionnelle d'un système en fonction de la distribution de température et des matériaux
- Elle engendre des contraintes mécaniques importantes dues aux dilatations différentes suivant les matériaux

Propriétés thermiques : Dilatation thermique (2/3)

- Coefficient de dilatation linéique pour les solides

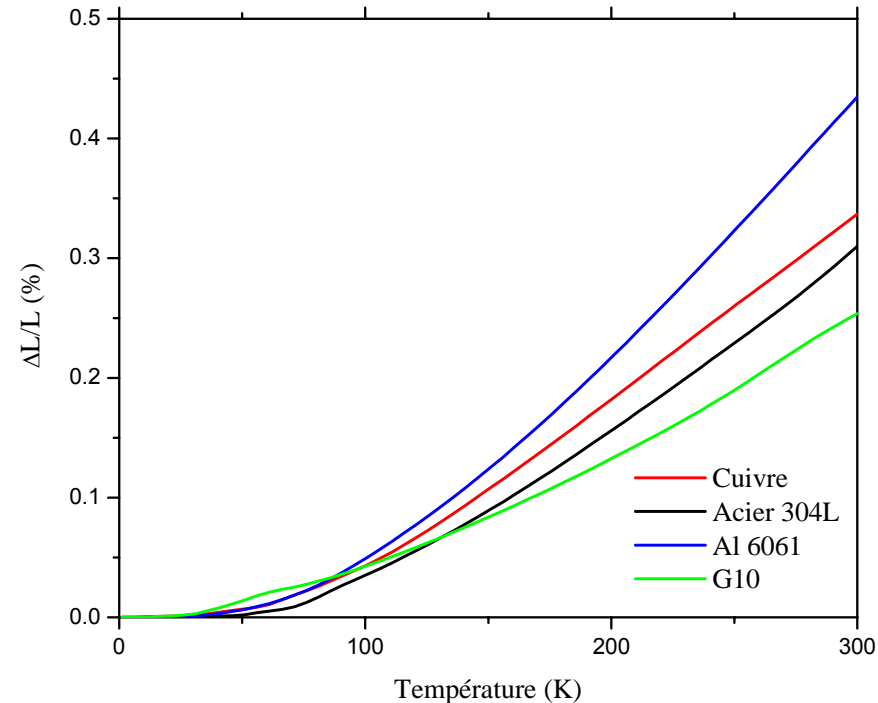
$$\alpha(T) = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT}$$

- A très basse température, le coefficient linéique évolue proportionnellement avec T^3 pour se stabiliser vers une valeur constante vers les hautes températures

- On utilise pratiquement le coefficient de dilatation moyen relatif donné par

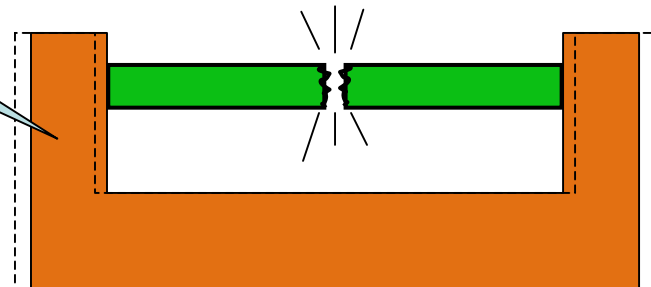
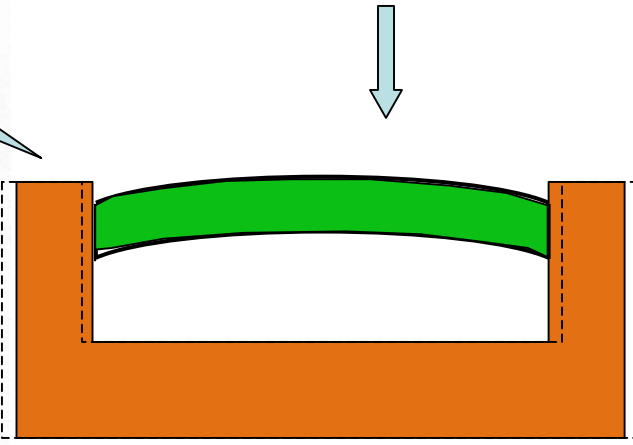
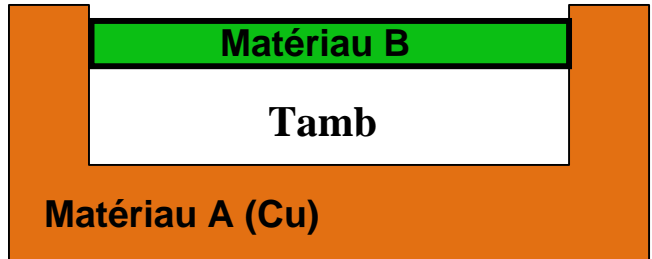
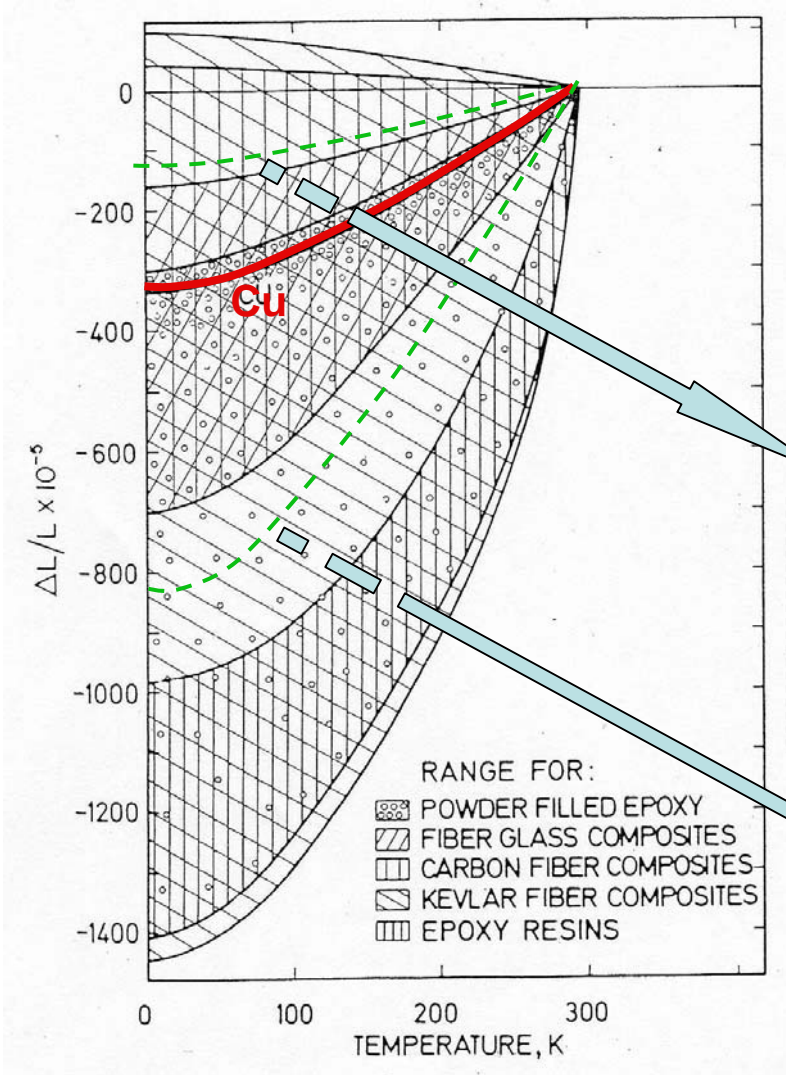
$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha(T) \Delta T = \frac{l - l_0}{l}$$

- En dessous de 100 K l'essentiel de la dilatation des matériaux a eu lieu
- Majeure partie du rétreint entre 300 K et 77 K



Ecarts relatifs où la longueur de référence a été prise à une température de 1 K.

Propriétés thermiques : Dilatation thermique différentielle (3/3)



Propriétés électriques : Résistivité (1/4)

- Comme pour la conductivité thermique, la résistivité électrique est liée au libre parcours moyen des électrons dans le matériau
- A température ambiante, la résistivité électrique des métaux purs décroît avec la température suivant une loi approximativement linéaire
- A basse température, la résistivité électrique tend vers une valeur constante (vers la température de l'hélium liquide 4 K)
- Cette valeur constante à basse température est appelée la résistivité résiduelle ρ_0 et est fortement dépendante de la pureté du métal et des imperfections de réseau cristallin
- En général ces deux effets sont additifs pour construire la résistivité électrique

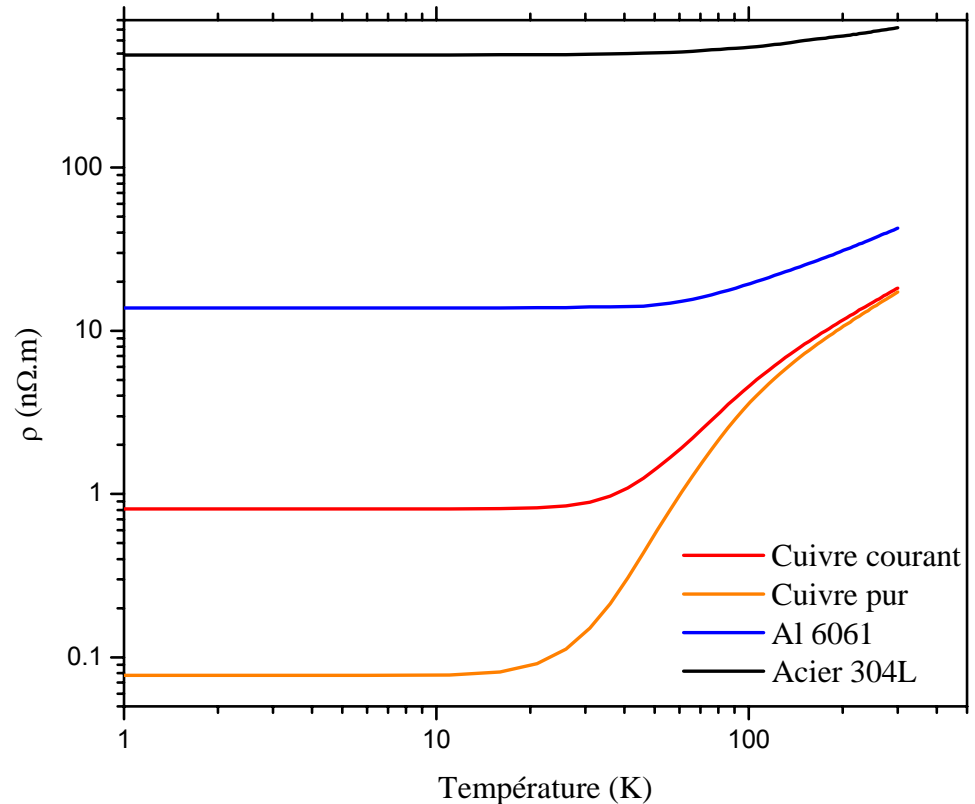
$$\rho = \rho_0 + \rho(T)$$

Propriétés électriques : Résistivité (2/4)

- Plusieurs ordres de grandeur dans les valeurs de résistivité électrique en fonction des matériaux
- Plus la résistivité est faible plus la résistivité résiduelle est atteinte pour des valeurs de température faible
- A haute température ρ ne dépend que de la nature du matériau
- La résistance, R , se construit avec la résistivité du matériau

$$R = \frac{\rho}{S} L \quad (\Omega)$$

L longueur du conducteur en m
S la section du conducteur en m^2



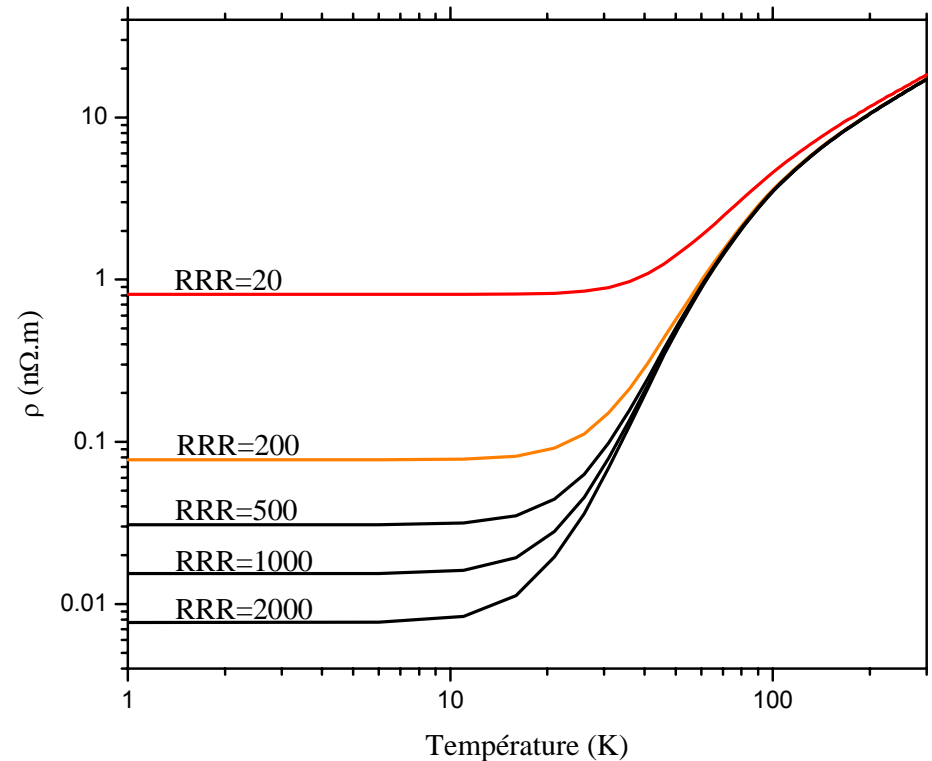
A température ambiante, la résistivité des métaux purs décroît avec la température.

Propriétés électriques : RRR (3/4)

- La résistivité à l'ambiante ne dépend que du métal de base
- La résistivité à basse température dépend de la pureté du matériau
- Pour les métaux, on définit le Rapport de Résistivité Résiduelle (RRR)

$$\text{RRR} = \frac{\rho(273 \text{ K})}{\rho(4,2 \text{ K})} \approx \frac{\rho(273 \text{ K})}{\rho_0}$$

- Le RRR est une indication de pureté souvent utilisée en métallurgie pour caractériser la qualité du métal
- Pour le cuivre et l'aluminium ordinaire, le RRR varie de 5 à 150. Les cuivres OFHC ont un RRR d'environ 100-200
- Dans le cas de métaux très purs, il peut monter à 500 voire 5000



Propriétés électriques : Isolation (4/4)

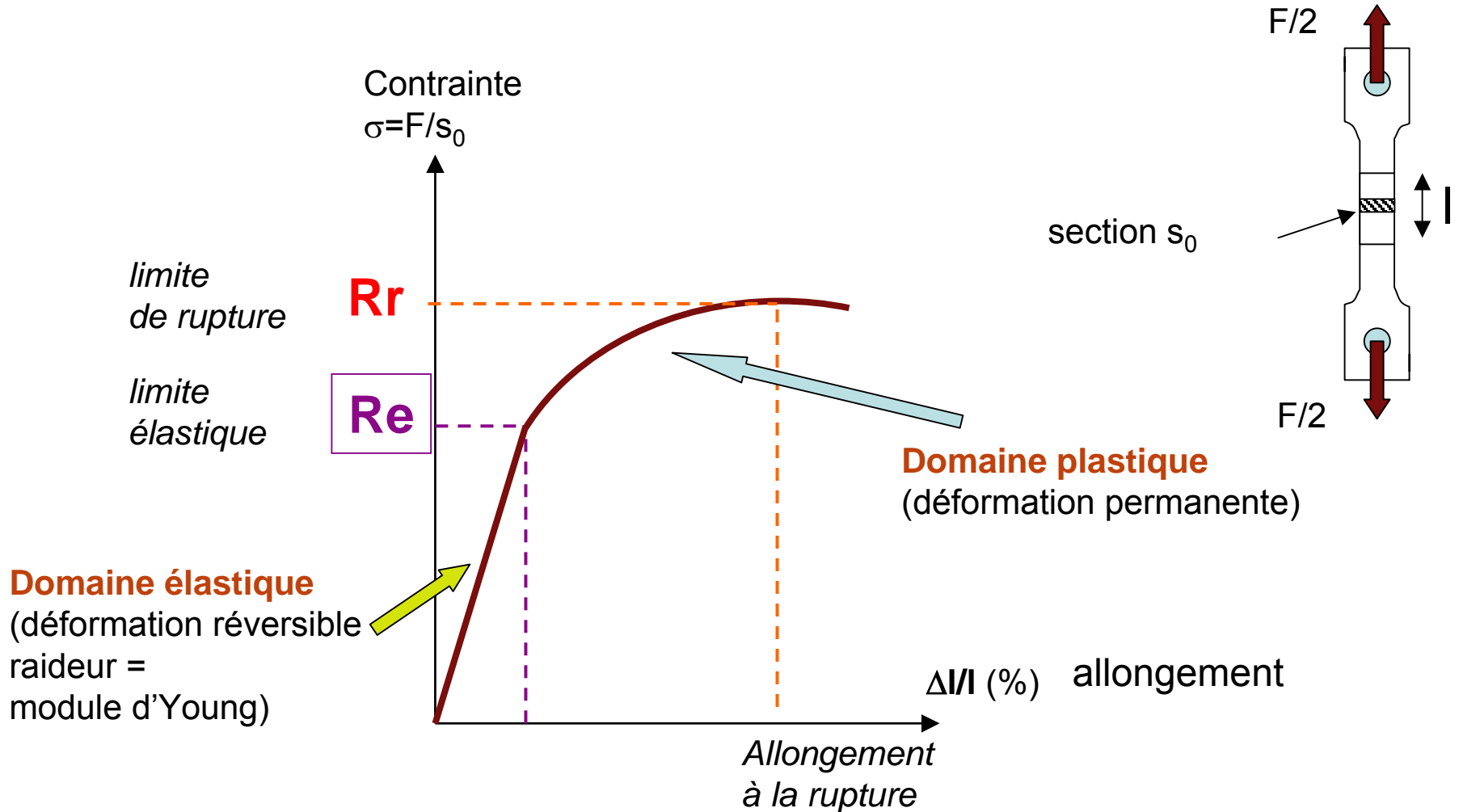
- La résistivité des isolants solides varie entre $10^{10} \Omega.m$ à $10^{16} \Omega.m$
- Différents facteurs : la structure chimique, la concentration en impuretés et le degré de polymérisation pour les matières plastiques (epoxy)
- La résistivité varie exponentiellement avec l'inverse de la température
- A basse température, la résistivité des solides atteint des valeurs très élevées.
- Rigidité diélectrique d'un isolant solide donnée avec erreur à cause du phénomène des décharges partielles dans le milieu dans lequel baigne l'échantillon (LN_2 ou LHe)

Propriétés Mécaniques : Introduction

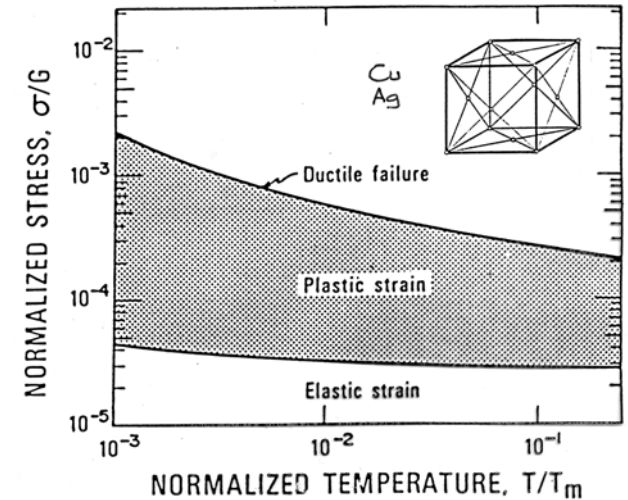
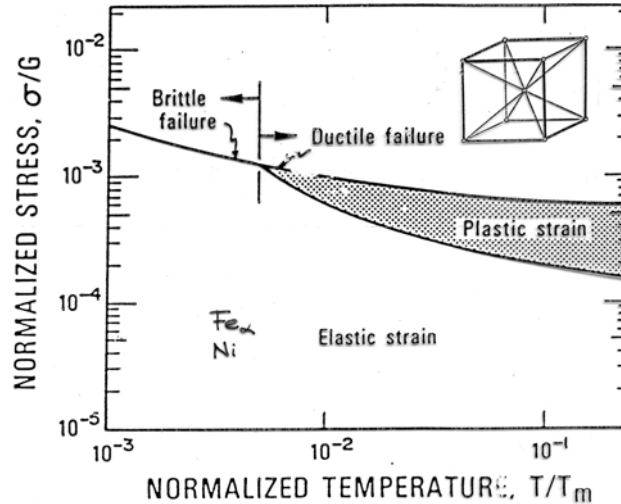
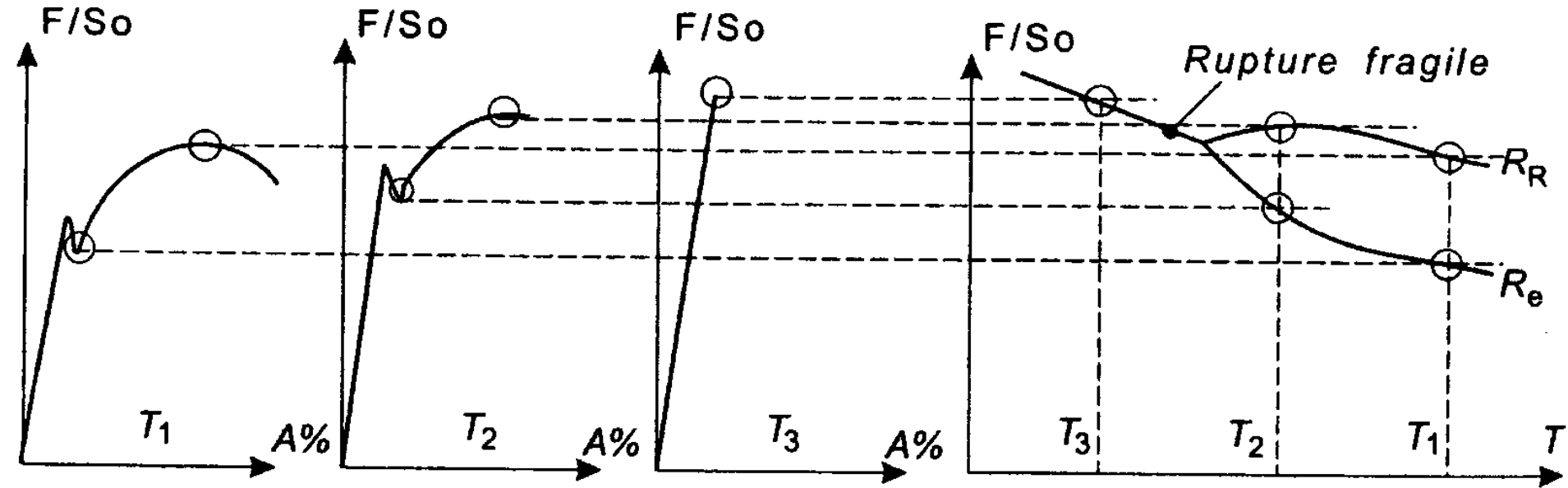
- En dessous d'une certaine température ce matériau devient fragile en opposition avec une certaine ductilité (ou plasticité) à chaud
- Le comportement à froid de certains métaux et alliages dépend de leur structure cristalline
- Pour les réseaux cristallins cubiques à faces centrées (Cu-Ni et alliages, Aluminium et ses alliages, acier inoxydable (série 300), Ag, Pb, laiton, Au, Pt), les matériaux restent ductiles jusqu'aux très basses températures et ne présentent pas de transition ductile-fragile
- Pour les matériaux à réseaux cubiques centrés (aciers ferritiques, acier au carbone, acier au Ni (<10%), Mo, Nb, Va, Cr, NbTi), la descente aux basses températures fait apparaître souvent une transition ductile-fragile
- Dans les structures hexagonales compactes, (Zn Be, Zr, Mg, Co, alliage de Ti (TA5E)...), il n'y a pas de règle générale et les variations dans les propriétés mécaniques dépendent beaucoup des composés interstitiels

Propriétés Mécaniques : Introduction Traction (1/3)

Exemple de l'essai mécanique de traction

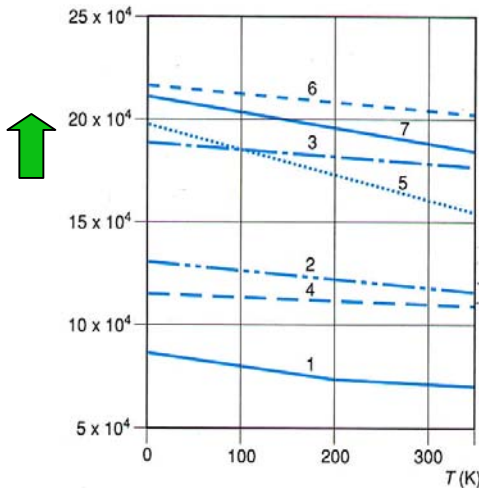


Propriétés Mécaniques : Transition ductile fragile (2/3)

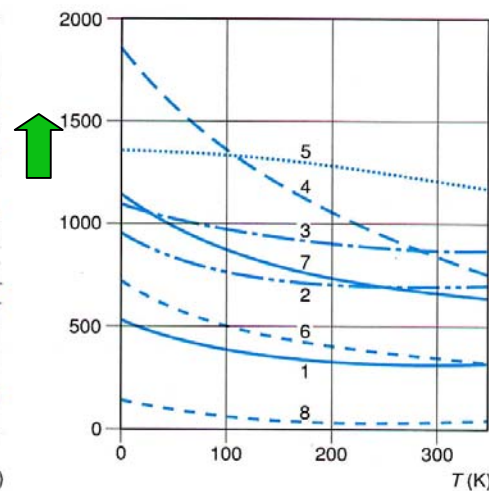


Propriétés Mécaniques : quelques valeurs (3/3)

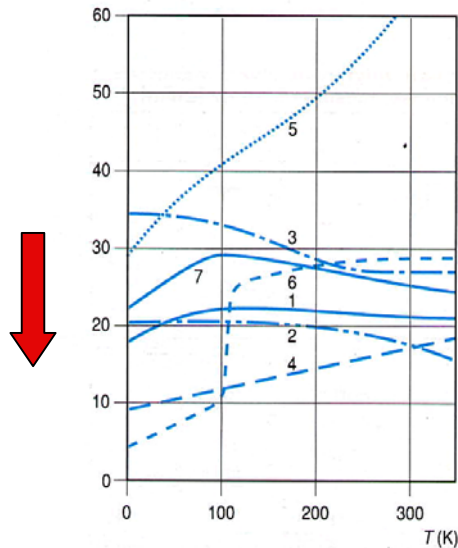
Module d'élasticité (MPa)



Limite d'élasticité (MPa)



Allongement à la rupture (%)



- 1 : 2024 T4 aluminium
- 2 : cuivre-béryllium
- 3 : K monel
- 4 : Titane
- 5 : Acier inox 304
- 6 : Acier carbone C 1020
- 7 : Acier 9% Ni
- 8 : Téflon
- 9 : Fibre de verre -Epoxy
- 10 : Kapton (polyimide)
- 11 : Mylar
- 12 : Nylon (polyamide)

- Les modules d'élasticité varient peu avec la température (meilleur à BT)
- La limite d'élasticité et la limite à la rupture augmentent aux basses températures
- La plasticité devient quasi nulle à froid (allongement très faible avant rupture)
- La fragilité augmente à basse température
- Limite de fatigue augmente à basse température (cycles de fatigue)

Propriétés Mécaniques : Matériaux (1/3)

Aciers inoxydables

- Trois types, les aciers martensitiques, ferritiques et austénitiques
- Les deux premiers types se fragilisent à froid et sont à proscrire
- Aciers austénitiques (teneurs en chrome de 12 à 30 %, nickel de 7 à 25 %)
- Le plus répandu est l'acier dit 18/10 (304L), 18 % chrome et 10 % de nickel
- Pour des efforts constants (boulons par exemple), l'emploi de certains types d'aciers inox est à préférer, choisir les aciers de type bas carbone 304L (Z2CN18-10) ou 316L (Z2CND17-12) plutôt que 304 et 316
- L'acier inox 304L est légèrement magnétique. Ce point peut être un handicap pour les appareillages de mesure de susceptibilité magnétique par exemple
- Pour travailler à des températures élevées, il est recommandé d'utiliser des aciers avec adjonction de Titane, par exemple les 316 L

Propriétés Mécaniques : Matériaux (2/3)

Alliages légers

- AL n'a pas d'excellentes propriétés mécaniques et une bonne conduction thermique
- Alliages les plus courants sont ceux de la série 6000 (Si, Mg) : aptitude aux déformations à chaud et à froid, bonne résistance à la corrosion.
- Les alliages avec magnésium 5754 (AG3), moins bons thermiquement, ont de bonnes caractéristiques mécaniques et soudables
- Il existe des jonctions inox-AL

Alliages de cuivre

- Les alliages de cuivre-béryllium ont une grande résistance mécanique avec un traitement thermique approprié.
- Le cuivre est souvent utilisé pour la thermalisation et écrans thermiques

Alliages de nickel

- L'Invar (36%Ni + Fe) a un très faible coefficient de dilatation (construction sans élément de compensation)
- Le Monel (67%Ni + Cu) allie d'excellentes propriétés mécaniques à une haute résistance à la corrosion

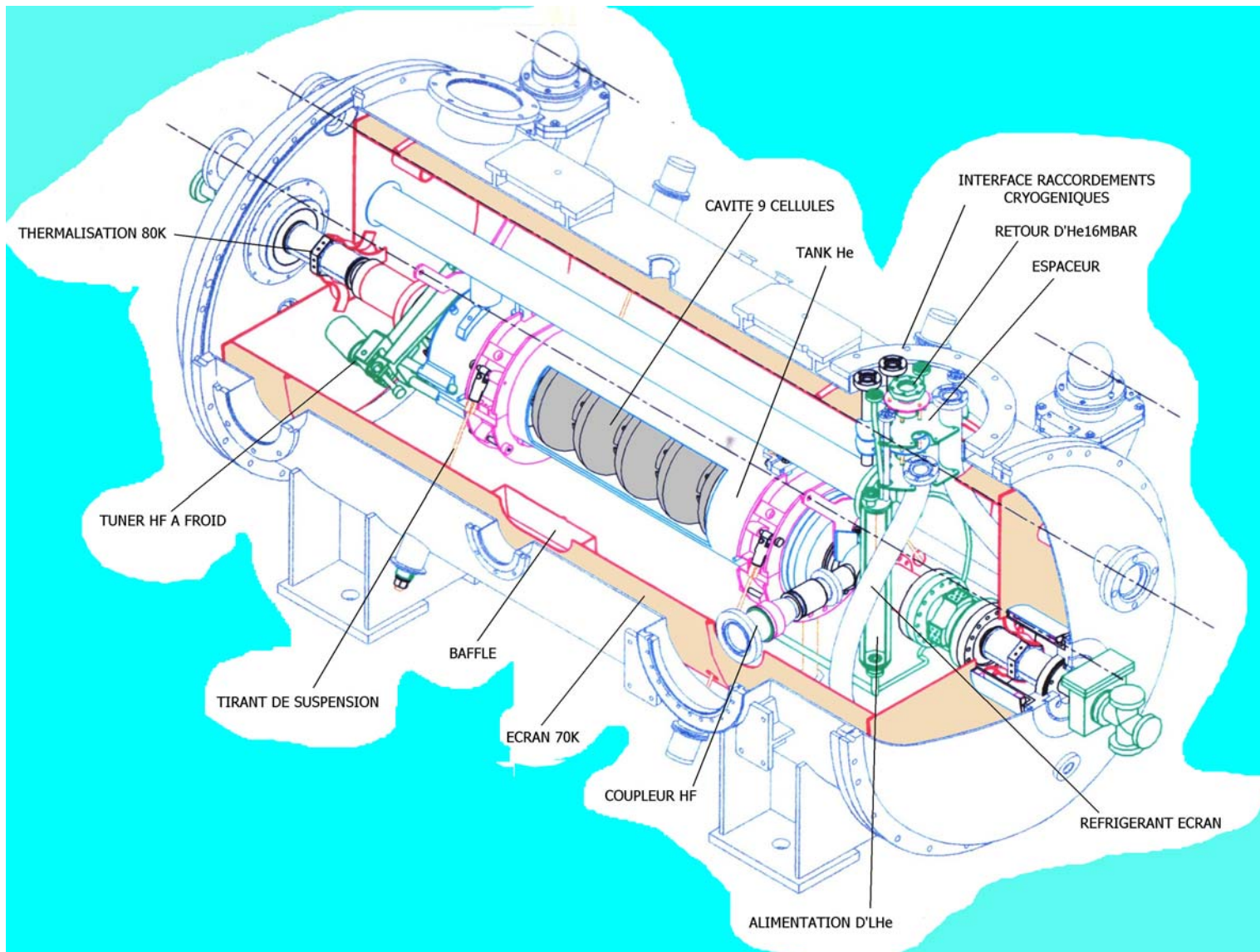
Plastiques classiques

- La résistance mécanique et la dureté augmentent à basse température
- Pour la plupart d'entre eux la fragilité augmente
- Transition ductile fragile (300 K en général, 90 K pour le Téflon)
- Propriétés élevées pour le Kapton qui est utilisé pour résister à la pression

Matériaux composites

- Fibre de verre ont des propriétés qui dépendent de la direction des fibres
- La résistance mécanique est de l'ordre de celle des métaux
- Légèreté, faible conduction thermique et amagnétisme
- Ils ne deviennent pas fragiles à basse température et supportent les mises en froid
- Utilisation : vases de stockage, cryostats pour magnétométrie, supports
- Coefficient de contraction thermique entre 300 K et 80 K est trois fois plus faible

Propriétés Mécaniques : une application



Références

Cryogénie, ses applications en supraconductivité, IIF, Technique de l'Ingénieur ,1995

Propriétés des matériaux à basses températures, S. Buhler

Propriétés mécaniques à basses températures, P. Gianese

Notes de cryogénie, Verdier J., Locatelli M.

CryoComp, Metalpak : logiciel, les caractéristiques thermiques et électriques des matériaux