

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

SUPRACONDUCTIVITE II

DETAILS SUR L'ETAT SUPRACONDUCTEUR
EXEMPLES DES CABLES SUPRA POUR AIMANTS
ex : CMS et ATLAS

Cryogénie

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

Cryogénie

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

- $T_{\text{ambiante}} \approx 300 K$
- « 4 K » => domaine des T° de l'hélium liquide (« LHe »)
- « 20K » => domaine des T° de l'hydrogène liquide (« LH₂ »)
- « 77 K » => domaine des T° de l'azote liquide (« LN₂ »)

Rappels des propriétés des cryofluides (voir tableau)

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 gamme des basses températures



Propriétés thermiques

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

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

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

$$\text{en énergie (J), } Q = m \cdot C \cdot \Delta T$$

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.

$$\text{en puissance (W), } P = m \cdot C \cdot \frac{dT}{dt}$$

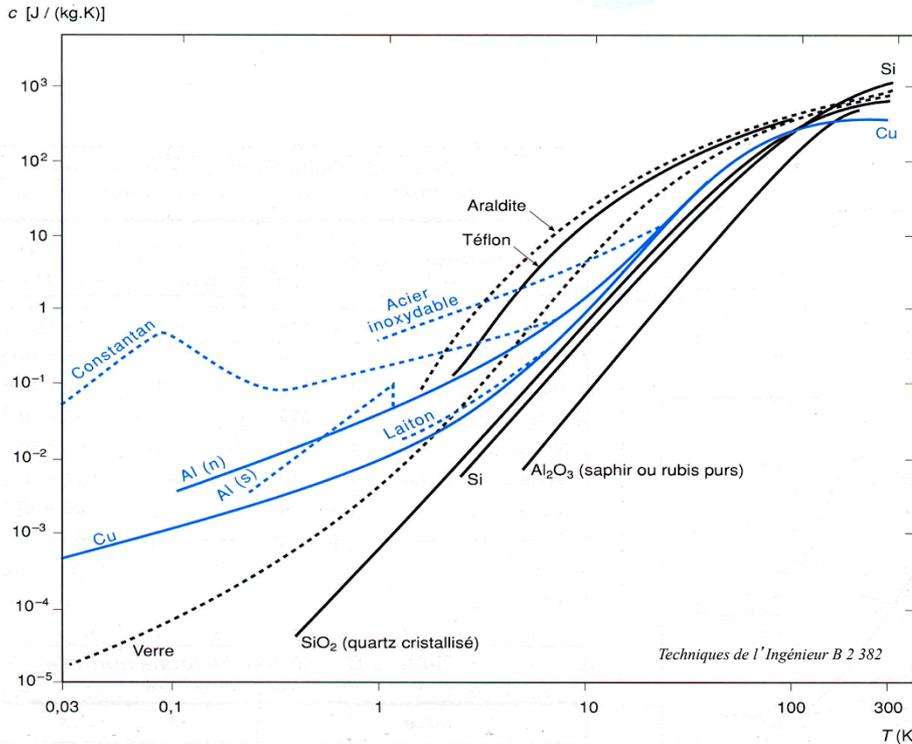
(P puissance absorbée ou extraite en W et dT/dt vitesse de descente ou de remontée en température (K/s ou °C/s))

On peut aussi écrire pour un fluide en mouvement recevant la puissance P:

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

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



Autour de 300 K, $C = 3R \approx 25 \text{ J.mole}^{-1}.\text{K}^{-1}$

(Loi Dulong et Petit)

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°).

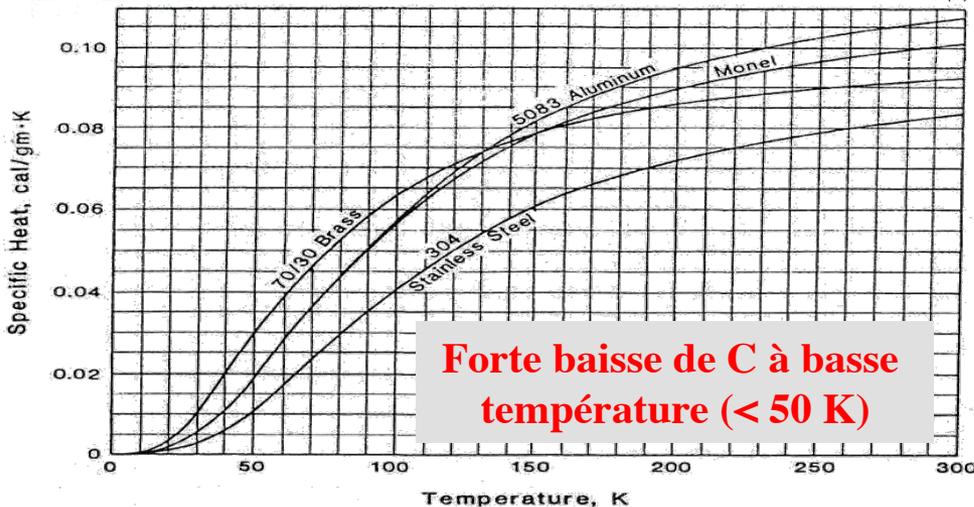
$$C = \sum_i c_i(T)$$

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

Aux très basses températures,

$$C \propto T^3 \text{ pour un isolant}$$

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



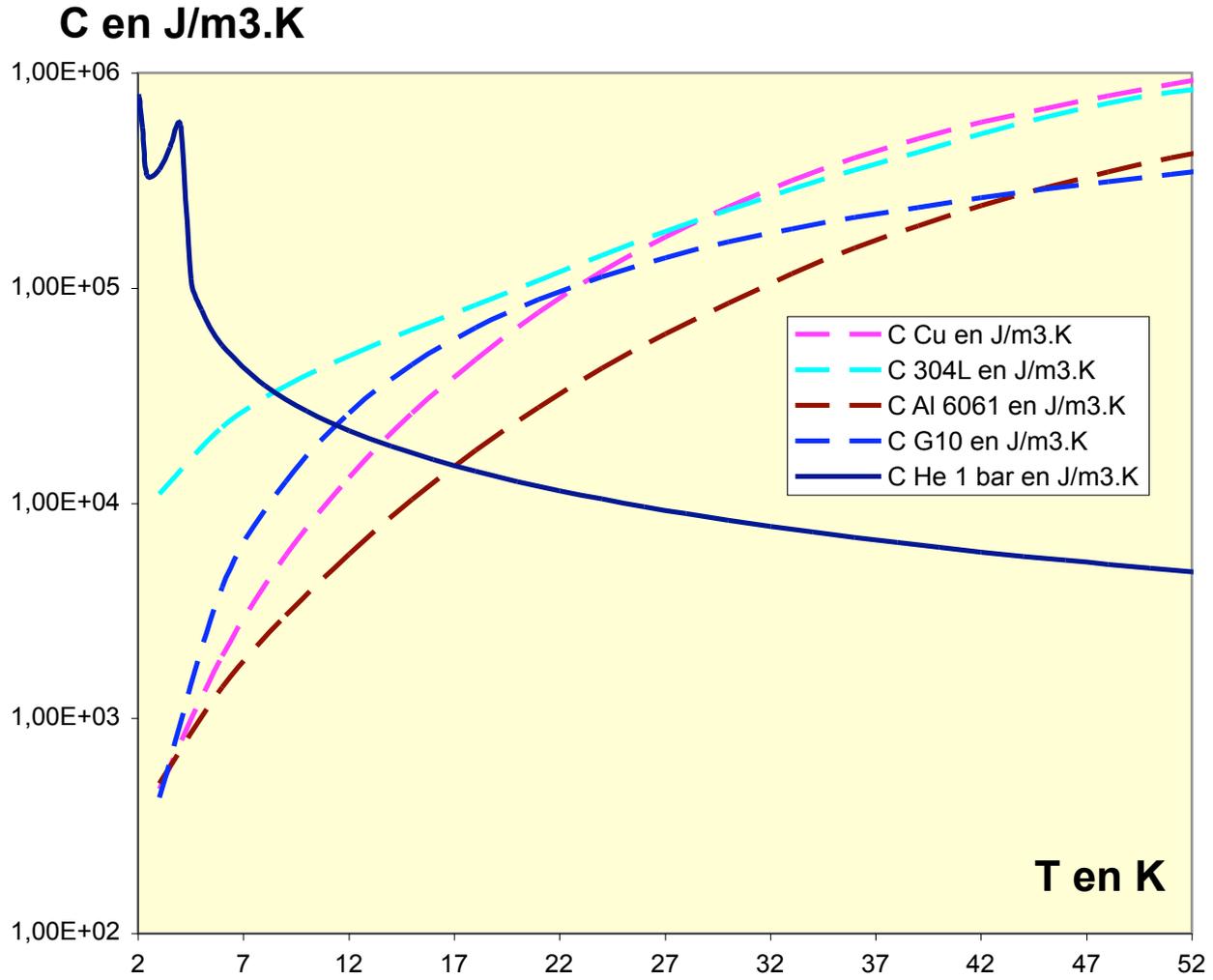
L'enthalpie h d'un corps représente l'intégrale de la capacité thermique en fonction de T dans un domaine de température fixé. Elle s'exprime alors par :

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

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

L' hélium comme « réserve calorique » à basse température versus les matériaux



L'hélium à basse température se trouve être souvent la plus grande réserve d'énergie...

Conductibilité thermique

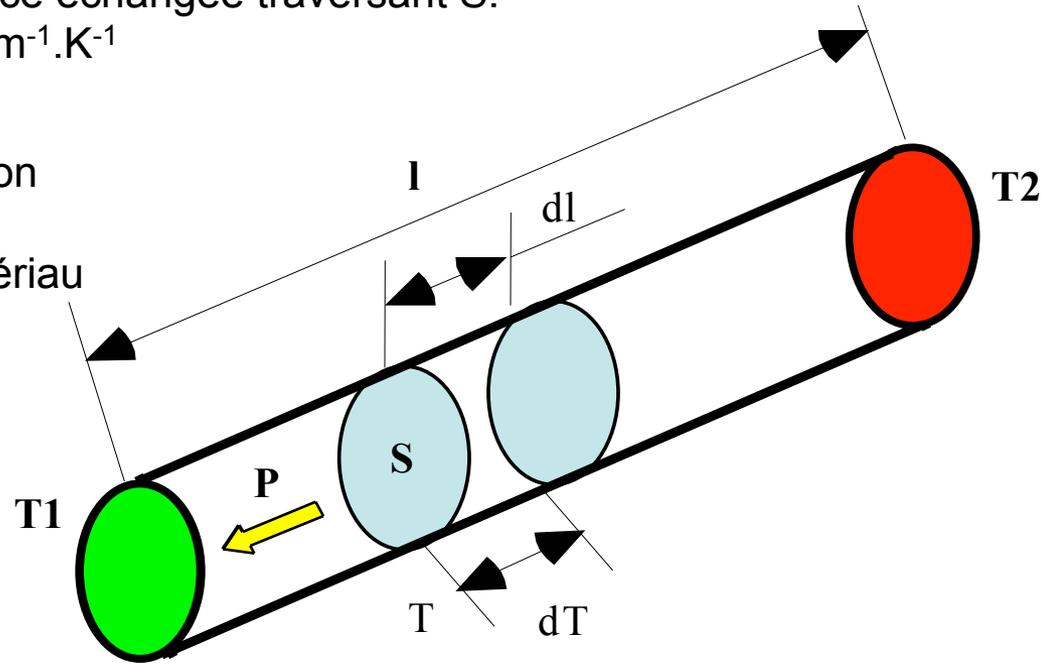
Conductibilité thermique.

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 :

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

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
 P 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

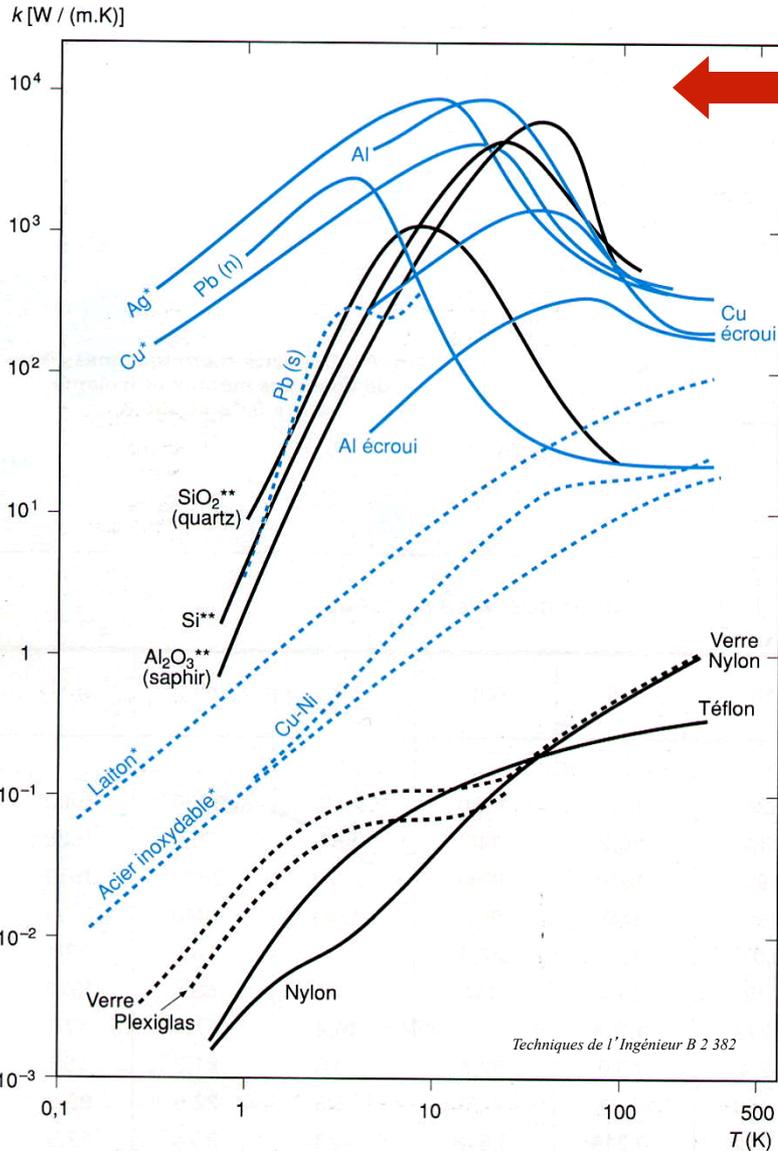


Pour un faible écart de T° , $k \approx$ constant

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

Conductance thermique en W/K

Conductibilité thermique des matériaux



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

Techniques de l'Ingénieur B 2 382

Conduction thermique : application techno

Adapter la géométrie pour réduire les apports de chaleur par conduction

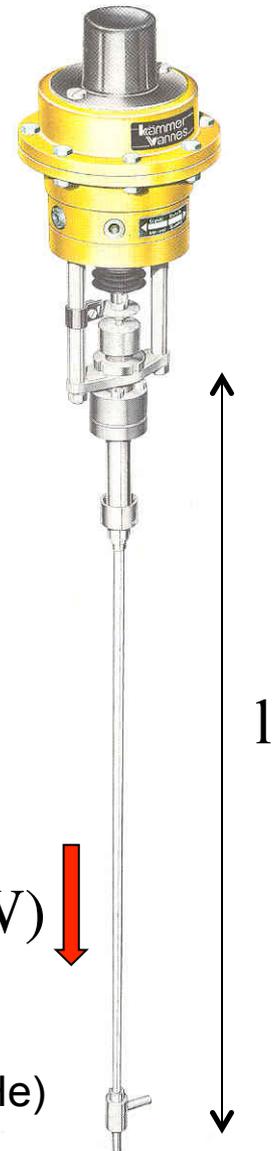
Exemple des vannes :

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

S/l réduit par S faible et grand l
=> Pertes thermiques P ↓



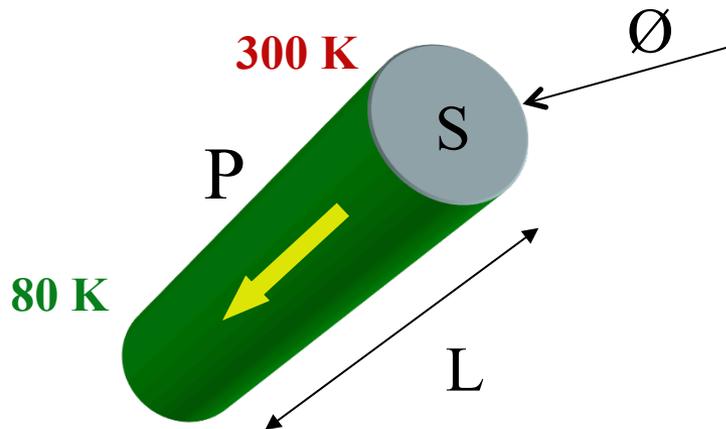
Vanne « chaude »



Vanne « froide » (LHe)

Conduction thermique: cas géométriques simples

Cas du barreau



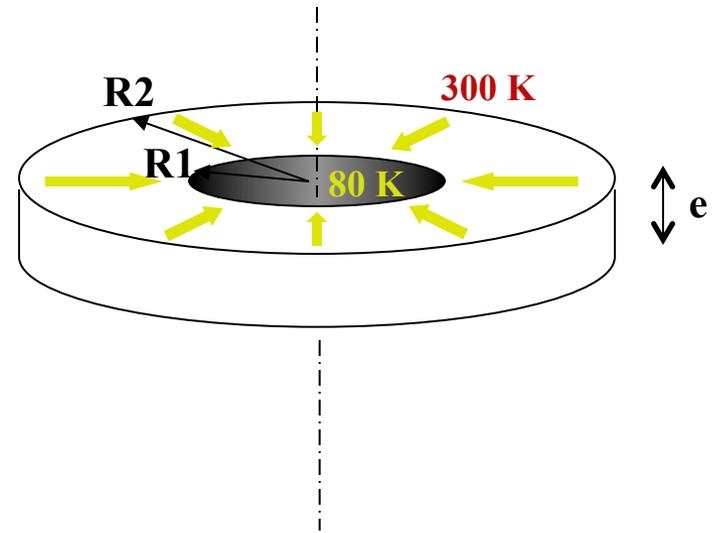
$$P = \frac{S}{L} \cdot \int_{80}^{300} k(T) \cdot dT$$

$I_{(80-300)}$
« 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

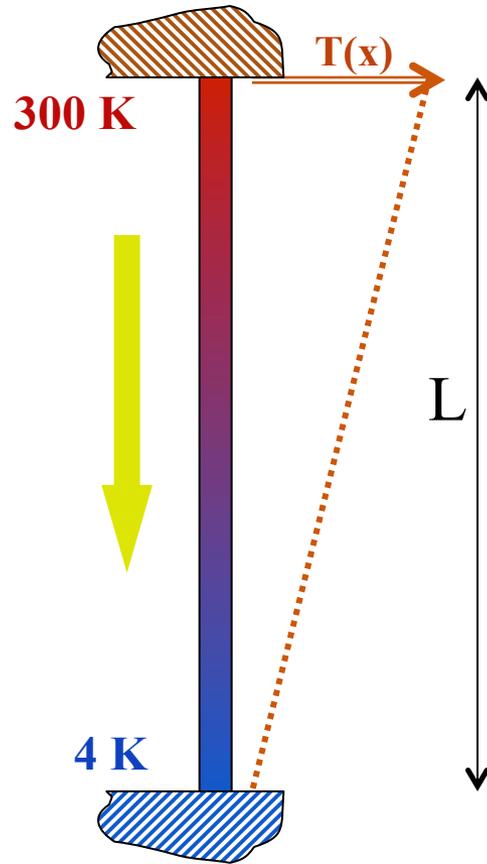
Cas de la pièce annulaire



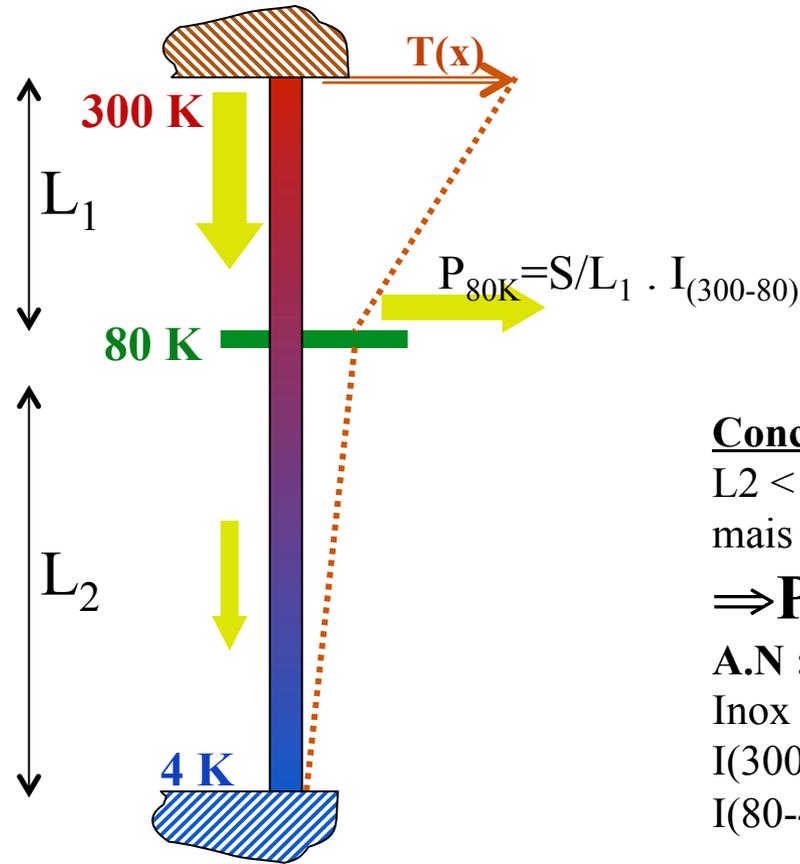
$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot e}{\ln(R2 / R1)} \cdot \int_{80}^{300} k(T) \cdot dT$$

Conduction thermique: réduction par « thermalisation »

Réduction des apports par thermalisation à T° intermédiaire:



$$P_{4K} = S/L \cdot I_{(300-4)}$$



$$P'_{4K} = S/L_2 \cdot I_{(80-4)}$$

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**

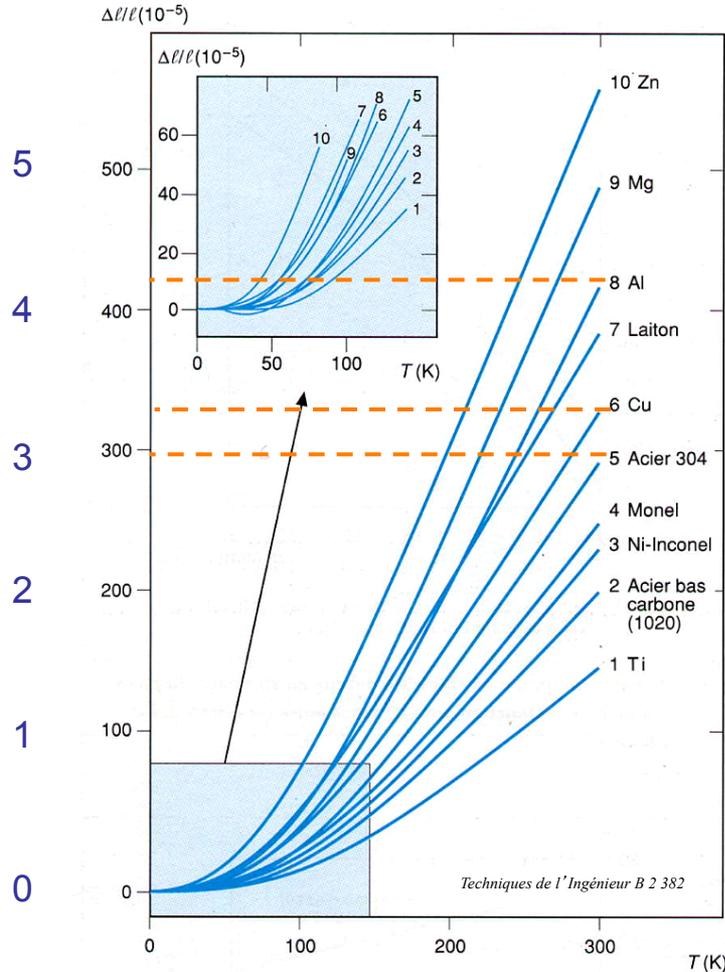
$$\Delta l = \frac{[l(T) - l_0]}{l_0} \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} l_0 \text{ est la longueur à 300 K} \\ l \text{ la longueur à basse température T} \end{array}$$

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

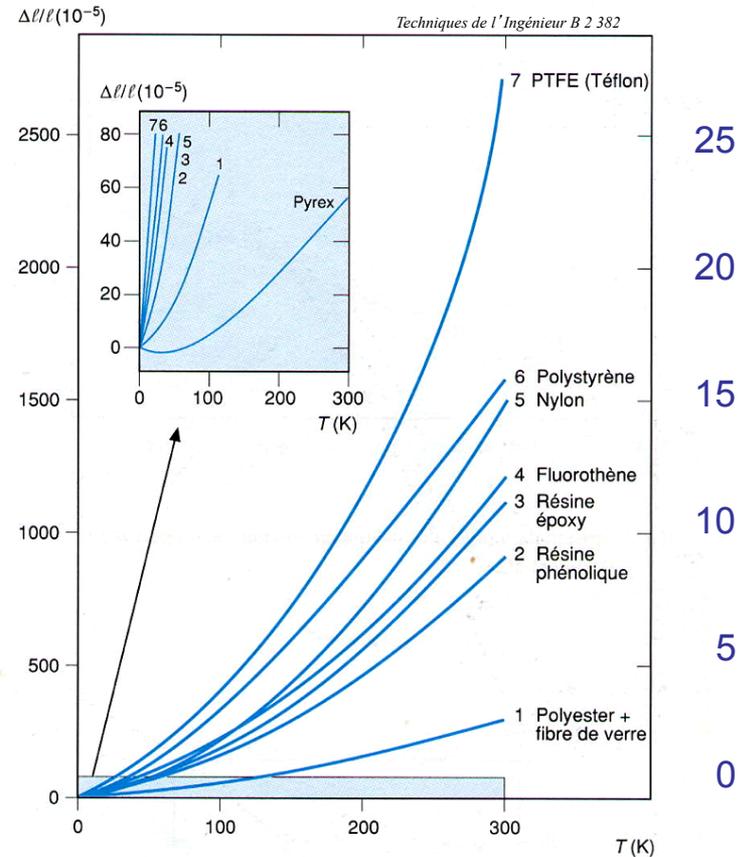
de 300 à 4 K
mm/m

Dilatation thermique

de 300 à 4 K
mm/m



Métaux

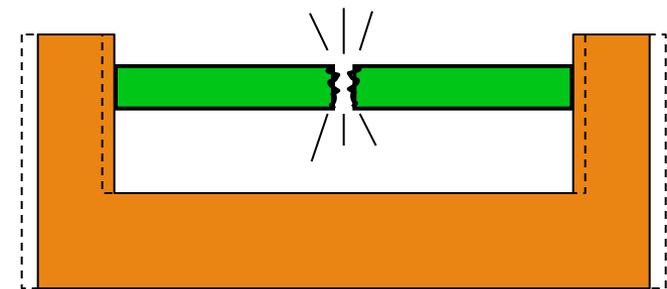
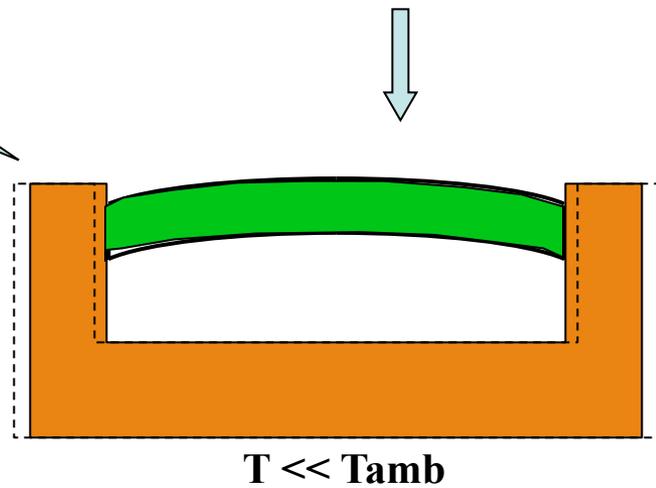
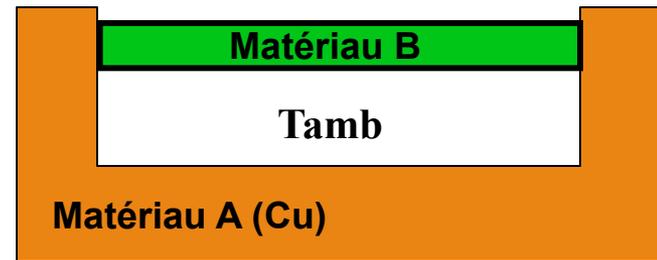
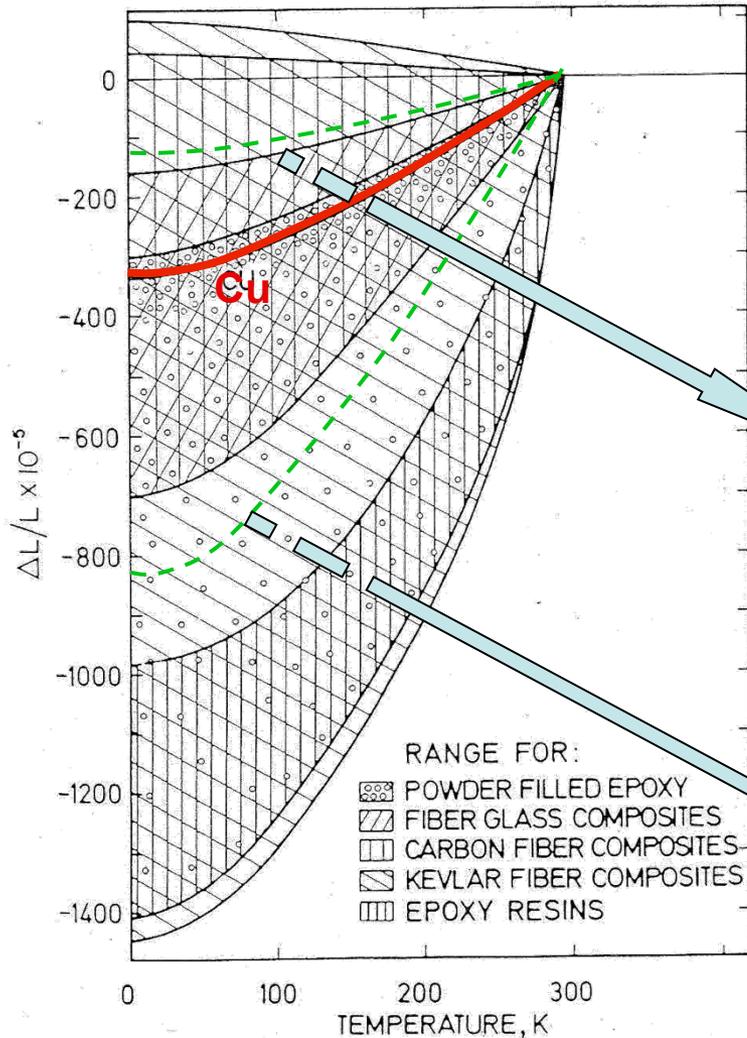


Matériaux synthétiques

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

Dilatation différentielle

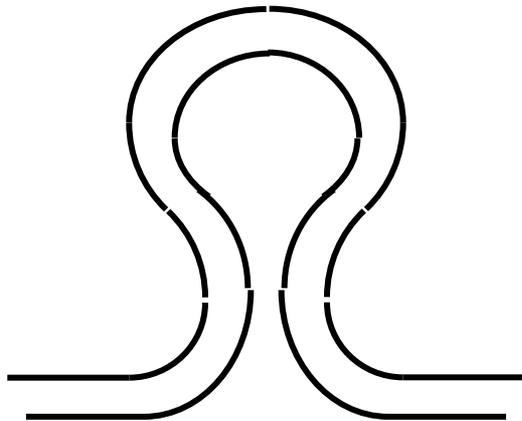
Comportements différents selon les natures des composants



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

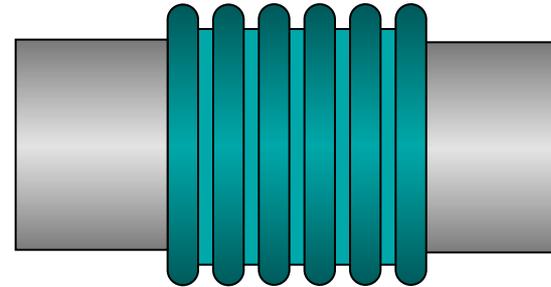
Souplesse à froid

par la souplesse intrinsèque des circuits ou éléments constitutifs



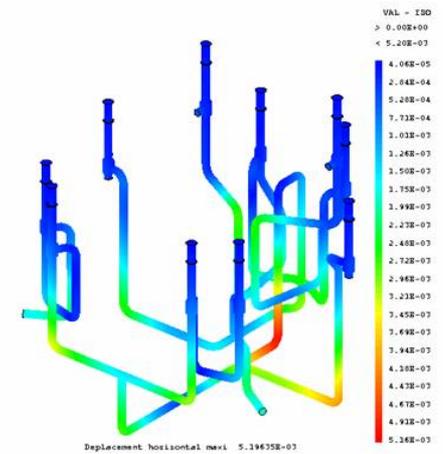
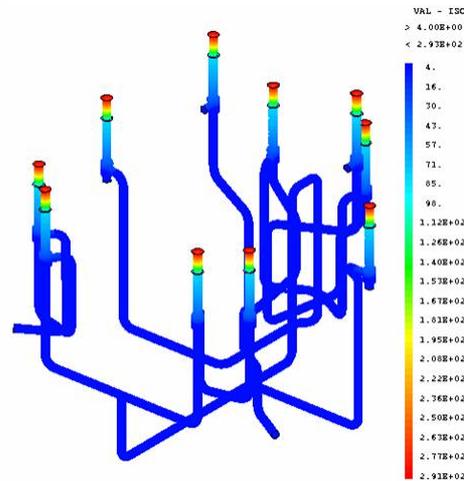
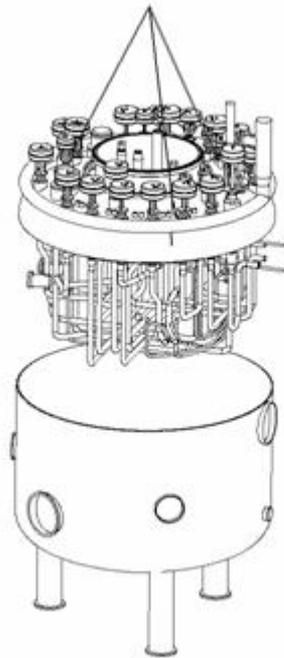
Attention à ce que la descente en froid ne fasse pas travailler le matériau dans le domaine plastique (écrouissage, fragilité, fissuration....)

par l'ajout d'éléments de souplesse supplémentaires

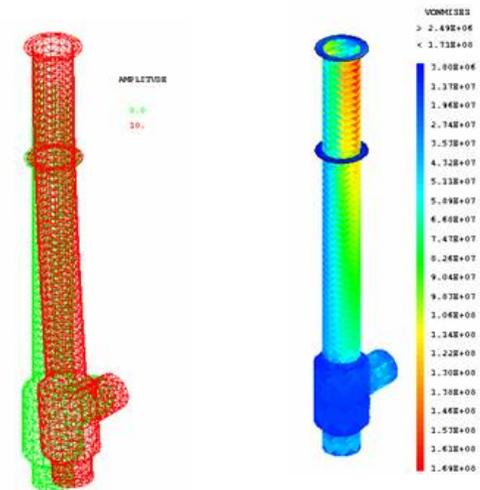


« Agréable » mais à risque car faible épaisseur avec soudure délicate (fatigue).

Analyse thermomécanique

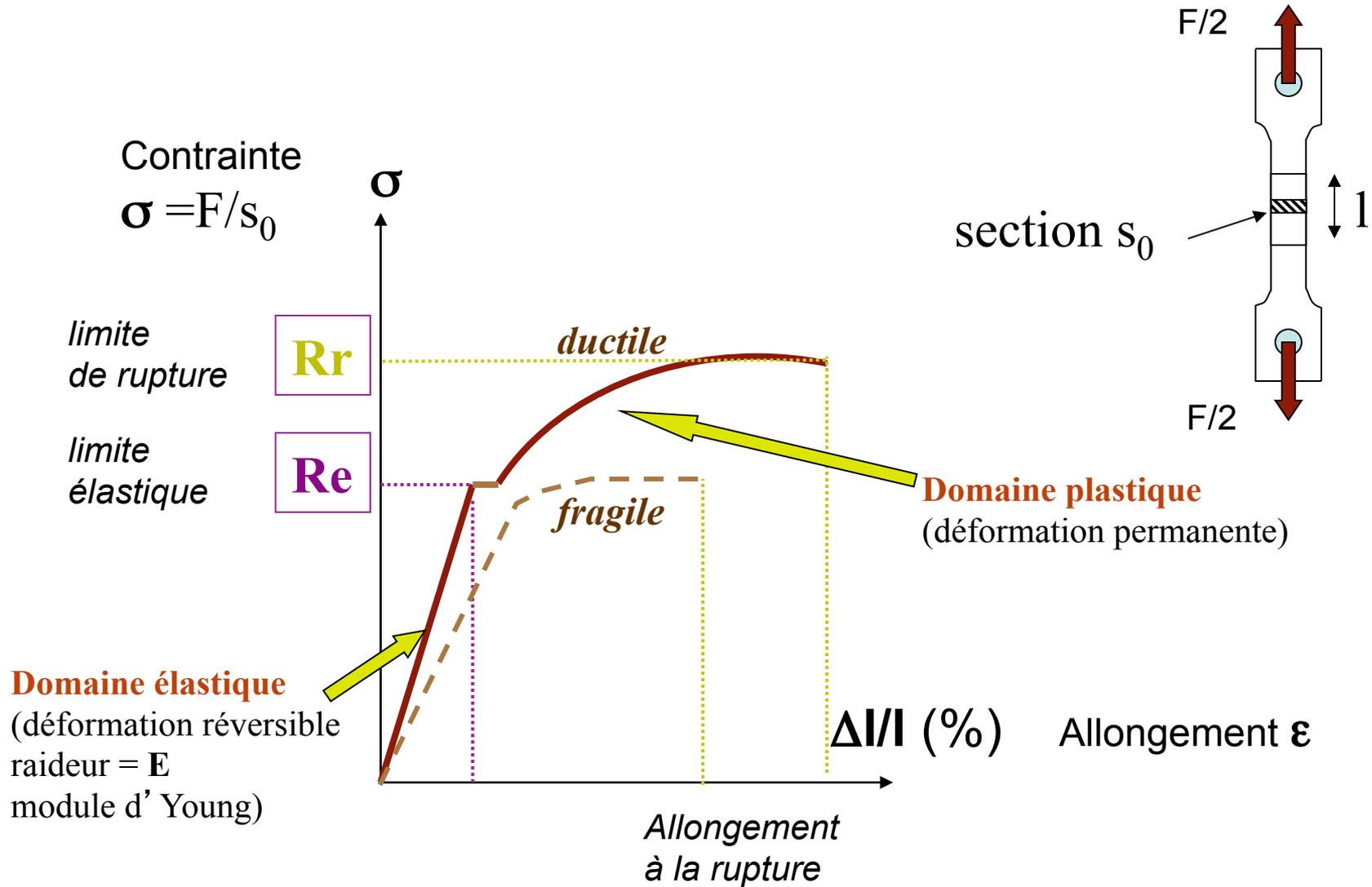


« Boîte à vannes d'ITER »
Pas de flexible sous videv (fiabilité maximale)) :
Etude thermomécanique de la circuiterie froide



Propriétés mécaniques

Exemple de l'essai mécanique de traction :



Propriétés mécaniques

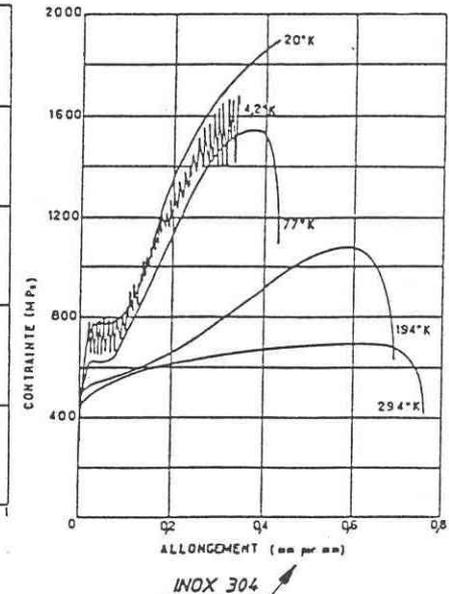
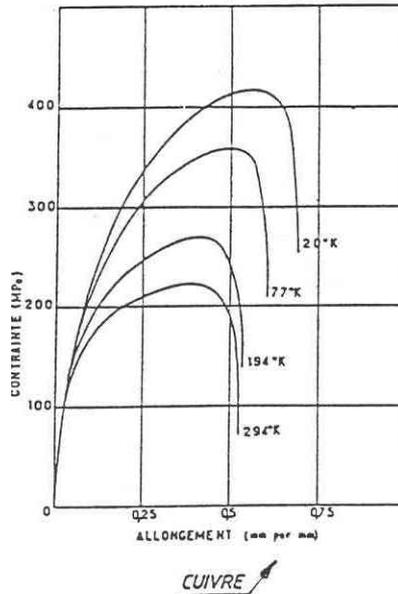
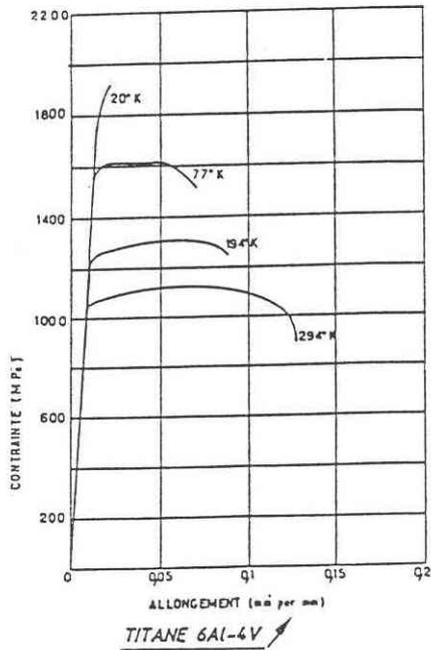
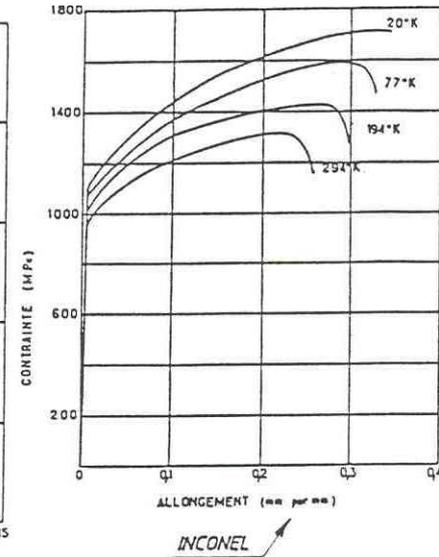
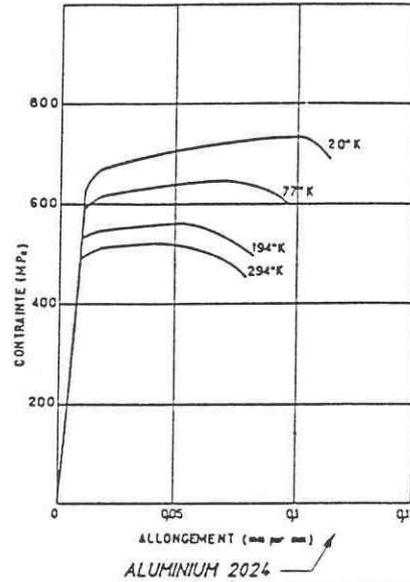
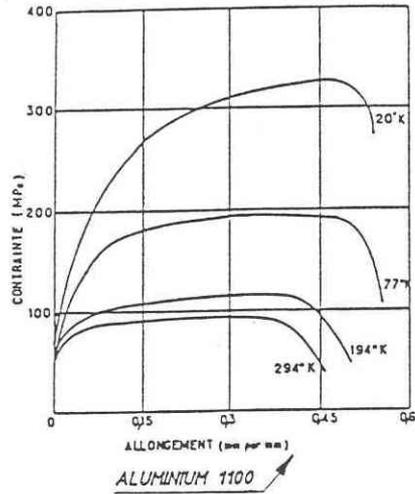
Selon le matériau, il est possible de constater qu'en dessous d'une certaine température ce matériau devient **fragile** en opposition avec une certaine ductilité (ou plasticité) à chaud.

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

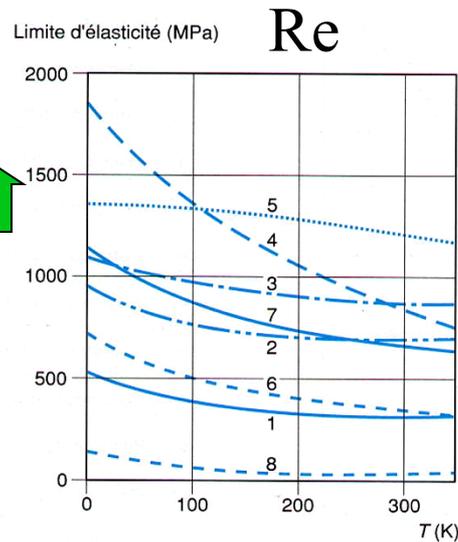
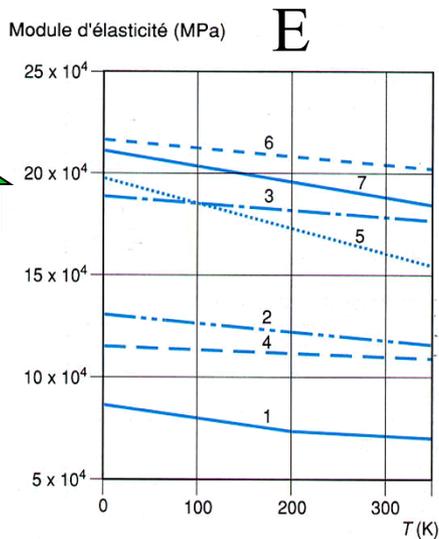
- réseaux cristallins cubiques à faces centrées (**Cu-Ni** et alliages, **Al et alliages, acier inoxydable (série 300)**, Ag, Pb, **laiton**, Au, Pt), les matériaux restent ductiles jusqu'aux très basses températures et ne présentent **pas de transition ductile-fragile**
- réseaux cubiques centrés (aciers 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 courbes de traction en fonction de T :



Propriétés mécaniques



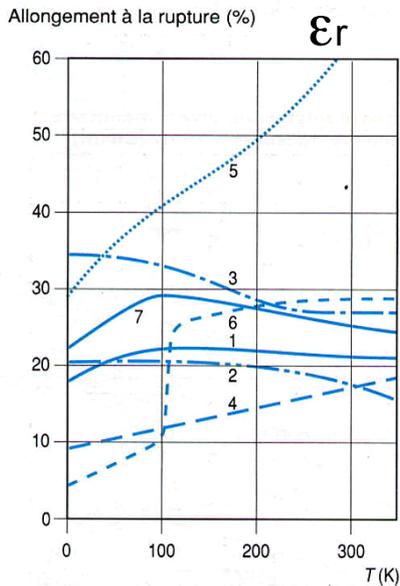
- les modules d'élasticité varient peu avec la température (meilleur à BT)

- 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).

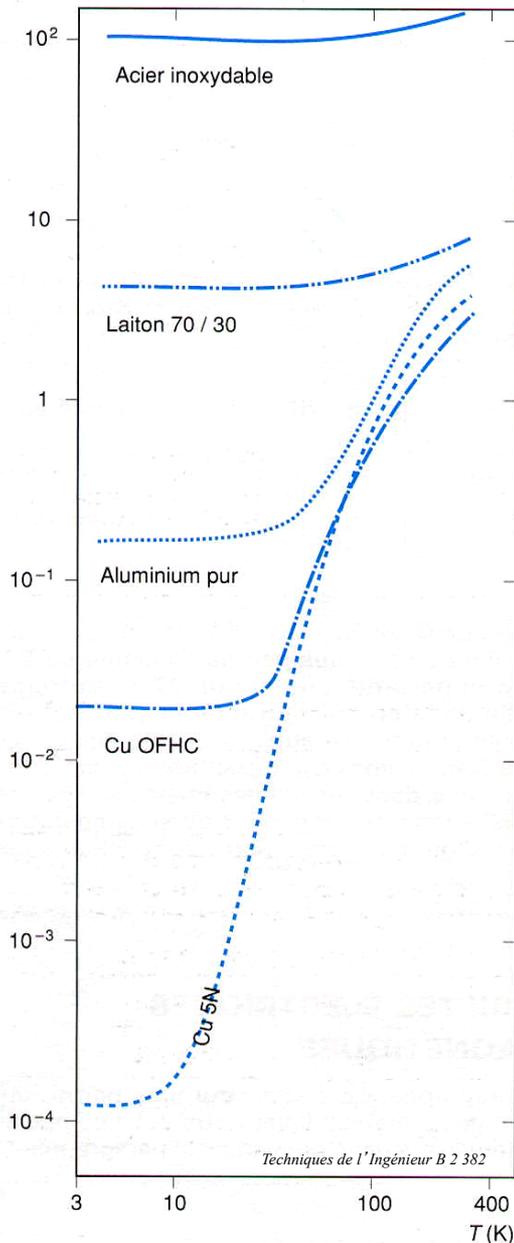
- limite de fatigue augmente à basse température (cycles de fatigue)



- 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

ρ ($10^{-8}\Omega.m$)



Techniques de l'Ingénieur B 2 382

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 :

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

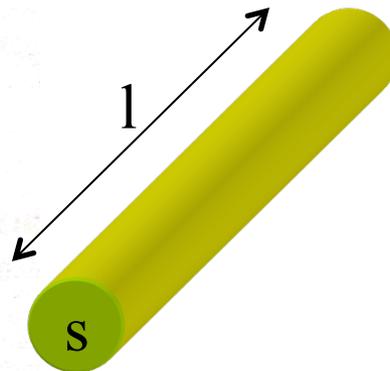
où

ρ résistivité en $\Omega.m$.

R résistance électrique en Ω

l longueur du conducteur en m

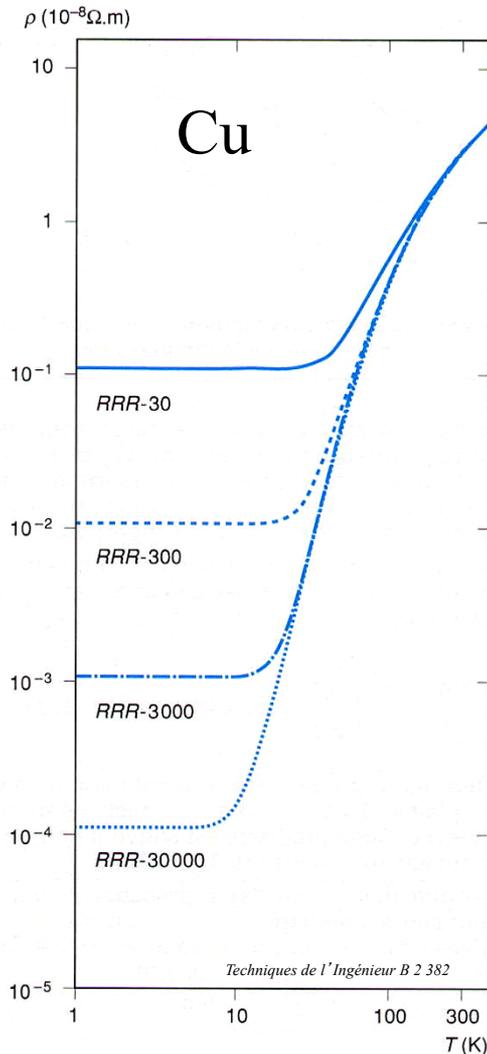
s section du conducteur en m^2



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 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 :

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

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.

Ex : RRR cuivre de plomberie = 7

RRR cuivre câble électrique = 70 à 120

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) | Lead |
| Aluminum 3003-F (UNS A93003) | Molybdenum |
| Aluminum 5083-O (UNS A95083) | Nickel Steel Fe 2.25 Ni |
| Aluminum 6061-T6 (UNS A96061) | Nickel Steel Fe 3.25 Ni (UNS S20103) |
| Aluminum 6063-T5 (UNS A96063) | Nickel Steel Fe 5.0 Ni (UNS S20153) |
| Apiezon N | Nickel Steel Fe 9.0 Ni (UNS S21800) |
| Balsa | Platinum |
| Beechwood/phenolic | Polyamide (Nylon) |
| Beryllium | Polyethylene Terephthalate (Mylar) |
| Beryllium Copper | Polyimide (Kapton) |
| Brass (UNS C2600) | Polystyrene |
| Copper (OFHC) (UNS C10100/ C10200) | Polyurethane |
| Fiberglass Epoxy G-10 | Polyvinyl Chloride (PVC) |
| Glass Fabric/polyester | Sapphire |
| Glass mat/epoxy | Stainless Steel 304 (UNS S30400) |
| Inconel 718 (UNS N107718) | 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](#)

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

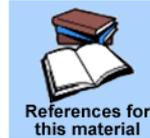
To view a
linear expansion plot
Click here

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.



References for
this material
To view a
thermal conductivity plot
Click here

To view a
specific heat plot
Click here

Return to Material Properties
Index Page

	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

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.

Autre source numérique CRYOCOMP:

The **CryoComp 5.1** software
Eckels Engineering Inc.
3322 Ebenezer Chase Drive
Florence, SC 29501
USA

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

Properties available:

- * **specific heat**
- * **thermal conductivity and its integral**
- * **thermal contraction**
- * **electrical resistivity**
- * **enthalpy**
- * **thermal diffusivity**
- * **magneto-resistance of copper and aluminum**

Entre autres :

- * 1020 and 4340 steels
- * 304, 310, 316, 347 stainless steel
- * A353, A286 stainless steel alloys
- * 9 pct. Nickel steel
- * aluminum
- * aluminum alloys 2219 T81, 3003-F, 6061-T6, 7075-T6, 5083-T0
- * Apiezon "N" grease
- * ARMCO Iron
- * beryllium, beryllium copper
- * 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
- * Nitronic 50
- * nylon
- * Nylon 6/6
- * PbSn solder
- * PC film
- * PET
- * PET film
- * phosphor bronze
- * polyethylene
- * sapphire
- * silver
- * Styrafoam
- * teflon
- * tin
- * titanium and Ti-6Al4V alloy
- * Ti-5AL-2.5 Sn
- * YBCO

Cryogénie

Transferts thermiques

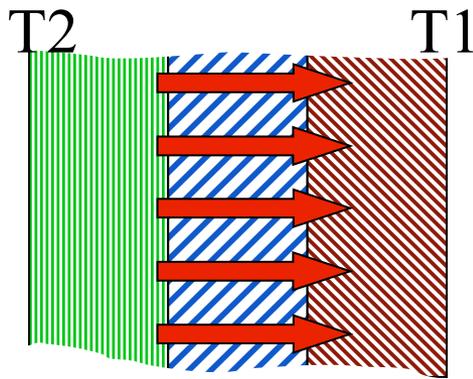
Mise en œuvre

Exemples :

- Bobine supra B0 ATLAS

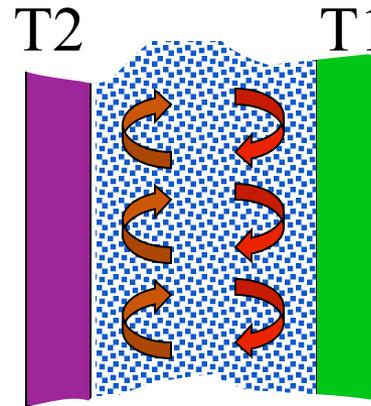
Transferts thermiques

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.



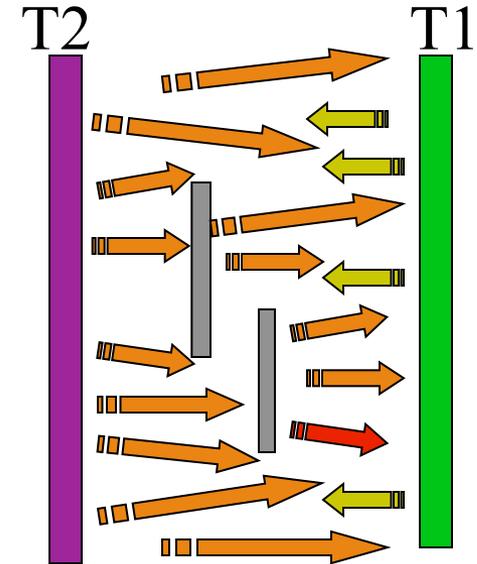
Conduction :

- solide
- gaz
- liquide



Convection :

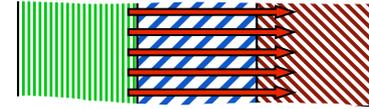
- gaz
- liquide
- *naturelle*
- *forcée*



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 ($\mathbf{W} = -k.s.grad T$) => 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 lien thermique (Cu, Al...).

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

Voir paragraphe précédent sur conductibilité thermique

Conduction moyenne dans liquides cryogéniques.

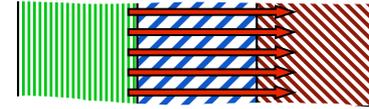
Sauf l'hélium superfluide ($T < 2,17 K$) qui fait exception. La conductivité thermique "équivalente" dans l'hélium superfluide ("équivalente" car fonction du flux de chaleur) est énorme et peut être largement supérieure ($> \times 1000$) à celle du cuivre dans les mêmes conditions de température, de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

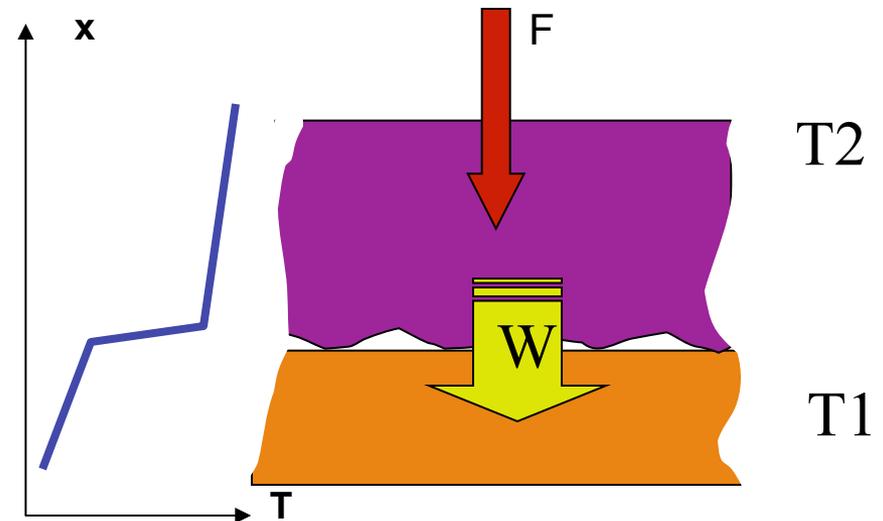
Remèdes :

Serrage important

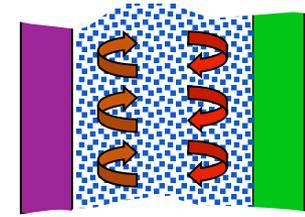
Liant thermique pour éviter des poches de vide entre paroi (pâte chargée, film indium,...)

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 entre paroi et fluide :

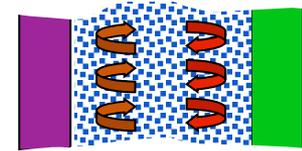
$$W = h_c \cdot S \cdot (T_p - T_f)$$

où h_c coefficient de convection ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
 S surface d'échange en m^2
 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 $W/m^2 \cdot K$ à plusieurs milliers de $W/m^2 \cdot K$ ce qui réduira l' écart de température entre fluide et paroi.

Convection



Evaluation du coefficient h grâce au calcul du nombre de Nusselt

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

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 ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)

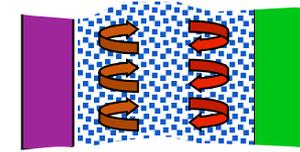
l : grandeur géométrique caractéristique dans l'échange (diamètre d ' un tube, hauteur d ' une paroi verticale, distance entre plaque...) (m)

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

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

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

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 $l/r \cdot C_p$) avec le mouvement de la matière (viscosité cinématique h/r).

nombre de Nusselt

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

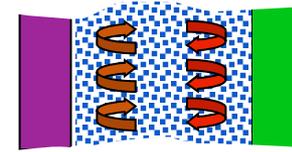
où h_c est le coefficient d'échange exprimé en $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

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 : **$hc \approx 7 \text{ à } 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$** \Leftrightarrow valeur usuelle en convection naturelle avec ΔT raisonnable (qq K à qq dizaines de K) ...

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.

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

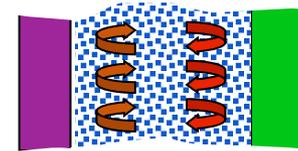
$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad \text{pour } 10^4 < Re < 1,2 \cdot 10^5$$

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

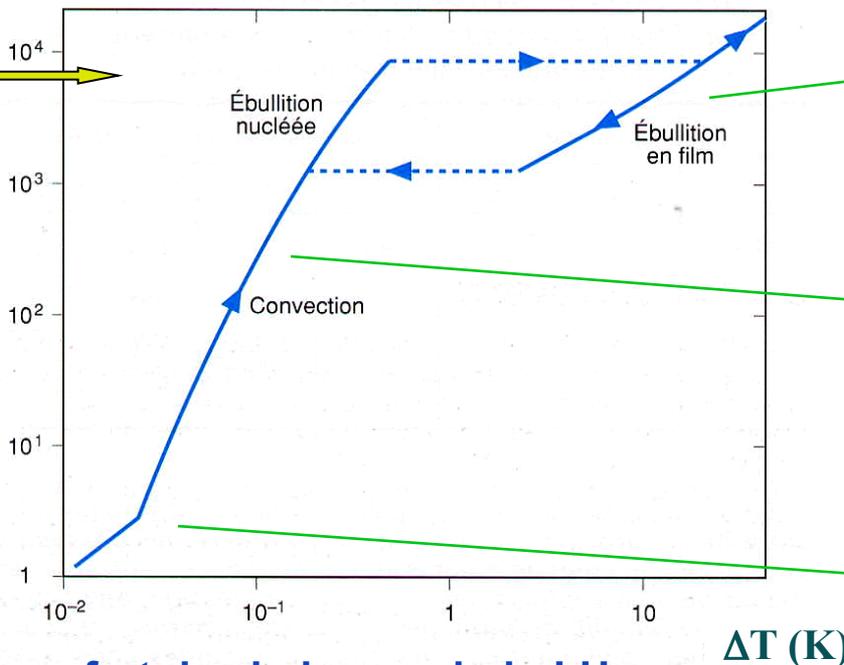


Exemple de l'ébullition en bain

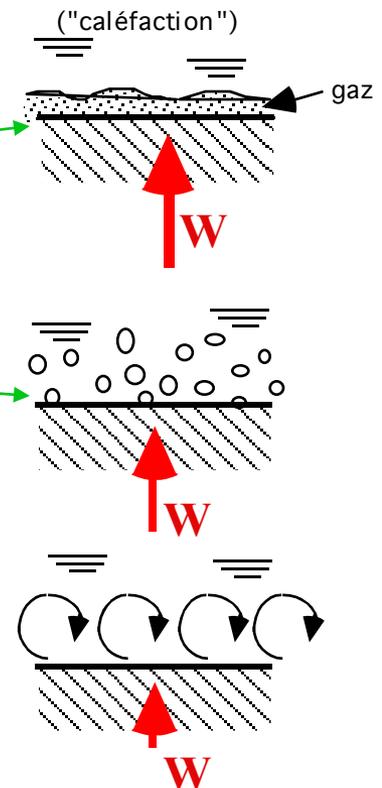
Les différents régimes que l'on rencontre lorsque l'on évacue de la chaleur d'une surface vers un bain. A chaque régime va correspondre un coefficient d'échange type. Le flux critique est le flux de chaleur à partir duquel un film de gaz se positionne entre le bain et la plaque chaude. Dès lors, ce film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

Flux (W/m²)

! Flux critique

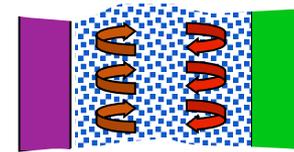


$$h = \frac{Flux}{\Delta T}$$

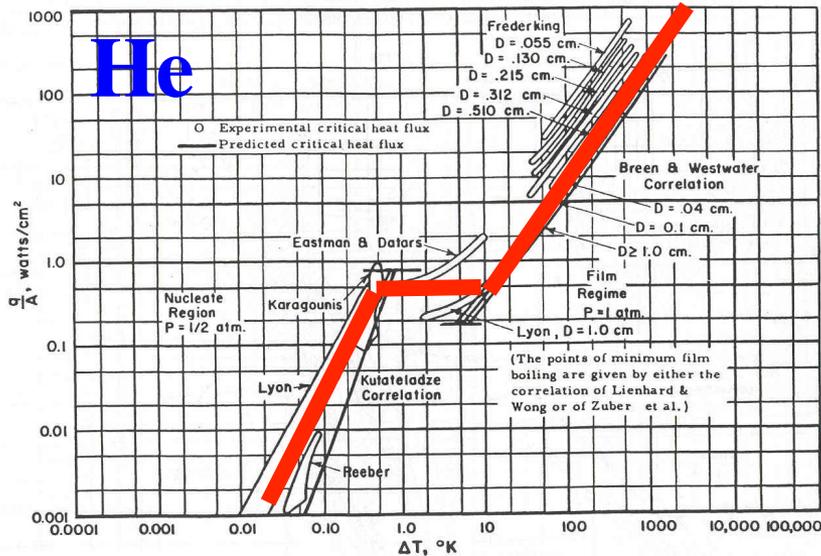


Ex : transfert de chaleur en bain LHe

Convection en fluide diphasique

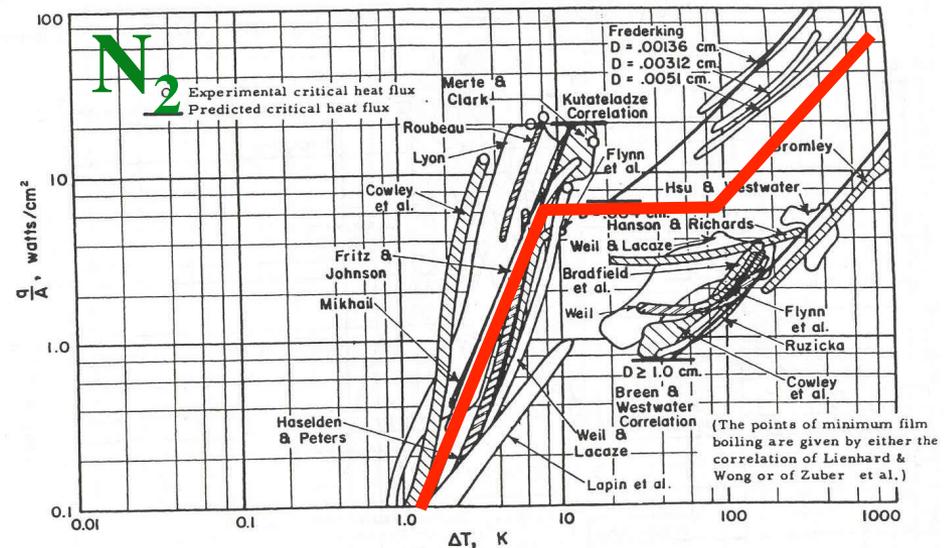


- Ebullition nucléée => h élevé (ex : 30000 W/m².K pour H₂O, de 10000 W/m².K pour LHe)
- Flux critique => augmentation brutale du ΔT = surchauffe paroi



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

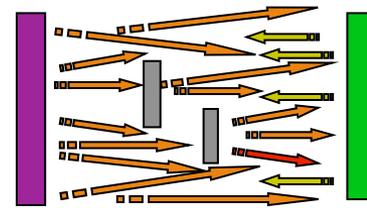
Hydrogène liquide à 1 bar
 $\Phi_c \approx 40000 \text{ W/m}^2$ et $\Delta T_c \approx 20 \text{ K}$



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 = $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

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 $\varepsilon < 1$)

et

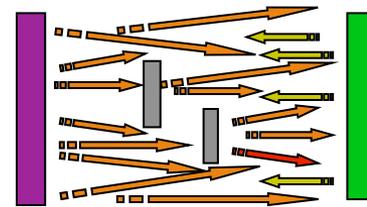
λ la longueur d'onde émise

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

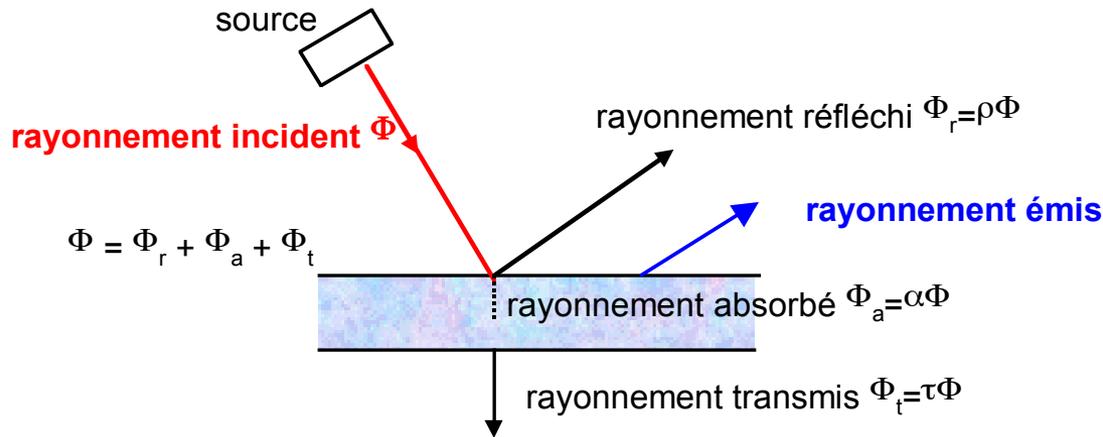
$\varepsilon \downarrow$ quand $T \downarrow$

$\varepsilon \uparrow$ 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

$$\varepsilon = 1 - \rho \quad (\text{milieux opaques } \tau=0)$$

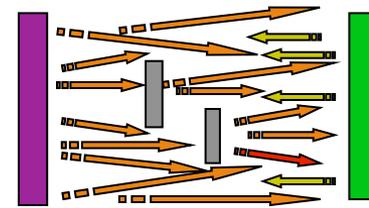
$$\varepsilon \downarrow \Leftrightarrow \rho \uparrow$$

Loi de Kirchoff

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

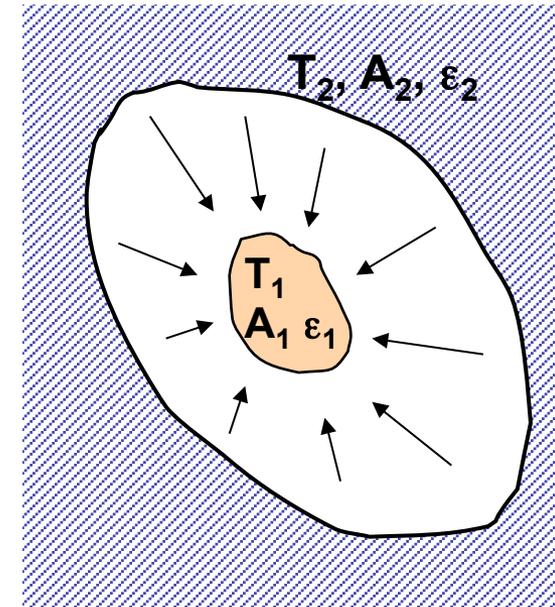
Puissance reçue par la paroi de surface A_1 à la température T_1 en regard d'une paroi de surface A_2 à la température T_2 :

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

F_{12} : facteur d'émissivité = $f(\epsilon_1, \epsilon_2, A_1, A_2)$

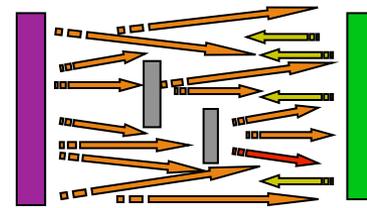
Exemples :

- cas de plaques parallèles et voisines ($A_1 \sim A_2$) :
$$F_{12} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_2 + (1 - \epsilon_2) \epsilon_1}$$
- cas de longs cylindres coaxiaux ($L \gg R$) :
$$F_{12} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_2 + \frac{A_1}{A_2} (1 - \epsilon_2) \epsilon_1}$$
- cas d'émissivités proches et surfaces voisines
$$F_{12} = \frac{\epsilon}{2 - \epsilon}$$



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



A.N :

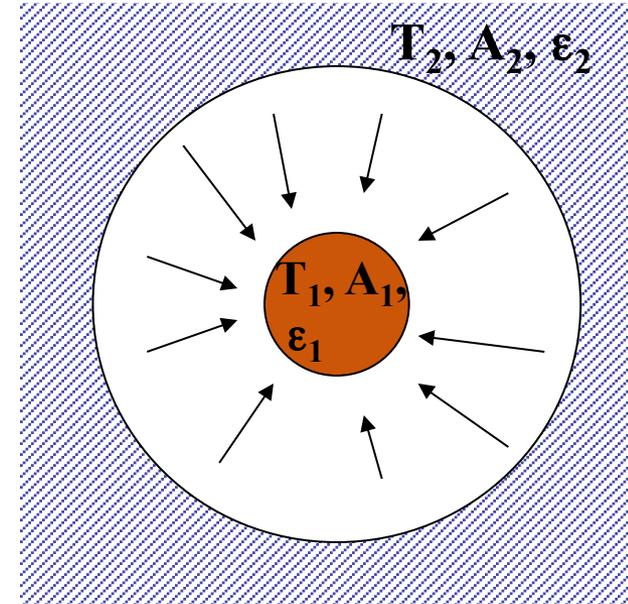
$$A_1 = A_2 \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_2$$

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

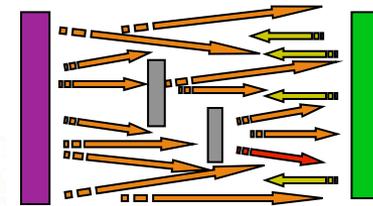
entre 300 et 4 K, $W = 46 \text{ W/m}^2$

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

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



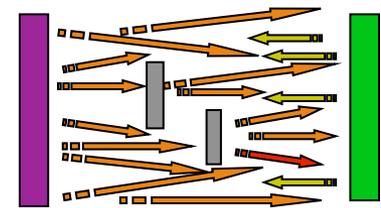
Exemples d'émissivité



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

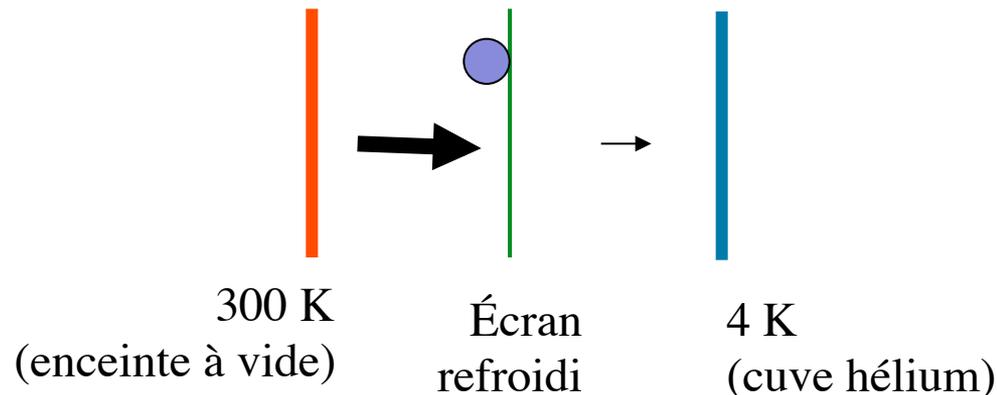
Ecrantage anti-rayonnement



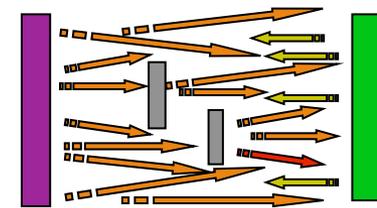
Interposition d'écrans refroidis

Écrans refroidis par circulation gaz

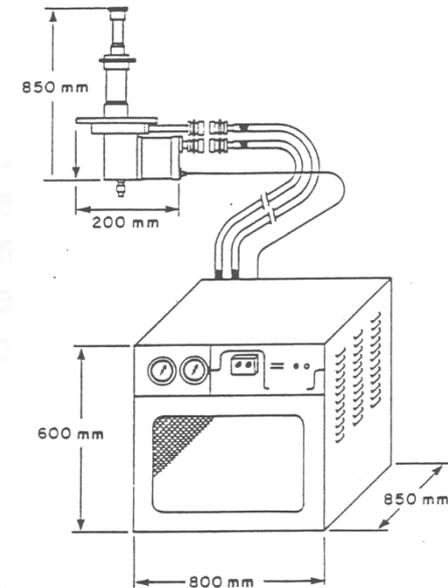
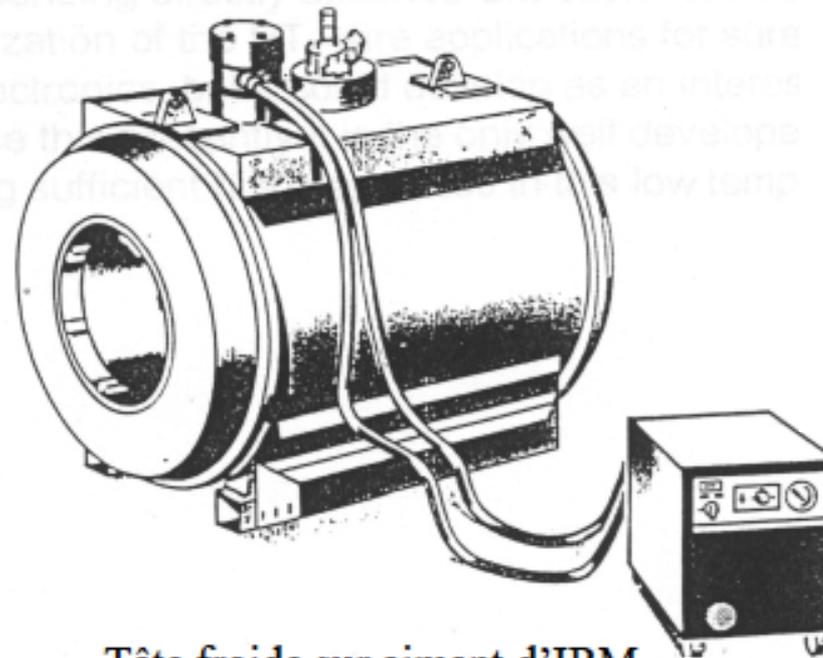
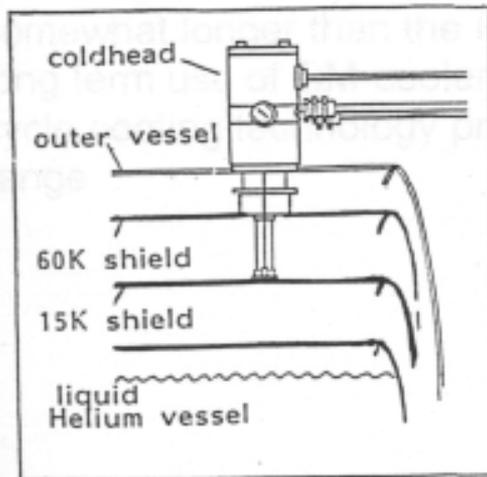
- par circulation d'azote liquide :
réduction d'un facteur $(300/77)^4 = 230$
- par retour de vapeurs d'hélium :
(forte chaleur sensible 1500 J/g de 4,2 K à 300 K)
- écran à 60 K/77 K : gain 2.7



Ecrantage anti-rayonnement

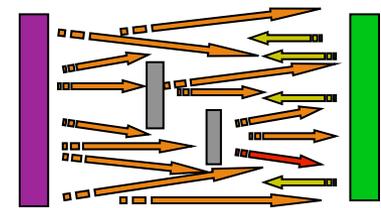


Écrans refroidis par thermalisation sur étage
Cryogénérateur : exemple d'écrantage thermique sur
IRM pour diminuer la consommation d'hélium liquide à
des très faibles valeurs



Tête froide sur aimant d'IRM
(refroidissement d'écrans thermiques)

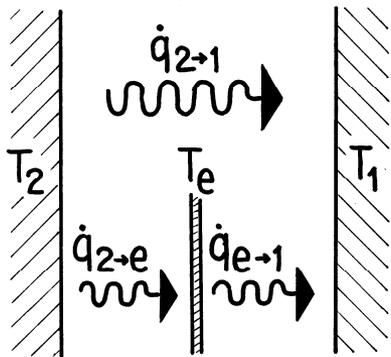
Ecrantage anti-rayonnement



- **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 flottants

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



$$T_e = ? K$$

$$\dot{q}_{2 \rightarrow e} = \dot{q}_{e \rightarrow 1}$$

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

$$\Rightarrow \dot{q}_{2 \rightarrow e} = \frac{\dot{q}_{2 \rightarrow 1}}{2}$$

$$T_2 = 300 K \quad (T_{amb})$$

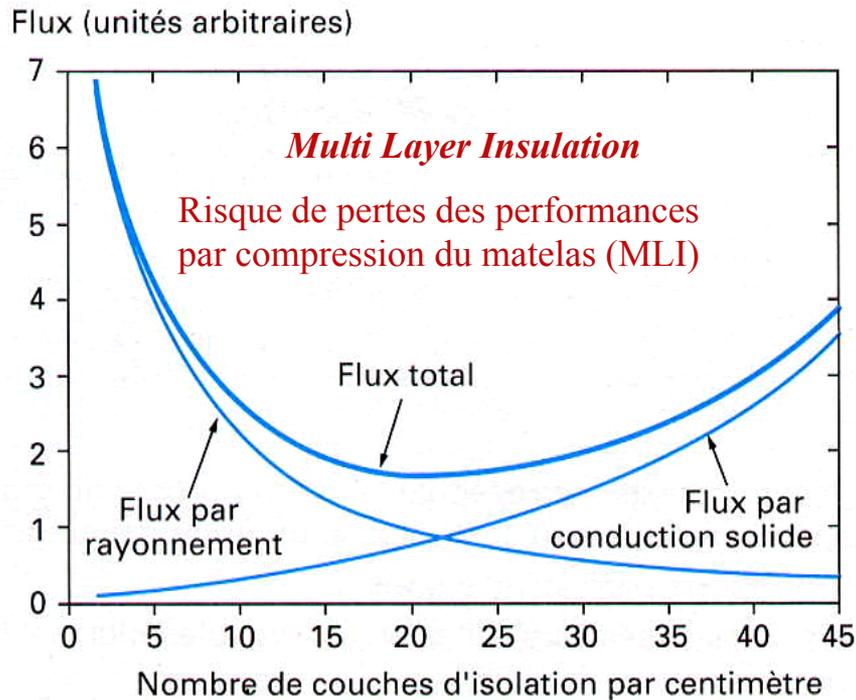
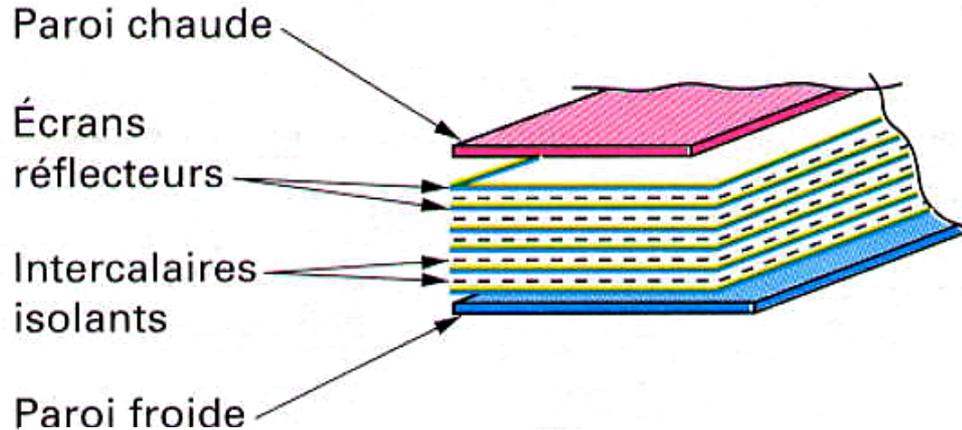
$$T_1 = 4 K$$

$$T_e = 252 K!!!$$

- n écrans multiples :
- superisolation ...

$$\dot{q}_{n \text{ écrans}} \approx \frac{1}{n+1} \cdot \dot{q}_{2 \rightarrow 1}$$

Super-isolation (MLI = Multi Layer Insulation)



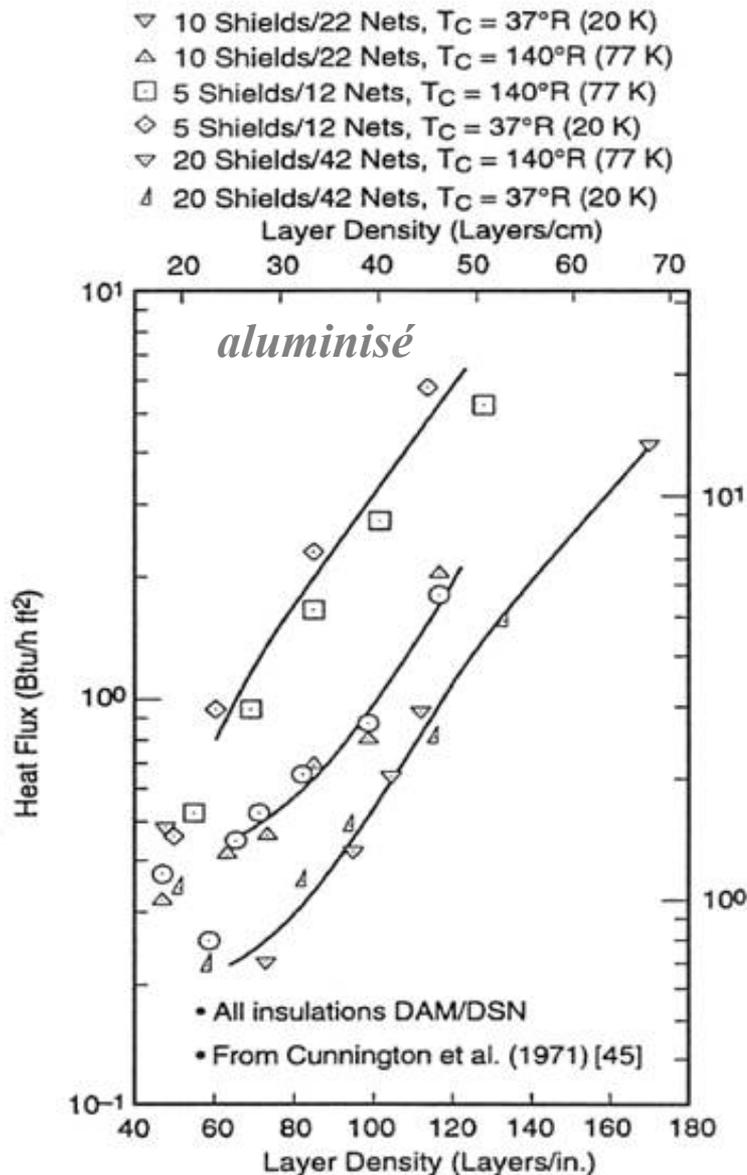
Techniques de l'Ingénieur B 2 382



ensemble enveloppé de MLI

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

Exemples de performances de MLI



T_c : température paroi froide

$T_h = T_{amb} = 300\text{ K}$

Typiquement, un manteau MLI d'une vingtaine de couches laisse passer :

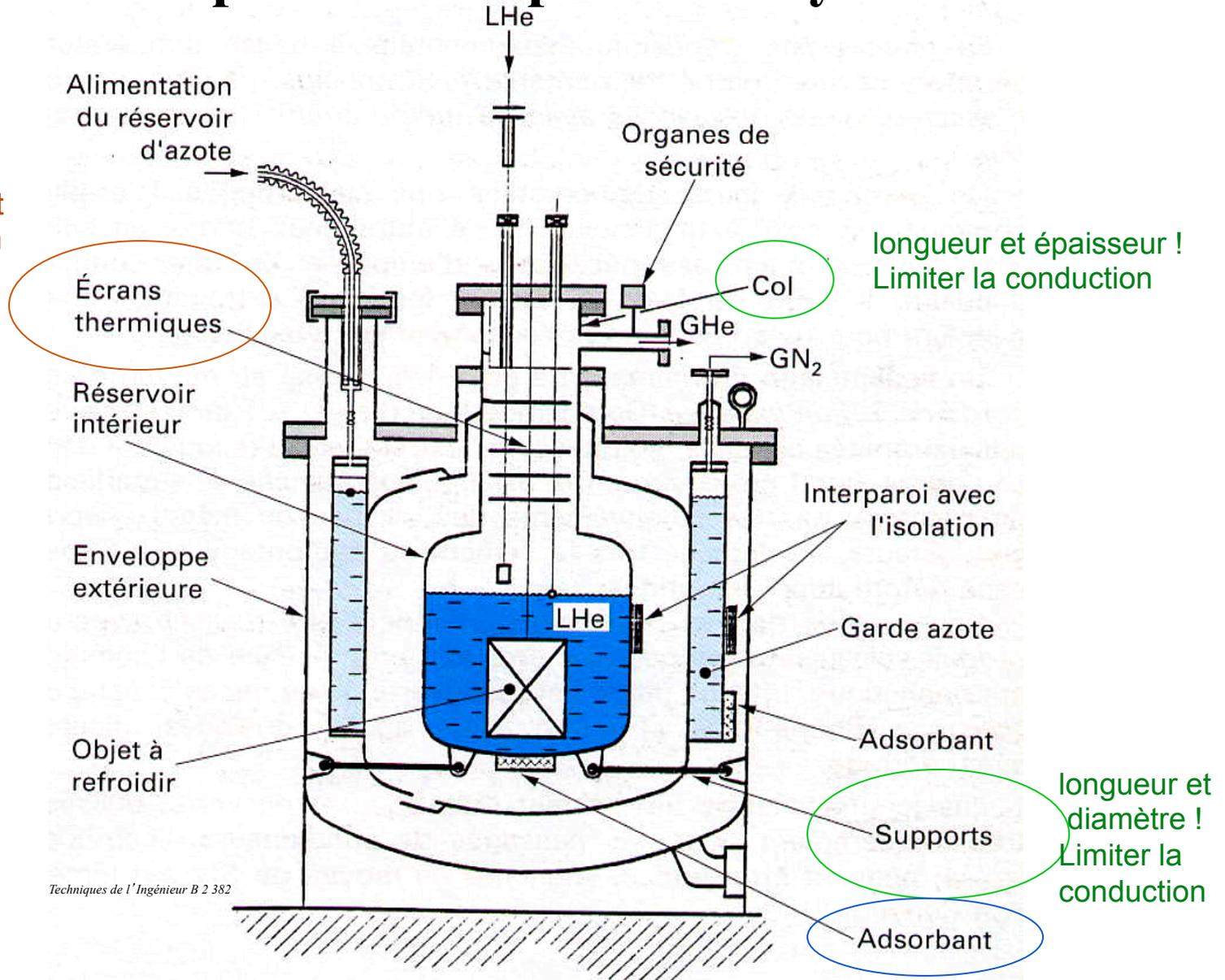
- 1 à 3 W/m² entre 300 et 80 K
(5 W/m² si comprimé)

- moins de 100 mW/m² entre 80 et 4 K

Forte variation en fonction des effets de bord, des ouvertures ou défauts dans le manteau et de sa compression

Exemple de conception de cryostat

Anti-rayonnement
et anti-convection



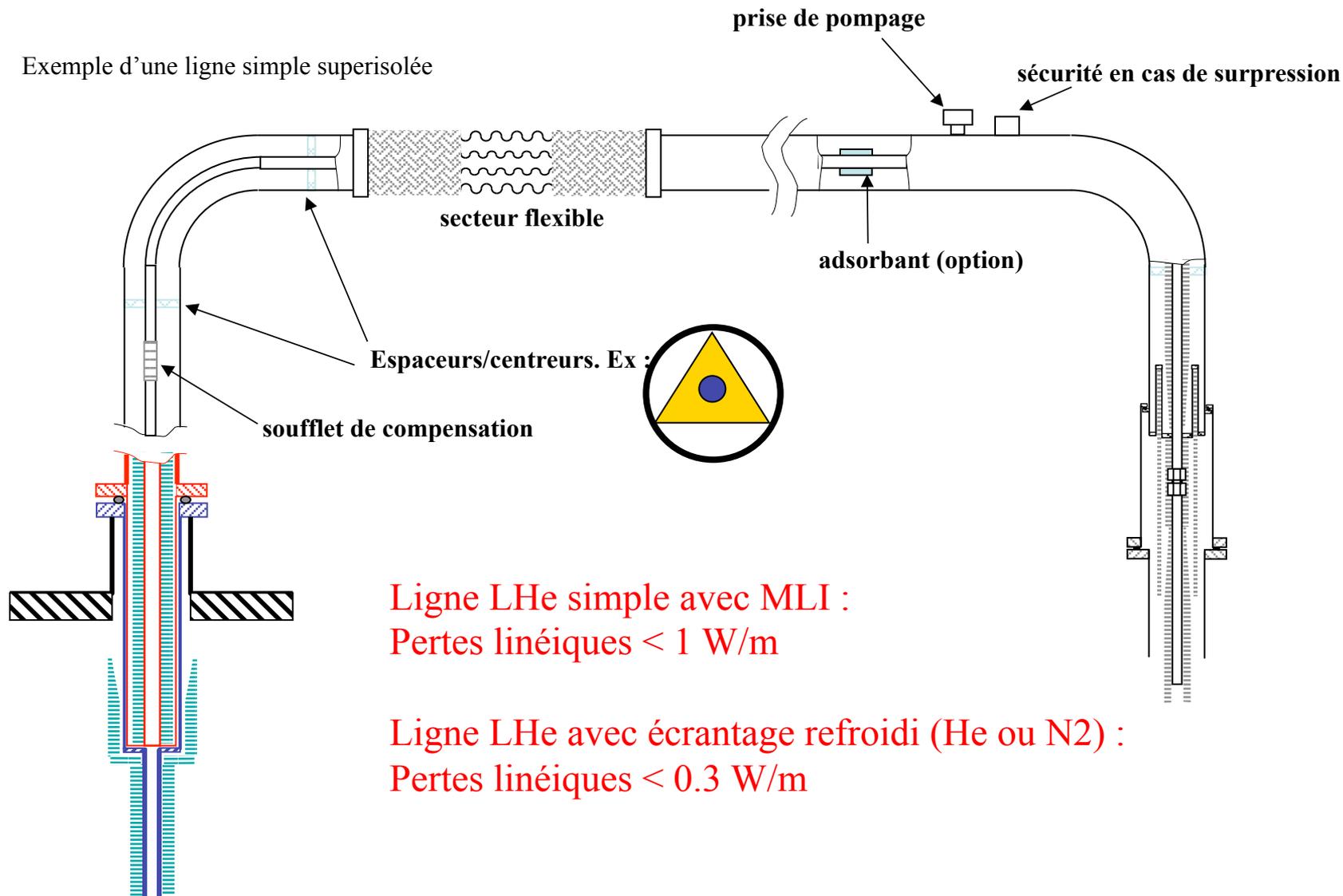
Techniques de l'Ingénieur B 2 382

Qualité du vide ! Anti-convection et anti-conduction

ETBD Cargèse

Ligne de transfert cryogénique (simple)

Exemple d'une ligne simple superisolée



Ligne LHe simple avec MLI :
Pertes linéiques < 1 W/m

Ligne LHe avec écrantage refroidi (He ou N₂) :
Pertes linéiques < 0.3 W/m

Instrumentation (exemple de la thermométrie)

Thermométrie classique à BT (hors thermomètres primaires non présentés)

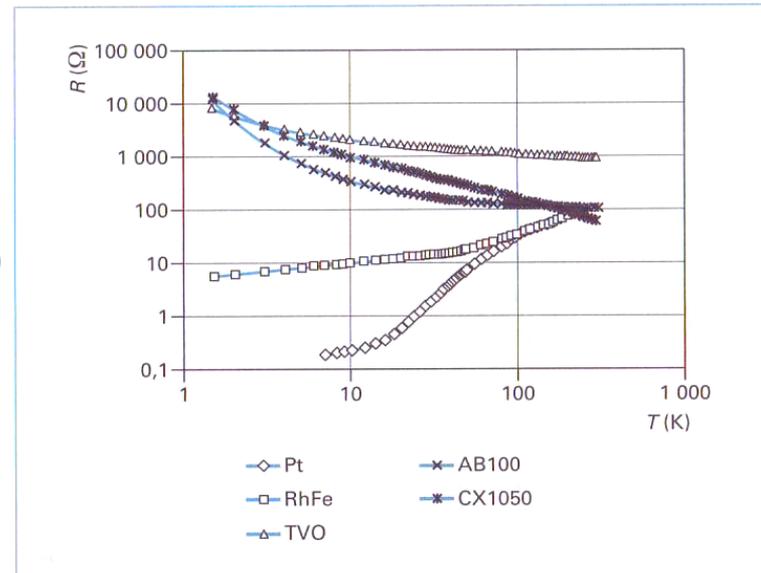
- à résistance
 - Platine (Pt100, Pt1000...) 20 K à 373 K
 - Rh-Fe 1,5 à 300 K
 - Carbone qq mK à 100 K
 - Germanium 1 à 100 K
 - Diode (Si) 1,5 à 300 K
 - RuO2 qq mK à 100 K
 - Cernox 1 à 300 K

- à thermocouple
 - Au (0,02%)Fe-Chromel 2 à 300 K (11 μ V/K à 4 K)
 - Cu-Constantan (type T) 4 à 600 K

- à tension de vapeur (bulbe à hélium)

Instrumentation (exemples de thermomètres résistifs $R=f(T)$)

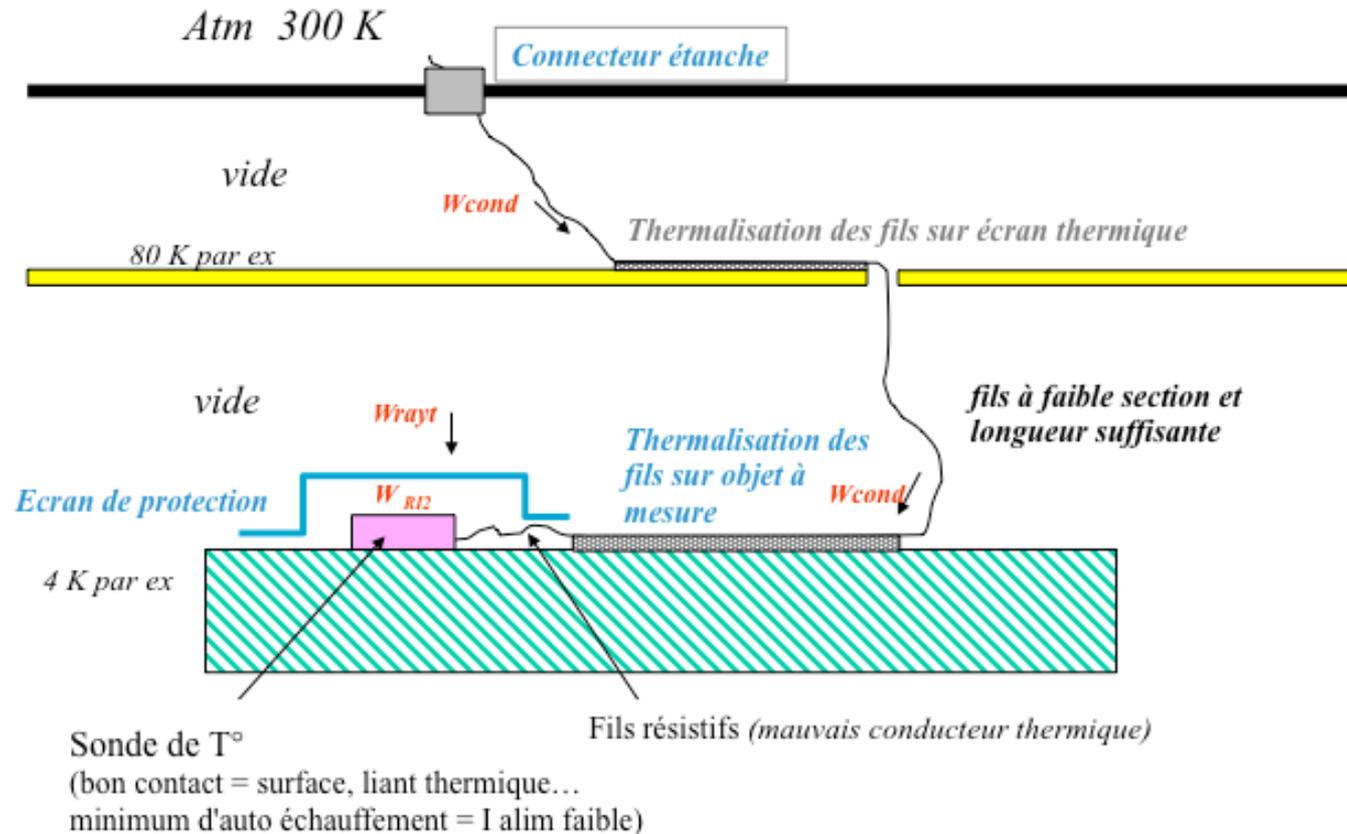
Site du fournisseur le plus connu:
<http://www.lakeshore.com/>



Précautions en mesure de température à basse température

- Importance d'intercepter les apports thermiques parasites (thermalisation, fils résistifs, écrantage...) et éviter l'auto échauffement (faible courant d'alim).
- Bon contact avec la zone à mesurer (liant thermique, grande surface de contact...)
- Limiter les perturbations externes (mesure en 4 fils, blindage, torsadage des fils, qualité des contacts électriques, inversion de polarité contre effets de jonctions...)
- Etalonnage sur sonde pré-équipée (sonde déjà montée sur porte-sonde) avec aucune surchauffe (soudure des fils d'alimentation ou contrainte mécanique)

Exemple d'interception des flux parasites



Appareils à pression

Directive Européenne des Equipements sous pression DESP 97

$P > 0.5$ bars

Classement selon P.V

Dossier DESP

Codes de dimensionnement (CODAP...)

Qualification initiale

Requalification périodique

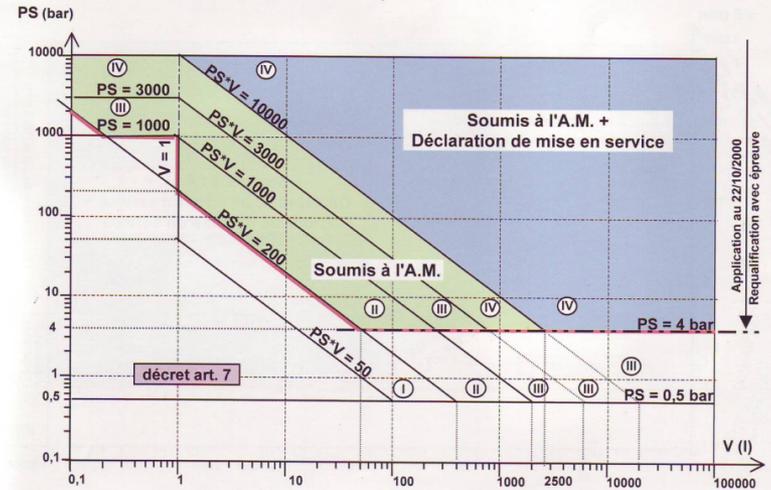
Dimensionnement et contrôles des organes de sécurité

Exemple de seuils de soumissions et autres dispositions réglementaires

3-3 - Récipients Gaz - Fluides groupe 2 (autres que la vapeur)

(Sauf appareils à couvercles amovibles à fermeture rapide, RPS, bouteilles et extincteurs) (Art. 2 §2)

Seuil de soumission $PS > 4$ bar et $PS.V > 200$ bar.l
(sauf ceux dont $V \leq 1$ l. et $PS \leq 1000$ bar)



Mise en service

- **Déclarat.** Oui si $PS > 4$ bar et $PS.V > 10\,000$ bar.l
- **Contrôle** Non
- **Document** Déclaration s'il y a lieu (à établir par exploitant)

Inspection périodique

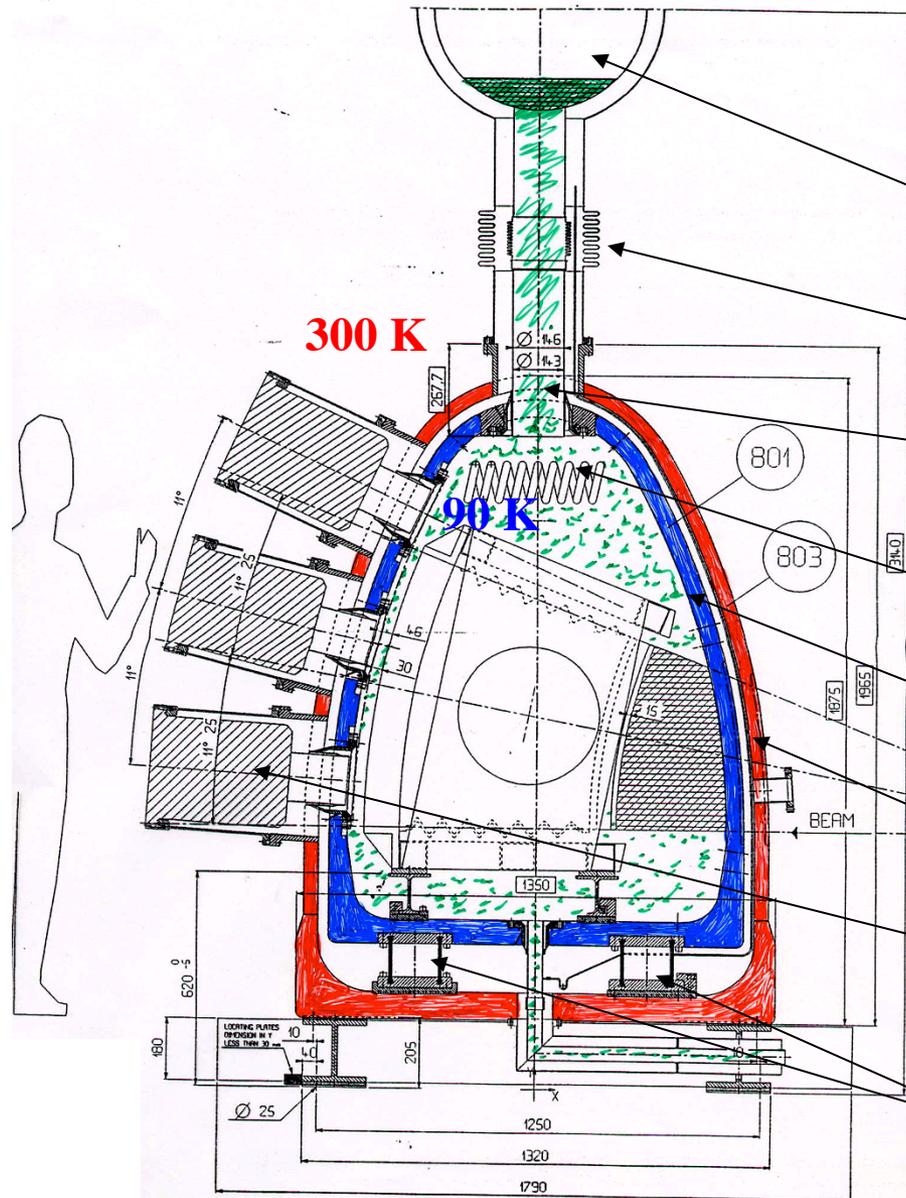
- **Par** Organisme habilité ou exploitant (personne compétente)
- **Périodicité** 40 mois maxi
- **Contenu** Vérif. ext.
+ vérif. int. (sauf dispense, dérogation ministérielle ou préfectorale)
+ vérif. accessoires de sécurité
+ toute investigation complémentaire jugée nécessaire
- **Document** CR d'inspection périodique

Requalification périodique

- **Par** Expert d'un organisme habilité
- **Seuil** Tous équipements soumis
- **Périodicité** 3 ans, 5 ans ou 10 ans selon fluide
Après, à la fois, changement d'installation et changement d'exploitant
- **Contenu** Vérif. ext. + vérif. int.
+ vérif. existence et exactitude du dossier
+ vérif. accessoires de sécurité*
+ épreuve hydraulique
+ toute investigation complémentaire jugée nécessaire
- **document** PV de requalif. + CR détaillé des contrôles + poinçon TdC

* avec retarage ou remplacement des soupapes si $PS.V > 3000$ bar.l

Ex de conception de cryostat horizontal



Cryostat de test des éléments
du calorimètre Argon ATLAS

Vase d'expansion

Soufflets de dilatation

Argon liquide

Echangeur de sous-refroidissement

Cuve Argon en Al

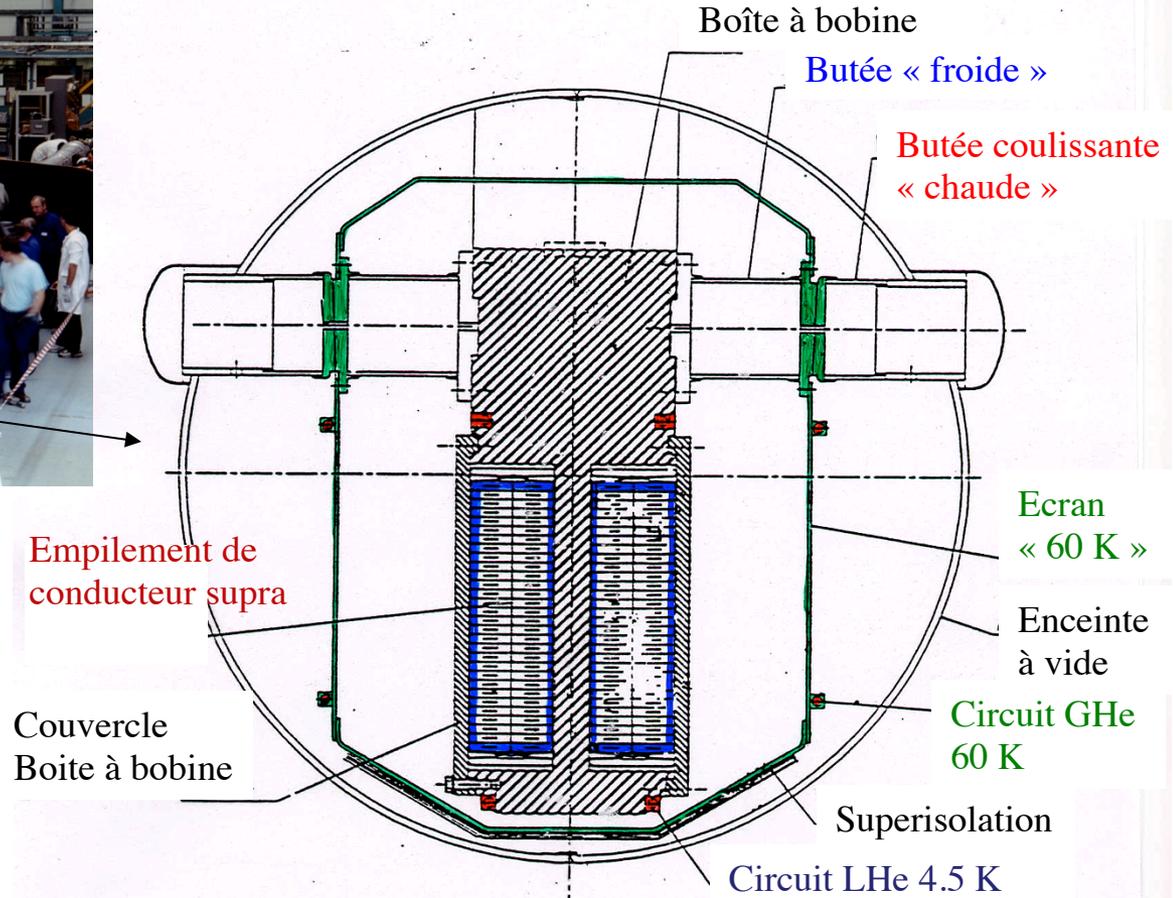
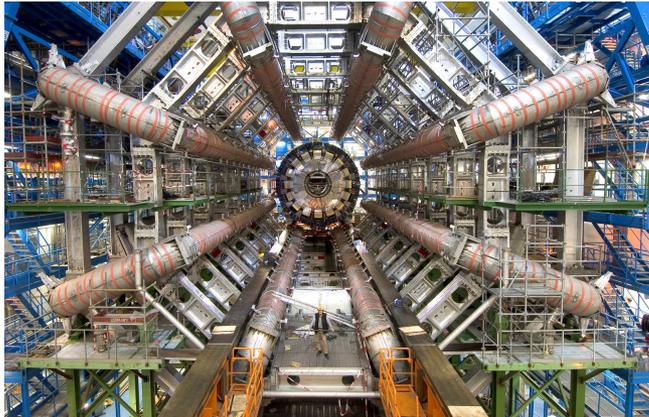
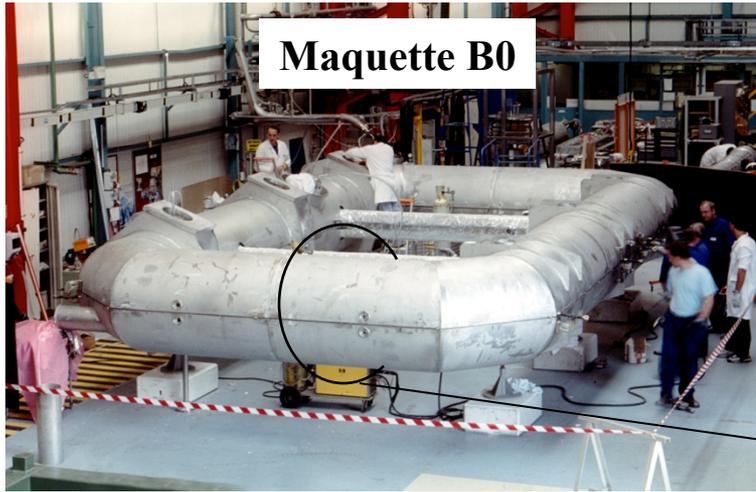
Enceinte à vide Al

Traversées étanches

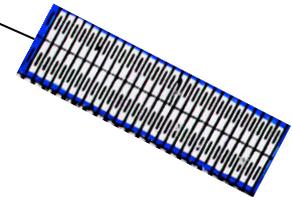
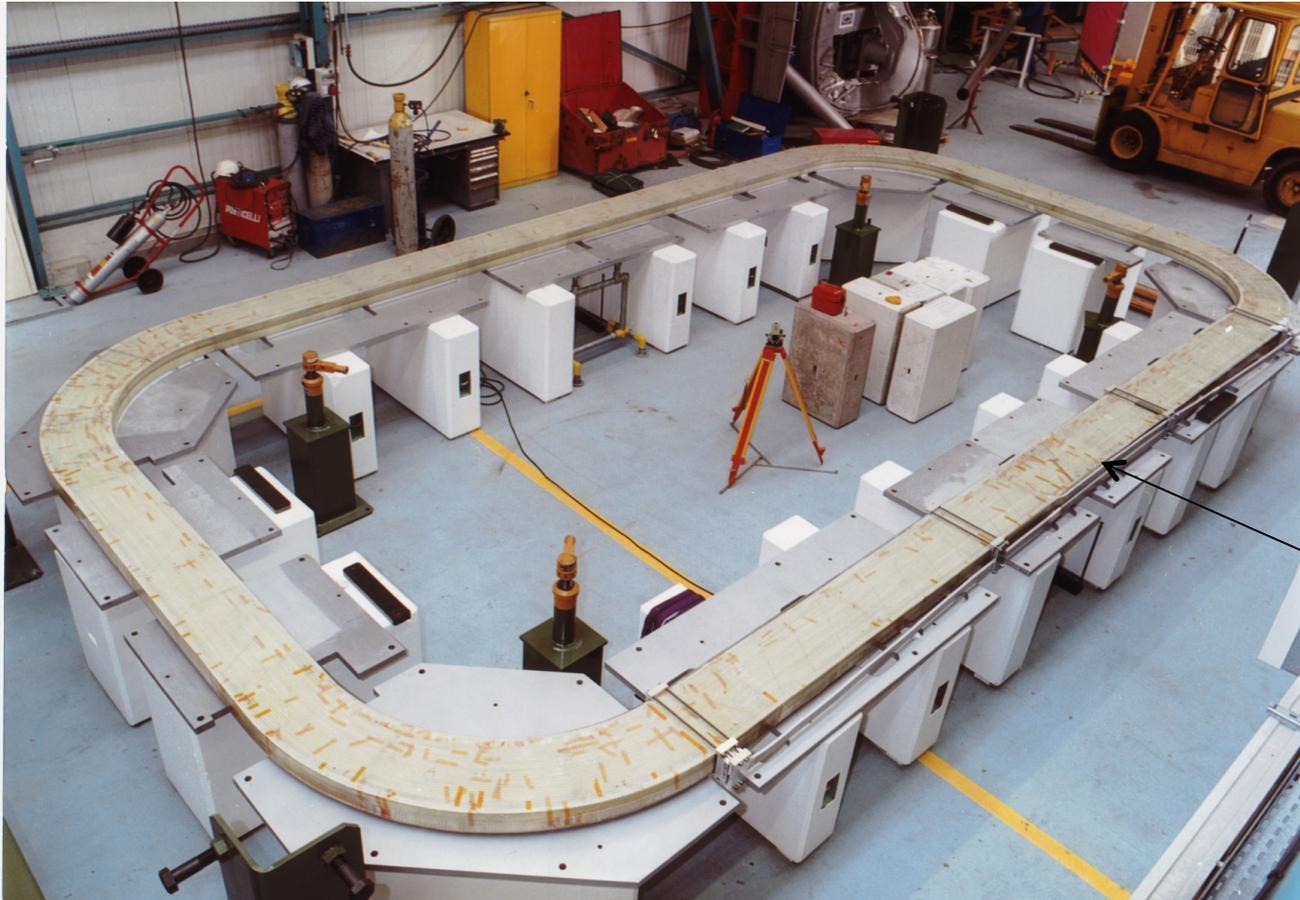
Supports mécaniques
masse froide (vérépo)

Exemple d'assemblage de cryostat pour aimant complexe

Coupe du cryostat d'une bobine toroïdale ATLAS

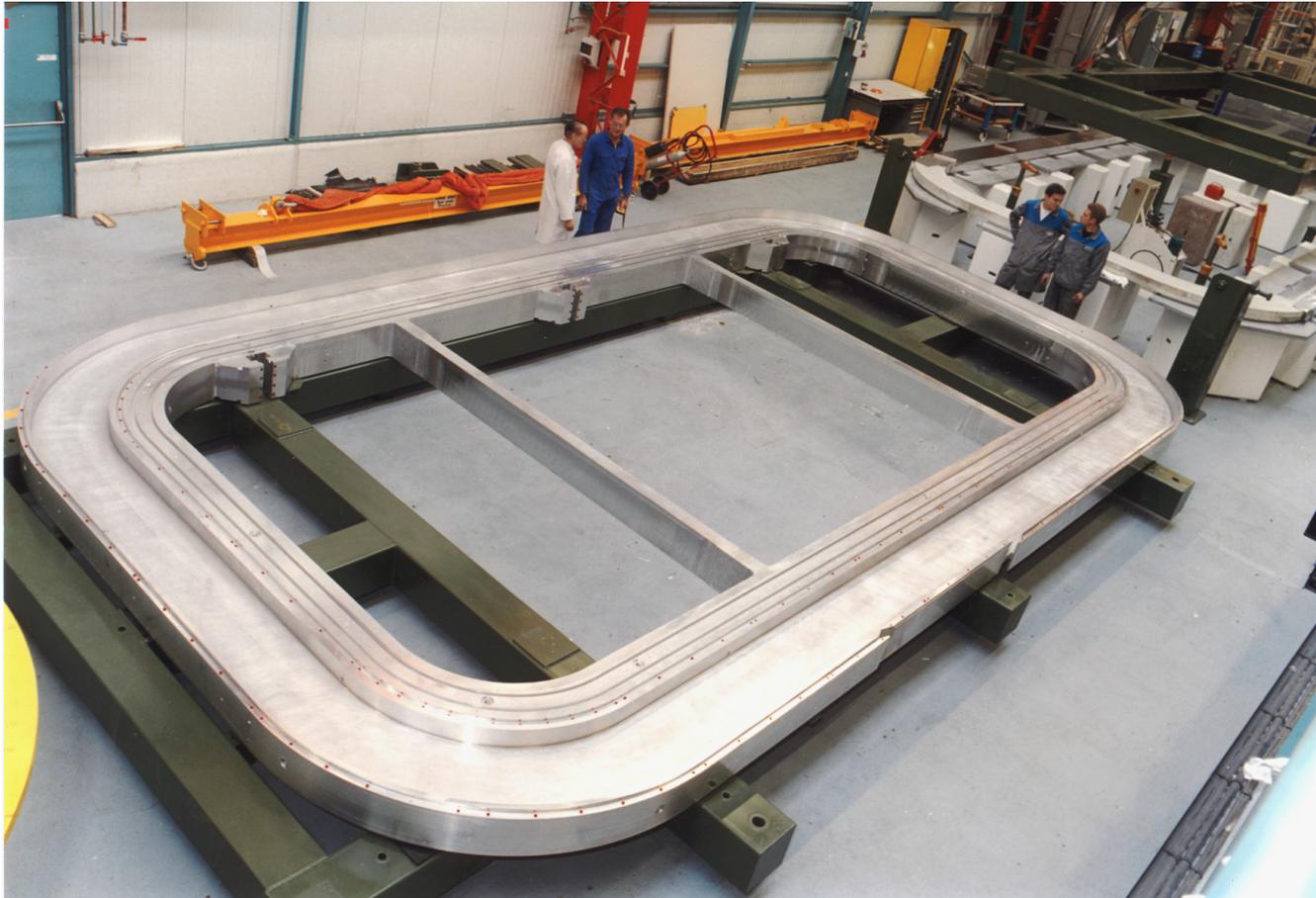


Ex de montage d'un aimant toroïdal dans son cryostat - maquette B0 pour ATLAS -



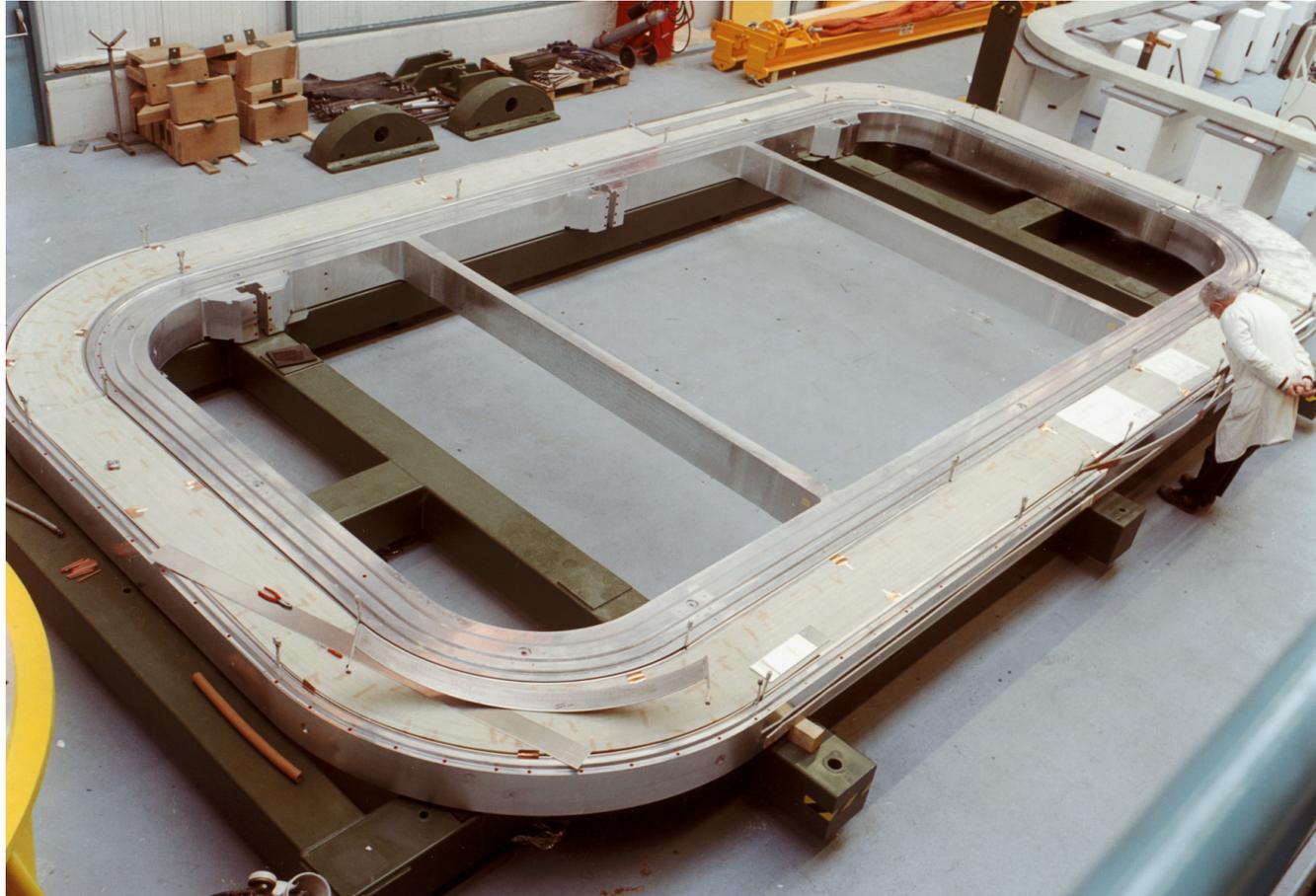
Bobinage supraconducteur, imprégné et polymérisé
= câble sur 30 tours et 2 couches, isolé et noyé dans une résine

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



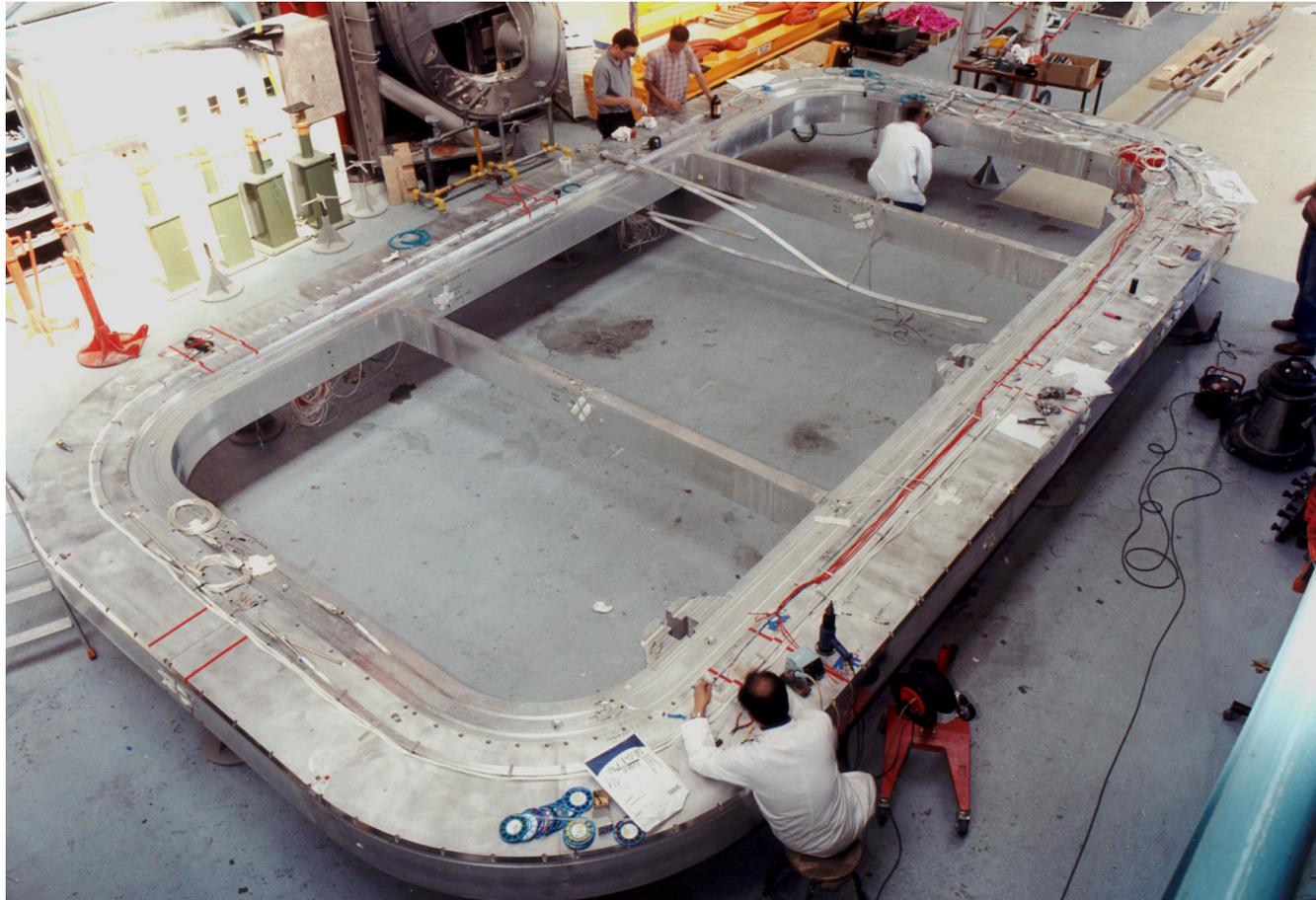
Boîte à bobine usinée dans la masse en Alliage d'aluminium

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



Bobinage installé dans sa Boîte à bobine avec calage mécanique

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



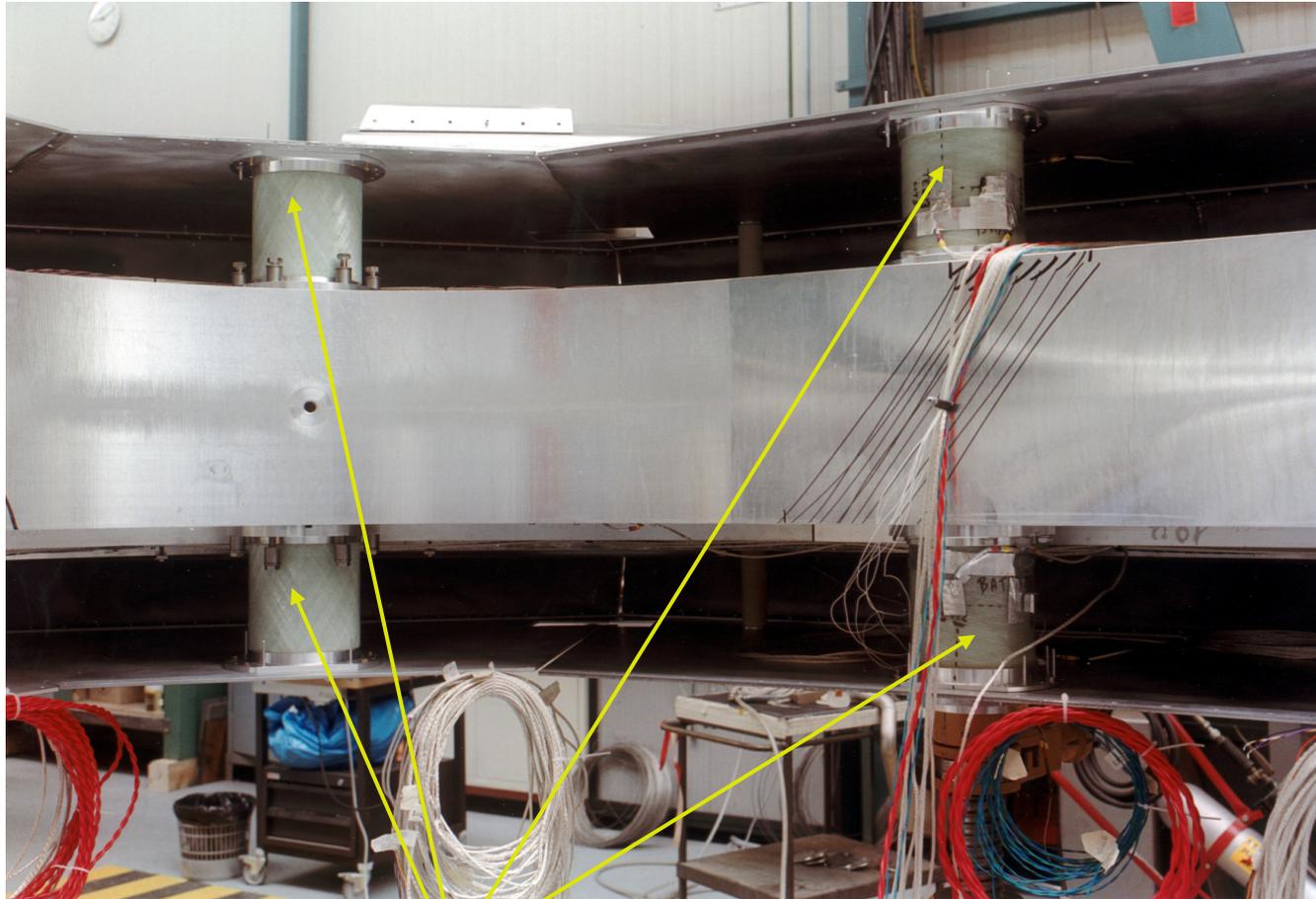
Fermeture Boîte à bobine et instrumentation (T° , tension)

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 -



60 K

4 K

60 K

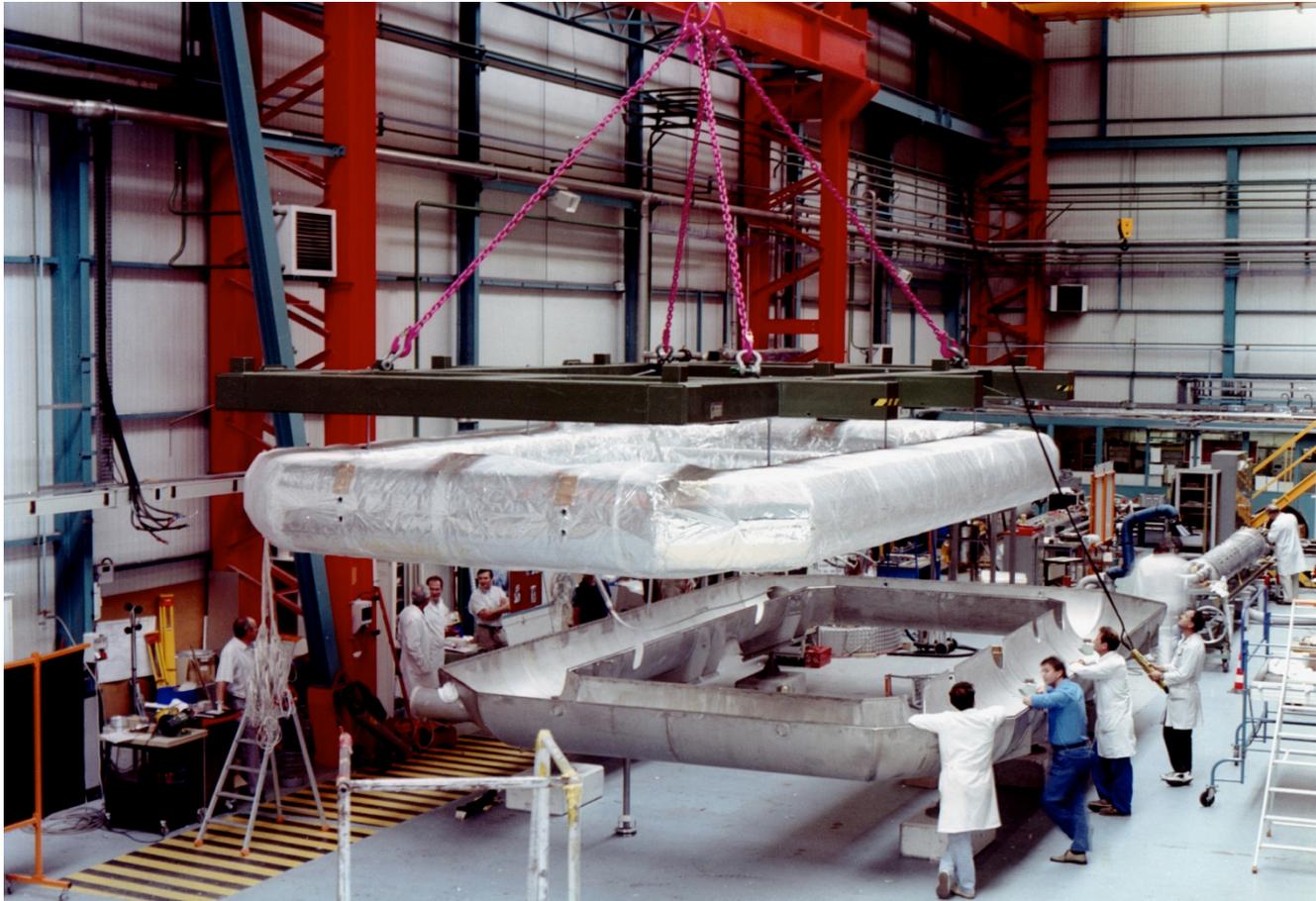
Détail sur les supports (Vêrépox -G10) de l'écran thermique (Al)
entre 4 K et 60 K

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



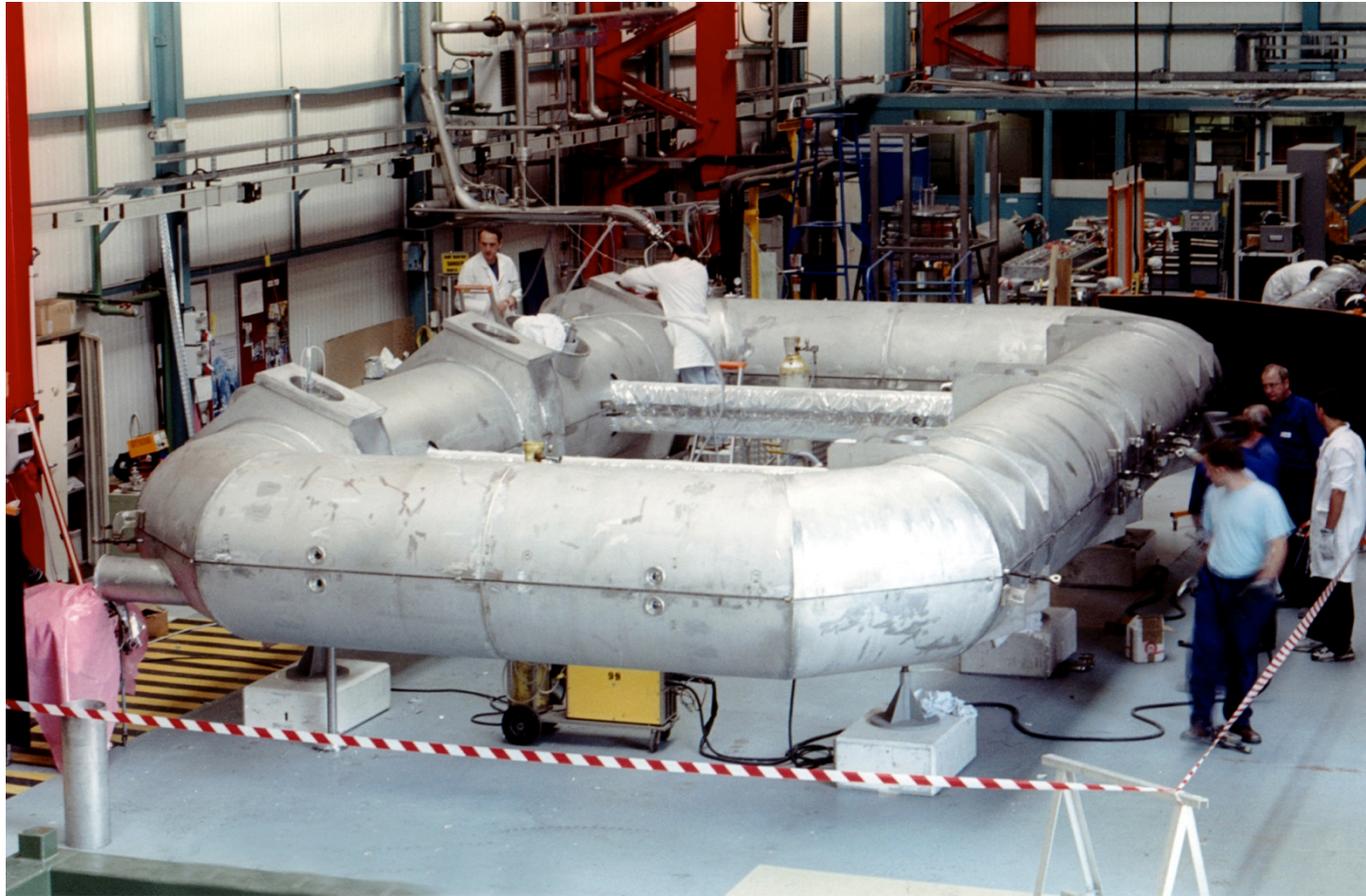
Mise en place de la super-isolation (MLI 30 couches)
sur l'écran thermique

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