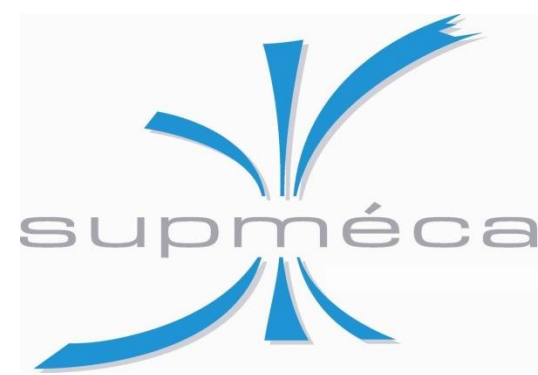


DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea



# RÉALISATION D'UN CRYOSTAT DE TEST DE 300 kN EN COMPRESSION ET EN TRACTION SOUS DES TEMPÉRATURES VARIANT DE 4 K À 200 K

Soutenance de stage | Agnès VILMER  
Sous la direction de Christophe MAYRI

[www.cea.fr](http://www.cea.fr)

6 NOVEMBRE 2014

Présentation du sujet

Choix du design du cryostat d'essai

Conception en compression

Solutions techniques

Conclusion

# PRÉSENTATION DU SUJET

Présentation du CEA

Qu'est ce qu'un supraconducteur?

Qu'est ce qu'un cryostat?

Définition du besoin

Définition des contraintes extérieures

Présentation des machines d'essai du laboratoire

Cryostats d'essai existants

## Présentation du CEA



CEA  
Saclay

DSM

- Direction des Sciences de la Matière

IRFU

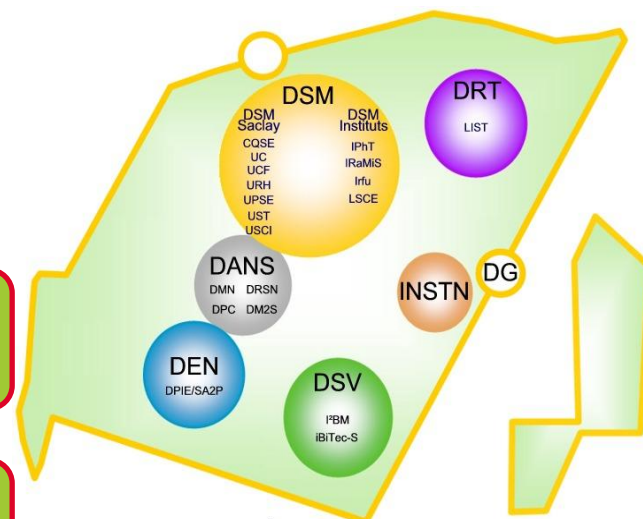
- Institut de Recherche sur les Lois Fondamentales de l'Univers

SACM

- Service des Accélérateurs, de Cryogénie et de Magnétisme

LCSE

- Laboratoire de Cryogénie et de Station d'Essai



ENTREPRISES IMPLANTÉES



DIRECTIONS FONCTIONNELLES

- Pôle Maîtrise des Risques (MR)**
  - Direction Centrale de la Sécurité (DCS)
  - Direction Juridique et du Contentieux (DJC)
  - Direction de la Protection et de la Sûreté Nucléaire (DPSN)
  - Inspection Générale et Nucléaire (IGN)
- Pôle Gestion des Systèmes d'Information (GSI)**
  - Direction des Achats et des Partenaires Stratégiques (DAPS)
  - Direction Financière (DF)
  - Direction des Systèmes d'Information (DSI)
- Pôle Stratégie et Relations Extérieures (SRE)**
  - Direction des Relations Internationales (DRI)
- Pôle Ressources Humaines et Formation (RHF)**
  - Direction des Ressources Humaines et des Relations Sociales (DRHRS)

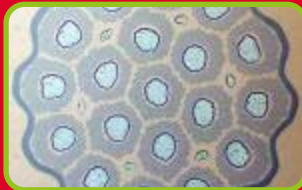
## Présentation du CEA

### Le LCSE – Laboratoire



#### Aimant supraconducteurs pour la recherche

- Imageur à haut champ magnétique Iseult
- Bobine supraconductrice pour l'aimant hybride du LNCMI
- Test des aimants supraconducteurs de l'expérience Katrin



#### Développement pour les aimants du futur

- R&D sur le refroidissement des aimants supraconducteurs
- Utilisation des supraconducteurs à haute température critique
- Développement des futurs aimants supraconducteur du LHC



#### Cryogénie

- Station d'essai des bobines
- Les grands systèmes de refroidissement



#### Accélérateurs linéaires d'ions à haute intensité

- Accélérateur prototype

## Qu'est ce qu'un supraconducteur?

- Absence de résistivité dans le supraconducteur
- Pas de perte par effet Joule
- Nécessité d'être à température cryogénique



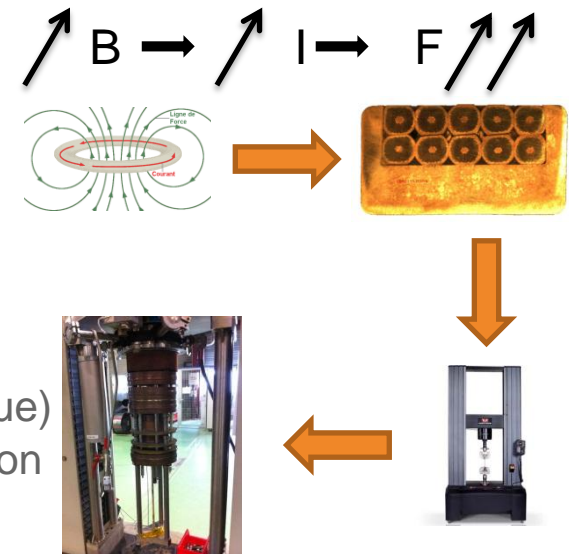
## Qu'est ce qu'un cryostat?

- Récipient thermiquement isolé sous pression permettant de descendre à des températures cryogéniques (inférieure à 120 K)
- Nécessité de réduire les pertes thermiques avec l'extérieur: par rayonnement et par conduction



## Définition du besoin

- Augmentation des champs magnétiques induits par les courants dans les supraconducteurs
  - ⇒ Nécessité de faire des tests avec des contraintes plus importantes
  - ⇒ Test sur des échantillons de taille plus grande
- Intérêt pour les HTC (conducteur haute température critique)
  - Nécessité de pouvoir faire des tests sur des matériaux non supraconducteurs à des températures variables



## Définition des contraintes extérieures

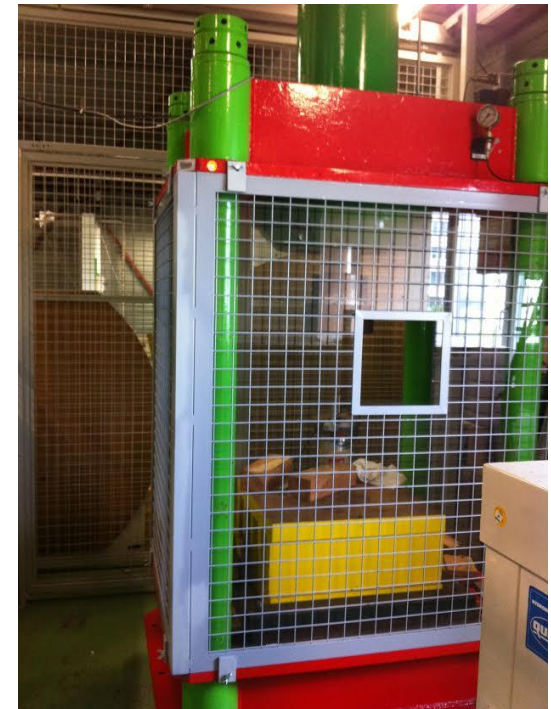
- Contraintes encombrement
- Contraintes budgétaires
- Contraintes temporelles



## Présentation des machines d'essai du laboratoire LCSE

Les machines d'essai:

- La Instron 5500R 150 kN
- La Instron 5586 300 kN
- Presse hydraulique 2 000 kN



## Cryostats d'essai existants



Cryostat supportant  
5 tonnes



Cryostat supportant  
8 tonnes en traction  
15 en compression



« Chaussette »  
d'un cryostat

# **CHOIX DU DESIGN DU CRYOSTAT D'ESSAI**

Comparaison des deux solutions possibles

Critères mécaniques

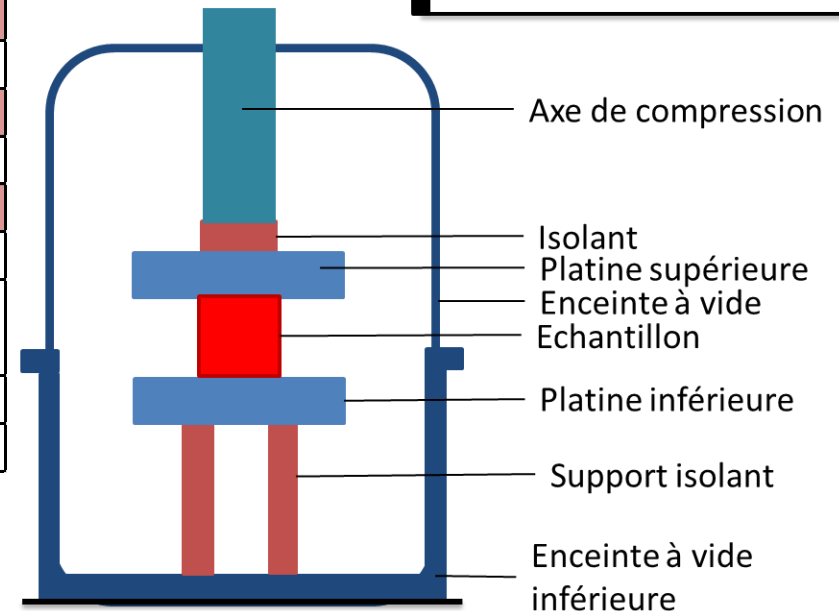
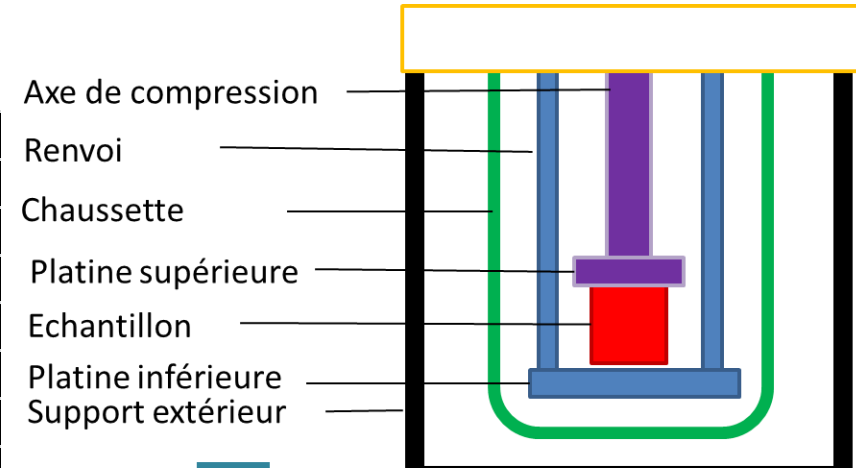
Comparaison du point de vue mécanique

Comparaison du point de vue thermique

Solution choisie

## Comparaison entre les deux solutions possibles

	Solution 1	Solution 2
<b>Axe de compression</b>		
Force exercée	300 kN	300 kN
Flambage	Oui	Oui
<b>Mécanique</b>	Renvoi	Support isolant
Flambage	Support extérieur	Support isolant
Transmission effort	Indirect	Direct
<b>Enceinte à vide</b>	Thermos	Cryostat à écranter
Débattement	Petit	Grand & Petit
Étanchéité	Facile	Complicé
<b>Refroidissement</b>	Bain	Indirect
<b>Ecran thermique</b>	Disque d'écrantage	Ecran complet
<b>Echantillon</b>		
Déplacement	De l'ensemble, après fermeture	Fermeture cloche
Risque de mouvement	Oui	Non
Accès	A travers les renvois	A 360°



## Critère mécanique

### ■ Critère de Von Mises

Il faut satisfaire le critère de Von Mises pour rester dans le domaine élastique du matériau

On a le tenseur des contraintes en compression et en traction  $\bar{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

La contrainte équivalente :  $|\sigma_e| = |\sigma_1| = \left| \frac{F}{A} \right|$

On choisit ici un coefficient de sécurité de 1,5

Critère à vérifier:  $|\sigma_e| < \frac{R_e}{1.5}$



## Critère mécanique

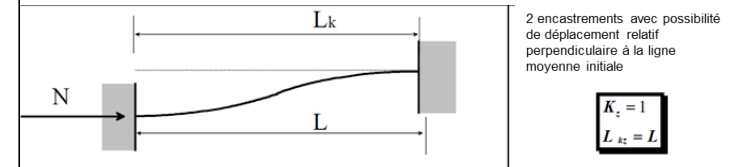
### ■ Flambage – Méthode de Rankine/ Euler

Le flambage est un fléchissement d'une pièce dû à une instabilité de structure

Méthode de Rankine - Euler		
$0 \leq \lambda_{col} < 20$	$20 \leq \lambda_{col} < \lambda_{lim Euler}$	$180 \dots 200 \geq \lambda_{col} \geq \lambda_{lim Euler}$
<i>Compression simple</i>	<i>Rankine</i>	<i>Euler</i>
$\sigma = \frac{N}{A} < \sigma_{adm comp}$	$\sigma = \frac{N}{A} (1 + \bar{\lambda}^2) \leq \sigma_{adm Rankine}$	$\sigma = \frac{N}{A} \bar{\lambda}^2 \leq \sigma_{adm Euler}$
$\sigma_{adm comp} = \frac{R_e}{S_{comp}}$ ( $S_{comp} \approx 1.5$ )	$\sigma_{adm Rankine} = \frac{R_e}{S_{Rankine}}$ ( $S_{Rankine} \approx 1.7 \dots 2 \dots 2.2$ )	$\sigma_{adm Euler} = \frac{R_e}{S_{Euler}}$ ( $S_{Euler} \approx 2.5 \dots 3 \dots 3.5$ )
$N_{adm} = \sigma_{adm comp} A$ $= \frac{R_e A}{S_{comp}}$	$N_{adm} = \frac{\sigma_{adm Rankine} A}{(1 + \bar{\lambda}^2)}$ $= \frac{R_e A}{S_{Rankine} (1 + \bar{\lambda}^2)}$ $= \frac{\pi^2 E A}{S_{Rankine} \left( \lambda_{lim Euler}^2 + \frac{A l_f^2}{I_{min}} \right)}$	$N_{adm} = \frac{\sigma_{adm Euler} A}{\bar{\lambda}^2}$ $= \frac{R_e A}{S_{Euler} \bar{\lambda}^2}$ $= \frac{\pi^2 E I_{min}}{S_{Euler} l_f^2}$

$$i_g = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad \lambda_{lim Euler} = \pi * \sqrt{\frac{E}{R_e}}$$

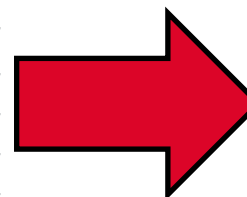
$$\lambda_{col} = \frac{l_f}{i_g} \quad \bar{\lambda} = \frac{\lambda_{col}}{\lambda_{lim Euler}}$$



## Comparaison pour l'axe de compression du point de vue mécanique

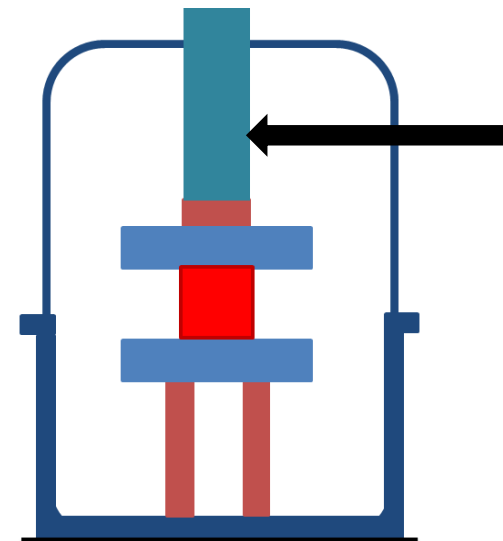
	Titane TA6V	Inox 304	G10
<b>Mécanique</b>			
Longueur Axe de compression (mm)	750	750	750
Rayon (axe) (mm)	32,5	34	54
Rayon intérieur axe (mm)	26,75	19,25	46,5
Densité (g.cm <sup>-3</sup> )	4,4	7,9	2,08
Limite élastique Re (MPa)	1110	300	350
Prix au kilo (€.kg <sup>-1</sup> )	12	4	2
Module de Young (MPa)	110 000	195 000	45 000
Poids (kg)	3,53	14,62	3,69
Contrainte de von Mises (MPa)	420	182	190
Validation du critère de Von Mises	690	118	160
Allongement (mm)	2,9	0,7	3,2
Prix	42,38 €	58,48 €	7,39 €
$\bar{\lambda}$	1,14	0,48	0,59
<b>Critère d'Euler</b>			
$N_{crit Euler}$ (kN)	↓ 915		
$N_{adm}$ (kN)	305		
Vérification critère (N)	5 009		
<b>Critère de Rankine</b>			
$N_{crit Rankine}$ (kN)		↓ 602	↓ 14 302
$N_{adm}$ (kN)		301	307 151
Vérification du critère (N)		979	7 151
<b>Coefficient de sécurité Flambage</b>			
	3,05	2,01	2,05

Bon
Moyen
Mauvais



Titane:

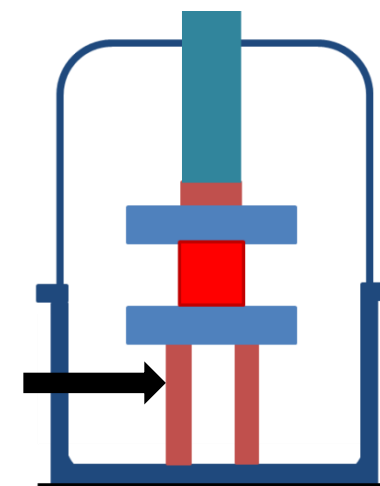
- Moins encombrant
- Plus résistant





## Comparaison pour les supports de la table du point de vue mécanique

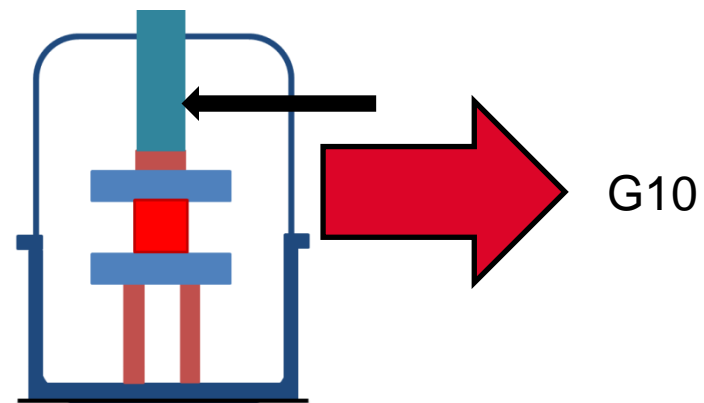
	Titane TA6V			Inox 304			G10		
Longueur Support (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Nombre de support	1	4	6	1	4	6	1	4	6
Rayon (support) (mm)	13	8,8	8	22	11,5	10	21	12	10
Rayon intérieur support (mm)	6,3	6,7	6,5	2,5	3,5	4,5	5,6	6,4	5,6
Densité (g.cm <sup>-3</sup> )	4,4	4,4	4,4	7,9	7,9	7,9	2,08	2,08	2,08
Limite élastique Re (MPa)	1 110	1 110	1 110	300	300	300	350	350	350
Prix au kilo (€.kg <sup>-1</sup> )	12	12	12	4	4	4	2	2	2
Module de Young (MPa)	110 000	110 000	110 000	195 000	195 000	195 000	45 000	45 000	45 000
Poids (kg)	0,18	0,04	0,03	1,19	0,30	0,20	0,27	0,07	0,04
Force appliquée (N)	300	75	50	300	75	50	300	75	50
Contrainte de von Mises (MPa)	1 108	1 100	1 098	300	298	299	350	348	348
Validation du critère de Von Mises (MPa)	2,28	9,85	12,38	0,18	1,58	0,65	0,33	2,47	2,20
Alongement (mm)	1,01	1,00	1,00	0,2	0,2	0,2	0,78	0,77	0,77
Prix total	2,14 €	2,16 €	2,16 €	4,74 €	4,77 €	4,75 €	0,54 €	0,54 €	0,54 €
<i>λ</i> barre	13,84	18,08	19,40	9,03	16,64	18,24	9,20	14,71	17,45
<b>Compression simple</b>									
N <sub>crit CS</sub> (kN)	451	114	76	450	113	75	450	113	75
N <sub>adm</sub> (kN) Coefficient de sécurité 1,5	301	76	51	300	75	50	300	76	50
Vérification du critère (N)	617	672	564	179	398	108	282	532	316



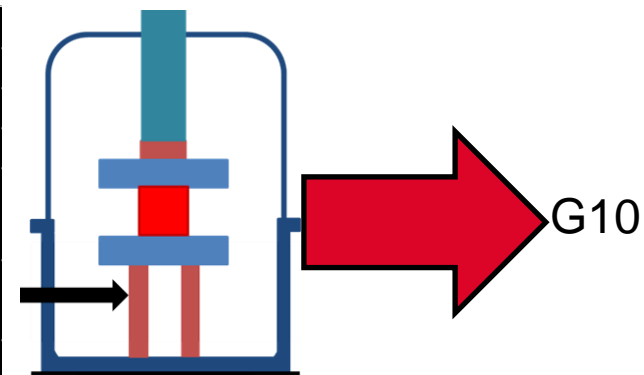
4 supports,  
Titane

## Comparaison pour l'axe de compression et des supports du point de vue thermique

	Titane TA6V	Inox 304	G10
Longueur Axe de compression (mm)	750	750	750
Delta T (K)	296	296	296
Conduction thermique ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	6,7	35	0,3
Puissance à absorber (W)	2,020	34,085	0,280

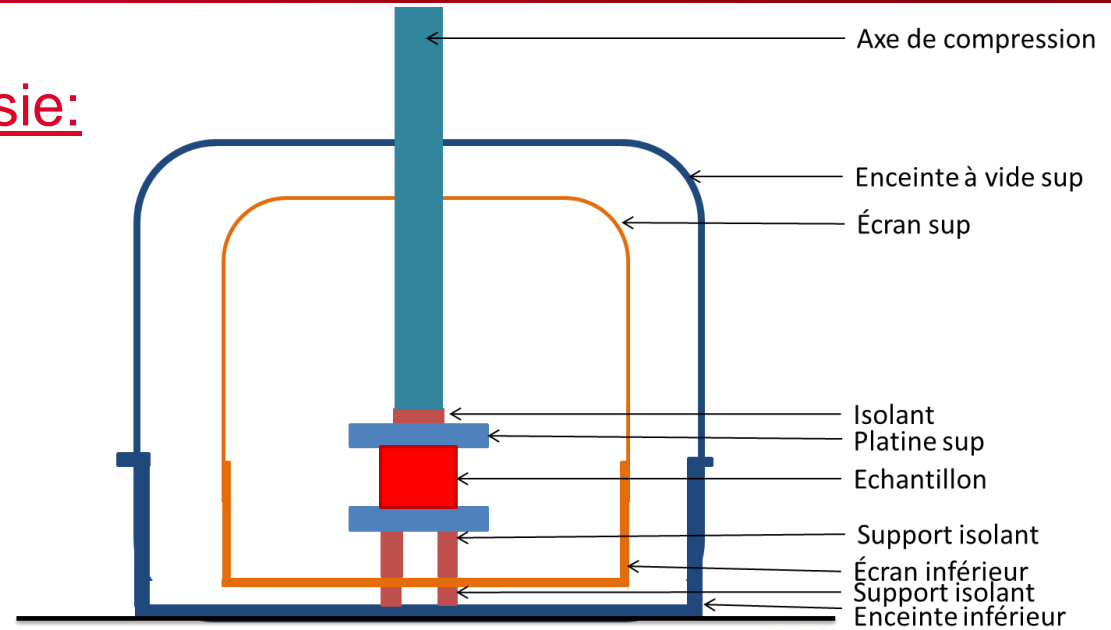


	Titane TA6V			Inox 304			G10		
	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Longueur Support	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Nombre de support	1	4	6	1	4	6	1	4	6
Delta T (K)	296	296	296	296	296	296	296	296	296
Conduction thermique ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	6,7	6,7	6,7	35	35	35	0,3	0,3	0,3
Puissance à absorber (W)	8,057	2,028	1,355	155,493	39,056	25,956	1,143	0,2875	0,191
Puissance totale (W)	8,057	8,112	8,131	155,493	156,225	155,737	1,143	1,150	1,149



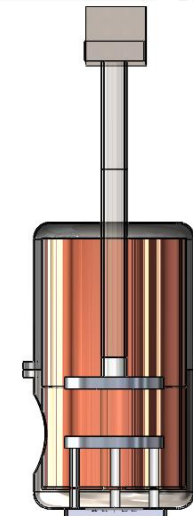
## Solution choisie:

Solution 2 est réalisable



## Choix des matériaux

	Point de vue Mécanique	Point de vue Thermique	Solution choisie
Axe	Titane	G10	<b>Titane</b>
Support	Titane	G10	<b>G10</b>



# CONCEPTION EN COMPRESSION

## Conception mécanique: Simulation sous SolidWorks

- Critère de Von Mises
- Flambage

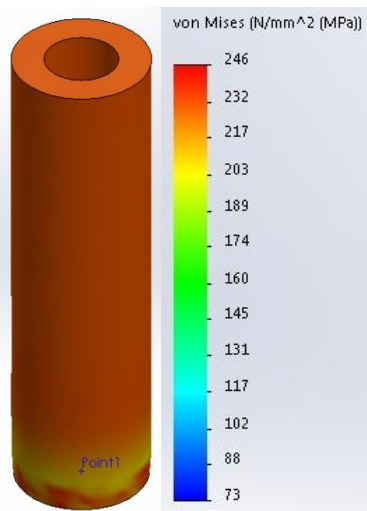
## Conception thermique

- Perte par conduction
- Thermalisation de l'axe principal
- Perte par rayonnement
- Choix du refroidissement
- Mise en froid

## Conception mécanique: Simulation sous SolidWorks

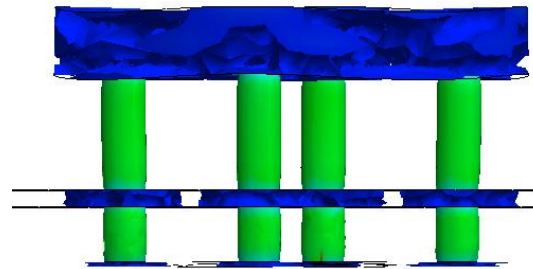
### ■ Critère de Von Mises

Support en G10 pièce critique  
Contrainte max supportable:  
350 MPa

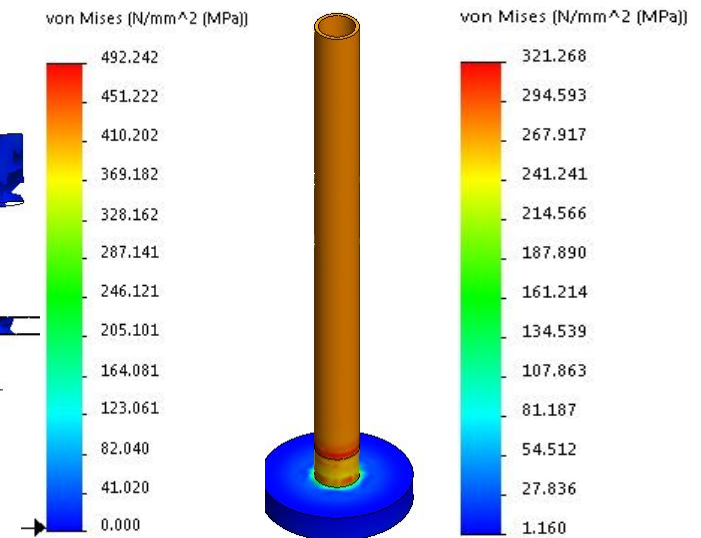


Max 246 MPa

Partie inférieure du  
cryostat



Axe de compression en titane  
Contrainte max supportable:  
1110 MPa

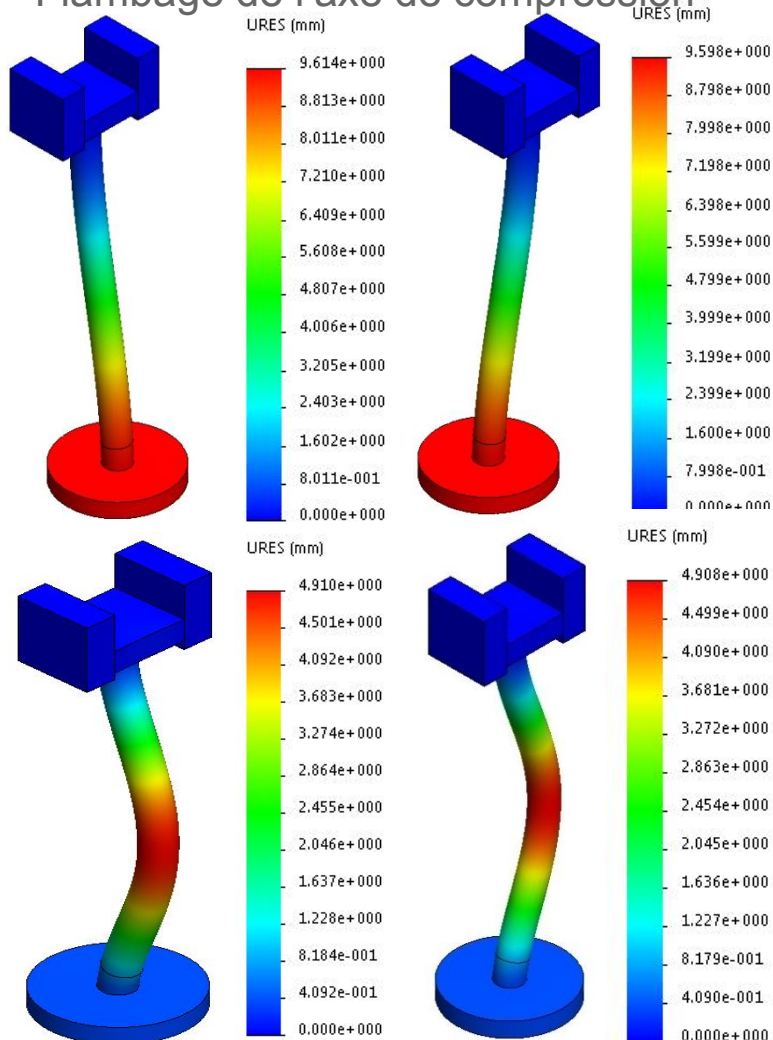


Max 321 MPa

Respect du critère de Von Mises  
⇒ Pas de plastification

## Conception mécanique: Simulation sous SolidWorks

### ■ Flambage de l'axe de compression



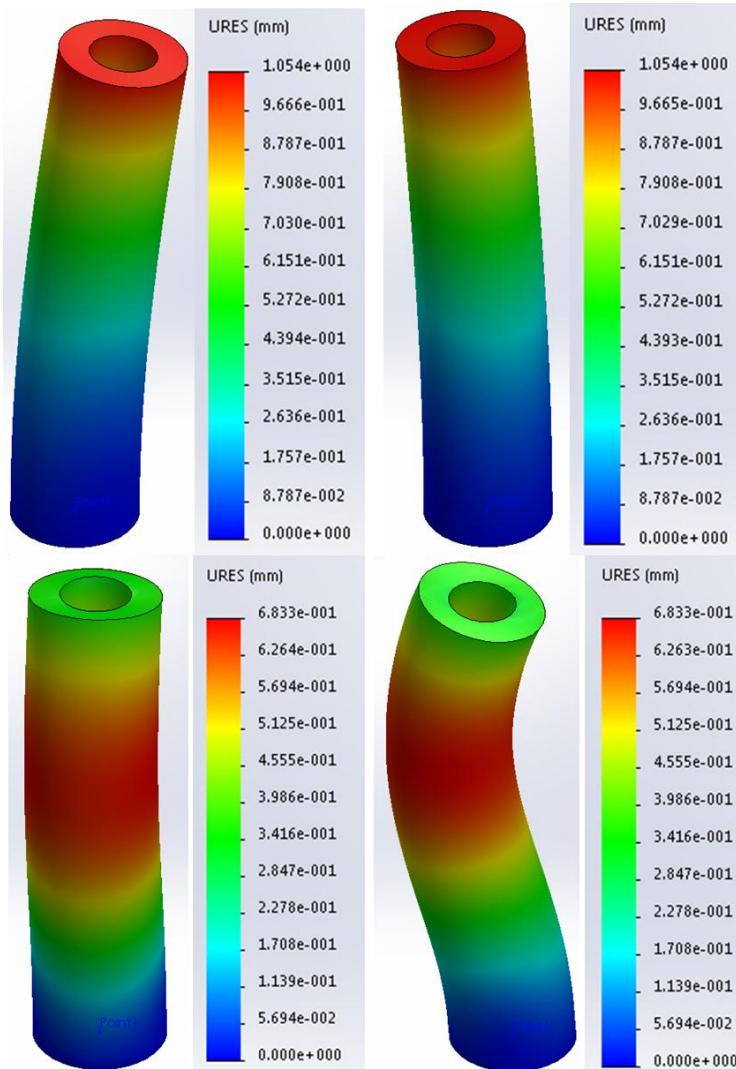
Hypothèses:

- Section de l'axe est constant
- Poids négligé
- Matériau homogène
- Raccourcissement barre négligeable devant la déformation

Mode n°	Facteur de chargement
1	83.166
2	83.823
3	309.12
4	312.97

## Conception mécanique: Simulation sous SolidWorks

### ■ Flambage du support en compression en G10



#### Hypothèses:

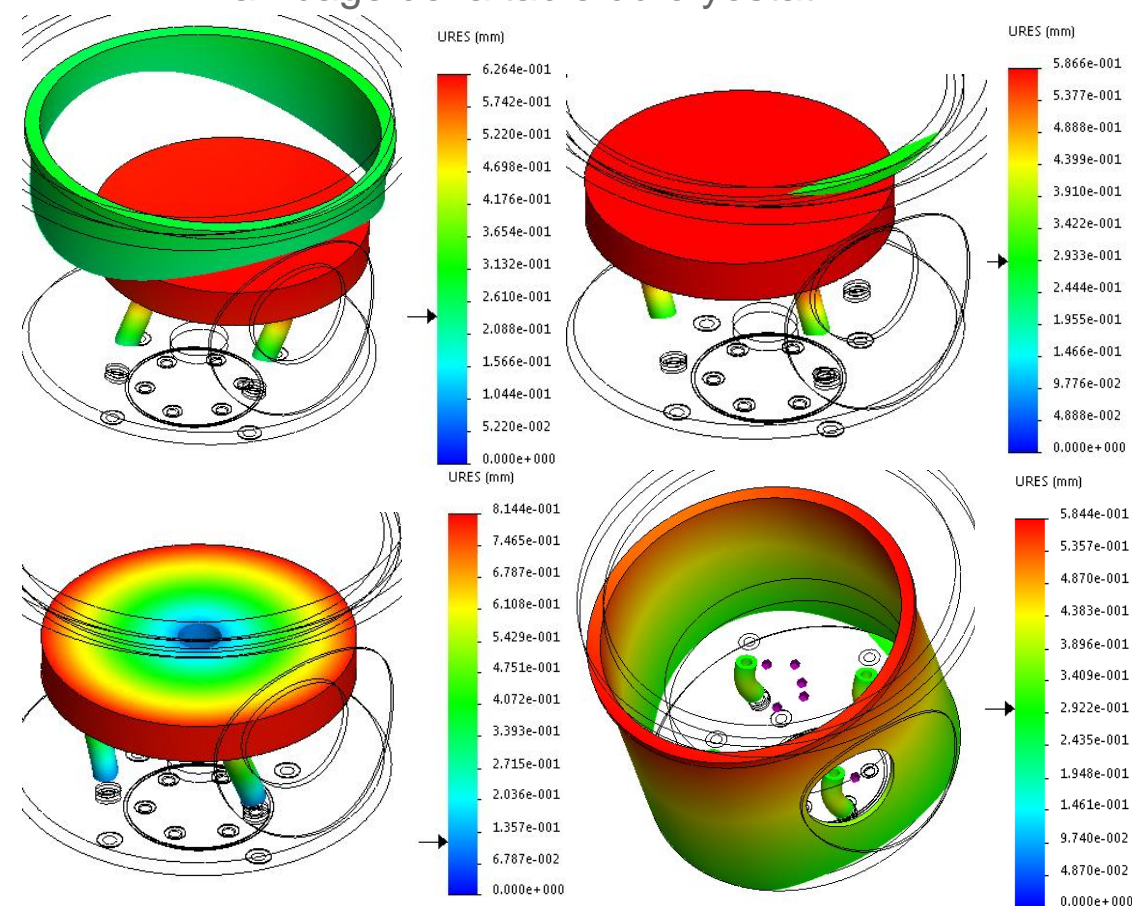
- Section de l'axe est constant
- Poids négligé
- Matériau homogène
- Raccourcissement barre négligeable devant la déformation

Mode n°	Facteur de chargement
1	2.128
2	2.1285
3	13.243
4	13.245



## Conception mécanique: Simulation sous Solidworks

### ■ Flambage de la table du cryostat



### Hypothèses:

- Poids négligé
- Matériau homogène
- Raccourcissement barre négligeable devant la déformation

Mode n°	Facteur de chargement
1	5.6855
2	5.6923
3	6.7125
4	14.484

## Conception thermique

### ■ Pertes par conduction

Evolution de la température sur l'axe principal par conduction

Calcul du cas critique au sein de l'axe principal entre 4K et 300K

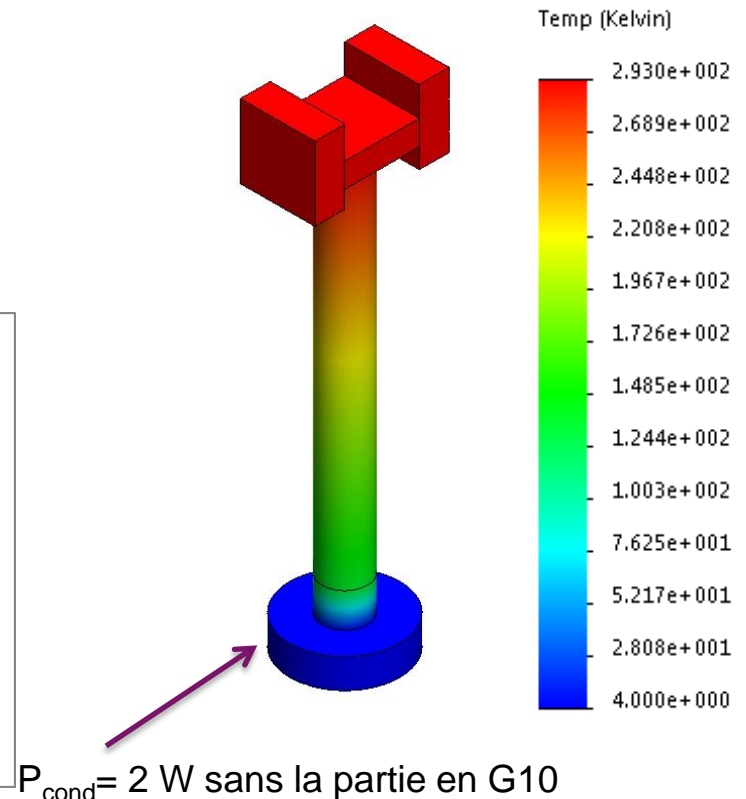
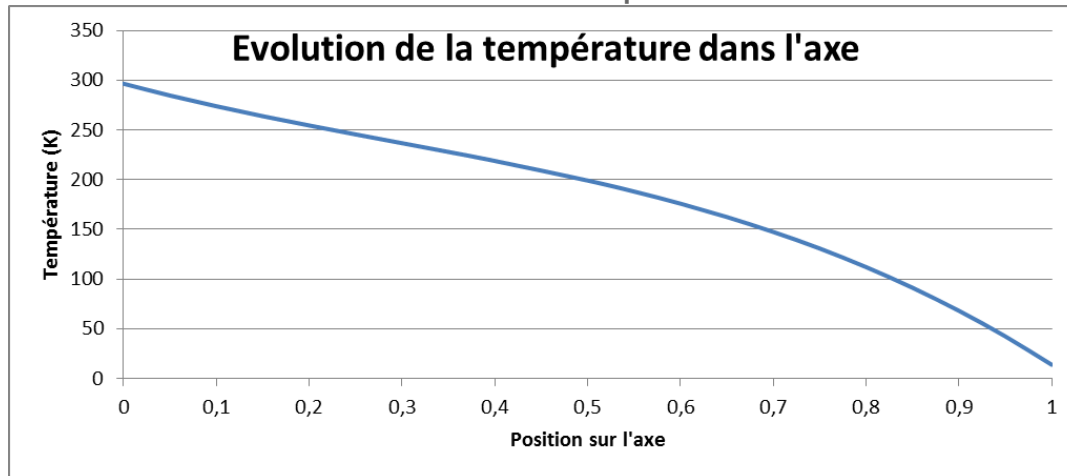
Loi de Fourier 
$$P = \frac{S}{L} \int \lambda(T) dT$$

Avec P la puissance générée,

S la surface d'échange,

L la longueur,

$\lambda$  la conductivité thermique du matériau

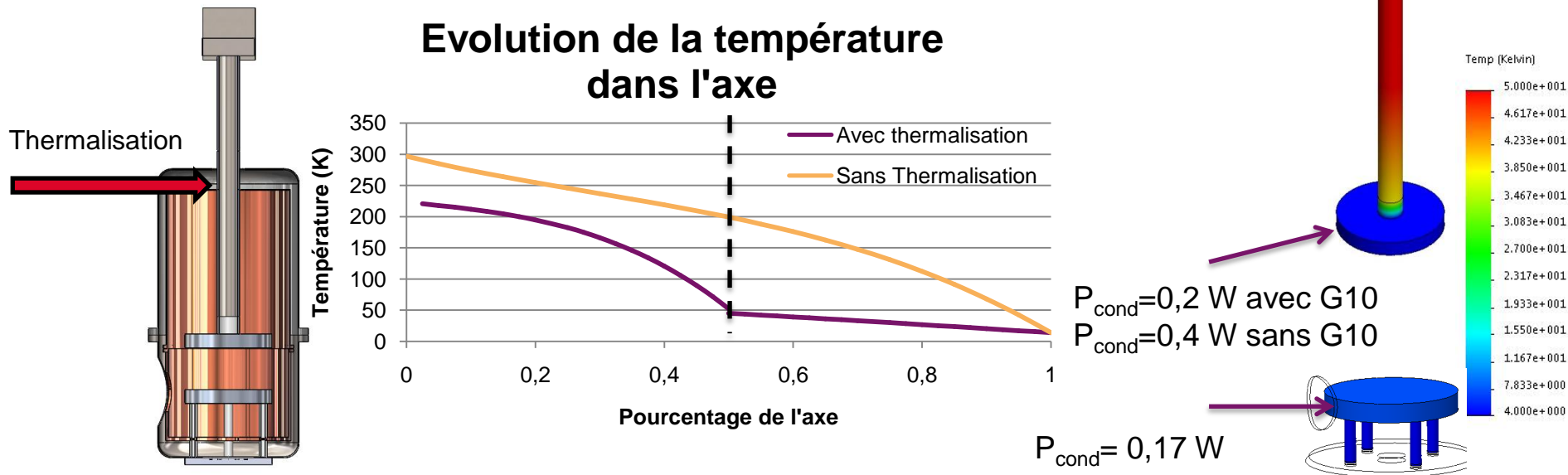


## Conception thermique

### Thermalisation de l'axe de compression

Diminution des apports de chaleur par conduction en refroidissant l'axe à une température intermédiaire

Thermalisation de l'axe de compression au niveau de l'écran en cuivre => 15 W @ 50 K



## Conception thermique

### ■ Perte par rayonnement

Hypothèses:

- Ecran de cuivre à 50K
- Pas d'isolation supplémentaire

Loi de Stefan-Boltzmann:

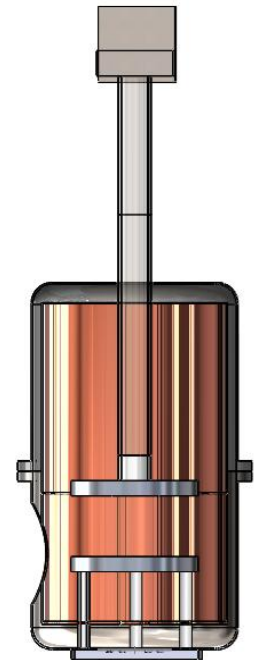
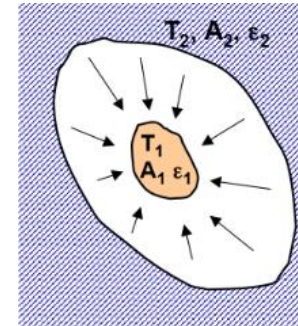
$$P_{rad} = \sigma * F_{12} * S_1 * (T_2^4 - T_1^4)$$

où  $F_{12} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_2 + (1 - \epsilon_2) \epsilon_1}$  surfaces voisines

$\sigma$  est la constante de Boltzmann  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ , S la surface et T les températures

Ici  $F_{12} = 0,015$  entre l'aluminium et le cuivre

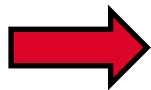
Donc la puissance rayonnée est  $P_{rad}$  est de l'ordre de  $10^{-5} \text{ W}$  soit  $0,0053 \text{ W.m}^{-2}$



## Choix du refroidissement

### Echangeur

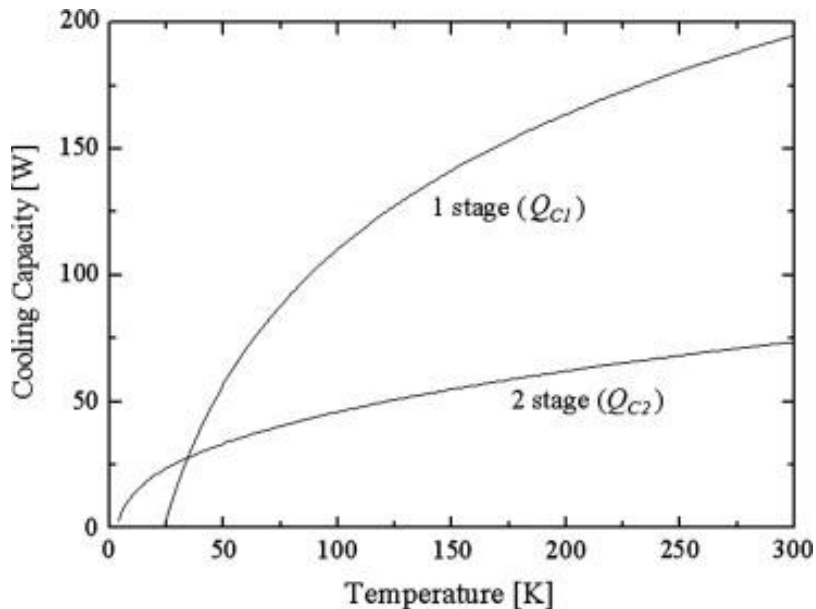
- Faibles pertes à compenser au niveau des masses froides (~0,4W)
- Accès facile aux masses froides



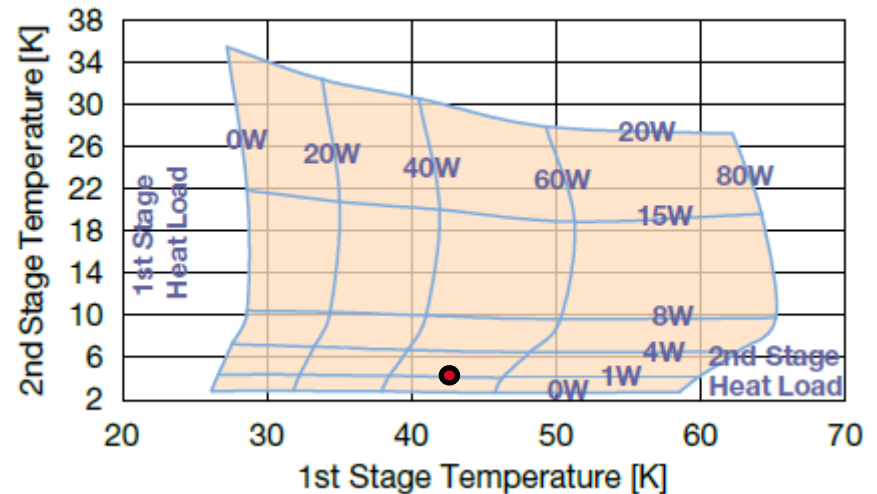
Cryocooler RDK 408D2 à 60 Hz: 1W @4,2K au 2<sup>ème</sup> étage & 50W@43K au 1<sup>er</sup>



### Puissance délivrée par le cryocooler à chaque étage

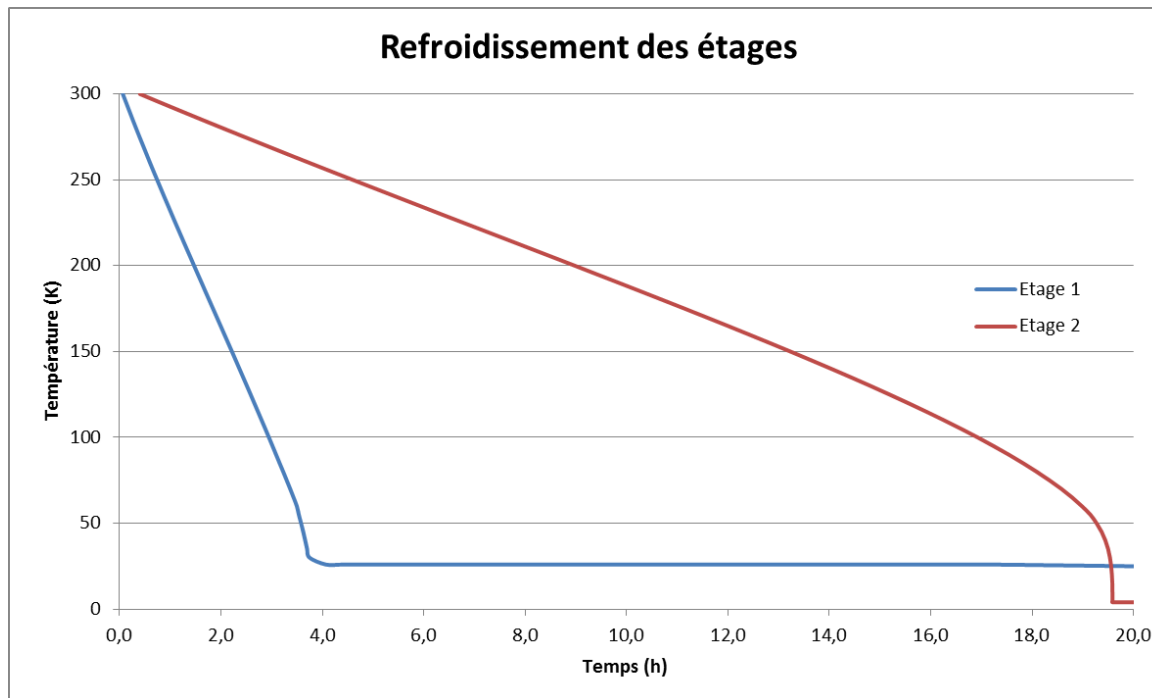


### SRDK-408D2 Cold Head Capacity Map (60 Hz)



## Mise en froid des deux étages

- Hypothèses:
  - Seule l'enthalpie à refroidir est considérée (1 ,78 MJ)
  - Pertes par conduction négligeables (<1W)
  - Rayonnement majoritairement favorable



# **SOLUTIONS TECHNIQUES**

## Problèmes liés au vide

- Conception de l'enceinte à vide
- Etanchéité de l'enceinte à vide

## Thermique au sein de l'enceinte

- Isolation de l'écran thermique
- Transfert thermique entre le cryocooler et les platines



## Problèmes liés au vide

■ Conception de l'enceinte à vide:  
Utilisation d'un fond bombé en inox tenant le vide, troué au centre

■ Etanchéité de l'enceinte à vide

■ Jonction entre les deux parties

Bride étanche avec joint torique

=> Pas de déplacement l'enceinte est fixe

■ Jonction entre l'enceinte à vide et l'axe de compression

Création d'un soufflet particulier déplaçable

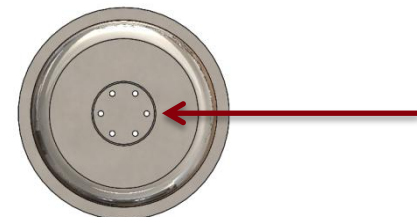
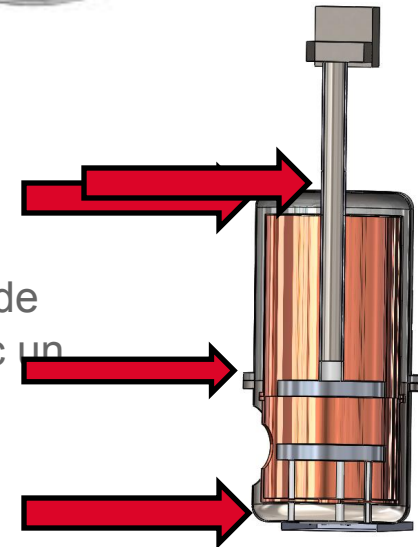
=> Déplacement grand pour l'installation et relatif pendant l'essai de l'axe de compression et de la cloche => système démontable fixé sur l'axe avec un manchon et une bride

=> Etanchéité, souplesse & tenue au vide



■ Jonction entre l'enceinte à vide et le bâti

Création d'une gorge de joint sur le fond de l'enceinte à vide



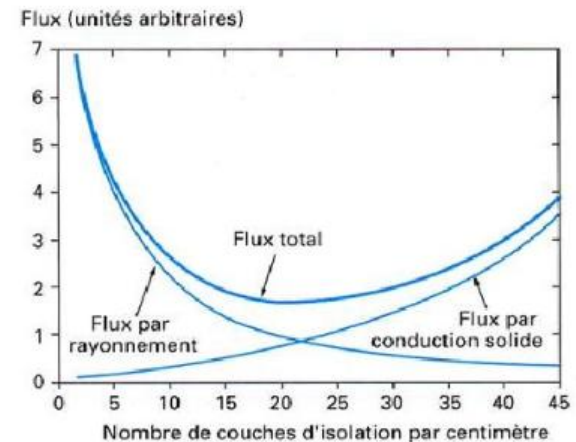
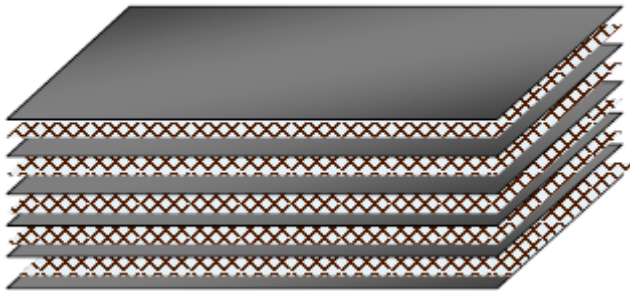
## Thermique au sein de l'enceinte

### ■ Isolation de l'écran thermique

#### Superisolation:

Superposition de feuilles d'aluminium ou des films polyester aluminisés et d'espaceur isolant

Sans superisolant:  $50 \text{ W.m}^2$



Réduction des pertes par rayonnement ( $2 \text{ W.m}^2$ )

## Thermique au sein de l'enceinte

### ■ Transfert thermique au sein de l'enceinte

#### ■ Feuilletés

Très bon conducteur

Mais liaisons rigides

⇒ Liaisons entre la platine inférieure et le 1er étage du cryocooler

#### ■ Tresses

Liaisons entre le 2ème étage du cryocooler et la platine supérieure  
(15 fois moins bien que les feuilletés pour une géométrie constante)

Liaison pour le pont thermique

#### ■ Chauffelettes

Nécessité de faire varier la température

⇒ Augmenter la puissance à extraire par le cryocooler

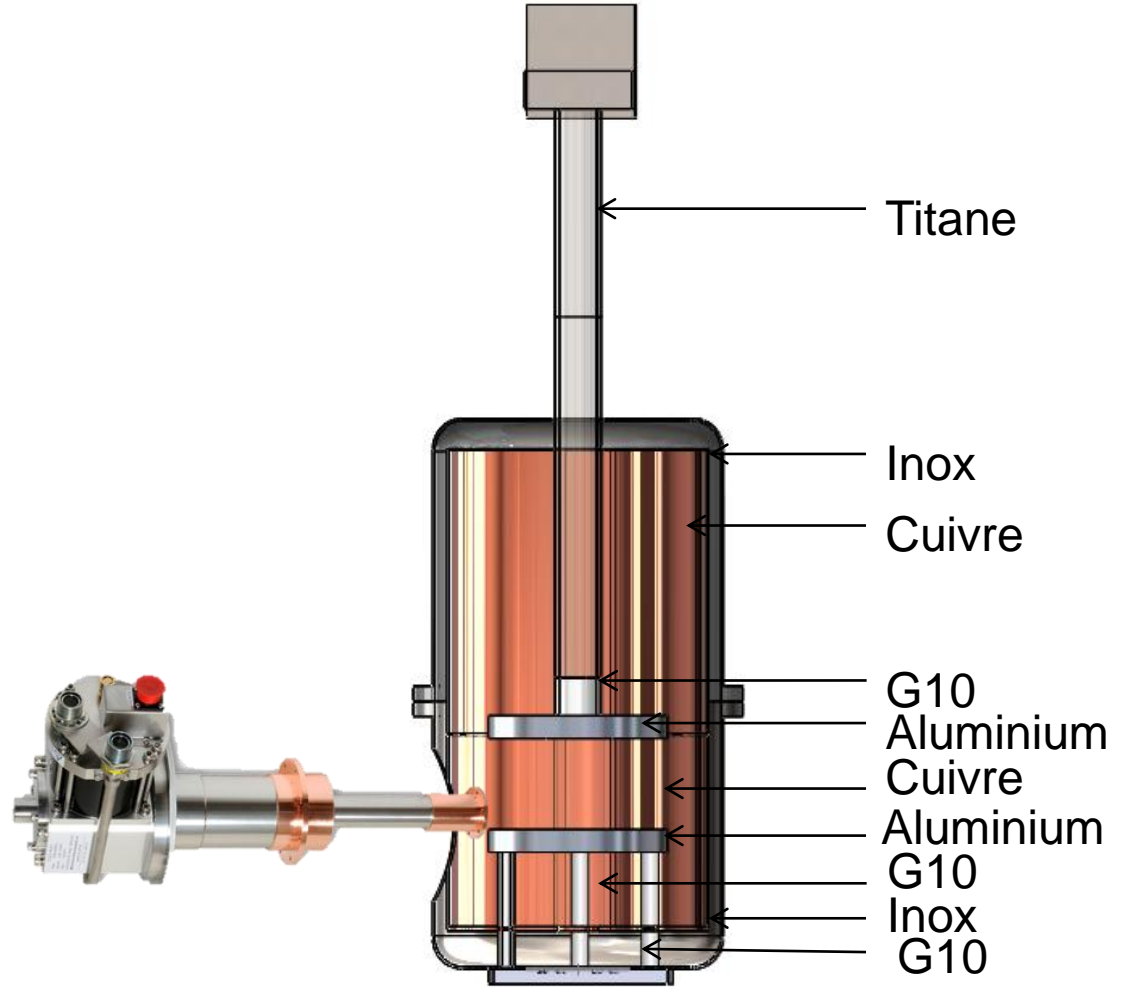
⇒ Compatible avec le fonctionnement du cryocooler

⇒ Réchauffer plus vite le cryostat après l'essai



# CONCLUSION

Livrable

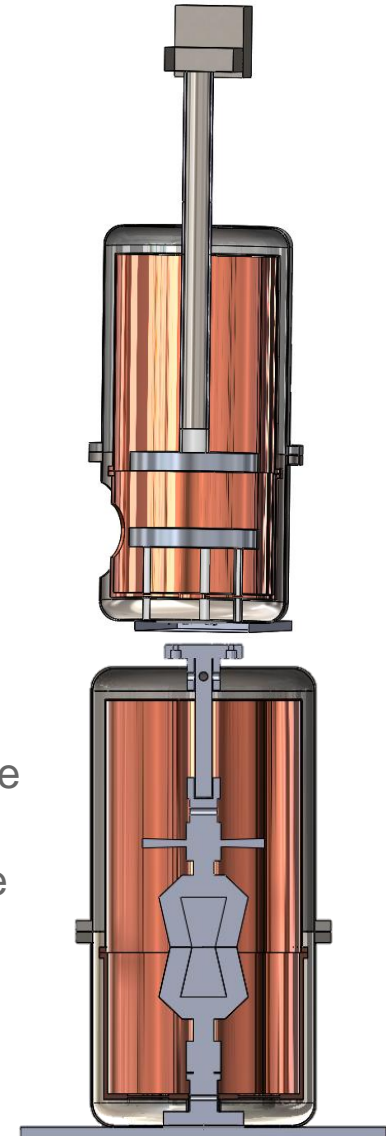


## Préconception du cryostat réalisé

- Validation des critères de conception mécanique
  - Pas de plastification des pièces
  - Pas de flambage des pièces
  - Peu de pertes thermiques
  - Accès simple à l'échantillon
  - Surface utile grande

## Axe d'amélioration

- Intégration de plus de technologies: Capteurs de température, de déformation,...
- Refaire les calculs sous un autre logiciel en particulier pour le flambage
- Finalisation des calculs thermiques en prenant en compte le cryocooler, les tresses, les chaufferettes, et la résistance thermique de contact
- Analyse du fonctionnement à haute température du cryocooler
- Développement de la solution en traction



**MERCI DE VOTRE ATTENTION**