

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

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

Propriétés thermiques

Capacité thermique

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.

On peut aussi écrire pour un fluide en mouvement:

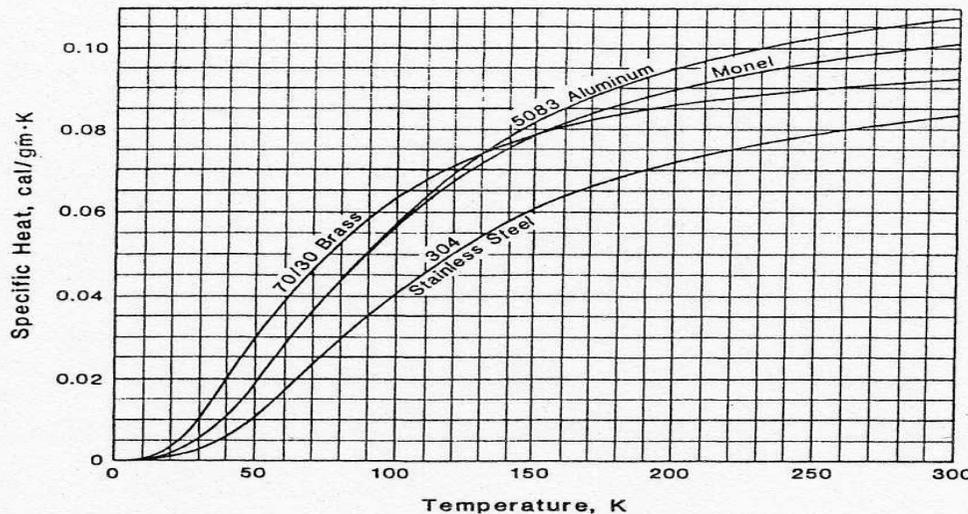
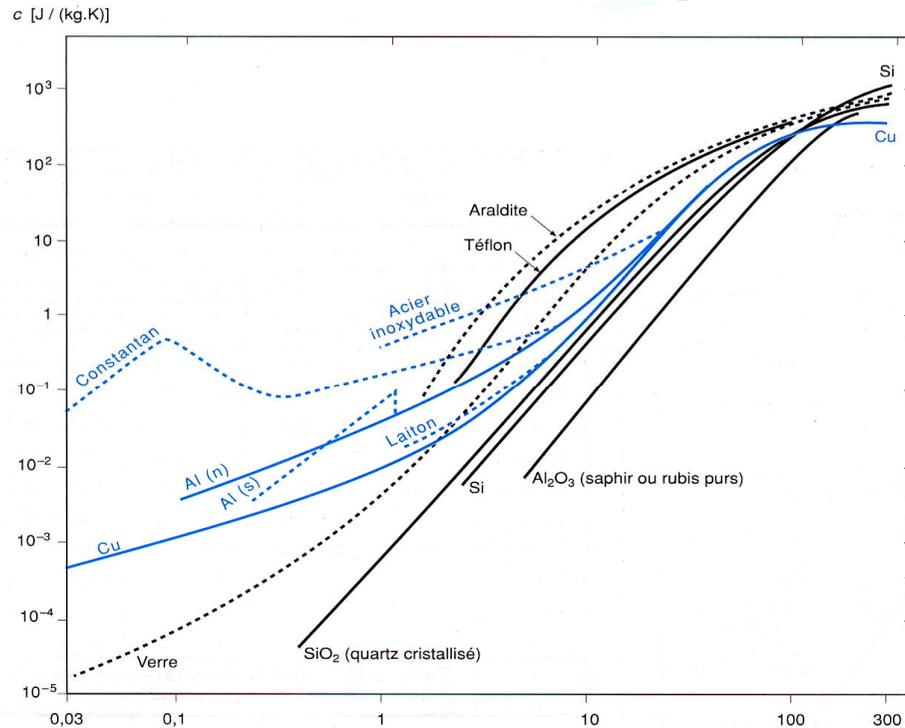
$$P = \dot{m} \cdot C \cdot \Delta T$$

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 .

C s'exprime en $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Appelée aussi capacité calorifique ou chaleur spécifique, elle donne la capacité qu'a le matériau à stocker (ou céder) de la chaleur.

Capacité thermique



En dessous de 100 K, les chaleurs spécifiques chutent **très rapidement** (peu de chaleur à extraire ou à apporter pour descendre ou monter en T°).

Contribution électrons libres
Contribution réseau

En général, $C = \beta(T).T^3 + \gamma T$
et $C \propto T^3$ quand $T < 30$ K (métaux)

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 :

$Q = m.\Delta h$ 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 $J.kg^{-1}$

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

Conductibilité thermique

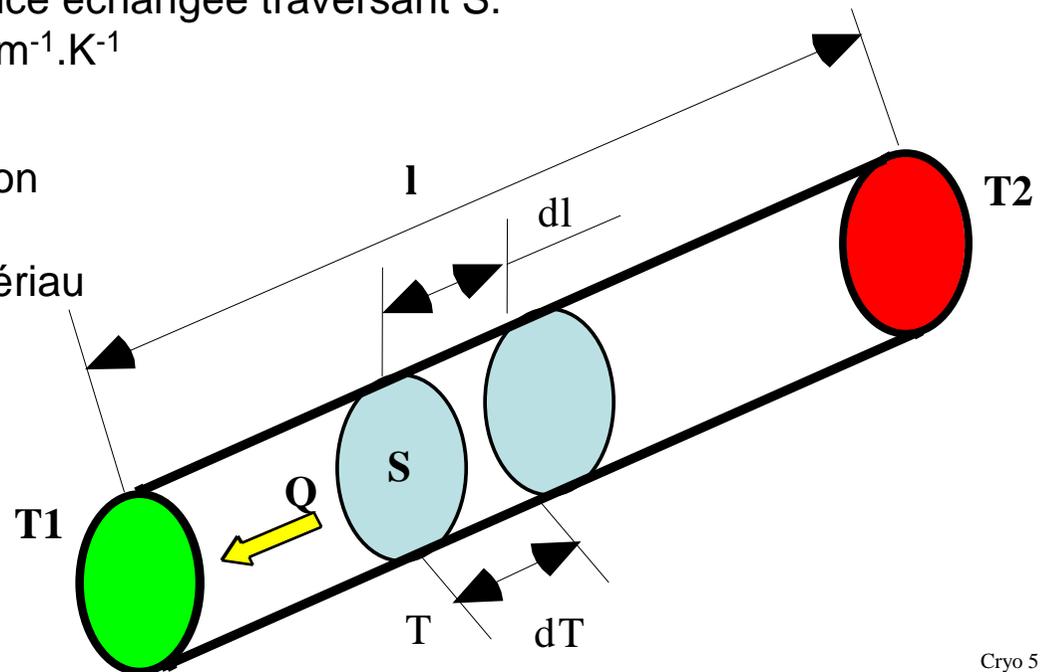
Conductibilité thermique.

C'est la facilité qu'aura un matériau à laisser circuler la chaleur. La conductibilité thermique k 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 $W.m^{-1}.K^{-1}$

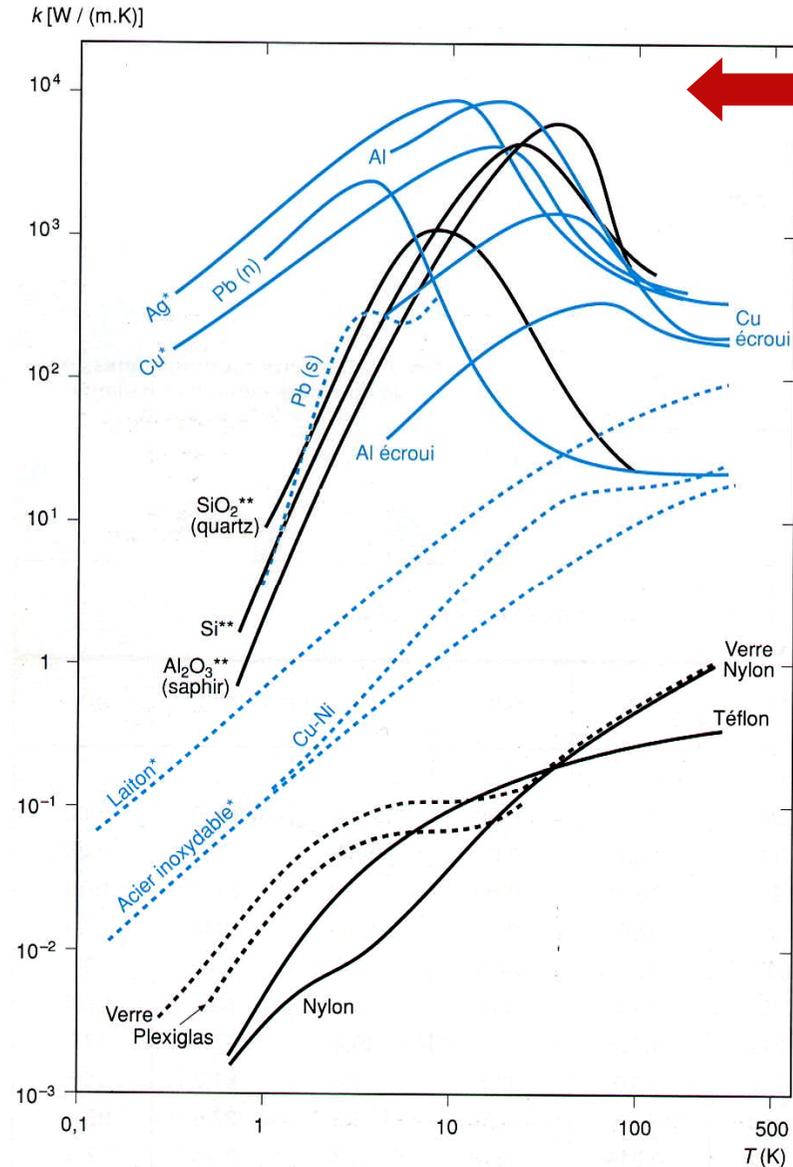
$\int_{T_1}^{T_2} k(T).dT$ = intégrale de conduction
 (courbe ou tabulée)
 propre à chaque matériau



Si $k \approx$ constant (faible écart de T°),
 $Q = S/l \cdot k \cdot (T_2 - T_1)$

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 $\int_{4,2}^T k(T) dT$ pour quelques matériaux.

Matériau	T (K)	6	8	10	15	20	60	80	300
Conducteurs (en W/cm)									
Cuivre extra-pur		166	382	636	1270	1790	2960	3090	4000
Cuivre électroécroui		8,0	19,1	33,2	80,2	140	587	707	1620
Argent		320	670	990	1610	1980	2570	2670	3570
Aluminium extra-pur		73	168	280	600	907	1740	1840	2390
Aluminium du commerce		1,38	3,42	6,07	15,2	27,6	170	232	728
Or		41	93	149	274	364	612	682	1370
Laiton		0,0531	0,129	0,229	0,594	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	1,21	2,20	15,5	22,6	99,6
Monel		0,0235	0,0605	0,112	0,315	0,618	5,23	8,24	52,5
Acier inoxydable		0,0063	0,0159	0,0293	0,0816	0,163	1,98	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	6,69	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 :

S/l réduit par $S \downarrow$ et $l \uparrow$
 \Rightarrow Pertes thermiques $Q \downarrow$



Vanne « chaude »

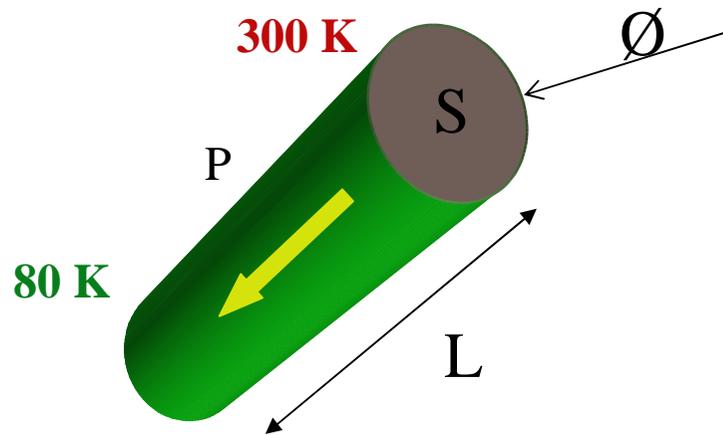


Vanne « froide » (LHe)

Conduction thermique

Exemples :

Cas du barreau



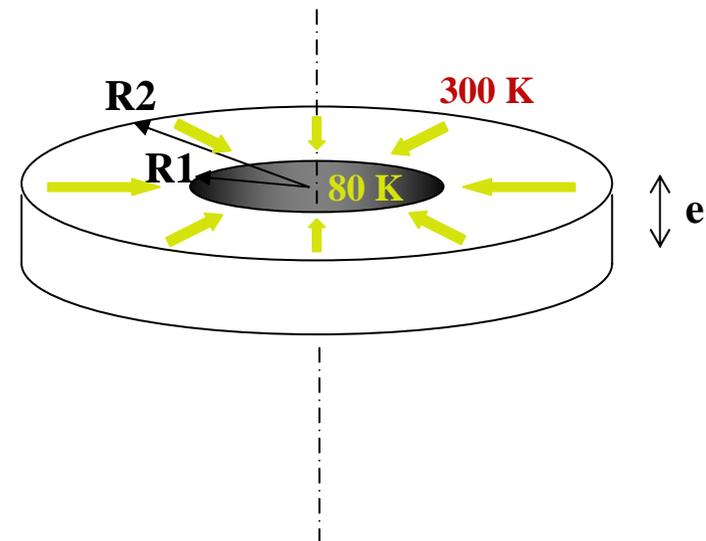
$$P = \frac{S}{L} \int_{80}^{300} k(T) \cdot dT$$

$I_{(80-300)}$
« 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
Ti	7700	3,0
Al :	49600	19,6
Inox :	2711	1,07
Vérépox	150	0,06
Nylon :	75,3	0,03

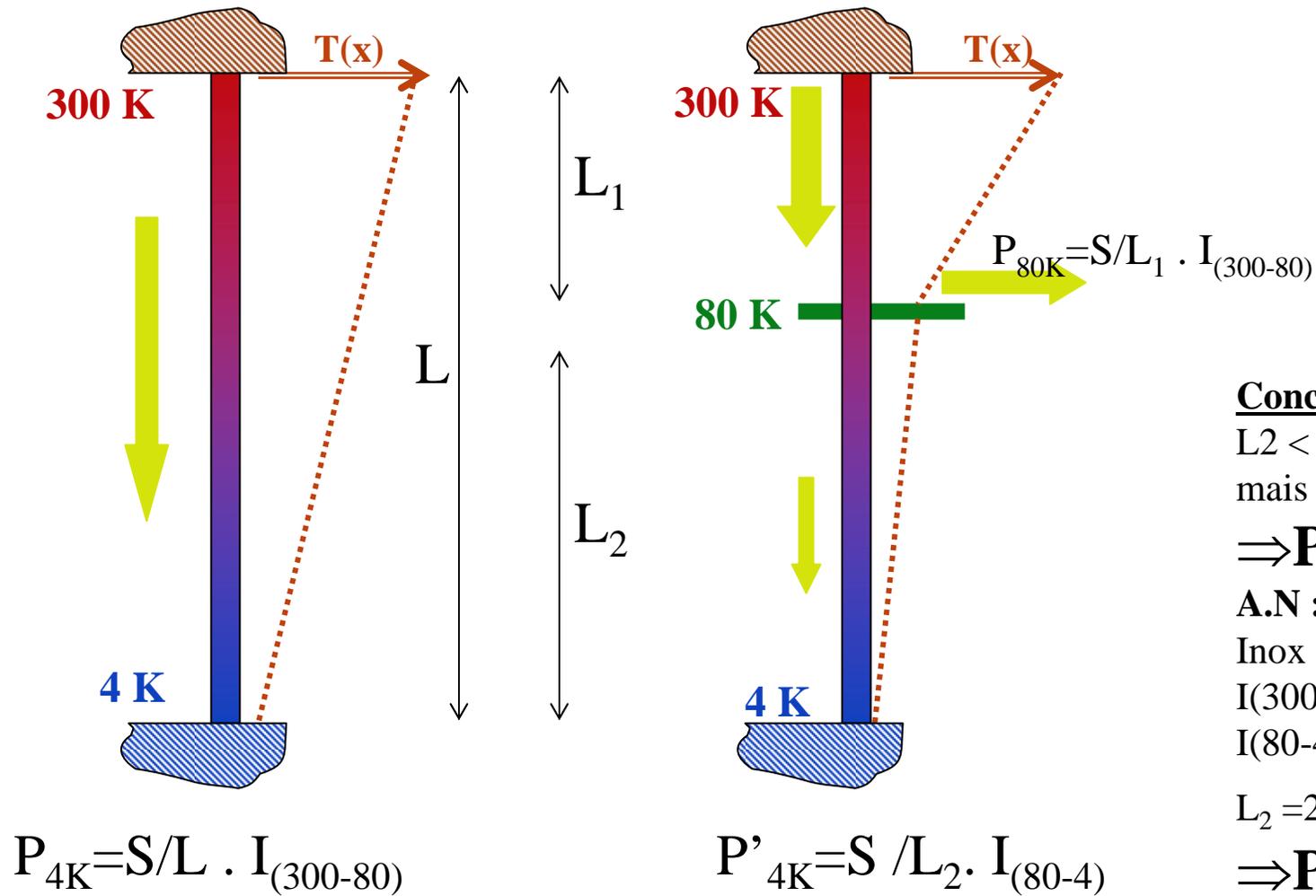
Cas de la pièce annulaire



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

Conduction thermique

Réduction des apports par thermalisation à T° intermédiaire:



Conclusion :

$L_2 < L$
 mais $I(80-4) \ll I(300-4)$

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

A.N :

Inox

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

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

$L_2 = 2/3 \cdot L_1$

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

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.

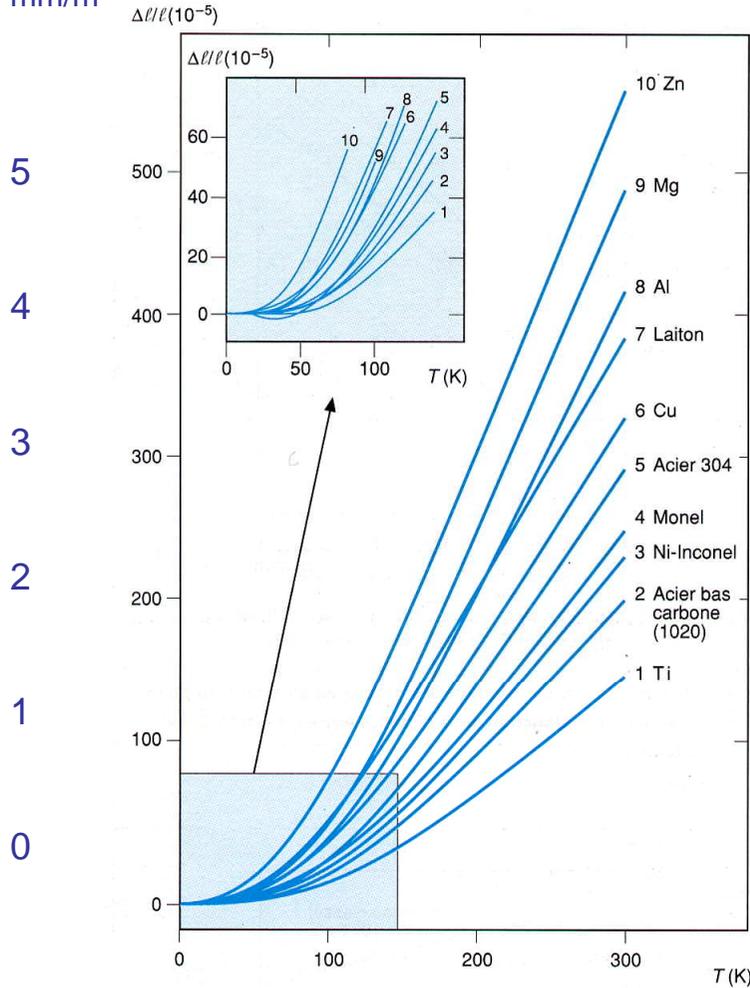
Dilatation exprimée par la variation relative en **mm/m**

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

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

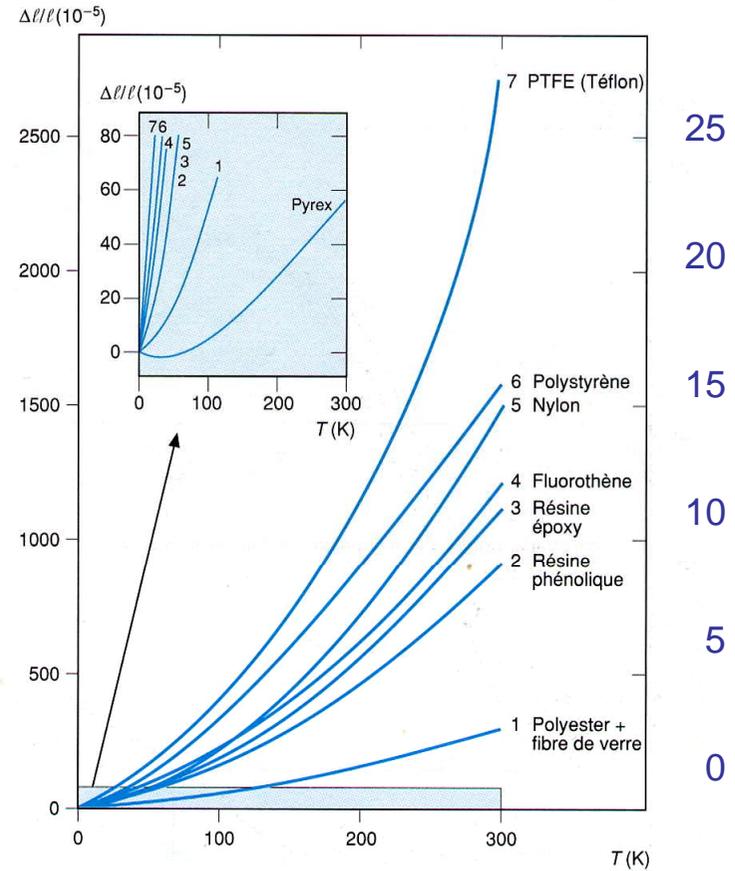
Dilatation thermique

de 300 à 4 K
mm/m



Métaux

de 300 à 4 K
mm/m

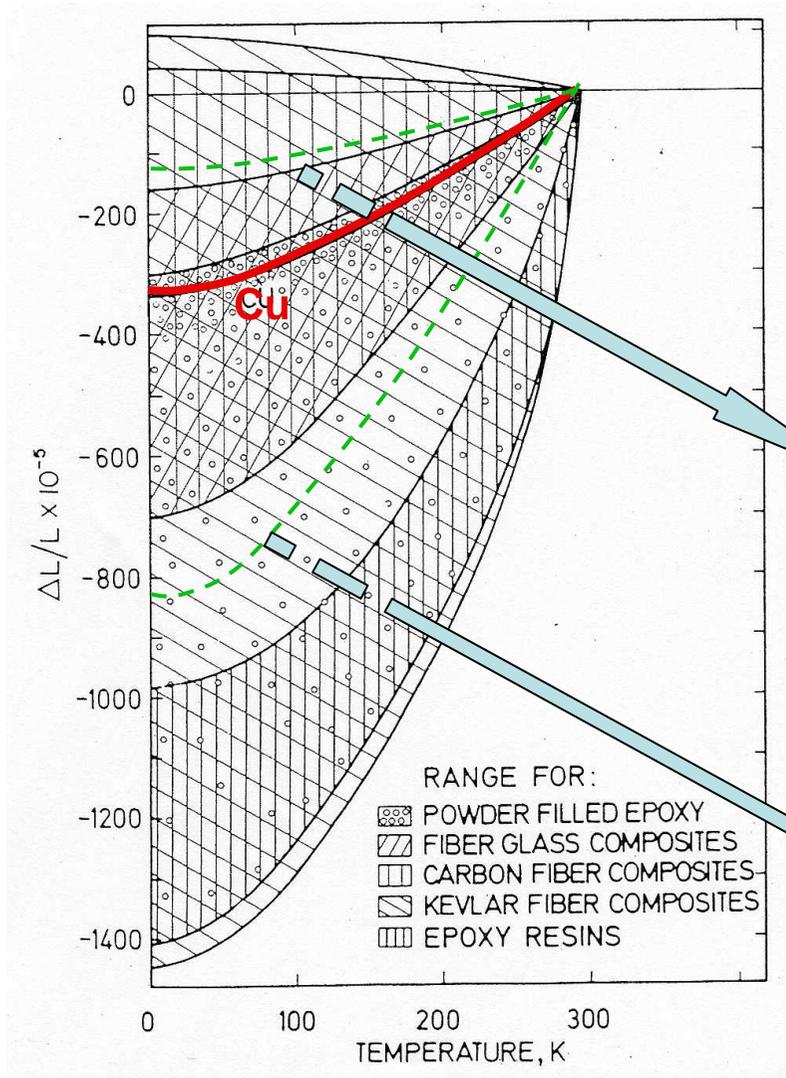


Matériaux synthétiques

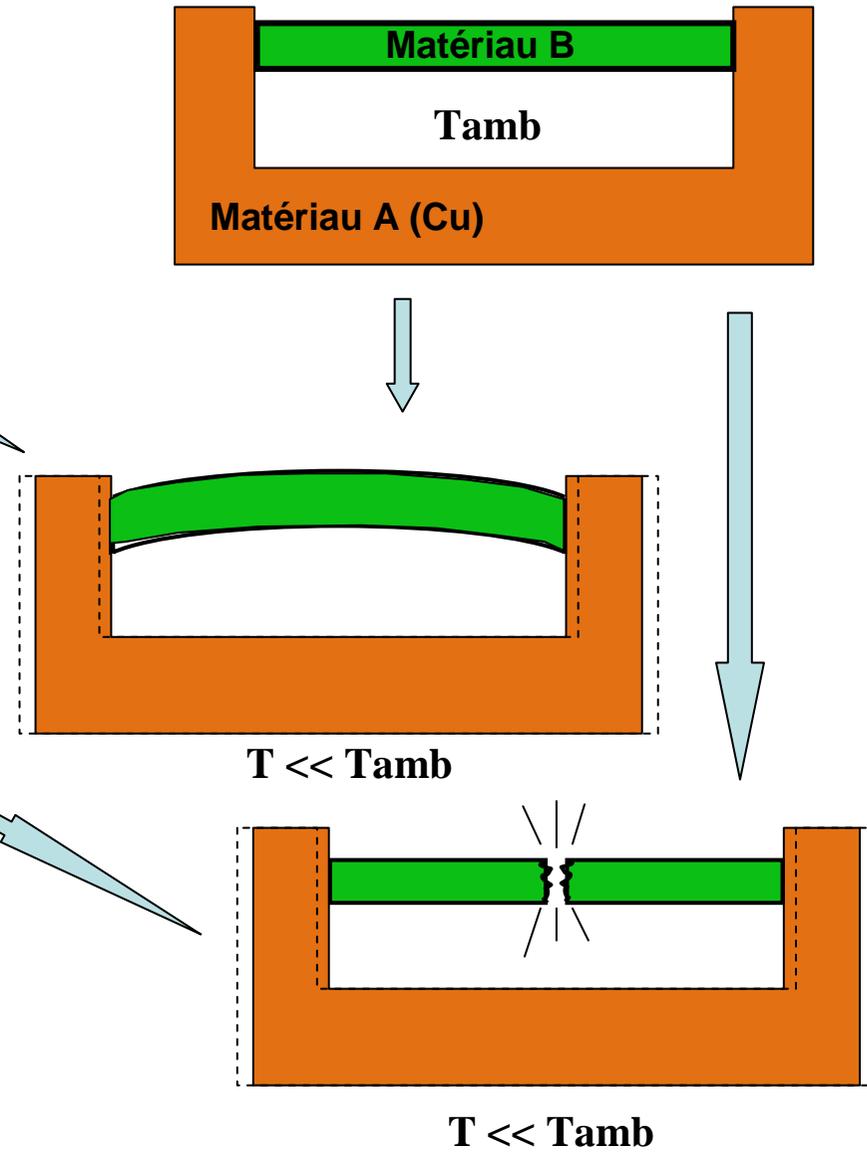
On notera qu'en dessous de 80 K l'essentiel de la dilatation des matériaux a eu lieu.
Un test simple à l'azote liquide (77 K) suffit souvent à mettre en évidence des problèmes mécaniques à froid.

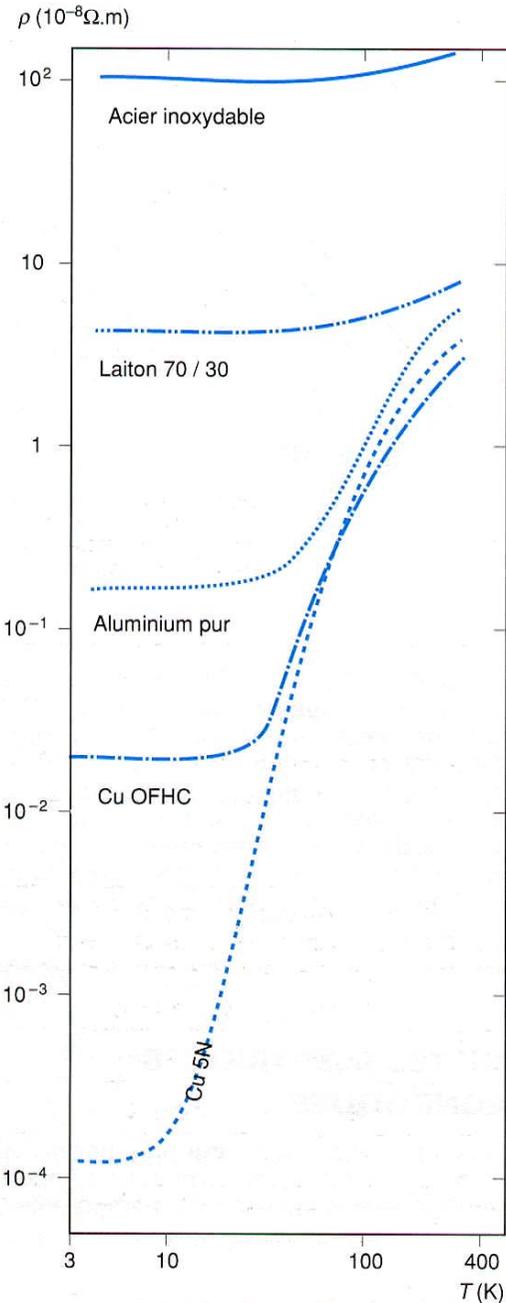
Dilatation différentielle

Comportements différents selon les natures des composants



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





OFHC Oxygen Free High Conductivity

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 :

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

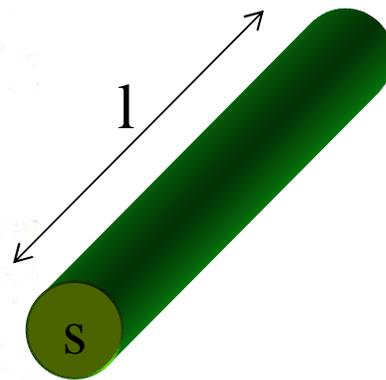
où

ρ résistivité en $\Omega \cdot m$.

R résistance électrique en Ω

l longueur du conducteur en m

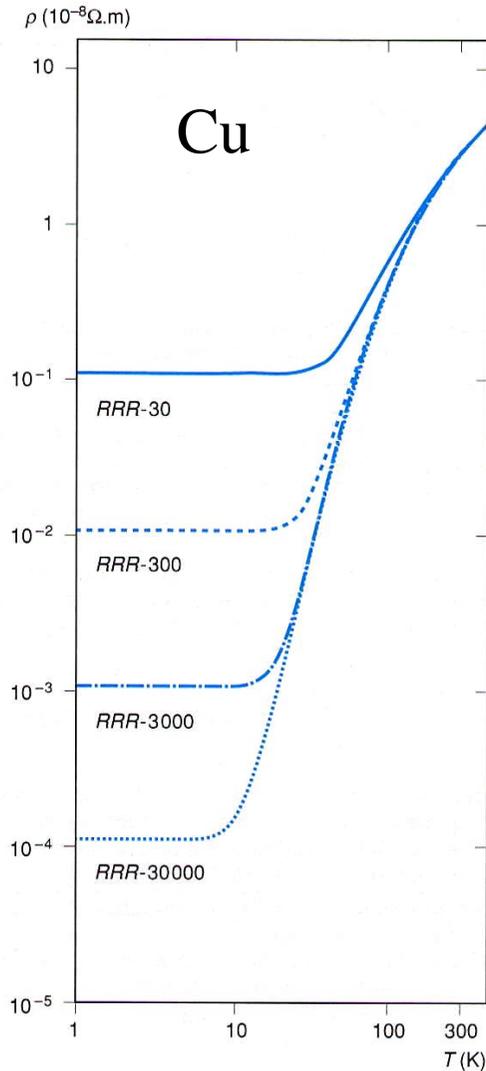
s section du conducteur en m^2



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

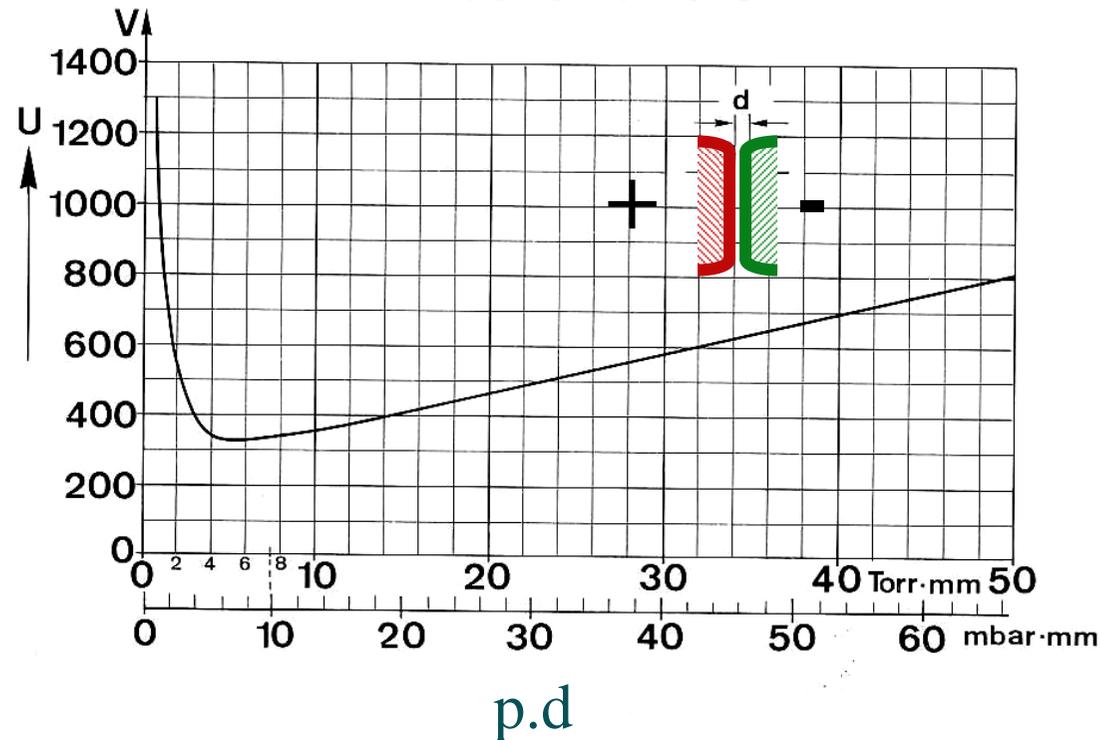
S'améliore à basse température pour les isolants solides.

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



- Sensibilité à la pression.
- Minimum à éviter ou à rechercher !
- **Diminution de la tension de claquage avec la baisse de la température**

Propriétés mécaniques

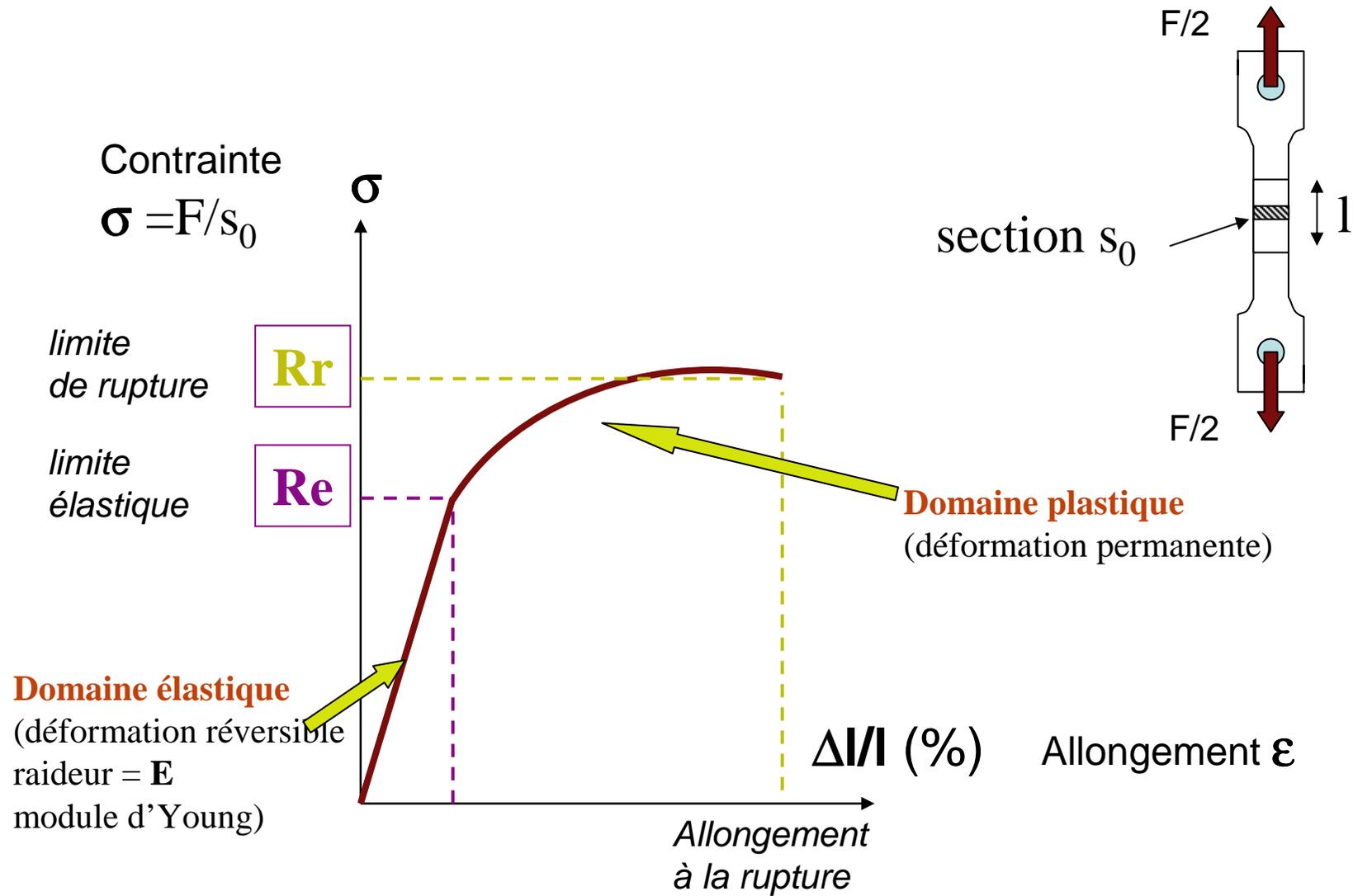
Quelque soit le matériau, il est courant de constater qu'en dessous d'une certaine température ce matériau devient **fragile** en opposition avec une certaine ductilité (ou plasticité) à chaud.

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.

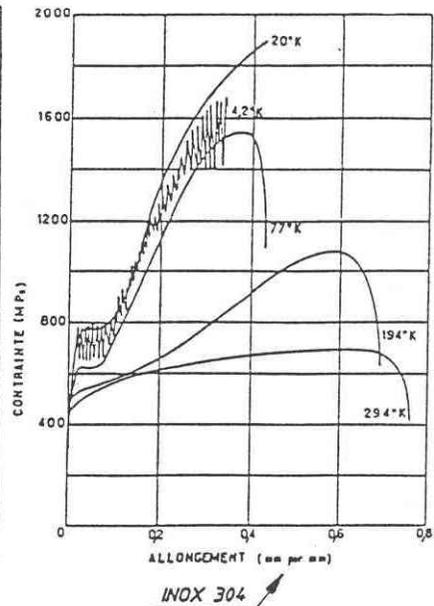
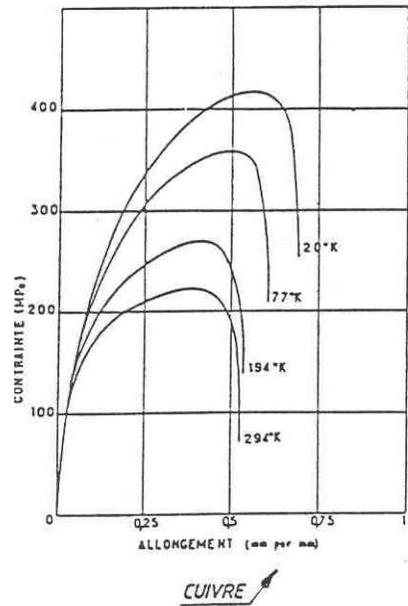
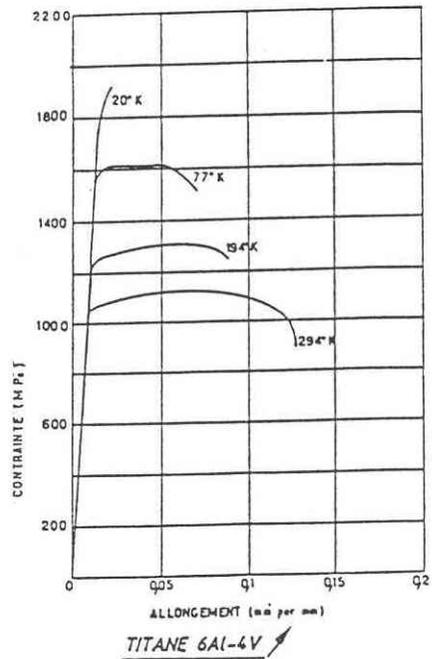
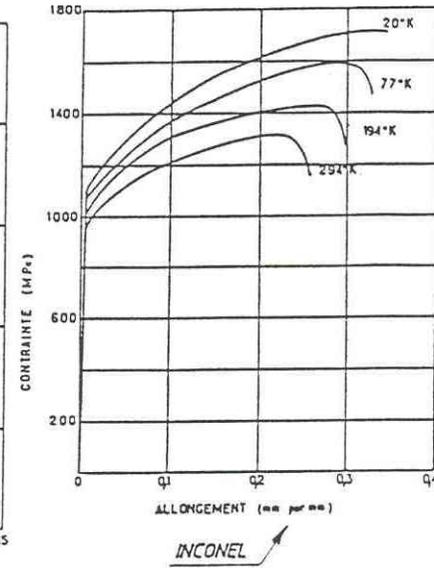
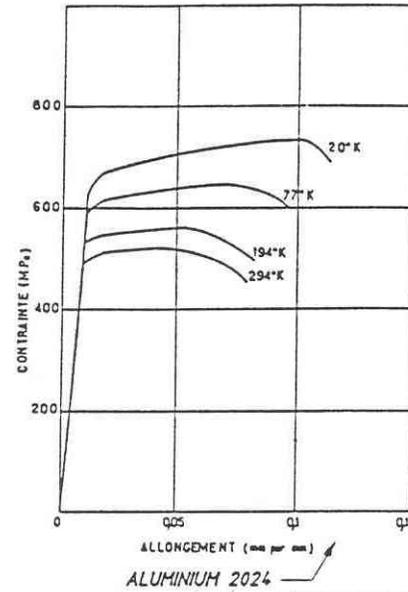
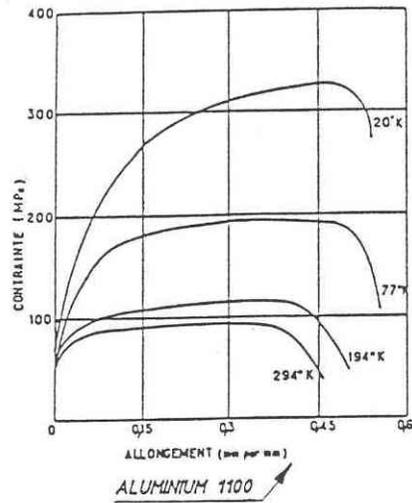
Propriétés mécaniques

Exemple de l'essai mécanique de traction :

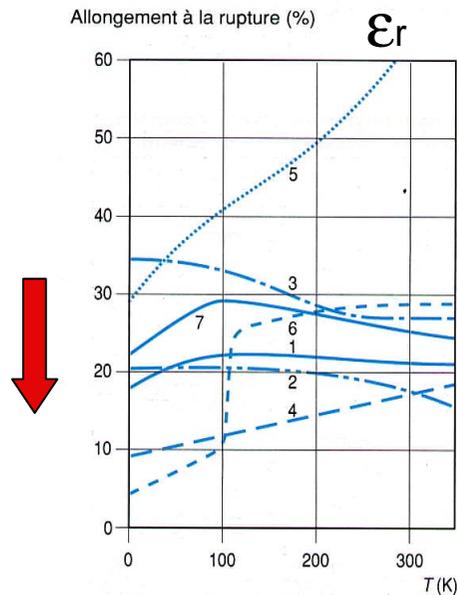
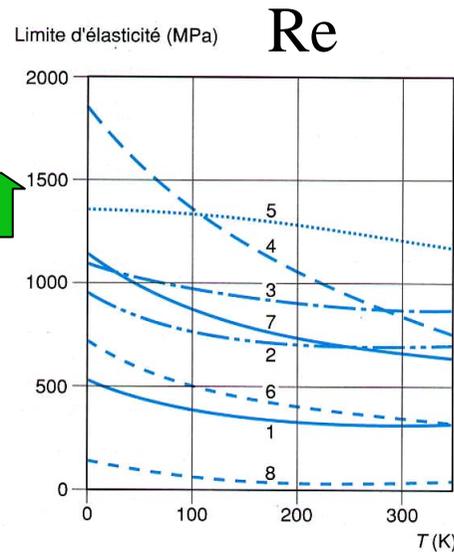
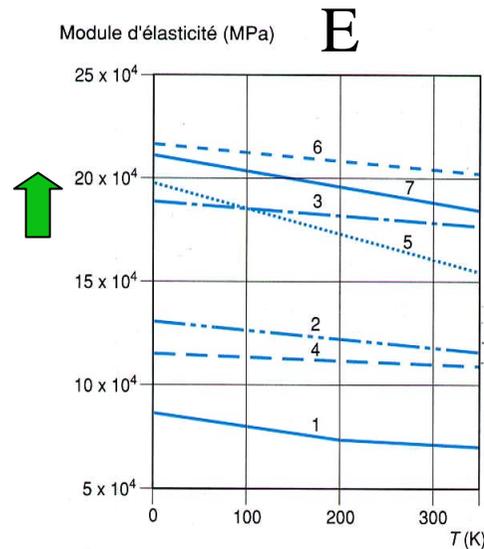


Propriétés mécaniques

Exemple de courbes 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

- 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)

Cryogénie

Transferts thermiques

Mise en œuvre

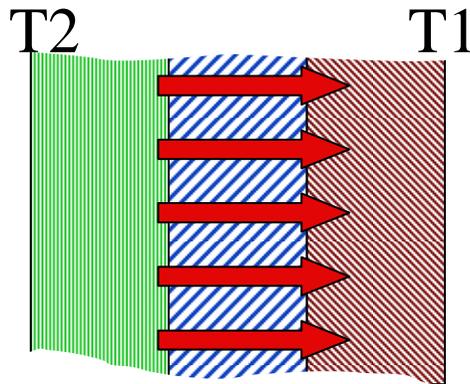
Exemples :

- **Bobine supra B0 ATLAS**

- **H1 calo argon**
(séquence vidéo)

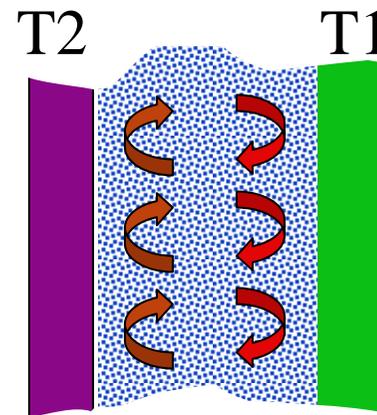
Transferts thermiques

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.



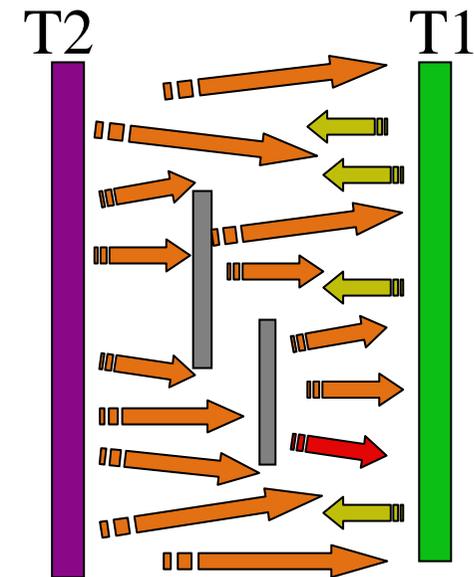
Conduction :

- solide
- gaz
- liquide



Convection :

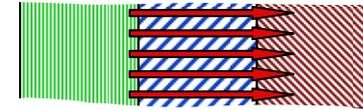
- gaz
- liquide
- *naturelle*
- *forcée*



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 ($P = -k.s.grad T$) => 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,...)

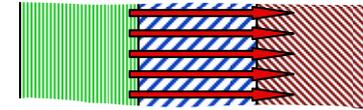
Conduction moyenne dans liquides cryogéniques. Sauf l'hélium superfluide ($T < 2,17 K$) qui fait exception. La conductivité thermique "équivalente" dans l'hélium superfluide ("équivalente" car fonction du flux de chaleur) est énorme et peut être largement supérieure ($> \times 1000$) à celle du cuivre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

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

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

S la surface de contact (m²)

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

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).

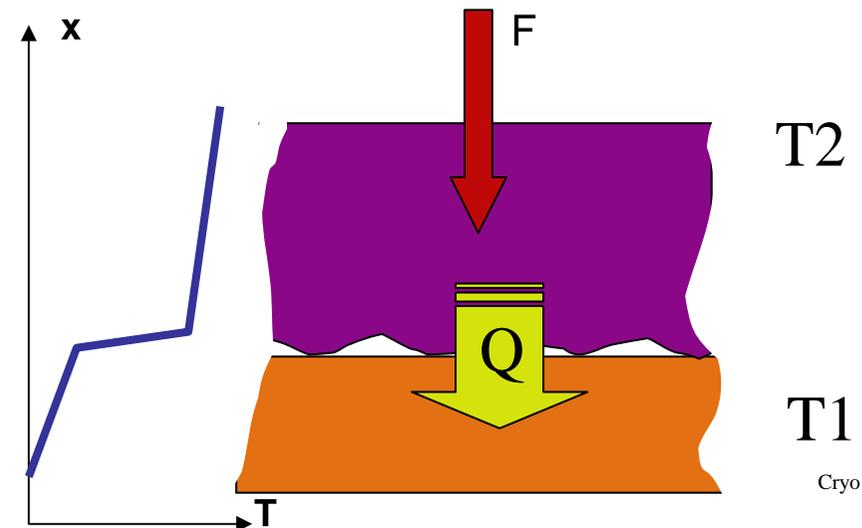
Remèdes :

Serrage important

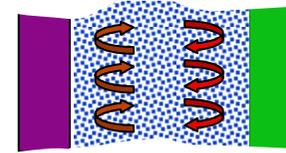
Liant thermique pour éviter le vide entre paroi (pâte chargée, film indium,...)

Matériau malléable

Grande surface de contact



Convection



Transfert de chaleur par déplacement de matière dans un fluide.

Généralement, on pose la puissance thermique Q échangée :

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

h_c coefficient de convection ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

s surface d'échange

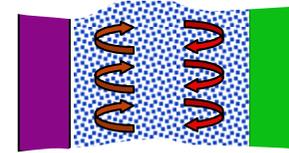
T_p température de paroi

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



$$\text{Nu} = \frac{h \cdot l}{k}$$

Nu : Nombre de Nusselt caractéristique du transfert thermique
(*comparaison de la conductance thermique en paroi à celle du gaz*)

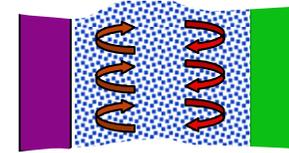
h : coefficient d'échange ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$)

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 ($\text{W} \cdot \text{m} \cdot \text{K}^{-1}$)

Lois semi-empiriques décrivant le nombre de Nusselt selon les 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

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.

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

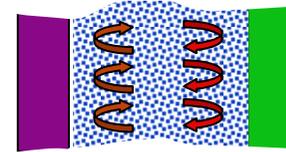
où h_c est le coefficient d'échange exprimé en $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

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 : $hc \approx 7 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ \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.

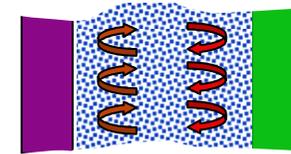
Dans ce dernier cas par exemple, et pour des tubes longs ($L/\emptyset > 60$), l'expression de Dittus-Boelter, appelée aussi formule de Colburn donne :

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

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

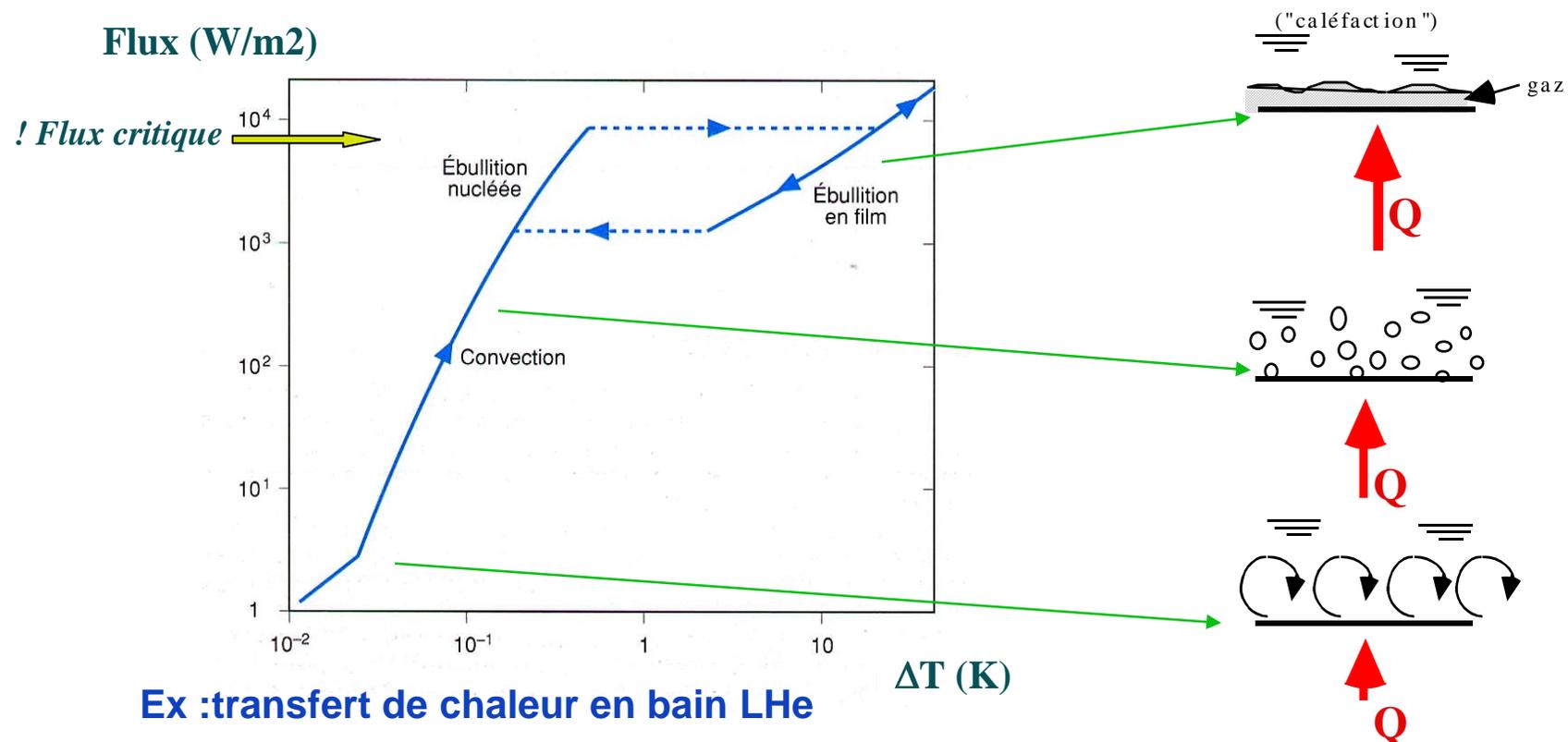
A.N : $hc \approx$ de **20 à 500 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$** dans les gaz
 $hc \approx$ de **500 à 10000 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$** dans les liquides

Convection en fluide diphasique



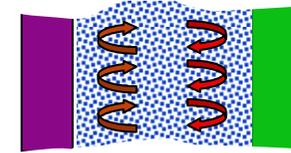
Exemple de l'ébullition en bain

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.

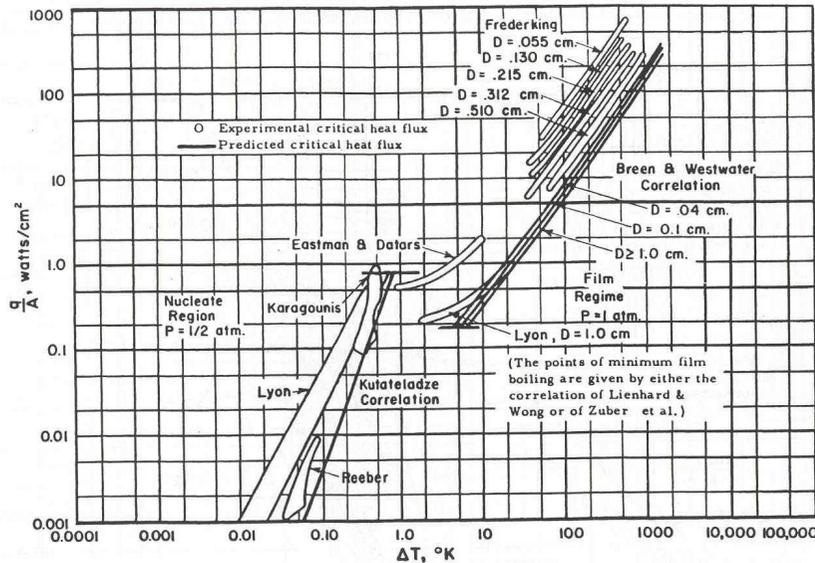


Ex : transfert de chaleur en bain LHe

Convection en fluide diphasique

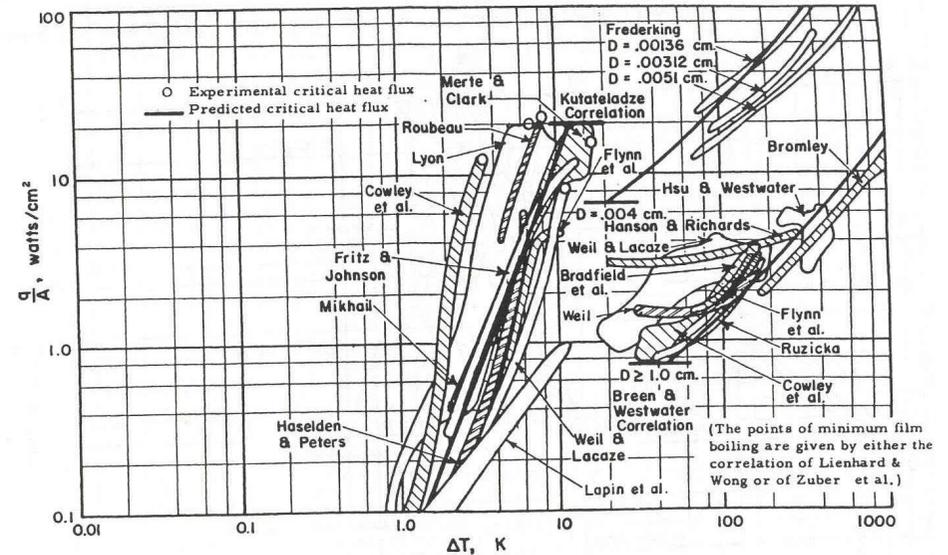


- Ebullition nucléée => h très grand (ex : 30000 W/m².K pour l'eau)
- Flux critique => augmentation brutale du ΔT = surchauffe paroi



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

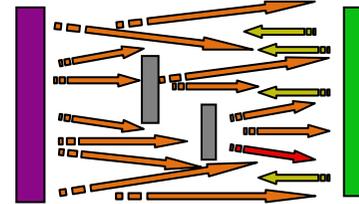
Hydrogène liquide à 1 bar
 $\Phi_c \approx 40000 \text{ W/m}^2$ et $\Delta T_c \approx 20 \text{ K}$



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**

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

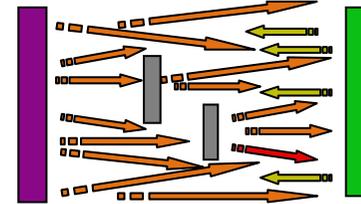
où

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

et

λ la longueur d'onde émise

Rayonnement



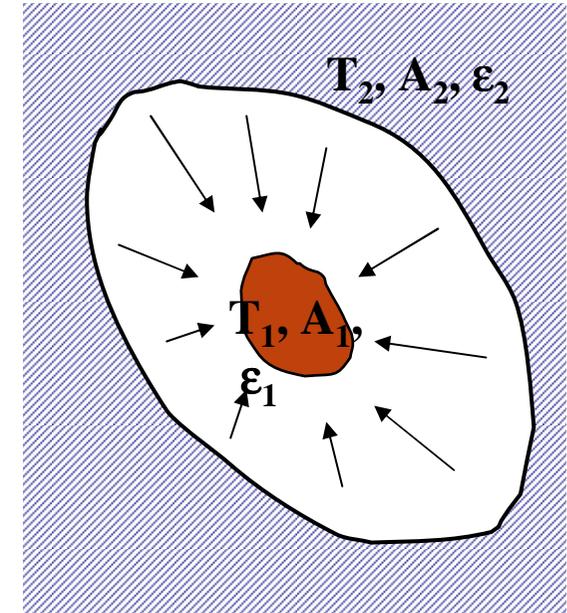
Loi de Kirchoff

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

La puissance W échangée entre une surface concave A_2 entourant une surface convexe A_1 s'écrit :

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

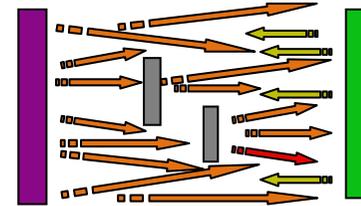
où F_{12} facteur de forme fonction de ϵ_1 , ϵ_2 , A_1 et A_2
 A_1 surface à l'émissivité ϵ_1 et T_1
 A_2 surface à l'émissivité ϵ_2 et T_2



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 :

$$W = 0,5 \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot (T_2^4 - T_1^4)$$

Rayonnement



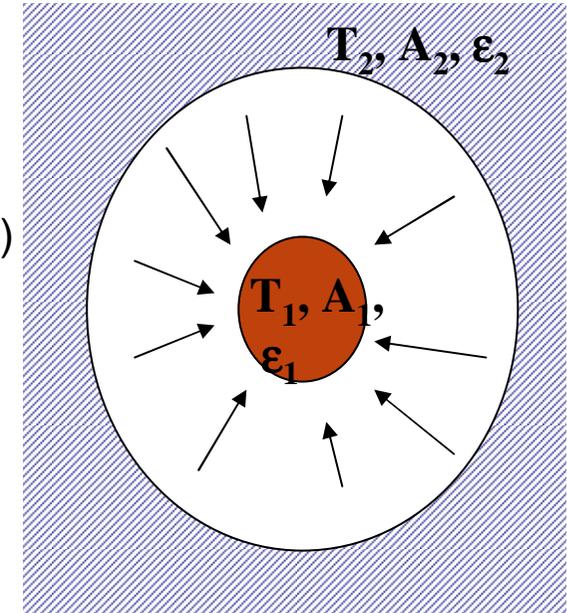
Facteur de forme et émissivité

F_{12} est fonction de la géométrie des surfaces et de leurs émissivités

Par exemple, pour deux surfaces concentriques (A_2 entourant A_1)

$$F_{12} = (1/\epsilon_1 + [(1/\epsilon_2) - 1] \cdot A_1/A_2)^{-1}$$

ϵ est fonction de T et du matériau ainsi que de son état de surface (oxydation, polissage...)

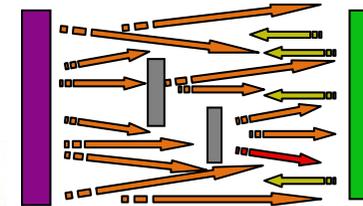


A.N : entre 300 et 80 K, $W = 45 \text{ W/m}^2$ pour $\epsilon = 0,2$
entre 300 et 4 K, $W = 46 \text{ W/m}^2$
entre 150 et 4 K, $W = 3 \text{ W/m}^2$

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

Exemples d'émissivité

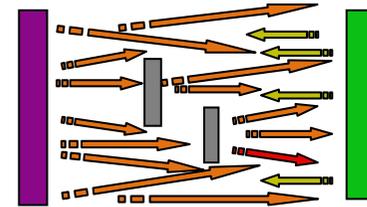
Métal	T (K)	ϵ_n
Or	300	0,02
	80	0,01
Argent	300	0,02
	80	0,01
	4	0,005
Aluminium commercial brut	300	0,25
	80	0,12
	4	0,07
Aluminium poli mécanique	300	0,20
	80	0,10
	4	0,06
Aluminium poli électrolytique	300	0,15
	80	0,08
	4	0,04
Chrome	300	0,08
Cuivre poli mécanique	300	0,10
	80	0,06
	4	0,02
Étain	300	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



Ecrantage : contre les pertes thermiques par rayonnement.

- **écrans refroidis** , le plus souvent par une circulation d'azote liquide , quelquefois par un retour de vapeur d'hélium (1500 J/g de 4,2 K à 300 K), plus rarement par un cryogénérateur dont la tête froide est vers 60 K ou moins.

Pour les écrans refroidis à l'azote par exemple, les pertes par rayonnement arrivant sur une enceinte à 4K par rapport à un écran à 300 K seront : $(300/77)^4$ fois plus faibles= 230 fois plus faibles

- **écrans flottants** , soit des plaques isolées thermiquement et qui s'équilibrent par rayonnement à une température intermédiaire soit le plus souvent un manteau multicouches de feuilles (≈ 20) de **superisolant** réfléchissantes(mylar aluminisé sur quelques microns d'épaisseur= MLI). La réalisation pratique de ce manteau joue beaucoup sur ses performances en particulier l'effet de tassement du manteau au montage.

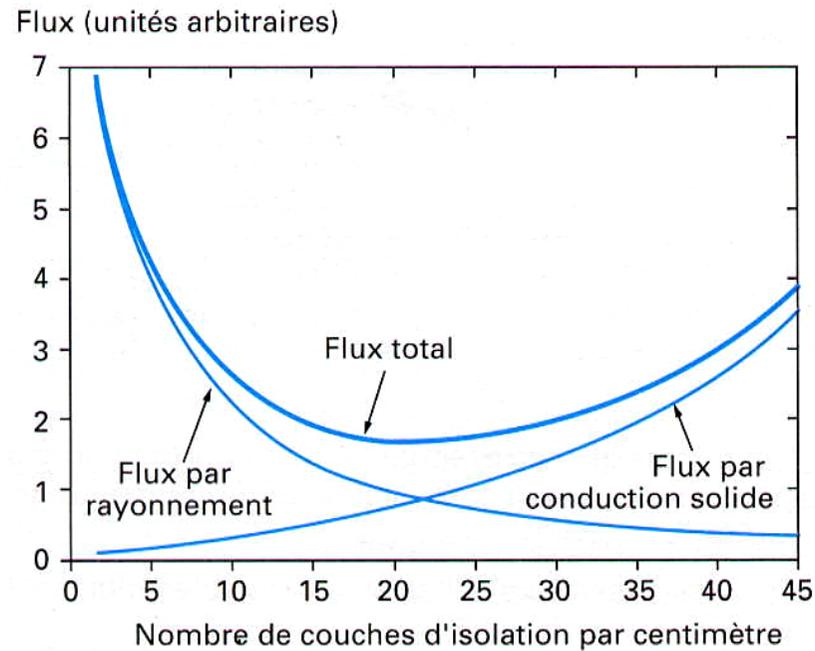
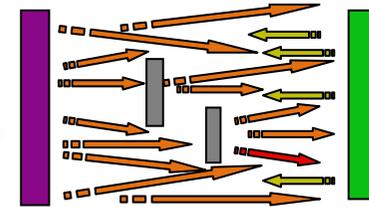
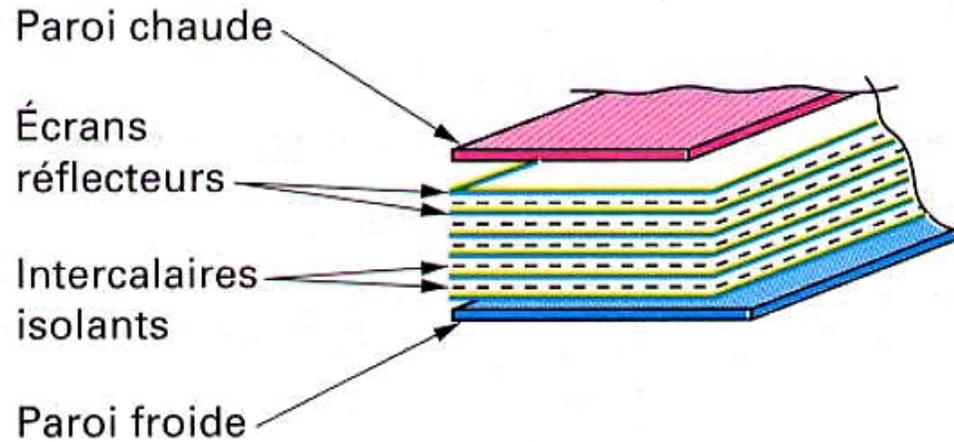
Pour n écrans flottants , la puissance reçue par la paroi froide s'écrit :

$$W = \frac{1}{n+1} \cdot \frac{\epsilon_0}{2} \sigma \cdot A \cdot (T_{\text{enveloppe}}^4 - T_0^4)$$

n écrans

ϵ_0 émissivité de l'enveloppe

Super-isolation



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

Multi Layer Insulation

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

Comparaison transferts thermiques

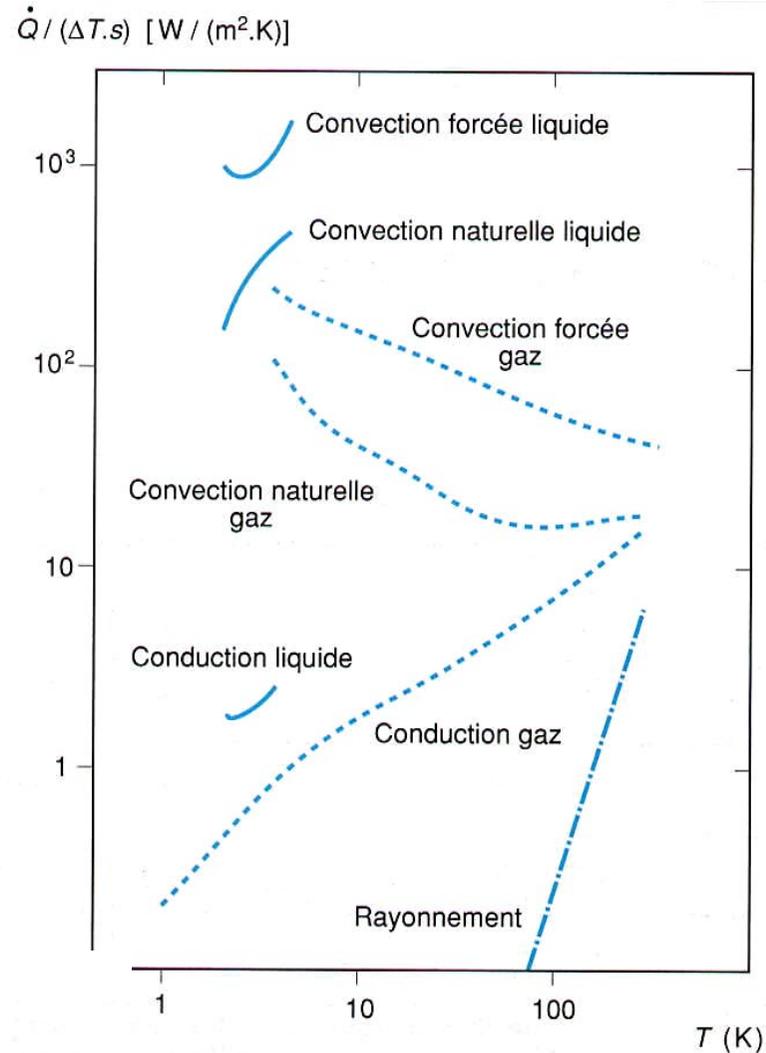
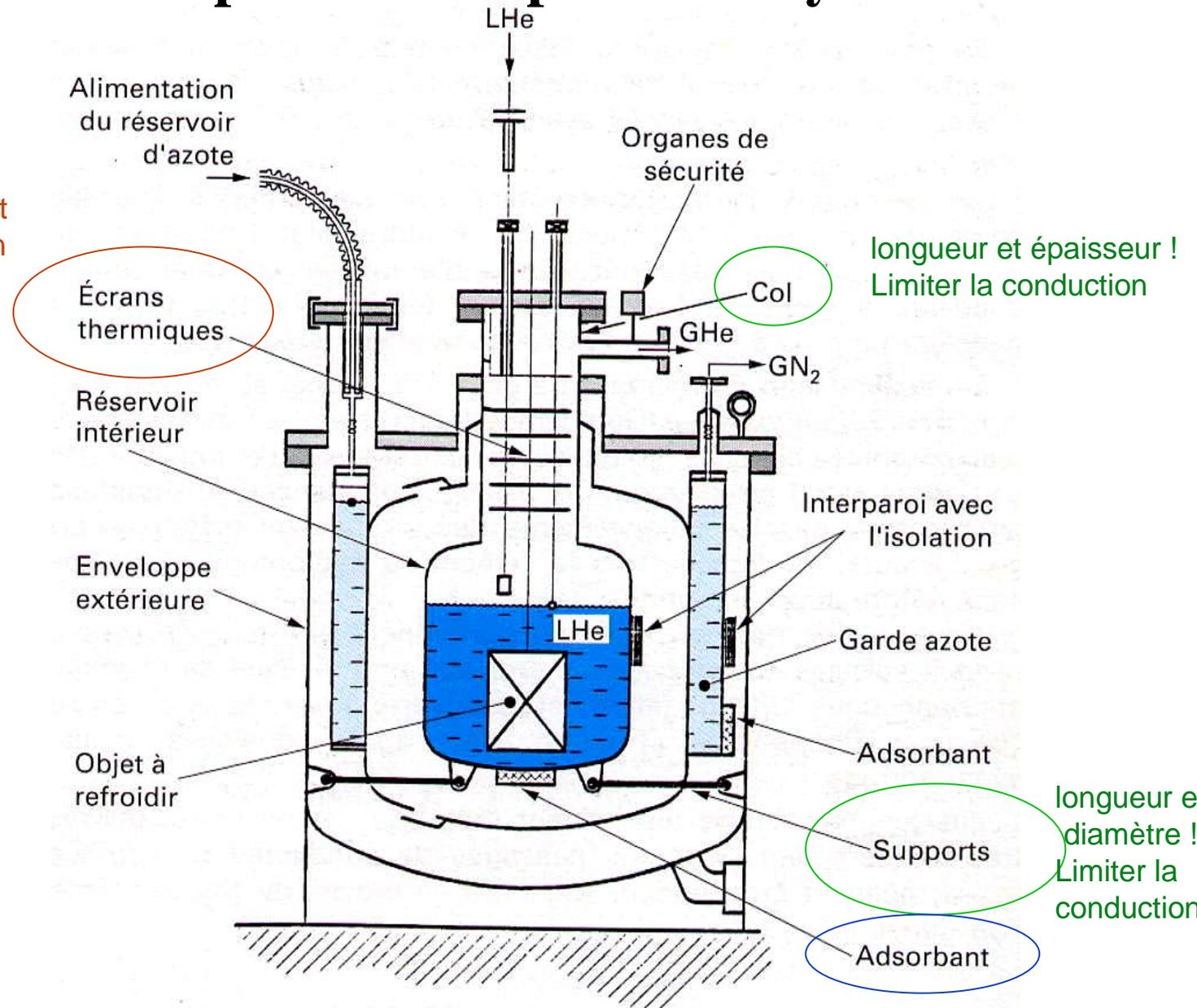


Fig. 25. - Puissances échangées entre deux surfaces soumises à une différence de température de 1 K, pour une température moyenne T :

- **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

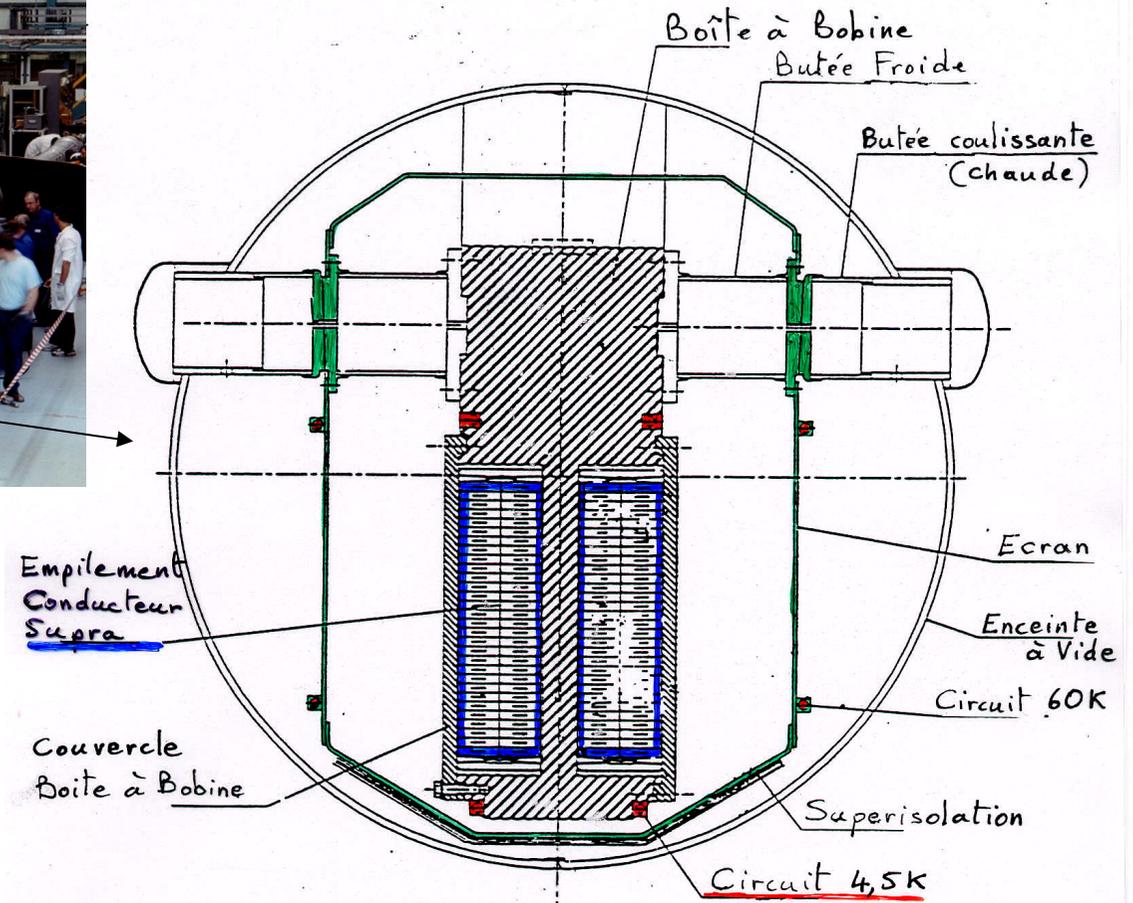
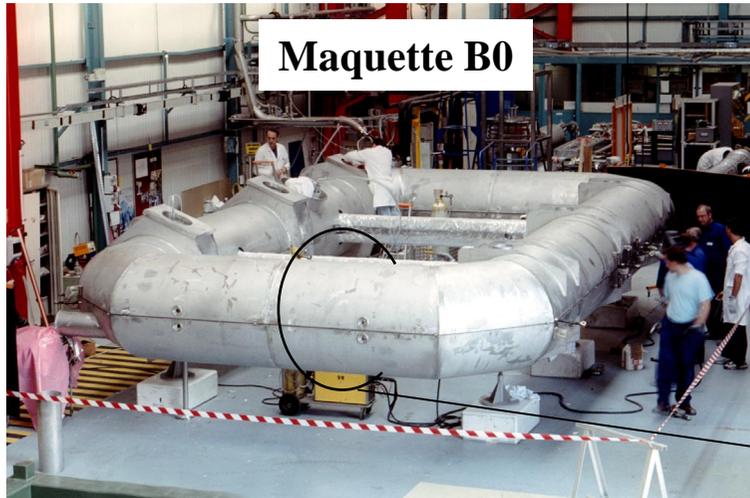
Anti-rayonnement
et anti-convection



Qualité du vide ! Anti-convection et anti-conduction

Ex de conception d'aimant complexe

Coupe du cryostat d'une bobine toroïdale ATLAS

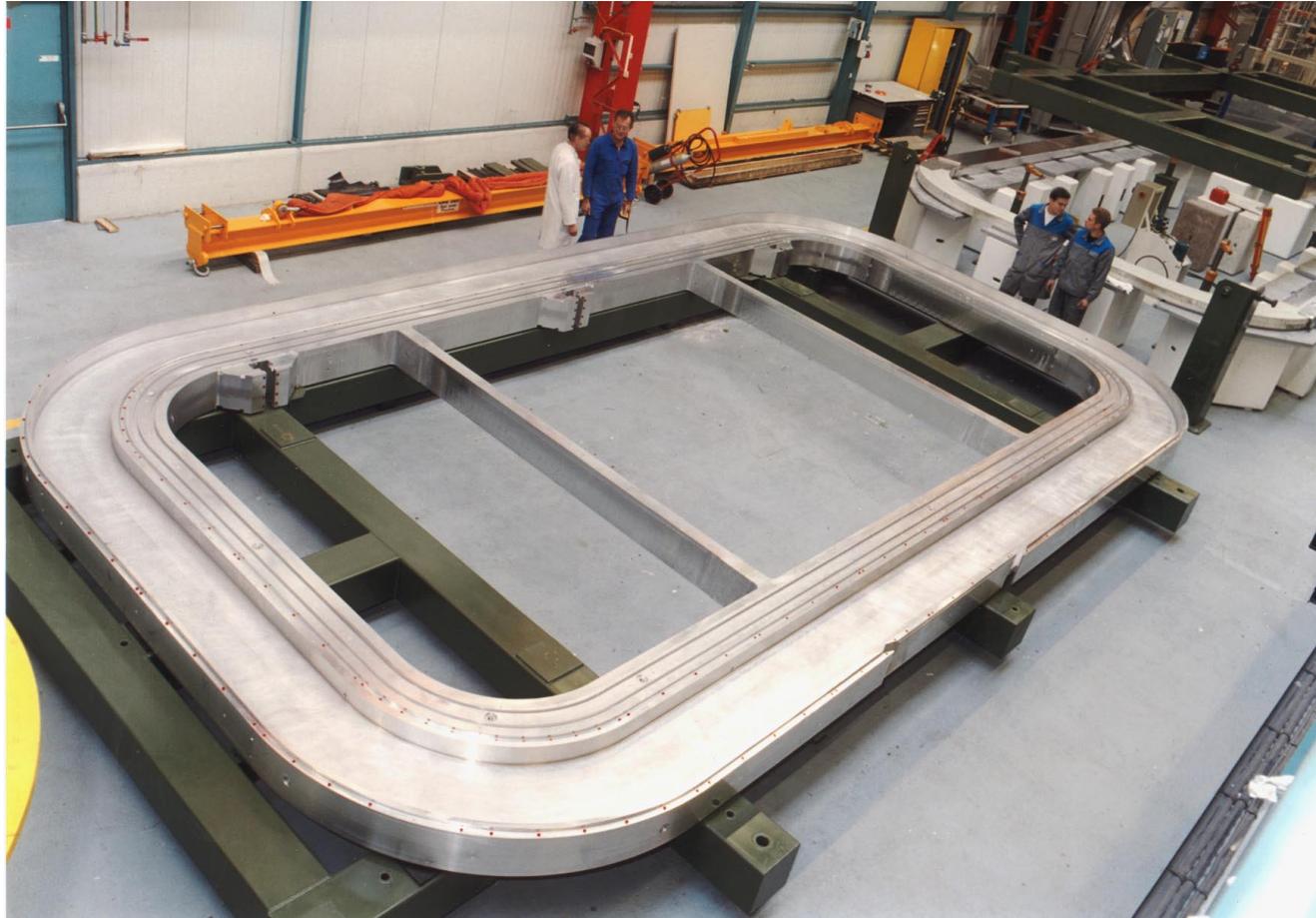


Ex de montage d'un aimant toroïdal dans son cryostat - maquette B0 pour ATLAS -



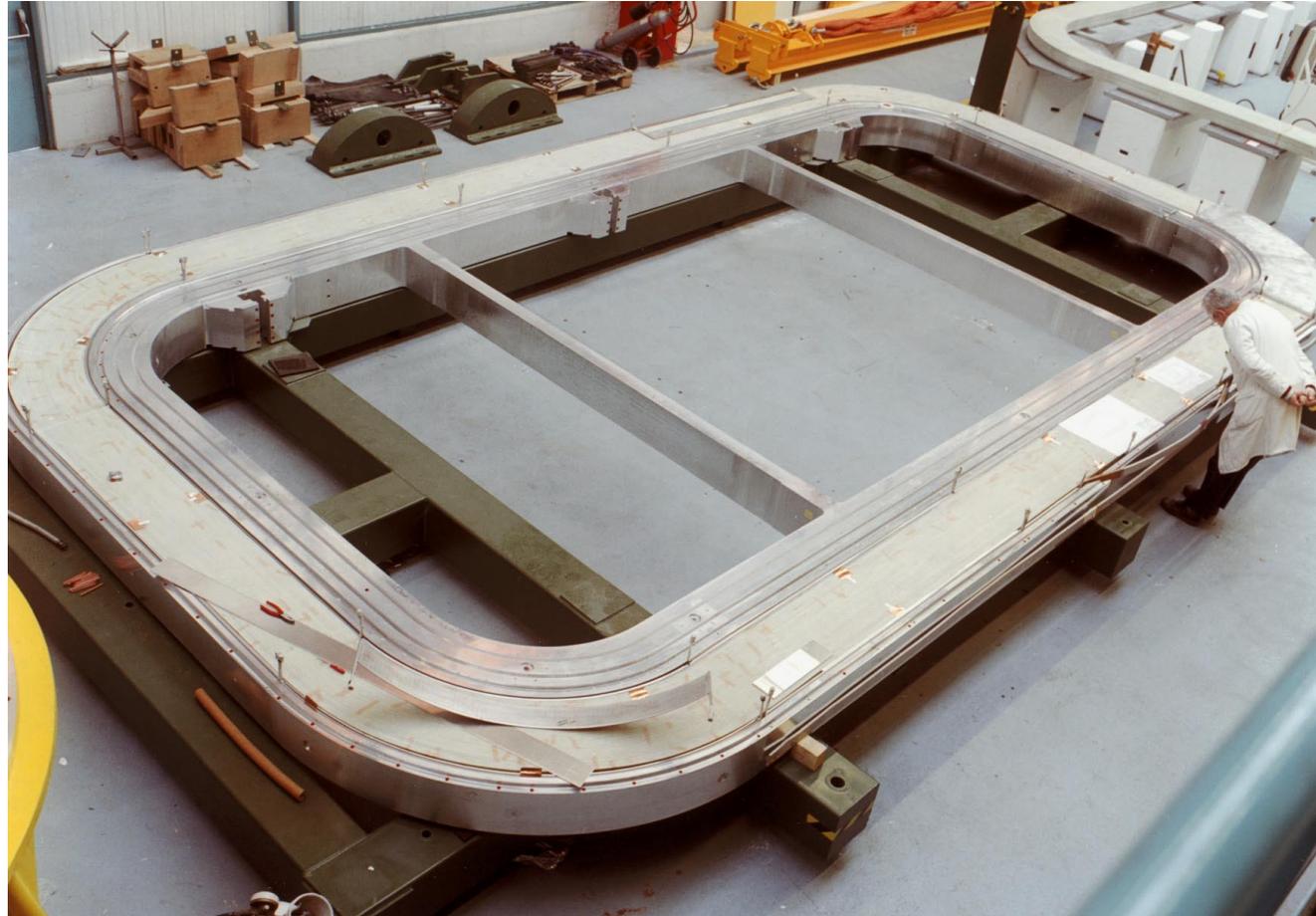
Bobinage supraconductrice assemblée et polymérisée
=câble + résine

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



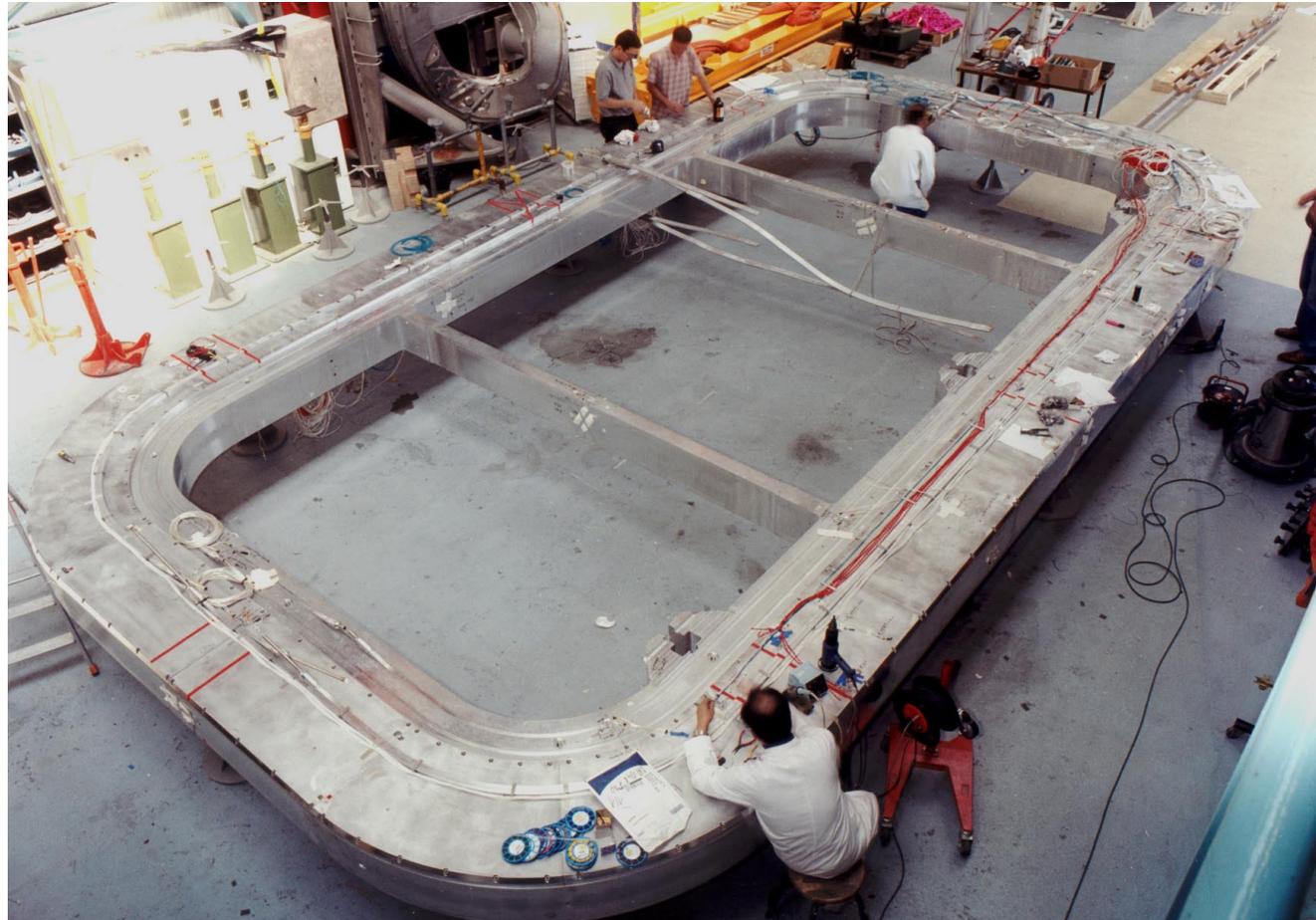
Boîte à bobine en Alliage d'aluminium

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



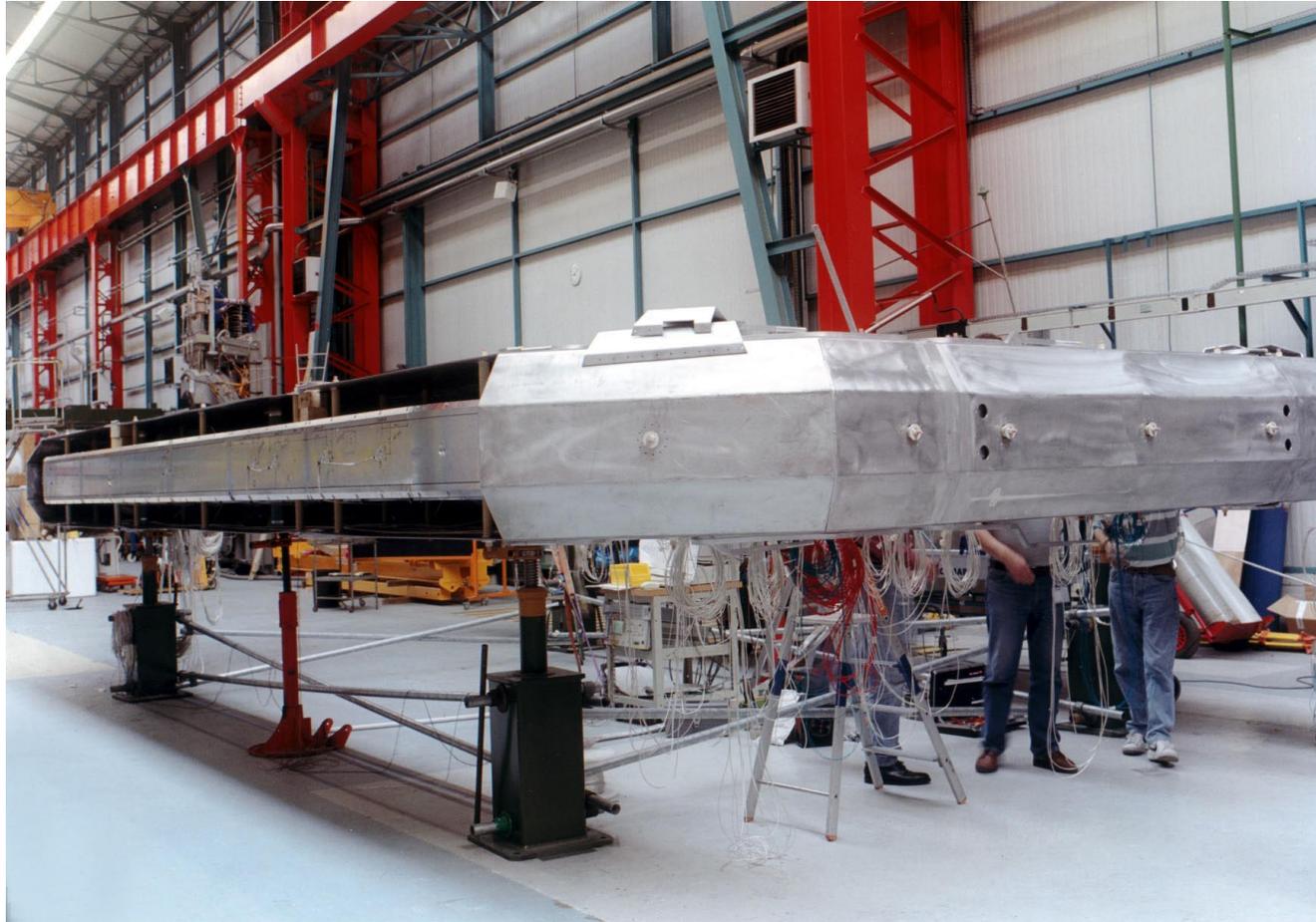
Bobine dans Boîte à bobine

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



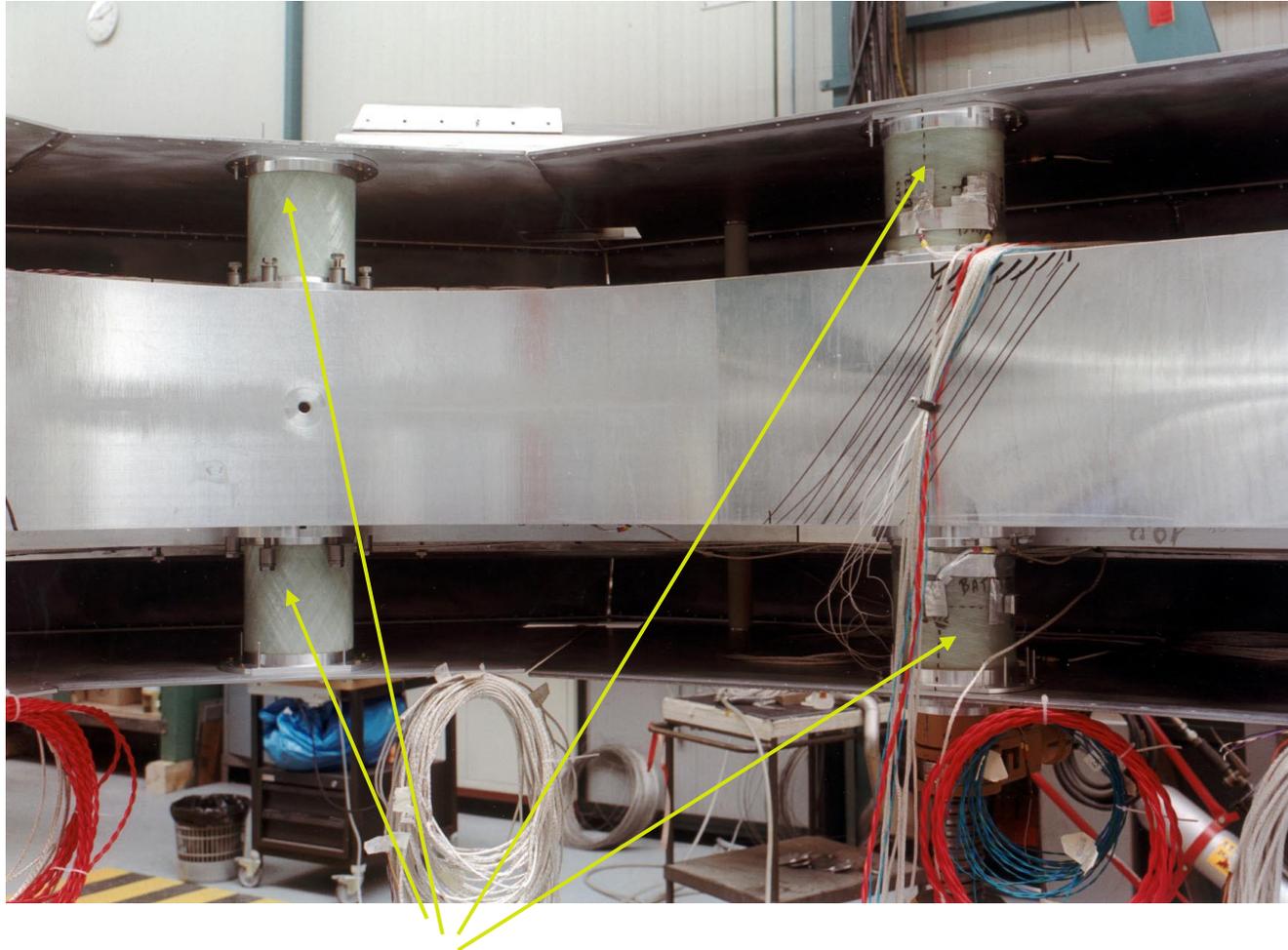
Bobine dans Boîte à bobine refermée et instrumentée

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 -



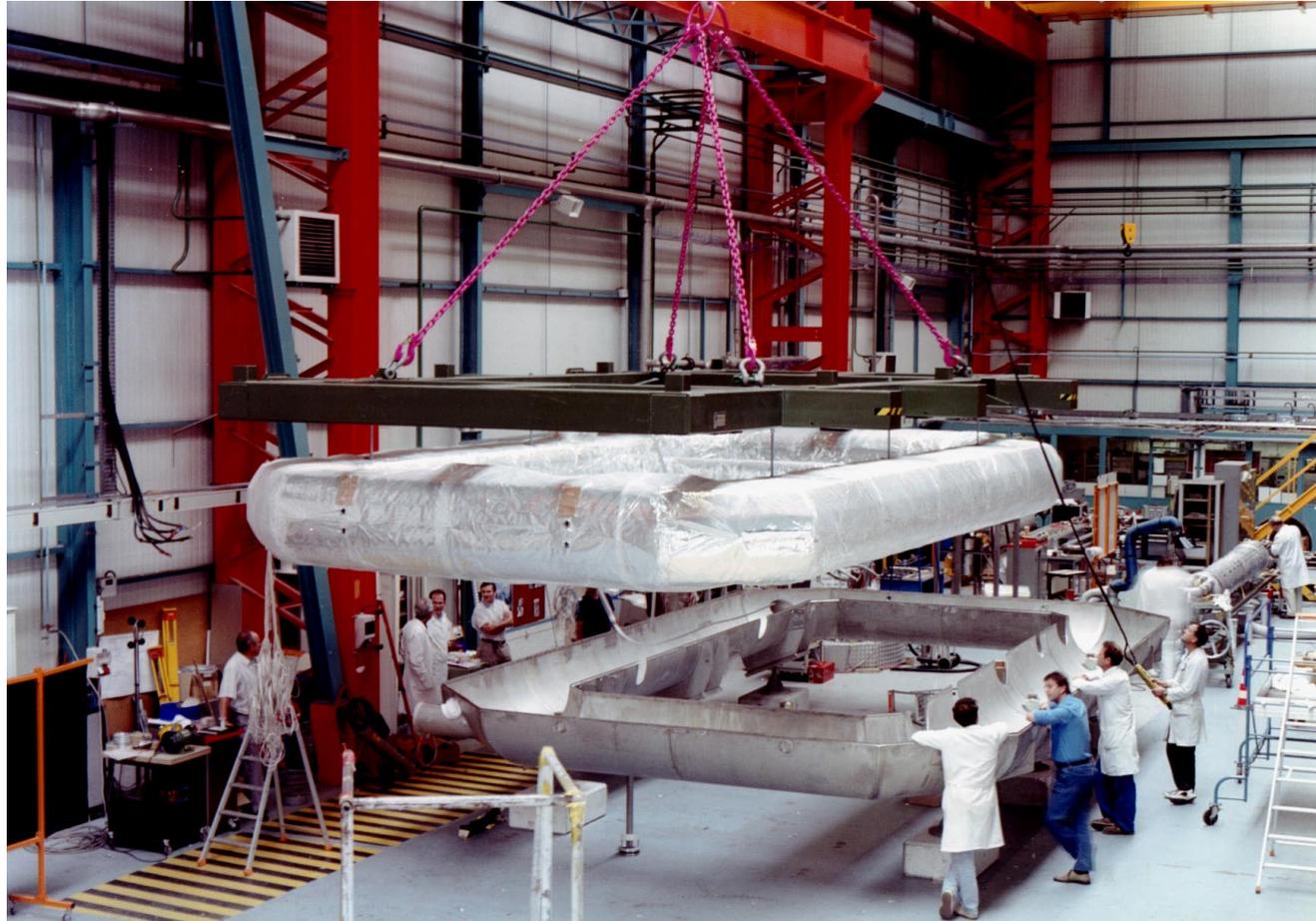
Détail sur les supports (Véreprox) d'écran thermique (Al)
entre 4 et 60 K

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



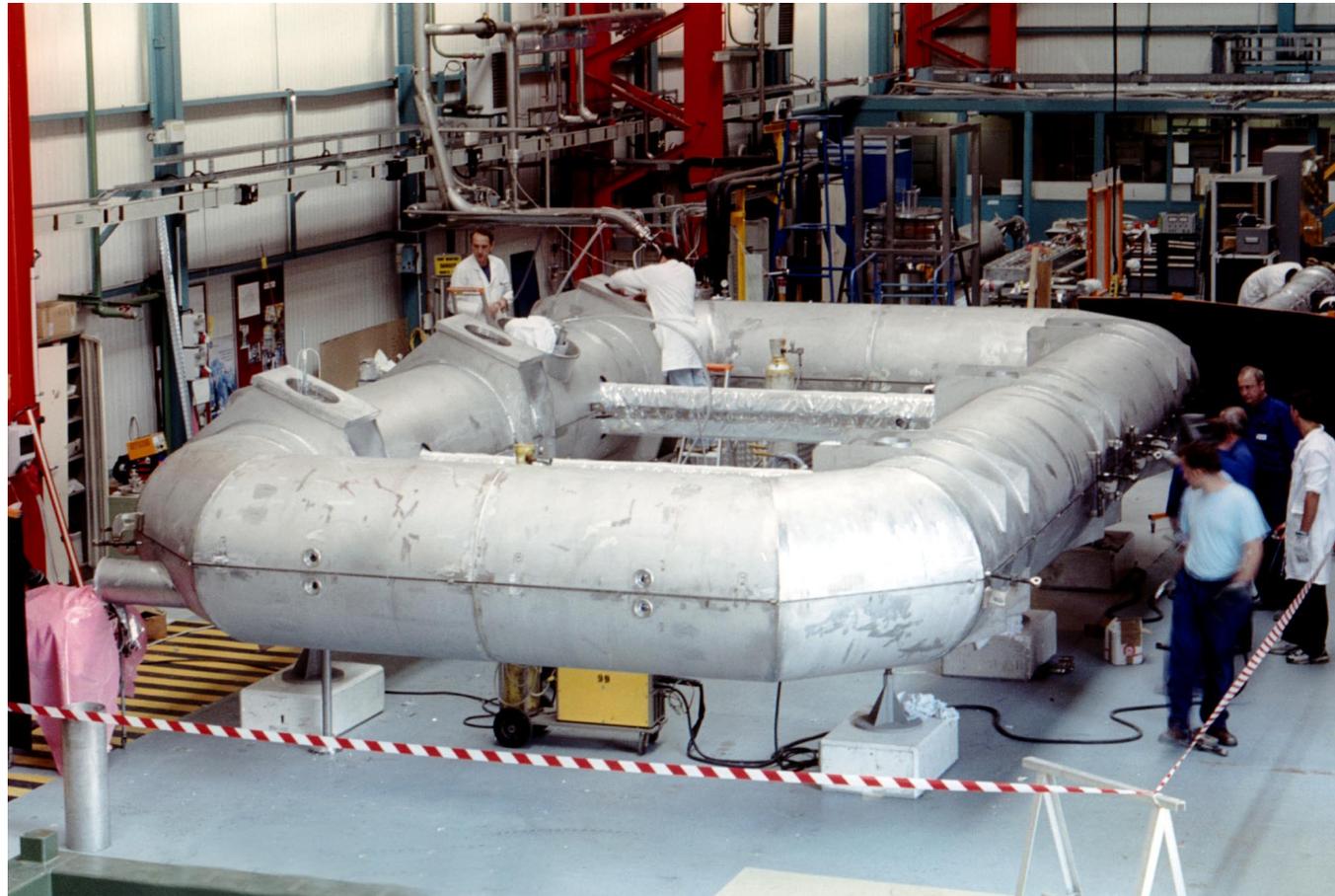
Mise en place de la superisolation sur l'écran thermique

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