

INTRODUCTION A LA CRYOGENIE ET LA SUPRACONDUCTIVITE

FLUIDES CRYOGENIQUES
DIAGRAMME DE PHASE
PROPRIETES USUELLES
SUPRACONDUCTIVITE
DOMAINE SUPRACONDUCTEUR
EXEMPLES

TECHNIQUES DU VIDE

NOTIONS GENERALES
OBTENTION - GAMMES
EXEMPLES DE MATERIEL
ETANCHEITE

CRYOGENIE II

PROPRIETES DES MATERIAUX
THERMIQUE, MECANIQUE, ELECTRIQUE
TRANSFERTS THERMIQUES
MISE EN OEUVRE DES BASSES TEMPERATURES
Séquence : Cryogénie Argon H1

SUPRACONDUCTIVITE II

DETAILS SUR L'ETAT SUPRACONDUCTEUR
EXEMPLES DES CABLES SUPRA POUR AIMANTS
Séquence : Quadrupôle HERA

Cryogénie

- Rappels des propriétés des cryofluides
- Propriétés thermiques, électriques et mécanique
 - Modes de transfert thermique
- Mise en œuvre des basses températures

Cryogénie

- Rappels des propriétés des cryofluides

$$T (K) = T(^{\circ}C) + 273,15$$

| Propriétés de quelques fluides | | He3 | He4 | H2 | D2 | Ne | N2 | O2 | Ar | CH4 | H2O |
|---|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-----------------|
| Température d'ébullition à p normale (1.013 .10 ⁵ Pa) (K) – Téb - | | 3.2 | 4.2 | 20.4 | 23.6 | 27.1 | 77.3 | 90.2 | 87.3 | 111.7 | 373.15 |
| POINT TRIPLE | Tt en K | - | - | 13.95 | 18.70 | 24.50 | 63.14 | 54.40 | 84.00 | 90.70 | 273.16 |
| | Pt en hPa | - | - | 72 | 170 | 424 | 125 | 2 | 670 | 116 | 6 |
| POINT CRITIQUE | Tc en K | 3.33 | 5.20 | 33.20 | 38.30 | 44.40 | 126.10 | 154.40 | 150.80 | 191.00 | 647.14 |
| | Pc en 10 ⁵ Pa | 1.16 | 2.23 | 12.80 | 16.50 | 26.60 | 33.10 | 49.50 | 47.70 | 45.80 | 220.60 |
| Volume de gaz provenant de l'évaporation d'1 litre de liquide | à Téb et pnormale (l) | 2.5 | 7.3 | 54.6 | 70.0 | 127.0 | 180.0 | 260.0 | 240.0 | 250.0 | |
| | à T et p normale (l) | 455 | 700 | 790 | 900 | 1355 | 646 | 798 | 784 | 595 | |
| Chaleur latente L de vaporisation à Téb et p normale (kJ/kg) | | 8.2 | 21 | 452 | 305 | 86 | 199 | 213 | 157 | 510 | 2250 |
| Enthalpie sensinle en,tre Téb et 300 K (kJ/kg) | | 2080 | 1550 | 3800 | 2048 | 280 | 233 | 193 | 112 | 402 | |
| Taux d'évaporation (Wh/l) = nombre de watts à déposer pour vaporiser 1 litre en 1 heure | | 0.14 | 0.7 | 9.0 | 13.6 | 29 | 45 | 68 | 61 | 60 | 624 |
| Capacité calorifique à pression constante (kJ/kg.K) à 0°C et 1 bar | | - | 5.20 | 14.05 | - | 1.03 | 1.038 | 0.909 | 0.52 | 2.19 | 1.842 (à 100°C) |
| Conductibilité thermique du gaz à Téb (mW/m.K) | | - | 10 | 15 | < 40 | 8 | 7.6 | 9 | 8 | 8.7 | 22 |
| Conductibilité thermique du gaz à p normale et 300 K (mW/m.K) | | - | 152 | 181 | 137 | 50 | 26 | 27 | 18 | 31 | |
| Masse volumique du liquide à p normale (kg/m ³) | | 59 | 125 | 71 | 161 | 1210 | 810 | 1140 | 1400 | 425 | 998 |
| Masse volumique de la vapeur saturante à p normale (kg/m ³) | | 24 | 17 | 1.3 | 2.3 | 9.5 | 4.5 | 4.4 | 5.8 | 1.7 | 0.77 |
| Masse volumique du gaz à p et T normales (kg/m ³) | | 0.13 | 0.18 | 0.09 | 0.18 | 0.9 | 1.25 | 1.43 | 1.8 | 0.55 | |
| Viscosité du liquide à Téb (μPa.s) | | 2 | 3.6 | 13 | 16.2 | 125 | 160 | 190 | 260 | 120 | 278 |
| Viscosité du gaz à Téb (μPa.s) | | 1.2 | 1 | 1 | 1.5 | 4.5 | 5 | 7 | 8 | 4.4 | 12.5 |
| Viscosité du gaz à Tambiante (μPa.s) | | - | 20 | 9 | 13 | 30 | 17 | 20 | 22 | 11 | - |
| Permittivité du liquide | | - | 1.05 | 1.23 | 1.27 | 1.19 | 1.44 | 1.48 | 1.54 | 1.68 | 80 |

Propriétés thermiques des matériaux dans la gammes des basses températures



Propriétés thermiques

Capacité calorifique (ou chaleur spécifique en J/kg.K)

= capacité qu'a le matériau à stocker (ou céder) de la chaleur.

La **capacité thermique C** d'un corps est donnée par la relation :

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

où m en kg est la masse du corps subissant un échauffement ΔT en K lorsqu'on lui apporte la quantité de chaleur Q en J.

$$P = m \cdot C \cdot \frac{dT}{dt}$$

(P puissance absorbée ou extraite en W et vitesse de descente ou remontée en température (K/s ou °C/s))

On peut aussi écrire pour un fluide en mouvement:

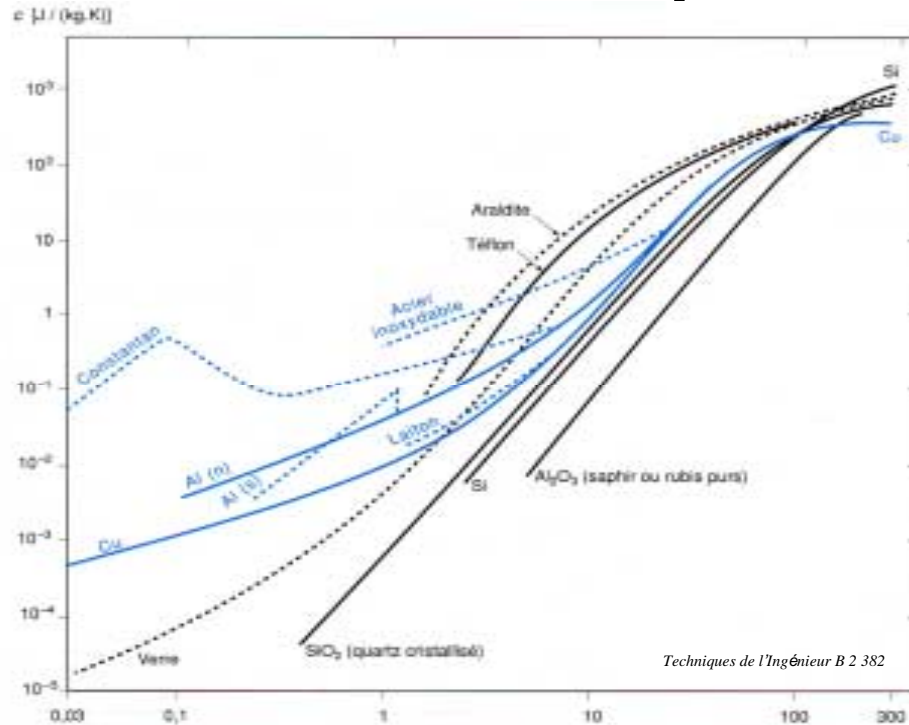
$$P = \dot{m} \cdot C \cdot \Delta T$$

où \dot{m} représente un débit en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

et P la puissance en W reçue par

le fluide qui s'échauffe de ΔT

Capacité calorifique



En dessous de 50 K, les chaleurs spécifiques chutent très rapidement (peu de chaleur à extraire ou à apporter pour descendre ou monter en T°).

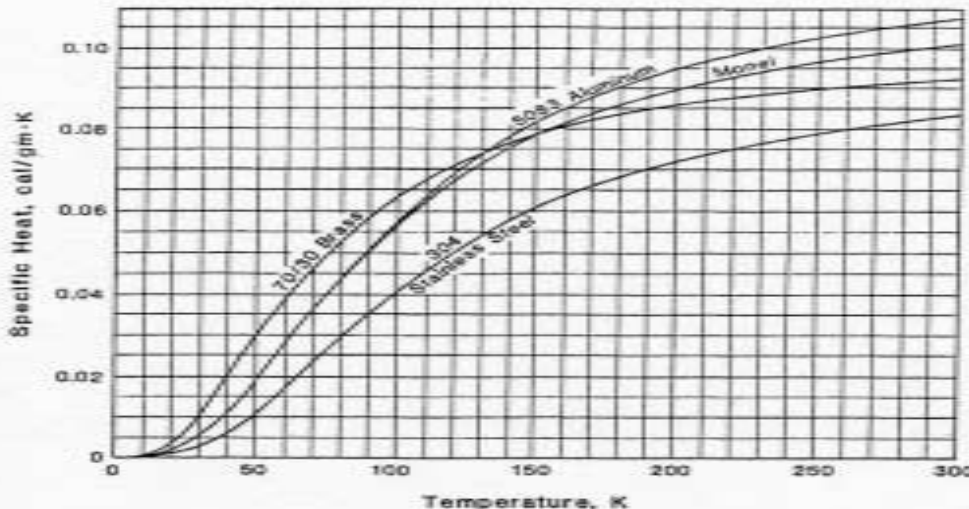
$$C = \sum_i c_i(T)$$

$C_{\text{réseau}}, C_{\text{électrons libres}}, \dots$

A très basses températures,

$C \propto T^3$ pour un isolant

$C \propto \beta \cdot T^3 + \gamma \cdot T$ pour un conducteur



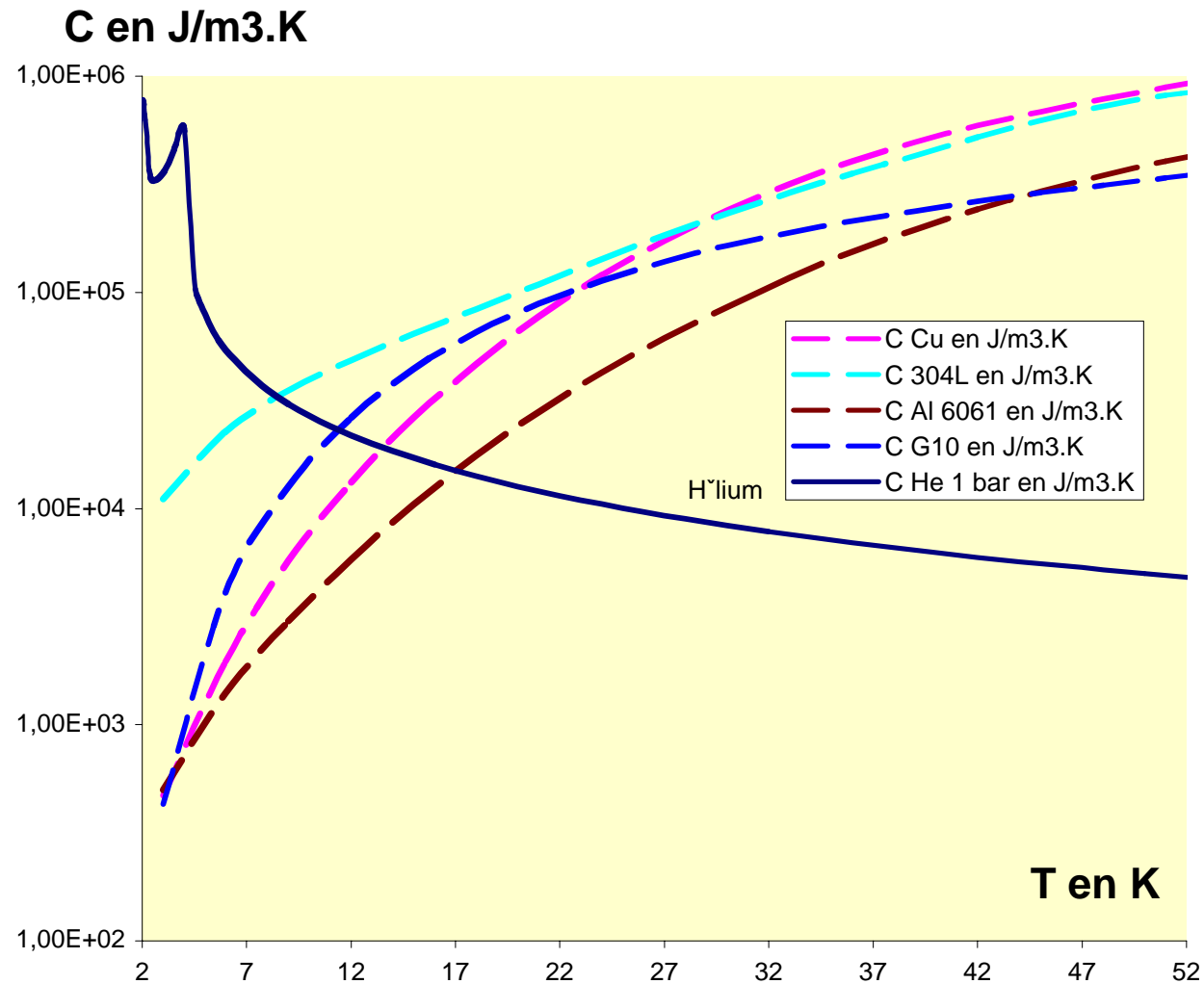
L'enthalpie h d'un corps représente l'intégrale de la capacité thermique en fonction de T dans un domaine de température fixé. Elle s'exprime alors par :

$Q = m \cdot \Delta h$ où Δh est la variation d'enthalpie du corps soumis à un apport de chaleur Q .

L'enthalpie est une réserve "calorique" et s'exprime en $J \cdot kg^{-1}$

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

L'hélium comme « réserve calorique » à basse température



L'hélium à basse température est souvent la plus grande réserve d'énergie...

Conductibilité thermique

Conductibilité thermique.

C'est la facilité qu'aura un matériau à laisser circuler la chaleur. La conductibilité thermique k , fonction de T , peut s'exprimer par la relation de Fourier simplifiée :

$$\frac{S}{l} \int_{T_1}^{T_2} k(T) dT = Q$$

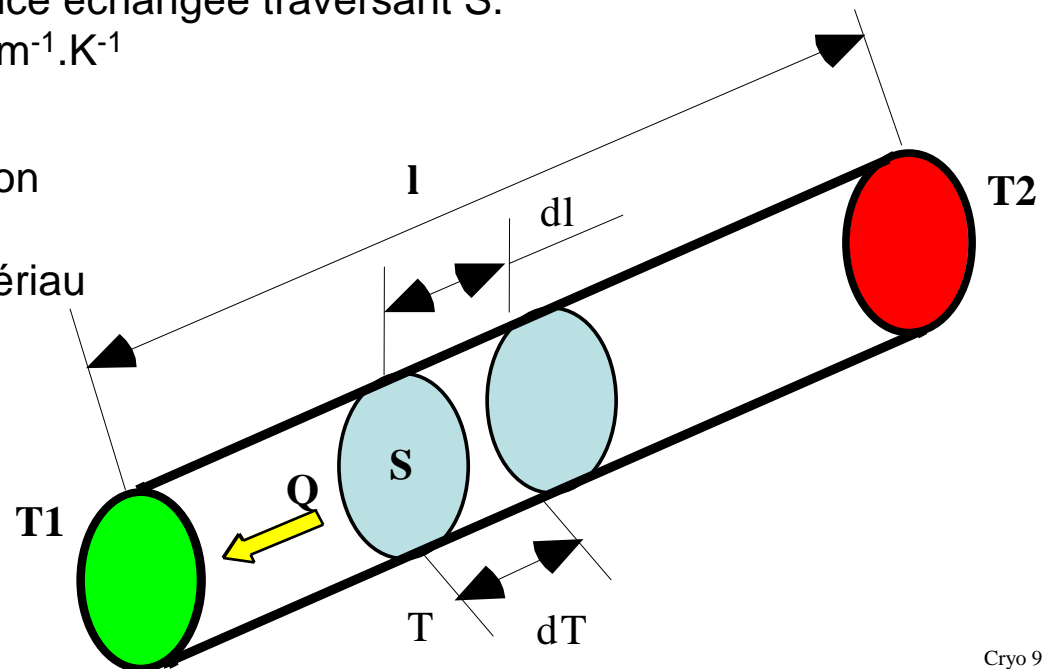
où S en m^2 est la section offerte au passage de la chaleur
 l la longueur en m à parcourir pour passer de T_1 à T_2
 Q en W la puissance échangée traversant S .
 k s'exprime en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

$\int_{T_1}^{T_2} k(T) dT$ = intégrale de conduction
 (courbe ou tabulée)
 propre à chaque matériau

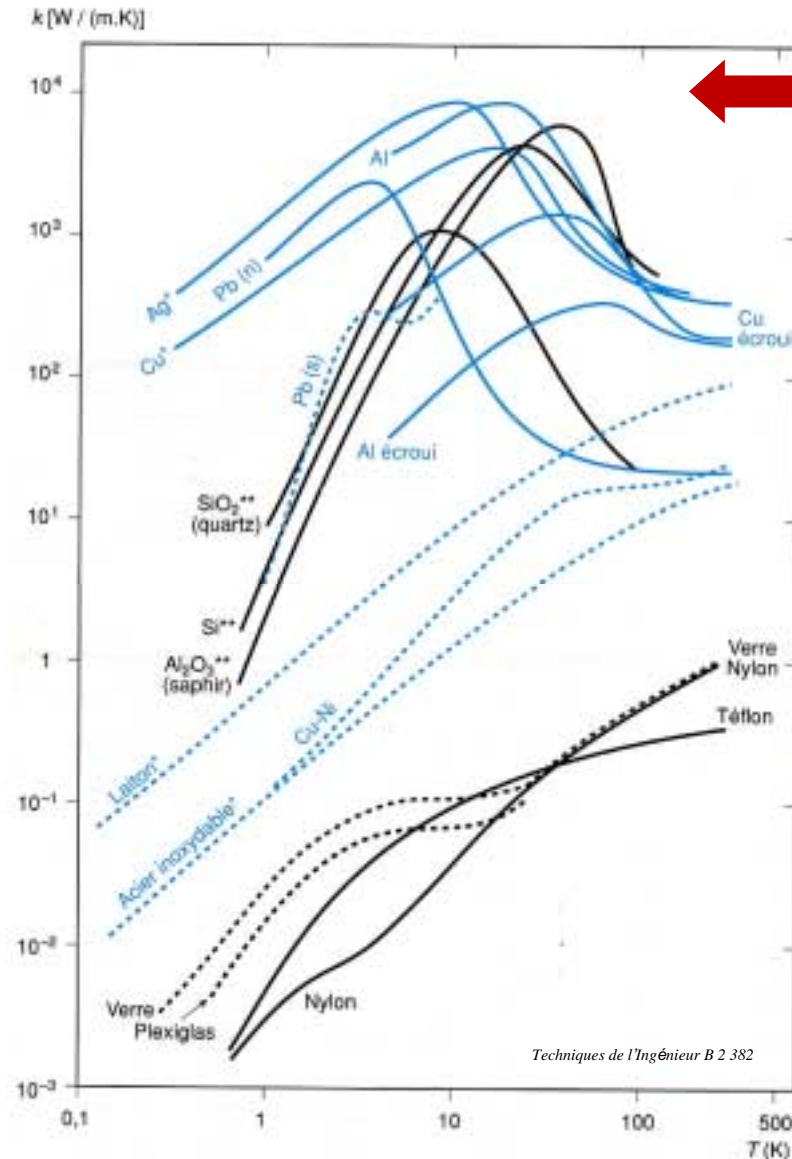
Si $k \approx$ constant (faible écart de T°),

$$Q = \frac{S}{l} \cdot k \cdot (T_2 - T_1)$$

Conductance en W/K



Conductibilité thermique



Conductibilité :

- présente un maximum pour les métaux purs et certaines céramiques
- $\propto T$ pour les métaux à très basse T°
- $\propto T^3$ pour les isolants cristallisés (quartz...)

Intégrale de conduction sous forme de table. (permet des calculs rapides pour évaluer des puissances échangées à travers des objets soumis à des gradients de température)

Tableau E. - Valeurs de l'intégrale $\int_{T_2}^{T_1} k(T) dT$ pour quelques matériaux.

| Matériau | T(K) | 6 | 8 | 10 | 15 | 20 | 60 | 80 | 300 |
|-----------------------------|------|--------|--------|--------|--------|-------|------|------|------|
| Conducteurs (en W/m) | | | | | | | | | |
| Cuivre extra-pur | | 106 | 382 | 636 | 1270 | 1790 | 2900 | 3090 | 4000 |
| Cuivre électroéroulé | | 8,5 | 19,1 | 33,2 | 60,2 | 140 | 587 | 707 | 1820 |
| Argent | | 320 | 670 | 890 | 1610 | 1980 | 2570 | 2670 | 3570 |
| Aluminium extra-pur | | 75 | 168 | 280 | 600 | 907 | 1740 | 1840 | 2390 |
| Aluminium de commerce | | 1,38 | 3,42 | 6,07 | 15,2 | 27,6 | 170 | 232 | 728 |
| Or | | 41 | 93 | 149 | 274 | 394 | 612 | 682 | 1370 |
| Laiton | | 0,0631 | 0,129 | 0,229 | 0,694 | 1,12 | 10,4 | 17,7 | 172 |
| Plomb (normal) | | 27,0 | 37,3 | 42,4 | 49,0 | 52,5 | 73,8 | 81,3 | 160 |
| Titane | | 0,115 | 0,277 | 0,488 | 1,31 | 2,20 | 15,5 | 22,6 | 96,6 |
| Monel | | 0,0235 | 0,0605 | 0,112 | 0,315 | 0,618 | 5,23 | 8,24 | 52,5 |
| Acier inoxydable | | 0,0083 | 0,0159 | 0,0293 | 0,0810 | 0,163 | 1,38 | 3,49 | 30,6 |
| Isolants (en mW/cm) | | | | | | | | | |
| Verre | | 2,11 | 4,43 | 6,81 | 13,1 | 20,0 | 115 | 194 | 1990 |
| Téflon | | 1,13 | 2,62 | 4,4 | 9,85 | 16,4 | 93,6 | 139 | 702 |
| Plexiglas | | 1,18 | 2,38 | 3,59 | 6,89 | 10,1 | 68,3 | 110 | 630 |
| Nylon | | 0,321 | 0,807 | 1,48 | 4,10 | 8,23 | 85,9 | 142 | 895 |

Conduction thermique

Adapter la géométrie pour réduire les apports de chaleur par conduction

Exemple des vannes :

$$\frac{S}{l} \int_{T_1}^{T_2} k(T).dT = Q$$

S/l réduit par S↓ et l↑
=> Pertes thermiques Q ↓



Vanne « chaude »

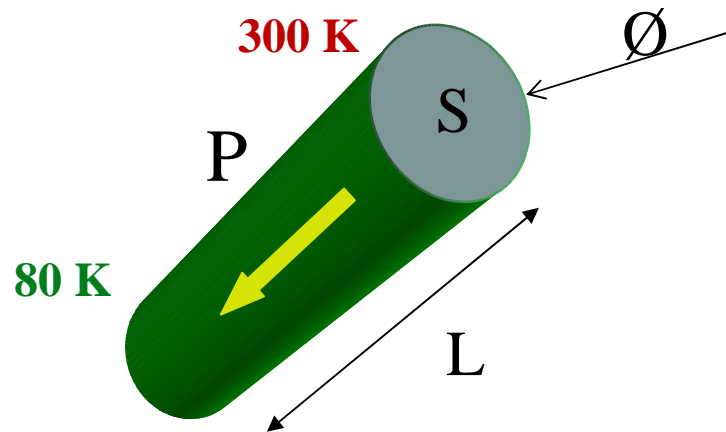


Vanne « froide » (LHe)

Conduction thermique

Exemples :

Cas du barreau



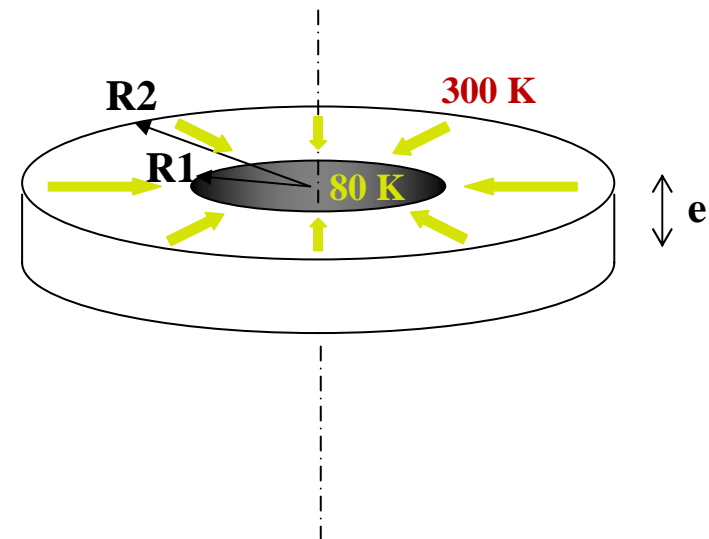
$$P = \frac{S}{L} \int_{80}^{300} k(T) \cdot dT$$

$I_{(80-300)}$
« Intégrale de conduction »

A.N : pour $\varnothing = 0,01$ m, $S = 79$ mm² et $L = 0,2$ m,

| | $I_{(300-80)}$ en W.m | P en W |
|---------|-----------------------|--------|
| Cu : | 91300 | 36,1 |
| Al : | 49600 | 19,6 |
| Ti | 7700 | 3,0 |
| Inox : | 2711 | 1,07 |
| Vérépox | 150 | 0,06 |
| Nylon : | 75,3 | 0,03 |

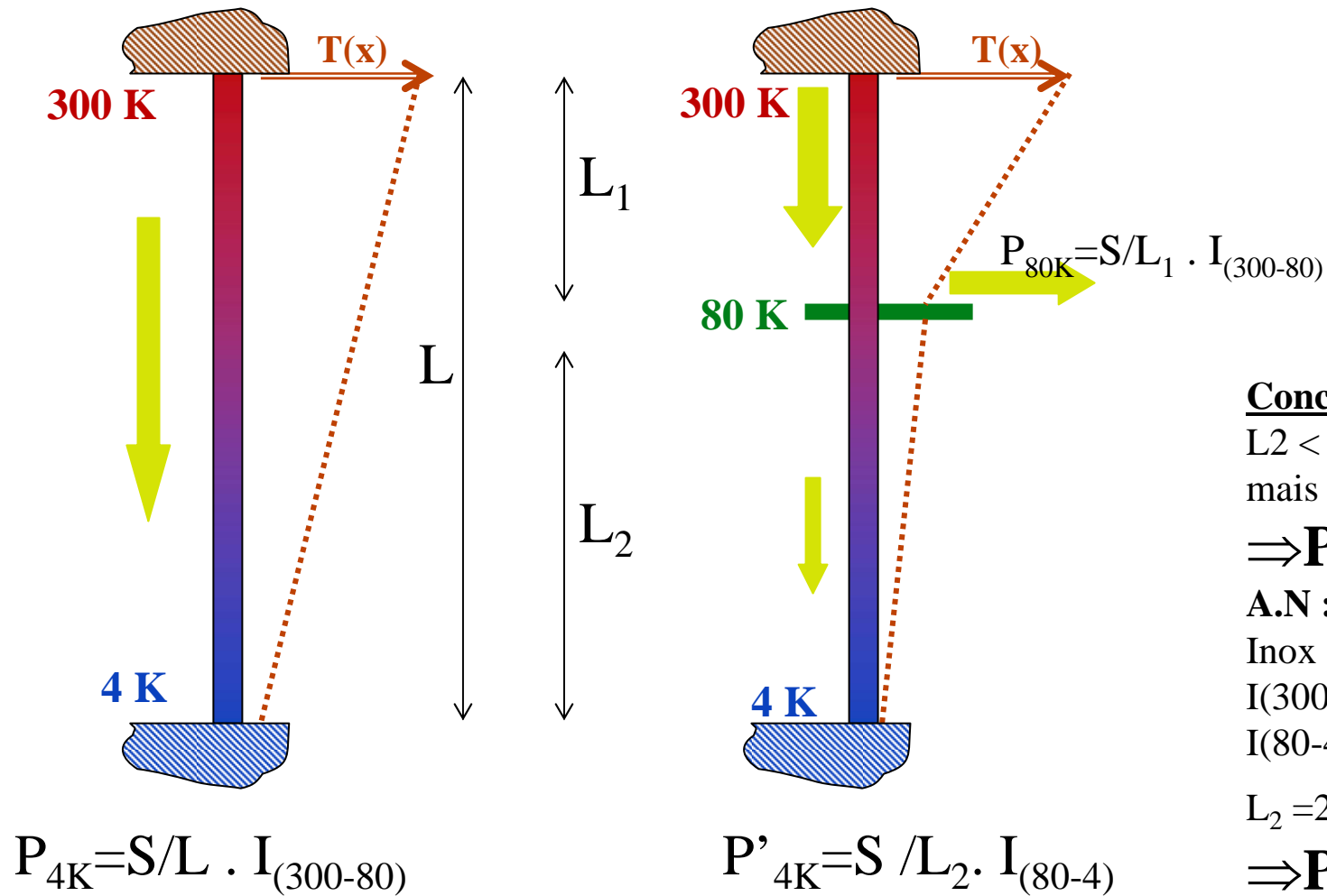
Cas de la pièce annulaire



$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot e}{\ln(R2 / R1)} \cdot \int_{80}^{300} k(T) \cdot dT$$

Conduction thermique

Réduction des apports par thermalisation à T° intermédiaire:



Conclusion :

$L_2 < L$

mais $I(80-4) \ll I(300-4)$

$\Rightarrow P'_{4K} \ll P_{4K}$

A.N :

Inox

$I(300-4) = 3070 \text{ W.m}$

$I(80-4) = 500 \text{ W.m}$

$L_2 = 2/3 \cdot L_1$

$\Rightarrow P'_{4K} = 1/4 P_{4K}$

Propriétés mécaniques

Dilatation thermique

Les éléments entrant dans les constructions cryogéniques vont être soumis à des écarts de températures élevés (jusqu'à 300 K), que ce soit lors du refroidissement (tout n'est pas instantanément homogène en température) ou bien en fonctionnement nominal (les éléments internes froids seront par un montage plus ou moins compliqué reliés mécaniquement aux éléments externes chauds).

La déformation avec la température étant différente d'un matériau à un autre, il va donc apparaître des **contraintes thermo-mécaniques** dans les assemblages. Pour les minimiser ou les compenser, il faut parfaitement connaître le comportement en dilatation des matériaux en fonction de T.

Dilatation exprimée par la variation relative en **mm/m**

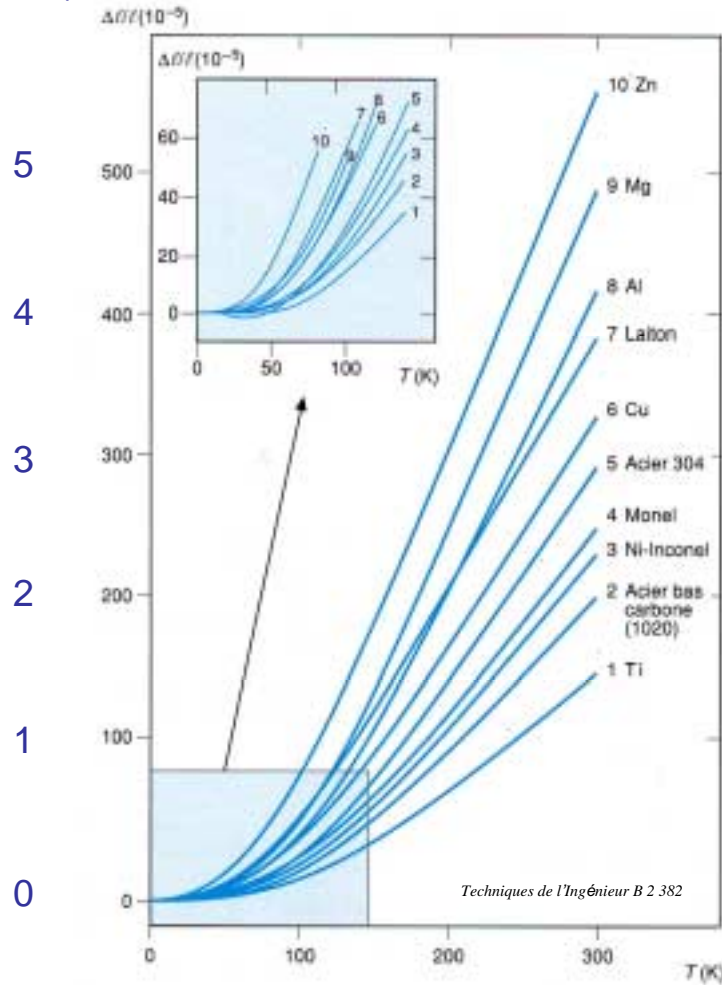
$$\Delta l = \frac{[l(T) - l_0]}{l_0} \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} l_0 \text{ est la longueur à 300 K} \\ l \text{ la longueur à basse température T} \end{array}$$

La mise en « parallèle » de matériaux ayant des coefficients de dilatation trop différents nécessitera des éléments de flexibilité ou des possibilités de glissement.

de 300 à 4 K
mm/m

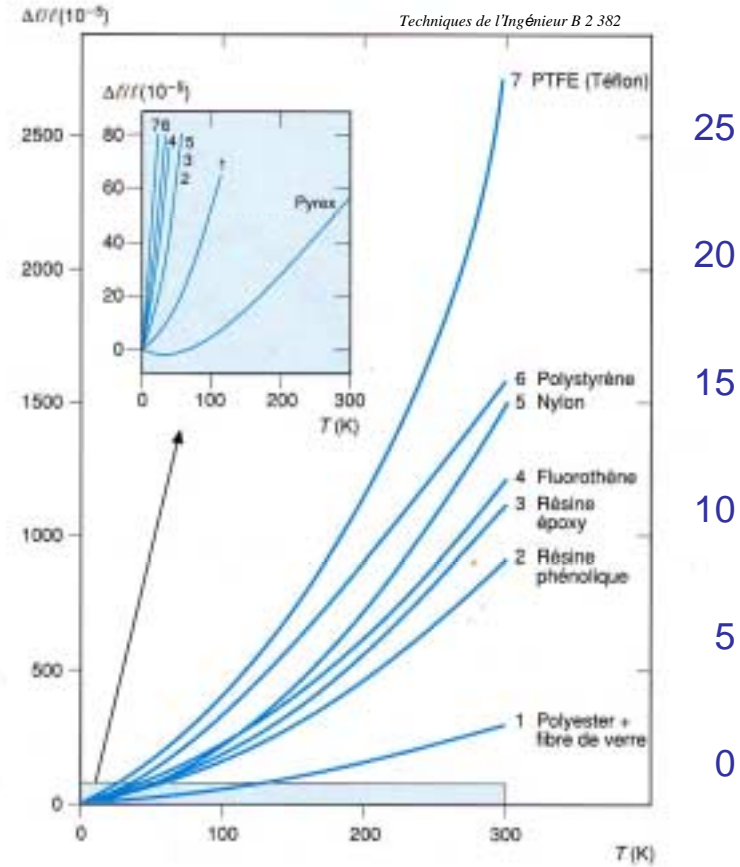
Dilatation thermique

de 300 à 4 K
mm/m



5
4
3
2
1
0

Métaux



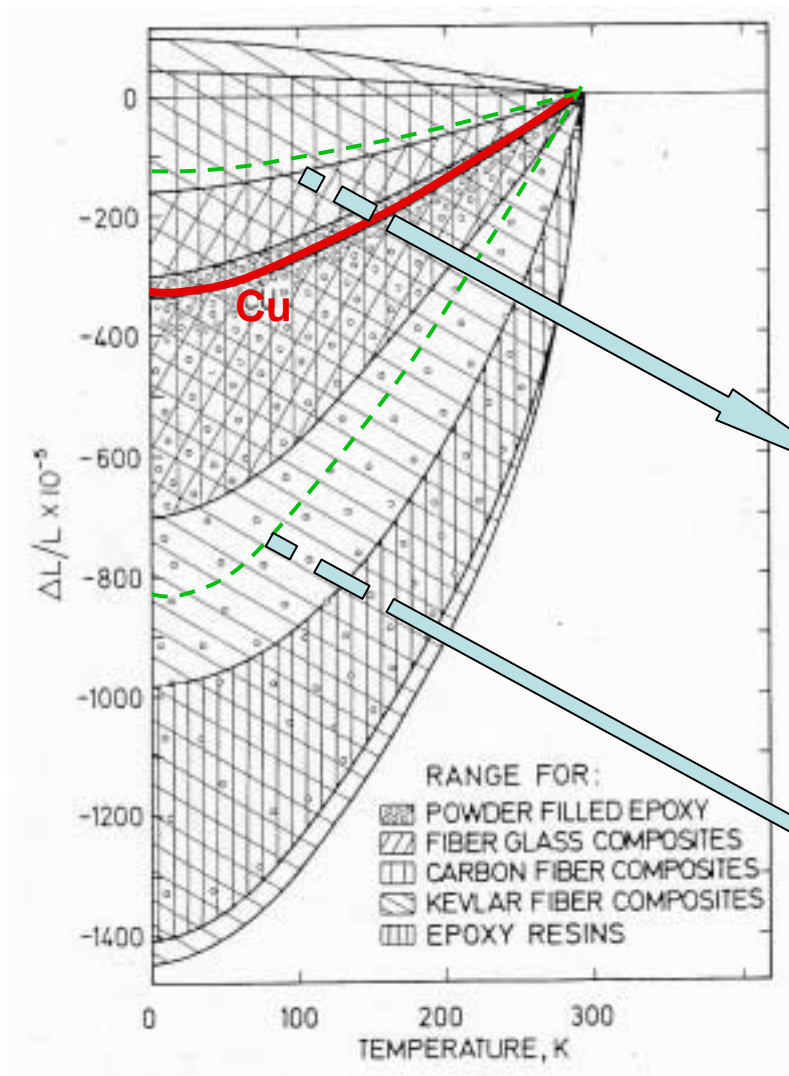
25
20
15
10
5
0

Matériaux synthétiques

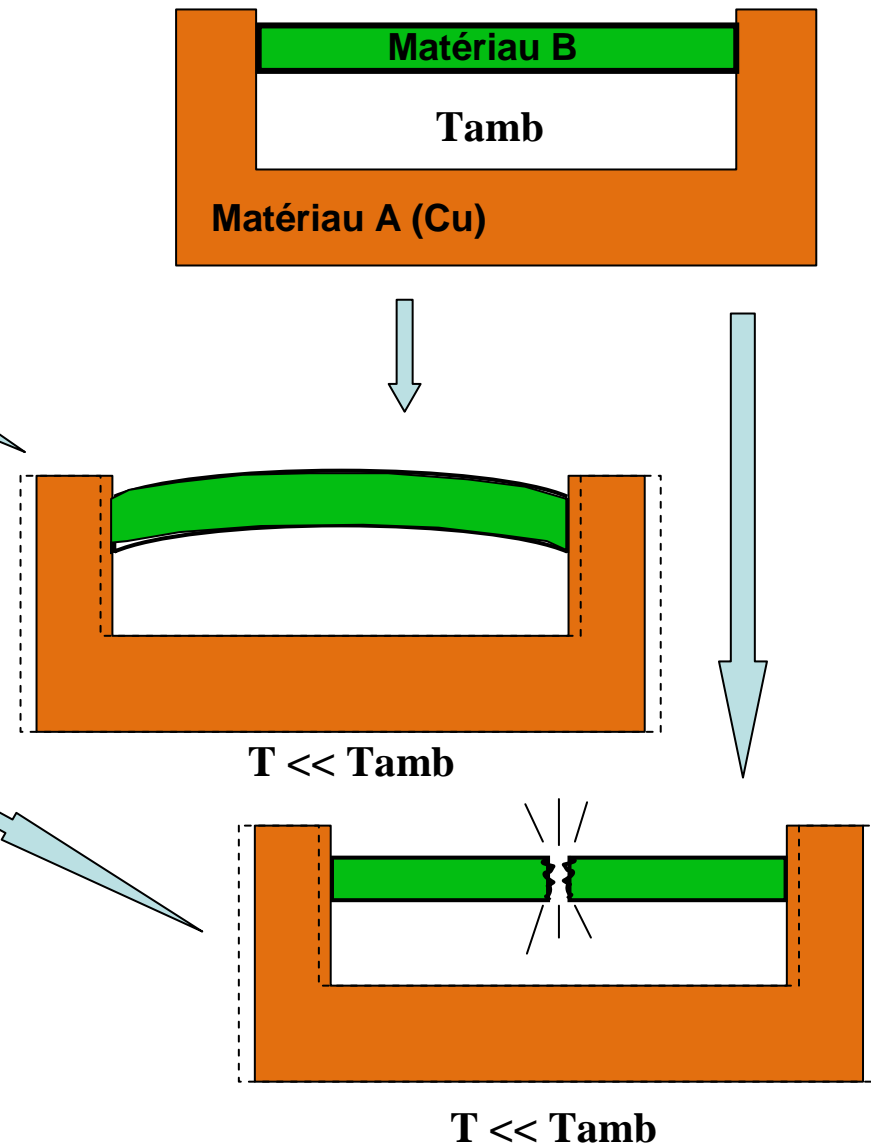
On notera qu'en dessous de 80 K l'essentiel de la dilatation des matériaux a eu lieu.
Un test simple à l'azote liquide (77 K) suffit souvent à mettre en évidence des problèmes mécaniques à froid.

Dilatation différentielle

Comportements différents selon les natures des composants



Grande dispersion dans les composites, par produit et selon leur mode d'élaboration...



Propriétés mécaniques

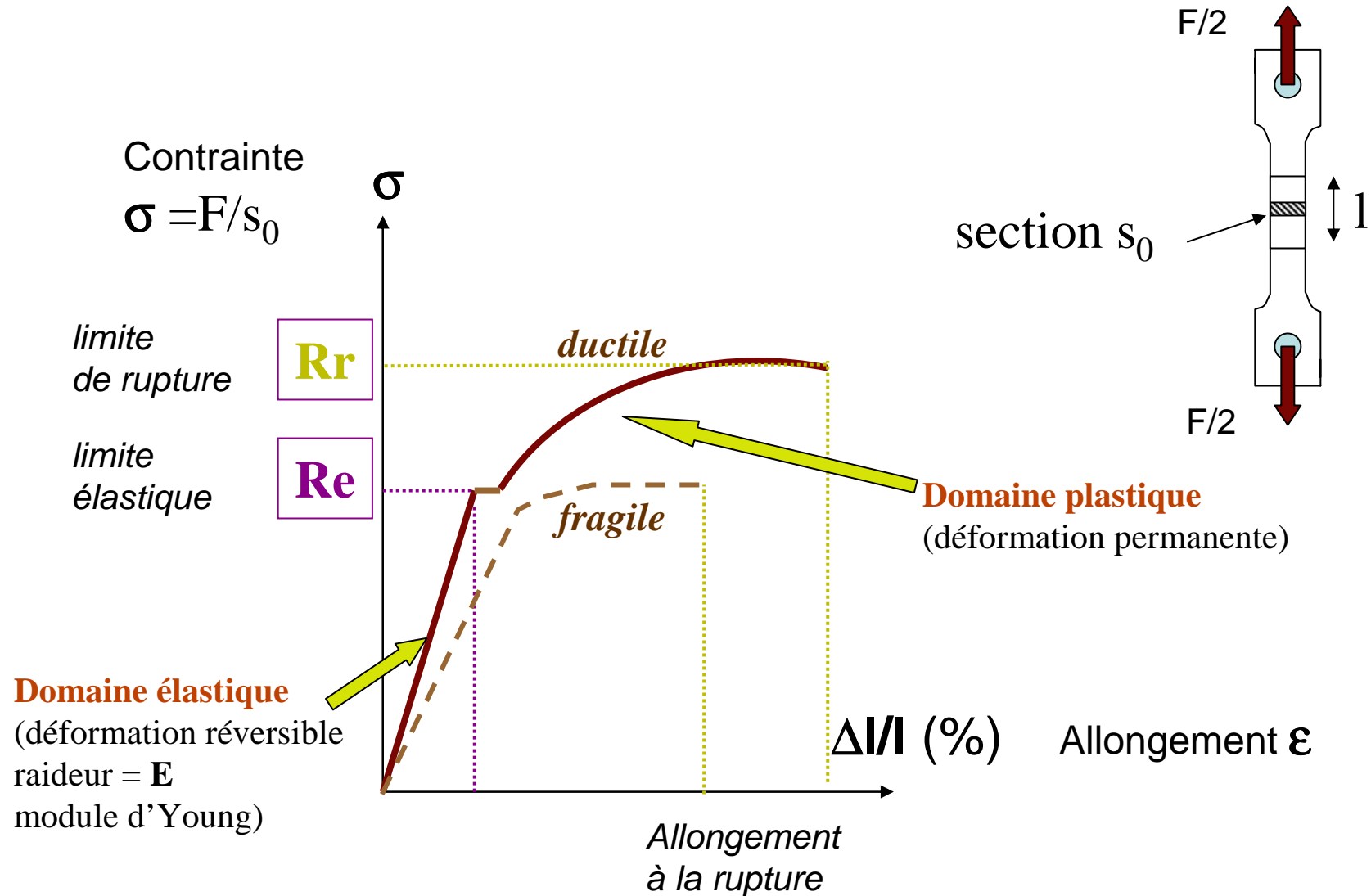
Quelque soit le matériau, il est courant de constater qu'en dessous d'une certaine température ce matériau devient **fragile** en opposition avec une certaine ductilité (ou plasticité) à chaud.

Le comportement à froid des métaux et alliages dépend de leur structure cristalline:

- réseaux cristallins cubiques à faces centrées (**Cu-Ni** et alliages, **Al et 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**
- 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**.
- 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.

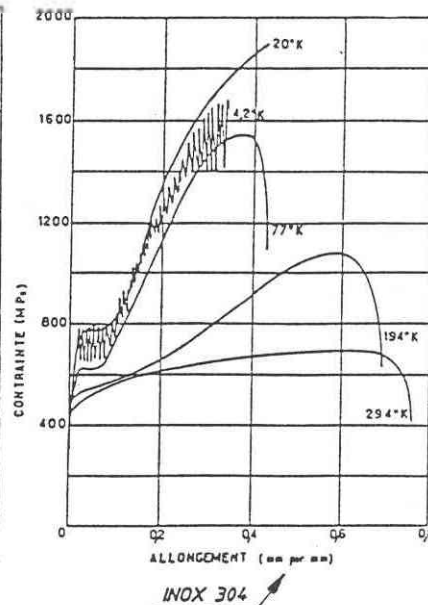
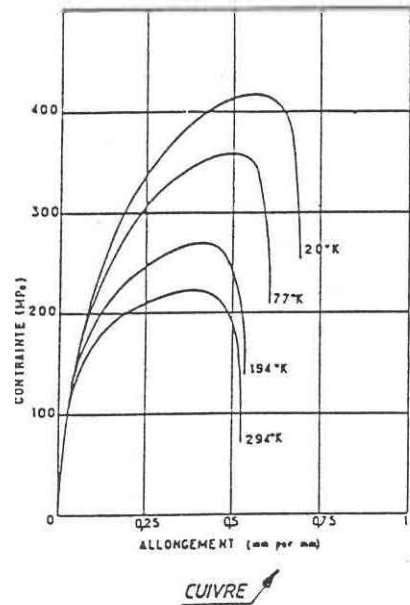
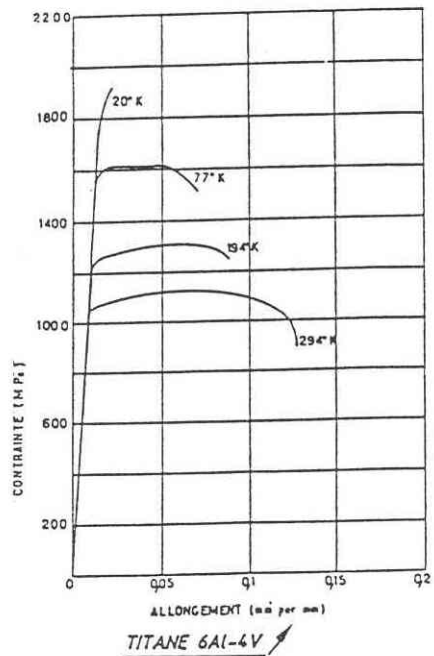
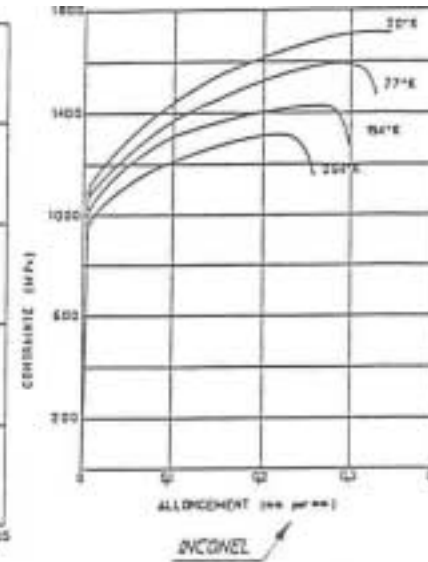
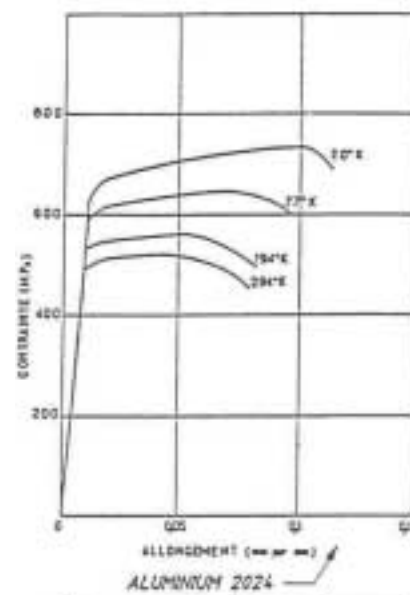
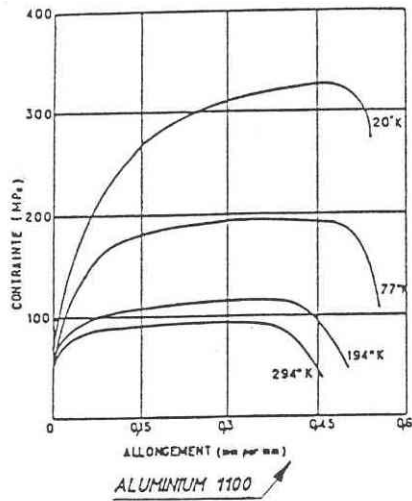
Propriétés mécaniques

Exemple de l'essai mécanique de traction :

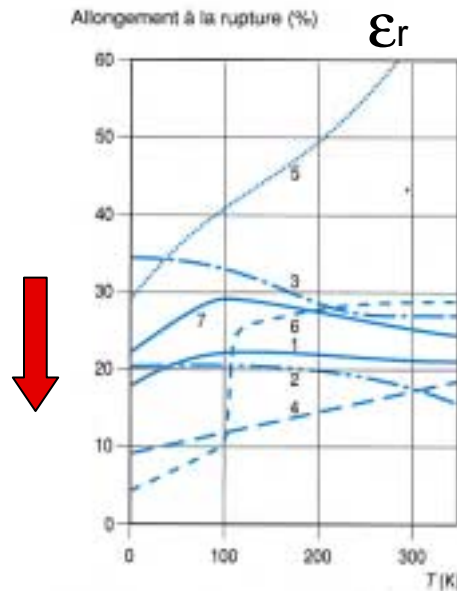
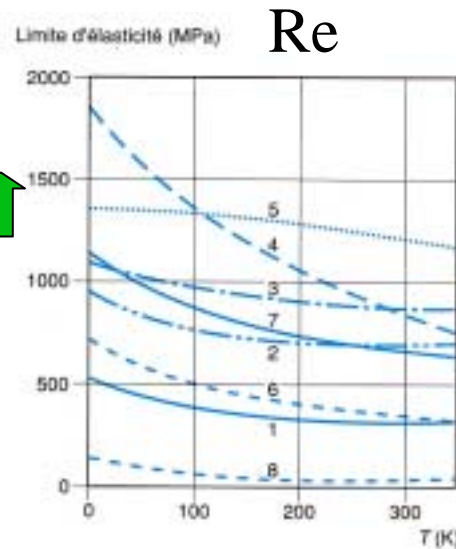
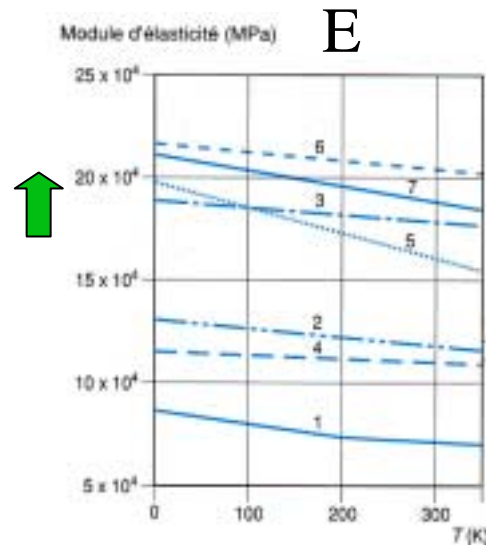


Propriétés mécaniques

Exemple de courbes de traction en fonction de T :



Propriétés mécaniques



- 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

Techniques de l'Ingénieur B 2 382

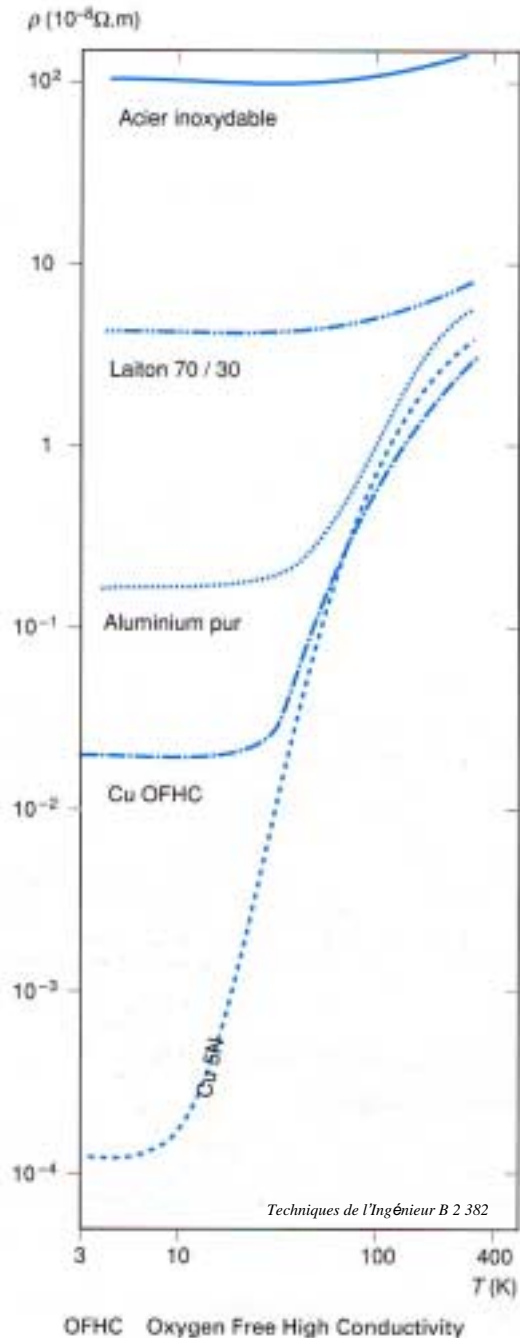
- les modules d'élasticité varient peu avec la température (meilleur à BT)

- 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 (test de Charpy).

- limite de fatigue augmente à basse température (cycles de fatigue)



Propriétés électriques

Résistivité électrique ρ

Liée au libre parcours moyen des électrons dans le matériau (comme la conductivité thermique), la résistivité électrique est régie par les vibrations du réseau et les défauts ou les impuretés du cristal .

Définie par la relation :

$$R = \rho \cdot l / s$$

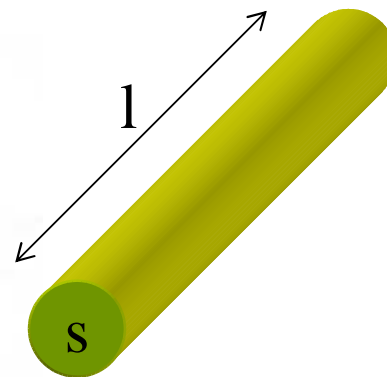
où

ρ résistivité en $\Omega \cdot m$.

R résistance électrique en Ω

l longueur du conducteur en m

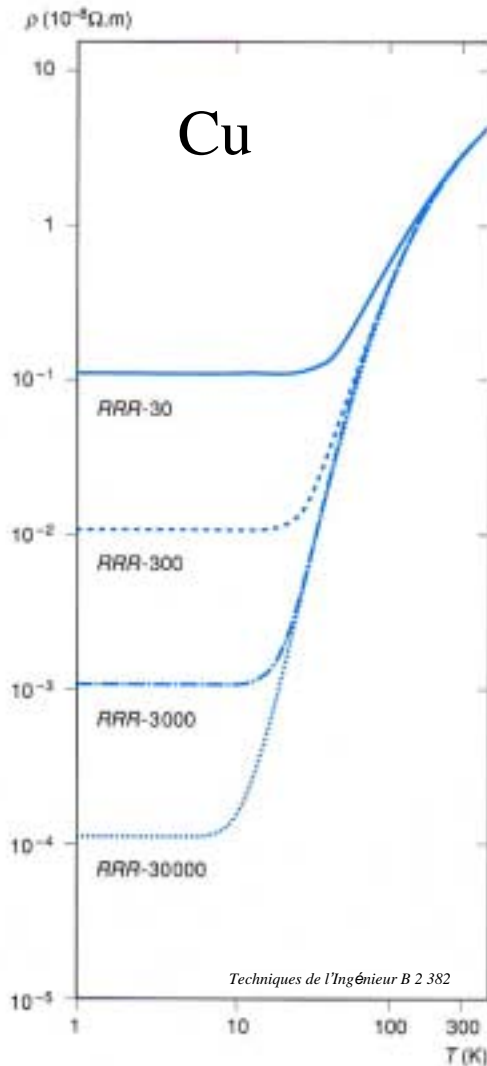
s section du conducteur en m^2



R : A très basses températures (qq K), ρ tend vers une limite non nulle qui est fonction de la pureté du matériau.

R : Les semi-conducteurs voient leur résistance augmenter à basses températures => cas d'application à la thermométrie basse température

Propriétés électriques



Résistivité résiduelle et RRR

Si la résistivité à température ambiante n'est fonction que de la nature du métal, par contre à basse température, la résistivité limite dépend beaucoup de la pureté du métal. L'exemple du cuivre montre cette variation en prenant comme critère le RRR définie par :

$$RRR = \rho (273 \text{ K}) / \rho (4,2 \text{ K})$$

Le RRR (Rapport de Résistivité Résiduelle) est une indication de pureté souvent utilisée en métallurgie pour caractériser la qualité du métal (grand RRR signifiant une faible quantité de défauts et d'impuretés...).

Pour le cuivre et l'aluminium « ordinaires », le RRR varie respectivement de 5 à 150. Dans le cas de métaux très purs, il peut monter à plusieurs milliers.

Propriétés diélectriques et d'isolation électrique

Permittivité électrique

Diminue avec la température dans la cas des matériaux polaires et stables pour les autres.

Facteur de perte électrique $\tan\delta$

Décroit de manière significative avec la baisse de température.

Résistivité des isolants

Celle des isolants augmente de manière exponentielle avec la baisse de température

⇒ Elle est suffisamment élevée pour ne pas en tenir compte dans la conception des équipements électriques travaillant à basses températures.

⇒ Cas des semi-conducteurs : isolant à 0 K, $\rho \nearrow$ quand $T \square$ et ρ à basse T° est fonction des impuretés (ajustable pour thermométrie)

Rigidité électrique

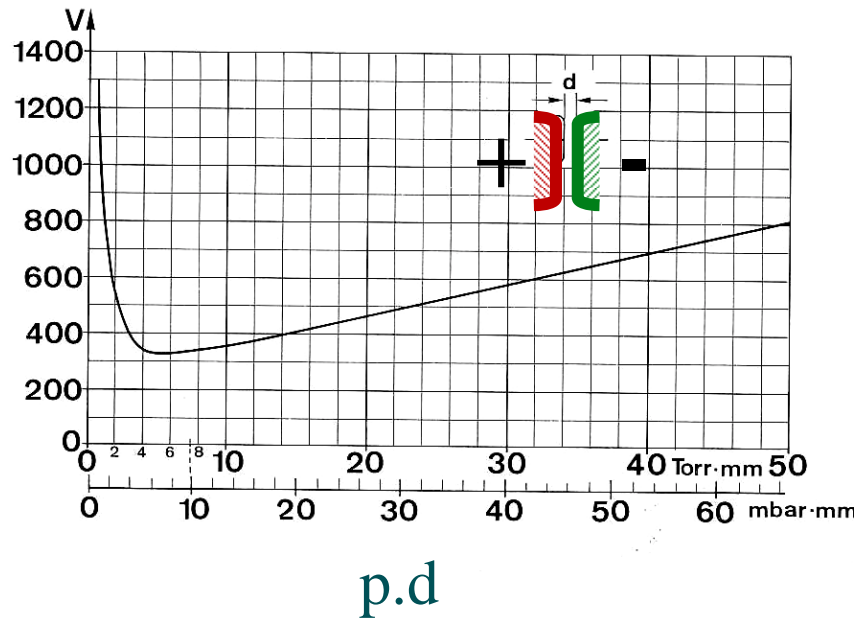
S'améliore à basse température pour les isolants solides.

Risque de claquage des gaz à basse pression

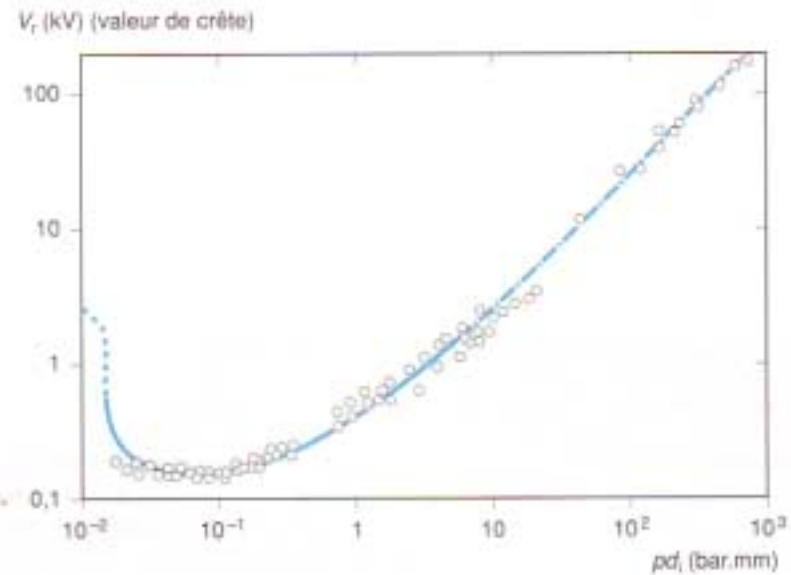
(ex : He à qq mbars $V_c \approx 100$ V à 20° C)

Tension de claquage dans les gaz

Courbe de Paschen
de l'air à 20°C



Courbe de Paschen
de l'hélium à 20°C



- Sensibilité à la pression.
- Minimum à éviter ou à rechercher !
- **Diminution de la tension de claquage avec la baisse de la température ($T^\circ \downarrow \Leftrightarrow$ densité $\uparrow \Leftrightarrow P \uparrow$)**

Adresses utiles pour quelques propriétés de matériaux aux basses températures

**NATIONAL INSTITUT OF STANDARDS AND TECHNOLOGY
(NIST Boulder USA)**

Cryogenics materials properties

- **<http://cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/material%20properties.htm>**

Cryogenics Technologies Group

| |
|-------------------------------------|
| Staff |
| Group Information |
| Publications |
| Cryocoolers |
| Material Properties |
| Fluid Properties |
| About Cryogenics |
| Links of Interest |
| Home |

Material Properties

[Aluminum 1100 \(UNS A91100\)](#)

[Aluminum 3003-F \(UNS A93003\)](#)

[Aluminum 5083-O \(UNS A95083\)](#)

[Aluminum 6061-T6 \(UNS A96061\)](#)

[Aluminum 6063-T5 \(UNS A96063\)](#)

[Apiezon N](#)

[Balsa](#)

[Beechwood/phenolic](#)

[Beryllium](#)

[Beryllium Copper](#)

[Brass \(UNS C2600\)](#)

[Copper \(OFHC\) \(UNS C10100/ C10200\)](#)

[Fiberglass Epoxy G-10](#)

[Glass Fabric/polyester](#)

[Glass mat/epoxy](#)

[Inconel 718 \(UNS N107718\)](#)

[Lead](#)

[Molybdenum](#)

[Nickel Steel Fe 2.25 Ni](#)

[Nickel Steel Fe 3.25 Ni \(UNS S20103\)](#)

[Nickel Steel Fe 5.0 Ni \(UNS S20153\)](#)

[Nickel Steel Fe 9.0 Ni \(UNS S21800\)](#)

[Platinum](#)

[Polyamide \(Nylon\)](#)

[Polyethylene Terephthalate \(Mylar\)](#)

[Polyimide \(Kapton\)](#)

[Polystyrene](#)

[Polyurethane](#)

[Polyvinyl Chloride \(PVC\)](#)

[Sapphire](#)

[Stainless Steel 304 \(UNS S30400\)](#)

[Stainless Steel 304L \(UNS S30403\)](#)



CRYOGENIC TECHNOLOGIES GROUP

Material Properties: 316 Stainless (UNS S31600)

Thermal Conductivity
 Specific Heat
 Data Available: [Young's Modulus](#)
[Linear Expansion](#)

| | Thermal Conductivity | Specific Heat 1 | Specific Heat 2 |
|------------------------------------|----------------------|-----------------|-----------------|
| UNITS | W/(m-K) | J/(kg-K) | J/(kg-K) |
| a | -1.4087 | 12.2486 | -1879.464 |
| b | 1.3982 | -80.6422 | 3643.198 |
| c | 0.2543 | 218.743 | 76.70125 |
| d | -0.6260 | -308.854 | -6176.028 |
| e | 0.2334 | 239.5296 | 7437.6247 |
| f | 0.4256 | -89.9982 | -4305.7217 |
| g | -0.4658 | 3.15315 | 1382.4627 |
| h | 0.1650 | 8.44996 | -237.22704 |
| i | -0.0199 | -1.91368 | 17.05262 |
| data range | 4-300 | 4-300 | 4-300 |
| equation range | 1-300 | 4-50 | 50-300 |
| curve fit % error relative to data | 2 | 2 | 2 |

To view a **thermal conductivity** plot
[Click here](#)

To view a **specific heat** plot
[Click here](#)

Curve fit equation of the form:

$$\log_{10} y = a + b(\log_{10} T) + c(\log_{10} T)^2 + d(\log_{10} T)^3 + e(\log_{10} T)^4 + f(\log_{10} T)^5 + g(\log_{10} T)^6 + h(\log_{10} T)^7 + i(\log_{10} T)^8$$

Solves as:

$$y = 10^{a + b(\log_{10} T) + c(\log_{10} T)^2 + d(\log_{10} T)^3 + e(\log_{10} T)^4 + f(\log_{10} T)^5 + g(\log_{10} T)^6 + h(\log_{10} T)^7 + i(\log_{10} T)^8}$$

Where: Coefficients a - i are summarized in the appropriate table and T is the temperature in K (x-axis), and y is the property to solve for.

References for this Material

| | Young's Modulus | Young's Modulus | Linear expansion |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|---|
| Units | GPa | GPa | $[(L-L_{293})/L_{293}] \times 10^5$ unitless, eg. m/m |
| a | 2.084729E2 | 2.079488E2 | -2.9554E2 |
| b | -1.358965E-1 | 7.394241E-2 | -3.9811E-1 |
| c | 8.368629E-3 | -9.627200E-4 | 9.2683E-3 |
| d | -1.381700E-4 | 2.845560E-6 | -2.0261E-5 |
| e | 6.831930E-7 | -3.240800E-9 | 1.7127E-8 |
| T_{low} (K) | | | 23 |
| f> | | | -300.04 |
| data range (K) | 5-60 | 48-294 | 4-300 |
| equation range (K) | 8-50 | 50-294 | 4-300 |
| curve fit % error relative to data | 1 | 1 | 5 |

To view a
Young's Modulus plot
Click here

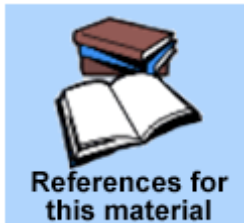
To view a
linear expansion plot
Click here

equation of the form:

$$y = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 \quad >T \geq T_{low}$$

$$y = f \quad T < T_{low}$$

solves as expected: Where: Coefficients *a-e* are summarized in the appropriate table and *T* is the temperature in K (x-axis), and *y* is the property to solve for.



[Return to Material Properties Index Page](#)

Autre source numérique CRYOCOMP:

The CryoComp 4 software
Eckels Engineering Inc.
3322 Ebenezer Chase Drive
Florence, SC 29501
USA

Revendu par CRYOFORUM en France <http://www.cryoforum.com/>

Properties include:

- * **specific heat**
 - * **thermal conductivity and its integral**
 - * **thermal contraction**
 - * **electrical resistivity**
 - * **enthalpy**
 - * **thermal diffusivity**
 - * **magneto-resistance of copper and aluminum**
-
- * 1020 and 4340 steels
 - * 304 stainless steel
 - * 9 pct. Nickel steel
 - * aluminum
 - * aluminum alloys 6061-T6, 7075-T6, 5083-T0
 - * Apiezon "N" grease
 - * beryllium
 - * brass
 - * carbon reinforced epoxy plastic
 - * Constantan
 - * copper
 - * Cu-Ni alloy
 - * epoxy
 - * G-10 plastic
 - * pyrex and quartz glasses
 - * gold
 - * high temperature superconductors
 - * HDPE
 - * Inconel
 - * indium
 - * invar
 - * lead
 - * Lexan
 - * LDPE
 - * micarta
 - * monel
 - * NbTi
 - * nylon
 - * Nylon 6/6
 - * PbSn solder
 - * PC film
 - * PET
 - * PET film
 - * phosphor bronze
 - * polyethylene
 - * sapphire
 - * silver
 - * Styrafoam
 - * teflon
 - * tin
 - * titanium and Ti-6Al4V alloy
 - * YBCO

Cryogénie

Transferts thermiques

Mise en œuvre

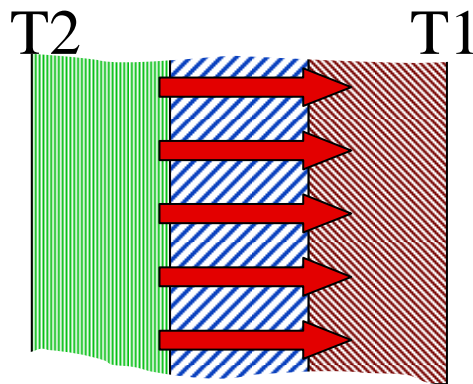
Exemples :

- **Bobine supra B0 ATLAS**

- **H1 calo argon**
(séquence vidéo)

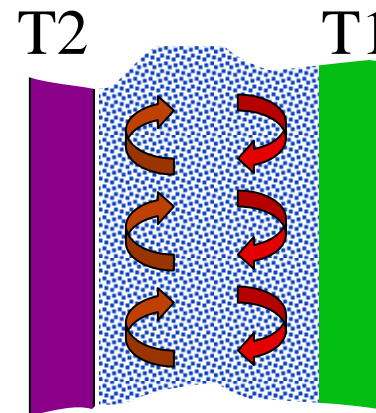
Transferts thermiques

Trois modes de transfert de chaleur sont possibles (conduction, convection, rayonnement). Dimensionner un système travaillant à basse température, c'est être capable d'évaluer l'importance des flux de chaleur se propageant par ces trois modes.



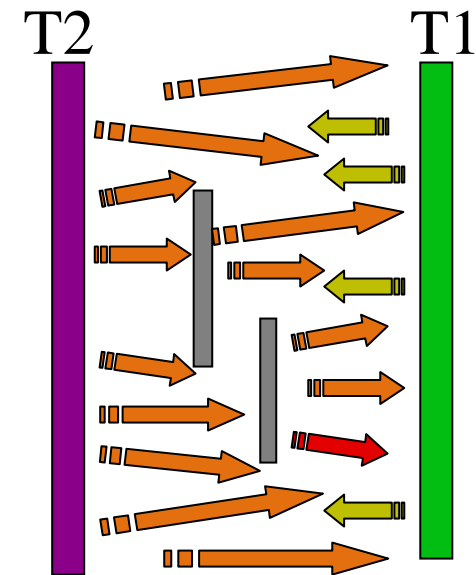
Conduction :

- solide
- gaz
- liquide



Convection :

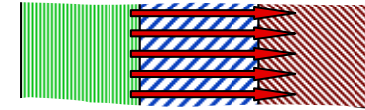
- gaz
- liquide
- *naturelle*
- *forcée*



Rayonnement :

- pas de contact
- dès que $T2 \neq T1$ et cheminement lumière possible

Conduction



Transfert de chaleur à l'intérieur de la matière sans transfert de masse.

Loi générale de Fourier ($W = -k.s.grad T$) => le flux de chaleur P traversant la section s sous l'effet du gradient de température est d'abord lié à la nature du matériau c'est à dire sa conductivité thermique et sa géométrie (section et longueur).

Conduction très variable dans les solides.

Matériaux à haute conductivité => pour avoir une bonne homogénéité ou un bon contact thermique (Cu, Al...).

Matériaux à faible conductivité => diminuer les apports de chaleur. (Inox , Laiton, All Ti, synthétique,...)

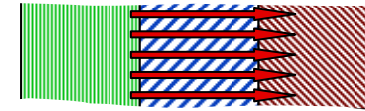
Conduction moyenne dans liquides cryogéniques. Sauf l'hélium superfluide ($T < 2,17 K$) qui fait exception. La conductivité thermique "équivalente" dans l'hélium superfluide ("équivalente" car fonction du flux de chaleur) est énorme et peut être largement supérieure ($> \times 1000$) à celle du cuivre dans les mêmes conditions de température, de flux thermique et de géométrie.

Faible conduction dans les gaz statiques.

Pour un gaz parfait, indépendante de la pression p et croît avec $T^{1/2}$.

Par contre, la conduction « moléculaire » d'un gaz à faible pression (mauvais vide d'isolement dans les cryostats) $\propto P \cdot (T_2 - T_1)$ (ex : He à 10^{-2} mbars => $1W/m^2$ entre 80 et 4 K)

Conduction



Résistance thermique de contact :

$$R_{th} = \Delta T \cdot S / W$$

où ΔT est l'écart de T° entre les parois (K),

S la surface de contact (m²)

et W la puissance qui transite dans le contact (Watts)

Dans un assemblage à froid, elles peuvent rapidement engendrer des écarts de température du même ordre de grandeur que ceux dans les matériaux eux-mêmes.

Fonction (surface, état de surface, nature des matériaux, force d'appui F, présence d'un liant thermique).

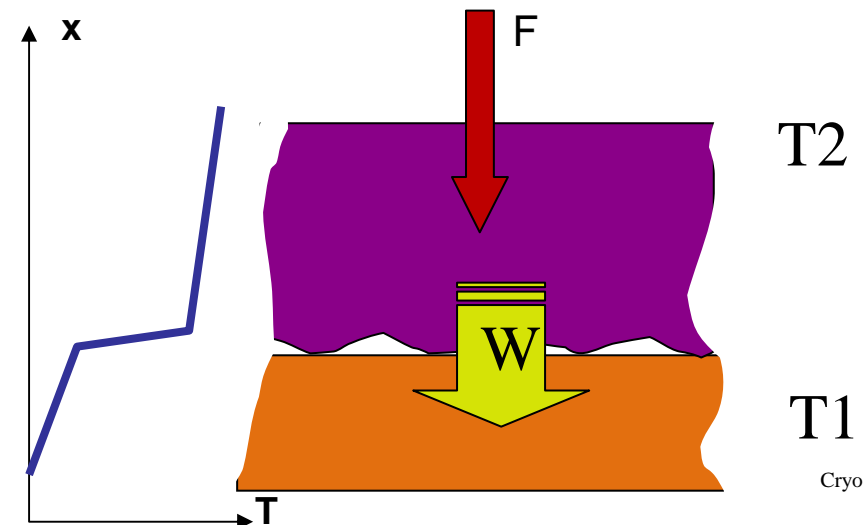
Remèdes :

Serrage important

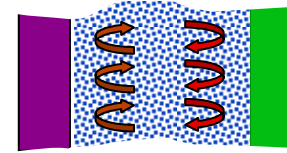
Liant thermique pour éviter le vide entre paroi (pâte chargée, film indium,...)

Matériau malléable

Grande surface de contact



Convection



Transfert de chaleur par déplacement de matière dans un fluide.

Généralement, on pose la puissance thermique W échangée :

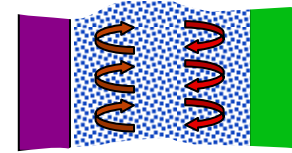
$$W = h_c \cdot s \cdot (T_p - T_f) \quad \text{où}$$

h_c coefficient de convection ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
 s surface d'échange
 T_p température de paroi
 T_f température du fluide loin de la paroi

- **convection naturelle** lorsque le déplacement du fluide est une conséquence directe de la différence de masse volumique due à la différence de température dans le fluide (rouleaux de convection, thermosiphon...).
- **convection forcée** quand le déplacement du fluide est provoqué par une action extérieure (pompe, ventilateur...).

Selon le choix de convection et la nature du fluide, le coefficient h_c variera de qq $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ à plusieurs milliers de $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ce qui réduira l'écart de température entre fluide et paroi.

Convection



Evaluation du coefficient h grâce au calcul du nombre de Nusselt

$$\mathbf{Nu = h.l / k}$$

Nu : Nombre de Nusselt caractéristique du transfert thermique
(comparaison de l'échange par convection avec celui de la simple conduction du fluide)

h : coefficient d'échange ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)

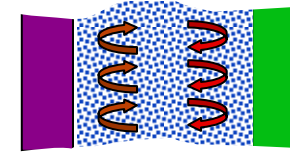
l : grandeur géométrique caractéristique dans l'échange (diamètre d'un tube, hauteur d'une paroi verticale, distance entre plaque...) (m)

k : conductibilité thermique du gaz ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

Lois semi-empiriques décrivant le nombre de Nusselt selon les géométries

$$Nu = \text{fonction}(Re, Pr, Gr, \text{géométries}...)$$

Convection naturelle



convection naturelle :

Les nombres caractéristiques dans le champ de gravité sont :

nombre de Grashof

$$Gr = l^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \alpha_p \cdot \Delta T / \eta^2$$

où l est la dimension caractéristique du corps (\emptyset d'un cylindre horizontal, hauteur d'un plan ou d'un cylindre vertical...), ρ la densité du gaz, α_p coefficient de dilatation à pression constante et η la viscosité dynamique du fluide.

C'est la comparaison des forces ascensionnelles avec les forces de viscosité.

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT}$$

nombre de Prandtl

$$Pr = C_p \cdot \eta / k$$

où k est la conductivité thermique du fluide, et C_p la capacité calorifique à p constante. C'est la comparaison du mouvement de chaleur (la diffusivité du fluide $\lambda / \rho \cdot C_p$) avec le mouvement de la matière (viscosité cinématique η / ρ).

nombre de Nusselt

$$Nu = h_c \cdot l / k = a \cdot (Gr \cdot Pr)^n$$

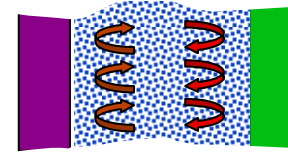
où h_c est le coefficient d'échange exprimé en $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

En général, $(Gr \cdot Pr)$ (nombre de Rayleigh Ra) est compris entre $5 \cdot 10^2$ et $2 \cdot 10^7$.
Dans ce cas, $a = 0,54$ et $n = 0,25$.

Si $(Gr \cdot Pr) < 10^{-3}$, on retrouve simplement une conduction pure dans le fluide.

A.N : $hc \approx 7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ \Leftrightarrow valeur usuelle en convection naturelle !!

Convection forcée



convection forcée :

L'échange est fonction de l'écoulement (profil des vitesses)

La classification des écoulements se fait par le calcul du **nombre de Reynolds**:

$$Re = \rho \cdot v \cdot D / \eta$$

où ρ est la densité (kg/m^3), v la vitesse, D la grandeur caractéristique (\emptyset, \dots) et η la viscosité dynamique ($\text{Pa}\cdot\text{s}$).

Si $Re < 2000$, on est en régime laminaire (*peu recommandé*)

Si $Re > 2000$ on entre dans les régimes turbulents.

Dans ce dernier cas par exemple, et pour des tubes longs ($L/\emptyset > 60$), l'expression de Dittus-Boelter, appelée aussi formule de Colburn donne :

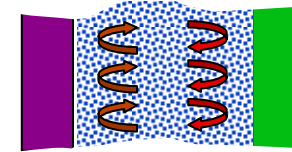
$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad \text{pour } 10^4 < Re < 1,2 \cdot 10^5$$

et $Nu = h \cdot D / k$, h étant le coefficient d'échange en convection forcée

A.N : $hc \approx$ de 20 à 500 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ dans les gaz

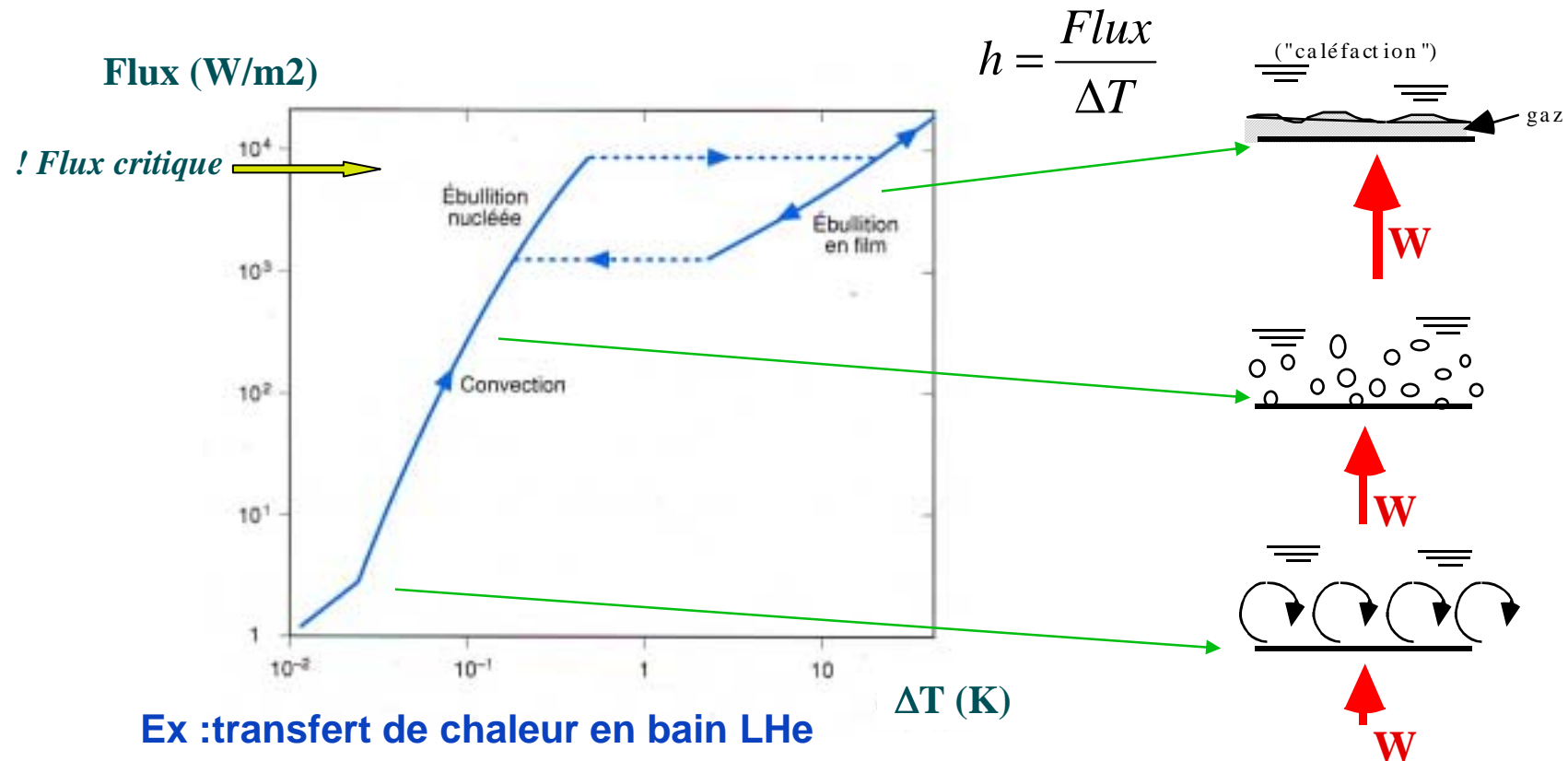
$hc \approx$ de 500 à 10000 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ dans les liquides

Convection en fluide diphasique

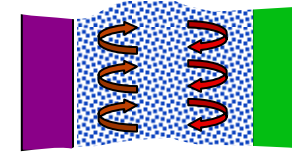


Exemple de l'ébullition en bain

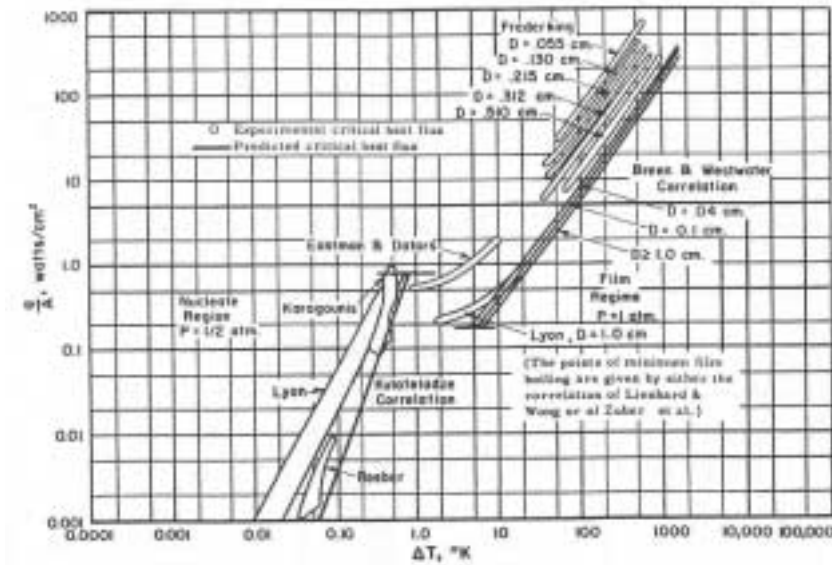
Les différents régimes que l'on rencontre lorsque l'on évacue de la chaleur d'une surface vers un bain. A chaque régime va correspondre un coefficient d'échange type. Le flux critique est le flux de chaleur à partir duquel un film de gaz se positionne entre le bain et la plaque chaude. Dès lors, ce film se comporte comme un isolant en limitant l'évacuation de la chaleur et menant à des écarts de température élevés.



Convection en fluide diphasique

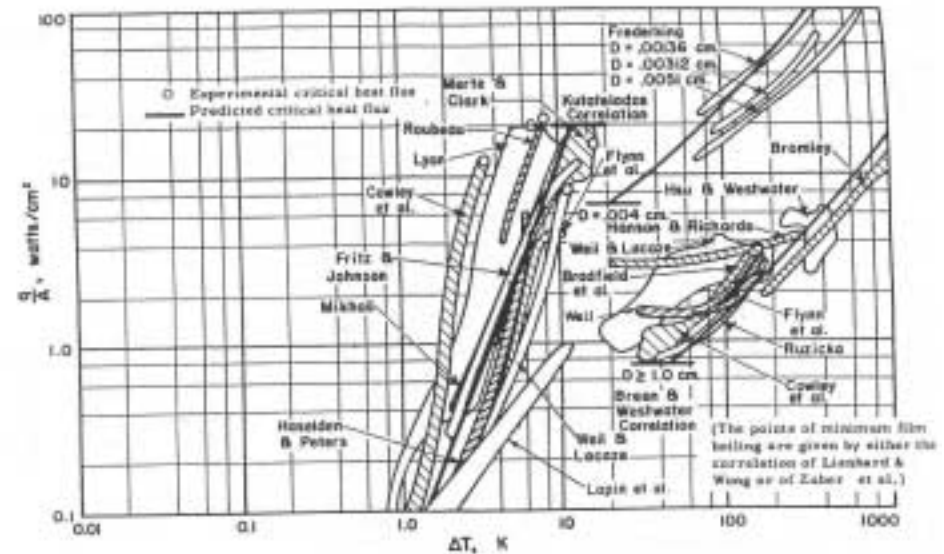


- Ebullition nucléée => h très grand (ex : 30000 W/m².K pour l'eau)
- Flux critique => augmentation brutale du ΔT = surchauffe paroi



Hélium liquide à 1 bar
 $\Phi_c \approx 10000 \text{ W/m}^2$ et $\Delta T_c \approx 10 \text{ K}$

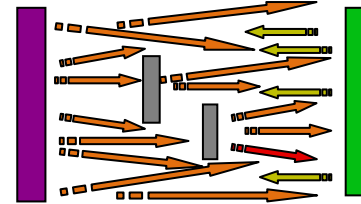
Hydrogène liquide à 1 bar
 $\Phi_c \approx 40000 \text{ W/m}^2$ et $\Delta T_c \approx 20 \text{ K}$



Azote liquide à 1 bar
 $\Phi_c \approx 100000 \text{ W/m}^2$ et $\Delta T_c \approx 100 \text{ K}$

Oxygène liquide à 1 bar
 $\Phi_c \approx 100000 \text{ W/m}^2$ et $\Delta T_c \approx 60 \text{ K}$

Rayonnement



C'est le transfert de chaleur qui se fait sans contact ni déplacement de matière.

La puissance thermique émise par un **corps noir** (le parfait radiateur) s'écrit :

$$W_r = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

où

W_r est la puissance rayonnée en Watts

A la surface de l'émetteur

T sa température

σ la constante de Stephan = **$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$**

Pour un **corps gris**

$$W_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$

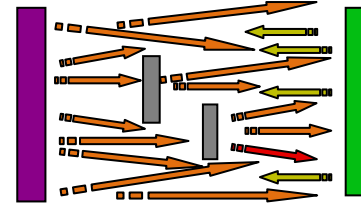
où

ε est l'émissivité du corps ($\varepsilon = f(\lambda, T)$)

et

λ la longueur d'onde émise

Rayonnement



$$\text{Emissivité } \varepsilon = \frac{\text{puissance rayonnée par la surface réelle}}{\text{puissance rayonnée par le corps noir à la même température}}$$

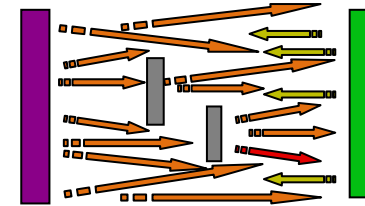
Émissivités de quelques surfaces

| | 300 K | 78 K | 4,2 K |
|-----------------------|-------|-------|-------|
| Or | 0,02 | 0,01 | |
| Argent | 0,02 | 0,01 | 0,005 |
| Etain | 0,05 | 0,012 | 0,013 |
| Aluminium brut | 0,25 | 0,12 | 0,07 |
| Aluminium poli | 0,20 | 0,10 | 0,06 |
| Cuivre poli | 0,10 | 0,06 | 0,02 |
| Acier inox | 0,20 | 0,12 | 0,10 |
| Verre | 0,8 | | |
| Eau, peau | 0,9 | | |

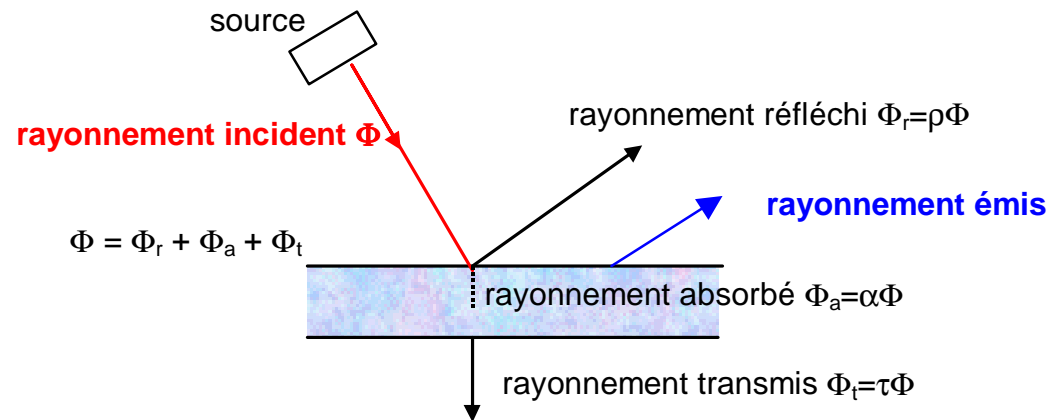
$\varepsilon \downarrow$ quand $T \downarrow$

$\varepsilon \uparrow$ avec la pollution des surfaces
(oxydation, impuretés, traces de graisse)

Rayonnement



Puissances absorbée, réfléchi et transmise



Conservation de l'énergie :

$$1 = \rho + \alpha + \tau$$

Loi de Kirchhoff

$$\alpha = \varepsilon$$

absorptivité

émissivité

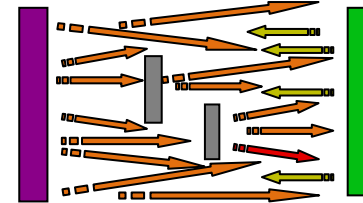
$$\varepsilon = 1 - \rho \quad (\text{milieux opaques})$$

$$\varepsilon \downarrow \Leftrightarrow \rho \uparrow$$

Loi de Kirchhoff

Pour un corps gris : $\varepsilon = \alpha$
(pour T et λ , émissivité = absorption)

Rayonnement



Bilan de l'ensemble des rayonnements émis, absorbés et réfléchis par deux parois

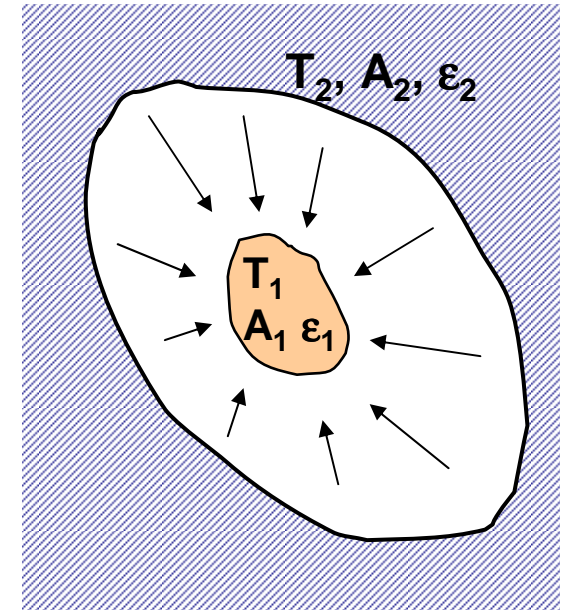
Hypothèses : surfaces opaques ($\tau = 0$), grises (ε indépendant de λ) à émission et réflexion diffuses et isotropes

Puissance reçue par la paroi de surface A_1 à la température T_1 en regard d'une paroi de surface A_2 à la température T_2 :

$$W_{rad} = \sigma \cdot F_{12} \cdot A_1 \cdot (T_2^4 - T_1^4)$$

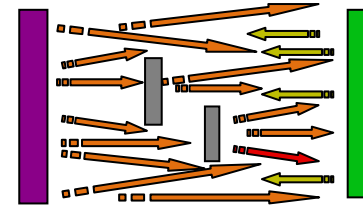
Exemples : F_{12} : facteur d'émissivité = $f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, A_1, A_2)$

- cas de plaques parallèles et voisines ($A_1 \sim A_2$) : $F_{12} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_2 + (1 - \varepsilon_2) \varepsilon_1}$
- cas de longs cylindres coaxiaux ($L \gg R$) : $F_{12} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_2 + \frac{A_1}{A_2} (1 - \varepsilon_2) \varepsilon_1}$
- cas d'émissivités proches et surfaces voisines $F_{12} = \frac{\varepsilon}{2 - \varepsilon}$



Dans le calcul des cryostats où les matériaux ont des émissivités faibles et équivalentes et où les surfaces sont voisines, on utilise souvent en bonne approximation la relation : $W = 0,5 \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_2^4 - T_1^4)$

Rayonnement



A.N :

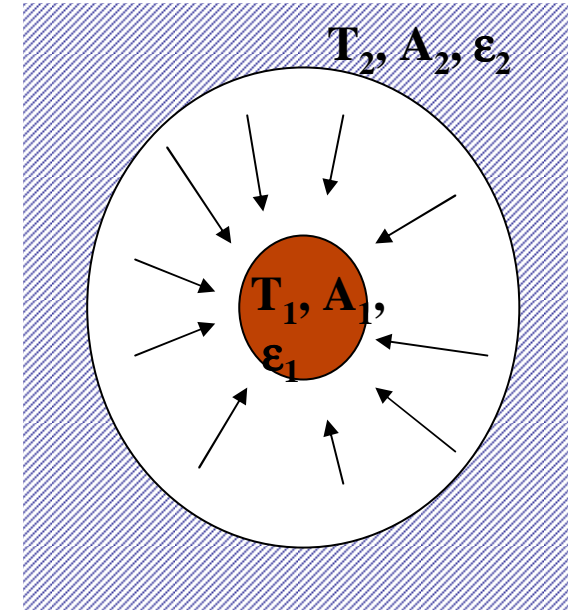
$$A_1=A_2 \quad \epsilon_1 = \epsilon_2$$

entre 300 et 80 K, $W = 45 \text{ W/m}^2$ pour $\epsilon = 0,2$

entre 300 et 4 K, $W = 46 \text{ W/m}^2$

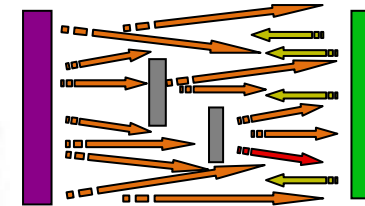
entre 150 et 4 K, $W = 3 \text{ W/m}^2$

entre 300 et 80 K, $W = 4,5 \text{ W/m}^2$ pour $\epsilon = 0,02$
(surface argentée)



Exemples d'émissivité

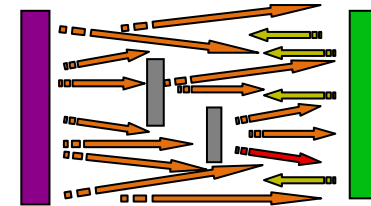
| Métal | T(K) | ϵ_n |
|-------------------------------|------|--------------|
| Or | 300 | 0,02 |
| | 80 | 0,01 |
| Argent | 300 | 0,02 |
| | 80 | 0,01 |
| | 4 | 0,005 |
| Aluminium commercial brut | 300 | 0,25 |
| | 80 | 0,12 |
| | 4 | 0,07 |
| Aluminium poli mécanique | 300 | 0,20 |
| | 80 | 0,10 |
| | 4 | 0,06 |
| Aluminium poli électrolytique | 300 | 0,15 |
| | 80 | 0,08 |
| | 4 | 0,04 |
| Chrome | 300 | 0,08 |
| Cuivre poli mécanique | 300 | 0,10 |
| | 80 | 0,06 |
| | 4 | 0,02 |
| Étain | 300 | 0,050 |
| | 80 | 0,012 |
| | 4 | 0,013 |
| Nickel | 300 | 0,05 |
| | 80 | 0,02 |
| Laiton poli | 300 | 0,03 |
| | 80 | 0,03 |
| | 4 | 0,02 |
| Acier inoxydable 18-8 | 300 | 0,20 |
| | 80 | 0,12 |
| | 4 | 0,10 |



Importance de :

- la nature
- l'état de surface
- un revêtement

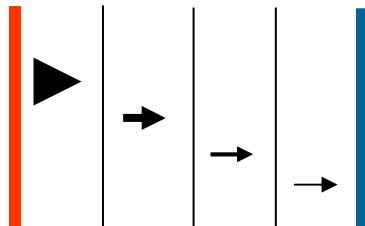
Ecrantage anti-rayonnement



- **Surfaces à émissivité réduite** : Dorure, aluminisation...
- **Interposition d'écrans** : Tous les orifices par lesquels un rayonnement extérieur peut entrer dans une enceinte à basse température doivent être vus sous un angle solide très faible ou être masqués par des pièges à rayonnement (écrans).

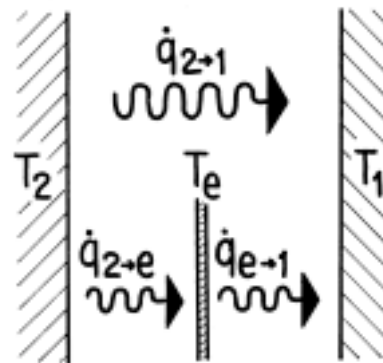
Écrans refroidis

- par circulation d'azote liquide :
réduction d'un facteur $(300/77)^4 = 230$
- par retour de vapeurs d'hélium :
(forte chaleur sensible 1500 J/g de 4,2 K à 300 K)
écran à 60 K/77 K : gain 2.7



Écrans flottants

- plaques isolées thermiquement qui s'équilibrent à des températures intermédiaires



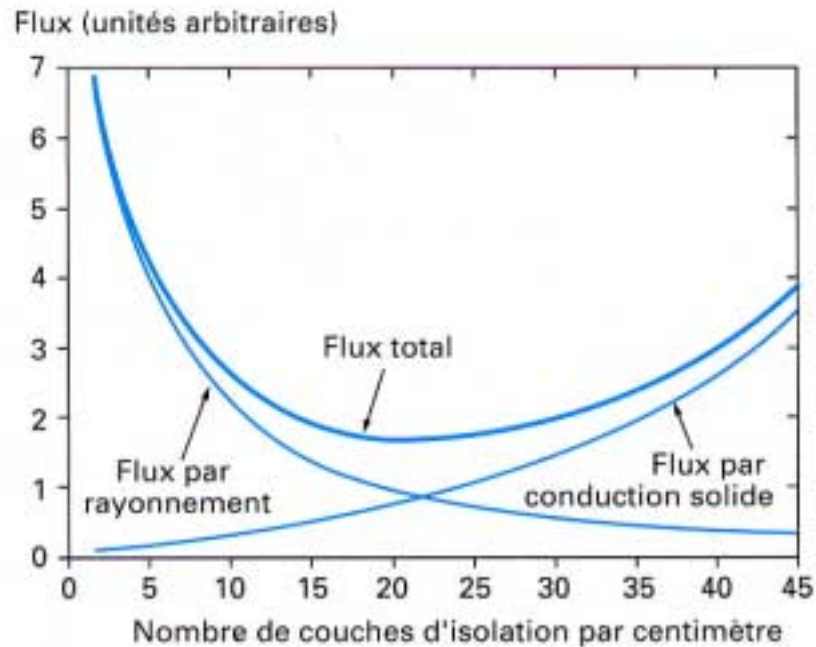
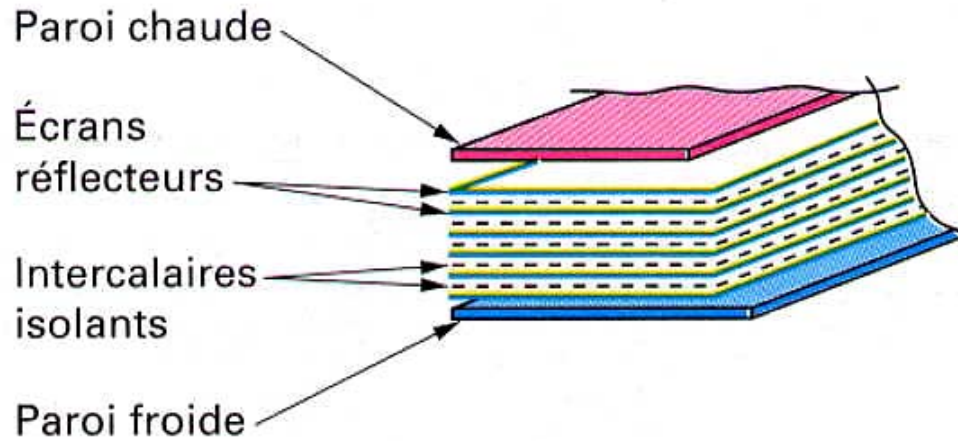
$$\epsilon_{2 \rightarrow e} = \epsilon_{e \rightarrow 1} = \frac{\epsilon_{2 \rightarrow 1}}{2}$$

$$T_e = \sqrt[4]{\frac{T_2^4 + T_1^4}{2}}$$

- écrans multiples :
→ superisolation ...

$$\epsilon_{n \text{ écrans}} \approx \frac{1}{n+1} \cdot \epsilon_{2 \rightarrow 1}$$

Super-isolation



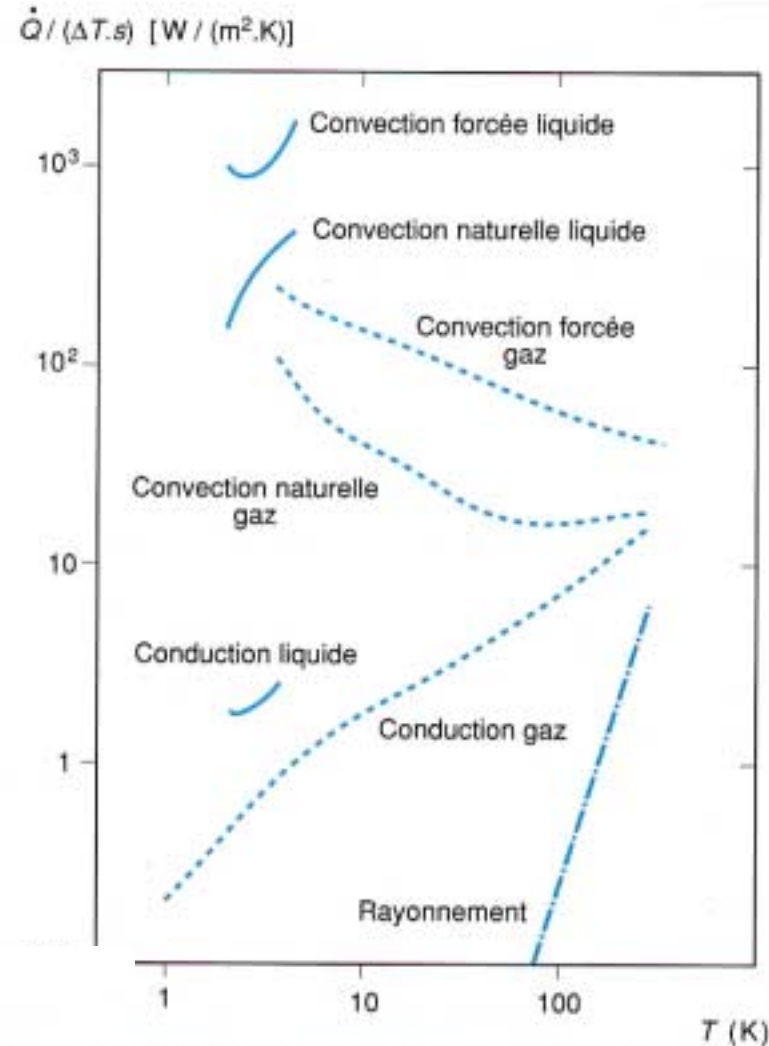
Risque de pertes des performances par compression du matelas (MLI)

Multi Layer Insulation

Techniques de l'Ingénieur B 2 382

Effet de la densité de couche de MLI sur le flux entre deux parois

Comparaison transferts thermiques



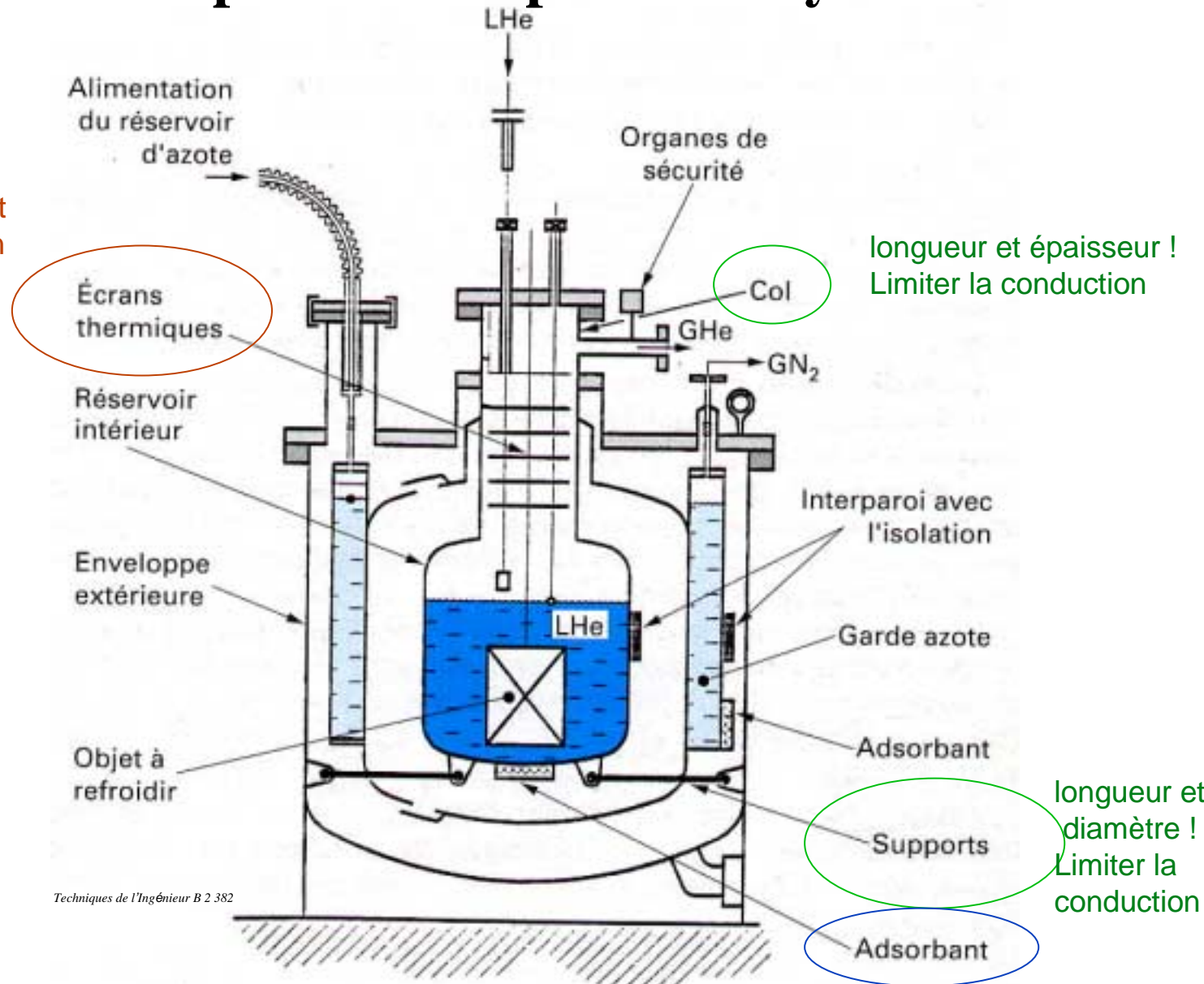
Techniques de l'Ingénieur B 2.382

Fig. 25. – Puissances échangées entre deux surfaces soumises à une différence de température de 1 K, pour une température moyenne T :

- **par rayonnement** entre deux parois,
- **par conduction** dans l'hélium entre deux parois séparées de 1 cm,
- **par convection** dans l'hélium autour d'une tige horizontale de 1 cm de diamètre (convection naturelle et forcée).

Exemple de conception de cryostat

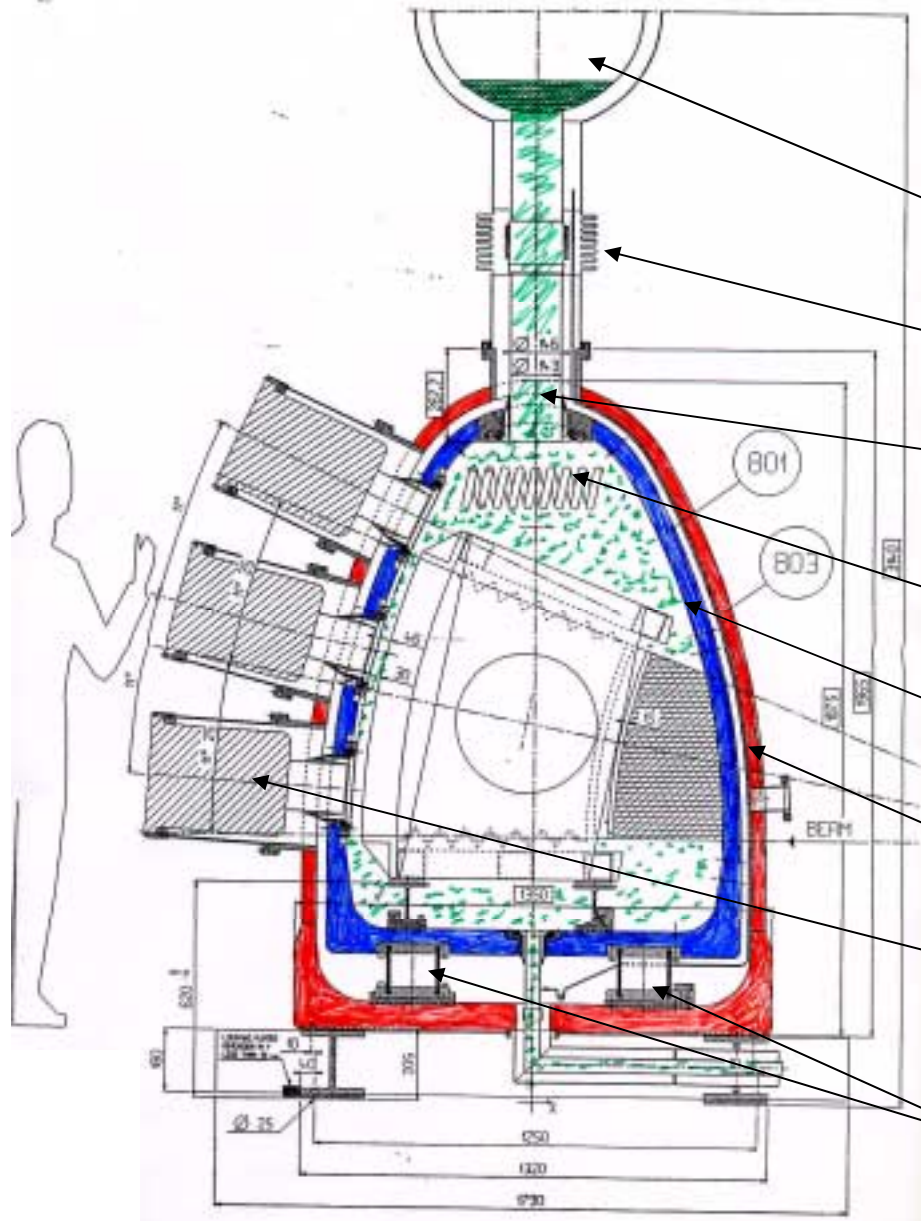
Anti-rayonnement
et anti-convection



Techniques de l'Ingénieur B 2 382

Qualité du vide ! Anti-convection et anti-conduction

Ex de conception de cryostat horizontal



Cryostat de test des éléments
du calorimètre Ar ATLAS

Vase d'expansion

Soufflets de dilatation

Ar liquide

Echangeur de sous-refroidissement

Cuve Ar

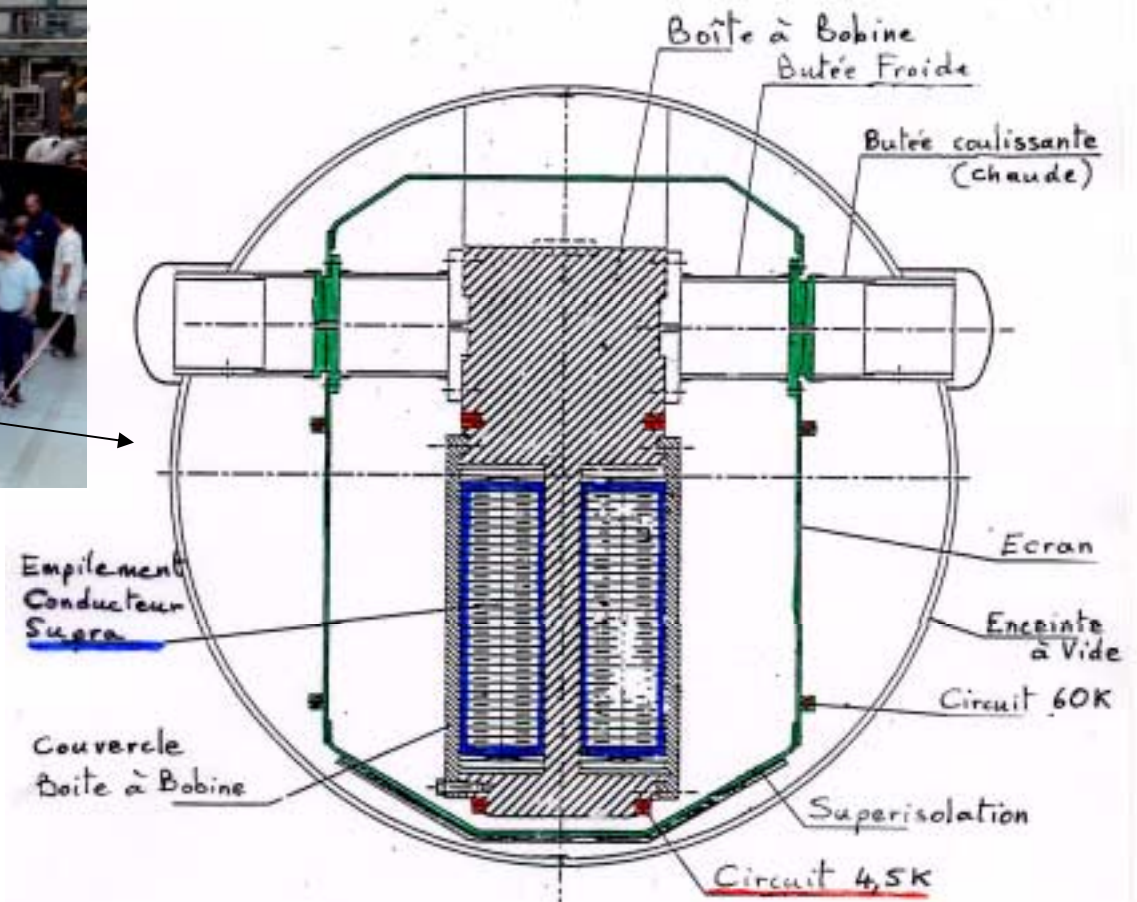
Enceinte à vide Al

Traversées étanches

Supports mécaniques
masse froide (vérépoxy)

Ex de conception d'aimant complexe

Coupe du cryostat d'une bobine toroïdale ATLAS



Ex de montage d'un aimant toroïdal dans son cryostat - maquette B0 pour ATLAS -



Bobinage supraconductrice assemblée et polymérisée
=câble + résine

Ex de montage d'un aimant toroïdal dans son cryostat - maquette B0 pour ATLAS -



Boîte à bobine en Alliage d'aluminium

Ex de montage d'un aimant toroïdal dans son cryostat - maquette B0 pour ATLAS -



Bobine dans Boîte à bobine

Ex de montage d'un aimant toroïdal dans son cryostat - maquette B0 pour ATLAS -



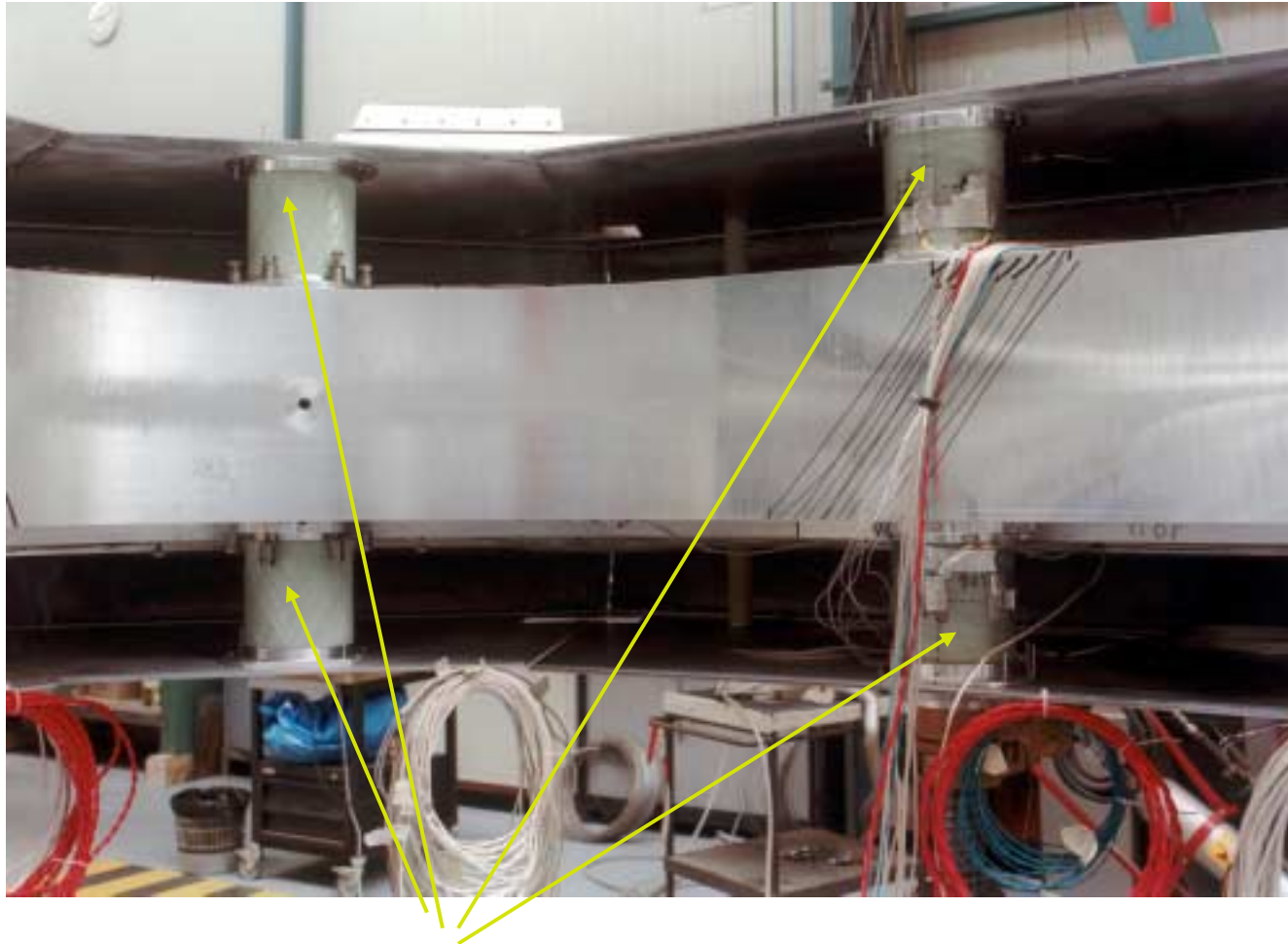
Bobine dans Boîte à bobine refermée et instrumentée

Ex de montage d'un aimant toroïdal dans son cryostat - maquette B0 pour ATLAS -



Boîte à bobine entourée de son écran thermique He « 60 K »

Ex de montage d'un aimant toroïdal dans son cryostat - maquette B0 pour ATLAS -



Détail sur les supports (Vêrépox) d'écran thermique (Al)
entre 4 et 60 K

Ex de montage d'un aimant toroïdal dans son cryostat - maquette B0 pour ATLAS -



Mise en place de la superisolation sur l'écran thermique

Ex de montage d'un aimant toroïdal dans son cryostat - maquette B0 pour ATLAS -



Montage de la masse froide écrantée dans 1/2 enceinte à vide

Ex de montage d'un aimant toroïdal dans son cryostat - maquette B0 pour ATLAS -



Fermeture des 1/2 enceintes à vide

Ex de montage d'un aimant toroïdal dans son cryostat - maquette B0 pour ATLAS -



Transport au CERN

Cryogénie

Mise en oeuvre

**- H1 calo argon
(séquence vidéo)**