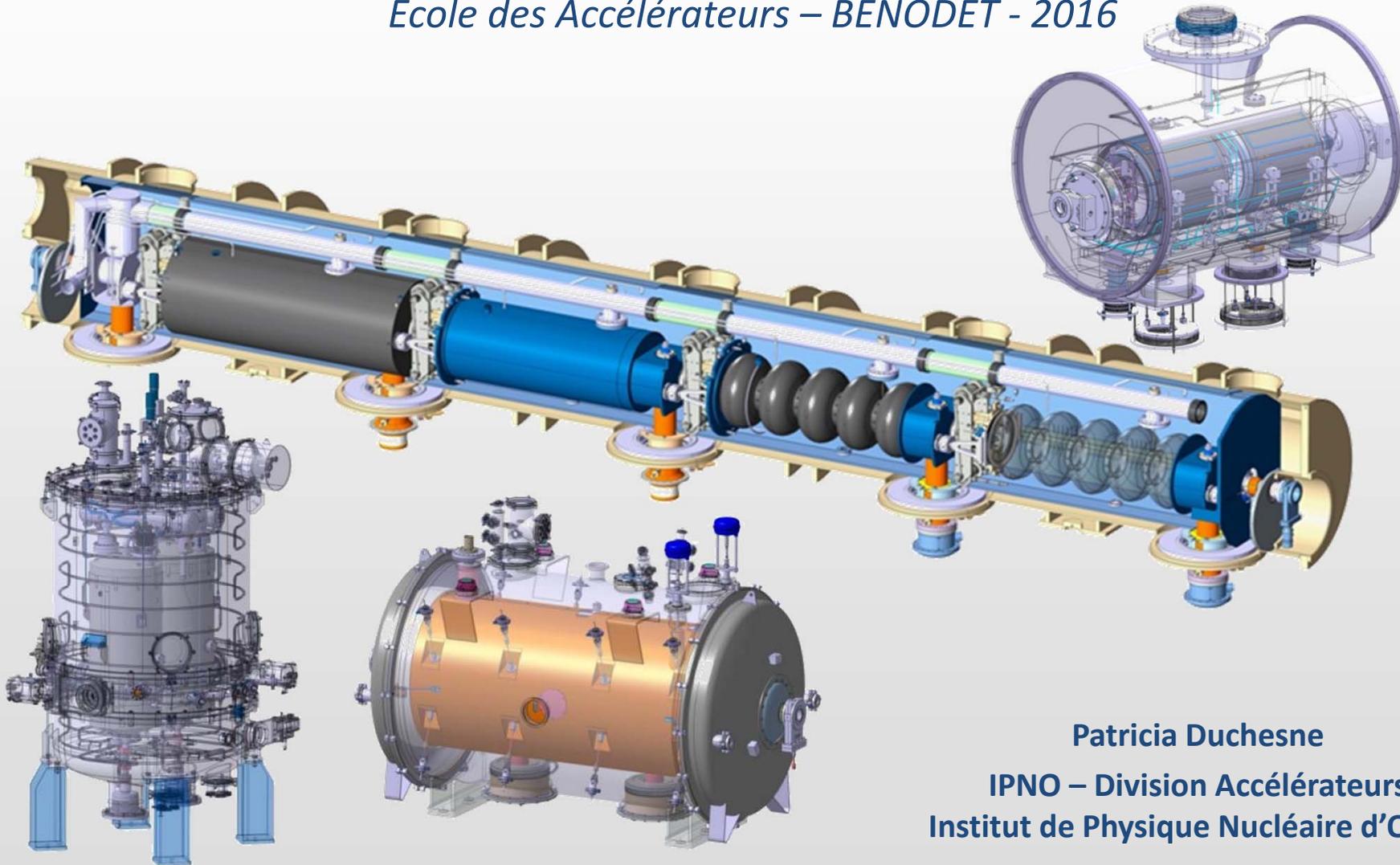


# Ingénierie des cryomodules

*Ecole des Accélérateurs – BENODET - 2016*



Patricia Duchesne

IPNO – Division Accélérateurs  
Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

## SOMMAIRE

---

- INTRODUCTION
- FONCTIONS D'UN CRYOMODULE
- COMPOSANTS PRINCIPAUX
- SCHEMA CRYOGÉNIQUE D'UN CRYOMODULE
- ASPECTS THERMIQUES
- ASPECTS MECANIQUES
- ASPECTS MAGNETIQUES
- DIFFÉRENTS CONCEPTS DE SUPPORTAGE
- PROCESS D'ASSEMBLAGE
- CONCLUSION

## SOMMAIRE

---

### INTRODUCTION

### FONCTIONS D'UN CRYOMODULE

### COMPOSANTS PRINCIPAUX

### SCHEMA CRYOGÉNIQUE D'UN CRYOMODULE

### ASPECTS THERMIQUES

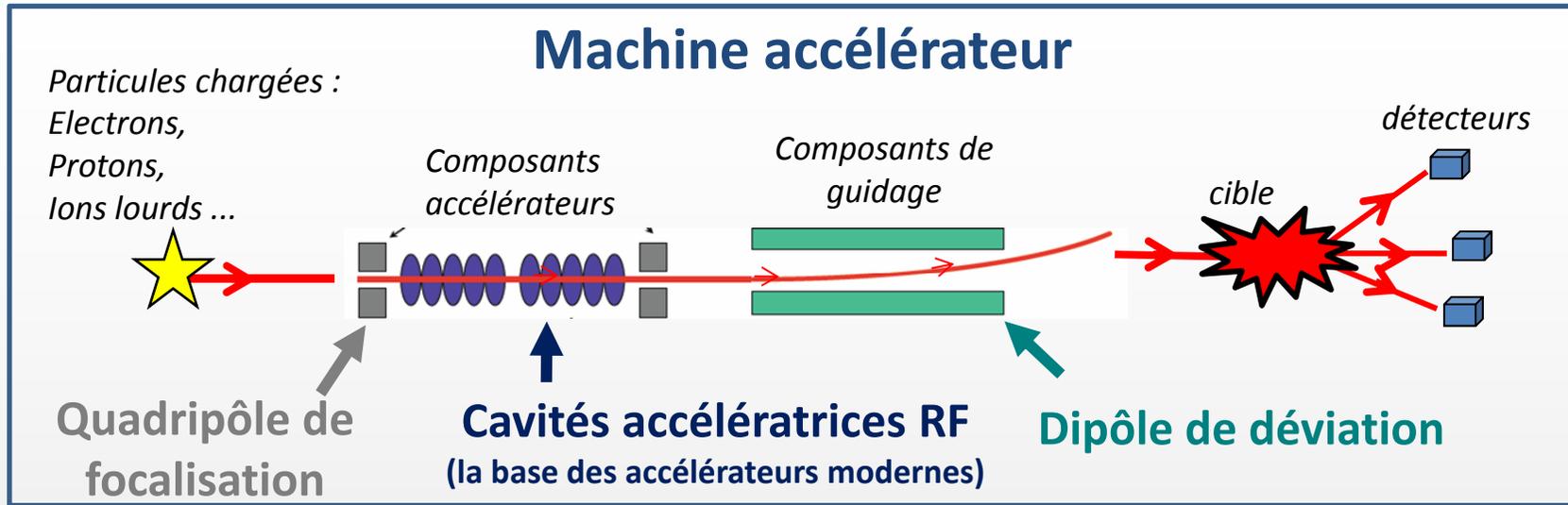
### ASPECTS MECANIQUES

### ASPECT MAGNETIQUES

### DIFFÉRENTS CONCEPTS DE SUPPORTAGE

### PROCESS D'ASSEMBLAGE

### CONCLUSION



Augmenter la performance  
des accélérateurs

## Cavités supraconductrices

Installation dans l'accélérateur

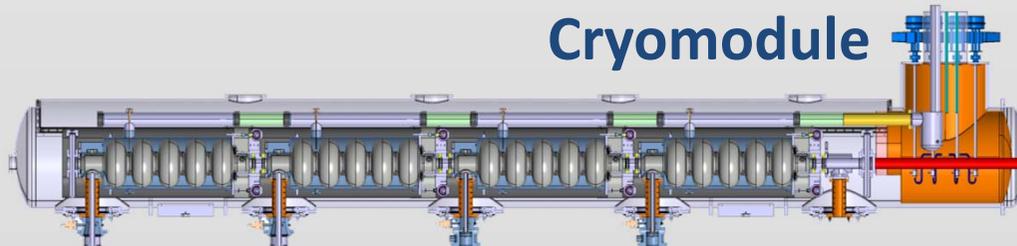
**Avantages :**

Gain sur le coût de fonctionnement  
Accélérateur plus court

**Inconvénients :**

Distribution cryogénique  
Préparation complexe

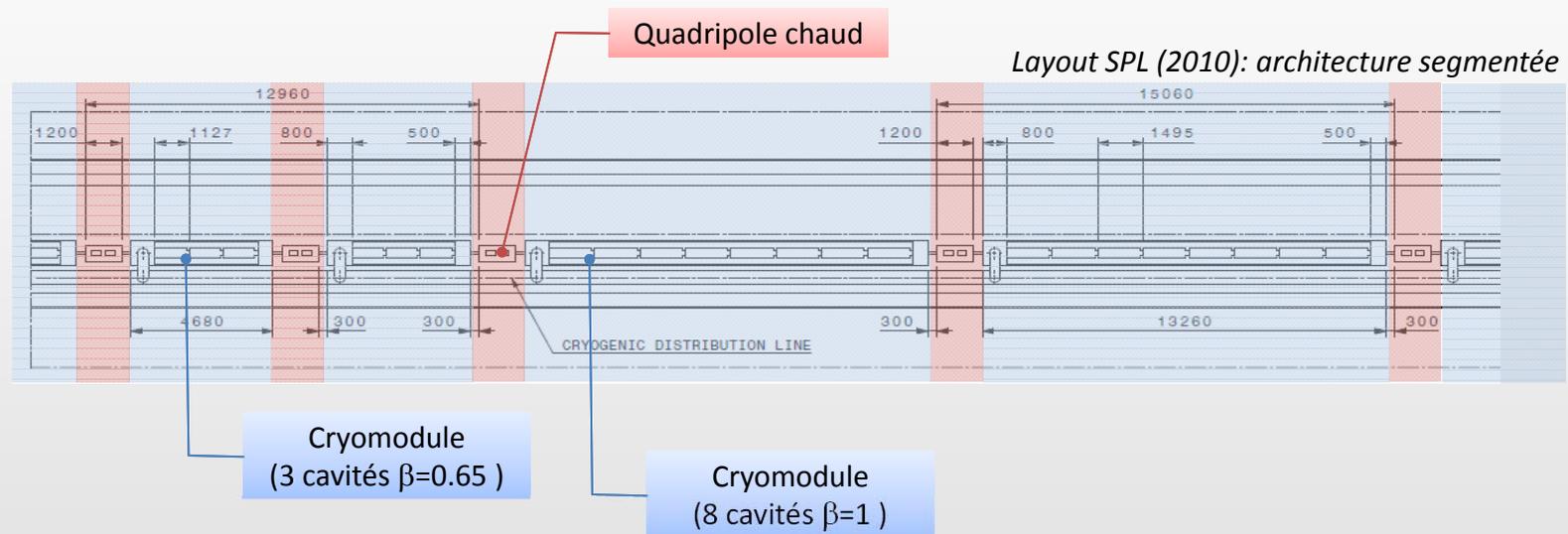
## Cryomodule



Distribution cryogénique  
Isolation thermique & magnétique  
Assemblage and alignment

Un cryomodule est une maille élémentaire d'un accélérateur contenant des cavités Supraconductrices Radio Fréquence (SRF) et des composants nécessaires à leur fonctionnement à très basse température (cryogénique).

INTRODUCTION



Cryomodule SPL (8 cavités  $\beta=1$ )



### **Une partie d'une section accélératrice**

Type et nombre de cavités et d'éléments de focalisation :

**Le design de l'accélérateur détermine en partie la composition du cryomodule**

### **Une partie d'un système cryogénique**

Sous-systèmes indépendants ou connectés les uns aux autres :

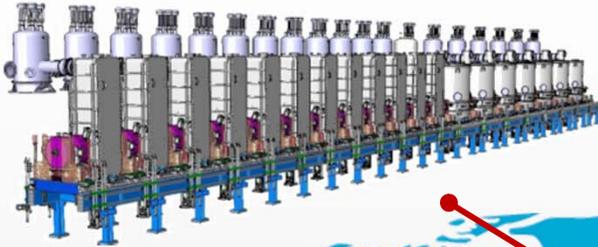
**Le système cryogénique global impacte sur la segmentation de l'accélérateur et donc sur le cryomodule**

## **Le design d'un cryomodule dépend de plusieurs paramètres :**

- **Le design de l'accélérateur** (composants d'accélération et de guidage, séquence)
- **Le système cryogénique global** (sous-systèmes indépendants ou non)
- **Les performances attendues de l'accélérateur** (fiabilité, disponibilité ...)
- **Le coût**
  - Coût de fabrication : ↗ facteur de remplissage (cryomodules longs, interconnexions courtes)
  - Coût de fonctionnement : ↘ Pertes statiques (cryomodules longs connectés cryogéniquement)

INTRODUCTION

**GANIL-SPIRAL2 FRANCE**



**ESS-LUND-SUEDE**

Début prévu en 2019



**DESY- HAMBURG-ALLEMAGNE**



**SNS, TENNESSEE-USA**



**CEBAF, J-LAB-VIRGINIE-USA**



**LHC – CERN-SUISSE**



**J-PARC-TOKAI-JAPON**



## SOMMAIRE

---

- INTRODUCTION
- FONCTIONS D'UN CRYOMODULE
- COMPOSANTS PRINCIPAUX
- SCHEMA CRYOGÉNIQUE D'UN CRYOMODULE
- ASPECTS THERMIQUES
- ASPECTS MECANIQUES
- ASPECT MAGNETIQUES
- DIFFÉRENTS CONCEPTS DE SUPPORTAGE
- PROCESS D'ASSEMBLAGE
- CONCLUSION

### ❑ **Un environnement cryogénique** pour la masse froide

Distribution (lignes, séparateur de phases, vannes) du fluide cryo (liquide ou gaz) aux températures souhaitées

- Les tanks des cavités/aimants sont remplis d'hélium liquide à 4K ou moins
- L'écran thermique peut être activement refroidi avec de l'hélium gaz
- L'écran magnétique
- Le coupleur de puissance

### ❑ **Isolation thermique** (écrans, vide et super-isolation) contre toute source de transfert de chaleur de la température ambiante vers la température cryogénique

- Conduction
- Convection
- Rayonnement

### ❑ **Supportage et positionnement** des composants

- Support structurel de la masse froide
- Alignement précis des cavités par rapport à l'axe faisceau et garantie de leur bon positionnement en fonctionnement (après cycles thermiques)

### ❑ **Interface** entre la masse froide et la température ambiante

- Points de connexion pour les systèmes à intégrer : courant, RF, instrumentation et cryogénie

### ❑ **Protection magnétique** contre le champ magnétique terrestre et toute autre source

- INTRODUCTION
- FONCTIONS D'UN CRYOMODULE
- COMPOSANTS PRINCIPAUX**
- SCHEMA CRYOGÉNIQUE D'UN CRYOMODULE
- ASPECTS THERMIQUES
- ASPECTS MECANIQUES
- ASPECT MAGNETIQUES
- DIFFÉRENTS CONCEPTS DE SUPPORTAGE
- PROCESS D'ASSEMBLAGE
- CONCLUSION

☐ **Masse froide (cavités, aimants)**

☐ **Ecran magnétique**

- Protection magnétique

☐ **Distribution cryogénique**

- Environnement cryogénique

☐ **Ecrans thermiques**

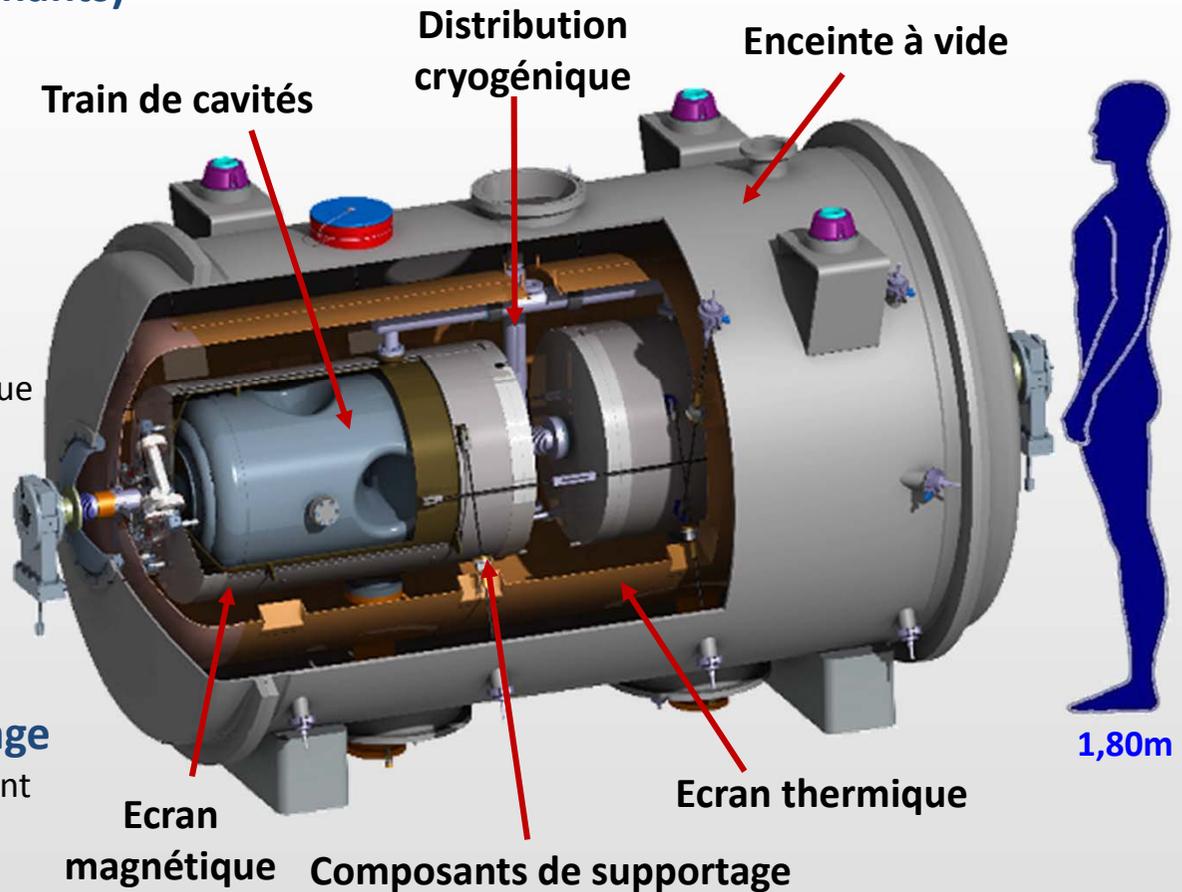
- Isolation thermique

☐ **Composants de supportage**

- Maintien et positionnement

☐ **Enceinte à vide**

- Isolation thermique
- Interface



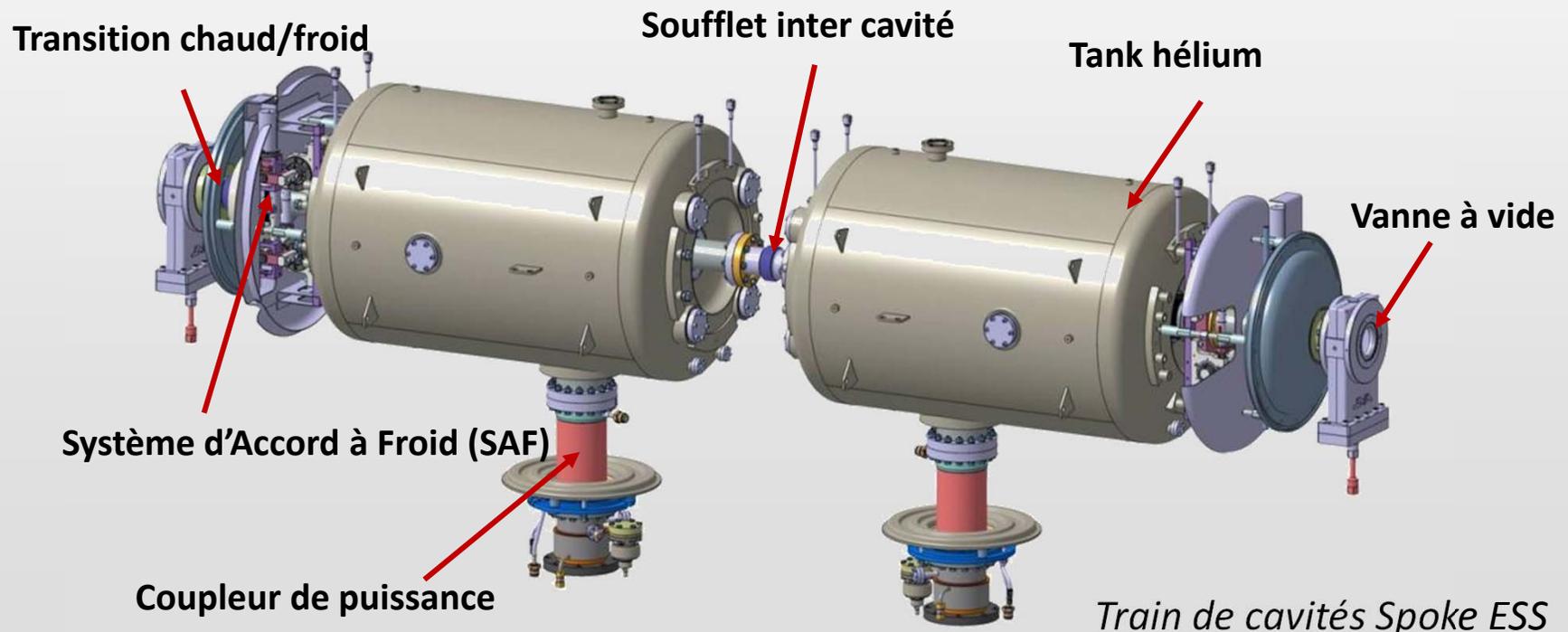
*Cryomodule ESS (Spoke)*

**Train de cavités supraconductrices RF (équipées de leur tank hélium et de leurs équipements) avec présence éventuelle d'aimants supraconducteurs de focalisation**

SC cavité: Niobium, Tank hélium : titane, acier inox

- **Cavité**: résonateur elliptique, spoke, quart d'onde ou demi-onde.
- **Assemblage du train** : ultra propreté nécessaire sur les parois internes de la cavité et du coupleur  
 → Le train est préparé en salle blanche classe 10 avec montage des coupleurs de puissance, des transitions chaud/froid et des vannes à vide aux extrémités.

COMPOSANTS PRINCIPAUX

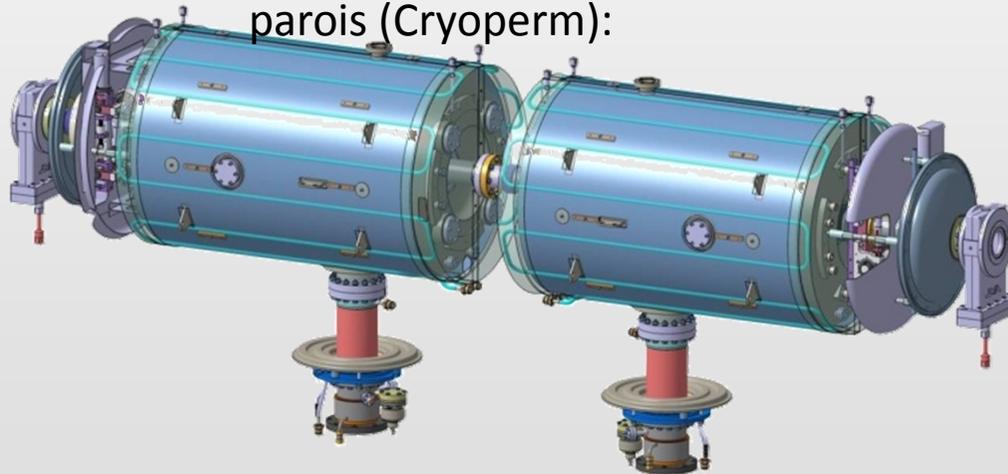


**Fournir une protection contre le champ magnétique terrestre et autres champs d'autres sources (ex: Champs de fuite des aimants)**

AMUMETAL (alliage nickel-fer) à température ambiante, CRYOPERM à basse température

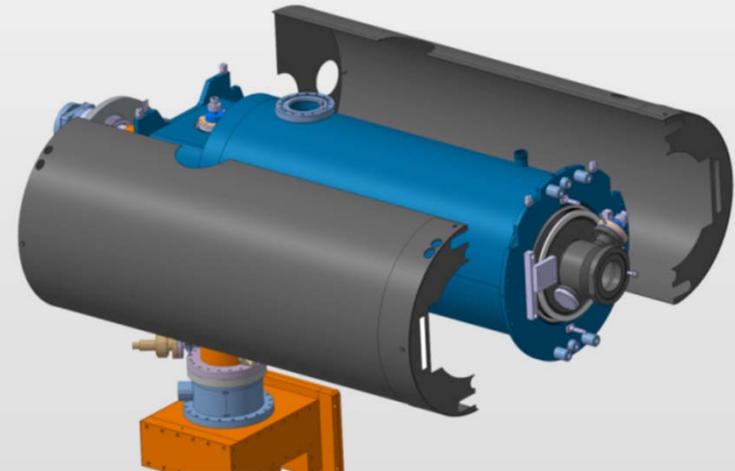
- **Autour de la cavité (écran à basse température)**  
Pour être efficace, l'écran peut être refroidi avant que la cavité n'atteigne sa température critique (supraconductivité)
- **Autour de tous les composants de l'enceinte à vide (écran à température ambiante)**

Ecran magnétique avec système de refroidissement entre deux parois (Cryoperm):



Cavité double Spoke ESS

Ecran magnétique (Cryoperm) autour de chaque each cavity:



Cavité elliptique SPL

## Circuits de distribution de fluides cryogéniques à différentes températures

Acier inox, aluminium ou cuivre

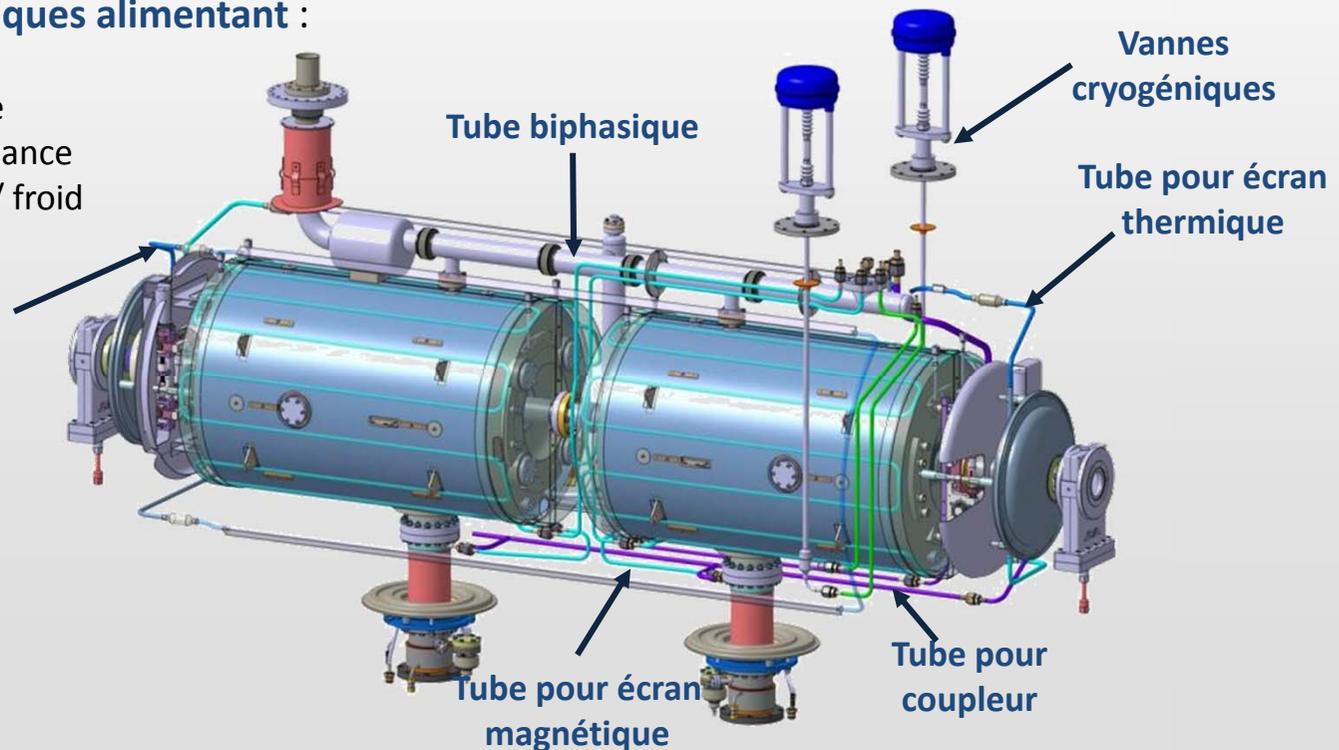
- **Son design dépend de la distribution cryogénique globale de l'accélérateur (voir § Schéma cryogénique d'un cryomodule):**

- Cryomodules connectés pour former un train cryo (minimiser le nombre d'alimentations cryogéniques) → Tubes de refroidissement et de retour intégrés à l'intérieur du cryomodule
- Cryomodules cryogéniquement Indépendants → Chaque cryomodule est connecté à la ligne de transfert cryogénique (CTL) via une boîte à vannes.

- **Circuits cryogéniques alimentant :**

- Ecran thermique
- Ecran magnétique
- Coupleur de puissance
- Transition chaud / froid
- Cavité

Circuit pour transition chaud/froid

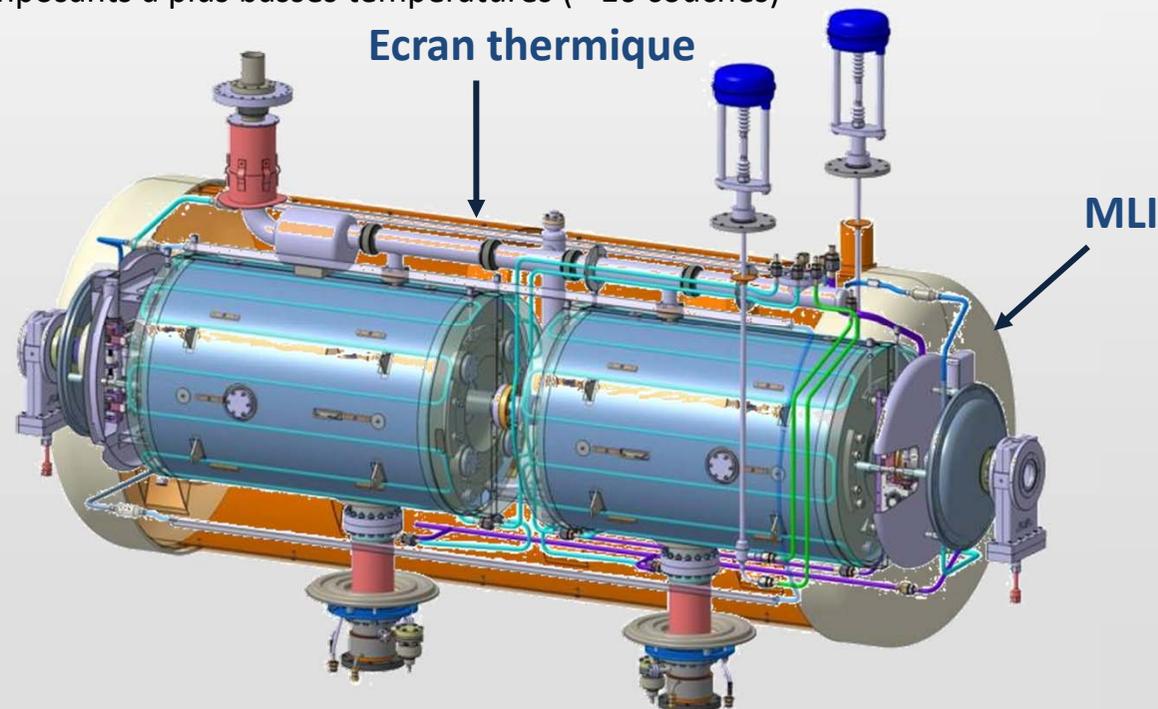


### Ecran thermique actif à température intermédiaire (50-80K)

### Ecran thermique passif (Isolation multicouche)

→ Pour minimiser les transferts thermiques par rayonnement

- **Ecran métallique** : aluminium ou cuivre refroidi activement à 50K-80K  
Son design est fortement conditionné par les contraintes liées aux contractions thermiques et celles d'assemblage
- **MLI (Multi Layer Insulation)**: composée de couches réfléchissantes (aluminium) alternées d'isolants (mylar) placée sur :
  - la surface de l'écran thermique (~ 30 couches)
  - la surface des composants à plus basses températures (~ 10 couches)

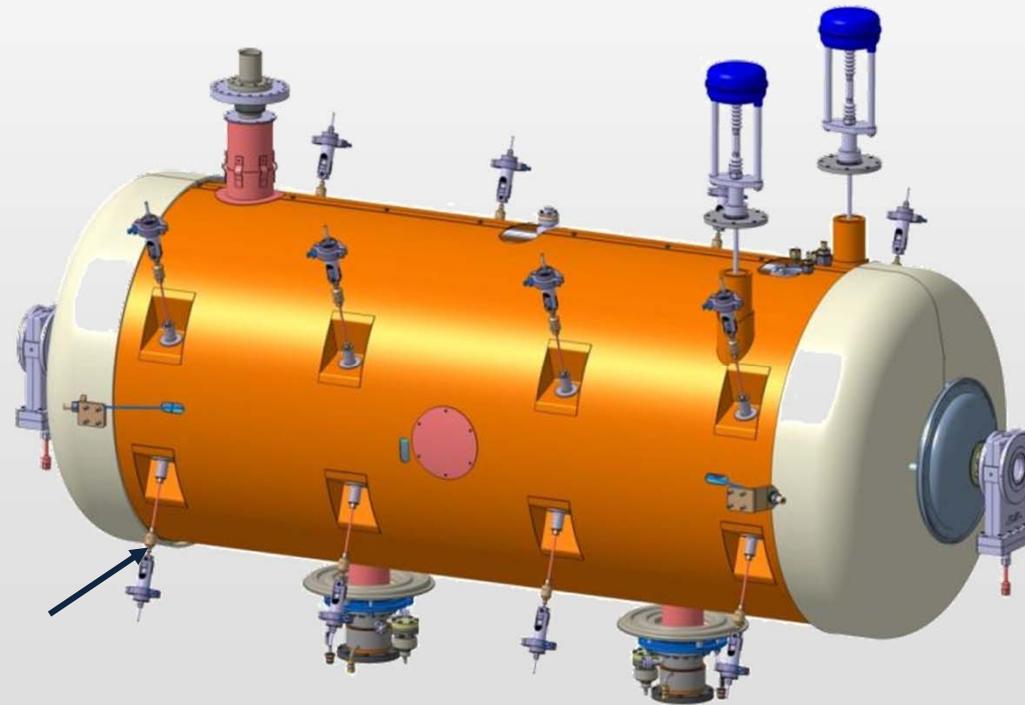


## COMPOSANTS DE SUPPORTAGE

### Supports maintenant tous les composants dans l'enceinte à vide

Résine, composite, Alliage titane, ...

- **Rigides et stables dans le temps** : Supporter le poids des composants et conserver le bon alignement de la masse froide
- **Transitions chaud/froid** : limiter les transferts de chaleur par conduction



Tirants

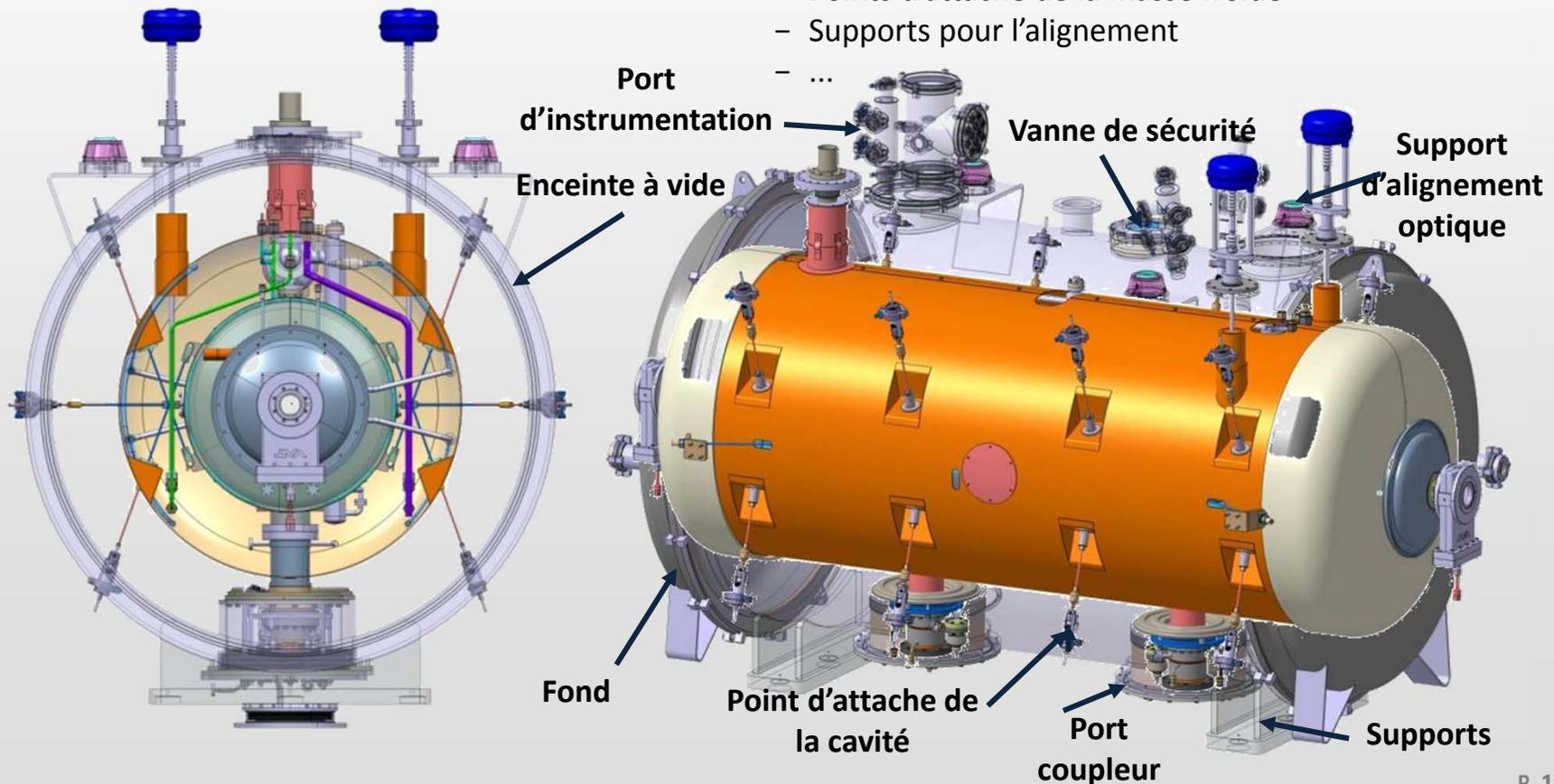
## ENCEINTE A VIDE

**Enceinte métallique dans laquelle règne le vide d'isolation pour minimiser les transferts thermiques par convection**

Acier au carbone, acier inox, aluminium (Tenue en pression, propriété magnétique, cout ...)

- **Structure étanche** : garantir  $10^{-7}$  bar à l'intérieur de l'enceinte
- **Structure rigide** : Aucun risque de flambage
- Elle doit être munie :
  - Supports pour la fixation au sol
  - Ports pour le coupleur, la distribution cryogénique, l'instrumentation ...
  - Points d'attache de la masse froide
  - Supports pour l'alignement
  - ...

COMPOSANTS PRINCIPAUX

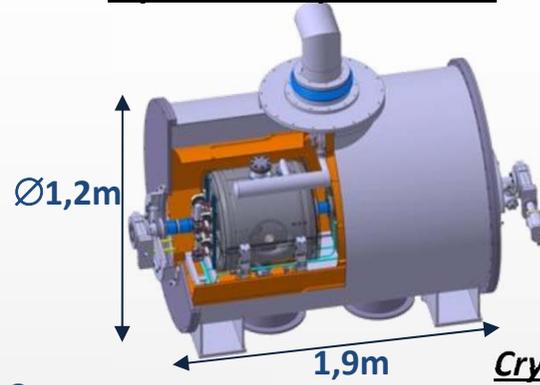


*Exemples d'enceinte à vide développées à l'IPNO :*

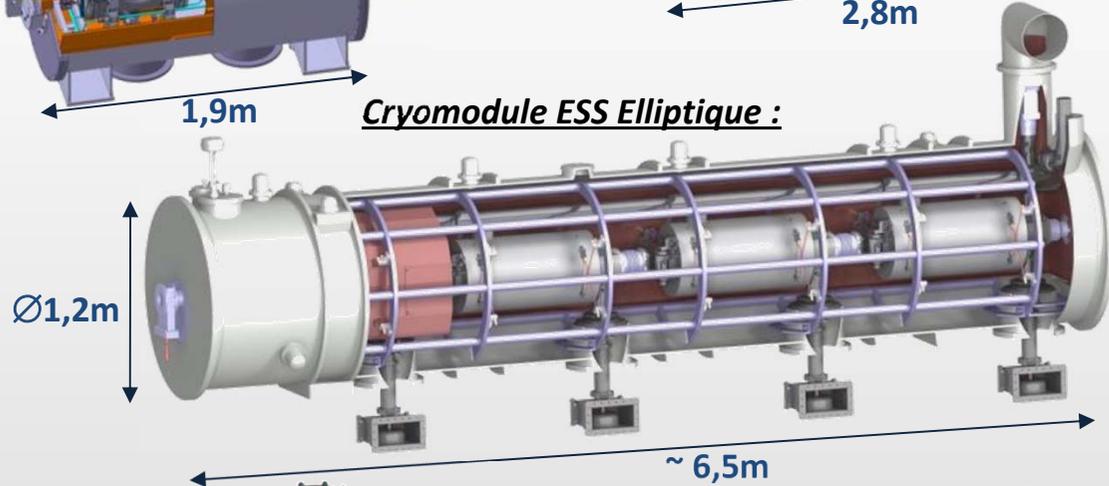
Cryomodule B SPIRAL2 :



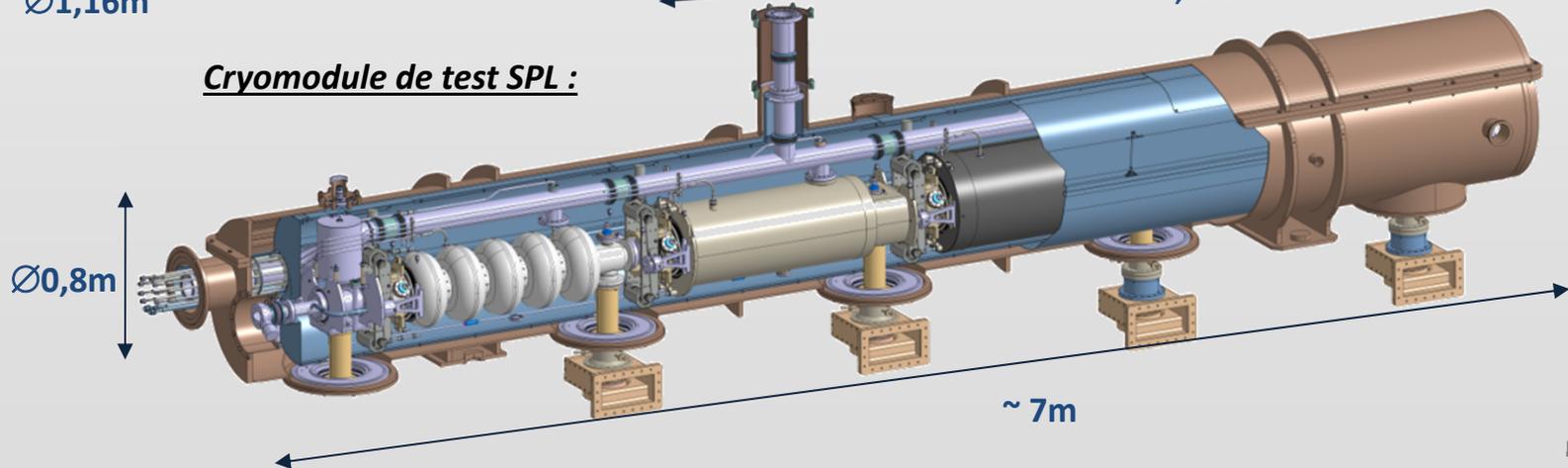
Cryomodule Spoke MAX :



Cryomodule ESS Elliptique :



Cryomodule de test SPL :



COMPOSANTS PRINCIPAUX

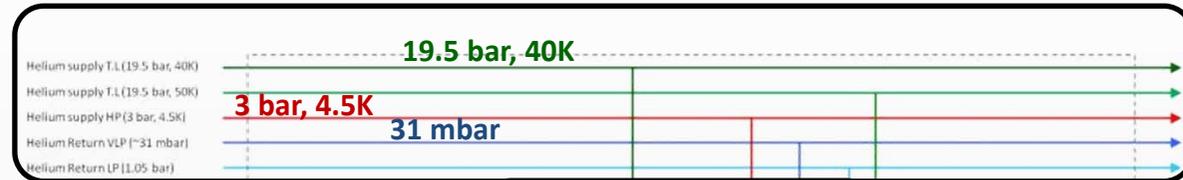
- INTRODUCTION
- FONCTIONS D'UN CRYOMODULE
- COMPOSANTS PRINCIPAUX
- SCHEMA CRYOGÉNIQUE D'UN CRYOMODULE
- ASPECTS THERMIQUES
- ASPECTS MECANIQUES
- ASPECT MAGNETIQUES
- DIFFÉRENTS CONCEPTS DE SUPPORTAGE
- PROCESS D'ASSEMBLAGE
- CONCLUSION



## Exemple de P&ID pour le cryomodule ESS :

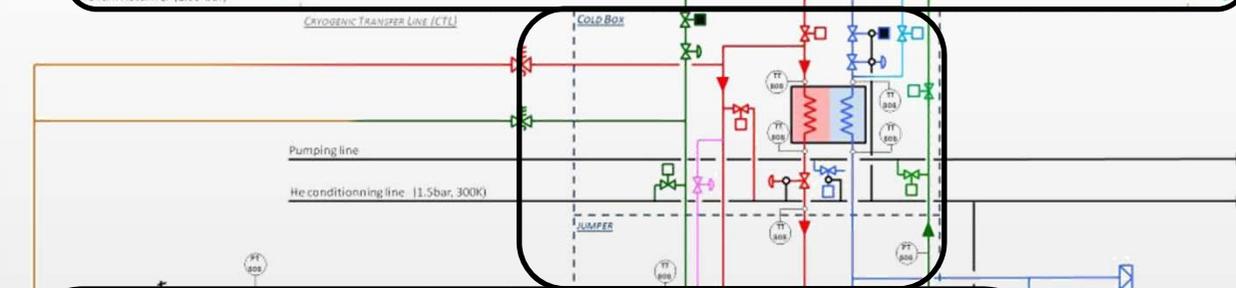
### Cryogenic Transfer Line (CTL)

Circuit d'alimentation et de retour d'hélium



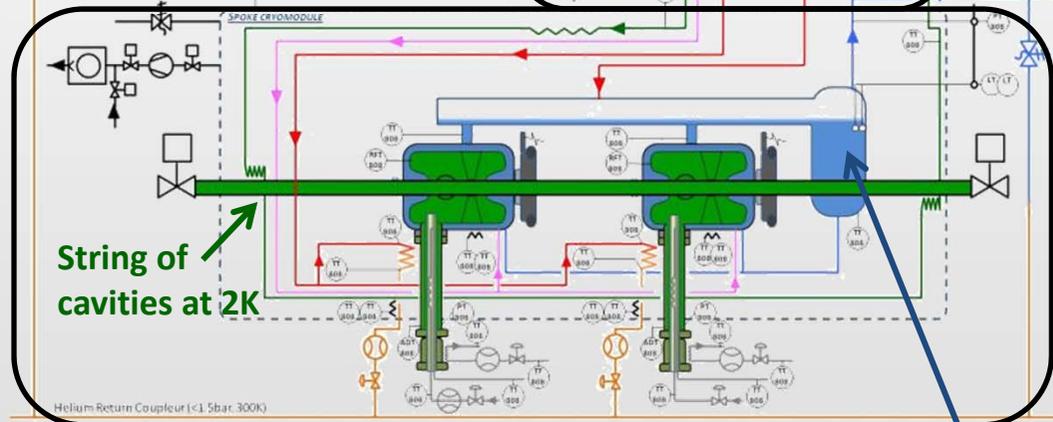
### Boîte à vannes

Distribution cryo (vannes) & échangeur de chaleur



### Cryomodule

- Lignes de mise en froid
- Lignes de remplissage
- Lignes de retour de gaz Helium
- Lignes de retour de gaz Helium



Legend:	
	Two position valve
	Two position 3 ways valve
	Burst disk
	Control valve
	Pressure safety valve
	Flow direction
These values must be confirmed: they depend on the leakiness of the control valves seat mounted in series with them.	
	Secondary vacuum pump
	Primary vacuum pump
	Electrical heater
	One flow heat exchanger
	TT 305 Sensor transmitter
	TT 306 Accurate measurement needed / Fluid measure / Use of death
	ADT 305 Arc detector
	Flow meter

- Eléments de sécurité (disque de rupture, vannes de sécurité pressure),
- Vannes de contrôle
- Circuit de vide
- Diagnostics de fonctionnement, capteurs

**Bain d'hélium II saturé à 2K dans le tube séparateur de phases**

## SOMMAIRE

---

- INTRODUCTION
- FONCTIONS D'UN CRYOMODULE
- COMPOSANTS PRINCIPAUX
- SCHEMA CRYOGÉNIQUE D'UN CRYOMODULE
- ASPECTS THERMIQUES**
- ASPECTS MECANIQUES
- ASPECT MAGNETIQUES
- DIFFÉRENTS CONCEPTS DE SUPPORTAGE
- PROCESS D'ASSEMBLAGE
- CONCLUSION

➤ **Transfert par conduction :**

- Toute pénétration partant de la température ambiante (coupleur de puissance, instrumentation...)
- Supports mécaniques

➤ **Transfert par rayonnement :**

- Le plus important (varie in  $T^4$ )

➤ **Transfert par convection :**

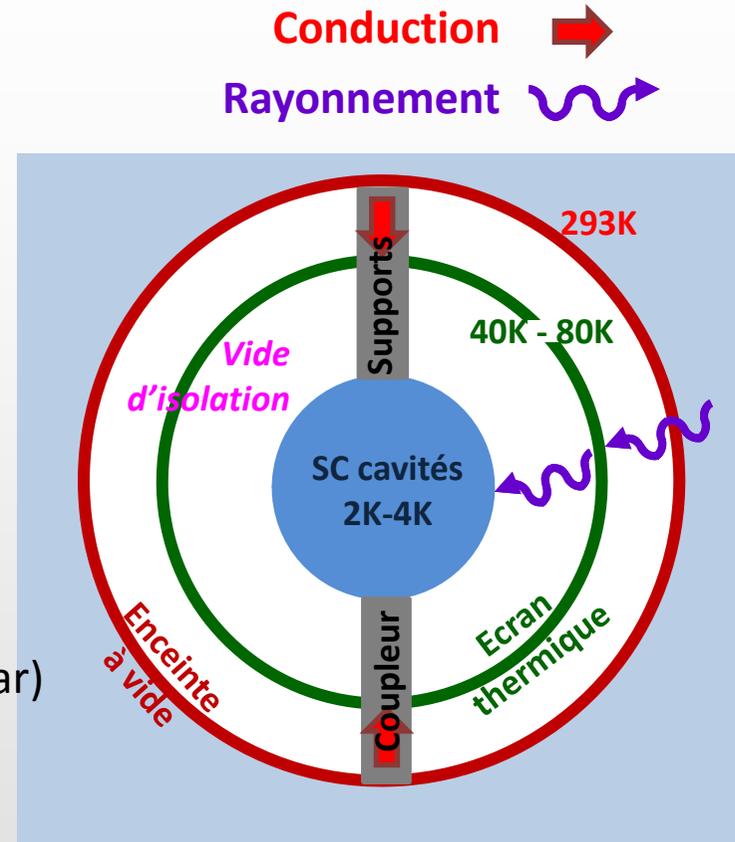
- Négligeable si niveau de vide d'isolation suffisant à l'intérieur de l'enceinte ( $< 10^{-3}$ mbar)

Identifier les dissipations thermiques :

- ➔ Impact sur le choix des matériaux et les formes géométriques
- ➔ Bilan des pertes de charge statique ( $\Leftrightarrow$  consommation de fluides cryogéniques).

*Pertes de charges dynamiques (fonctionnement de la cavité et du coupleur):*

- Fonctionnement pulsé:  $P_{stat.} \gg P_{dynam}$  ➔ atteindre une bonne isolation thermique
- Fonctionnement continu (CW):  $P_{dynam} \gg P_{stat.}$  ➔ résoudre les problèmes d'échauffement



**Transfert de chaleur par conduction → Tous les supports mécaniques**

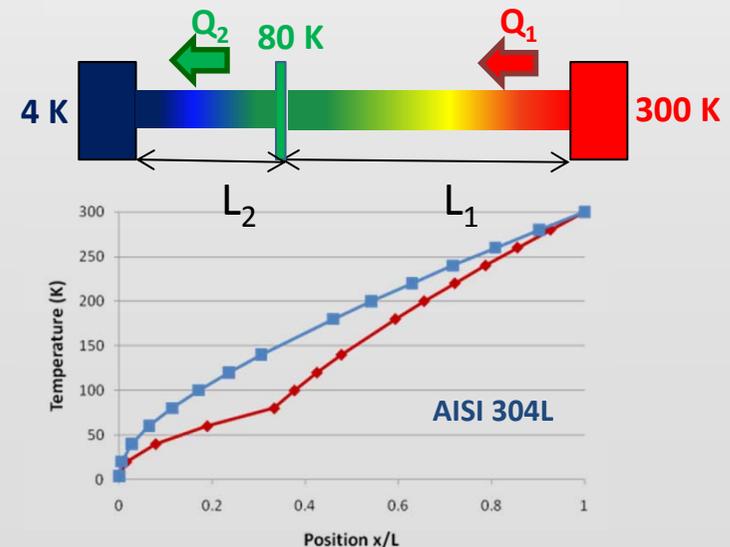
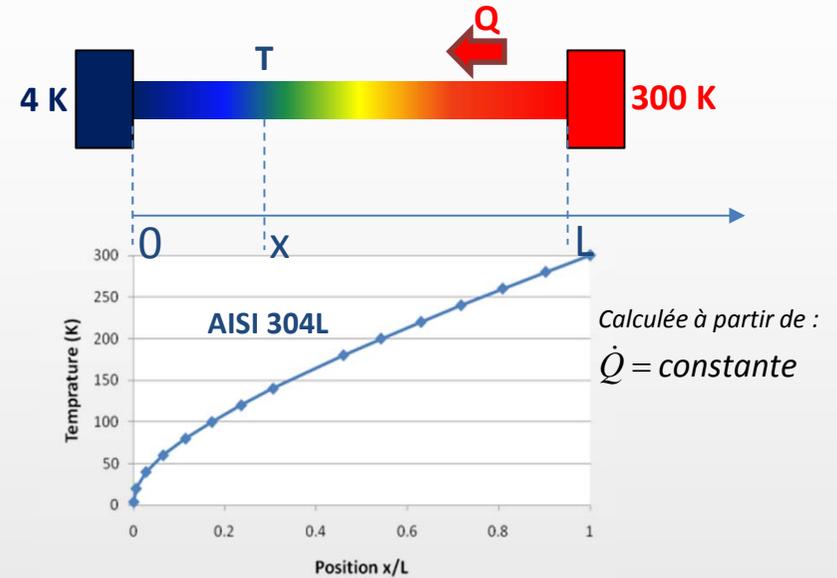
Le flux conductif (W) est donné par la loi de Fourier :

$$\dot{Q} = -\frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T).dT$$

- A : section (m<sup>2</sup>)
- L : longueur (m)
- $\lambda(T)$  : conductivité thermique (W/mK<sup>-1</sup>)

Pour limiter le flux Q tout en garantissant la tenue mécanique :

- Géométrie : ↘A, ↗L
- Matériau ayant une faible conductivité  $\lambda(T)$
- Thermalisation à des températures intermédiaires



## Exemple : Tirants entre le tank hélium et l'enceinte à vide

Matériau: AISI 304L  
 Diamètre D: 8mm  
 Longueur L: 665mm

➤ Sans thermalisation :

$$\dot{Q} = -\frac{A}{L} \int_{300}^4 \lambda(T).dT = \underline{0.23W} \text{ par tirant}$$

➤ Avec une thermalisation à T=80K:

$$\dot{Q}_{80} = -\frac{A}{(L-x)} \int_{300}^{80} \lambda(T).dT \quad \dot{Q}_4 = -\frac{A}{x} \int_{80}^4 \lambda(T).dT$$

La position optimale x est obtenue en minimisant la puissance nécessaire pour évacuer les flux interceptés à 4K et 80K vers l'ambiante en tenant compte du rendement de Carnot

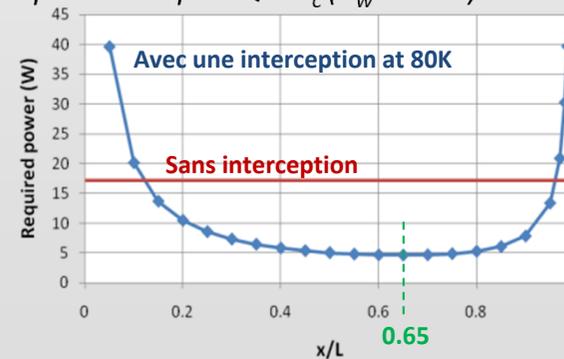
Cycle idéal Carnot :  $\eta = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}} = \frac{T_c}{T_w - T_c}$

Avec  $\dot{W}$ : Travail nécessaire que doit fournir l'usine cryo pour dissiper Q à  $T_c$  ( $T_w=300K$ )

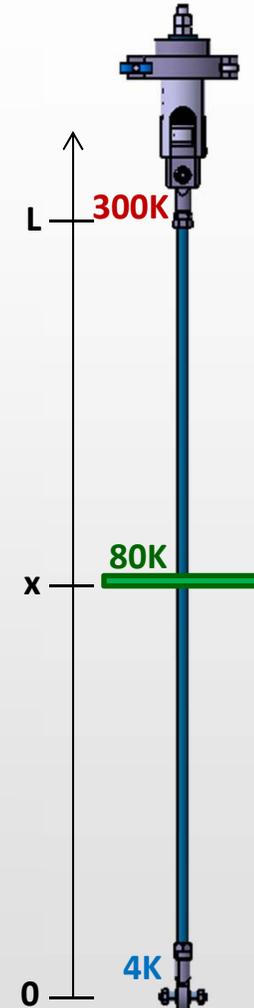
$$\Rightarrow \dot{W} = \dot{W}_{80} + \dot{W}_4 = \frac{220}{80} \times \dot{Q}_{80} + \frac{296}{4} \times \dot{Q}_4$$

$$\Rightarrow \dot{W} \left( \frac{x}{L} \right) = \frac{a_1}{1 - \frac{x}{L}} + \frac{a_2}{\frac{x}{L}} \rightarrow \text{Optimum: } x/L = 0.65$$

$$\dot{Q}_{80} = \underline{0.59W} \quad \dot{Q}_4 = \underline{0.04W}$$

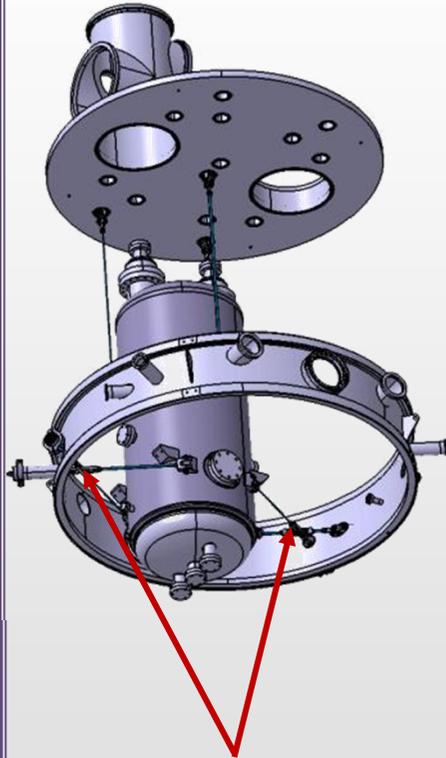


$\dot{W}=17.2W$  contre  $\dot{W}=4.8W$

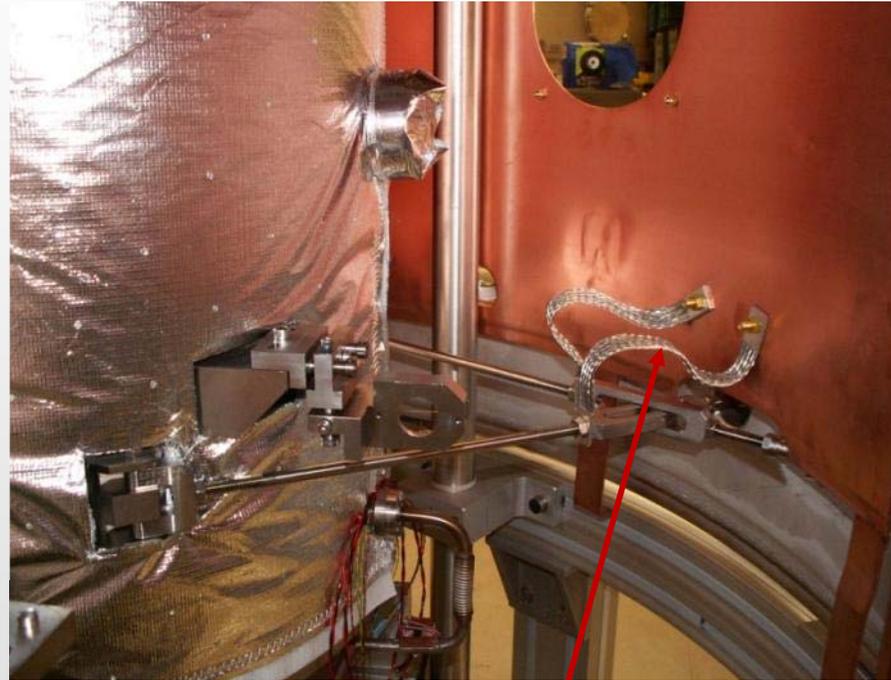


## Exemple: Tirants du CRYOMODULE B SPIRAL2

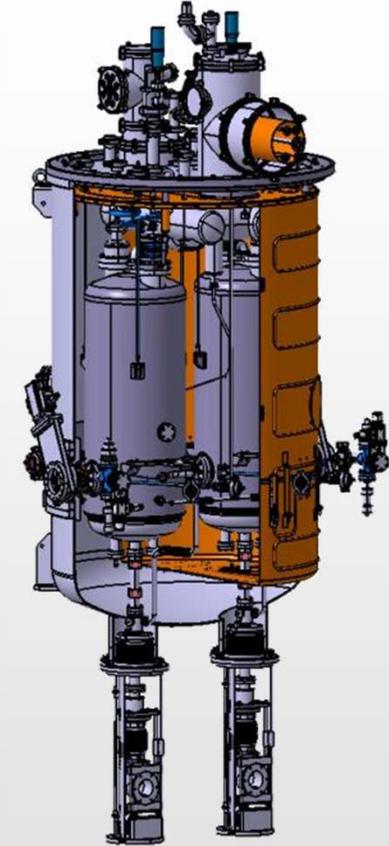
ASPECTS THERMIQUES



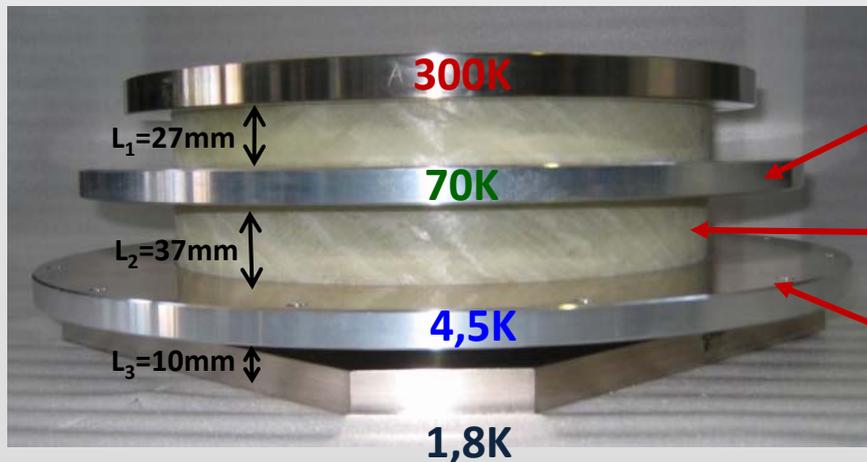
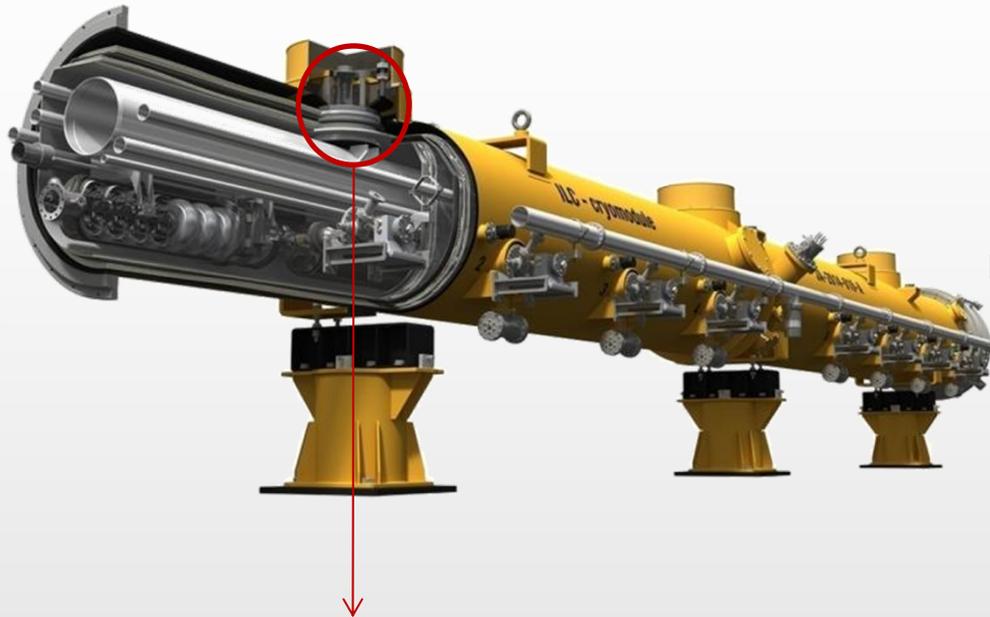
Tirants latéraux entre la cavité et l'enceinte à vide, thermalisés à 80K



Tresses en cuivre entre les tirants et l'écran thermique



**Exemple: Supports de maintien des cryomodules type TTF (XFEL, ILC)**



**Flux thermiques :**

$$\dot{Q} = -\frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T).dT$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_{70} = 9.6W \\ \dot{Q}_{4.5} = 0.84W \\ \dot{Q}_{1.8} = 0.04W \end{array} \right.$$

**Estimation de la charge du réfrigérateur :  
Efficacité de Carnot**

$$\dot{W} = \dot{W}_{70} + \dot{W}_{4.5} + \dot{W}_{1.8} = 93.3W$$

**Sans thermalisation :**

$$\dot{Q} = 2.79W \rightarrow \dot{W} = 462.2W$$

Disque aluminium connecté à l'écran thermique à 70K

Tube G-11 épaisseur 2.2mm, Øext=300mm

Disque aluminium connecté à l'écran thermique à 4,5K

**Transfert par rayonnement → Toutes les surfaces des composants**

Le flux radiatif (W) est donné par la loi de Stefan-Boltzmann :

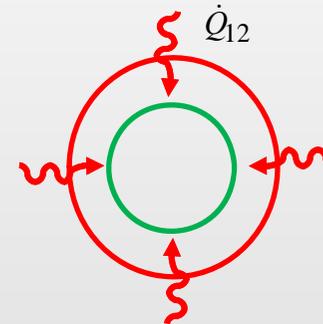
$$\dot{Q}_{12} = \sigma \cdot F_{12} \cdot S_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$\sigma$  : Stefan Boltzmann constant (=5.67x10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>K<sup>-4</sup>)  
 $S_1$  : Surface area (m<sup>2</sup>)  
 $F_{12}$  : View factor (depends on geometry and emissivity)

Où  $\dot{Q}_{12}$  est la puissance thermique de la surface 1 vers la surface 2.

Cylindres infinis coaxiaux :  
(modèle simplifié d'un écran thermique avec l'enceinte à vide)

$$F_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$



**Pour limiter  $\dot{Q}_{12}$  :**

- **Matériau avec faible émissivité  $\varepsilon$  (surfaces brillantes ...)**
- **Ecran thermique refroidi activement à T° intermédiaire**
- **Ecran thermique passif MLI (MultiLayer superInsulation)**

**Exemple : Flux radiatifs sans et avec écran thermique**

**Enceinte à vide en acier inox :**

Diamètre = 0.8 m

$\varepsilon = 0.2$

$T^\circ = 293K$

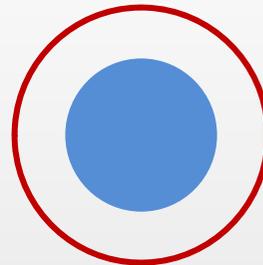
**Masse froide (train de cavités) :**

Diamètre = 0.5 m

$\varepsilon = 0.1$

$T^\circ = 2K$

➤ **Sans écran :**



*Pour 1m de longueur :*

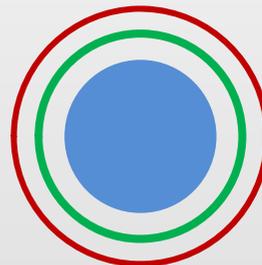
➔  $\dot{Q}_{\text{massefroide}} \cong 53W$

➤ **Avec un écran en aluminium:**

Diamètre = 0.7 m

$\varepsilon = 0.1$

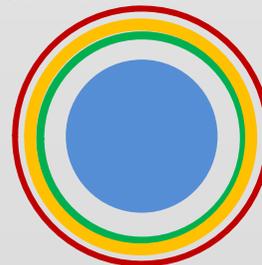
$T^\circ = 75K$



➔  $\dot{Q}_{\text{écran-therm}} \cong 68W$   
➔  $\dot{Q}_{\text{massefroide}} \cong 0.2W$

➤ **Couches de MLI sur l'écran aluminium :**

30 couches MLI de 293K: 1.5W/m<sup>2</sup>



➔  $\dot{Q}_{\text{écran-therm}} \cong 3.3W$   
➔  $\dot{Q}_{\text{massefroide}} \cong 0.2W$

## Exemple : Ecrans thermiques du Cryomodule B – SPIRAL2

MLI placée sur l'écran magnétique de chaque cavité, circuits et soufflets



MLI placée sur l'écran thermique



Ecran thermique actif  
en cuivre



A partir du bilan des charges thermiques → consommation en fluides cryogéniques  
(dimensionnement de l'usine cryo)

Exemple : Bilan des charges thermiques d'un cryomodule

Charges statiques à 4K :

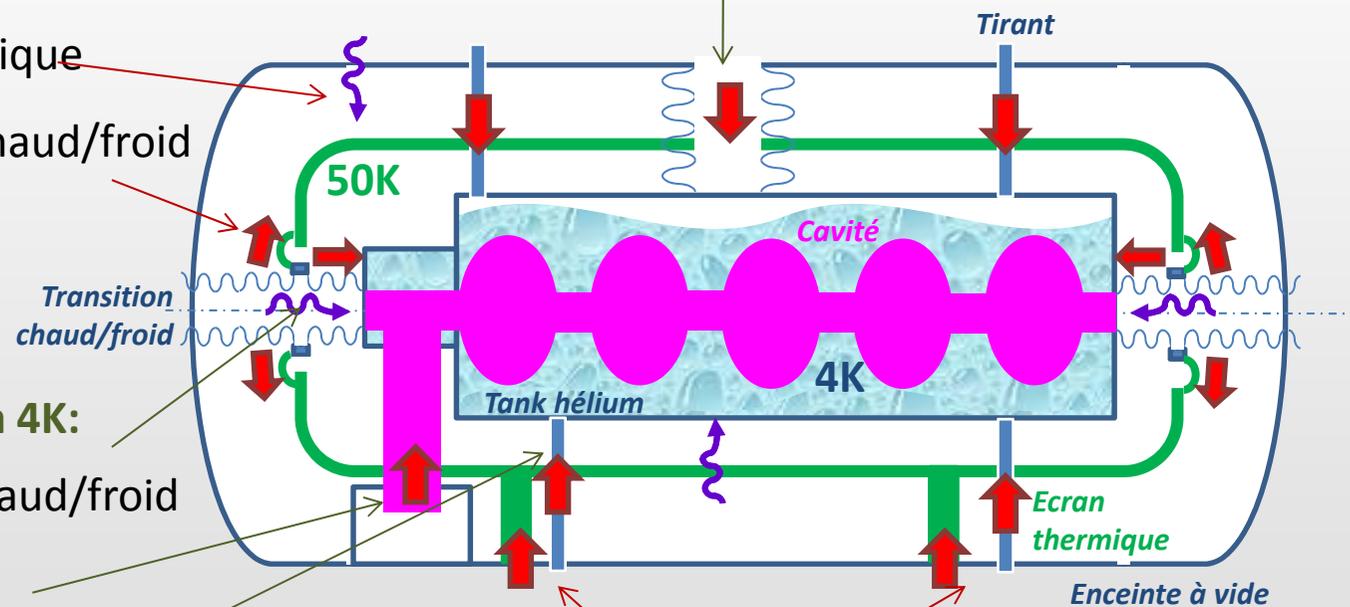
Charges statiques à 50K :

- Ecran thermique
- Transition chaud/froid

- Port hélium

Charges statiques à 4K:

- Transition chaud/froid
- Coupleur
- Supports



Charges statiques à 50K :

- Supports

## Cryomodule B – SPIRAL2

Composants	Charges statiques à 80K [W]	Charges statiques à 4K [W]
Ecran thermique	46.7	0.42
Système de supports (tirants)	3.93	2.55
Transitions chaud/froid	1.67	1.54
2 coupleurs	10	1.5
Système d'accord à froid	1.07	0.16
Instrumentation	0.3	2.30
Total	64	8.5

## Cryomodule Type TTF

	Charges statiques à 40/80K [W]	Charges statiques à 4K [W]	Charges statiques à 2K [W]
Total	70	13	3.5

## Cryomodule ESS Spoke (en cours d'études)

Composants	Charges statiques à 50K [W]	Charges statiques à 2K [W]
Ecran thermique	10	0.4
Système de supports (tirants)	4	0.2
Transitions chaud/froid	6	0.4
Equipement de sécurité	4.1	0.25
2 coupleurs	-	2.
Vannes de controle	3	1.5
Instrumentation	8	0.2
Total	35	5.

## Cryomodule MAX Spoke (en cours d'études)

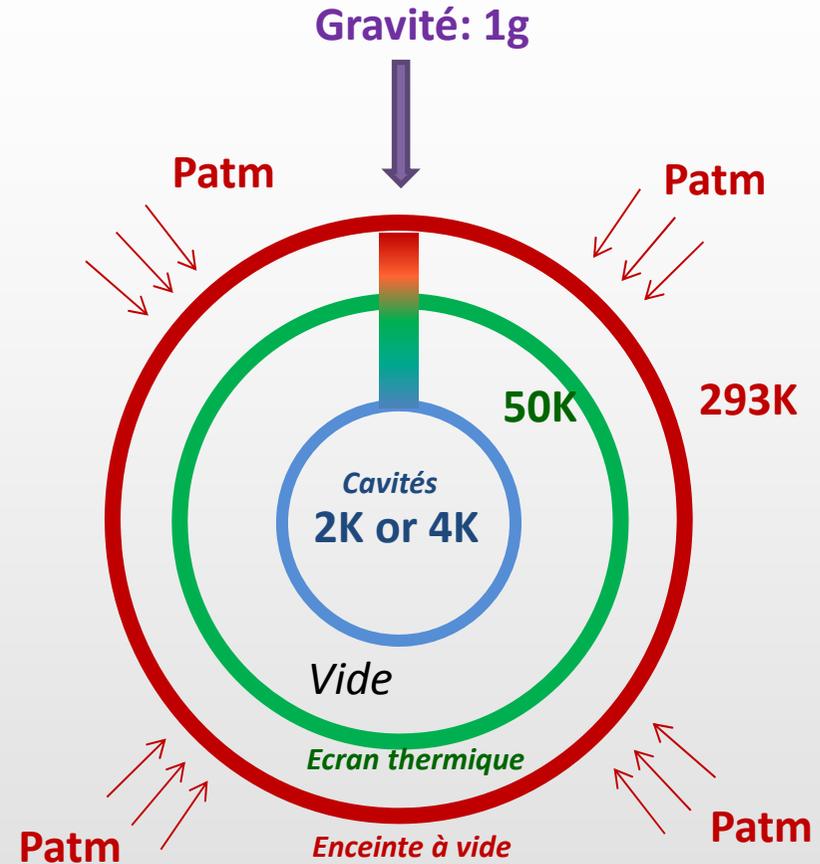
Composants	Charges statiques à 70K [W]	Charges statiques à 10K [W]	Charges statiques à 2K [W]
Ecran thermique	<30	-	0.2
Space frame	16	1	<0.1
Transitions chaud/froid	4.34	-	0.2
Equipement de sécurité	<2.	-	0.1
2 coupleurs	<35	<7	<2.1
Instrumentation	<5		0.5
Total	<92	<8	<3.2

## SOMMAIRE

---

- INTRODUCTION
- FONCTIONS D'UN CRYOMODULE
- COMPOSANTS PRINCIPAUX
- SCHEMA CRYOGÉNIQUE D'UN CRYOMODULE
- ASPECTS THERMIQUES
- ASPECTS MECANIQUES**
- ASPECT MAGNETIQUES
- DIFFÉRENTS CONCEPTS DE SUPPORTAGE
- PROCESS D'ASSEMBLAGE
- CONCLUSION

- ❑ **Champ de température**
  - Contractions thermiques
  - Contraintes thermiques
- ❑ **Vide d'isolation**
  - Pression externe
- ❑ **Gravité**
  - Poids des composants



➔ **Impact sur l'alignement et la stabilité des composants**

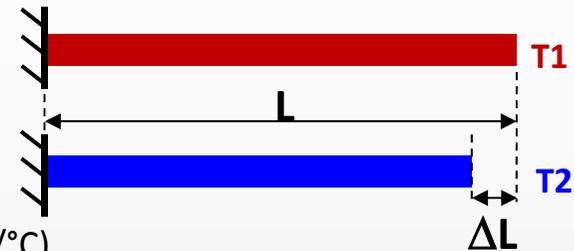
**Comment estimer les contractions et contraintes thermiques?**

**Contractions thermiques :**

➤ **Un tirant :**

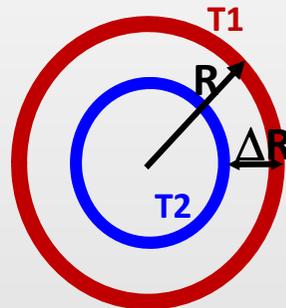
$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T$

$\alpha$  : Coefficient de dilatation thermique (1/K or 1/°C)  
 $L$  : Longueur caractéristique (m)  
 $\Delta T$  : Différence entre températures finale et initiale (K or °C)



➤ **Un tube :**

$\Delta R = \alpha \cdot R \cdot \Delta T$



**Contraintes thermiques :**

Si une force F est appliquée pour rallonger à la longueur initiale:

D'après la loi de Hooke :

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \frac{\Delta L}{L} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

## Limiter les contraintes thermiques $\sigma$ selon le type de connexion

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \frac{\Delta L}{L} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

- **Matériau avec un faible coefficient de dilatation thermique :** ↘  $\alpha$

Ex : Résines, composites, TiA6V

- **Matériau avec un faible module d'Young :** ↘  $E$

Ex : Résines, composites

- **Géométrie :** ↗ Flexibilité

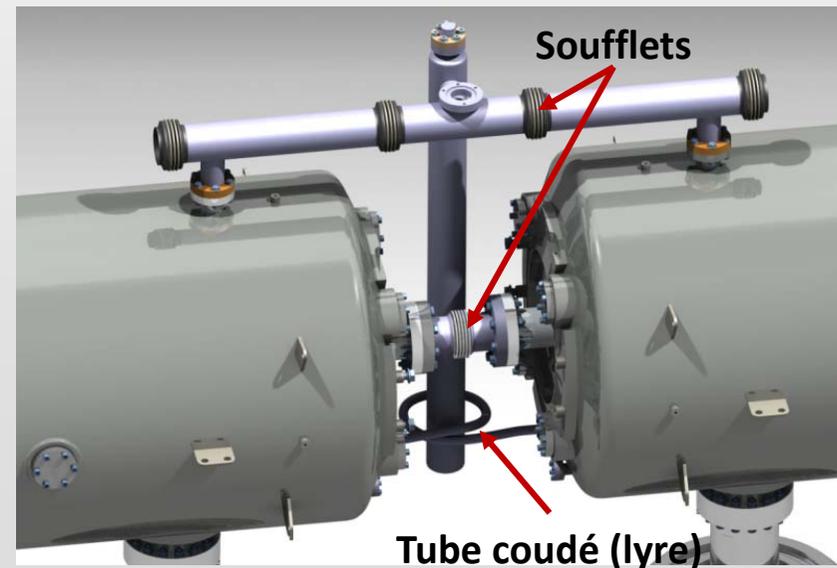
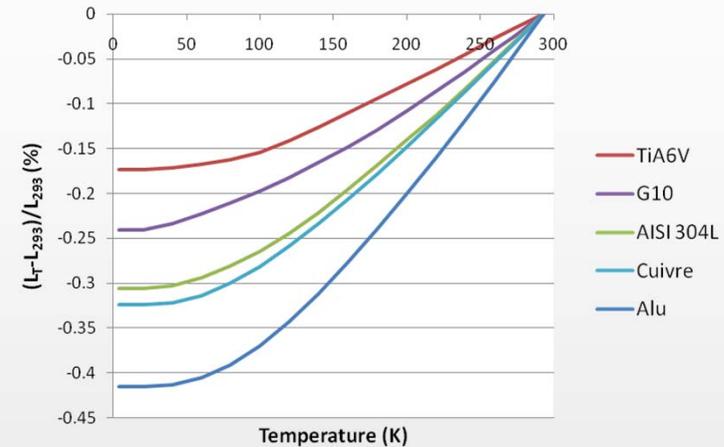
Ex : soufflet compensateur, tube coudé...

- **Conditions limites :** Relâcher des degrés de liberté

Ex : liaison rotule, liaison glissière

- **Matériau à haute limite élastique  $Re$  ou haute limite à la rupture  $Rm$**

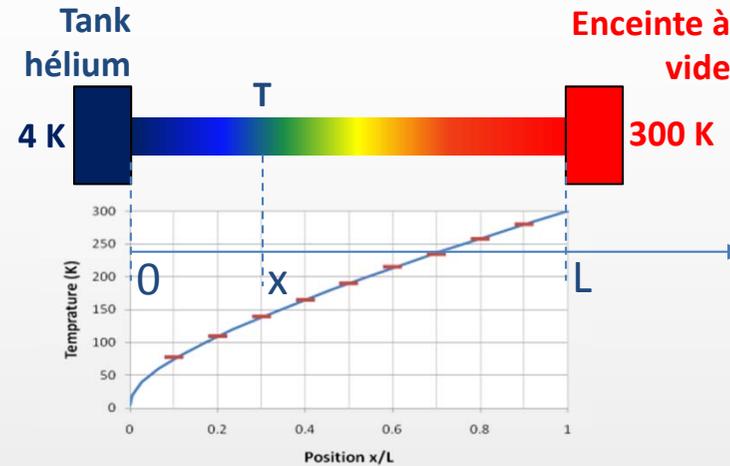
## Dilatations thermiques des différents matériaux $\Delta L/L$ :



## Exemple : Tirant entre le tank hélium et l'enceinte à vide

### 1. Profil de température dans le tirant :

$$\dot{Q} = -\frac{A}{x} \int_{T_1}^T \lambda(T) \cdot dT = -\frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) \cdot dT = Cst$$



### 2. Contraction du tirant :

Découpe du tirant en plusieurs sections, chacune définie par une température

moyenne :

$$\Delta L = \sum \Delta L_i = \sum (L_i^{293} - L_i^T)$$

Pour L=400mm:    AISI 304L:     $\Delta L = 0.67 \text{ mm}$   
                           G10:                 $\Delta L = 0.47 \text{ mm}$   
                           TIA6V:              $\Delta L = 0.36 \text{ mm}$

### 3. Contraction du tank hélium :

$$\Delta R = \alpha \cdot R \cdot \Delta T$$

Pour R=150mm:    AISI 304L:     $\Delta R = 0.38 \text{ mm}$   
                           Titane:          $\Delta R = 0.19 \text{ mm}$

### 4. Contrainte thermique dans le tirant :

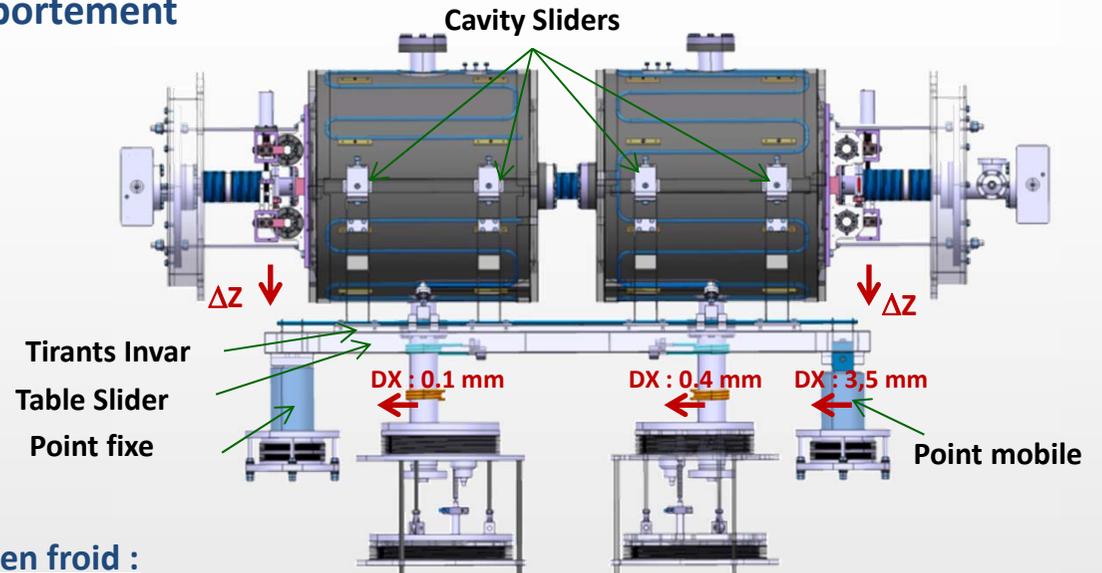
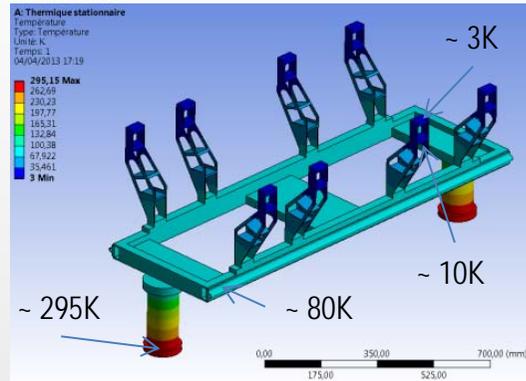
$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\Delta L + \Delta R}{L_{293}} \quad (\text{Tank hélium et enceinte à vide sont supposés infiniment rigide})$$

Pour un tank hélium en AISI 304L:  
 Tirant en AISI 304L :     $\sigma = 525 \text{ MPa}$   
 Tirant en TIA6V:         $\sigma = 200 \text{ MPa}$

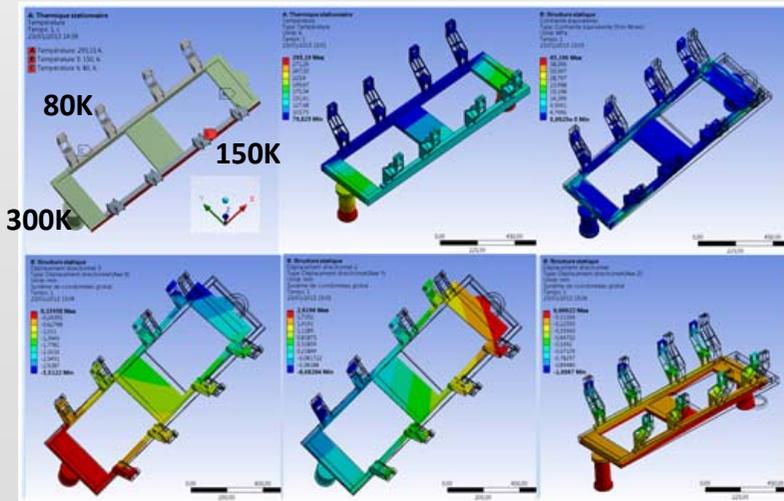
## Exemple : Supports du cryomodule MAX

Forme complexe → Analyse FEM (comportement durant la mise en froid)

### 1. Déplacements à 2K – Etat stationnaire :



### 2. Gradients de température durant la mise en froid :



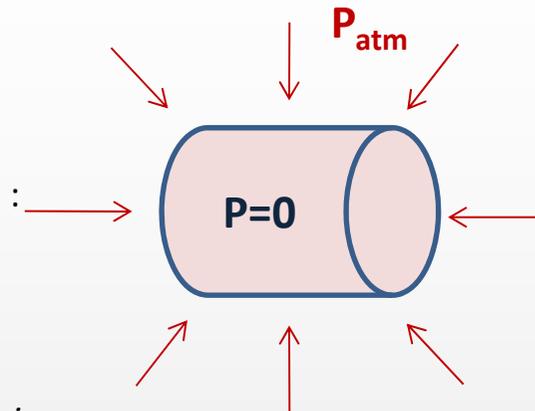
Température non uniforme de la table durant la mise en froid due à la variation de température du fluide cryo de l'entrée à la sortie du tube de refroidissement.

	$\Delta T_{max}$	$\delta X$	$\delta Y$	$\delta Z$	$\sigma_{v.M.}$
<b>Etat transitoire</b>	70 K (150-80)	3,4 mm	2,7 mm	1 mm	43 MPa
<b>Etat stationnaire</b>	0 (80-80)	3,4 mm	1,6 mm	1 mm	50 MPa

La pression externe génère sur les parois de l'enceinte à vide :

- Des déformations → Risque de désalignement
- Des contraintes de compression → Risque de flambage

Chaque pays applique sa norme de construction pour les appareils à pression :  
Exigences de design, de matériaux, de fabrication, de tests de contrôle.  
Ex : CODAP (France), Norme européenne EN 13445, ASME (Etats Unis).



Dans le CODAP :

- Classification des appareils à pression en fonction de leur volume, de la pression maximum admissible et de la nature du fluide.
- Une enceinte à vide ne rentre pas dans une catégorie à risque mais le design et la fabrication suivent les règles.

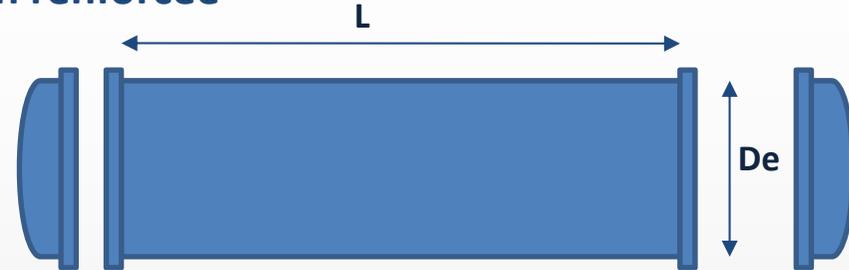
Ces exigences sont applicables pour le design de : l'enceinte à vide, des brides et des soufflets.

**Déterminer la pression critique de flambage :**

- Pour des formes simples :
  - Utilisation de normes (CODAP, Norme européenne) avec un coefficient de sécurité (prise en compte des défauts fabrication : géométrie, matériaux)
  - Formules analytiques (Roark) sans coefficient de sécurité
- Pour des formes plus complexes :
  - Analyse par éléments finis

### Exemple : Enceinte à vide cylindrique non renforcée

Matériau : Acier P235GH NF EN 10028-2  
 Diamètre externe  $D_e$ : 800mm  
 Longueur  $L$ : 6500mm  
 Epaisseur : 10mm



#### ➤ CODAP: Calcul de la pression maximale admissible

$$P_a = \frac{4}{3} \frac{B}{D_e/e} \cdot K \quad \begin{array}{l} K=1 \quad : \text{pour fonctionnement normal} \\ K=1.35 \quad : \text{pour fonctionnement exceptionnel} \end{array}$$

- A partir d'un abaque, déterminer le coefficient  $A = f\left(\frac{L}{D_e}, \frac{D_e}{e}\right) \rightarrow A = 0.0002$

- A partir d'un abaque, déterminer le coefficient  $B = f(A, \text{matériau}, T^\circ) \rightarrow B = 20 \text{ (MPa)}$

$$P_a = 0,33 \text{ MPa}$$

#### ➤ Formule de Roark : Calcul de la pression critique de flambage

$$P_{crit} = 0,807 \cdot \frac{E \cdot e^2}{L \cdot R} \cdot 4 \sqrt{\left(\frac{1}{1-\nu^2}\right) \cdot \frac{e^2}{R^2}} \quad (\text{Formule valable pour un tube court})$$

$$P_{crit} = 1,04 \text{ MPa}$$

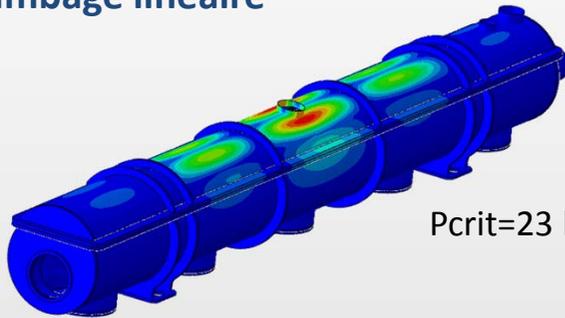
➔ Facteur de sécurité  $\sim 3$ :  $P_{crit} \text{ (Roark)} = 3,15 \times P_a \text{ (CODAP)}$

**Exemple : Cryomodule de test SPL**

Matériau : Acier type P235GH  
 Diamètre externe  $D_e$  : 800mm  
 Longueur L : 7000mm  
 Epaisseur : 10mm (bas) / 6mm (haut)

Forme complexe → Analyse FEM

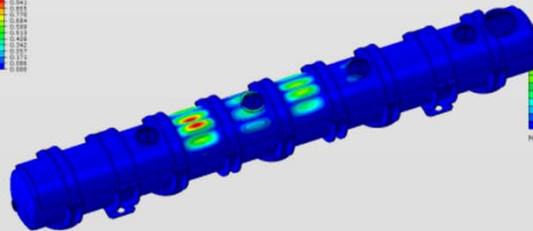
➤ Flambage linéaire



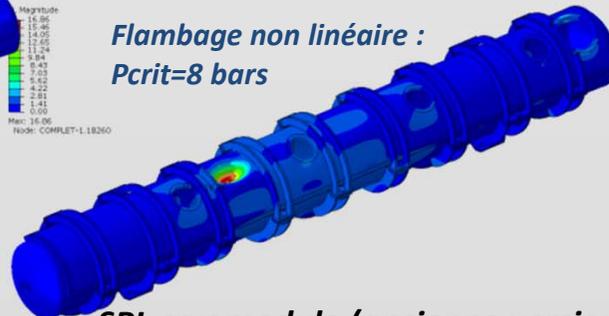
$P_{crit}=23$  bars (pas de coef. sécurité)

➤ Etude détaillée : Flambage non linéaire

- Matériau élasto-plastique
- Introduction d'un défaut géométrique

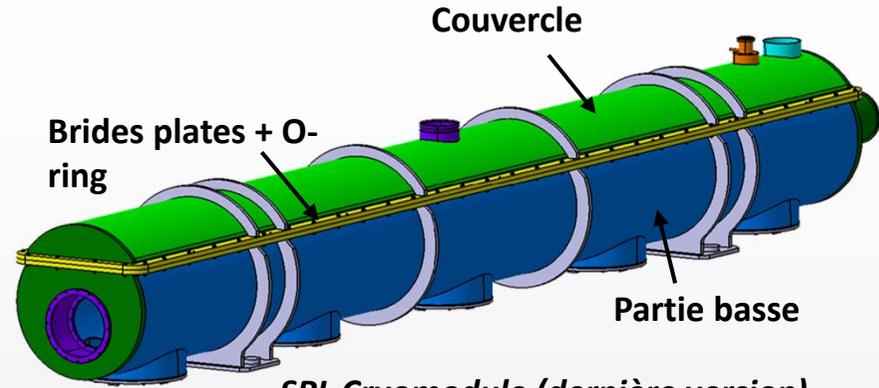


Flambage linéaire:  
 $P_{crit}=42$  bars

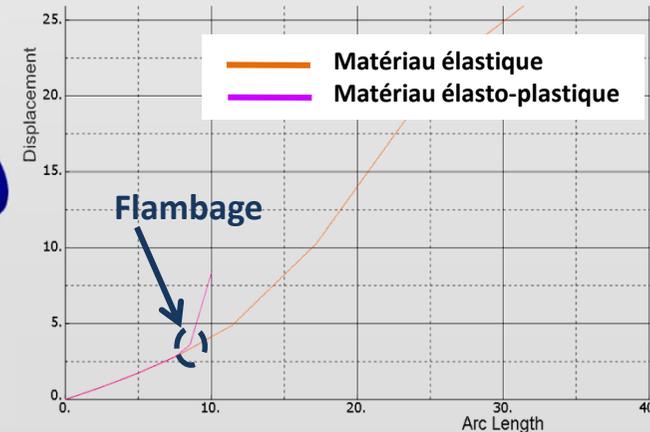


Flambage non linéaire :  
 $P_{crit}=8$  bars

SPL cryomodule (ancienne version)



SPL Cryomodule (dernière version)



## SOMMAIRE

---

- INTRODUCTION
- FONCTIONS D'UN CRYOMODULE
- COMPOSANTS PRINCIPAUX
- SCHEMA CRYOGÉNIQUE D'UN CRYOMODULE
- ASPECTS THERMIQUES
- ASPECTS MECANIQUES
- ASPECT MAGNETIQUES
- DIFFÉRENTS CONCEPTS DE SUPPORTAGE
- PROCESS D'ASSEMBLAGE
- CONCLUSION

### Limiter l'effet du champ magnétique sur les dissipations thermiques

**Rappel** : Le champ magnétique terrestre augmente la résistance résiduelle du niobium se traduisant par une augmentation des dissipations thermiques (pertes RF).

$$P_{RF} = \frac{1}{2} \iint R_S \cdot H_S^2 \cdot dS$$

Avec  $R_S$  : résistance de surface du matériau  
 $H_S$  : champ magnétique à la surface du matériau

*Lors de la mise en froid des cavités, les lignes de champ magnétique sont piégés dans le niobium.*

**Objectif** : Atténuer le plus possible le champ magnétique B (typiquement  $B_{\max}$  entre 10 et 20 mG).

Remarque : Selon la localisation sur la terre, le champ magnétique terrestre varie de  $30\mu\text{T}$  [300mG] à  $60\mu\text{T}$  [600 mG]

**Exemple : Ecran magnétique de la cavité spoke ESS**

➤ Calcul du facteur d'écrantage  $S (=B_{ext}/B_{int})$

➔ Epaisseur de l'écran pour atteindre  $B_{int} < 10 \text{ mG}$

Cas d'un écran cylindrique horizontal soumis :

A un champ vertical :

$$S_{\perp} \cong \frac{\mu d}{D} + 1$$

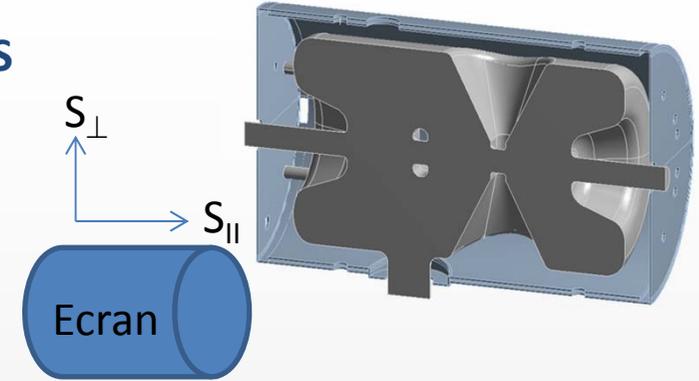
A un champ horizontal :

$$S_{\parallel} \cong 4NS_{\perp} \text{ où } N \approx \frac{D^2}{2L^2}$$

$\mu$  : perméabilité de l'écran (15000 mini)  
 $d$  : épaisseur de l'écran (2x1mm)  
 $D$  : diamètre de l'écran (570mm)  
 $L$  : longueur de l'écran

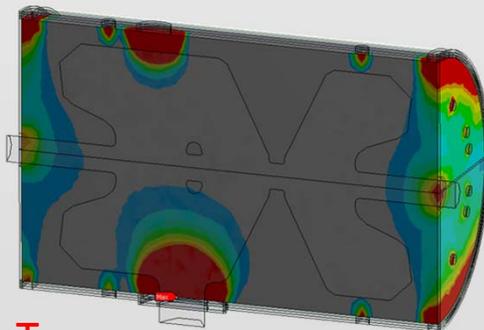
**Application numérique :**

$S_{\perp} \cong 53$  pour un champ vertical  $B_{ext} = 50 \mu\text{T}$ ,  $B_{int} = 0.93\mu\text{T}$  (9.3mG) < 10 mG



➤ Impact des ouvertures ➔ Analyse FEM

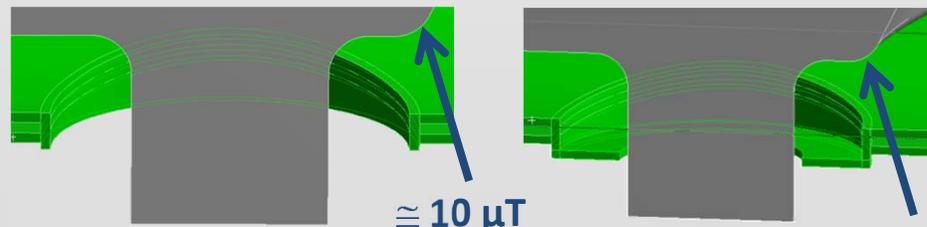
C:\Copia de Magnetostatic\_vent  
 Densité totale de flux magnétique z  
 Type: Densité totale de flux magnétique  
 Unité: mT  
 Temps: 1  
 02/04/2014 16:49  
 0.0017072 Max  
 0.002  
 0.0010571  
 0.0017143  
 0.0010274  
 0.0014206  
 0.0010107  
 0.001429  
 0.001  
 0.0001235 Min



>2 μT  
<1 μT

Calcul magnétostatique (ANSYS)

Ajustement des ouvertures pour limiter la pénétration du champ B :



$\cong 10 \mu\text{T}$

$\cong 2.6 \mu\text{T}$

## SOMMAIRE

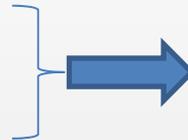
---

- INTRODUCTION
- FONCTIONS D'UN CRYOMODULE
- COMPOSANTS PRINCIPAUX
- SCHEMA CRYOGÉNIQUE D'UN CRYOMODULE
- ASPECTS THERMIQUES
- ASPECTS MECANIQUES
- ASPECT MAGNETIQUES
- DIFFÉRENTS CONCEPTS DE SUPPORTAGE
- PROCESS D'ASSEMBLAGE
- CONCLUSION

### Supports des composants à l'intérieur de l'enceinte à vide (cavités, écrans ...)

Quel que soit le type de support, les fonctions exigées sont :

➤ Etre une **transition** de la température ambiante à la basse température



**Limiter les transferts de chaleur par conduction**



Structure fine et longue  
Matériau avec faible  
conductivité thermique

➤ **Supporter** les composants



**Avoir une rigidité suffisante**  
**Limiter les contractions et contraintes thermiques**



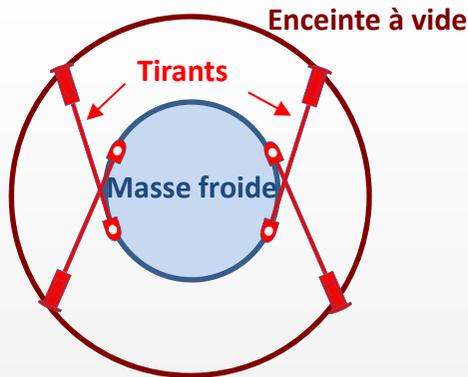
Structure épaisse et massive

➤ Assurer la **stabilité** et le bon **positionnement** de la masse froide

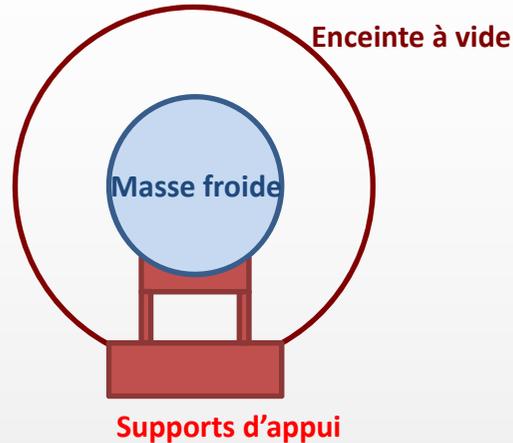


Le design mécanique des supports dépend de 2 contradictions techniques

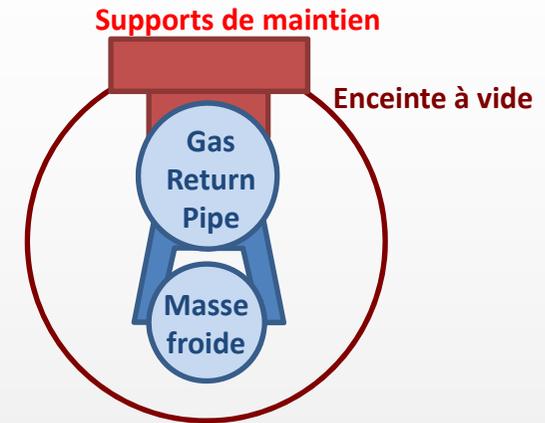
➤ **Tirants**



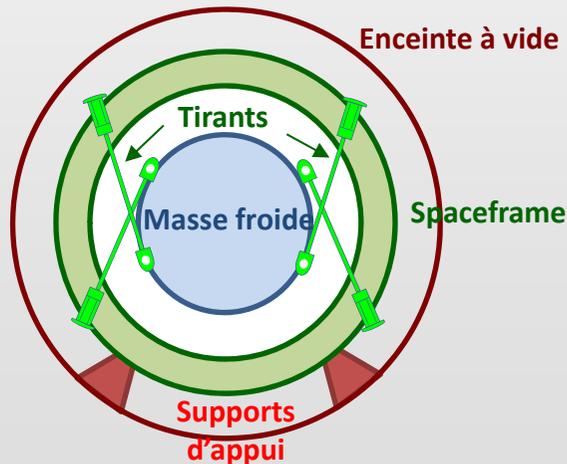
➤ **Supports d'appui**



➤ **GRP avec supports de maintien**



➤ **Cadre support "Space frame"**



➤ **Autres ...**

**Le choix dépend de :**

- Méthode d'assemblage
- Stratégie d'alignement (chaud/froid/intérieur/extérieur)
- Poids de la masse froide (LHC)
- Longueur du train de cavités
- Système de distribution cryogénique (grand GRP)
- Expérience des membres de l'équipe
- ...

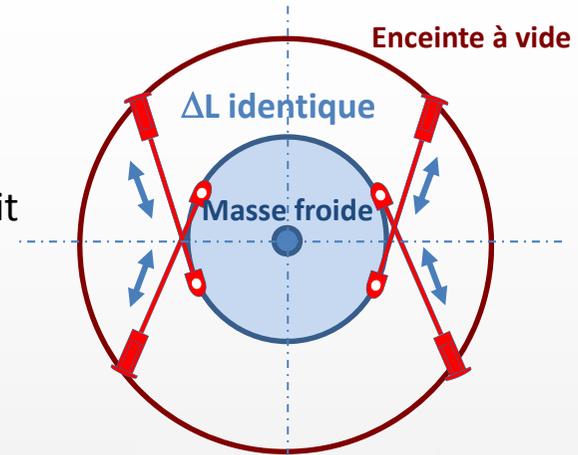
➔ Il n'y a pas de solution unique ...

➤ **Utilisation de tirants antagonistes**

- Préservation de l'alignement dans le plan formé par les tirants : Les tirants ont la même contraction thermique
- Limitation des contraintes thermiques : le tirant ne subit pas la contraction thermique de la masse froide
- Supports plus longs : Limiter la conduction

➤ **Joindre les tirants à l'enceinte à vide**

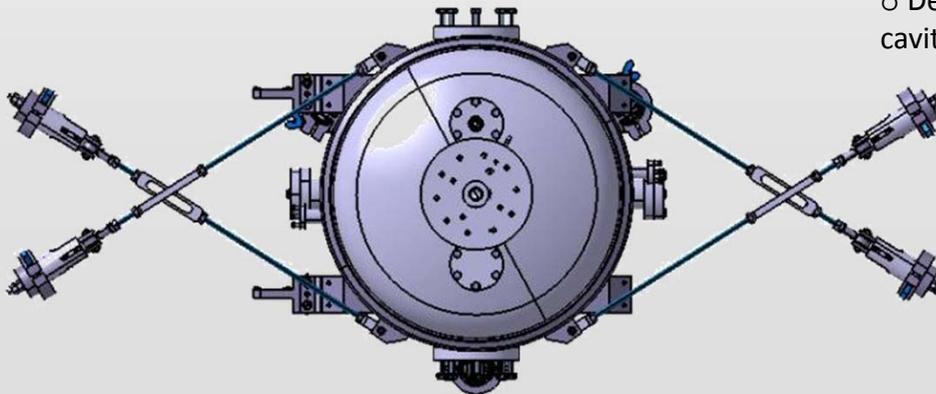
Possibilité d'ajuster l'alignement après mise en froid



**Exemple : Cryomodule B - SPIRAL2**

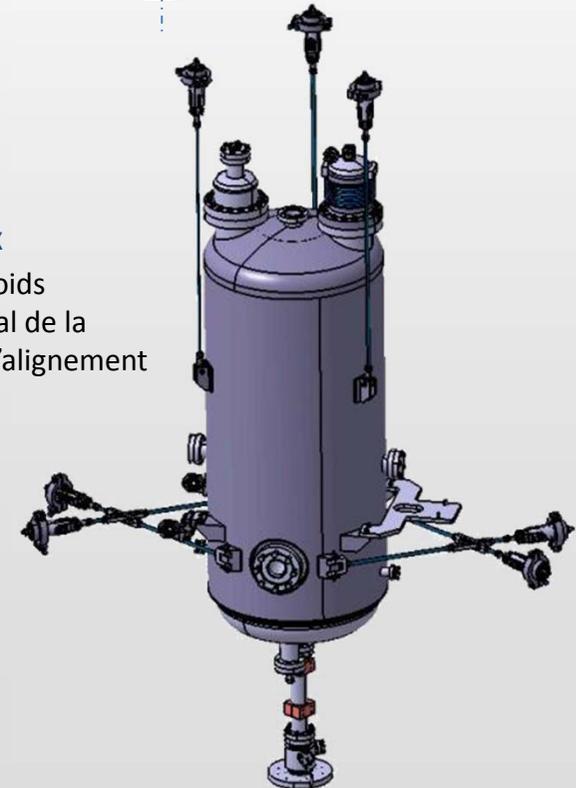
**Tirants antagonistes en horizontal**

- Pour ajuster l'alignement latéral
- Pour maintenir l'alignement latéral de la cavité



**Tirants verticaux**

- Pour supporter le poids
- Déplacement vertical de la cavité pour anticiper l'alignement



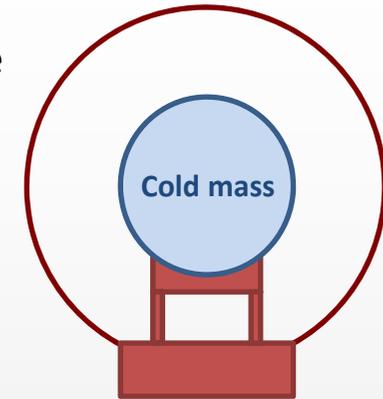
➤ **Utilisation de supports d'appui (avec table)**

- Le train de cavités est aligné sur ses supports en dehors de l'enceinte à vide
- Il faut anticiper le déplacement vertical du train après mise en froid

➤ **Utilisation de supports glissières et de tirant en invar**

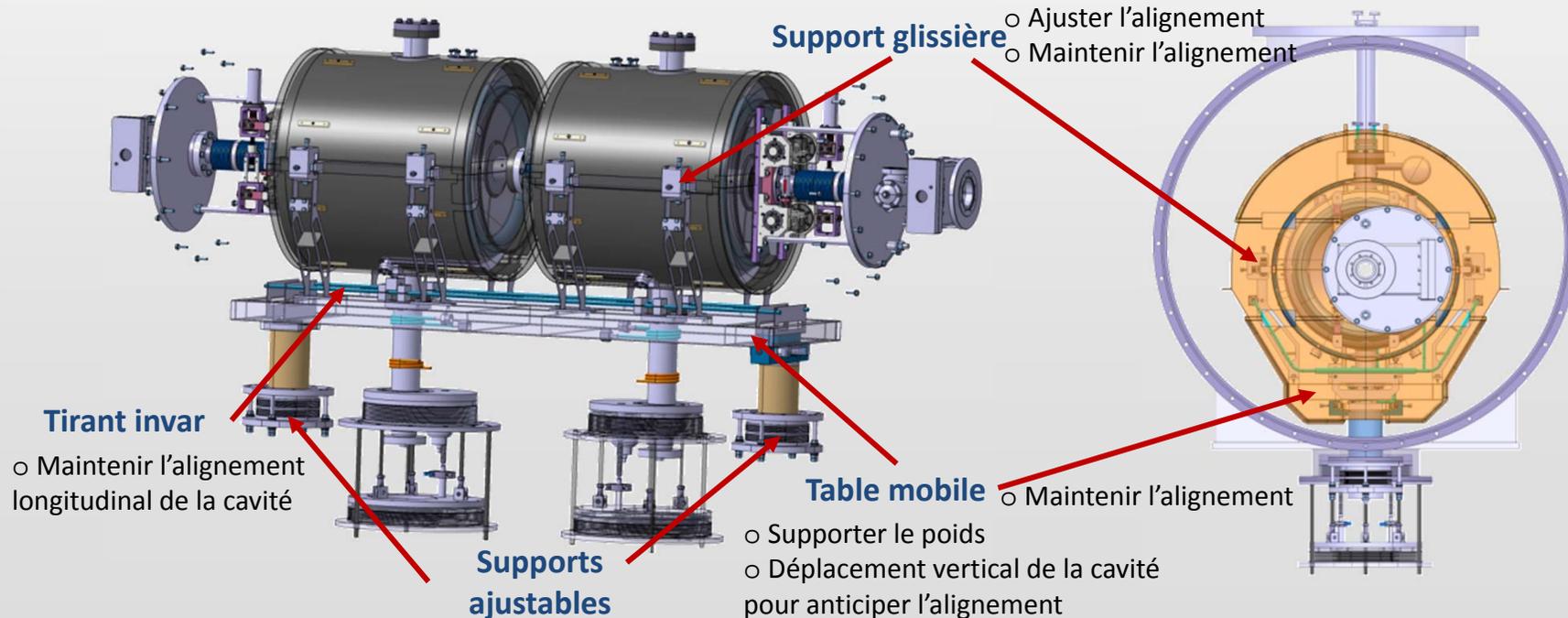
- Les contractions thermiques de la table ne sont pas transmises à la cavité
- La position longitudinale de la cavité est fixée par le tirant invar

Enceinte à vide

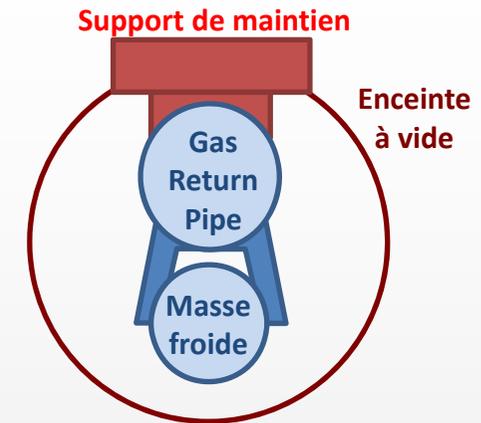


Supports d'appui

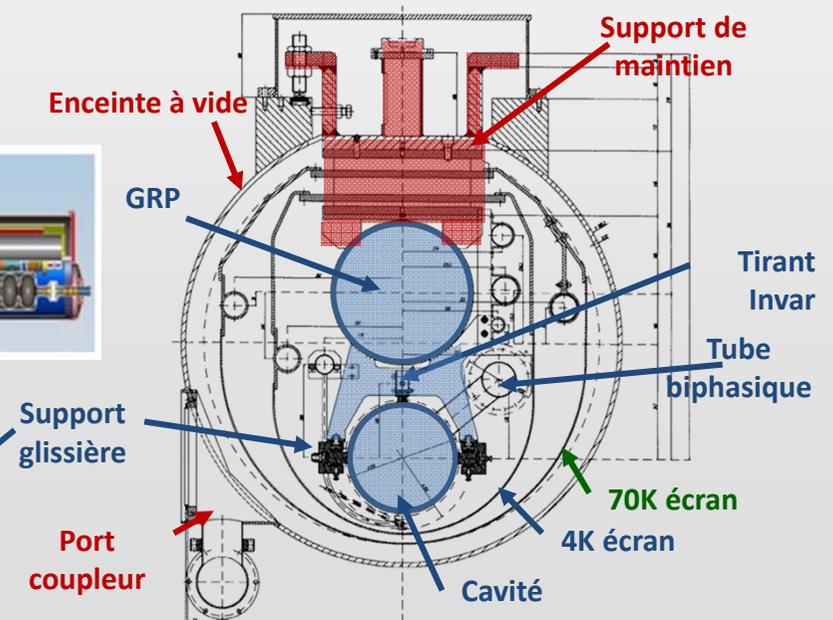
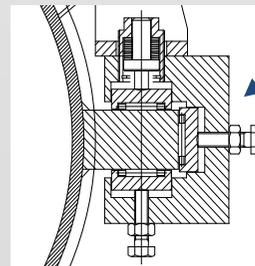
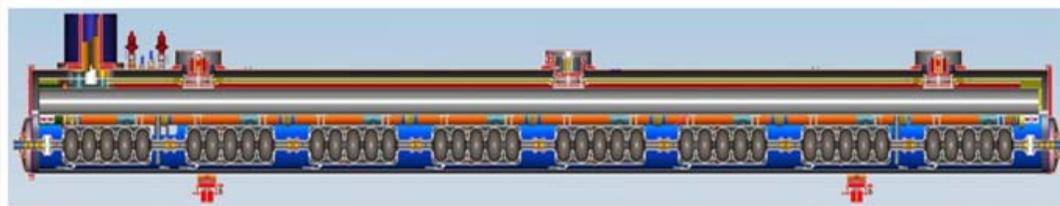
**Exemple : Cryomodule MAX pour les cavités spoke**



- **Utilisation du tube de retour de gaz Helium GRP comme support**
  - Gros diamètre de tube (en raison des pertes de charge)
- **Utilisation de supports en composite thermalisés**
  - Au centre : support fixé à l'enceinte
  - Aux extrémités : supports glissants pour s'affranchir des effets de la contraction thermique du tube GRP
- **Utilisation de supports glissières et de tirants en invar**
  - La contraction thermique du tube GRP n'est pas transmise à la cavité
  - Position longitudinale de la cavité est fixée par le tirant invar



**Exemple : TTF Tesla Test Facility cryomodule**  
**Même solution pour XFEL et ILC**



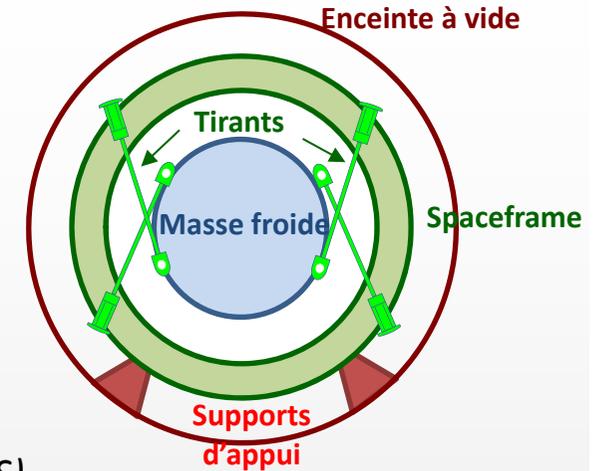
### ➤ Utilisation d'un cadre support

- Le train de cavités est aligné sur son spaceframe en dehors de l'enceinte à vide

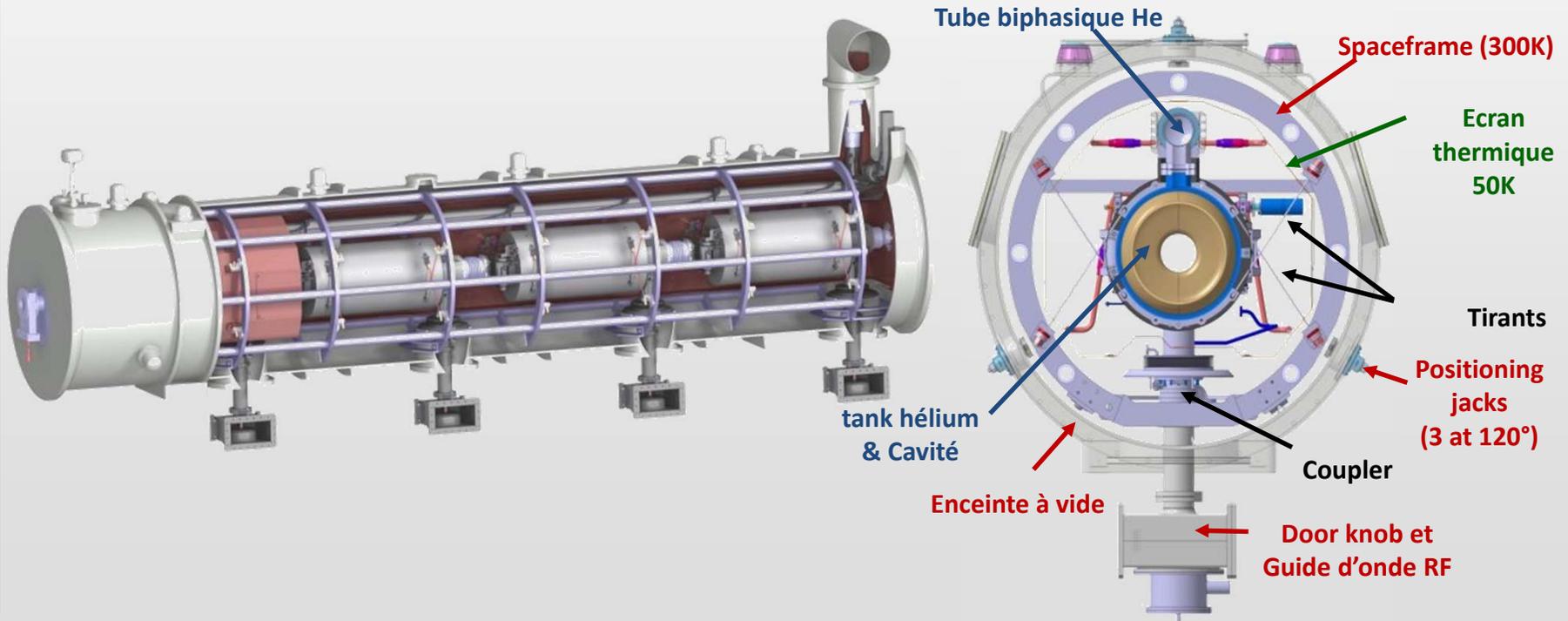
### ➤ Utilisation de tirants antagonistes

Préserver l'alignement des cavités après la mise en froid

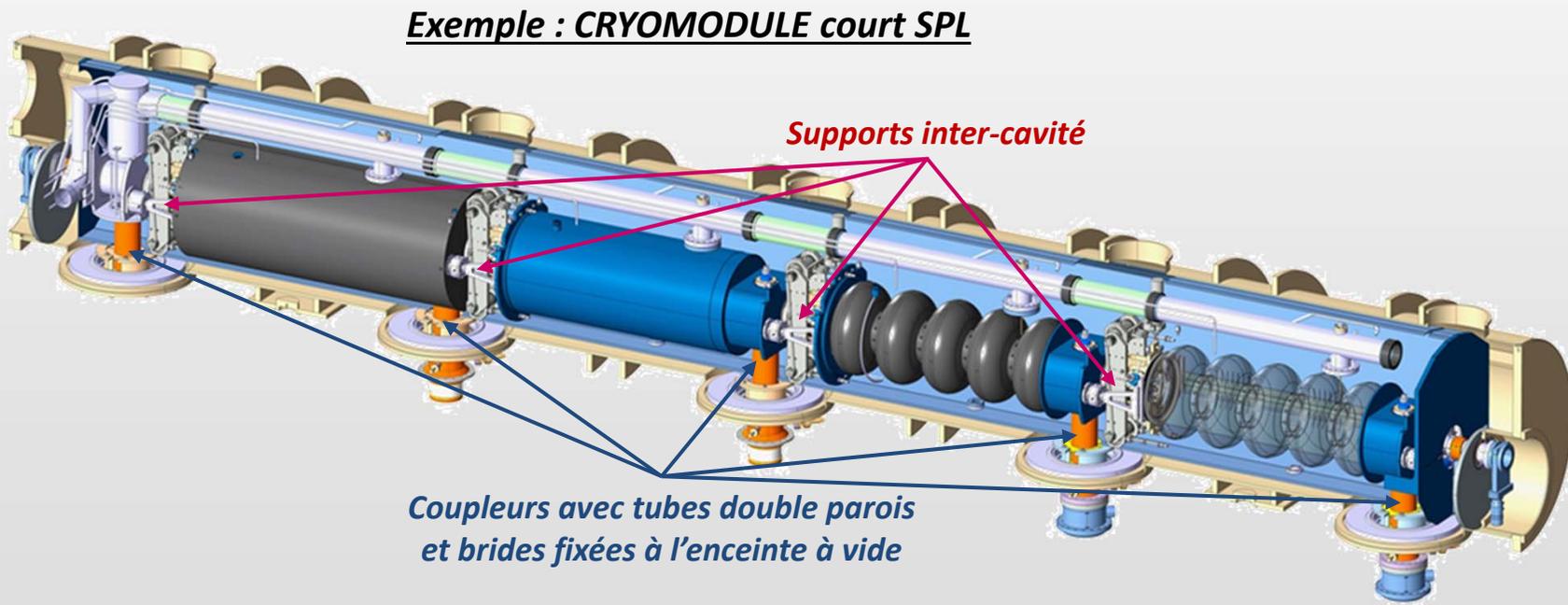
**Exemple : ESS Cryomodule pour cavités elliptiques (solution type SNS)**



DIFFERENTS CONCEPTS DE SUPPORTAGE



- **Utilisation du tube double paroi du coupleur de puissance comme support**
  - Assure l'alignement de chaque cavité le long de l'axe faisceau (point fixe)
- **Utilisation de supports inter-cavité**
  - Glissement relatif entre cavités adjacentes le long de l'axe faisceau
  - Apporter un second support vertical (éliminer le porte à faux)



## SOMMAIRE

---

- INTRODUCTION
- FONCTIONS D'UN CRYOMODULE
- COMPOSANTS PRINCIPAUX
- SCHEMA CRYOGÉNIQUE D'UN CRYOMODULE
- ASPECTS THERMIQUES
- ASPECTS MECANIQUES
- ASPECT MAGNETIQUES
- DIFFÉRENTS CONCEPTS DE SUPPORTAGE
- PROCESS D'ASSEMBLAGE**
- CONCLUSION

- ❑ **En salle blanche**
  - Assemblage du train de cavités et coupleurs avec un pré-alignement
  
- ❑ **En dehors de la salle blanche :** Insertion de tous les composants de l'enceinte à vide
  - Assemblage des autres équipements du train de cavités : Système d'accord à froid, écran magnétique, instrumentation,...
  - Assemblage des écrans thermiques, lignes de distribution cryo,...
  - Insertion à l'intérieur de l'enceinte,
  - Procédure d'alignement

**Pour chaque étape, il est nécessaire de fournir :**

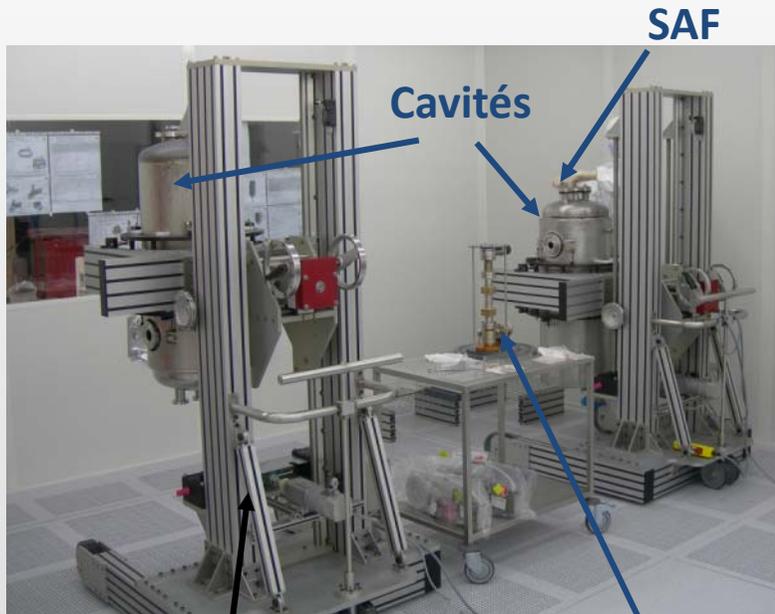


- **Des outillages spécifiques**
- **Des infrastructures adéquates**

## En salle blanche :

Assemblage de la cavité avec :

- le coupleur de puissance
- le système d'accord à froid (SAF ou CTS)



Outillage de  
salle blanche

Coupleur

Insertion et connexion des cavités  
dans la partie intermédiaire de  
l'enceinte à vide :



Une partie de  
l'enceinte à vide

Charriot de  
transport

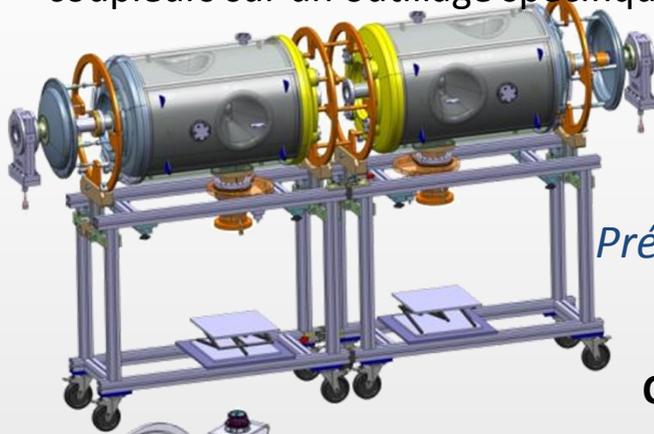
**En dehors de la salle blanche :**

PROCESS D'ASSEMBLAGE

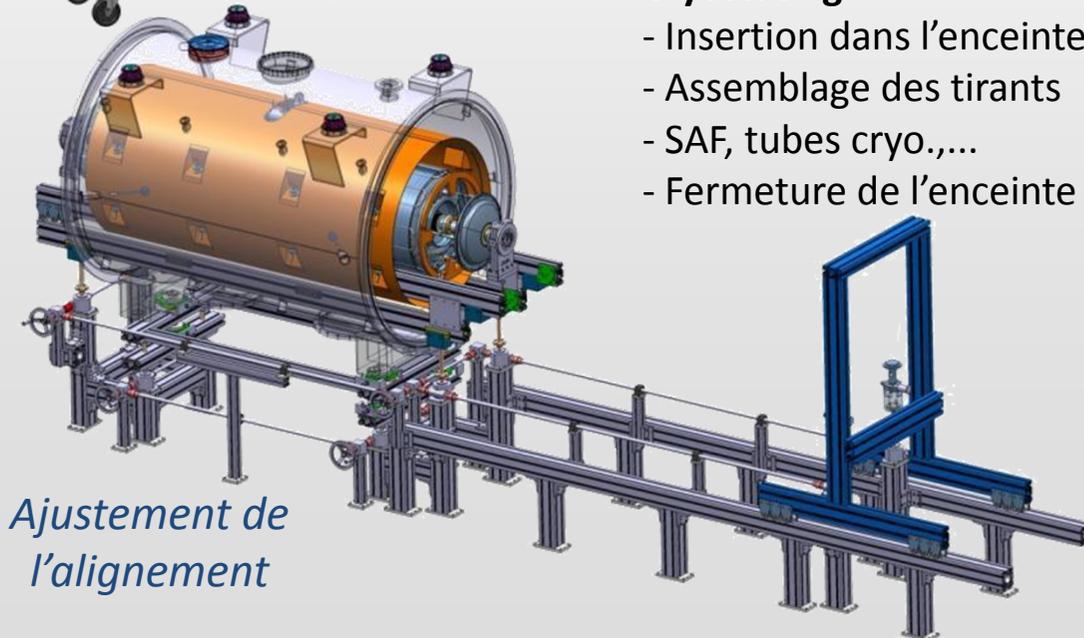


## En salle blanche :

Assemblage du train de cavités avec coupleurs sur un outillage spécifique



*Pré-alignement*

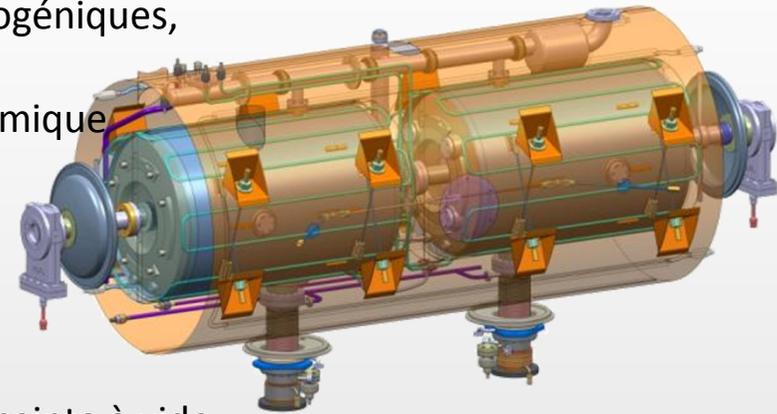


*Ajustement de l'alignement*

## En dehors de la salle blanche :

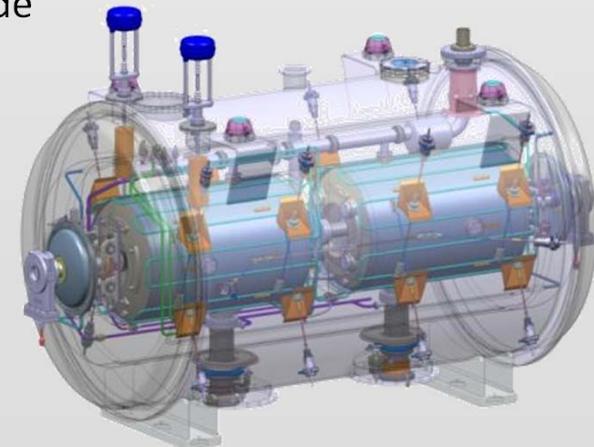
**Finalisation de l'habillage des cavités :**

- Ecran magnétique,
- Lignes cryogéniques,
- Tirants,
- Ecran thermique



**Cryostating:**

- Insertion dans l'enceinte à vide
- Assemblage des tirants
- SAF, tubes cryo.,...
- Fermeture de l'enceinte à vide



## Objectif :

**Aligner les tubes faisceau de toutes les cavités le long de l'axe faisceau.**

Les tubes faisceau ne sont plus accessibles une fois le cryomodule fermé

→ Report de l'axe des tubes faisceau : références externes (nouveaux repères)

1. Aligner les cavités à l'intérieur du cryomodule
2. Aligner les cryomodules les uns par rapport aux autres

Equipements de mesures:



*Théodolite*



*Laser tracker*

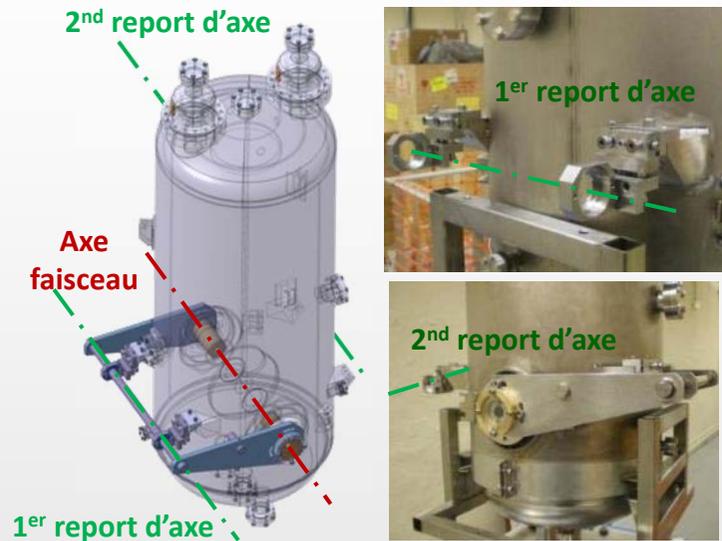


*Retro-réfecteur*



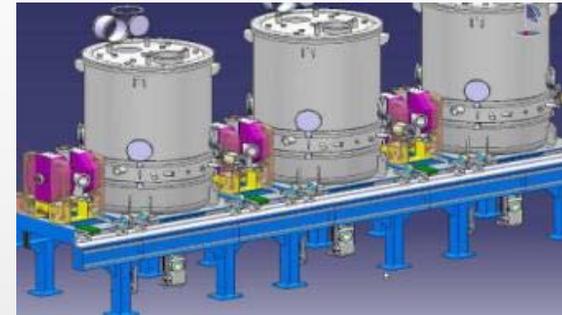
*Sphère Taylor Hobson*

**Reports de l'axe faisceau sur le tank hélium :**



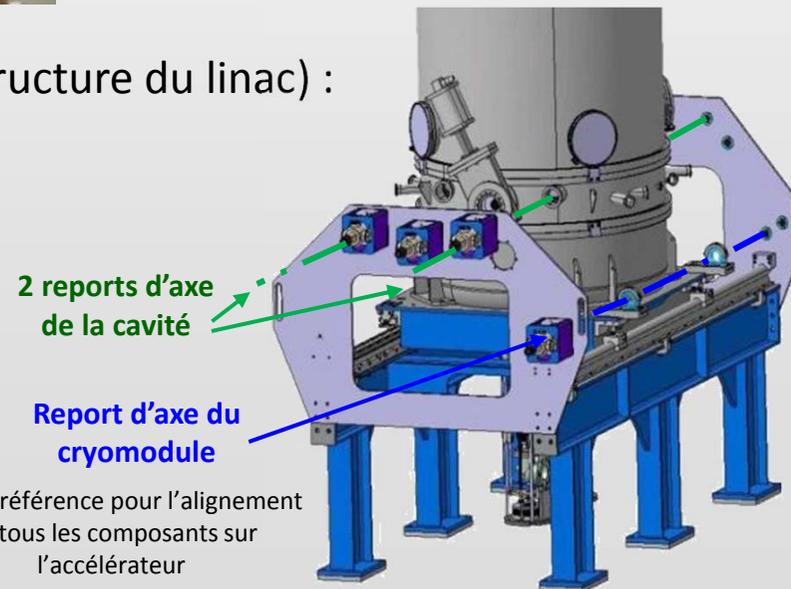
Les défauts de tolérance maximum de l'alignement global sont :

- $\pm 1$  mm en translation pour les cryomodules
- $\pm 0.3^\circ$  en rotation (X,Y) pour les cryomodules



**Banc d'alignement (= section de la structure du linac) :**

- Alignement des cavités dans le cryomodule
- Report de l'axe faisceau sur un support du cryomodule



Le design mécanique d'un cryomodule dépend d'une variété de paramètres qui nécessitent des connaissances en :

Mécanique, thermique, vide et cryogénie.

Au laboratoire IPNO, le design mécanique d'un cryomodule est effectué par le bureau d'études avec l'aide d'autres collègues de la division Accélérateurs (total : 90 personnes) :

- Des experts en cryogénie et vide
- Des experts sur les cavités RF
- Des experts en dynamique faisceau

- H. Saugnac, IPN Orsay, “Cryostat : construction et mise en oeuvre”, Journées cryogéniques d’Aussois, 2003
- Paolo Pierini, INFN-Milan, “overview of cryomodules for proton accelerators”, ESS Bilbao initiative workshop, 2009
- N. Ohuchi, KEK, “Fundamentals of cryomodule”, SRF 2009 tutorial program, 2009
- T. H. Nicol, Fermilab, “Fundamentals of Cryomodule Design: Theory and Practice, Part II – Mechanical Considerations”, SRF 2011 tutorials
- V. Parma, CERN, “Cryostat design II: Application to cryostat design”, Cryostat Design Seminar at GSI, 2005
- H. Saugnac, IPN Orsay, “Design review of the SPIRAL2 cryomodule B”, 2008
- P. Duthil, S. Rousselot & P. Duchesne, IPN Orsay, “ SPL Cryomodule Conceptual Design Review - Vacuum Vessel and Assembly Tooling”, 2011
- D. Reynet, P. Duthil & S. Bousson, IPN Orsay, “Engineering Design of the ESS Spoke Cryomodule”, SLHIPP meeting, 2013
- G. Olivier & J.P. Thermeau, IPN Orsay, “ESS Cryomodule for elliptical cavities (Medium and high beta)”, SLHIPP meeting, 2013

***MERCI POUR VOTRE ATTENTION***