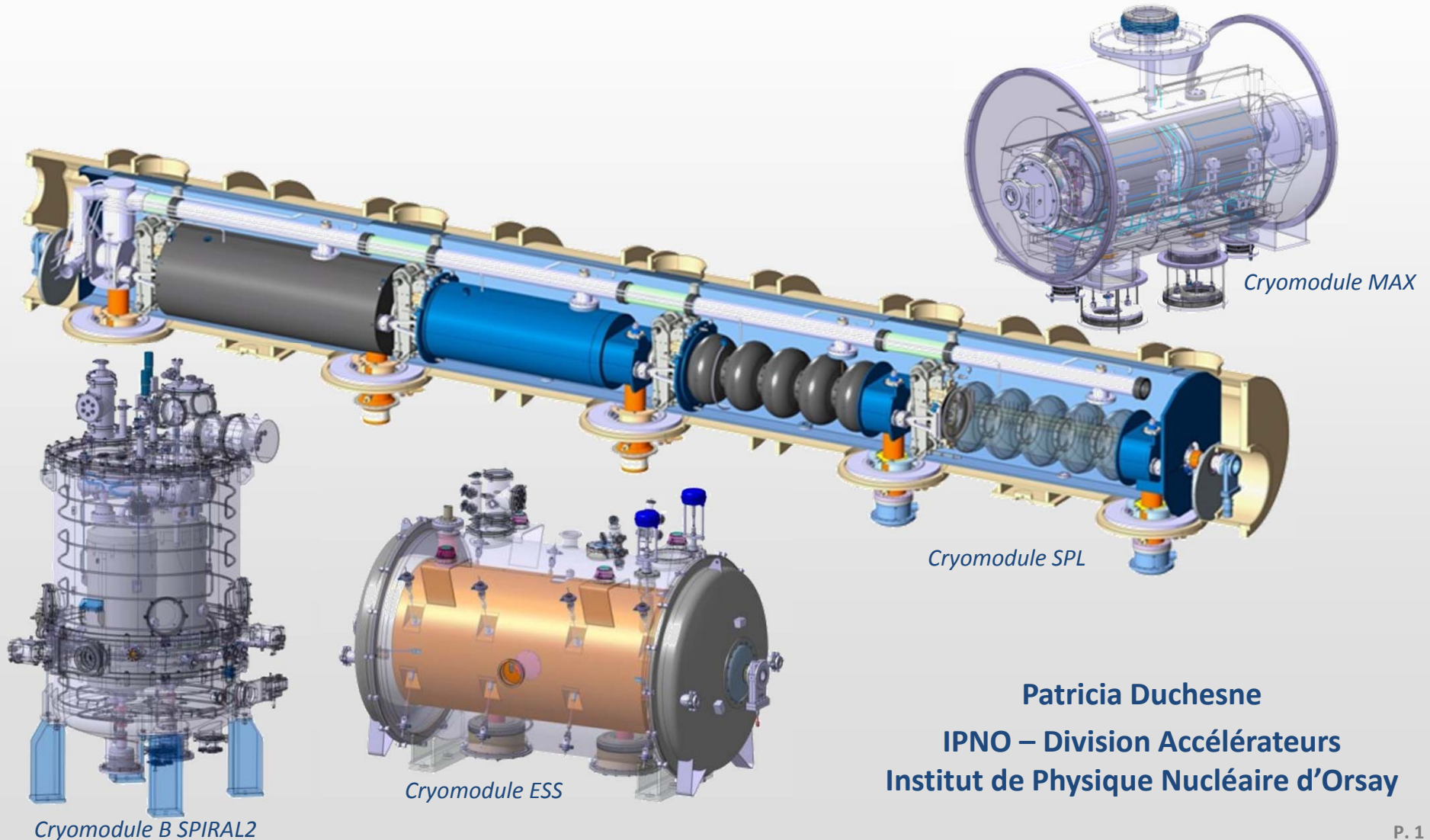


INGENIERIE DES CRYOMODULES

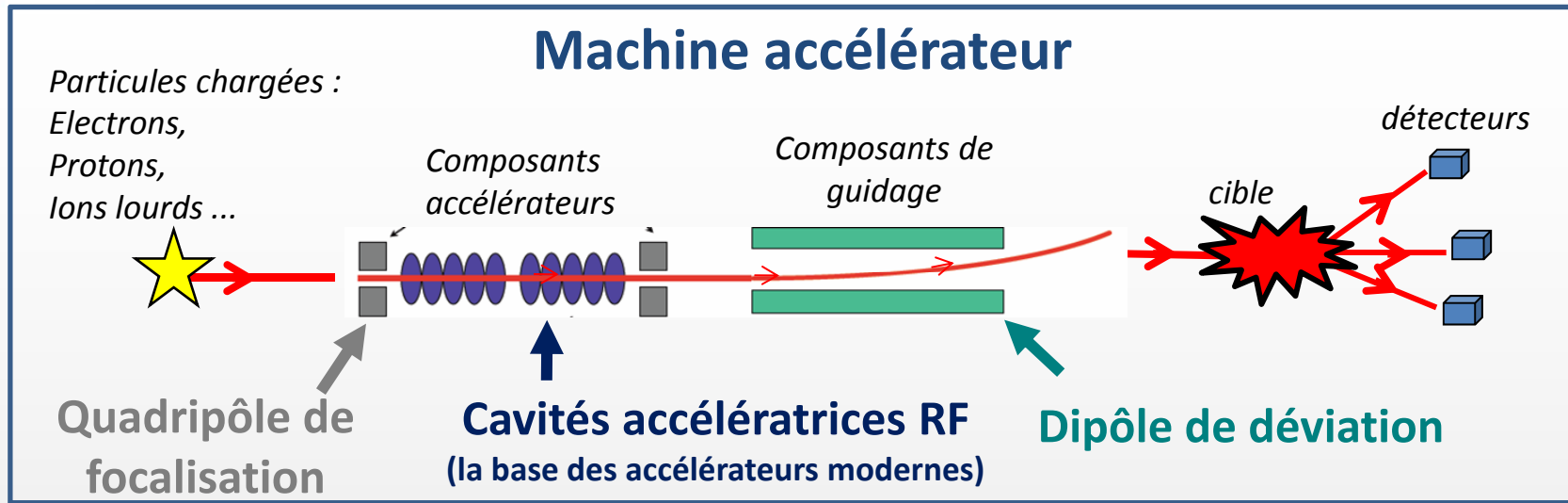
Ecole des Accélérateurs – BENODET - 2014



Patricia Duchesne
IPNO – Division Accélérateurs
Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

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

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



Augmenter la performance
des accélérateurs

Cavités supraconductrices

Installation dans l'accélérateur

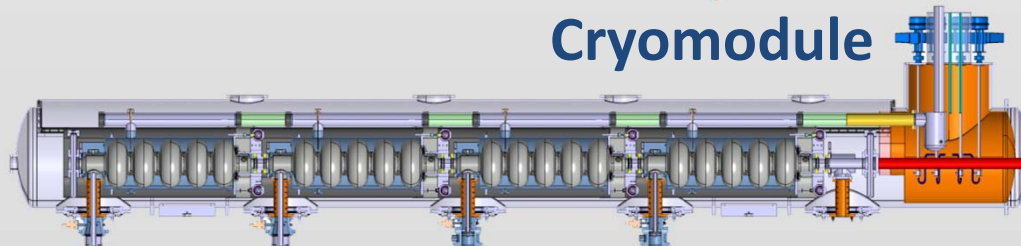
Avantages :

Gain sur le coût de fonctionnement
Accélérateur plus court

Inconvénients :

Distribution cryogénique
Préparation complexe

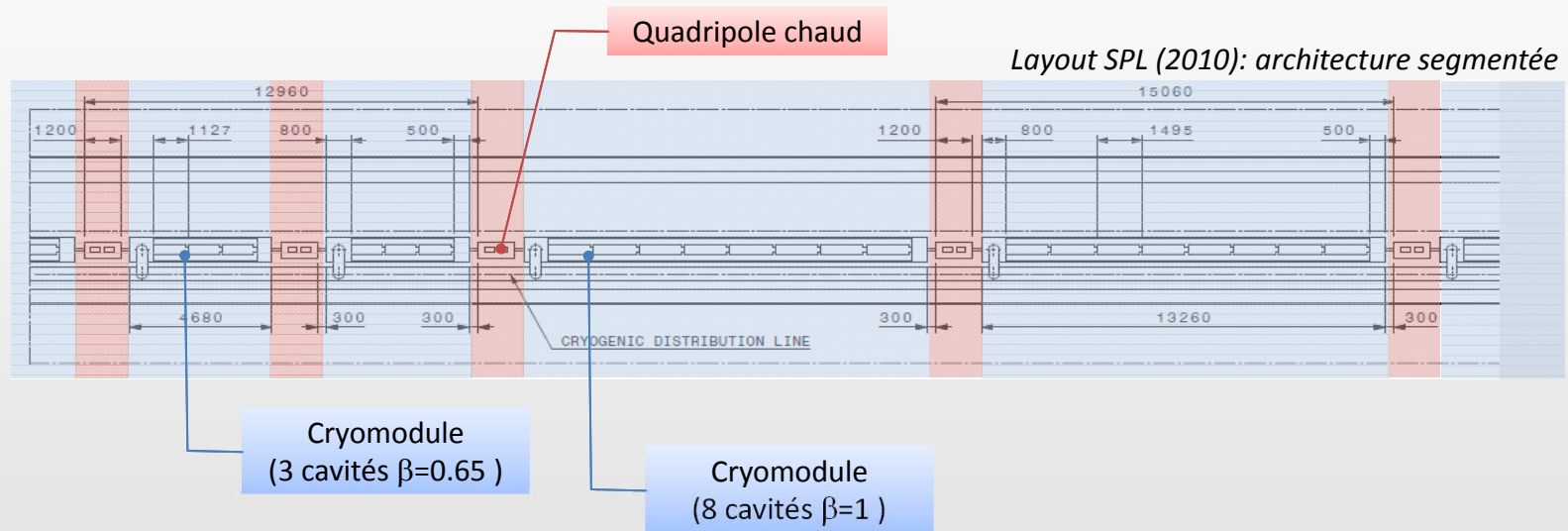
Cryomodule



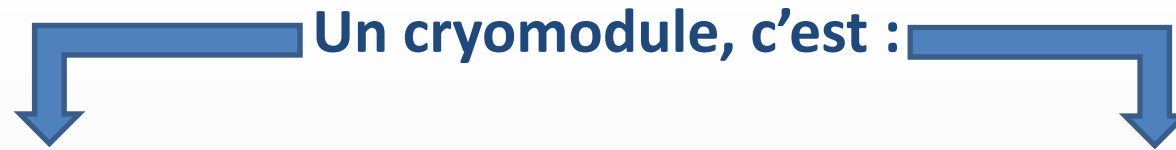
Distribution cryogénique
Isolation thermique & magnétique
Assemblage and alignment

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 :

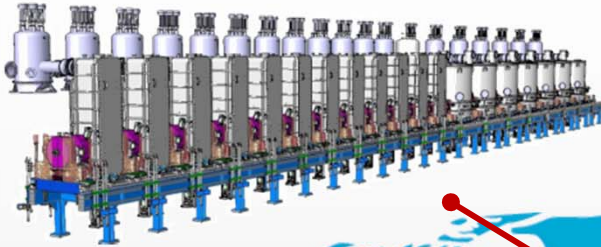
Le système cryogénique global impacte sur la segmentation de l'accélérateur et donc sur le cryomodule

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



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

Masse froide (cavités, aimants)

Ecran magnétique

- Protection magnétique

Distribution cryogénique

- Environnement cryogénique

Ecrans thermiques

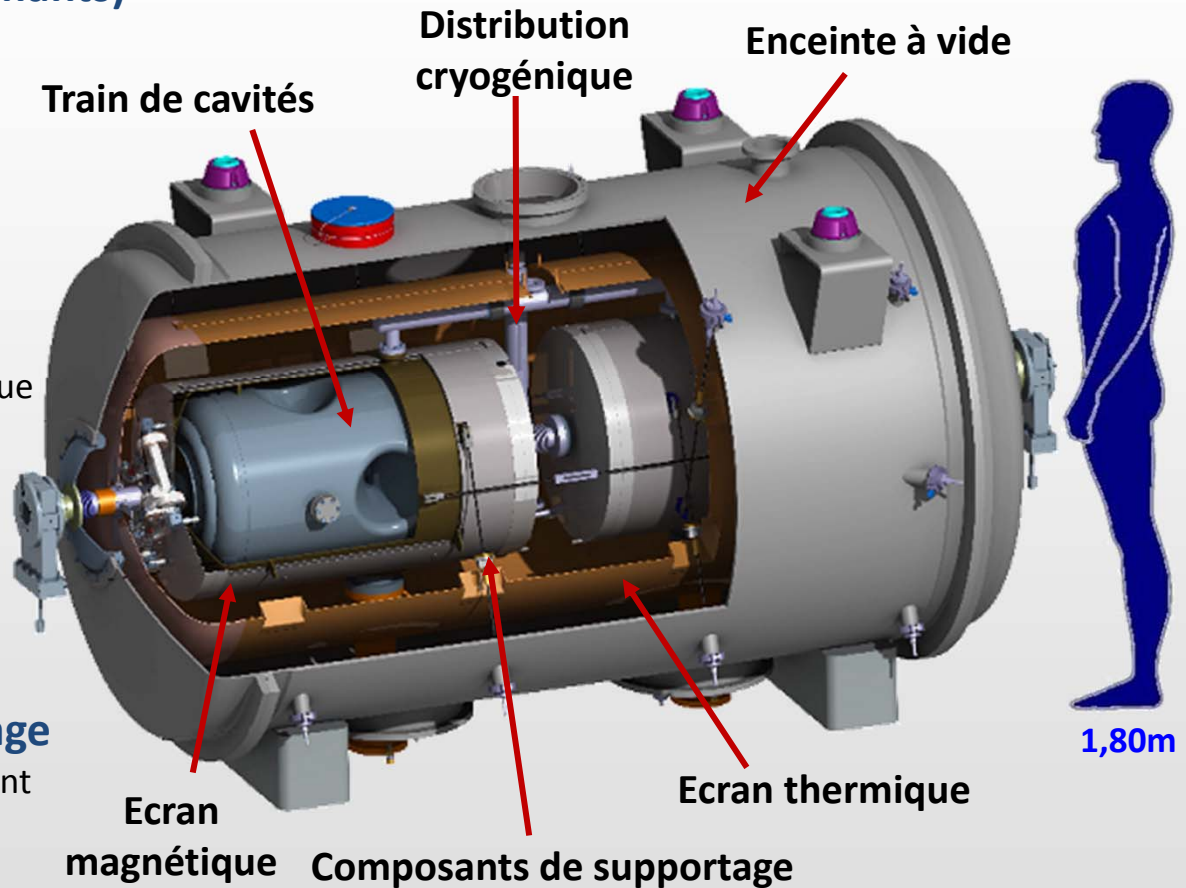
- Isolation thermique

Composants de supportage

- Maintien et positionnement

Enceinte à vide

- Isolation thermique
- Interface



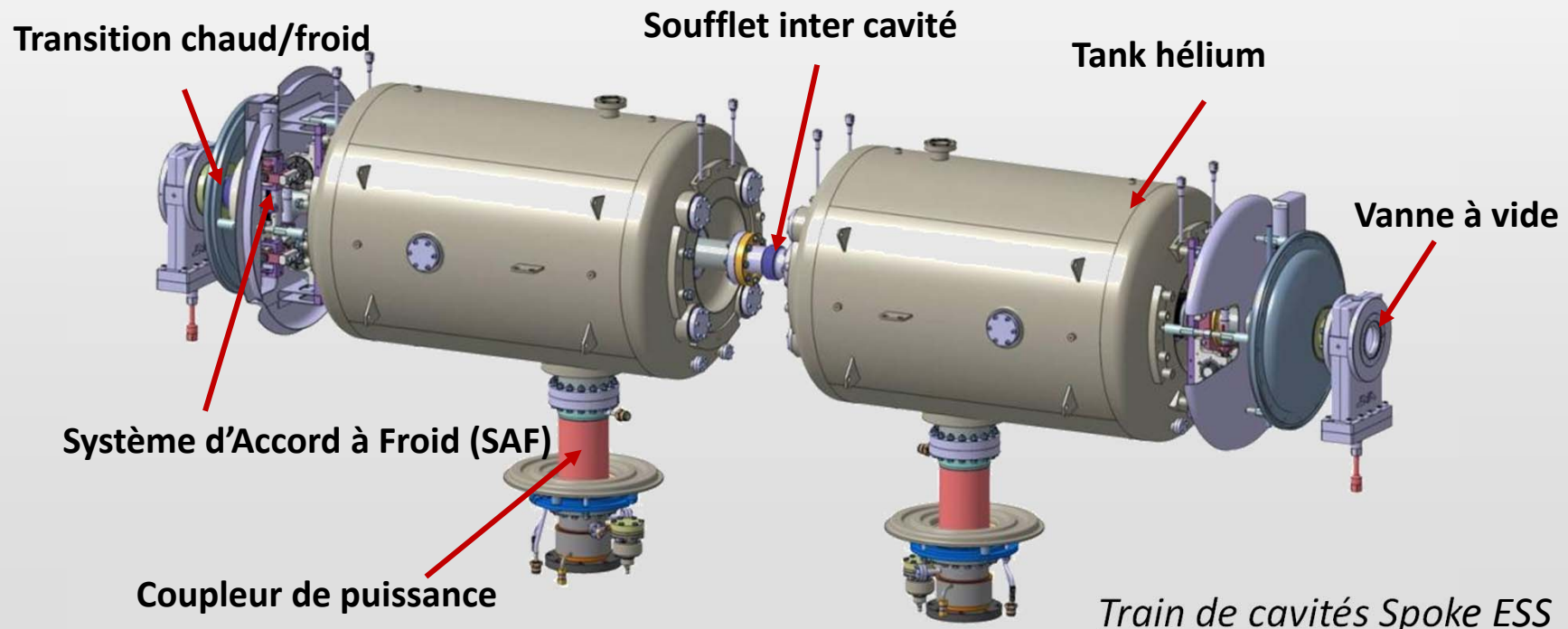
Cryomodule ESS (Spoke)

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

- **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.
- **Cavité**: résonateur elliptique, spoke, quart d'onde ou demi-onde.

COMPOSANTS PRINCIPAUX

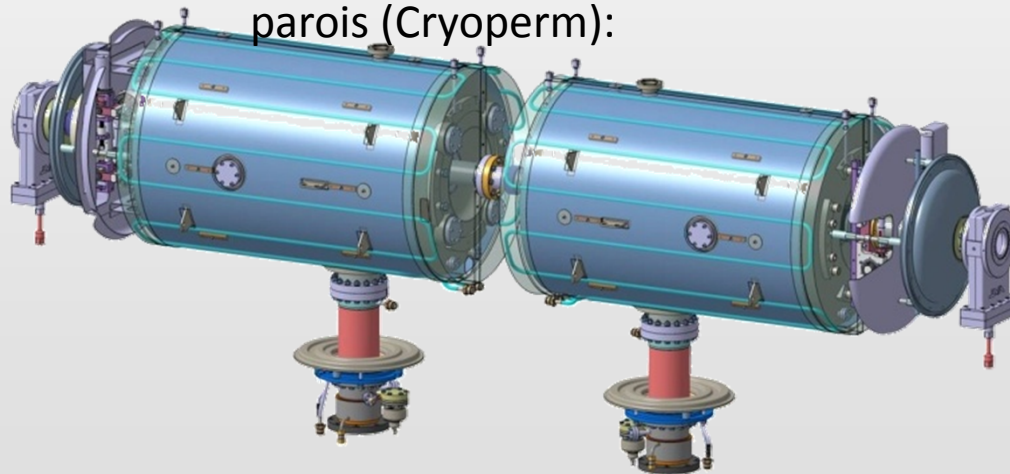


Fournir une protection contre le champ magnétique terrestre et autres champs d'autres sources (ex: Champs de fuite des aimants)

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

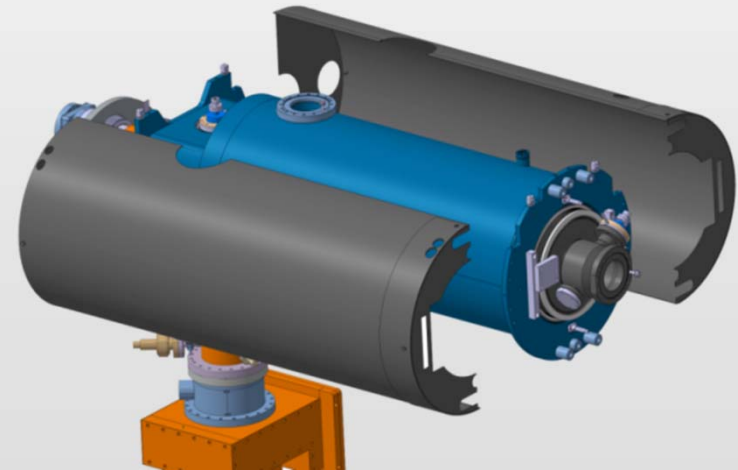
- **Autour de la cavité** (écran à basse température)
Pour être efficace, l'écran peut être refroidi avant que la cavité n'atteigne sa température critique (supraconductivité)
- **Autour de tous les composants de l'enceinte à vide** (écran à température ambiante)

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

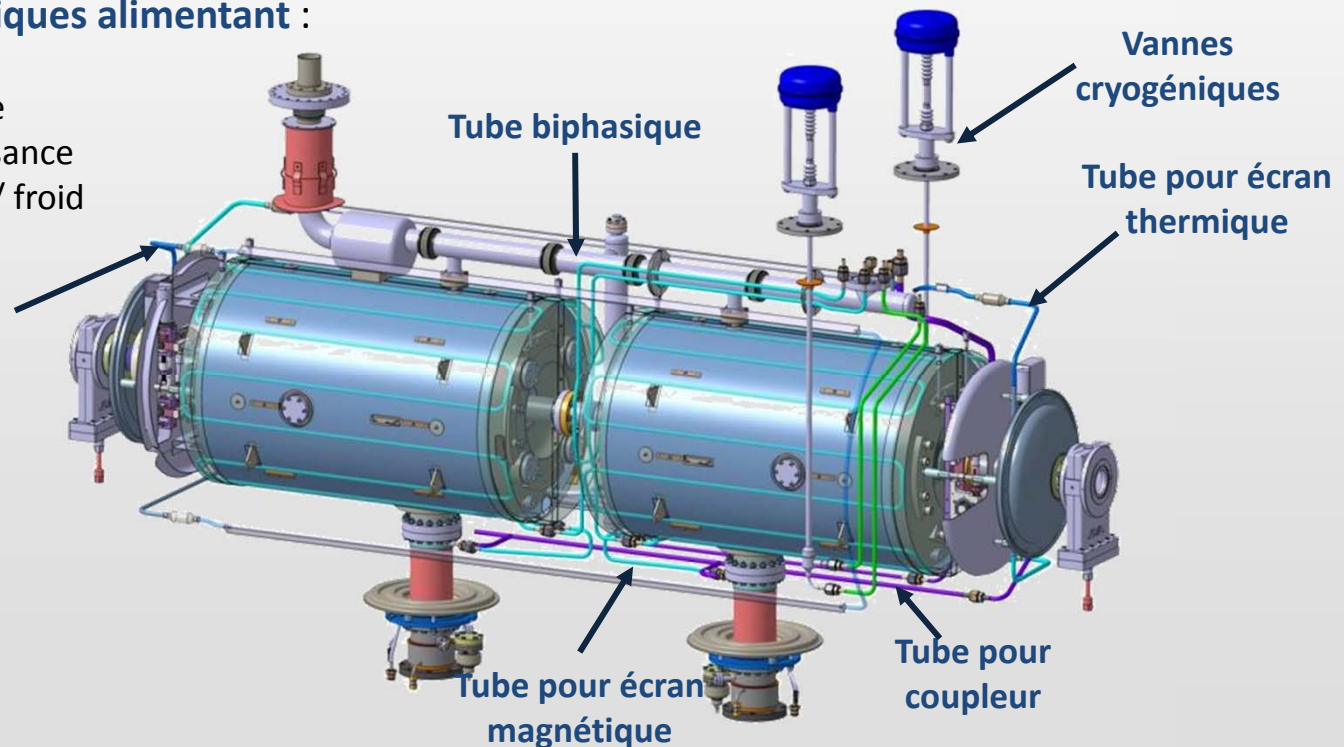
- **Son design dépend de la distribution cryogénique globale de l'accélérateur (voir § Schéma cryogénique d'un cryomodule):**

- 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

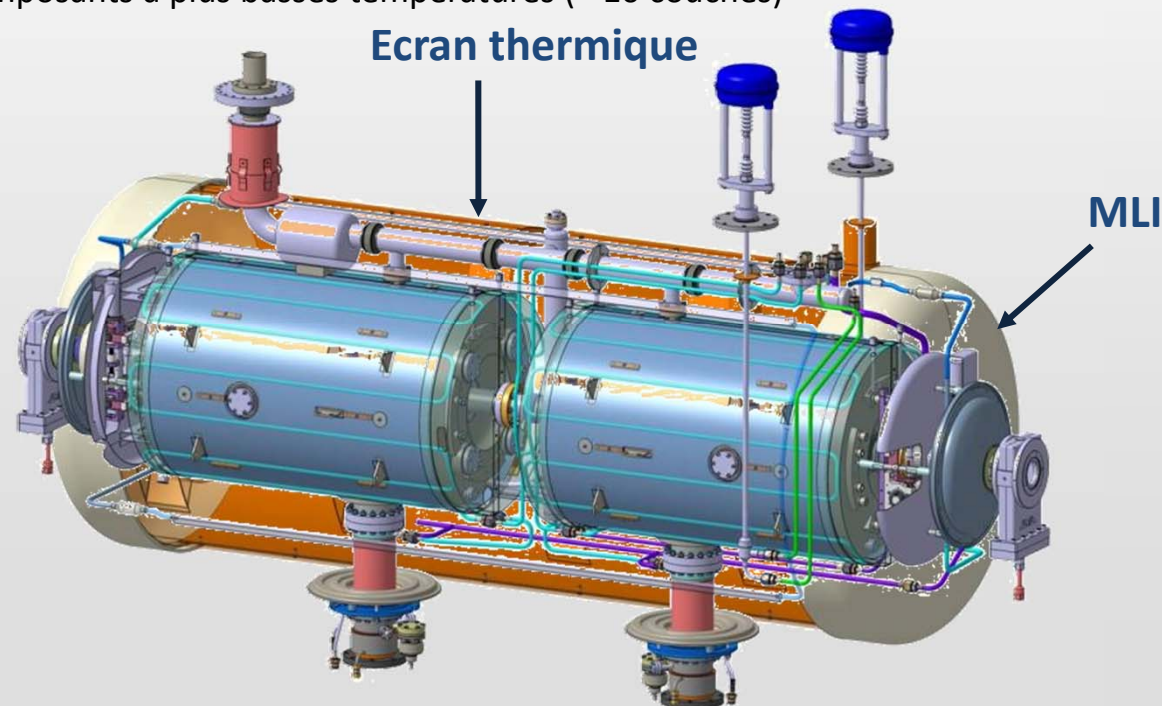


Ecran thermique actif à température intermédiaire (50-80K)

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)

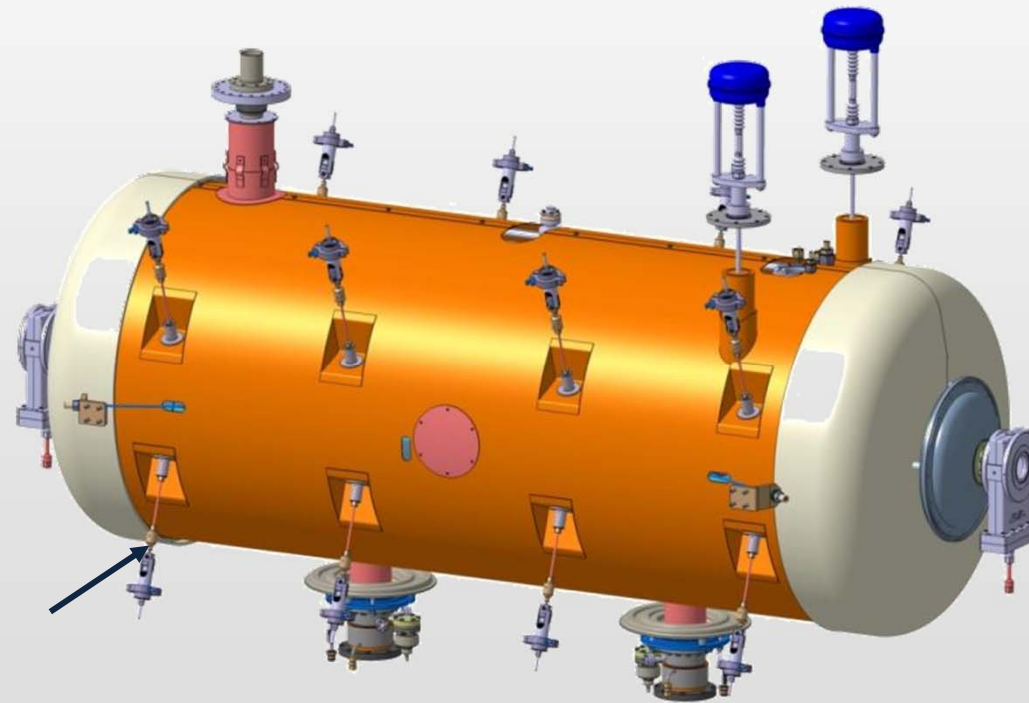


COMPOSANTS DE SUPPORTAGE

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

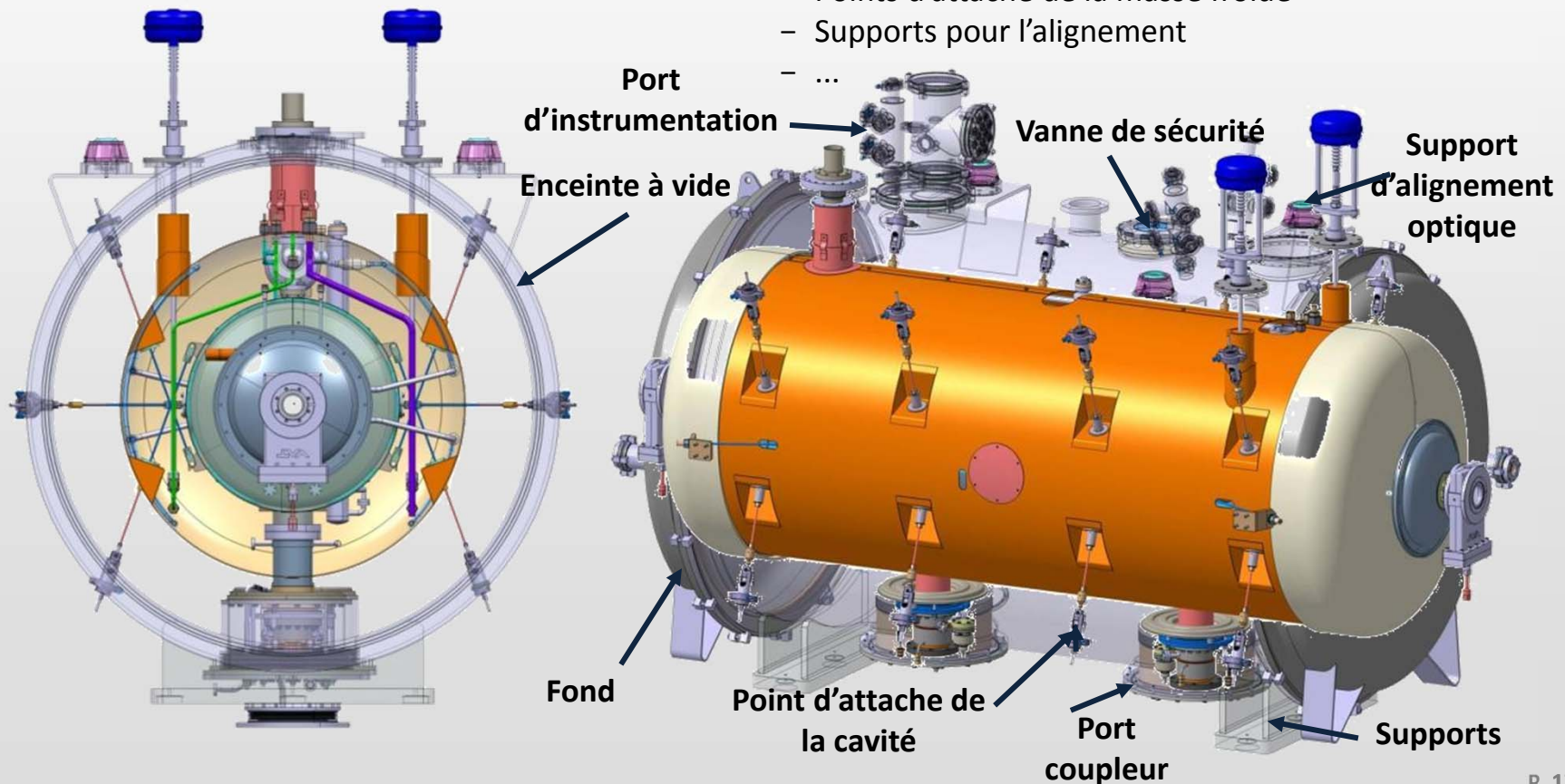
ENCEINTE A VIDE

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
 - ...

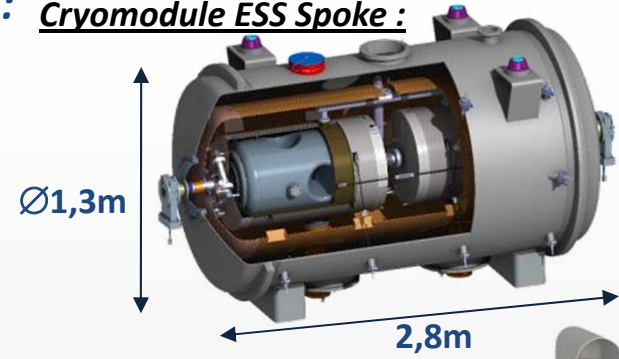
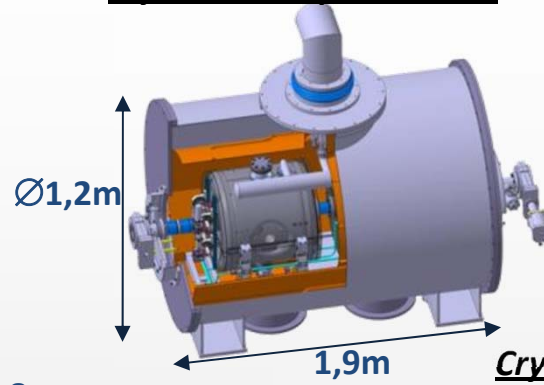
COMPOSANTS PRINCIPAUX



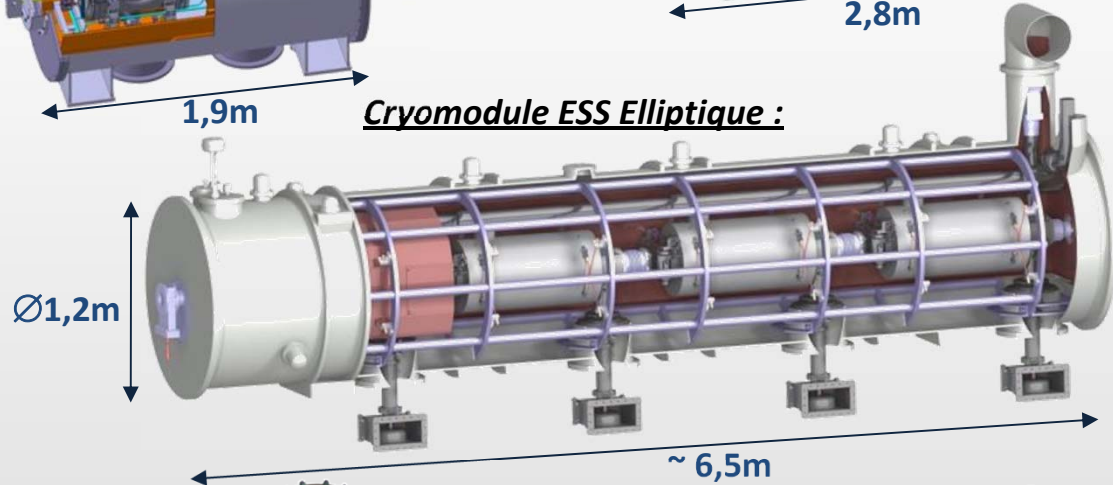
Exemples d'enceinte à vide développées à l'IPNO : Cryomodule ESS Spoke :

Cryomodule B SPIRAL2 :

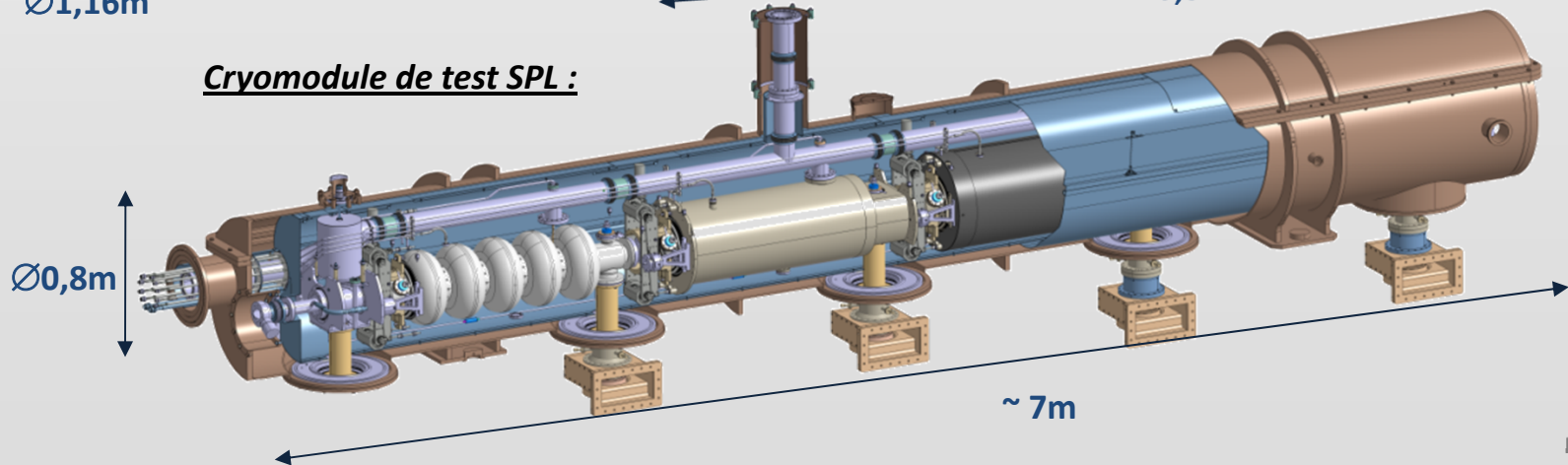
Cryomodule Spoke MAX :



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
- DIFFÉRENTS CONCEPTS DE SUPPORTAGE
- PROCESS D'ASSEMBLAGE
- CONCLUSION

Les cavités SRF sont généralement refroidies avec un bain saturé isotherme (équilibre des phases liquide et gaz):

- $T = 4.2\text{K}$ et $P = 1\text{ bar}$

- $T < 2.1\text{K}$ et $P < 30\text{ mbar}$

→ Pressions stables, limitation des variations de pression qui ont un impact sur la fréquence de la cavité

→ Un bain à $T < 4.2\text{K}$ est généré par une détente isenthalpique, à travers une vanne Joule-Thomson (pompage)

Les aimants sont souvent refroidis avec un liquide sous-refroidi :

→ Les surfaces sont complètement couvertes par le liquide, stabilisation des supraconducteurs

Helium phase diagram

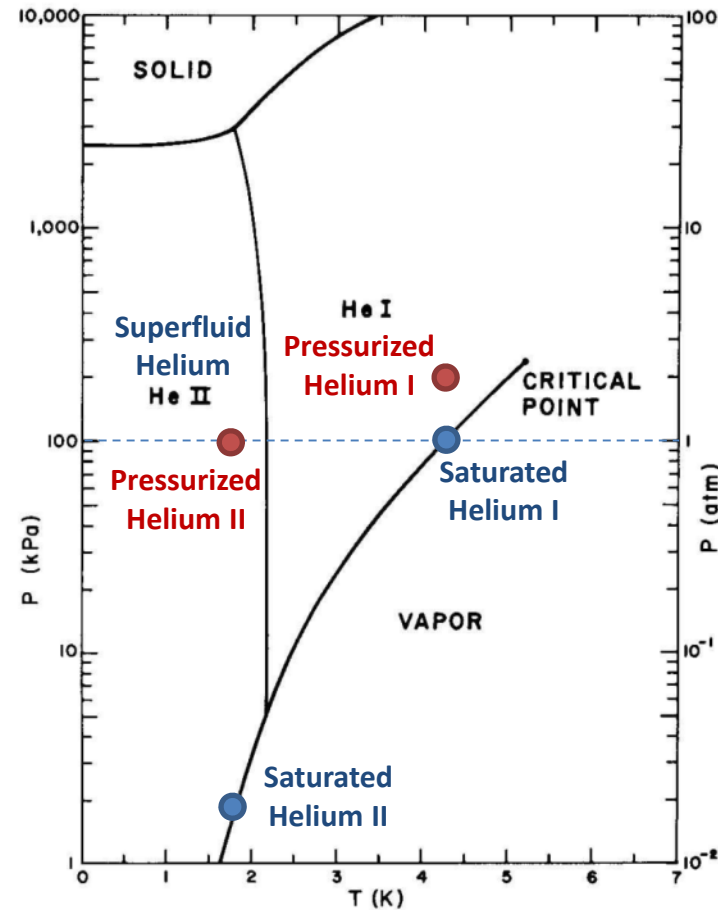
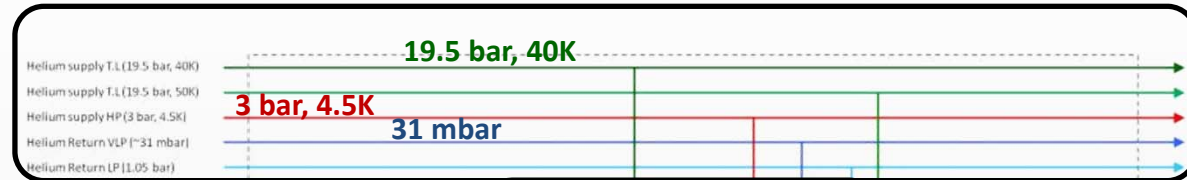


Fig. 3.1. ⁴He phase diagram.

Exemple de P&ID pour le cryomodule ESS :

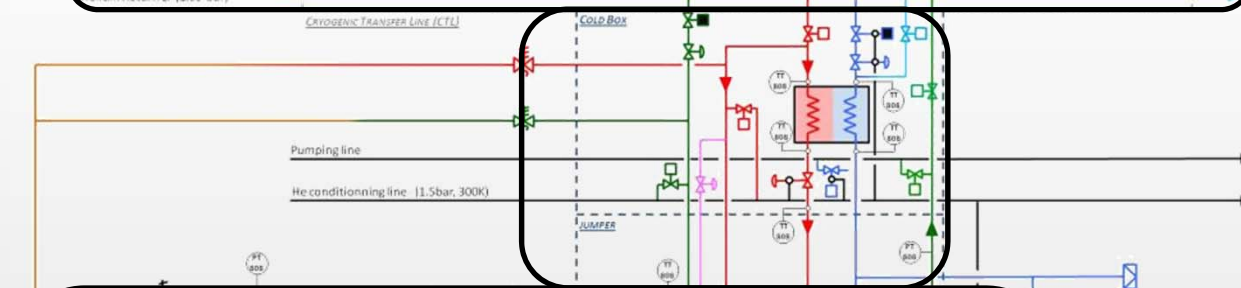
Cryogenic Transfer Line (CTL)

Circuit d'alimentation et de retour d'hélium



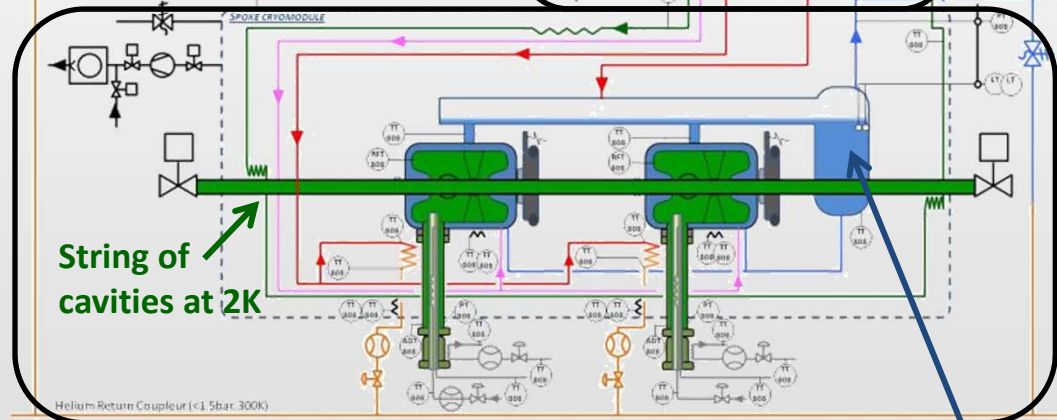
Boîte à vannes

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
	Flow direction
	Secondary vacuum pump
	Primary vacuum pump
	Electrical heater
	One flow heat exchanger
	TT 305 - Sensor transmitter
	TT 305 - Accurate measurement needed / Fluid measure / Use of death
	ADT 305 - Arc detector
	FT 305 - Flow meter
	Control valve
	Pressure safety valve

- 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

- INTRODUCTION
- FONCTIONS D'UN CRYOMODULE
- COMPOSANTS PRINCIPAUX
- SCHEMA CRYOGÉNIQUE D'UN CRYOMODULE
- ASPECTS THERMIQUES**
- ASPECTS MECANIQUES
- 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 :**

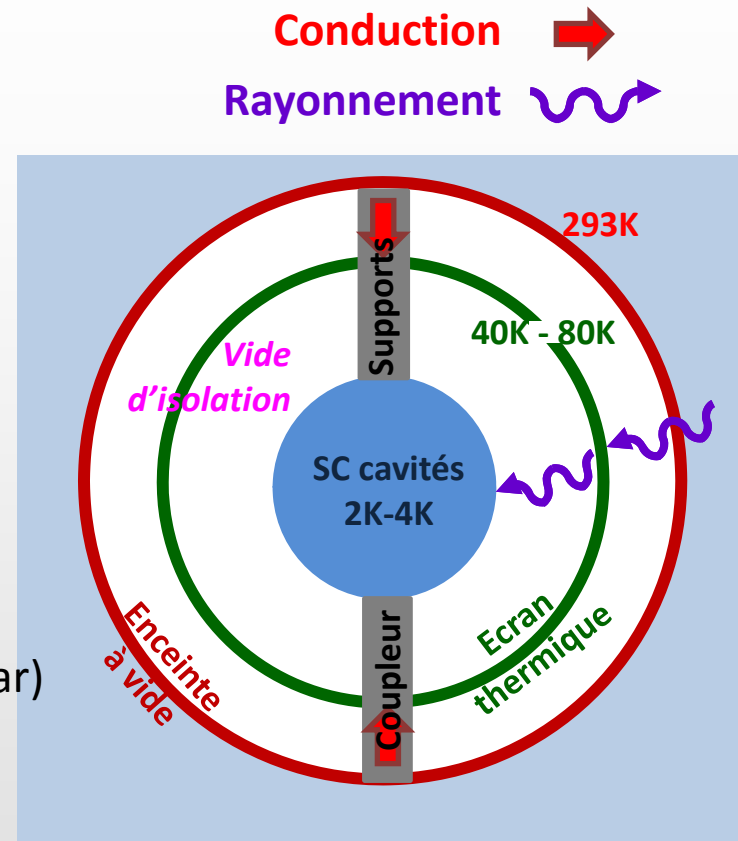
- Négligeable si niveau de vide d'isolation suffisant à l'intérieur de l'enceinte ($< 10^{-3}$ mbar)

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

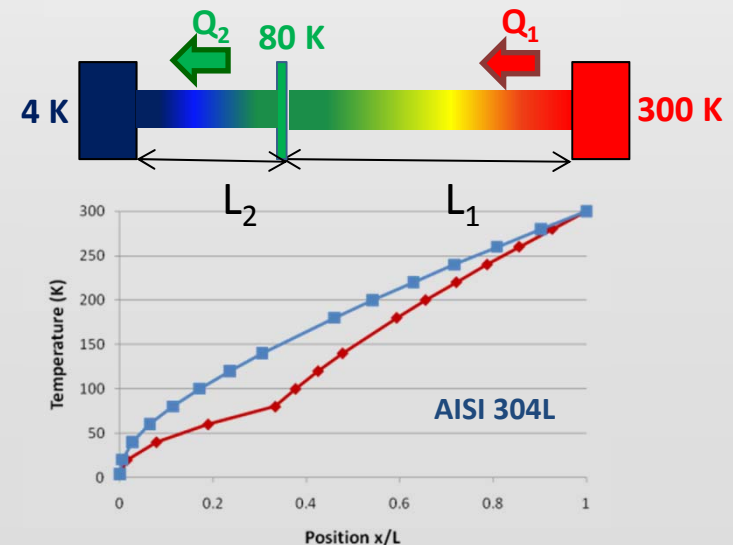
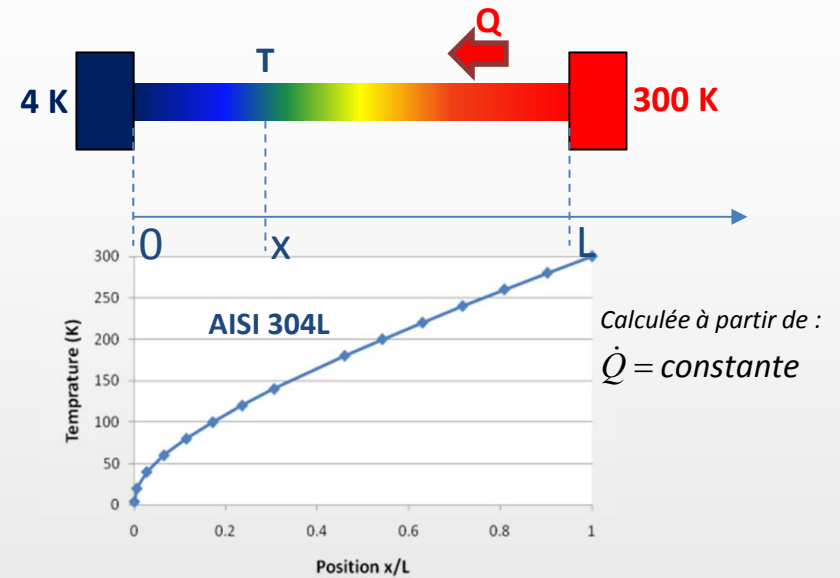
Le flux conductif (W) est donné par la loi de Fourier :

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

- A : section (m²)
- L : longueur (m)
- $\lambda(T)$: conductivité thermique (W/mK⁻¹)

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

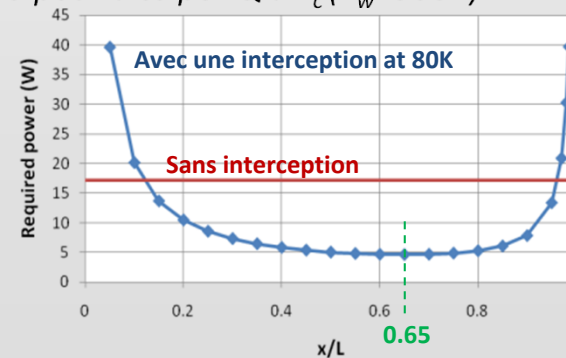
Cycle idéal Carnot :
$$\eta = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}} = \frac{T_c}{T_w - T_c}$$

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

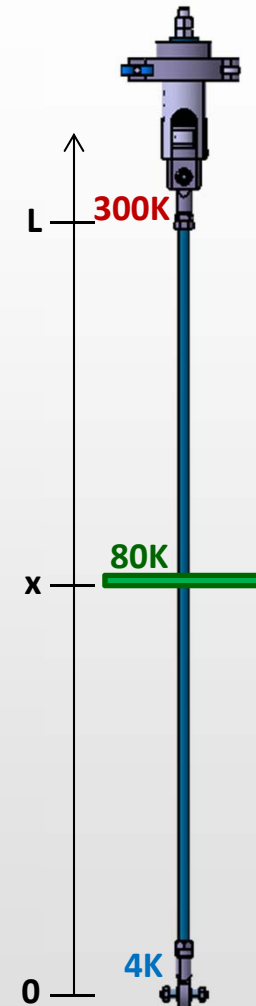
$$\Rightarrow \dot{W} = \dot{W}_{80} + \dot{W}_4 = \frac{220}{80} \times \dot{Q}_{80} + \frac{296}{4} \times \dot{Q}_4$$

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

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

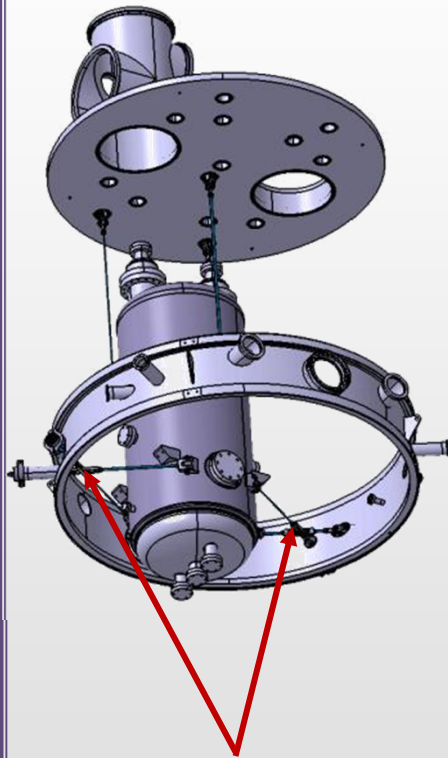


$\dot{W}=17.2W$ contre $\dot{W}=4.8W$



Exemple: Tirants du CRYOMODULE B SPIRAL2

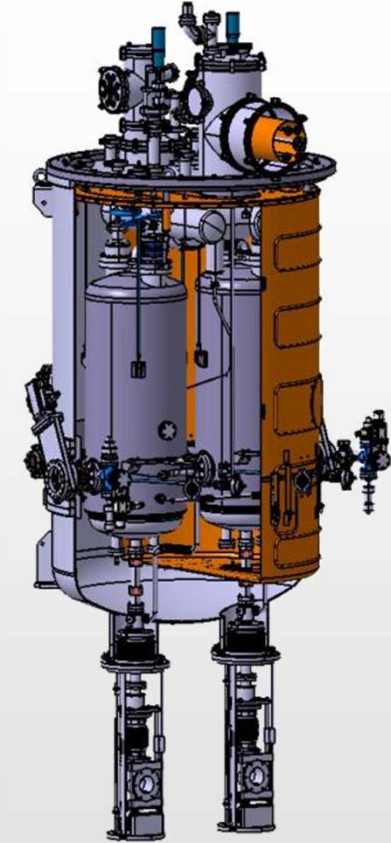
ASPECTS THERMIQUES



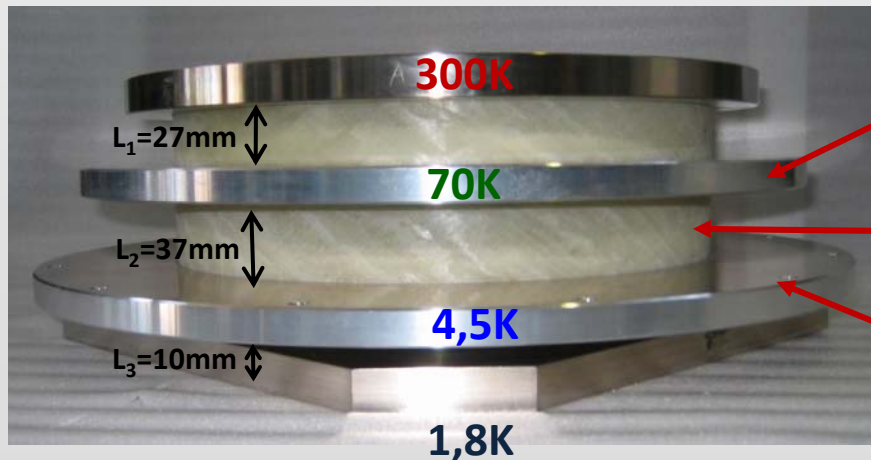
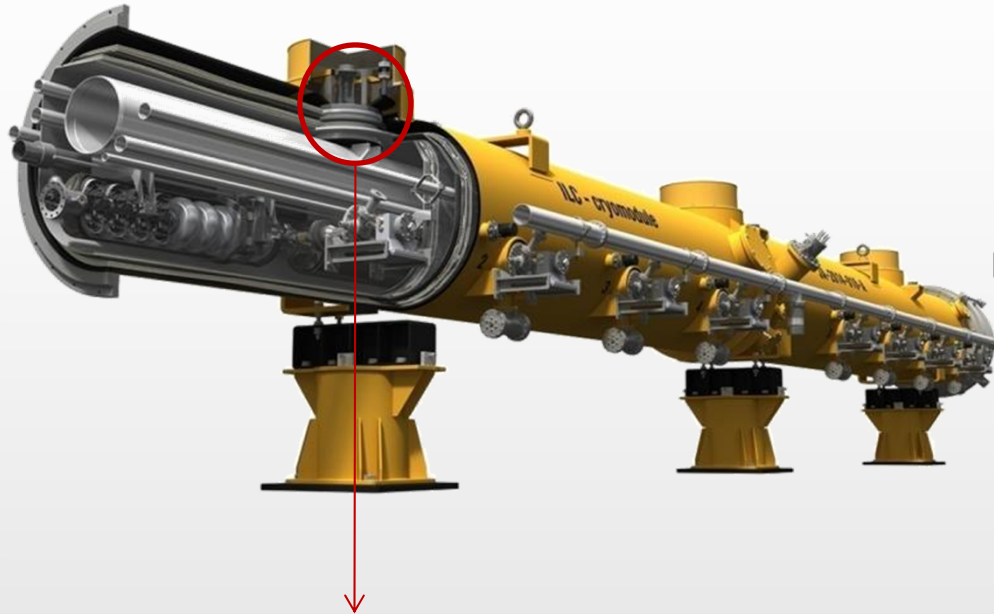
Tirants latéraux entre la cavité et l'enceinte à vide, thermalisés à 80K



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 :

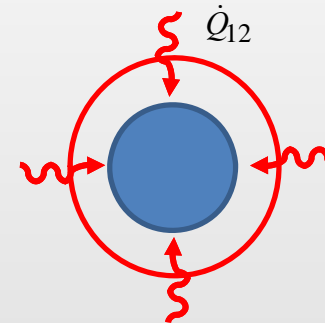
$$\dot{Q}_{12} = \sigma \cdot F_{12} \cdot S_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

σ : Stefan Boltzmann constant (=5.67x10⁻⁸ W/m²K⁻⁴)
 S_1 : Surface area (m²)
 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 ε (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) :

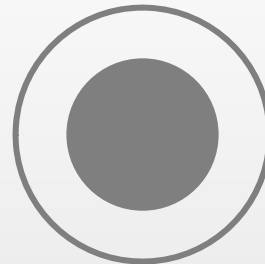
Diamètre = 0.5 m

$\varepsilon = 0.1$

$T^\circ = 2K$

ASPECTS THERMIQUES

➤ **Sans écran :**



Pour 1m de longueur :

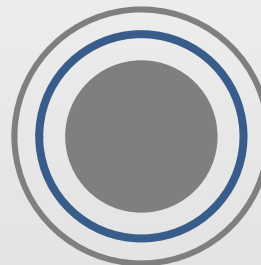
$$\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_{\text{massefroide}} \cong 53W \end{array} \right.$$

➤ **Avec un écran en aluminium:**

Diamètre = 0.7 m

$\varepsilon = 0.1$

$T^\circ = 75K$



$$\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_{\text{écran-therm}} \cong 68W \\ \dot{Q}_{\text{massefroide}} \cong 0.2W \end{array} \right.$$

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

30 couches MLI de 293K: 1.5W/m²



$$\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_{\text{écran-therm}} \cong 3.3W \\ \dot{Q}_{\text{massefroide}} \cong 0.2W \end{array} \right.$$

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 :

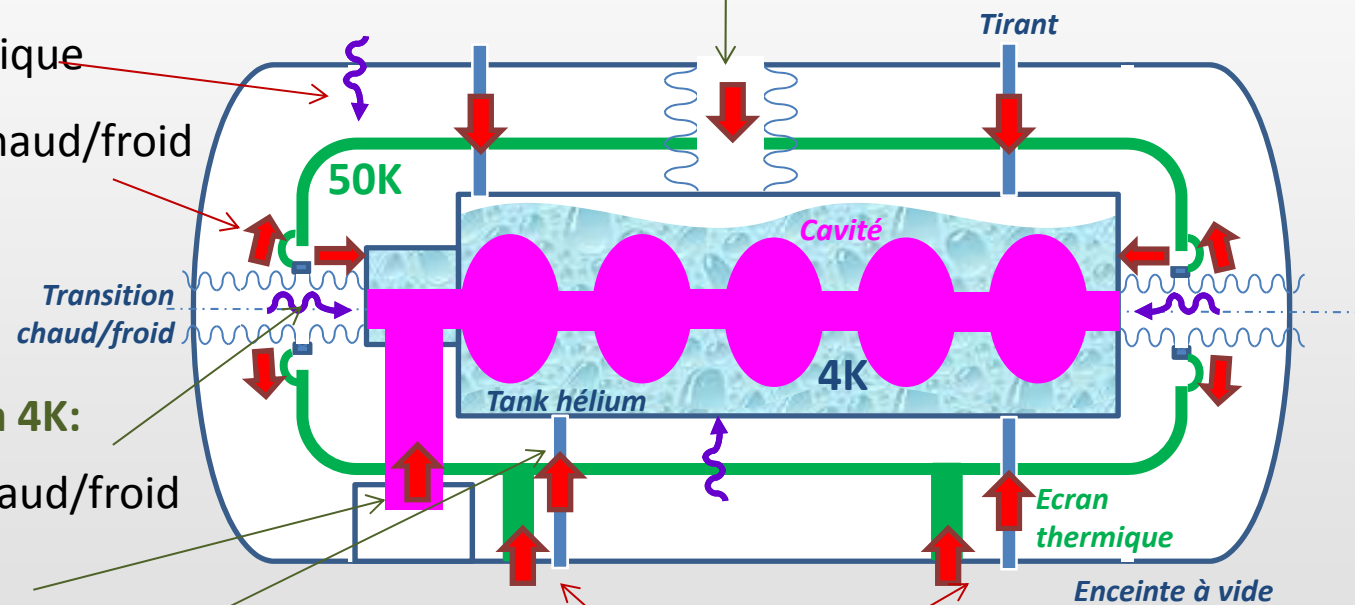
Charges statiques à 50K :

- 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)

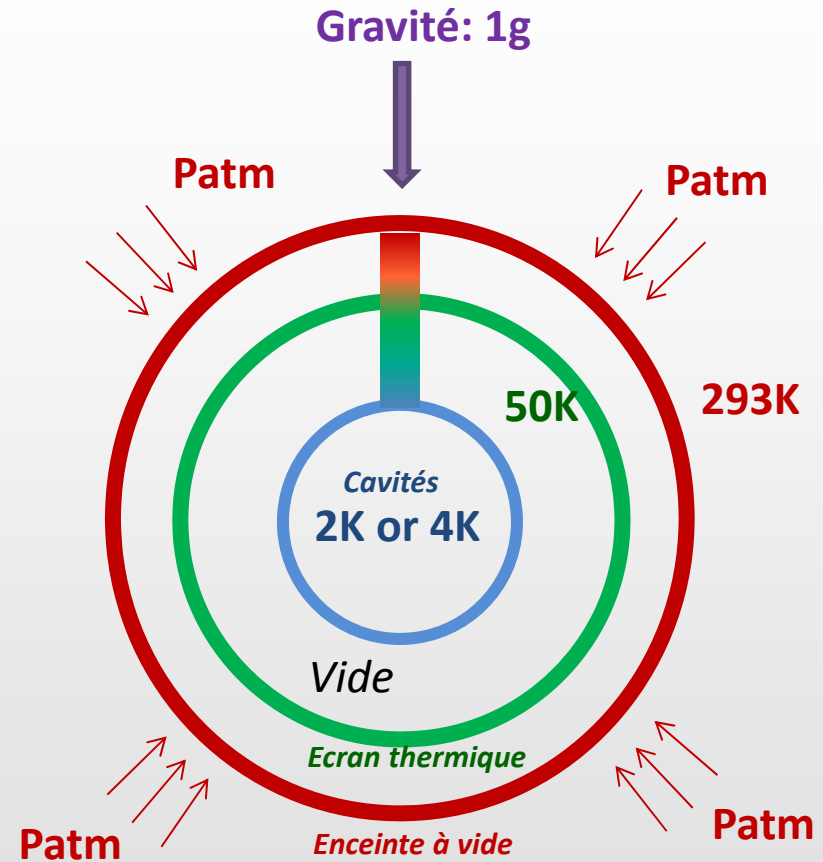
Composants	Charges statiques à 50K [W]	Charges statiques à 2K [W]
Ecran thermique	10	0.4
Système de supports (tirants)	4	0.2
Transitions chaud/froid	6	0.4
Equipement de sécurité	4.1	0.25
2 coupleurs	-	2.
Vannes de controle	3	1.5
Instrumentation	8	0.2
Total	35	5.

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

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

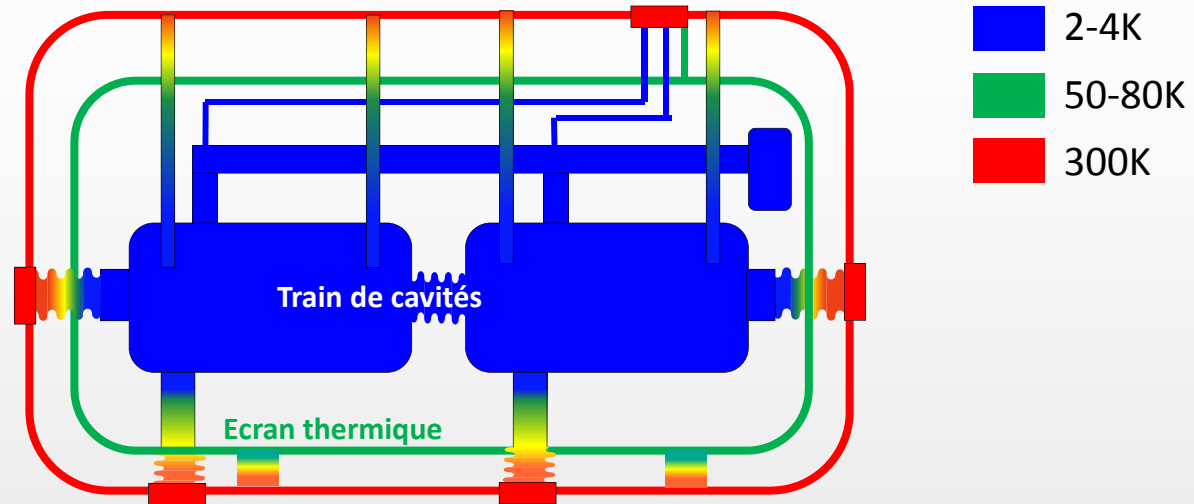
- ❑ **Champ de température**
 - Contractions thermiques
 - Contraintes thermiques
- ❑ **Vide d'isolation**
 - Pression externe
- ❑ **Gravité**
 - Poids des composants



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

Champ de température dans un assemblage → Contractions et contraintes thermiques

Champ de température dans un cryomodule après mise en froid :



→ Des contractions thermiques apparaissent dans tous les composants:

- Train de cavités à 2/4K: niobium, titane, acier inox...
- Ecrans thermiques à 50/80K: cuivre, aluminium
- Lignes cryogéniques de 2K à 300K: acier inox, aluminium...
- Supports de 2K à 300K

→ Ces contractions peuvent être à l'origine de fortes contraintes thermiques.

Réduire les contraintes dépend du type de connexion entre les composants :

- Supportage,
- Transfert de fluides cryo
- Circuit de vide

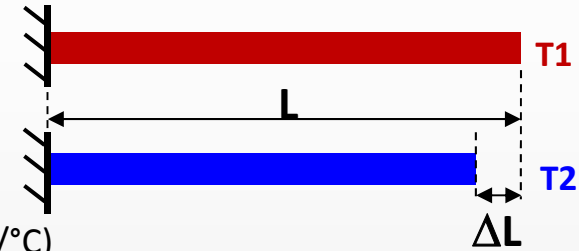
Comment estimer les contractions et contraintes thermiques?

Contractions thermiques :

➤ **Un tirant :**

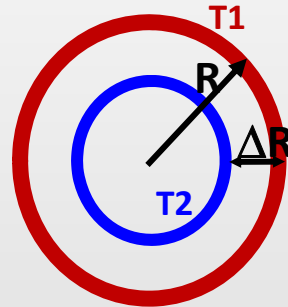
$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T$$

α : Coefficient de dilatation thermique (1/K or 1/°C)
 L : Longueur caractéristique (m)
 ΔT : Différence entre températures finale et initiale (K or °C)



➤ **Un tube :**

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



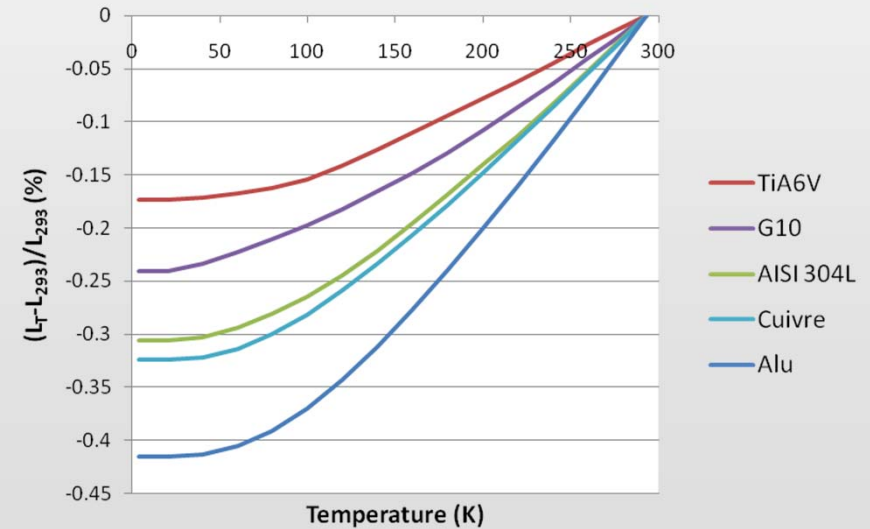
Contraintes thermiques :

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

D'après la loi de Hooke :

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

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



Limiter les contraintes thermiques σ selon le type de connexion

- Pour supporter,
- Pour le transfert de fluide cryo
- Pour le circuit de vide

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

- **Matériau avec un faible coefficient de dilatation thermique :** ↘ α

Ex : Résines, composites, TiA6V

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

Ex : Résines, composites

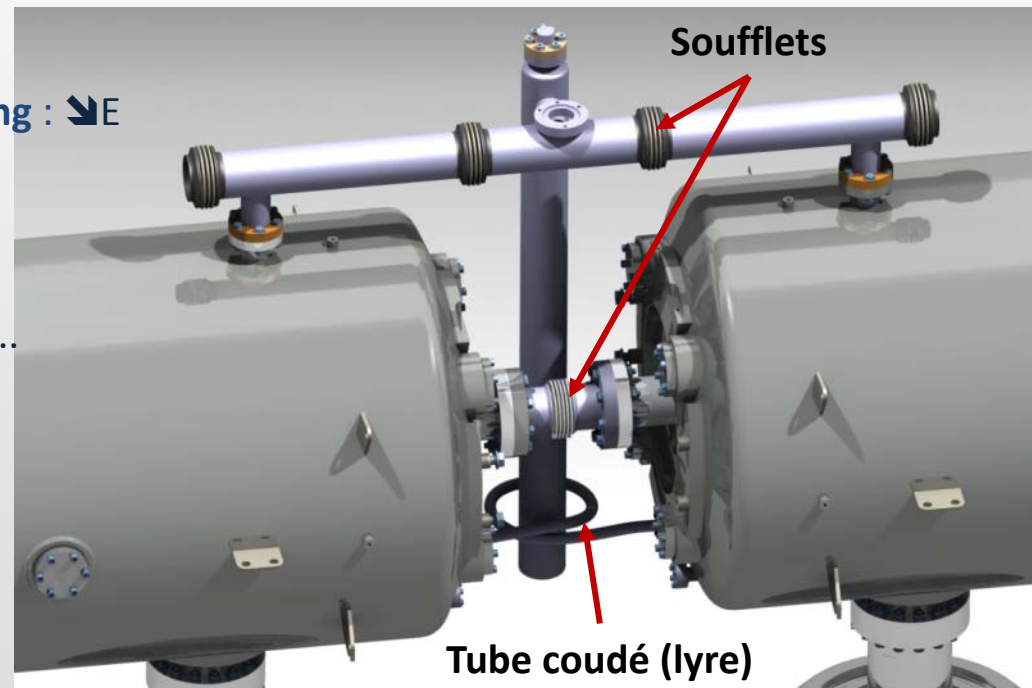
- **Géométrie :** ↗ Flexibilité

Ex : soufflet compensateur, tube coudé...

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

Ex : liaison rotule, liaison glissière

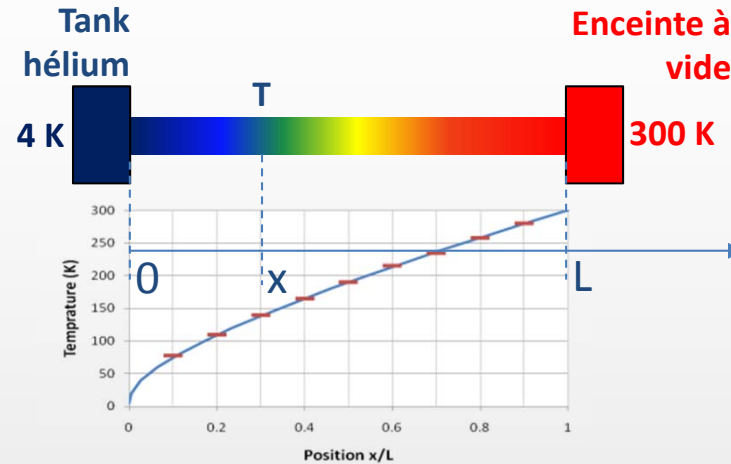
- **Matériau à haute limite élastique R_e ou haute limite à la rupture R_m**



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 :

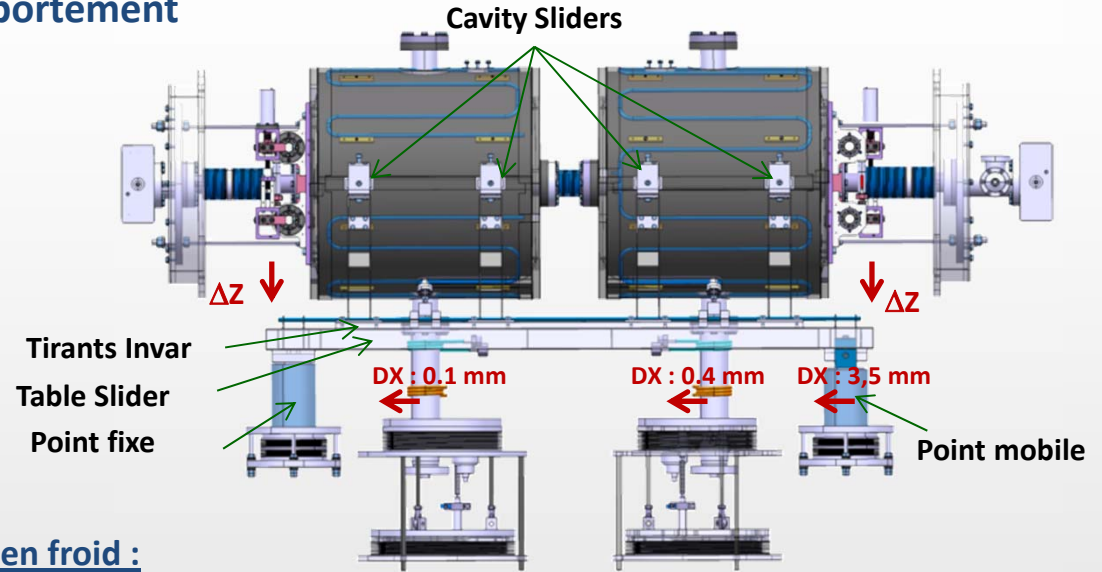
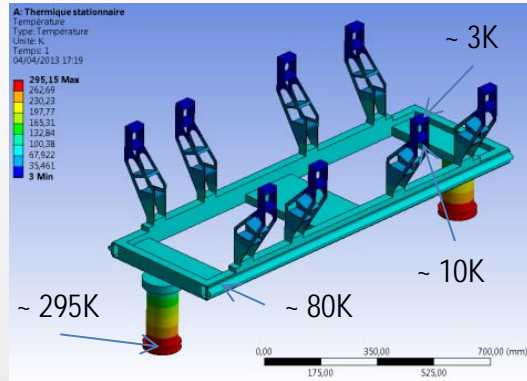
$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\Delta L + \Delta R}{L_{293}} \quad (\text{Tank hélium et enceinte à vide sont supposés infiniment rigide})$$

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

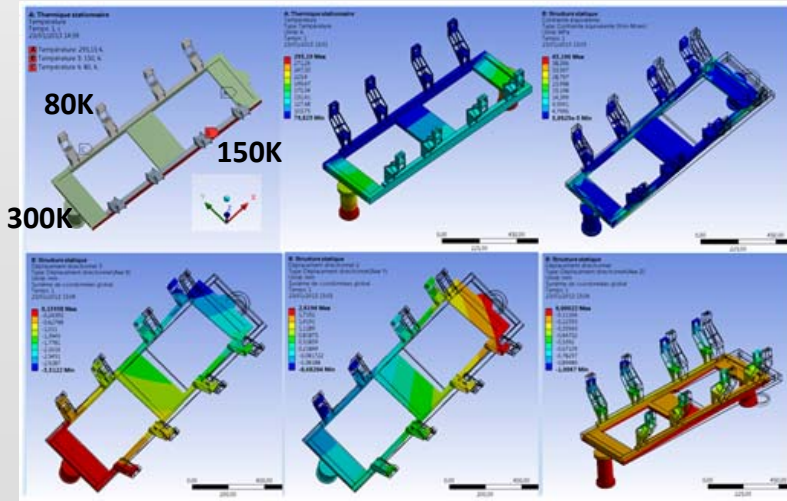
Exemple : Supports du cryomodule MAX

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.

	ΔT_{max}	δX	δY	δZ	$\sigma_{v.M.}$
Etat transitoire	70 K (150-80)	3,4 mm	2,7 mm	1 mm	43 MPa
Etat stationnaire	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).

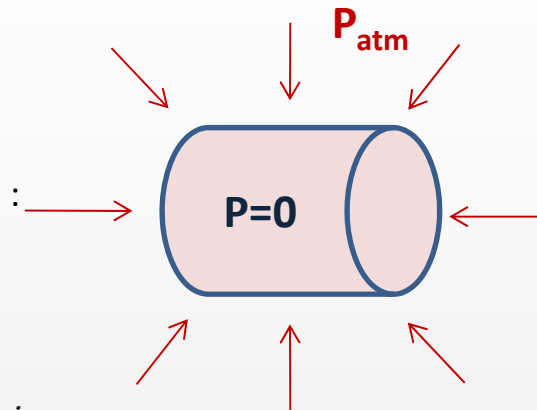
Dans le CODAP :

- 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.

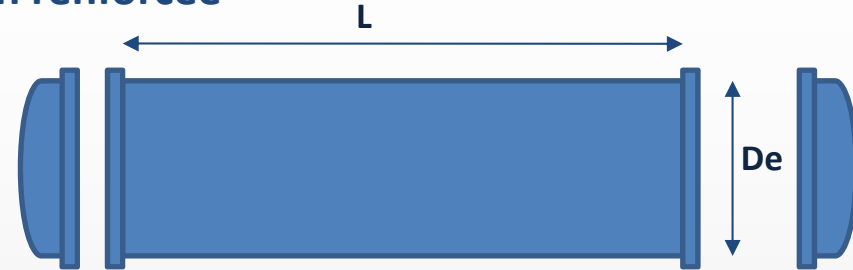
Déterminer la pression critique de flambage :

- 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

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

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

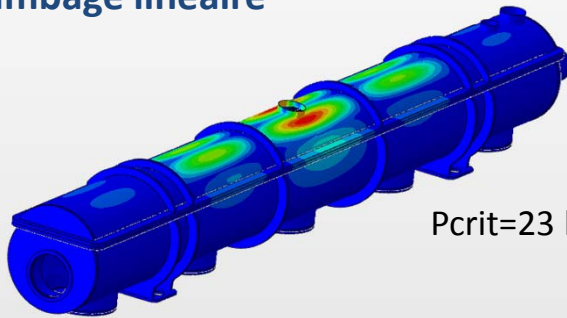
➔ Facteur de sécurité ~ 3 : $P_{crit} \text{ (Roark)} = 3,15 \times P_a \text{ (CODAP)}$

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

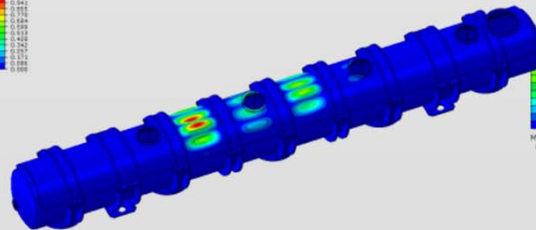
➤ Flambage linéaire



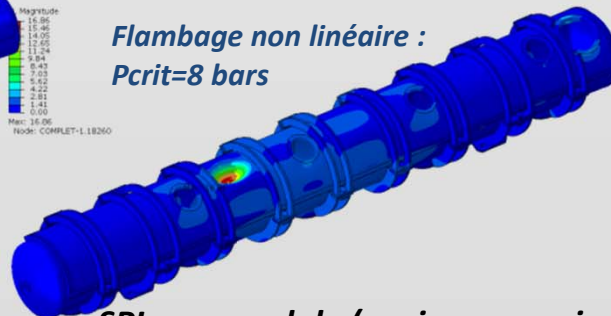
$P_{crit}=23$ bars (pas de coef. sécurité)

➤ Etude détaillée : Flambage non linéaire

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

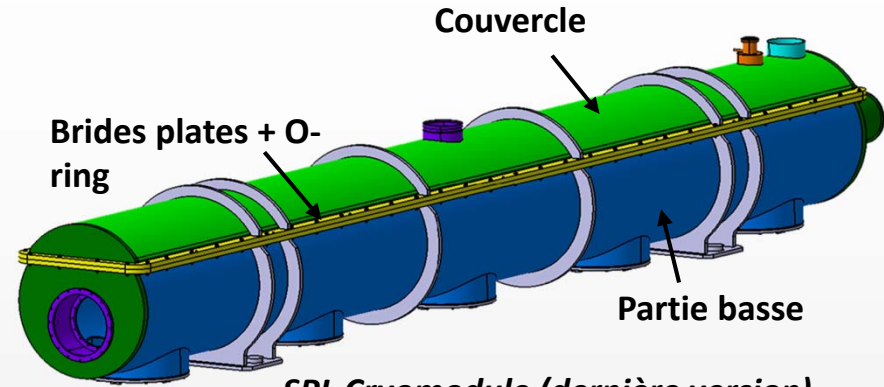


Flambage linéaire:
 $P_{crit}=42$ bars

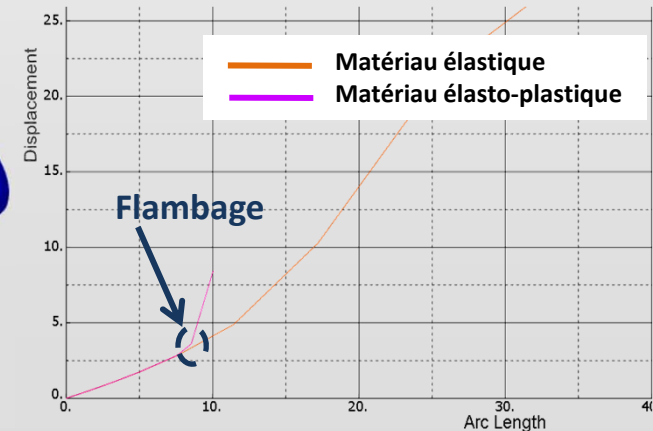


Flambage non linéaire :
 $P_{crit}=8$ bars

SPL cryomodule (ancienne version)



SPL Cryomodule (dernière version)

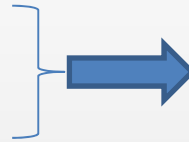


- INTRODUCTION
- FONCTIONS D'UN CRYOMODULE
- COMPOSANTS PRINCIPAUX
- SCHEMA CRYOGÉNIQUE D'UN CRYOMODULE
- ASPECTS THERMIQUES
- ASPECTS MECANIQUES
- DIFFÉRENTS CONCEPTS DE SUPPORTAGE**
- PROCESS D'ASSEMBLAGE
- CONCLUSION

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



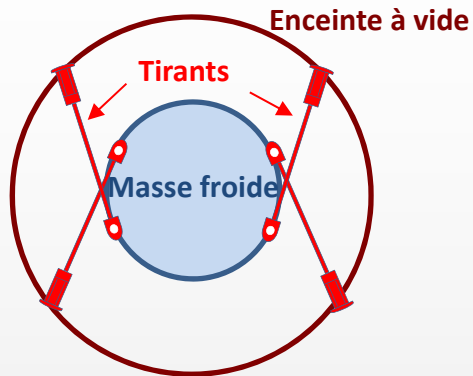
Structure épaisse et massive

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

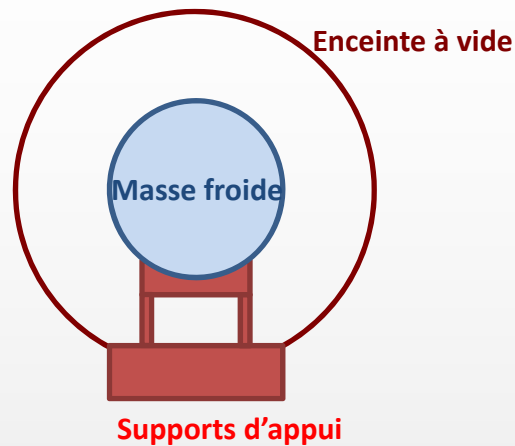


Le design mécanique des supports dépend de 2 contradictions techniques

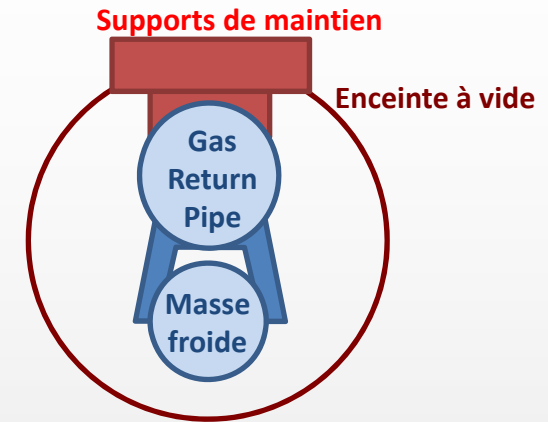
➤ **Tirants**



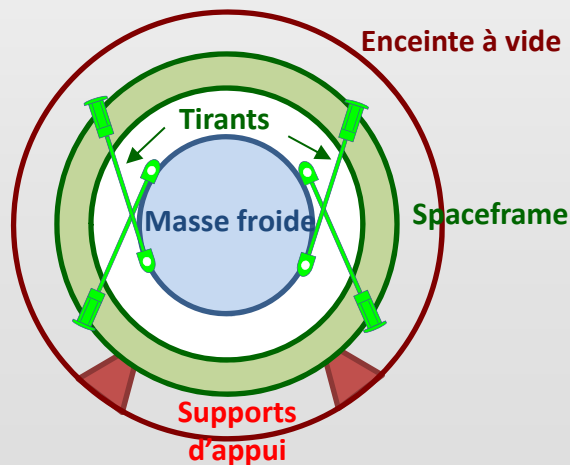
➤ **Supports d'appui**



➤ **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
- ...

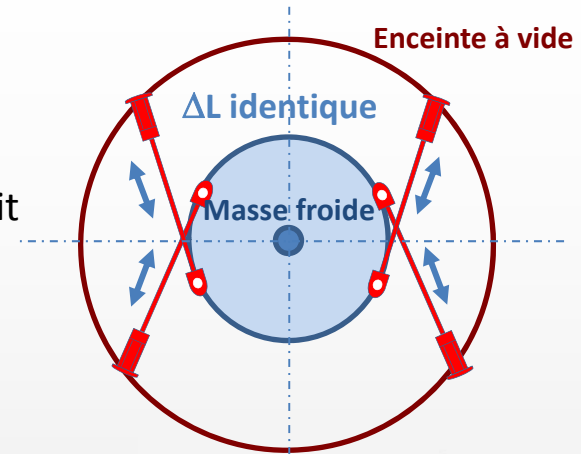
➔ Il n'y a pas de solution unique ...

➤ **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**

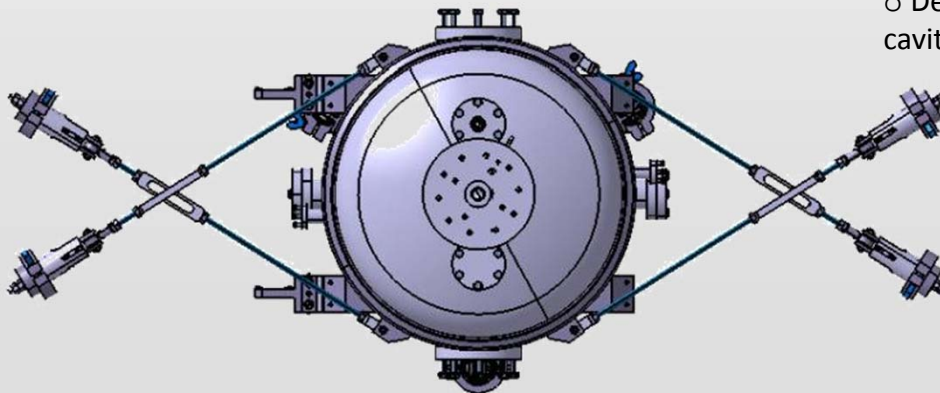
Possibilité d'ajuster l'alignement après mise en froid



Exemple : Cryomodule B - SPIRAL2

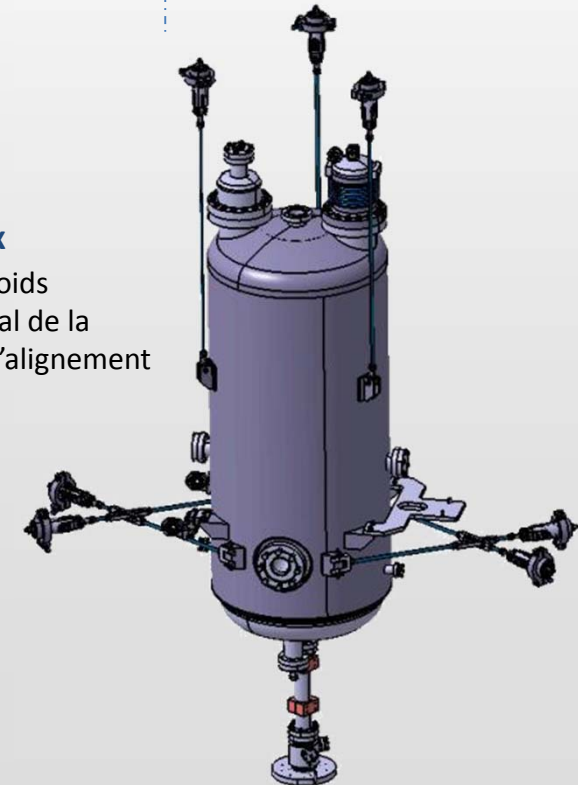
Tirants antagonistes en horizontal

- 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



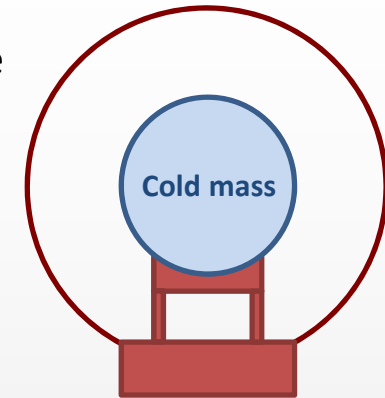
➤ **Utilisation de supports d'appui (avec table)**

- 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**

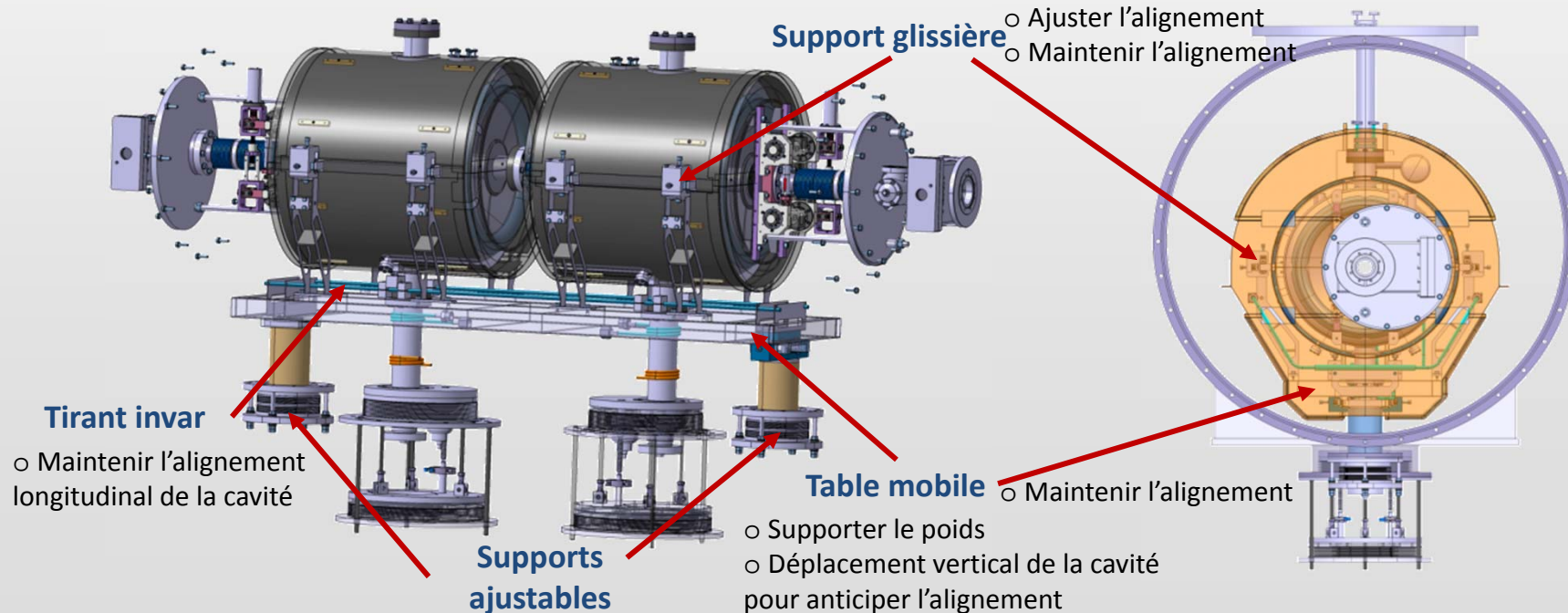
- Les contractions thermiques de la table ne sont pas transmises à la cavité
- La position longitudinale de la cavité est fixée par le tirant invar

Enceinte à vide

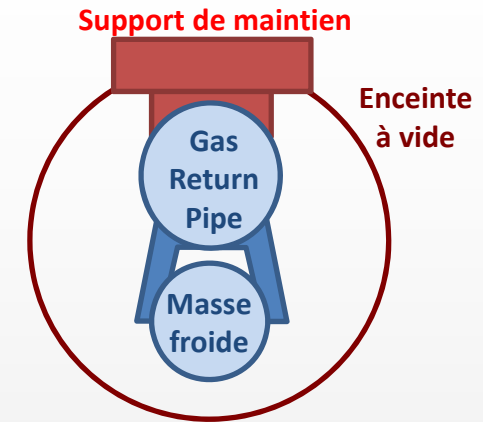


Supports d'appui

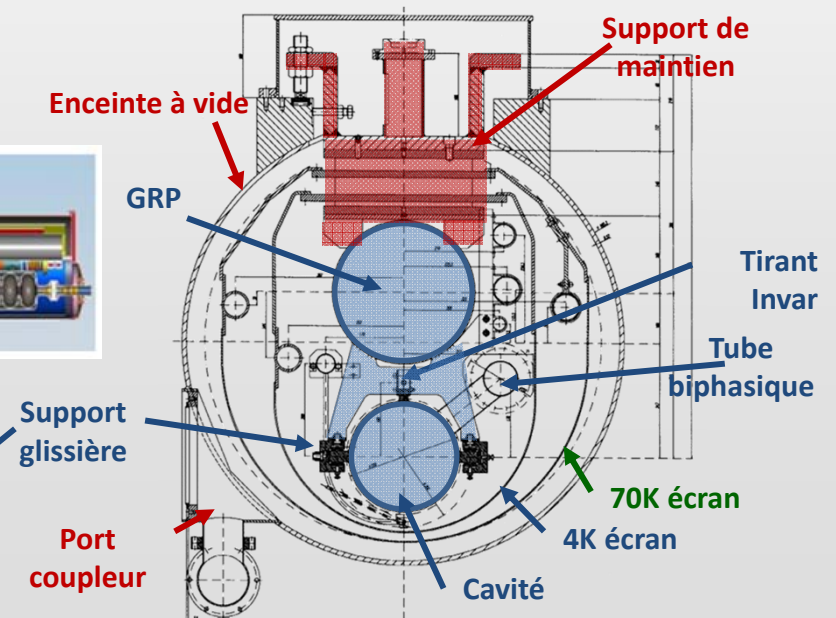
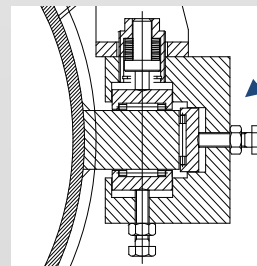
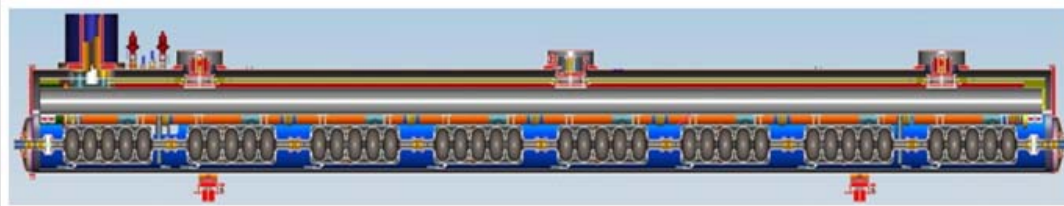
Exemple : Cryomodule MAX pour les cavités spoke



- **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



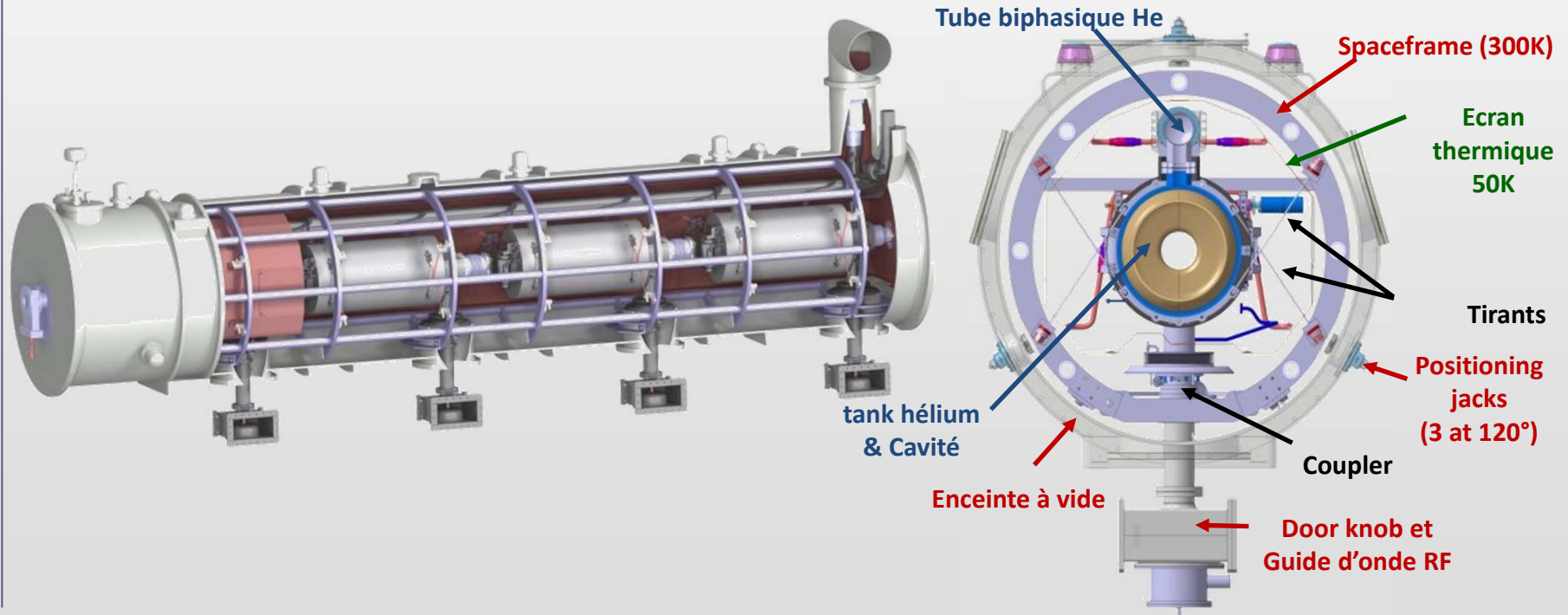
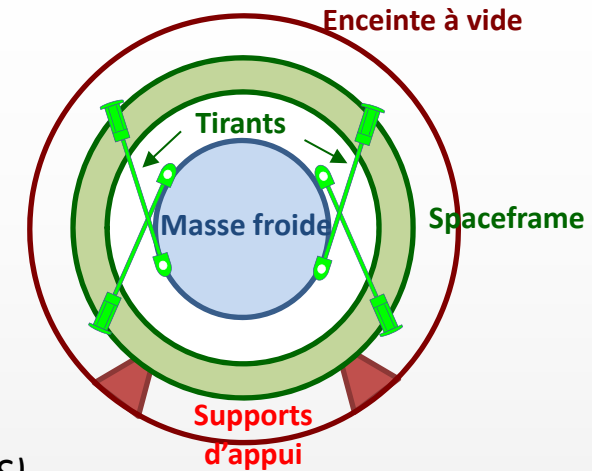
➤ Utilisation d'un cadre support

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

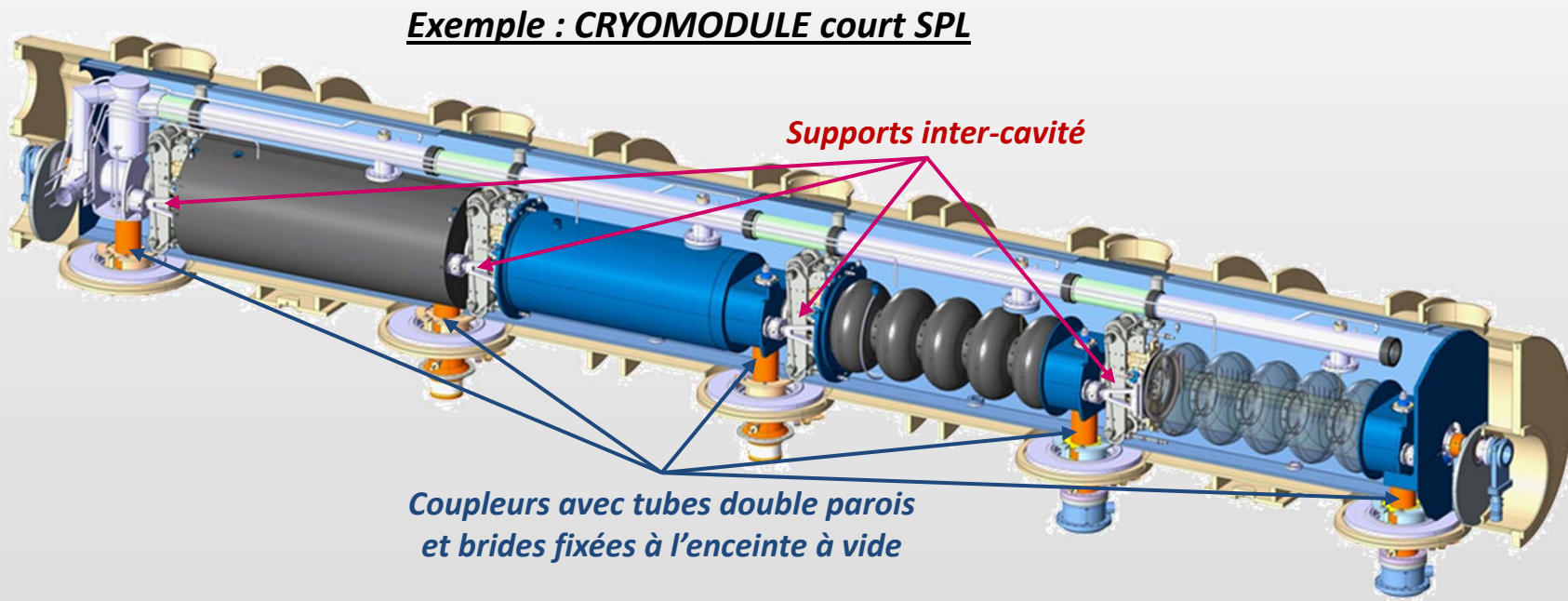
➤ Utilisation de tirants antagonistes

Préserver l'alignement des cavités après la mise en froid

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



- **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)

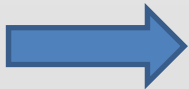


- INTRODUCTION
- FONCTIONS D'UN CRYOMODULE
- COMPOSANTS PRINCIPAUX
- SCHEMA CRYOGÉNIQUE D'UN CRYOMODULE
- ASPECTS THERMIQUES
- ASPECTS MECANIQUES
- DIFFÉRENTS CONCEPTS DE SUPPORTAGE
- PROCESS D'ASSEMBLAGE**
- CONCLUSION

- ❑ **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 :

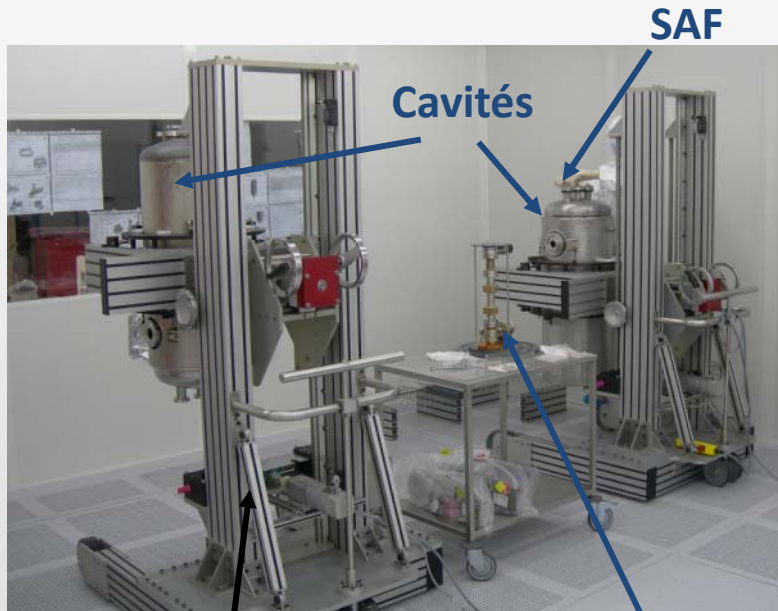


- **Des outillages spécifiques**
- **Des infrastructures adéquates**

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

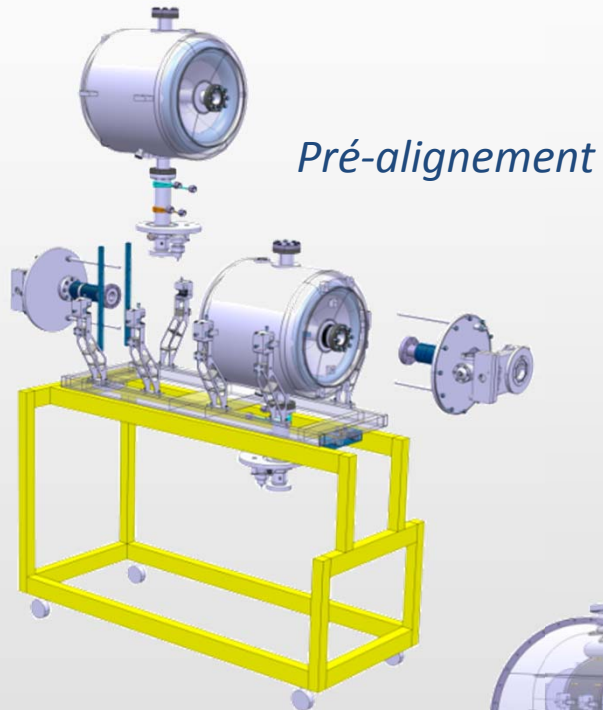
En dehors de la salle blanche :

PROCESS D'ASSEMBLAGE



En salle blanche :

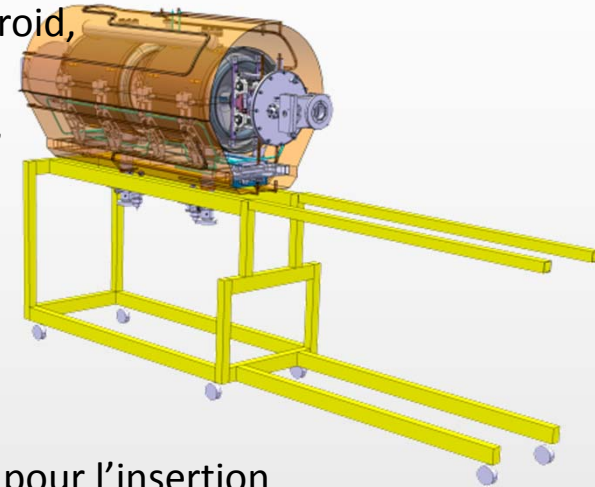
Assemblage du train de cavités avec coupleurs sur table mobile



En dehors de la salle blanche :

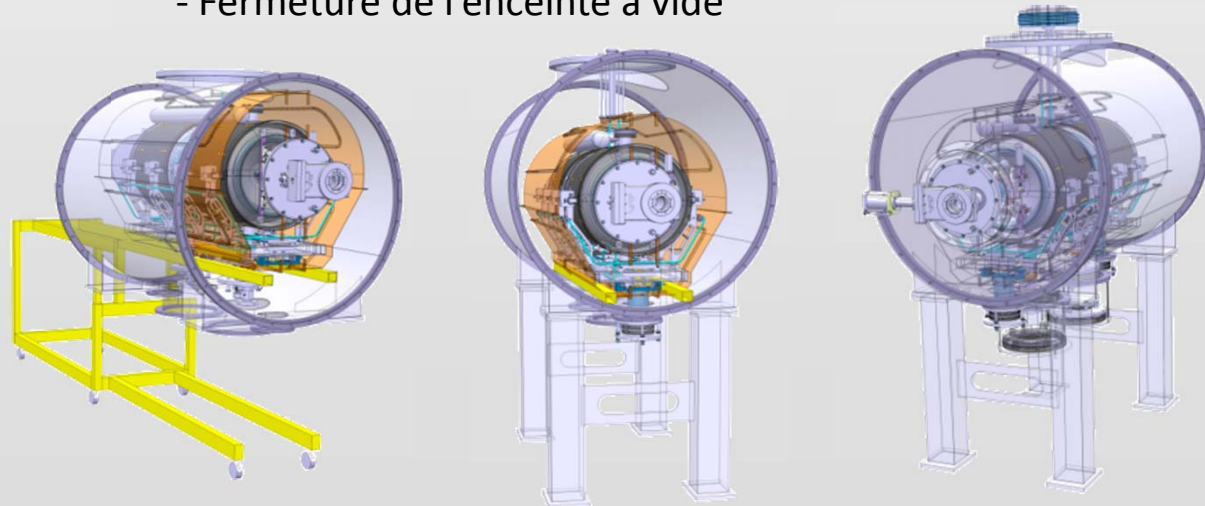
Finalisation de l'habillage des cavités :

- Système d'accord à froid,
- Ecran magnétique,
- Lignes cryogéniques,
- Ecran thermique



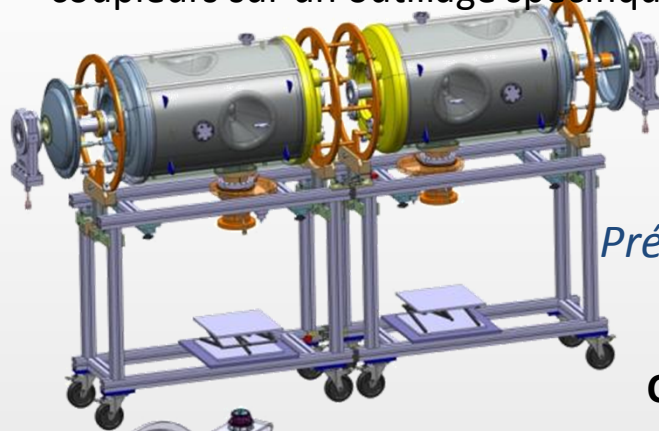
Cryostating:

- Déplacement de l'enceinte pour l'insertion
- Assemblage des supports d'appui,...
- Fermeture de l'enceinte à vide

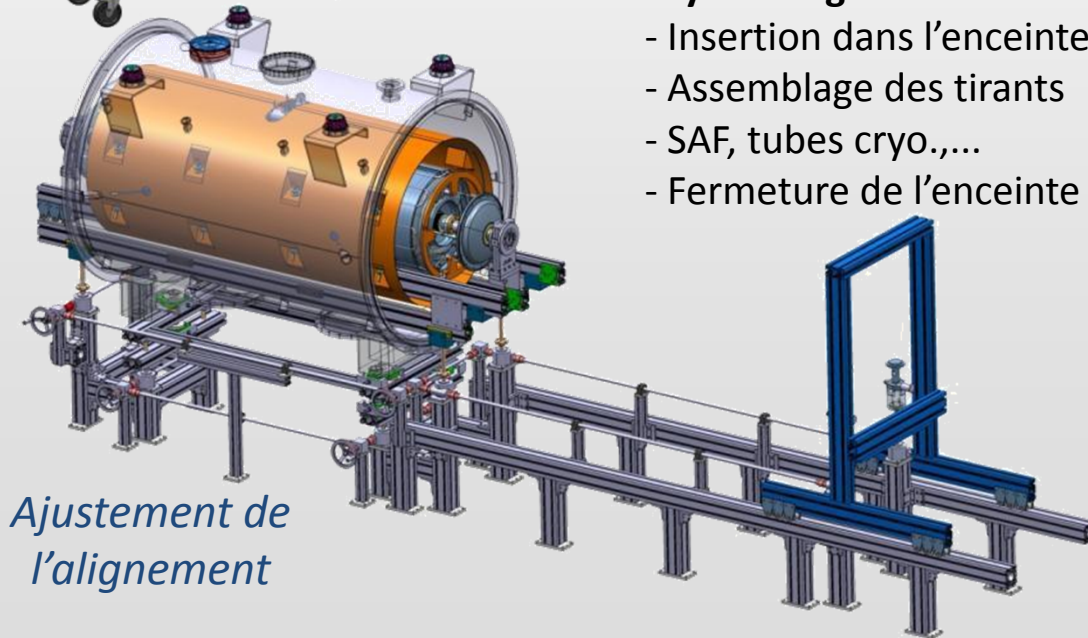


En salle blanche :

Assemblage du train de cavités avec coupleurs sur un outillage spécifique



Pré-alignement

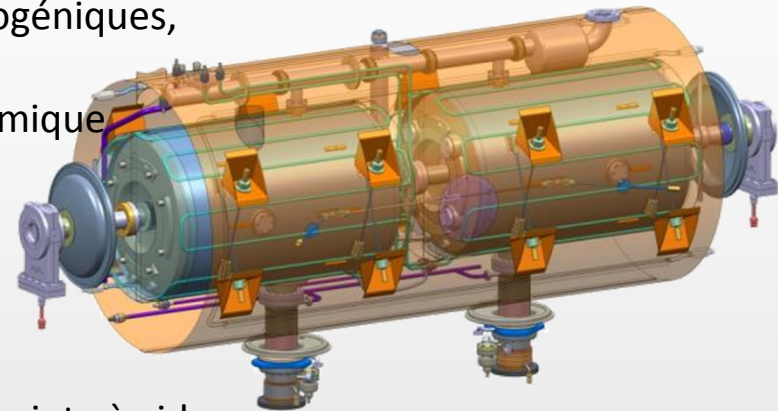


Ajustement de l'alignement

En dehors de la salle blanche :

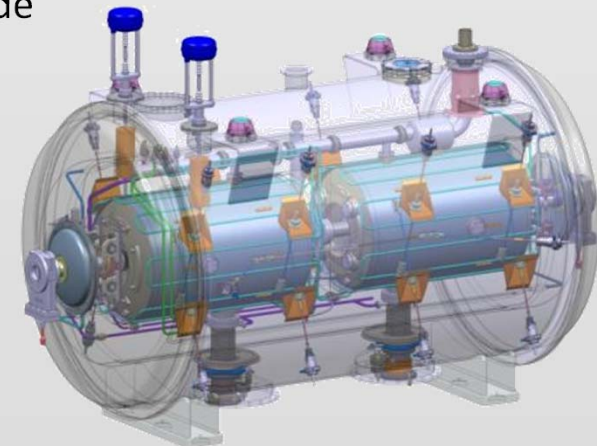
Finalisation de l'habillage des cavités :

- 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

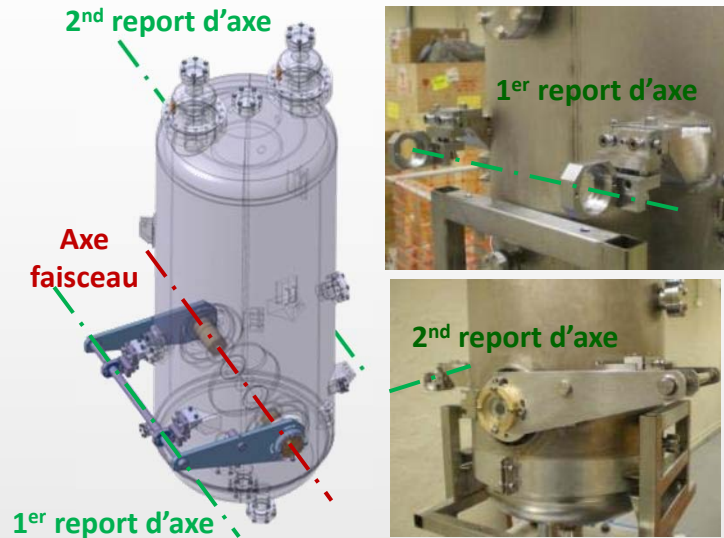


Retro-réfecteur



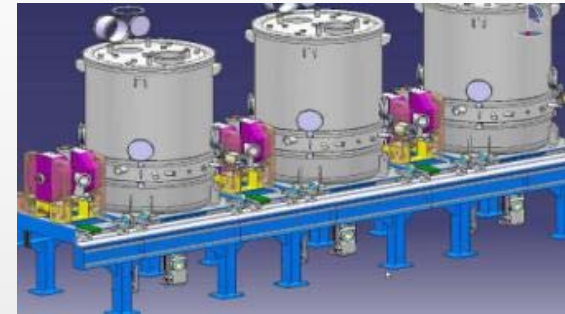
Sphère Taylor Hobson

Reports de l'axe faisceau sur le tank hélium :



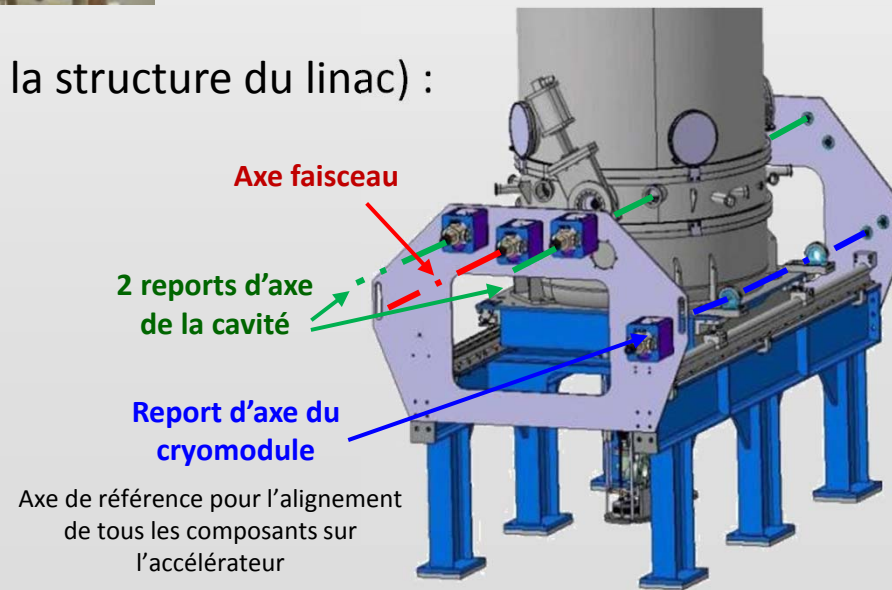
Les défauts de tolérance maximum de l'alignement global sont :

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



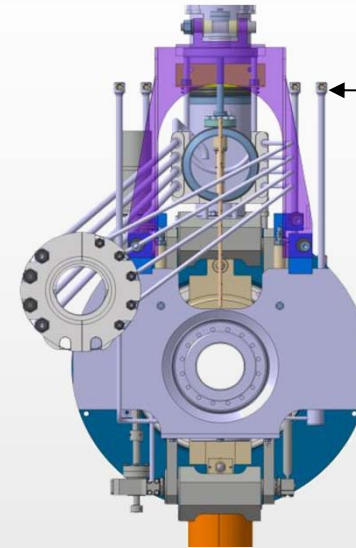
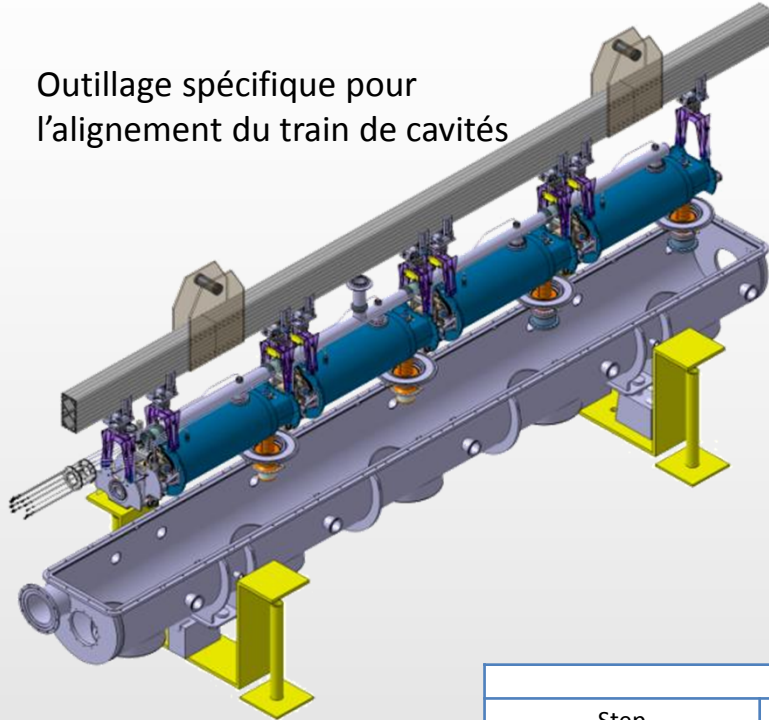
Banc d'alignement (= section de la structure du linac) :

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



Exemple du budget de tolérance : Cryomodule SPL

Outillage spécifique pour l'alignement du train de cavités



4 sphères par cavité pour ajuster l'alignement

PROCESS D'ASSEMBLAGE

BUDGET OF TOLERANCE			
Step	Sub-step	Tolerances (3 σ)	Total envelopes
Cryo-module assembly	Cavity and He vessel assembly	± 0.1 mm	Positioning of the cavity w.r.t. external referential ± 0.5 mm
	Supporting system assembly	± 0.2 mm	
	Vacuum vessel construction	± 0.2 mm	
Transport and handling (± 0.5 g any direction)	N.A.	± 0.1 mm	Reproducibility/ Stability of the cavity position w.r.t. external referential ± 0.3 mm
Testing/operation	Vacuum pumping	± 0.2 mm	
	Cool-down		
	RF tests		
	Warm-up		
	Thermal cycles		

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 composé actuellement de :

- 5 ingénieurs
- 6 dessinateurs

D'autres collègues de la division Accélérateurs y participent (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