

CRYOSTAT : CONSTRUCTION ET MISE EN OEUVRE

H. SAUGNAC

IN2P3/IPN Orsay

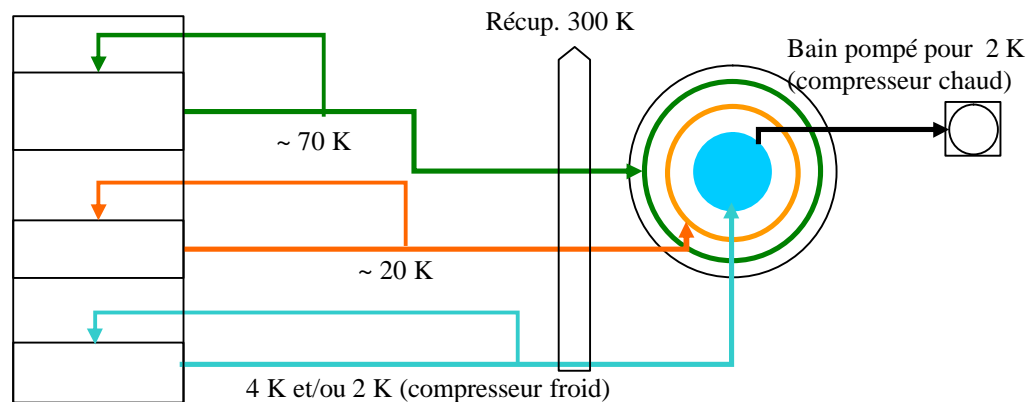
Environnement cryogénique

Mode réfrigérateur :

(Grandes installations)

Récupération du gaz froid.

Températures intermédiaires prises sur différents étages du réfrigérateur.

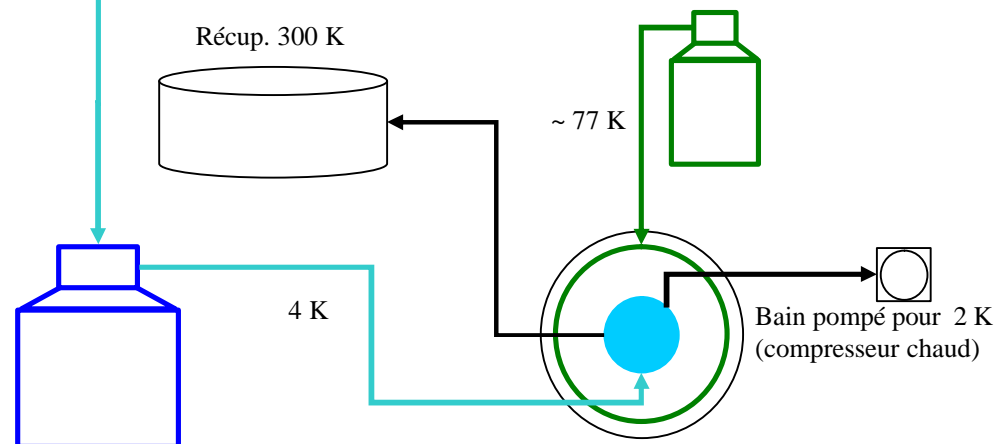


Mode Liquéfacteur :

(Petites installations)

Alimentation à partir de bouteilles.

Température intermédiaire = Azote liquide



Environnement cryogénique

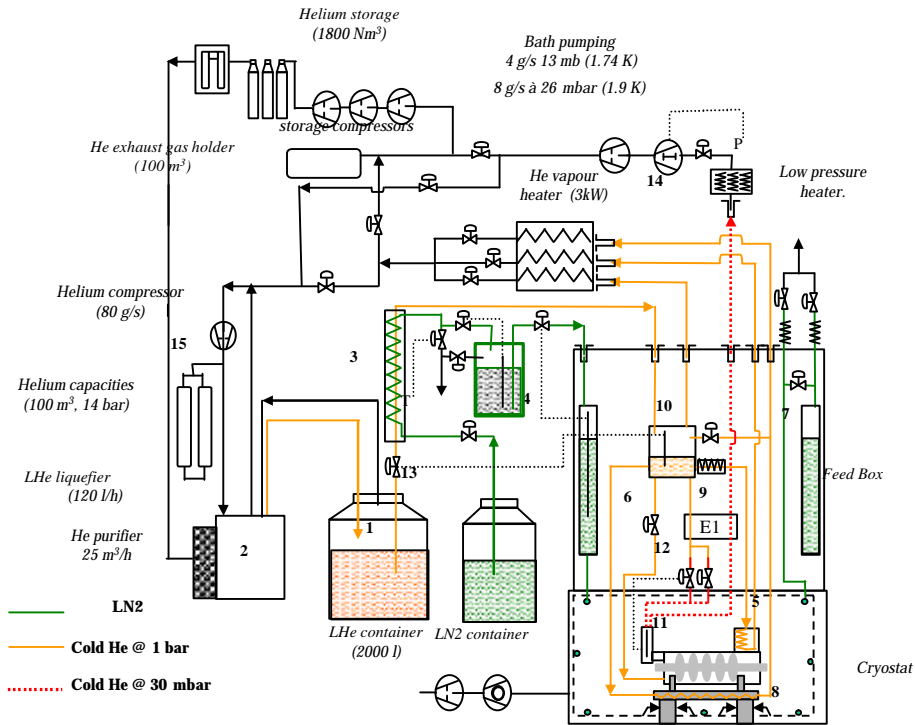


Schéma simplifié : mode liquéfacteur

Environnement cryogénique

Pour les deux modes de fonctionnement il faudra :

Un cryostat

Des lignes de transfert

Une ligne de pompage pour fonctionner @ 2K (mis à part l'utilisation de compresseurs froids).

Une ligne de récupération de gaz chaud

CRYOSTAT

- Enceinte à vide
- Des écrans radiatifs
- Des réservoirs de gardes
- Des vannes cryogéniques
- Des tubulures de transfert de cryofluides
- Des réchauffeurs
- Des échangeurs
- Des soupapes de sécurité
- Des connexions aux lignes d'alimentations de cryofluides
- Des structures mécaniques pour le maintien des différents éléments du cryostat.
- Différents types de capteurs.

Vide d'isolation :

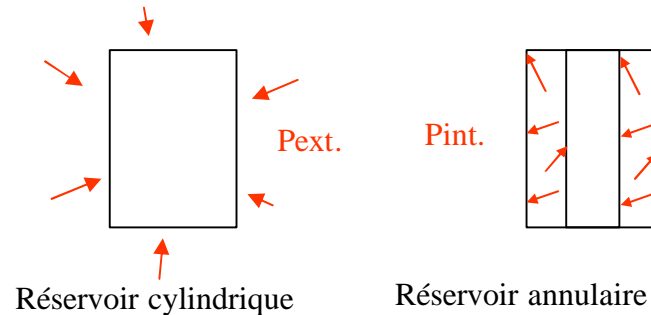
= **vide poussé** ($< 10^{-3}$ mbar à 300 K et $< 10^{-6}$ mbar à 4K) \neq **ultra vide** :

- Dégazage important à 300 K (colles, isolant électrique, super isolation ...)
- Dimensionnement de la vitesse de pompage se fait pour 300 K (pompage moléculaire)
- A basse température c'est le cryopompage qui fait le travail (le groupe de pompage peut aider à maintenir le vide en cas de **fuite** !)
- Brides iso ou Pneurop avec joints organiques (Perbunan, viton...)
- !! Les joints organiques ne résistent pas aux basses températures. Il existe des joints aluminium (EVAC...) au standard Pneurop.

Tenue au vide :

Calcul de flambage :

- A partir des abaques du CODAP (inclus un coefficient de sécurité de l'ordre de 3.5)
- A partir de formules analytiques **Attention inclus rarement le coefficient de sécurité**
- A partir d'un code de calcul éléments finis
- Le flambage a lieu lorsque l'on fait apparaître des contraintes de compression.



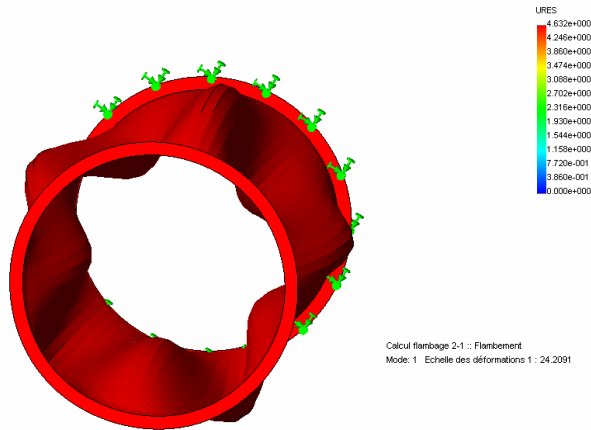
→ La présence de piquages sur un cylindre **semble** augmenter sa tenue au flambage

→ Le coefficient de sécurité est lié aux défauts de fabrication de l'enceinte (Matériau, géométrie...). Dans le spatial ce coefficient est de l'ordre de 2, pourtant ils maîtrisent fortement la fabrication de leurs enceintes !

CRYOSTAT

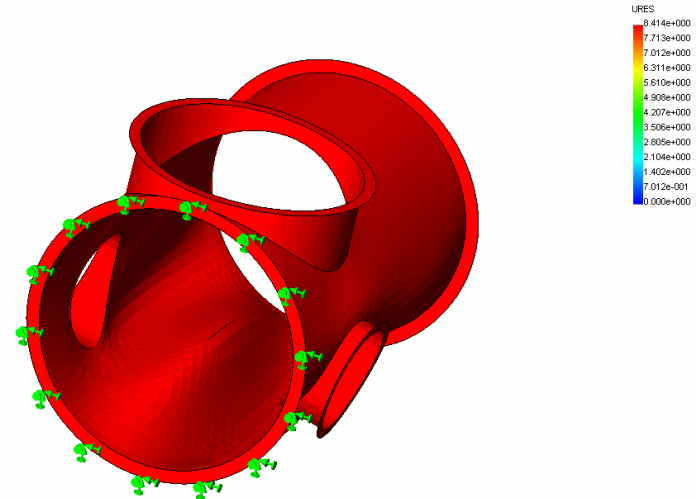
Enceinte à vide

Calcul flambage 1-1 :: Flambement
 Mode: 1 Echelle des déformations 1 : 41.8843



Calcul flambage 2-1 :: Flambement
 Mode: 1 Echelle des déformations 1 : 24.2091

ép, 6 mm	Tube Lisse	Enceinte +
Lg 2 m	Brides extrémité	Piquages
Φ 1200		
CODAP	1 bar	###
ROARK	5 bars	###
Calcul EF		
COSMOS	0,8 bars	0,9 bars



- Réduction de l'émissivité (polissage, scotch alu...)
- Ecrans actifs à température intermédiaire (80 K, 20 K)
 - Refroidi par circulation
 - Réservoir de garde
- Ecrans passifs : super isolation
- Etanchéité optique des écrans : chevrons, chicanes au niveau des ouvertures



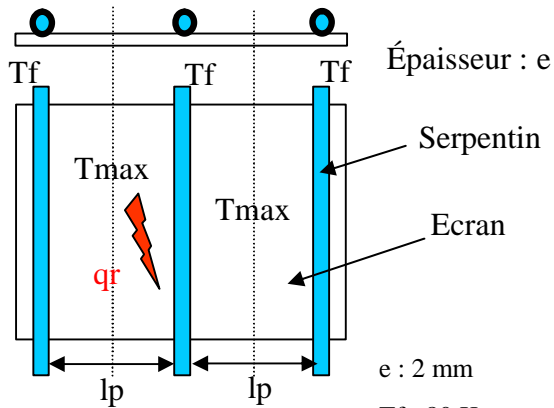
CF. Cours Isolation Thermique échanges de chaleur par rayonnement.



Homogénéité de la température de l'écran :

- Choix du matériau
- Refroidissement

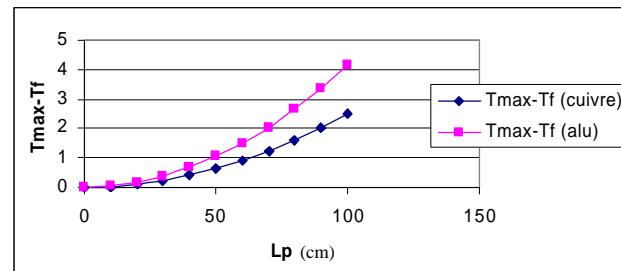
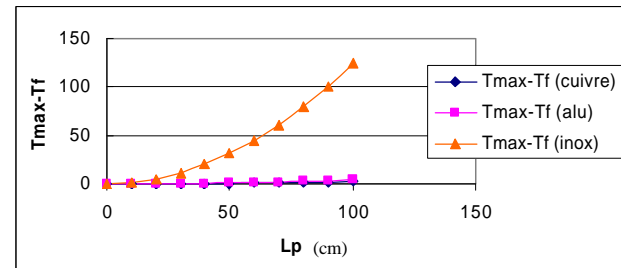
Hyp : Contact thermique parfait entre le serpentin et l'écran.



Épaisseur : e
 Serpentin
 Ecran
 e : 2 mm
 Tf : 80 K
 qr = 10 W/m2
 K(80 K) Cuivre ≈ 5 W/cm K
 K(80 K) Alu ≈ 3 W/cm K
 K(80 K) Inox ≈ 0.1 W/cm K

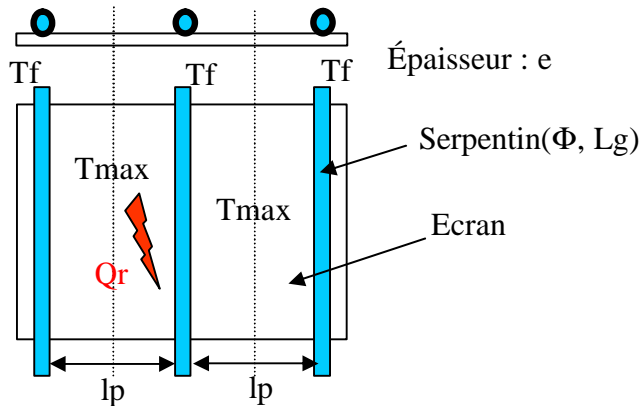
$$q_r \cdot \frac{l_p}{2} \cdot h = \frac{A}{l_p/2} \cdot K(\tilde{T}) \cdot (T_{\max} - T_f)$$

$$T_{\max} = q_r \cdot \frac{l_p^2}{4 \cdot e} \cdot \frac{1}{K(\tilde{T})} + T_f$$



Mise en froid de l'écran :

Hyp : Contact thermique parfait entre le serpentin et l'écran.



$$h \cdot S_{éch.} > \frac{Q_r}{T_{écran} - T_{fluide}}$$

S échange : Diamètre et longueur tube.

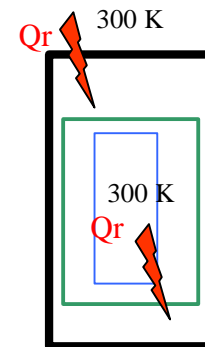
Coefficient d'échange h dans le tube.

Masse M et C de l'écran.

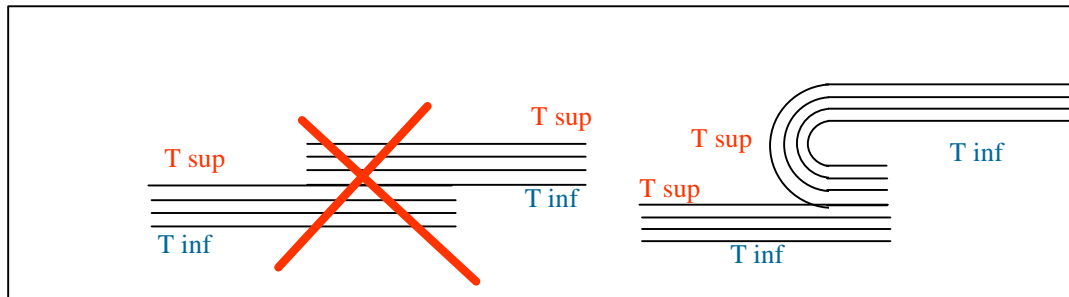
Attention :

Dans le cas d'un refroidissement à l'Azote liquide on est en film boiling avec un mauvais coefficient d'échange. Il faut augmenter la surface d'échange.

On peut dans le cas d'un process où l'on met en froid d'abord l'écran puis la partie 4 K ne pas pouvoir descendre la température de l'écran en dessous de ~ 100 K; la charge thermique sur l'écran étant importante.

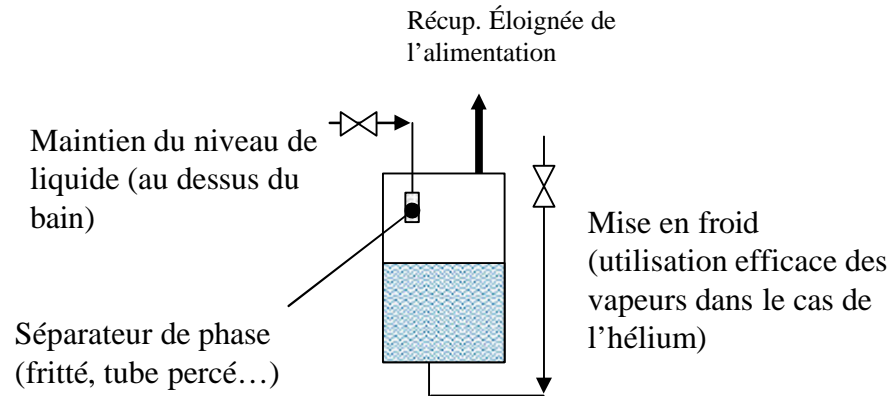


- Nombre de couches :
 - ~ 30 couches entre 300 K et 80 K
 - ~ 10 couches entre 80 K et 4 K
- Conditionnés en multi-couches (1, 5, 10) ou en matelas sur demande (forme du matelas à étudier...).
- A monter dans des conditions relativement propres (utilisation de gants...)
- Peut être fixé avec du Velcro, du scotch en mylar aluminisé...
- Ne pas trop serrer les couches au montage
- respecter les températures des couches au montage lors des recouvrements :



CF. Annexe A.3.2

- Permettent une certaine autonomie en cryofluides pour permettre par exemple des changements de bouteilles.
- Servent de tampon pour limiter les variations de pression dues à la vaporisation du liquide lors du transfert.
- La position des tubes d'alimentation et de dégazage est importante :



- Fonctionnement en pression interne :

Mais attention !!

Les volumes contenant des fluides à basses températures doivent avoir une très bonne étanchéité (densité ↗ et flux gazeux par une fuite ↗).

La sensibilité des test d'étanchéité à 300 K doit être grande $\sim 1 \cdot 10^{-9}$ mbar l/s.

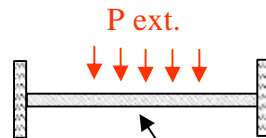
Pour obtenir cette sensibilité seul le test par aspersion Hélium est possible et cela implique la mise sous vide de l'enceinte testée.

➔ Tenue au flambage ou pas de test d'étanchéité sensible

- Pour la tenue en pression interne :

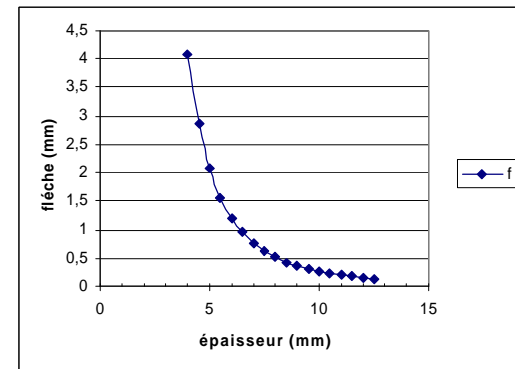
Calcul en contrainte pour la virole et les flancs

Calcul possible en déplacement pour les flancs



Utilisation de fonds bombés

$$f_{\max} = 0.0136 \cdot \frac{p \cdot D^4}{E \cdot e^3}$$



Pour de l'Inox

D = 400 mm

CF. Annexe A.6.3

- Isolent les différents circuits du cryostat.
- Régulent (pression, niveau, températures)
- Assurent le débit correspondant à la puissance cryogénique de la partie qu'elles alimentent.
- Apportent peu de chaleur au cryofluide (Réduction de la conduction solide)
- Fonctionnent à basse température



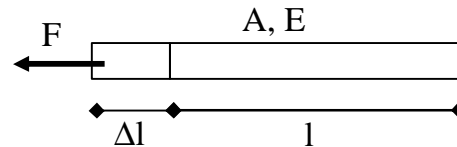
Pour les vannes de régulation, les constructeurs donnent les différentes formules pour dimensionner les clapets.

La difficulté est l'évaluation précise des débits des différentes phases s'écoulant dans la vanne (écoulement diphasique). On peut calculer les valeurs extrêmes pour chaque phase.

- Mettent en relation les différents volumes de cryofluide
- Les sections et longueurs sont dimensionnées pour passer le débit correspondant à la puissance cryogénique requise
- Les liaisons entre les tuyauteries et les réservoirs se font par soudures ou raccords à joints métalliques (brides CF, Raccords CAJONS). Les raccords à olives présentent des risques de fuites pour des montages et démontages trop nombreux.
- Les tubulures peuvent être soumises à des contraintes thermo-mécaniques importantes:



$$s = \frac{F}{A} = E \cdot \frac{\Delta l}{l}$$



La réduction de ces contraintes passe par :

Choix du matériau : $\searrow \Delta L/L$ et $\searrow E$

Réduction de l'effort F : \nearrow Souplesse du tube (Soufflets compensateurs, lyre...)

- Réchauffer les vapeurs froides de retour (cas du mode liquéfacteur)

Eviter la formation d'eau sur les conduites

Permettre d'utiliser, sur les conduites de retour de gaz, des vannes, des capteurs des compresseurs ... fonctionnant à 300K

- Réguler la pression d'un volume par évaporation de cryofluide
- Réchauffer le cryostat en fin de manip.



Attention !!

Lorsque l'on place un élément chauffant sous vide l'échange est très mauvais.

Eléments de contrôles de la température du réchauffeur = **nécessaire**

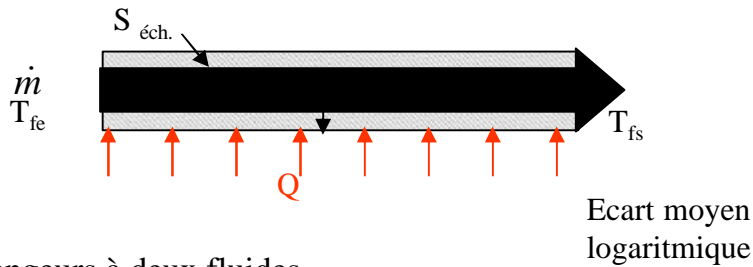
Attention !!

Risques de claquages pour des tensions trop importantes :

220 V dans un environnement d'azote

48 V dans un environnement d'**Hélium**

- Améliorer l'efficacité d'un réchauffeur
- Refroidir un cryofluide
- Echangeurs à charge Q constante (réchauffeurs, condenseurs...)



$$Q = k \cdot S \cdot \Delta T_m$$

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{fs} - T_{fe})$$

$$\Delta T_m = \frac{[(T_{ce} - T_{fe}) - (T_{cs} - T_{fs})]}{\ln \left[\frac{T_{ce} - T_{fe}}{T_{cs} - T_{fs}} \right]}$$

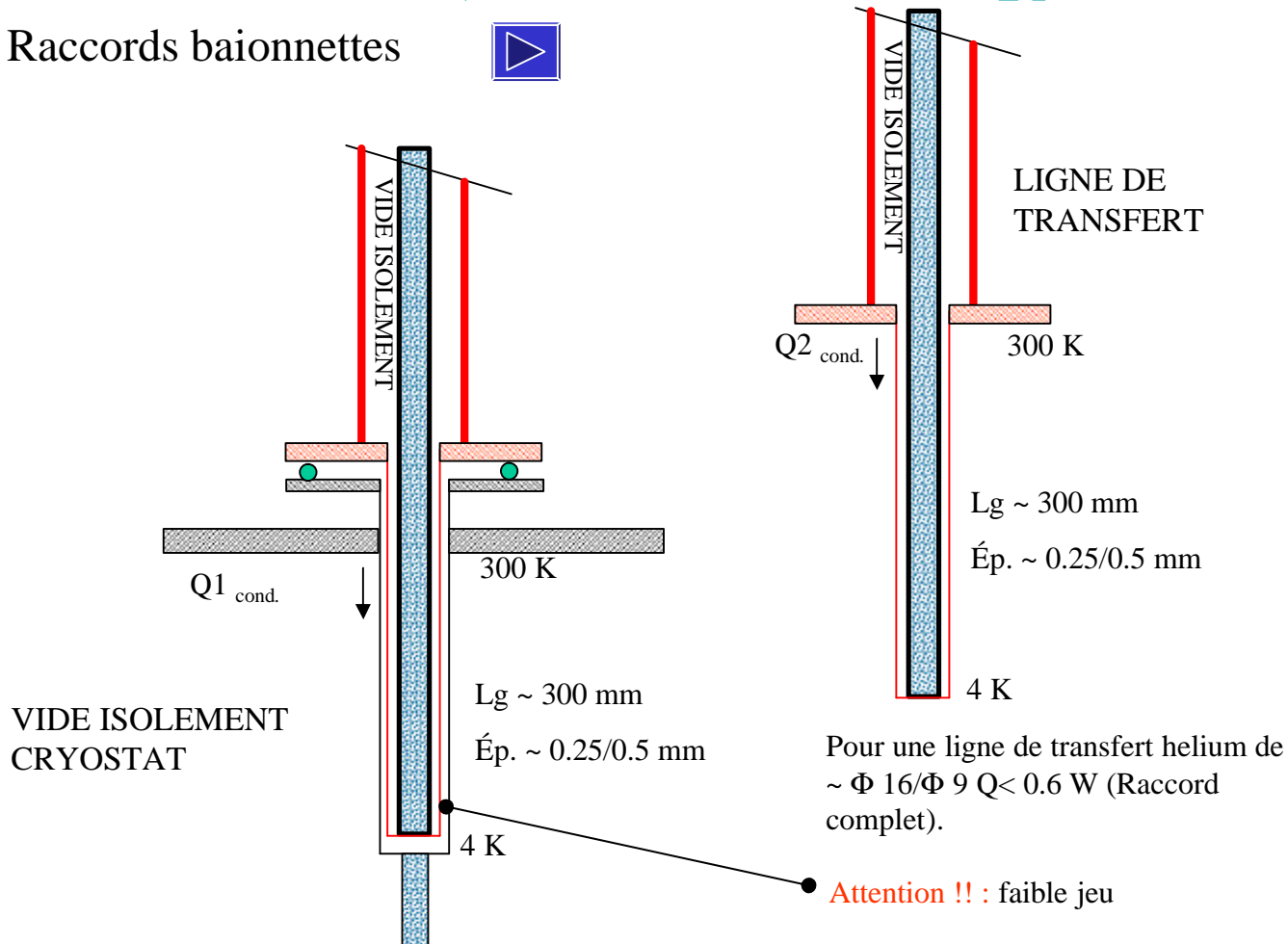
- Echangeurs à deux fluides



$$Q = \dot{m}_c \cdot c_{pc} \cdot (T_{ce} - T_{cs}) = \dot{m}_f \cdot c_{pf} \cdot (T_{fs} - T_{fe})$$

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta T_m$$

Raccords baionnettes



Doivent maintenir mécaniquement les différents éléments du cryostat :
Ecrans, réservoirs, échangeurs ...

D'un point de vue thermique ils constituent des transitions chaud - froid
apportant des flux conductifs sur les cryofluides.

Ils peuvent, dans certains cas, avoir pour objectif de maintenir les éléments
dans une position précise.

Leur conception nécessite des études:

Thermique

Thermomécanique

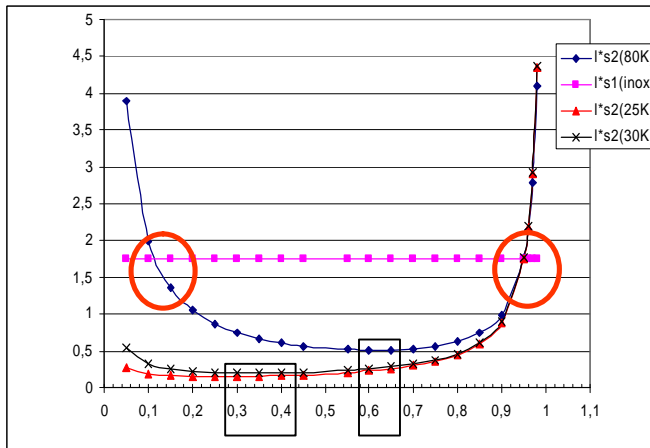
Mécanique

L'échange mis en œuvre est la conduction solide

Pour limiter le flux thermique vers le point froid :

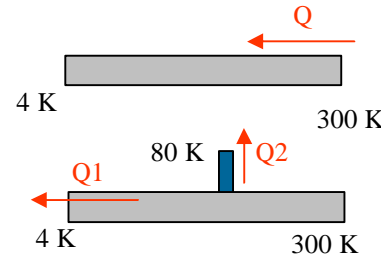
Le choix de la géométrie et du matériau est aussi conditionné par les critères de rigidité et de tenue mécanique.

Pour limiter la charge totale sur le réfrigérateur :
Thermalisation par des températures intermédiaires



$$Q = \frac{A}{l} \cdot \int_{T_1}^{T_2} K(T) \cdot dT$$

Géométrie Matériau



$$S = \frac{Q_1}{4} + \frac{Q_2}{80} < \frac{Q}{4}$$

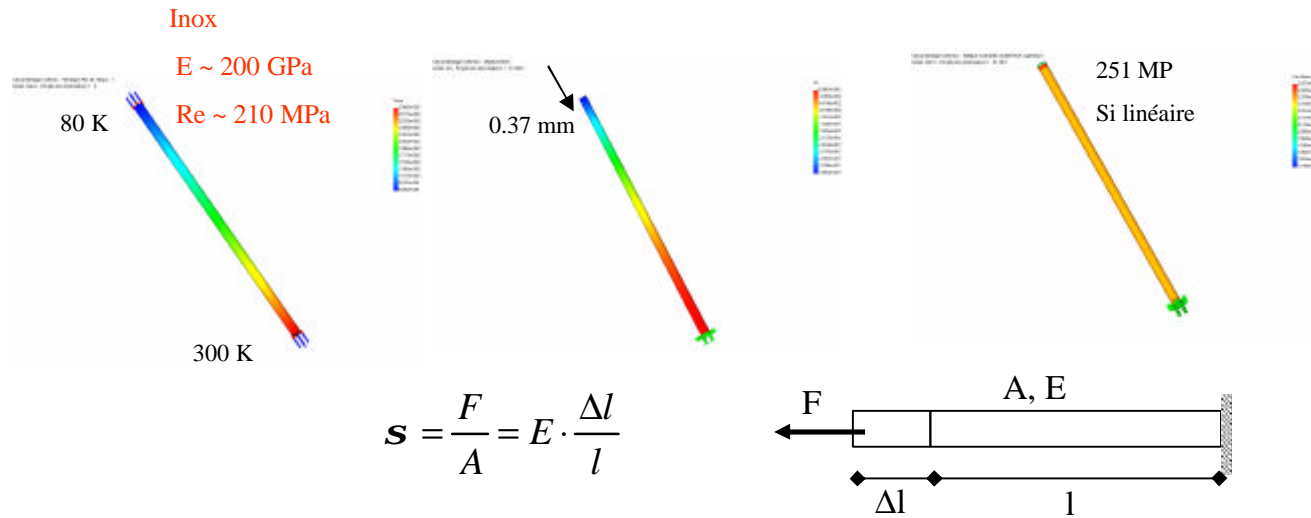
Attention la position de la thermalisation est importante.

Elle dépend du matériau du support et de la température de thermalisation



CF. Annexe A.3.1

Apparitions de contraintes thermo-mécaniques importantes dans le cas de supports rigides ayant pour objectifs de maintenir une position précise.



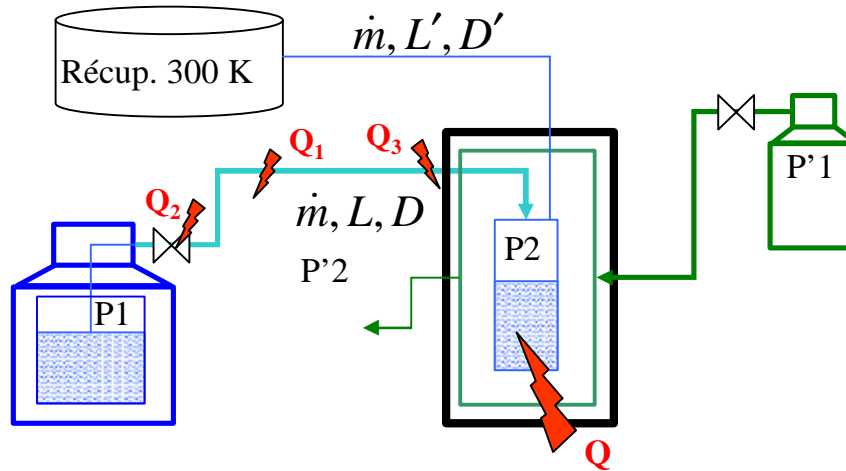
Dans ce cas F et E sont importants (support rigide).

On ne peut jouer que sur le matériau $\Delta l/l$ ↘ et Limite élastique ou de rupture ↗ .

Composites verre/epoxy, alliages de Titane, Invar ...



Lignes De Transfert



$$Q + (Q_1 + Q_2 + Q_3) = \dot{m} \cdot L_v$$

$$\dot{m} = f(P1, P2, L, D, \text{Fluide})$$

Calcul de pertes de charges pour évaluer les dimensions de la ligne de transfert et des vannes d'alimentation.

Isolation thermique des éléments de la ligne.

Lignes De Transfert

Les lignes de transfert doivent au même titre qu'un cryostat assurer une bonne isolation thermique.

Suivant les types de cryofluides concernés et le type d'installations plusieurs solutions technologiques se présentent :

Pour de l'azote :

Une isolation sous mousse est possible.

Faible coût

Formation de glace au niveau des raccords (Joints métalliques, présence d'eau)

Pour l'Hélium :

Isolation sous vide + Superisolant

Dans le cas de grandes installations les pertes de transfert deviennent importantes
✓ **Un écran radiatif**



Mode Liqué. : Azote ou retour des vapeurs froides d'Hélium.

Mode Réfrigérateur : Température intermédiaire sur la boîte froide.

L'utilisation d'un écran intermédiaire permet aussi de maintenir en froid la ligne et de réduire la consommation de fluide pendant la mise en froid de la ligne.

Lignes De Transfert

$$\Delta P = \mathbf{x} \cdot \frac{\mathbf{r}}{2} \cdot w^2 \cdot \frac{L}{d}$$

Coefficient de frottement : dépend du nombre de Reynolds et de la géométrie du conduit

Nombre de Reynolds : $Re = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\rho \cdot d} \cdot \mathbf{m}$ Viscosité dynamique kg/ms

Pour un tube lisse de section circulaire constante

Régime Laminaire (Re < 2000) $\Delta P = 40.74 \cdot \frac{\mathbf{m} \cdot L}{r \cdot d^4} \cdot \dot{m}$

Régime Turbulent (Re > 2300) $\Delta P = 0.241 \cdot \frac{\mathbf{m}^{0.25} \cdot L}{r \cdot d^{4.75}} \cdot \dot{m}^{1.75}$

Forte dépendance du diamètre
Proportionnel à la densité

Dans le cas du transfert d'un cryofluide l'écoulement est diphasique :

Calcul avec la vapeur saturante.

Calcul avec le liquide saturé.

Les valeurs extrêmes pour le dimensionnement de la ligne.

CF. Annexe A.5.1

Ligne de pompage

Le pompage d'un bain d'hélium permet d'abaisser la pression de vapeur saturante et ainsi d'obtenir des températures inférieures à 4.2 K. Pour des pressions de bain < 50 mbar l'hélium se trouve en phase superfluide.

Pour les petites installations (< 200 W à 2 K) le pompage du bain se fait au moyen de **pompes volumétriques** fonctionnant à 300 K. Ces pompes sont utilisées comme pompe de circulation devant évacuer un débit masse important à la pression atmosphérique.

Problème 1:

La densité du gaz à température élevée et à basse pression est faible.

Les pompes utilisées sont volumétriques = elles évacuent théoriquement à la Patm. un volume constant ~ proportionnel aux dimensions et à la vitesse de rotation de la pompe.

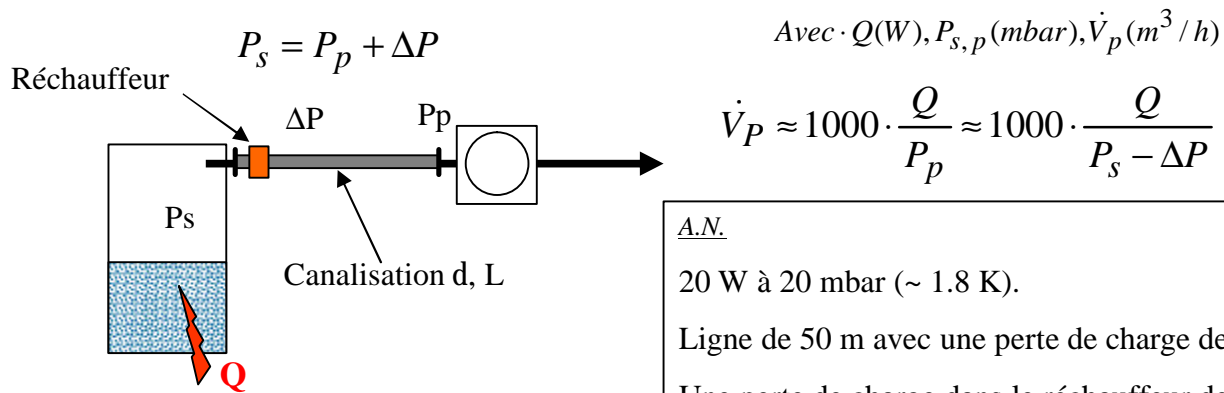
Les pompes utilisées fonctionnent à 300 K.

$$\dot{m} \propto \frac{P}{T} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Problème 2:

La densité du gaz étant plus faible les pertes de charges dans la canalisation de pompage sont importantes et limitent le débit massique.

Ligne de pompage



Avec $\cdot Q(W), P_{s,p}(mbar), \dot{V}_p(m^3/h)$

$$\dot{V}_p \approx 1000 \cdot \frac{Q}{P_p} \approx 1000 \cdot \frac{Q}{P_s - \Delta P}$$



A.N.

20 W à 20 mbar (~ 1.8 K).

Ligne de 50 m avec une perte de charge de 1 mbar

Une perte de charge dans le réchauffeur de 4 mbar

-Ligne Φ 100

-Pompe de 1100 m³/h minimum à 20 mbar

Attention aux pertes de charges singulières (coudes, Tés ...)

$$\Delta P = 40.74 \cdot \frac{m \cdot L}{r \cdot d^4} \cdot \dot{m}$$

$$\Delta P = 0.241 \cdot \frac{m^{0.25} \cdot L}{r \cdot d^{4.75}} \cdot \dot{m}^{1.75}$$

$$\Delta P \propto \frac{1}{r} \propto \frac{1}{P_s}$$

$\Delta P \nearrow$ pour des petits diamètres de canalisations

Réduire les pertes de charge.

Pompes à grand débit volumique autour de la dizaine de mbar (pompes à palettes associées à des dépresseurs roots). Les dépresseurs roots de part leur conception peuvent opérer à des vitesses de rotation importantes (débit volume \nearrow).

Ligne récupération gaz chaud



- Réchauffeurs (électriques, bain-marie)
- Vannes chaudes
- Déverseurs
- Clapets
- Soupapes
- Gazomètre
- Compresseurs HP
- Cadres HP

Transitoires

- Transfert :

CF. Annexe A.3.4

Débit faible au début (T élevé \Rightarrow pertes de charges).

Film boiling pour l'azote liquide.

Utilisation de la chaleur latente pour l'azote \Rightarrow transfert à haut débit.

Utilisation de la chaleur spécifique pour l'hélium \Rightarrow transfert à petit débit.

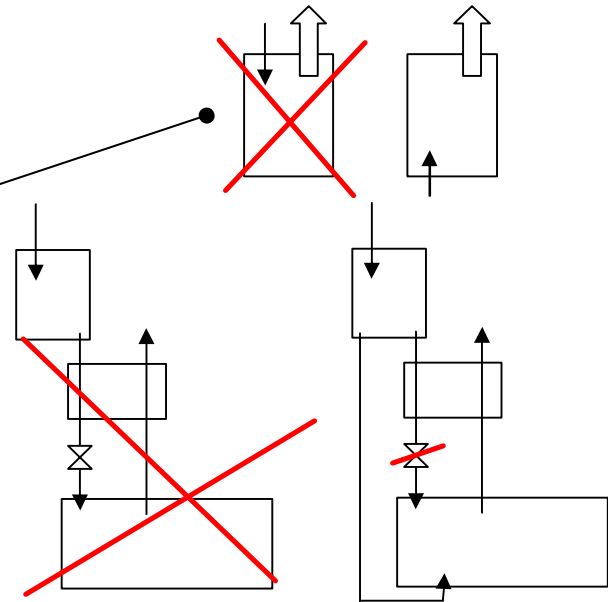
- Mise en froid :

Consommation en cryofluide (voir annexe)

Refroidir d'abord l'écran \Rightarrow moins de charges thermiques sur l'hélium.

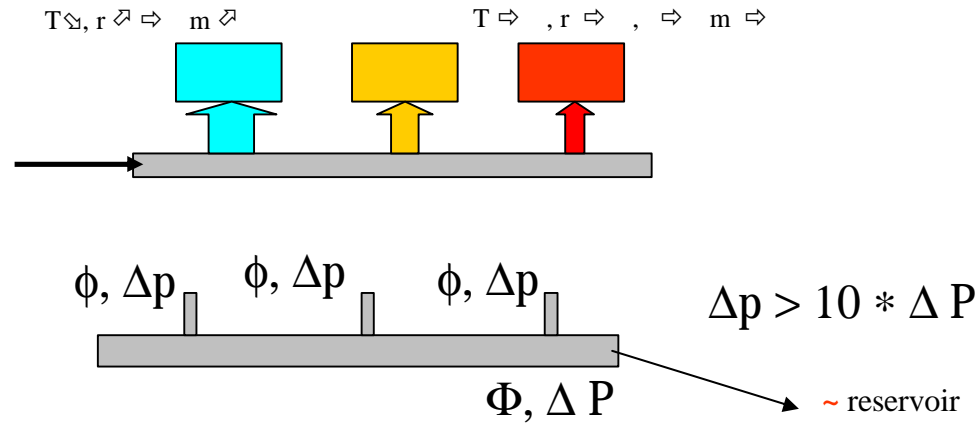
Utilisation au mieux de la chaleur spécifique de l'Hélium
 \Rightarrow Position des tubulures.

Attention aux échangeurs \Rightarrow ne pas les faire fonctionner à l'envers.



Transitoires

Attention à la mise en froid de circuits parallèles. Le débit n'est jamais équilibré.



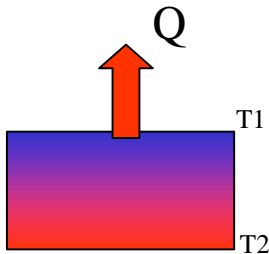
Ou vannes de régulation pour chaque circuit \Rightarrow Coût

Attention !! Les pertes de charges sont importantes pour les températures élevées \Rightarrow Les pressions peuvent être importantes dans les enceintes !!!

Transitoires

Refroidissement par conduction :

- Augmenter la diffusivité thermique $k/C_p \Rightarrow$ Choix du matériau (scotch alu sur Inox ?)



$$Q = M_s \cdot C_s(\bar{T}_s) \cdot \frac{d\bar{T}_s}{t} \quad \Rightarrow \quad \frac{d\bar{T}_s}{t} \propto \frac{k(\bar{T}_s)}{C_s(\bar{T}_s)}$$

$$Q = k(\bar{T}_s) \cdot F(A, L...) \cdot G(T_2 - T_1)$$

Diffusivité \propto quand T \propto

$C_p \propto$ quand T \propto La consommation d' Hélium est plus \Rightarrow Pré refroidissement à T intermédiaire importante à haute température

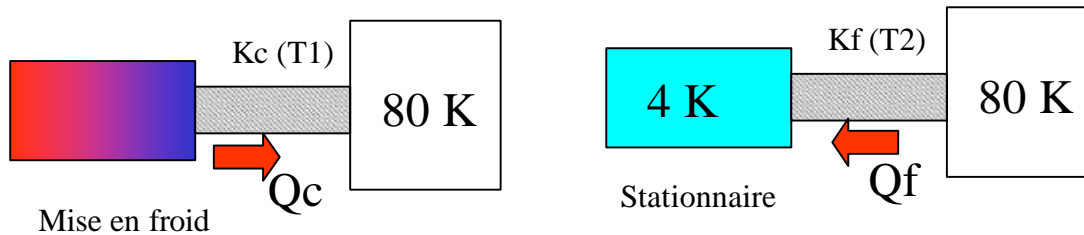
Transitoires

- Pré refroidissement à L'azote (**mode liquéfacteur seulement**)

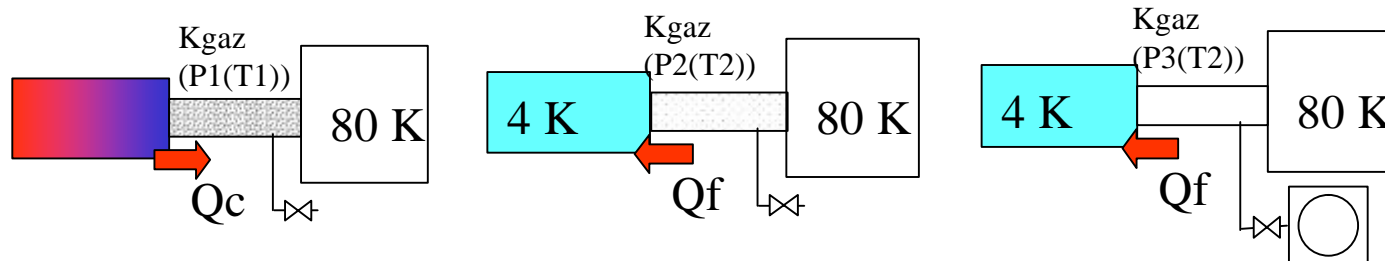
Transférer de l'azote liquide dans les circuits hélium puis évacuer l'azote avant le transfert d'hélium

Attention Process très délicat il ne faut plus qu'il reste d'azote !!

- Pré refroidissement par conduction



$K_c(T1) > K_f(T2) \Rightarrow Q_c > Q_f \Rightarrow$ Refroidit à la mise en froid Isole en stationnaire (CHOIX du Matériau)



Même principe en utilisant la conduction gazeuse. Quand $T \simeq P \simeq$ et $Q_f \simeq$. On isole mieux en pompant le volume de gaz une fois arrivé en régime stationnaire.

Maintenance Preventive

Equipement	Tâche	Périodicité
Soupapes	Inspection / tarage	2 ans
Réservoirs ss pression	Inspection periodique	3 ans
	Requalification	10 ans
Groupe de pompage	Vidange palettes	8 000 h
	Révisions palettes	16 000 h
	Vidange roots	8 000 h
	Révisions palettes	16 000 h
	Vidange pompe à diff	8 000 h
	Révisions pompe à diff	16 000 h
	Révisions turbomoléculaires	16 000 h
jauges de mesures de vide	Révisions Pirani	8 000 h
	Révisions Penning	8 000 h
Capteurs Chaîne de sécurité	Inspection calibration	1 an
Capteurs	Inspection calibration	2 ans
Equipements soumis aux vibrations	Resserage connexions élec,	6 000 h
Vannes de contrôle	Verification fonctionnement + FDC	6 000 h
	calibration	12 000 h
Vannes tout ou rien	Verification fonctionnement + FDC	6 000 h
Vannes manuelles	Verification fonctionnement + FDC	6 000 h

Securité

Brûlures froides → Gants, lunettes
En cas de brûlures verser de l'eau tiède

Asphyxie → Baisse progressive de facultés quand O2 ↘
Danger pour O2 < 15 %
Risque mortel pour O2 < 9 %
Détecteur de O2 + Balises d'anoxie
Appareils respiratoires accessibles
Dans les espaces confinés INDICATION + éventuellement port d'un appareil respiratoire

Explosions → Respect des normes
Soupapes de sécurité

Incendie → H2 ou GNL en contact avec O2
O2 favorise la combustion
Si on a été en contact avec de l'oxygène ventiler ses vêtements avant d'allumer une cigarette !

Calculs

La difficulté pour les calculs thermiques est la forte dépendance en température des lois de comportement (Chaleur spécifique, conductibilité thermique...). L'utilisation de valeurs moyennes et la discrétisation par domaine de température donnent des résultats acceptables.

Une évaluation par la formule de Fourier uniaxiale (section constante) est souvent suffisante pour évaluer les flux de chaleur par conduction.

Dans le cas de sections non constantes (cônes, pyramides, cylindres concentriques ...) il existe des facteurs de formes permettant de trouver une solution analytique au problème.

L'évaluation des résistances de contact est complexe. Il existe des solutions analytiques dans la littérature.

Le calcul du rayonnement est complexe (facteur de forme et non-linéarité ...). On peut se reporter à des tables donnant les densités surfaciques de flux (voir annexe). Les codes de calculs différences finis ou éléments finis ne permettent pas toujours de calculer les facteurs de forme. Il faut alors les calculer analytiquement à partir de formules présentes dans la littérature.

Pour les calculs des coefficients d'échange il existe dans la littérature suffisamment de corrélations adimensionnelles. Le problème demeure alors la dépendance des différents paramètres en fonction de la température.

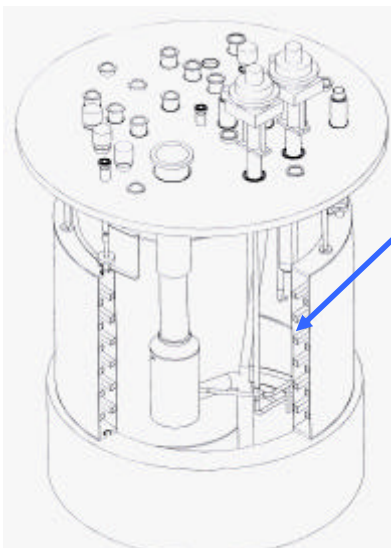
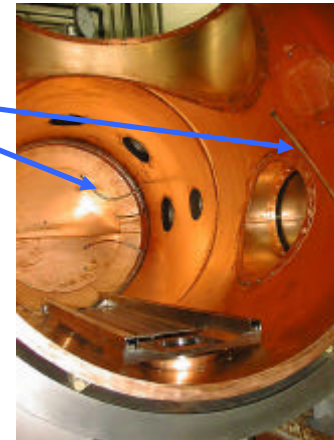
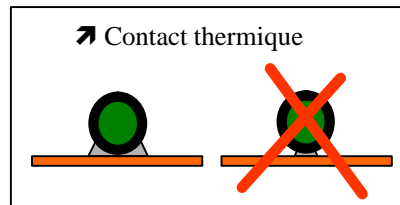
Pour les calculs transitoires ! Codes de calculs.



Ecrans 1



Circulation d'azote



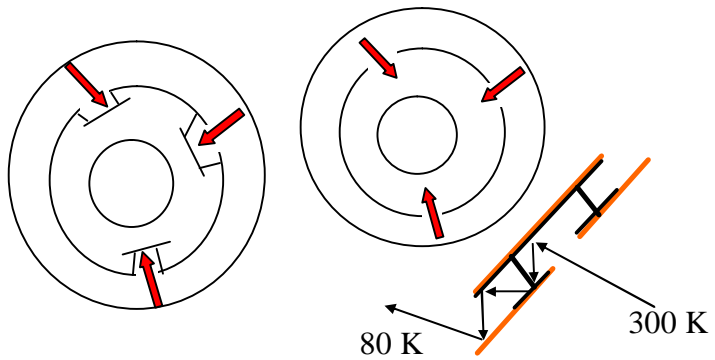
Réservoirs de garde
de forme annulaire

Attention flambage !

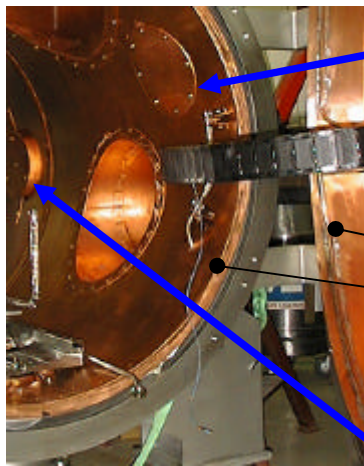
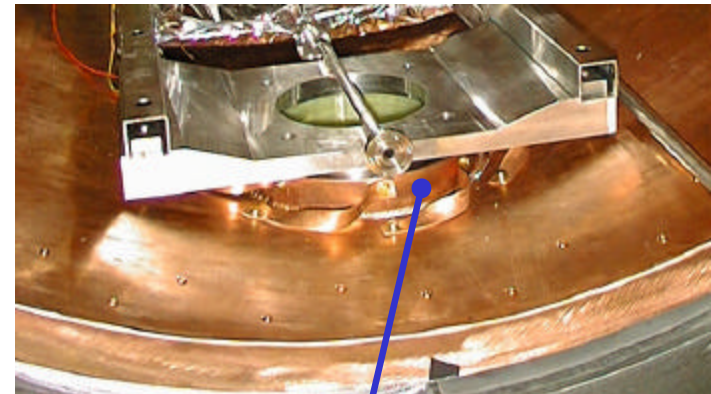
Avec LN2 le débit de
mise en froid, donc la
pression interne, peut être
important.



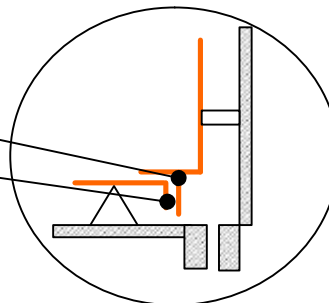
Ecrans 2



Utilisation de peinture à fort coefficient d'absorption sur les parties pouvant réfléchir du rayonnement à 300 K.



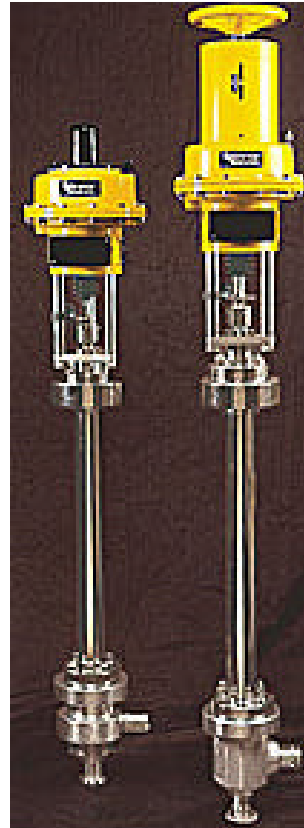
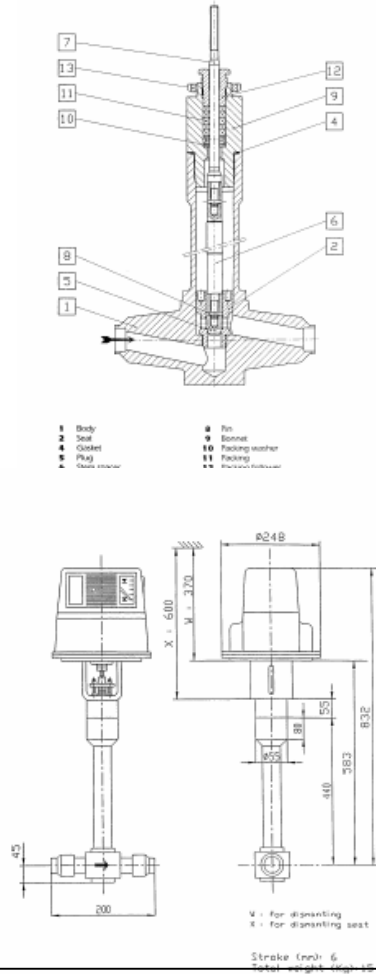
Fixation des parties rapportées par un nombre important d'écrous : ↗
Contact thermique



Baffle de pompage



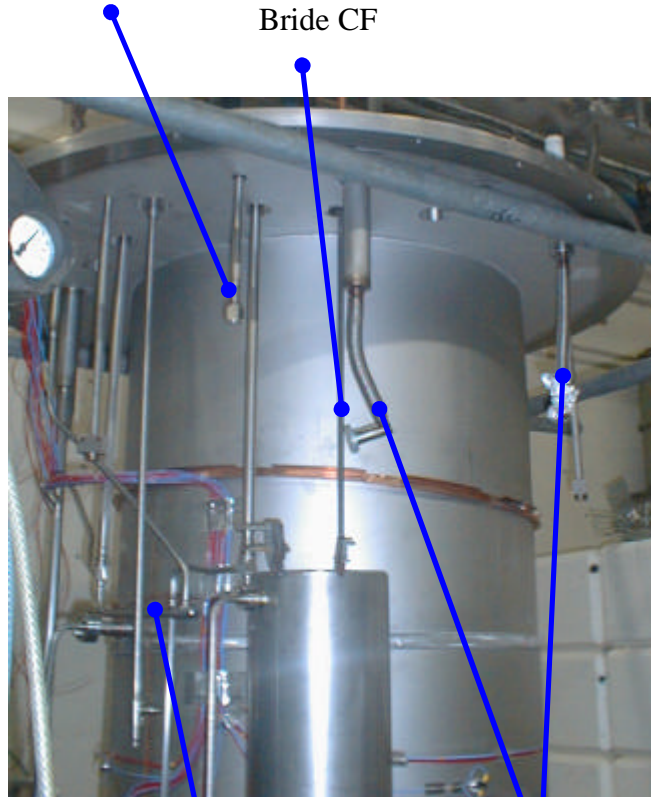
Vannes cryogéniques



Tubulures de transfert



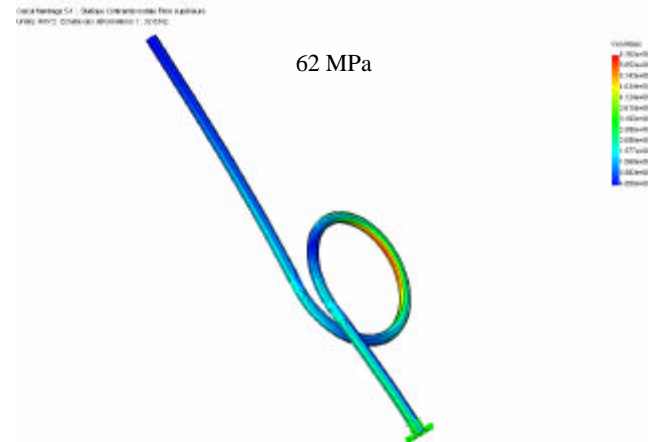
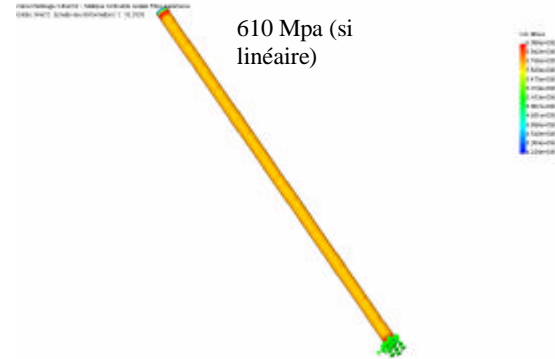
Raccord CAJON



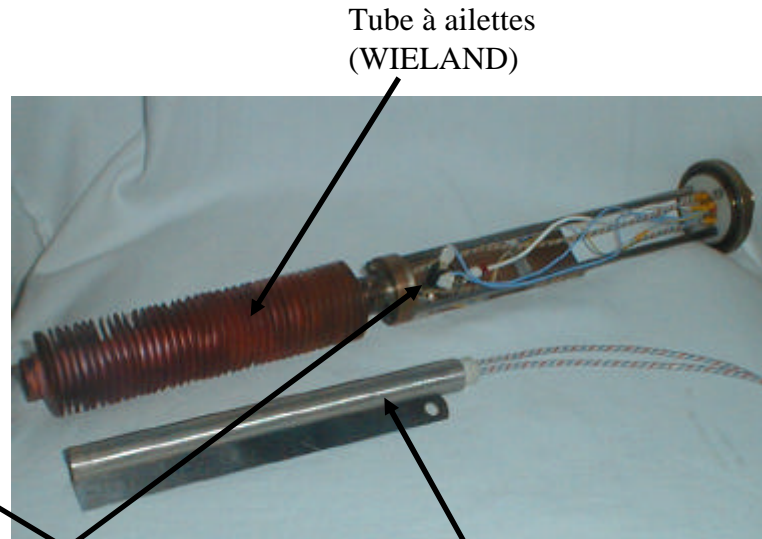
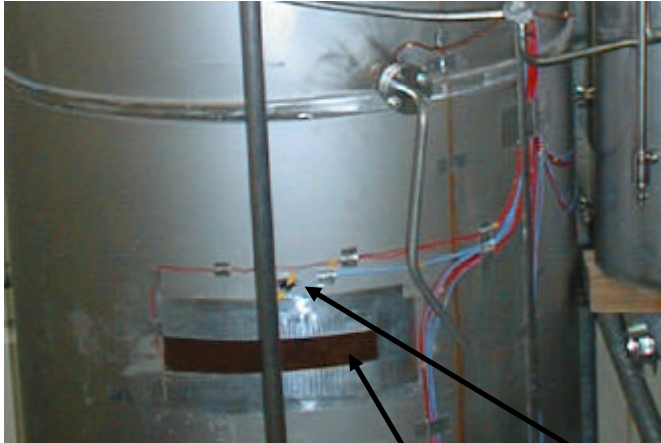
Bride CF

Souplesse de la tuyauterie

Soufflets de compensation



Réchauffeurs

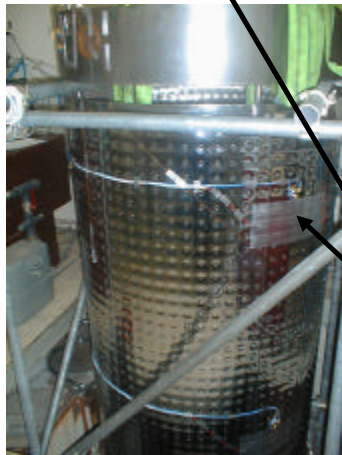


Tube à ailettes
(WIELAND)

Thermoswitch.
(HEITO,
ELMWOOD LTD)

Cartouche
chauffante 1000 W
(VULCANIC)

Attention Offset
sous vide.

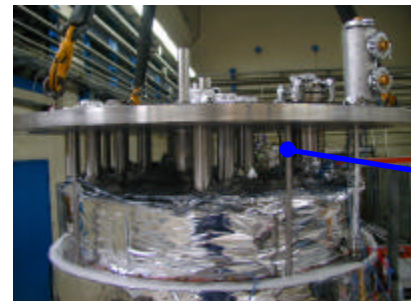
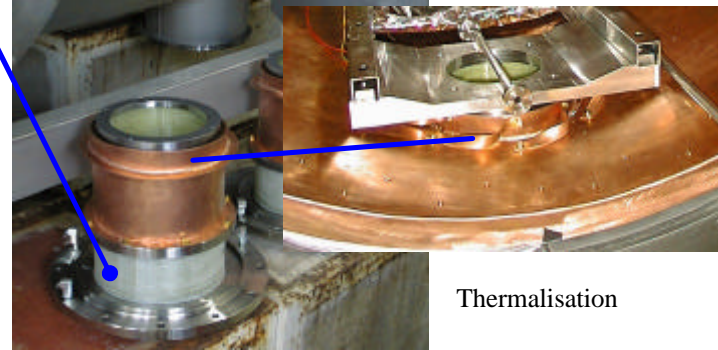
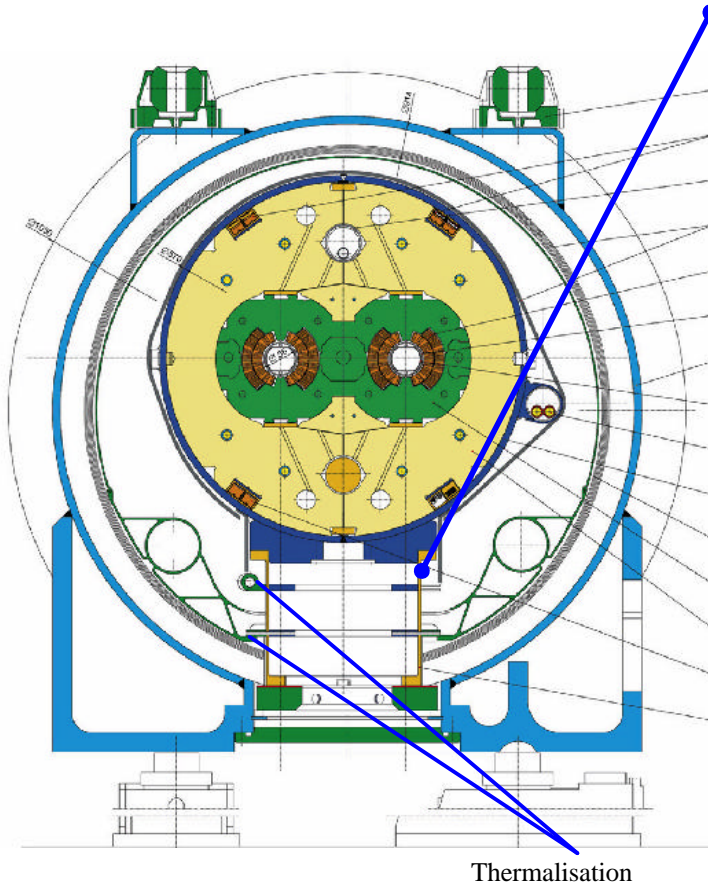


Réchauffeurs laminaires collés
(MINCO).

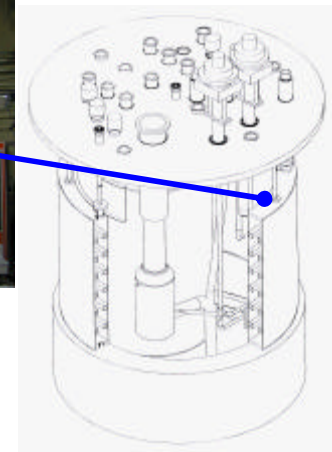
Supports mécaniques

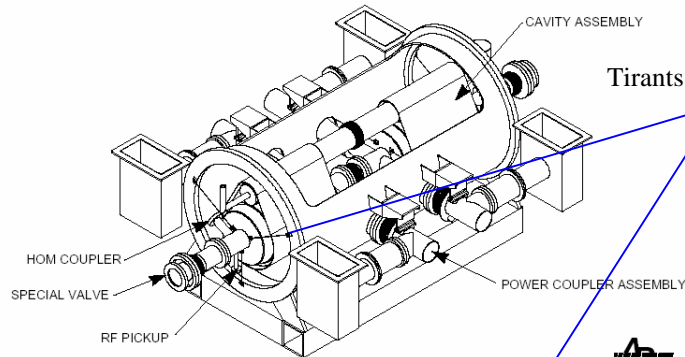


Matériaux composites (Epoxy + verre). Bonne tenue mécanique, faible contraction thermique, faible conductivité thermique. La position des éléments change (contraction thermique libre)

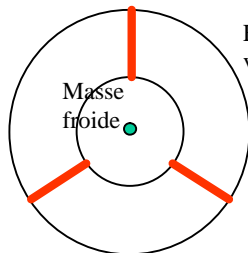
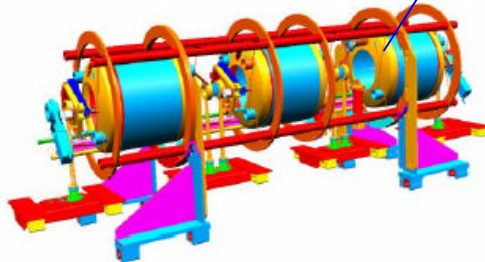
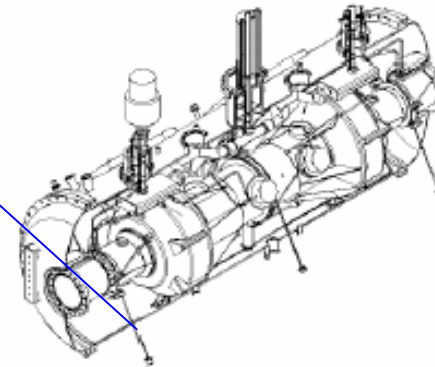


Support de réservoir (Inox, Titane, epoxy verre...) **Attention** aux sollicitations latérales (manutention...)





Tirants antagonistes



Enceinte à vide

Masse froide

L identique
 T identique
 Δl identique
 Rigidité identique

Le centre à la même position à 300 K et 4 K

L'alignement se fait par réglage de l'enceinte à vide.

Lignes de transfert



Transfert d'azote
isolé sous
mousse

Transfert
d'hélium isolé
sous vide

Transfert
d'hélium isolé
sous vide.

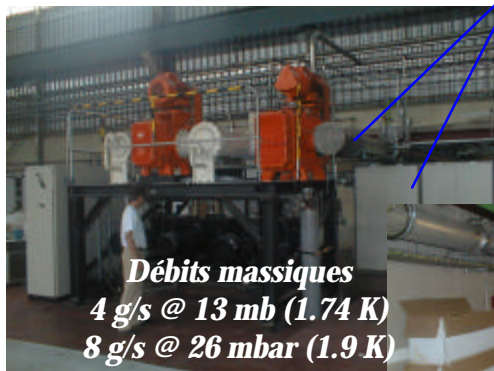
Ligne flexible



Lignes de pompage

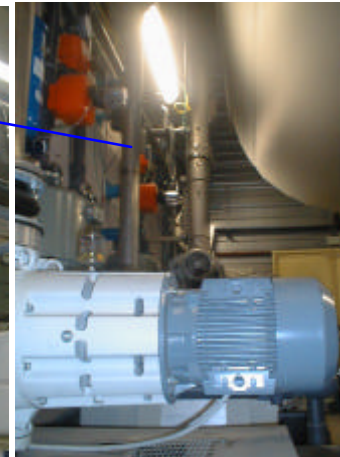
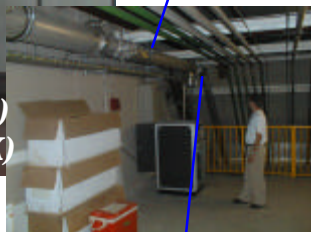


Ligne pompage simple



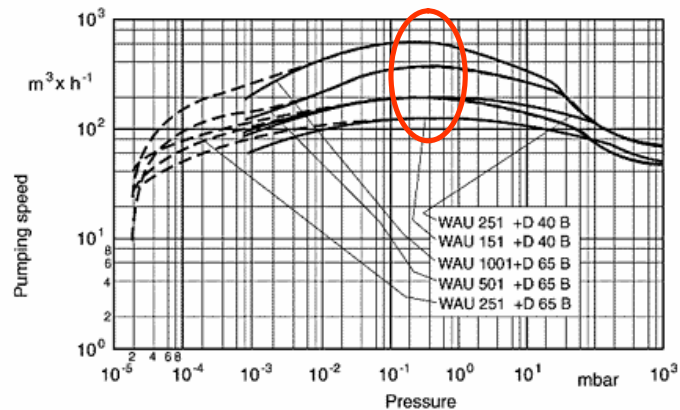
Débits massiques
 4 g/s @ 13 mb (1.74 K)
 8 g/s @ 26 mbar (1.9 K)

Réchauffeur
 basse pression

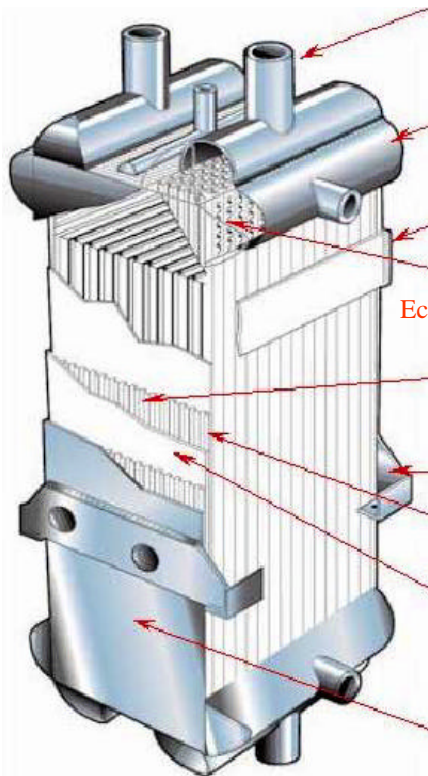


Ligne pompage isolée sous vide

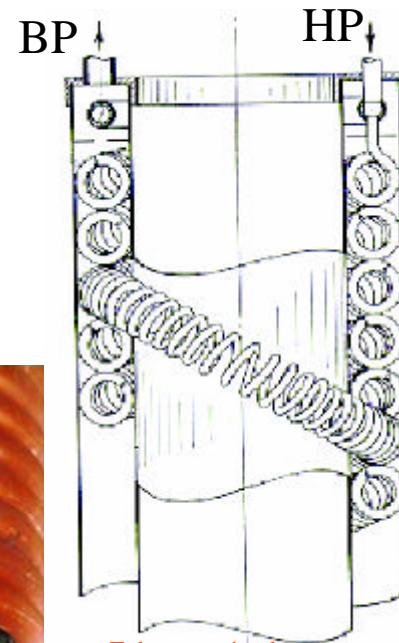
Débit maxi pour $P < 1$ mbar



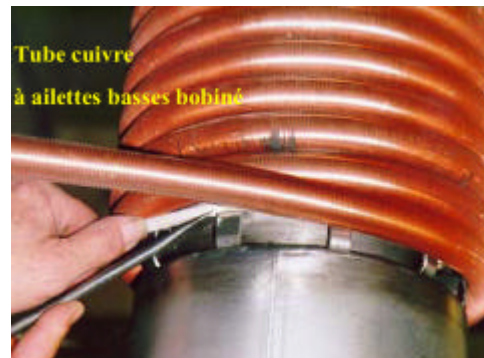
Echangeurs



Echangeur à plaques



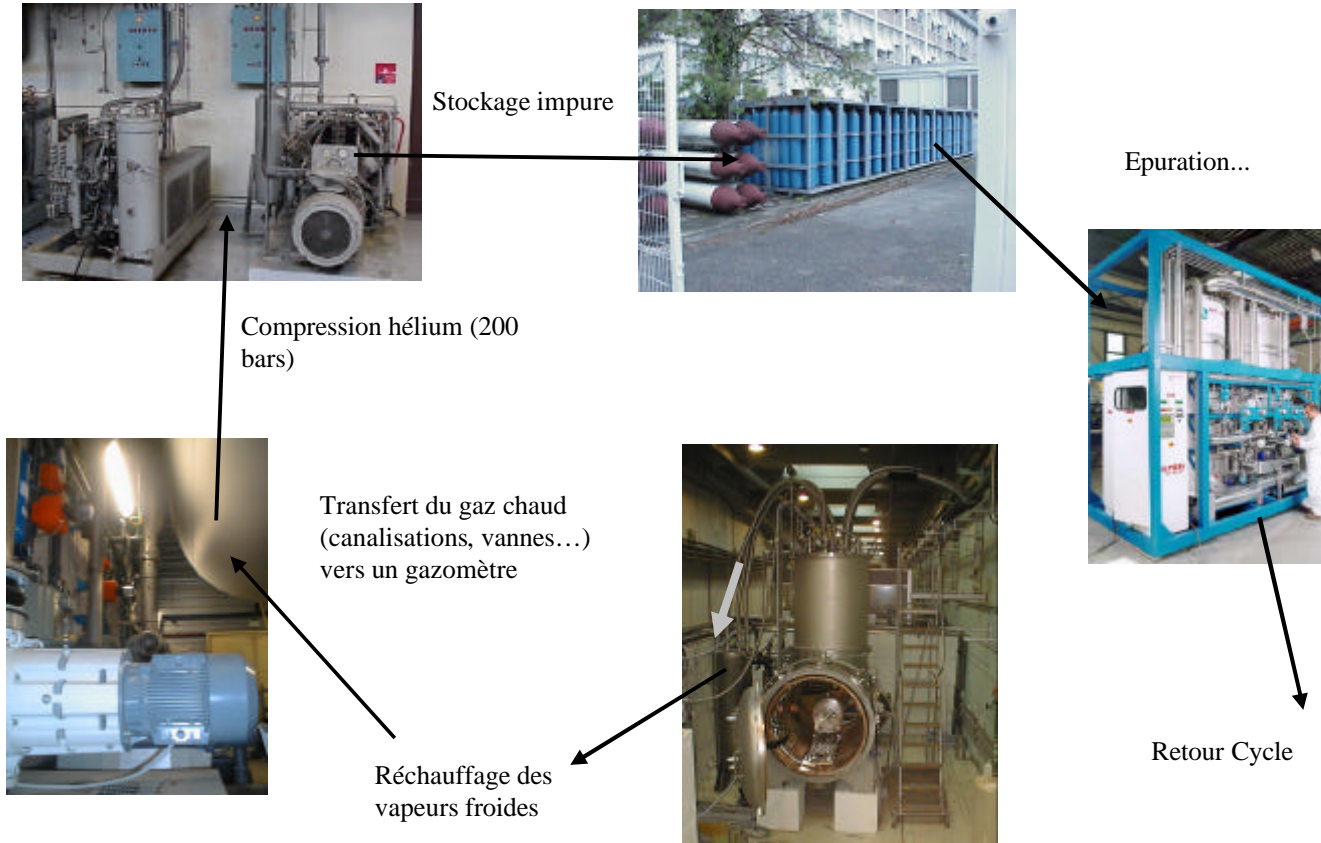
Echangeur à tubes



- Compact
- Faibles pertes de charges
- Bon échange thermique



Ligne de récupération gaz chaud



Exemples



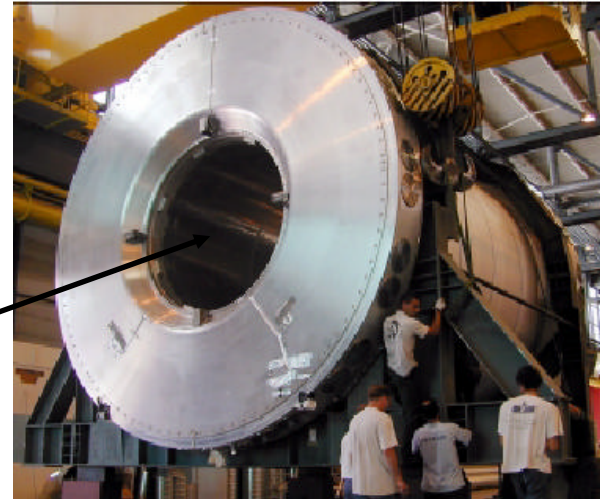
Enceinte à vide

Enceinte froide

Echangeurs azote

Cryostat Argon

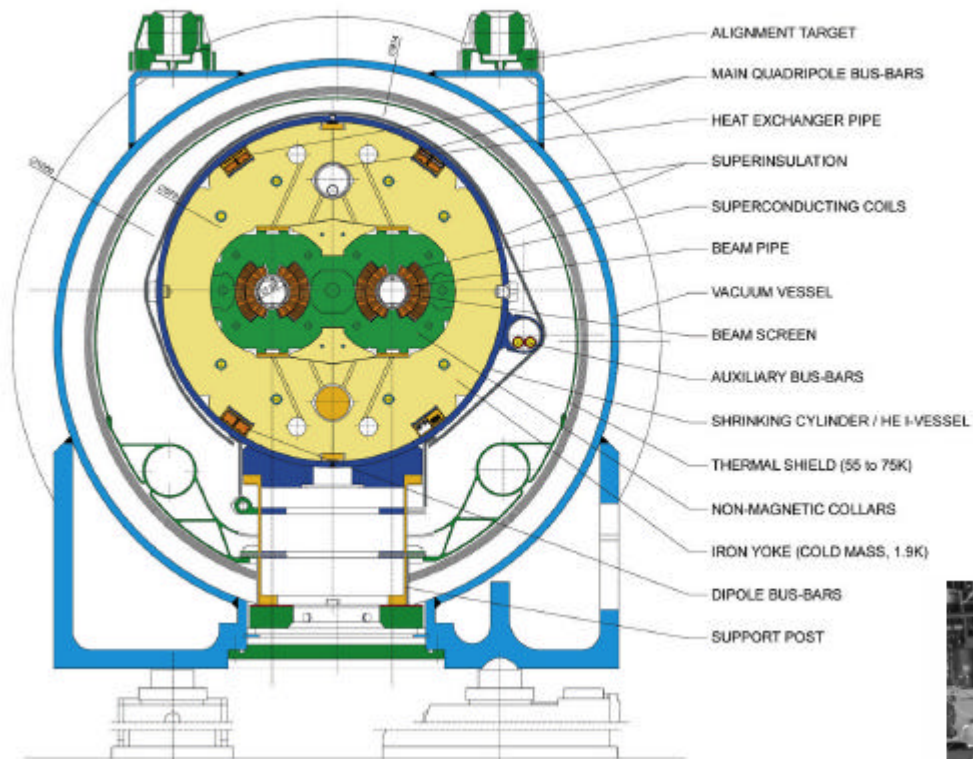
Détecteur ATLAS



Exemples

LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

CEBN AC/CA/TM - 05.197 - 10.04.2000



Exemples

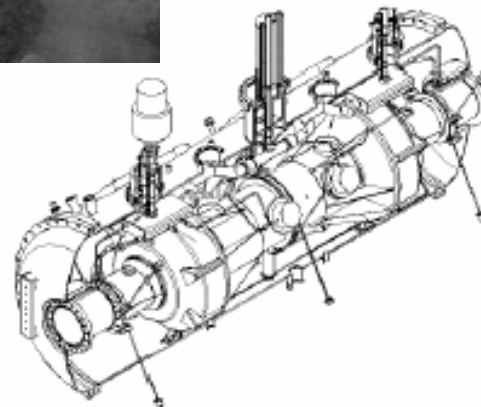


Cryomodule 5 cavités supras $\lambda/4$ (Legnaro).

Pas de super isolation : Le vide faisceau/cavité est commun au vide d'isolement du cryostat

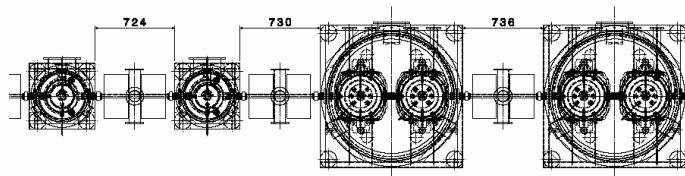
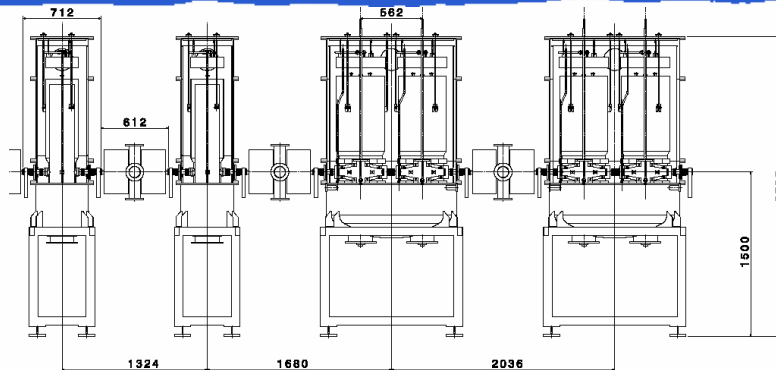
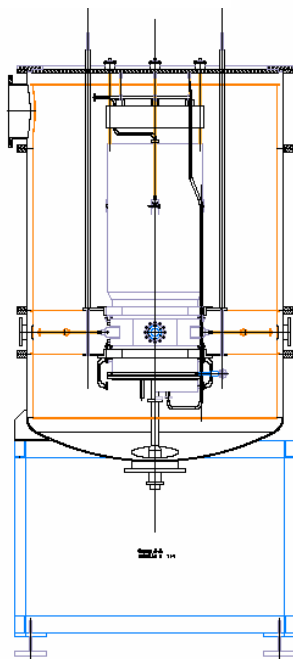
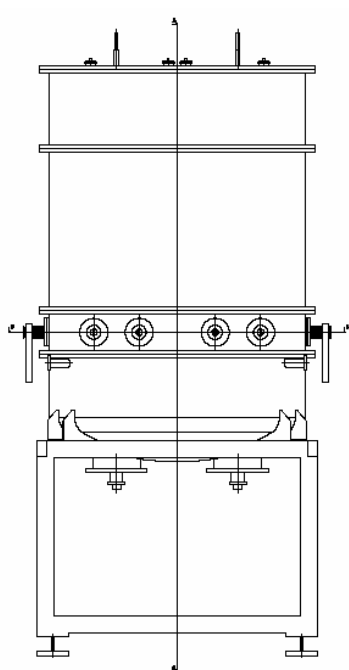


Grandes ouvertures.
Accessibilité pour le montage en salle blanche

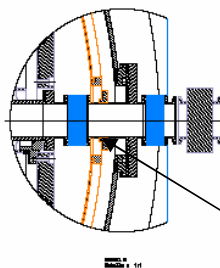
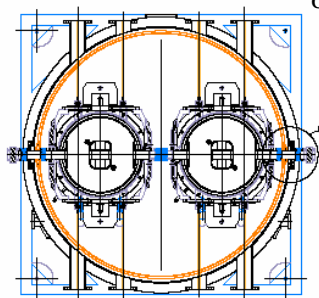


Cryomodule prototype de cavités supras (SOLEIL). Pas d'écran actif (methode CERN/LEP 2). Rajout d'un écran pour la version machine.

Exemples



Court. M. Blivet

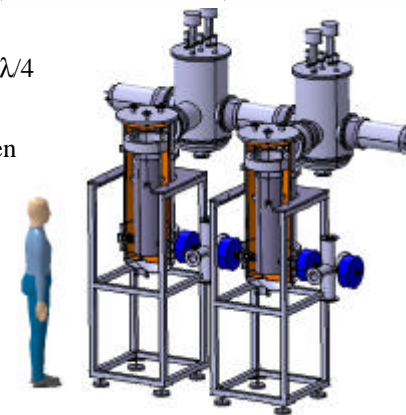


Transition chaud/ froid
~ 80 mm

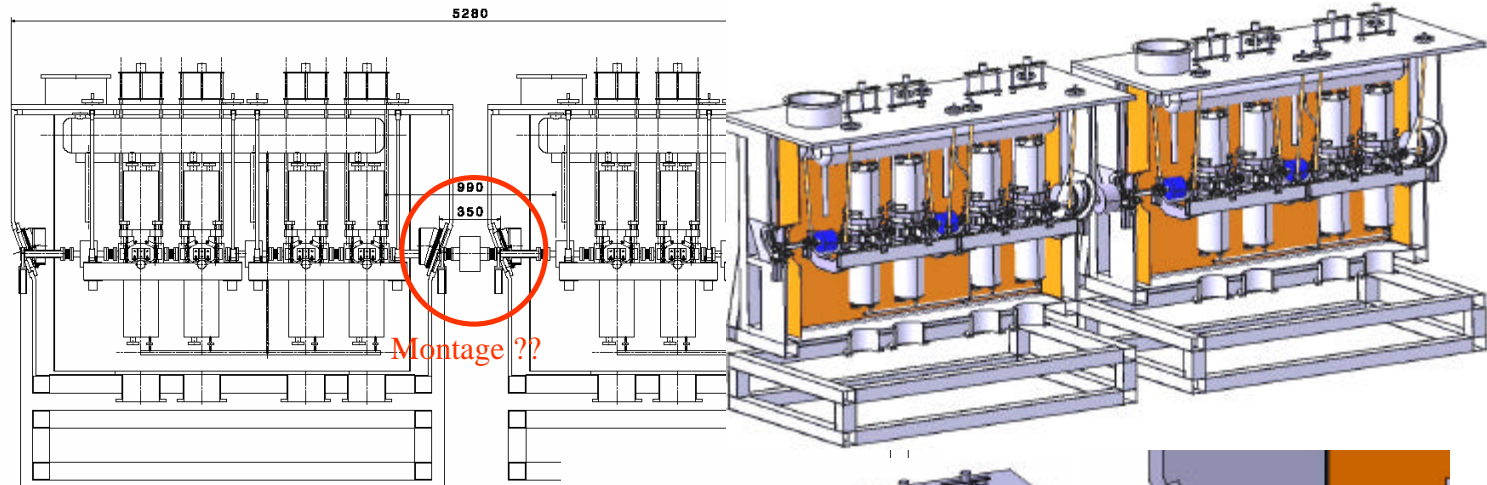
Etude cryomodule cavités supras $\lambda/4$
vide séparé (SPIRAL II).

Montage cavité dans cryomodule en
salle blanche

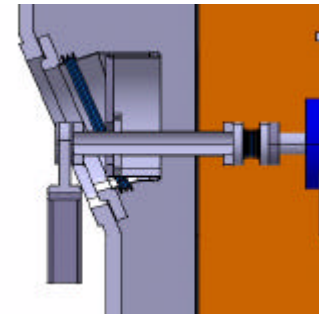
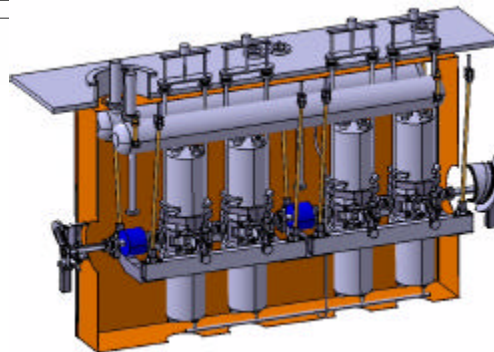
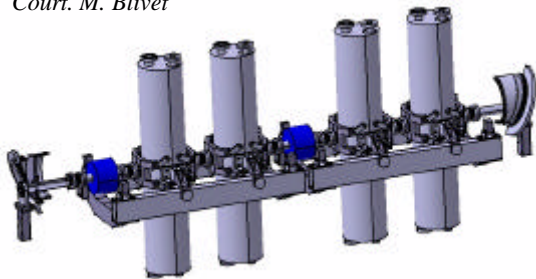
Distance inter éléments réduite
(transport du faisceau).



Exemples



Court. M. Blivet



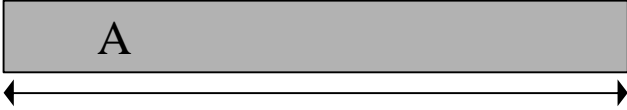
Etude cryomodule (abandonnée) cavités supras $\lambda/2$ vide séparé (SPIRAL II).

Distance inter éléments réduite (transport du faisceau).

Montage du train de cavités en salle blanche puis montage dans le cryomodule.

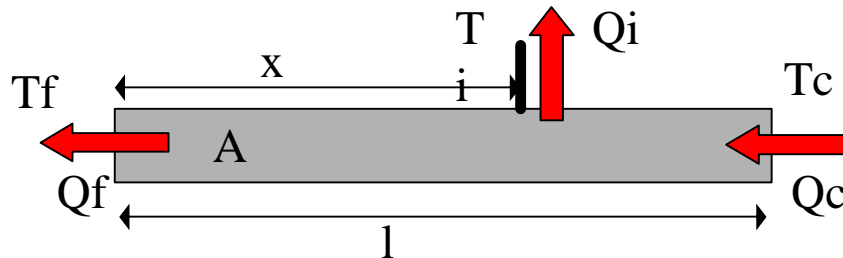
Conduction Solide : Thermalisation = minimiser $\sum Q_i/T_i$

Pour une longueur thermique entre 4 K ou 2 K et 300 K et une température intermédiaire donnée, ~ 80 K, on cherche la position de la thermalisation qui minimise la $\sum Q_i/T_i$



$$Q = \frac{A}{l} \cdot \int_{T_c}^{T_f} K(T) \cdot dT$$

$$s_1 = \frac{Q}{T_f}$$



$$Q_c = \frac{A}{l \cdot (1 - x/l)} \cdot \int_{T_i}^{T_c} K(T) \cdot dT$$

$$Q_i = Q_c - Q_f$$

$$s_2 = \frac{Q_i}{T_i} + \frac{Q_f}{T_f}$$

$$Q_f = \frac{A}{l \cdot (x/l)} \cdot \int_{T_f}^{T_i} K(T) \cdot dT$$

Conduction Solide : Thermalisation = minimiser $S_i Q_i/T_i$

$$l \cdot s_2 = \frac{A \cdot (T_i - T_f)}{T_f \cdot T_i \cdot (x/l)} \cdot \int_{T_f}^{T_i} K(T) \cdot dT + \frac{A}{T_i \cdot (1-x/l)} \cdot \int_{T_i}^{T_c} K(T) \cdot dT$$

$$l \cdot s_1 = \frac{A}{T_c} \cdot \int_{T_c}^{T_f} K(T) \cdot dT$$

Avec : $T_f = 300$ K, $T_c = 4$ k et un tube en inox, $A = 0.23$ cm².

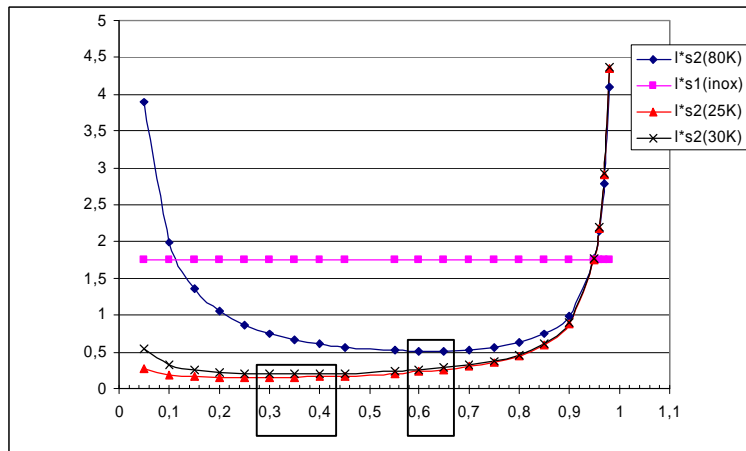
$$l \cdot s_1 = 1.76$$

Avec : $T_i = 80$ K, $T_f = 300$ K, $T_c = 4$ k et un tube en inox, $A = 0.23$ cm².

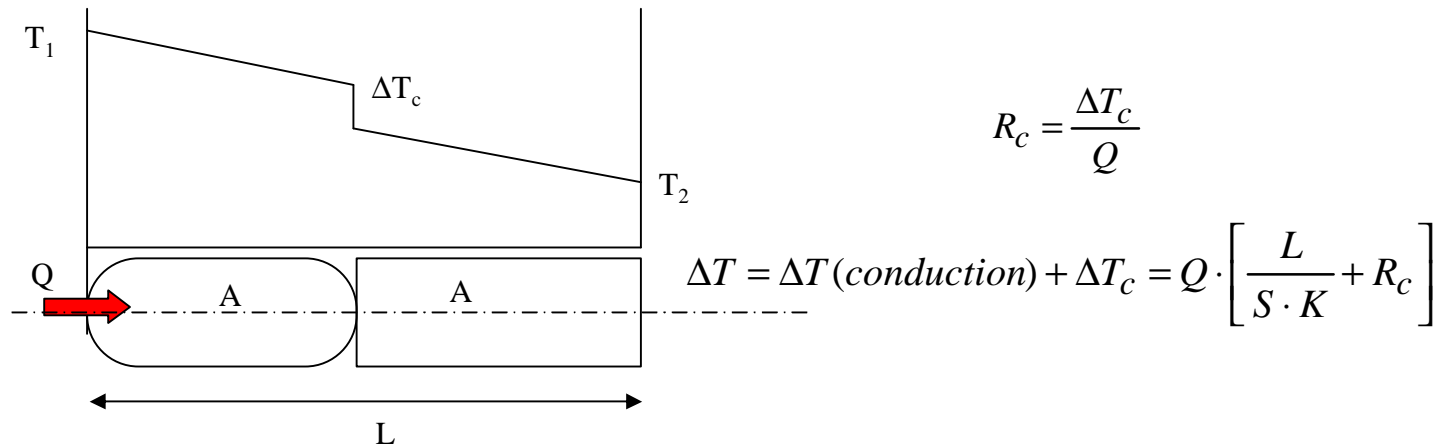
$$l \cdot s_2 = \frac{0.191}{(x/l)} + \frac{0.078}{1-(x/l)}$$

Avec : $T_i = 30$ K, $T_f = 300$ K, $T_c = 4$ k et un tube en inox, $A = 0.23$ cm².

$$l \cdot s_2 = \frac{0.023}{(x/l)} + \frac{0.087}{1-(x/l)}$$



Conduction Solide : Resistance de contact



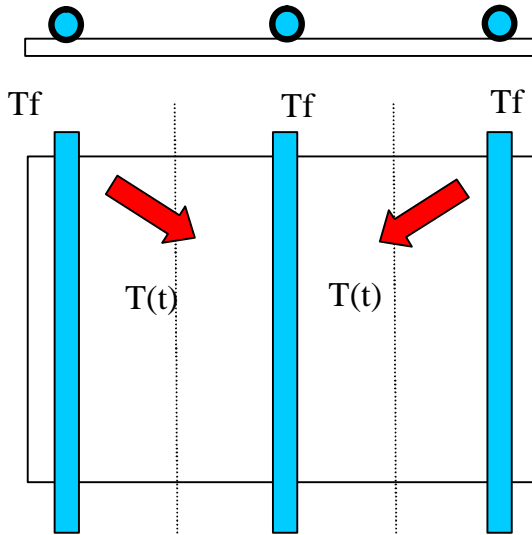
La resistance de contact dépend :

Géometrie de la surface de contact (résistance de constriction)

De la surface de contact (modèle de Hertz) :

R_c diminue pour F (force de contact) augmente et E (module d'Young) diminue

Rayonnement : Refroidissement de l'écran thermique actif / Régime transitoire (Cas d'un refroidissement avec LN2)

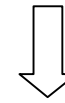


$$M \cdot C_p(T) \cdot \frac{dT}{dt} + Q_r(T) = h(T) \cdot S_{éch.} (T_{écran} - T_{fluide})$$

$$\ln \left(\frac{T_{écran} - T_{fluide} - B/A}{T_{init} - T_{fluide} - B/A} \right) = -At$$

$$B = \frac{Q_r}{M_{métal} \cdot \tilde{C}_{p_{métal}}}$$

$$A = \frac{h \cdot S_{éch.}}{M_{métal} \cdot \tilde{C}_{p_{métal}}}$$



$$h \cdot S_{éch.} > \frac{Q_r}{T_{écran} - T_{fluide}}$$

S échange : Diamètre et longueur tube.

Coefficient d'échange h dans le tube.

Masse M et Cp de l'écran.

Rayonnement : Refroidissement de l'écran thermique à l'azote liquide / Régime transitoire

Attention : échange par ébullition !!

En film boiling (jusqu'à 95 K pour l'azote liquide à la Patm.) le coefficient d'échange est faible.

