

# CUTE

## Cryostat pour la détection de Matière Noire

ANF CNRS 2020 – Ecole de Mécanique IN2P3

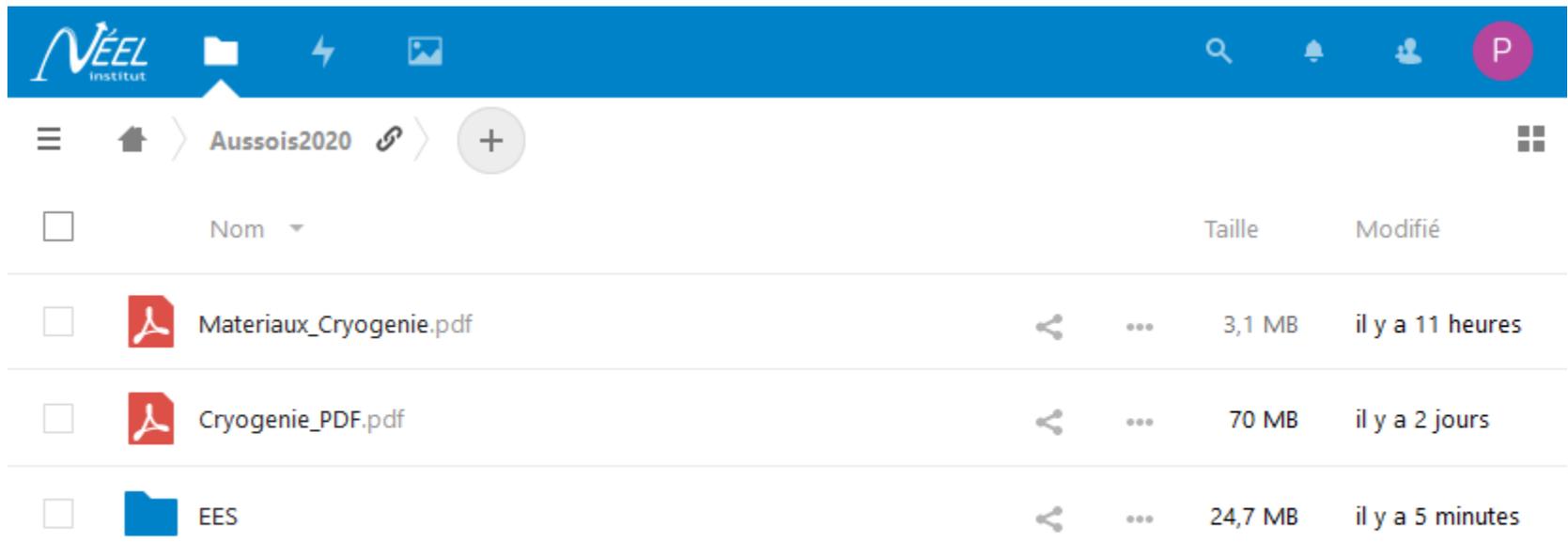
Philippe Camus  
Aussois, Septembre 2020

# Plan

- Objectifs du TD
- Contexte Scientifique
- Principe d'un cryostat à dilution
- Performances des cryo-réfrigérateurs
- Bilan thermique des étages

# Fichiers disponibles

<https://cloud.neel.cnrs.fr/index.php/s/p7kcdK8giHXakCQ>



The screenshot shows a cloud storage interface with a blue header bar. The header bar contains the NEEL Institut logo, a folder icon, a lightning bolt icon, a photo icon, a search icon, a notification bell icon, a user profile icon, and a pink circular profile picture with the letter 'P'. Below the header bar, the breadcrumb path is 'Aussois2020'. The main content area displays a list of files and folders. The list has columns for 'Nom', 'Taille', and 'Modifié'. There are three items in the list: two PDF files and one folder.

<input type="checkbox"/>	Nom	Taille	Modifié
<input type="checkbox"/>	 Materiaux_Cryogenie.pdf	3,1 MB	il y a 11 heures
<input type="checkbox"/>	 Cryogenie_PDF.pdf	70 MB	il y a 2 jours
<input type="checkbox"/>	 EES	24,7 MB	il y a 5 minutes

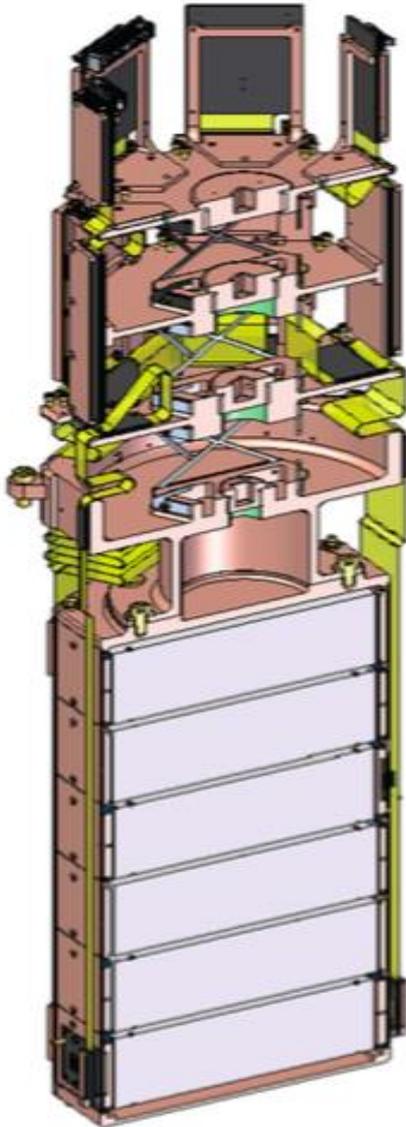
1 dossier et 2 fichiers 97,8 MB

# Objectifs du TD

- Initiation à la mise en œuvre des très basses températures ( $< 1\text{K}$ )
- Comprendre le principe de fonctionnement d'un cryostat à dilution
- Comprendre les diagrammes de performances des cryo-réfrigérateurs
- Comprendre le principe de l'écrantage radiatif
- Evaluer le bilan thermique d'un étage
- Evaluer le temps de mise en froid

# Contexte scientifique

- Les détecteurs cryogéniques
- La matière noire et les événements rares
- Le laboratoire sous-terrain de SNOLAB



- Détecteur en Ge pur (10 kg)
- Bolomètre (énergie) et diode (ionisation)
- Très basse température (15 mK)
- Electronique intégrée
- Dissipation à différentes températures (15 mK – 1K – 4K)

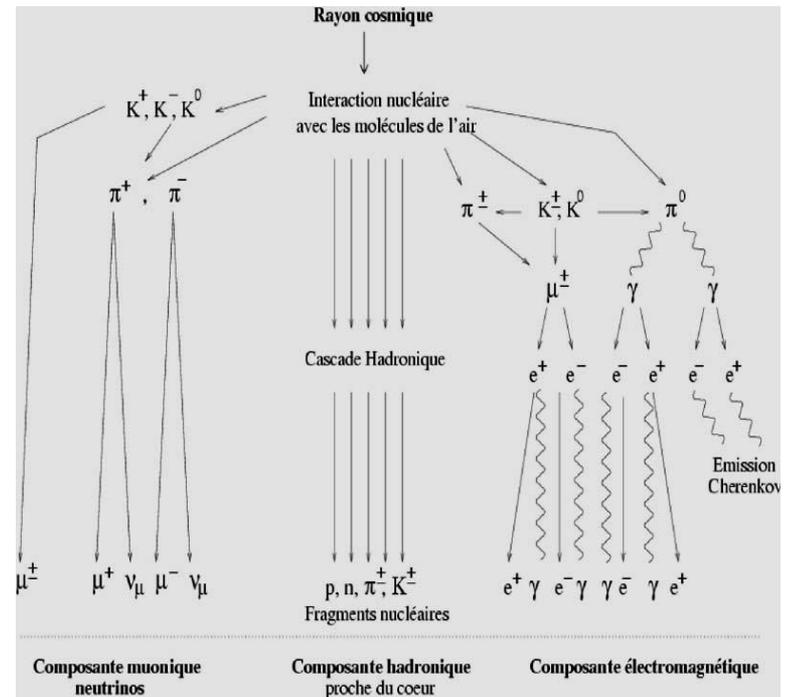
Le détecteur mesure les effets de l'impact d'une particule; les deux informations permettent de distinguer différentes particules (p.e. gamma et neutron)

Les particules attendues ne sont pas distinguables d'un neutron...

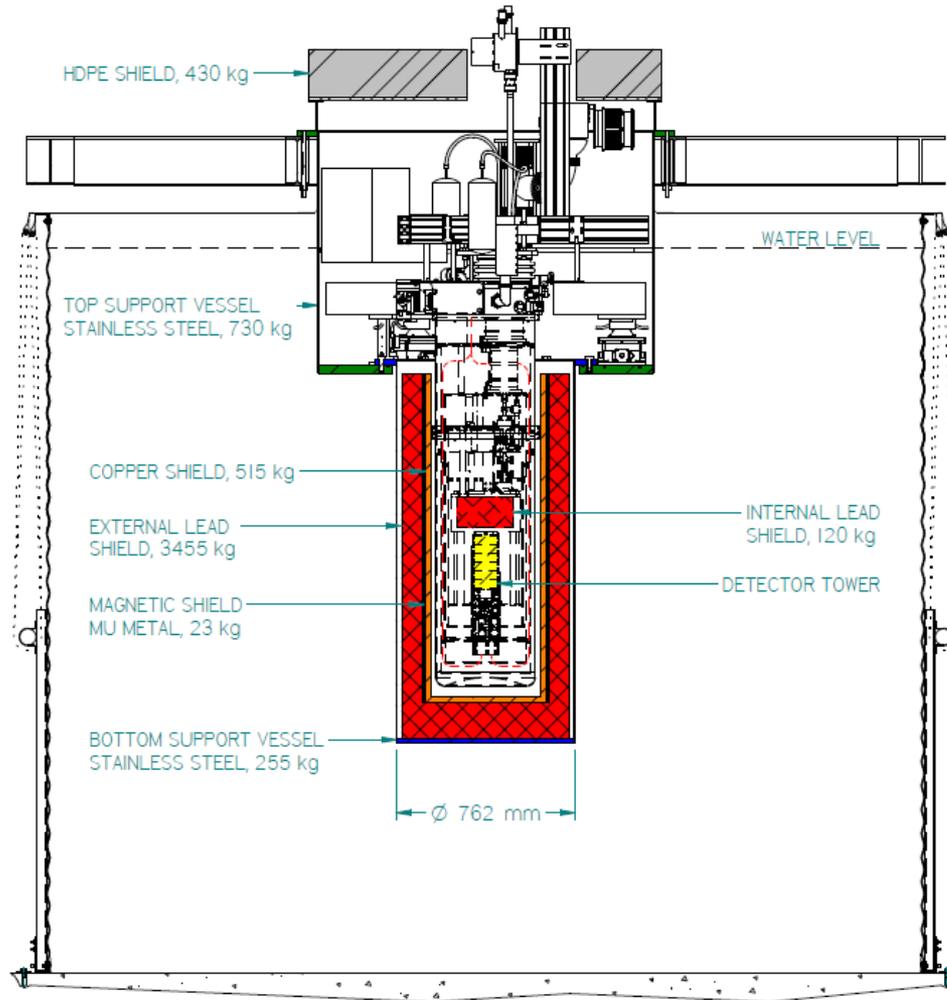
=> Limite du bruit de fond (qq événements par an et par kg)

# Environnement des particules

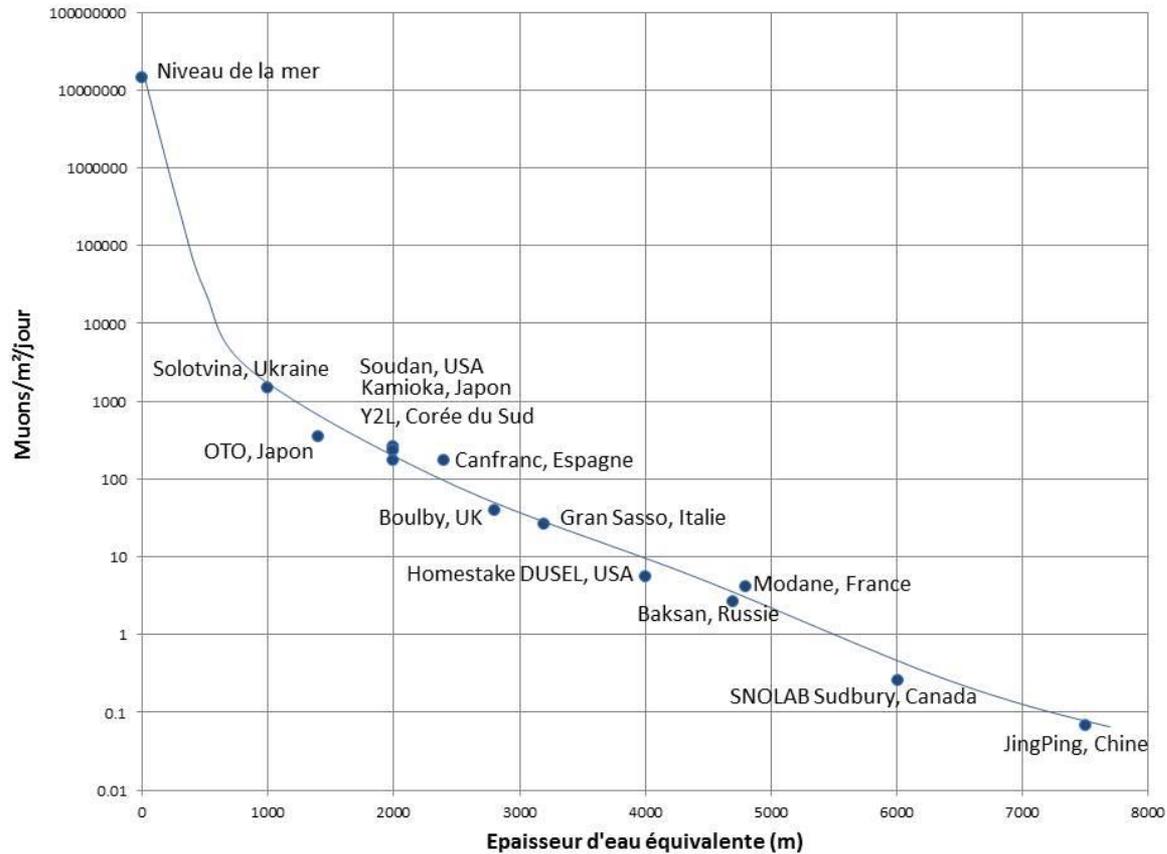
- Rayons cosmiques dans l'atmosphère  
  
=> muons
- Radioactivité naturelle (U, Th, Ra) =>  $\alpha$ ,  $\gamma$ , n,  $e^-$ , ...

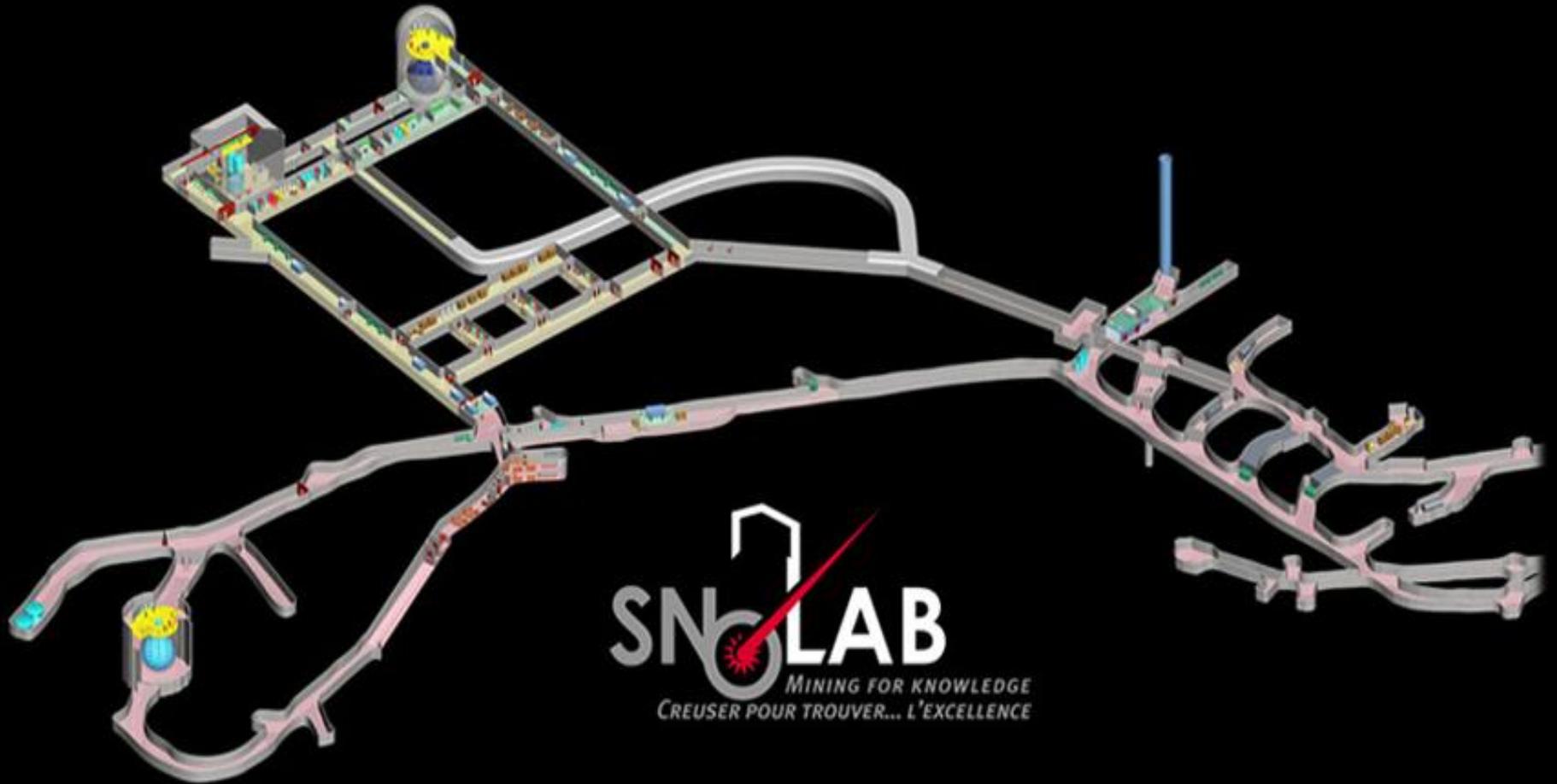


# Cryostat CUTE et son blindage



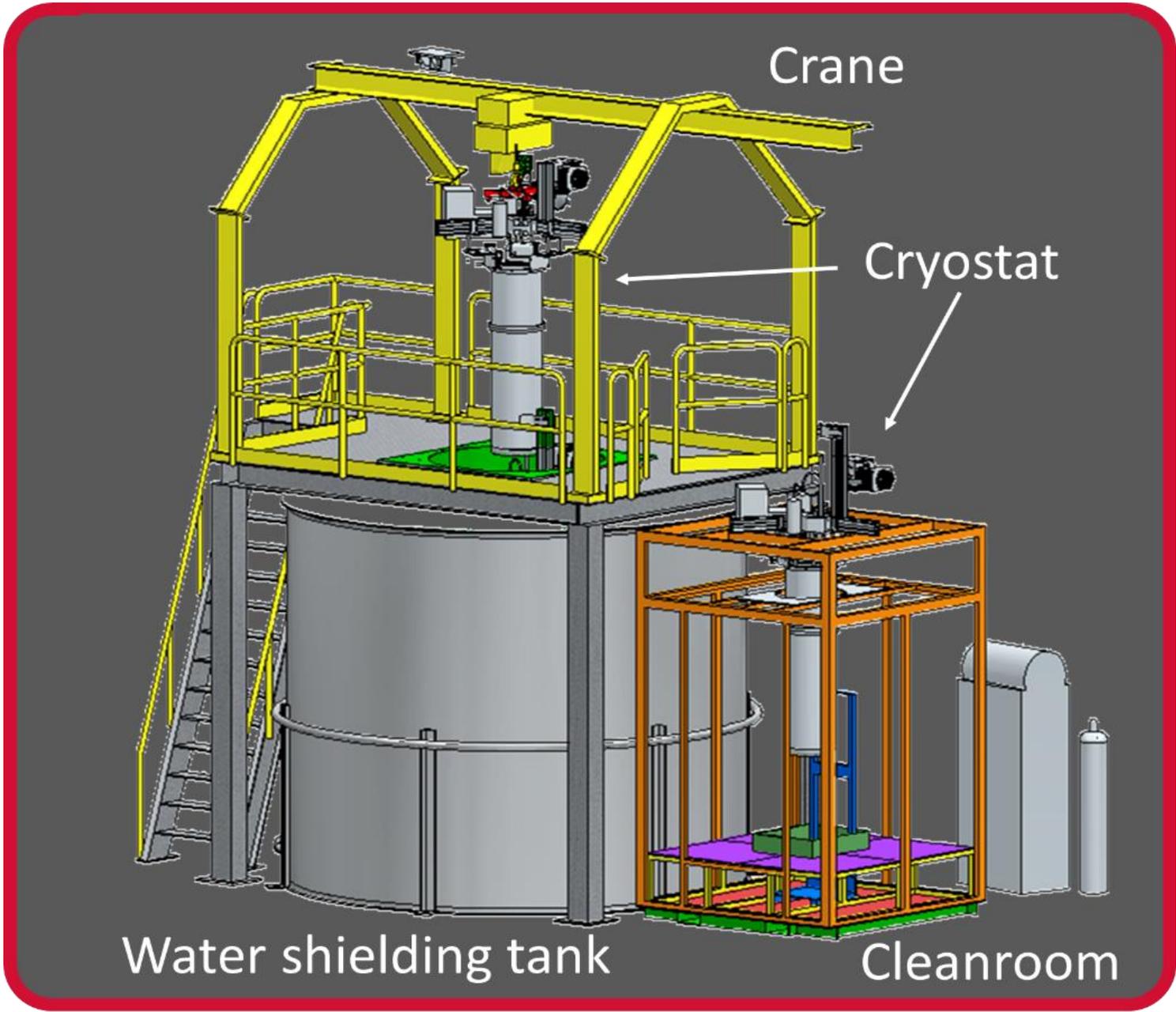
# Laboratoires sous-terrains



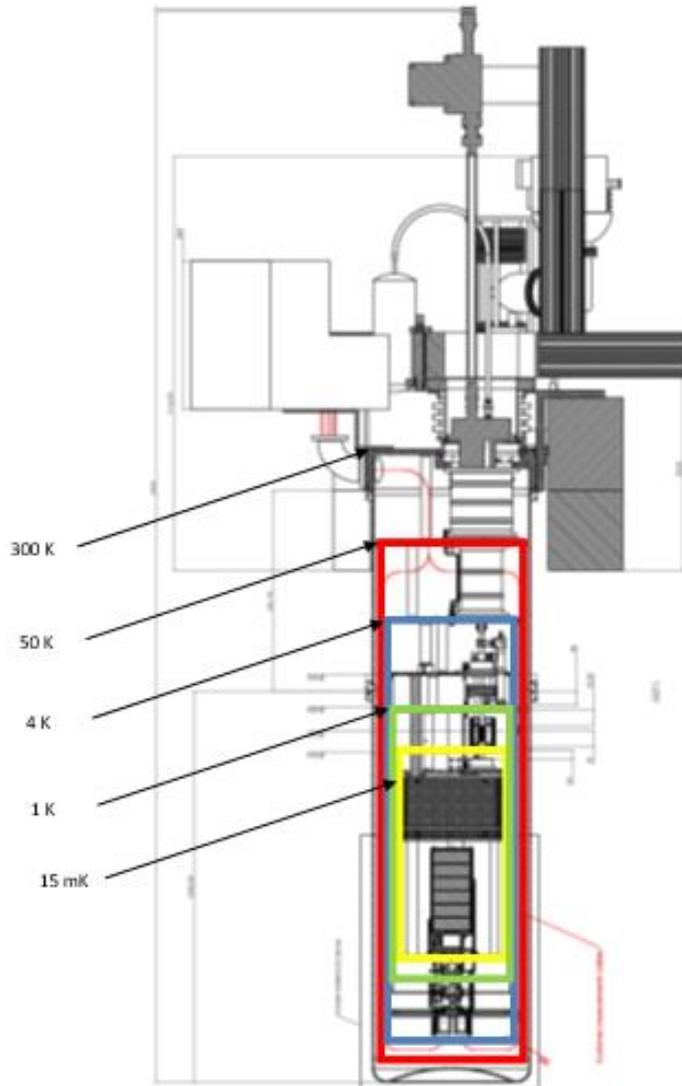


## [A day at SNOLAB](#)

<https://www.youtube.com/watch?v=sZPLcv-ASwc>



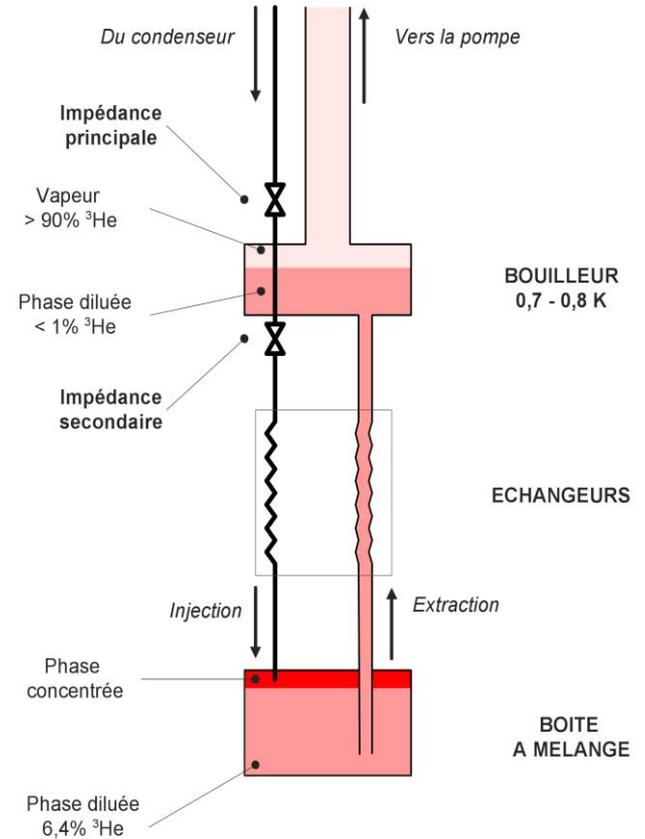
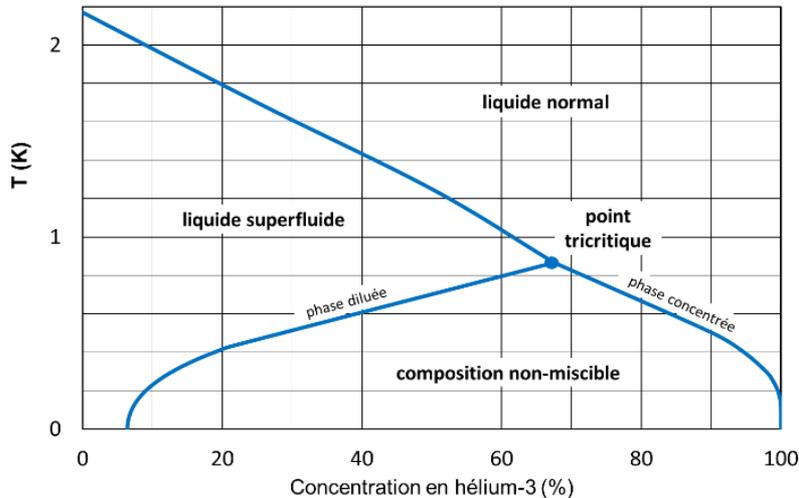
# Le cryostat



- Choix des matériaux
- Suspension souple pour limiter les vibrations

# QUESTIONS 1.1

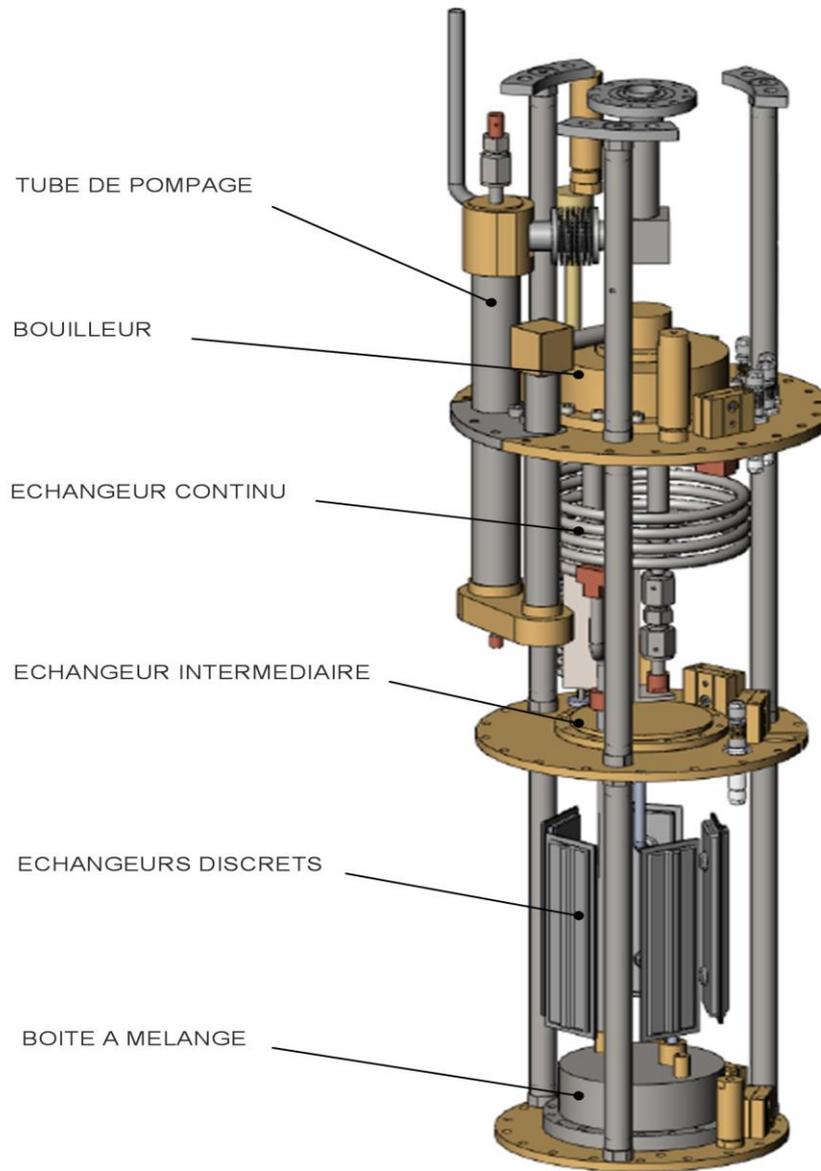
# Réfrigérateur à dilution



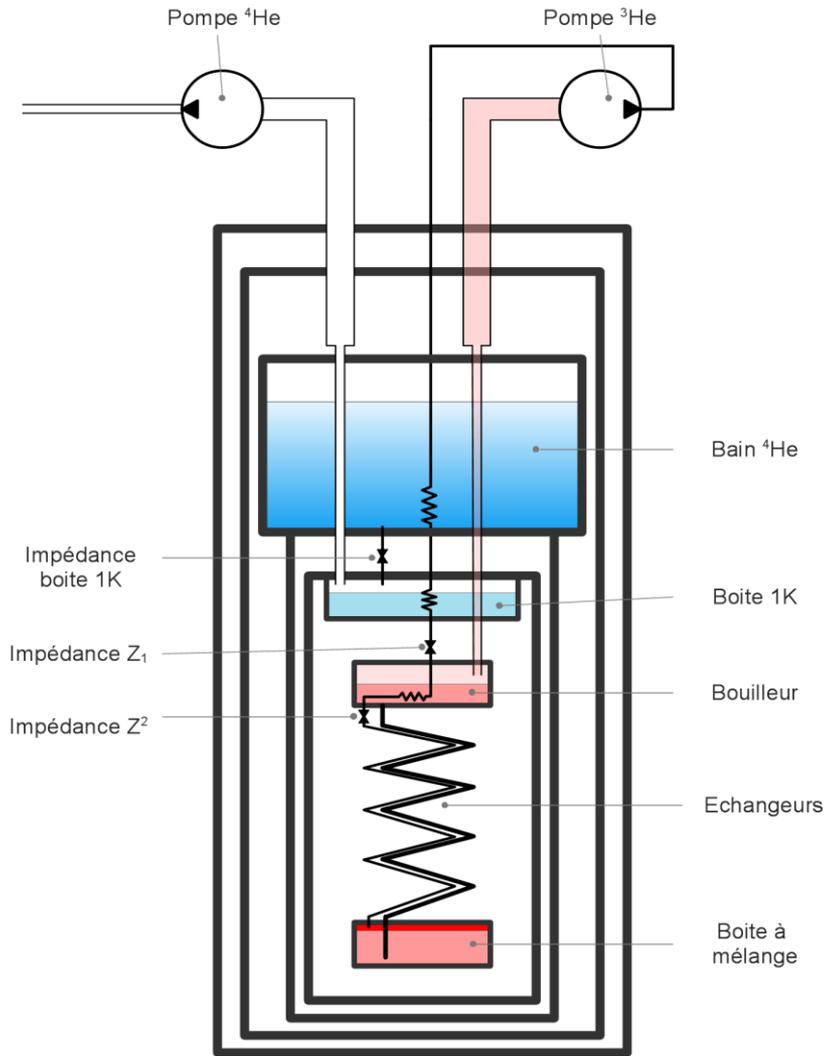
- Puissance froide (BM)

$$H_{3D} - H_3 = T \cdot (S_{3D} - S_3) = 84 \cdot T^2 \text{ (J} \cdot \text{mol}_{3\text{He}}^{-1} \cdot \text{T}^{-2}\text{)}$$

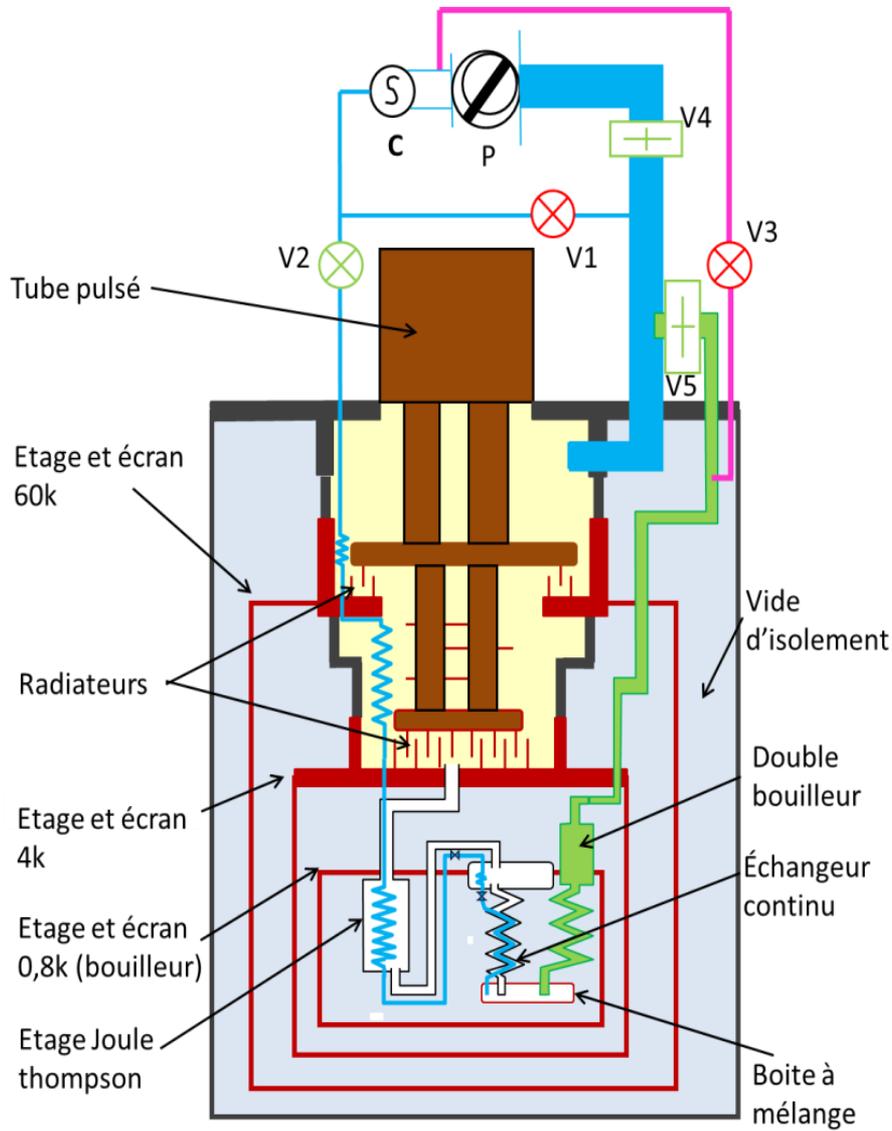
- Puissance froide (Bouilleur):  $L \sim 35 \text{ J/mol}$



**Architecture d'un insert à dilution comportant 6 échangeurs discrets (Crédit Cryoconcept)**



Architecture d'une dilution classique avec bain d'hélium liquide et 'boite à 1 K'



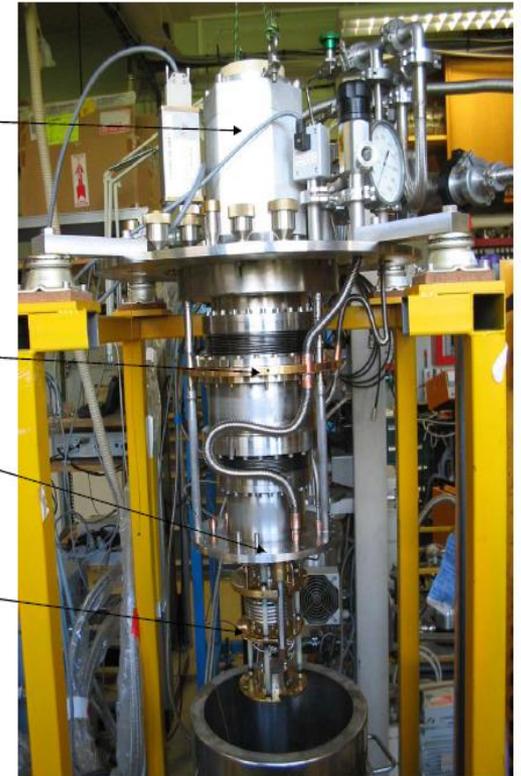
## DILUTION FREE 2007

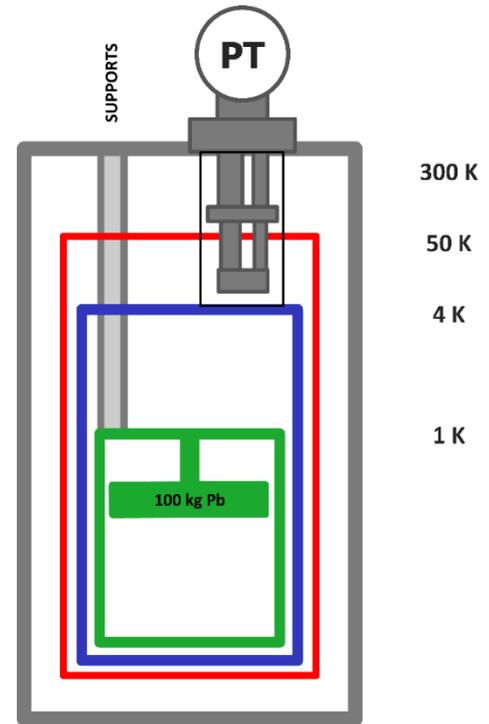
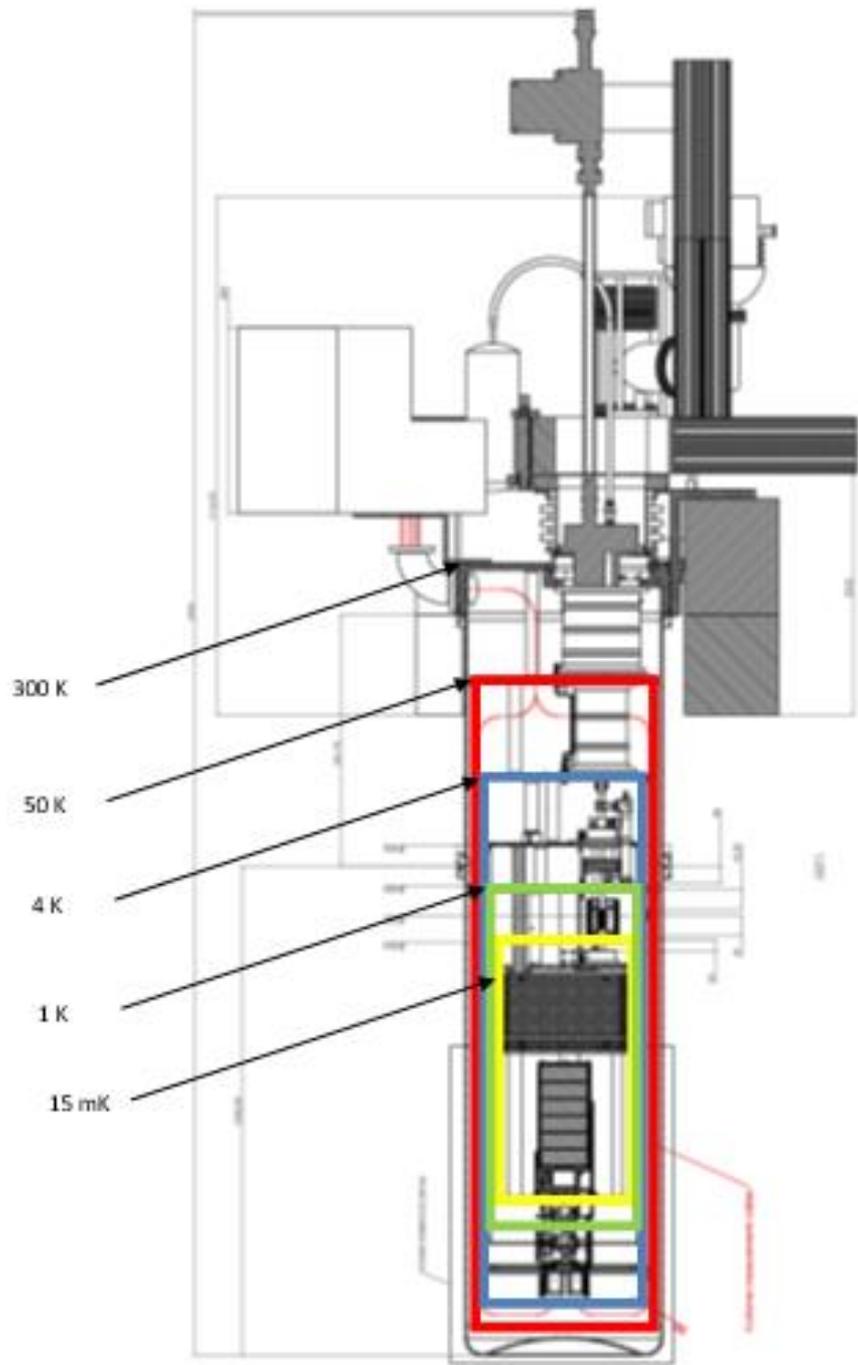
PT 407  
700mW @ 4.2K

FIRST STAGE  
60k

SECOND STAGE  
4K

DILUTION STAGE  
30 mK  
LESS 20 Hours  
50mK < T < 300K

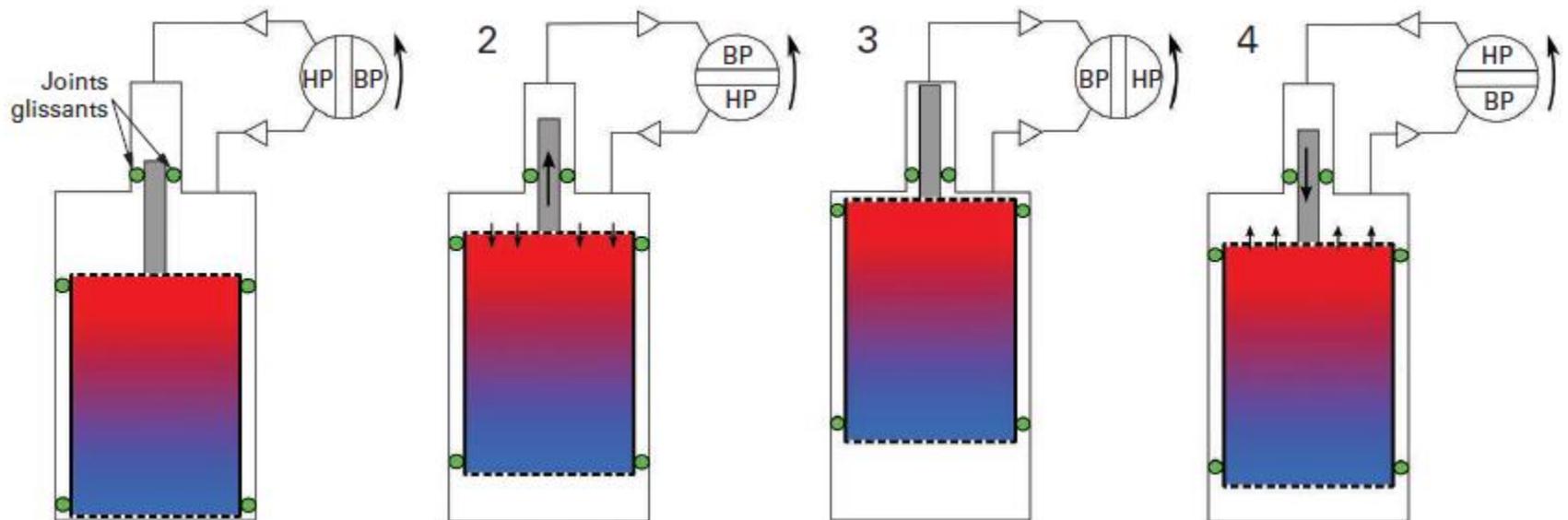




ETAGE	D (mm)	H (mm)	M
300 K	460	1600	Al 80 kg
50 K	400	1400	Cu 50 kg
4 K	360	1200	Cu 30 kg
1 K	340	1000	Cu 20 kg Pb 100 kg

# Questions 2.4

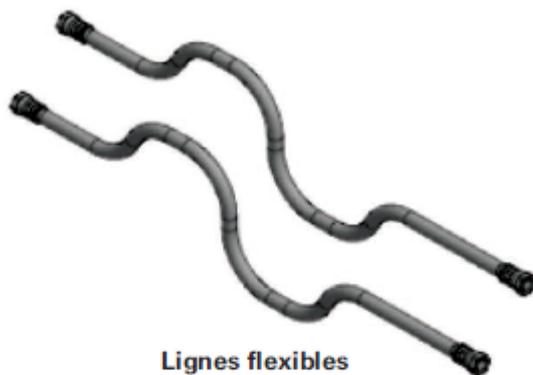
# Performances du Pulse-Tube: fonctionnement d'une machine Gifford-Mac Mahon



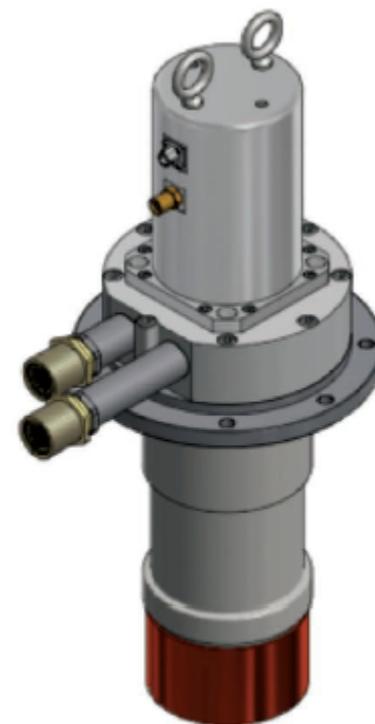
# Exemple AL600 (600W @ 80K !) – 12 kW



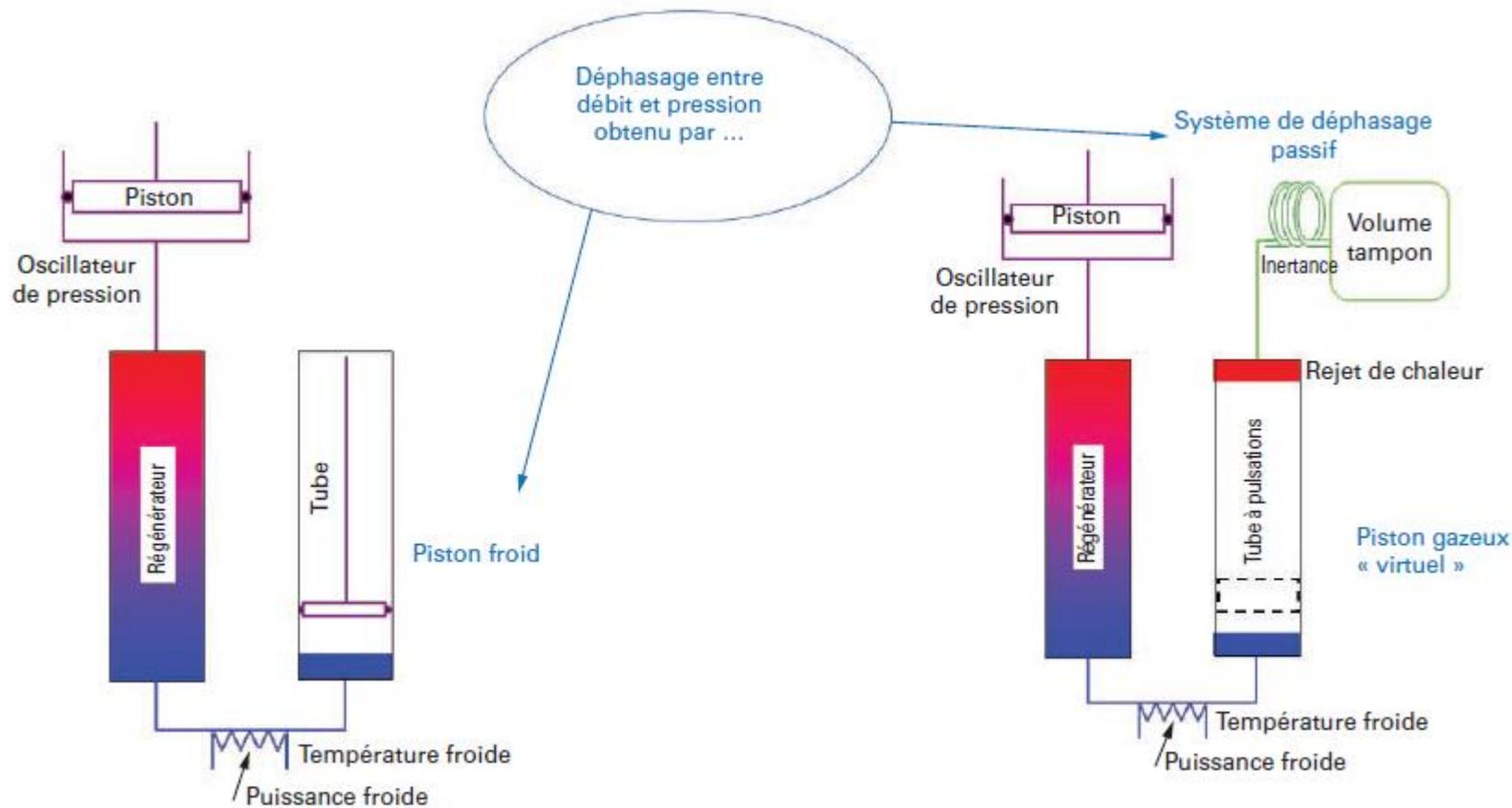
Compresseur hélium  
incluant le système  
de déshuilage



Lignes flexibles  
de liaison  
compresseur-doigt froid



Doigt  
froid



**(a) déphasage : machine théorique intermédiaire**  
 Piston mobile froid (but pédagogique)

**(b) déphasage passif (tube à gaz pulsé)**

# Machine à deux étages

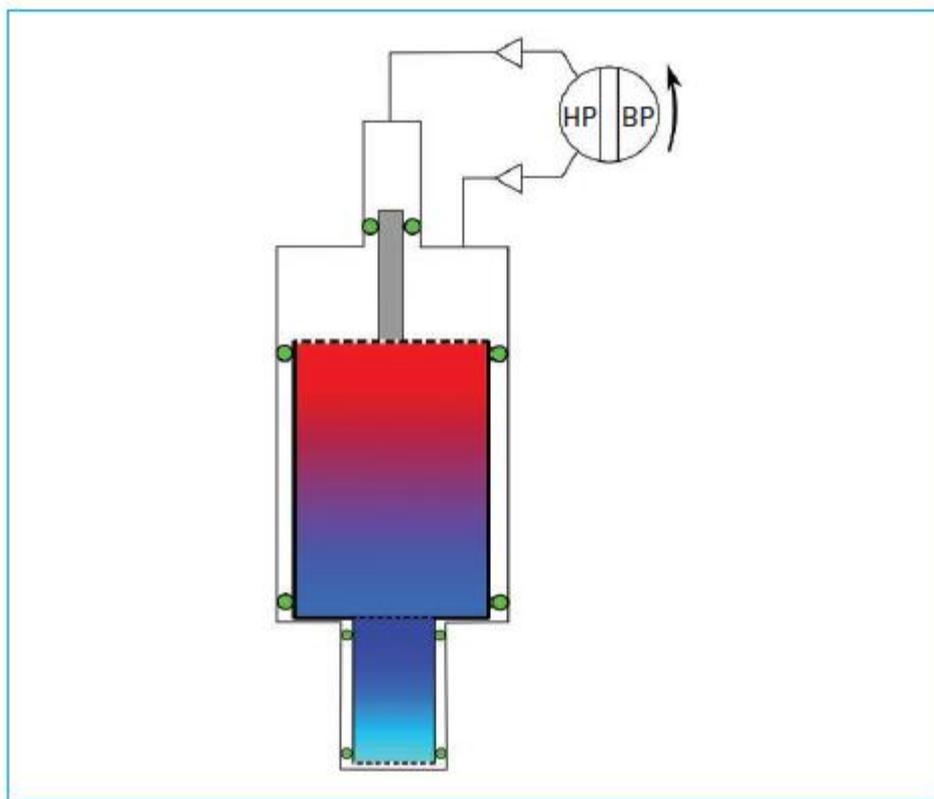
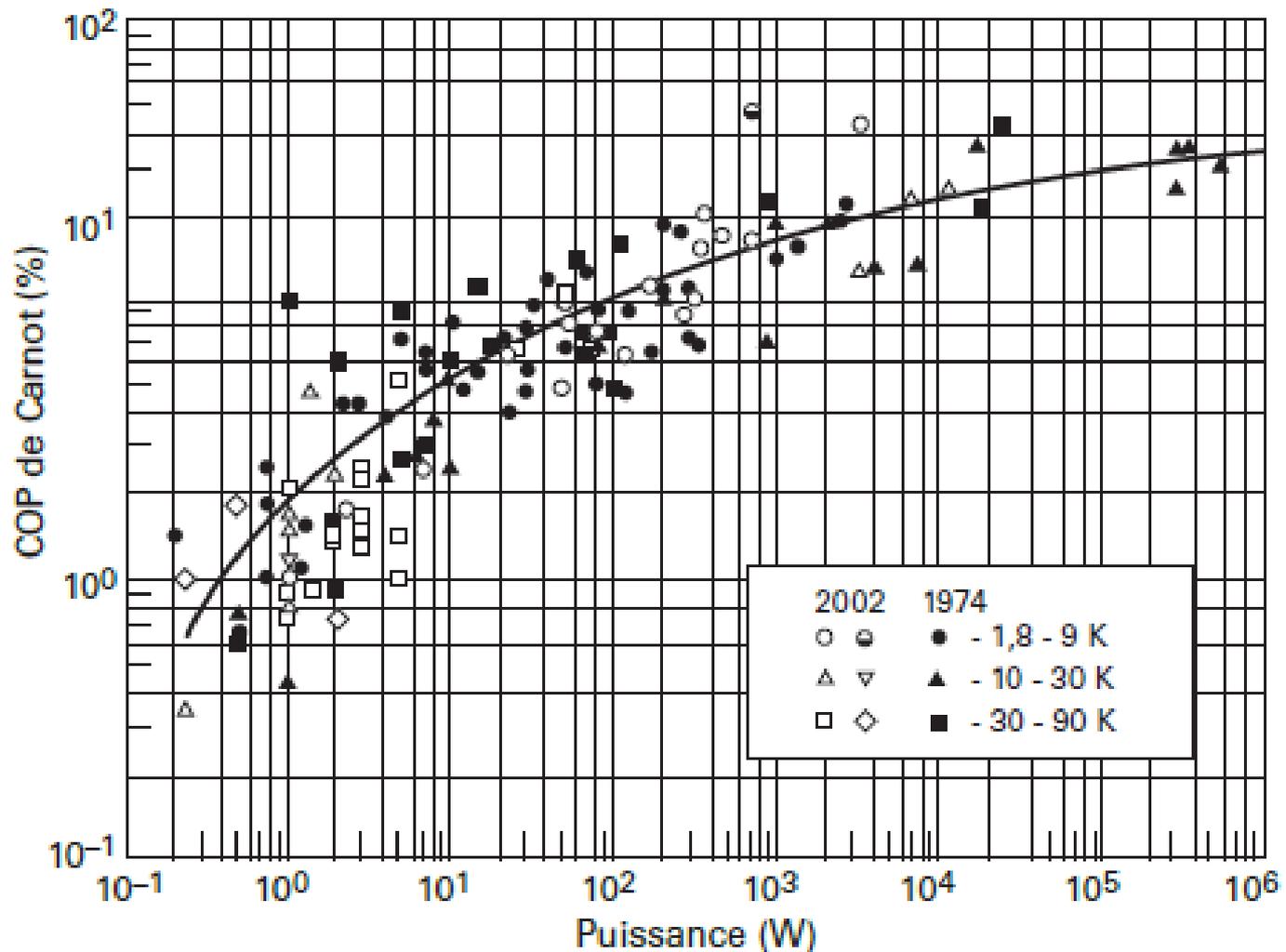
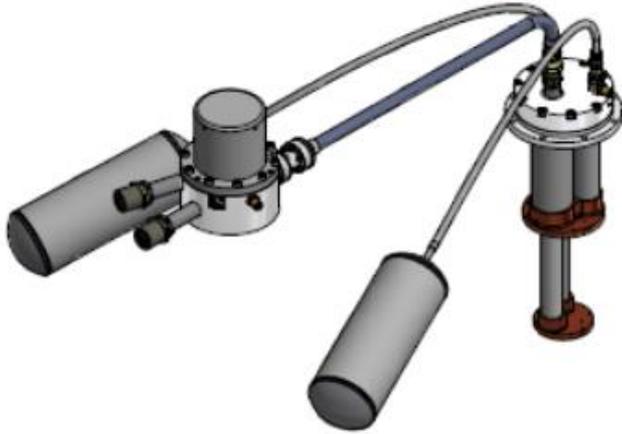


Figure 18 - Schéma d'un Gifford-McMahon bi-étagé



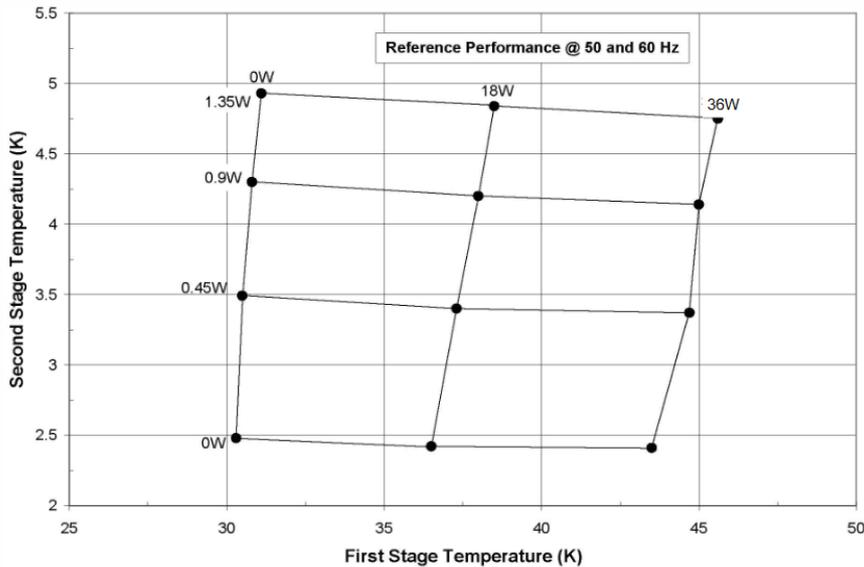
Les performances énergétiques des petites machines ne sont pas très bonnes (1 – 10 % de Carnot)

# Performances du Pulse-Tube

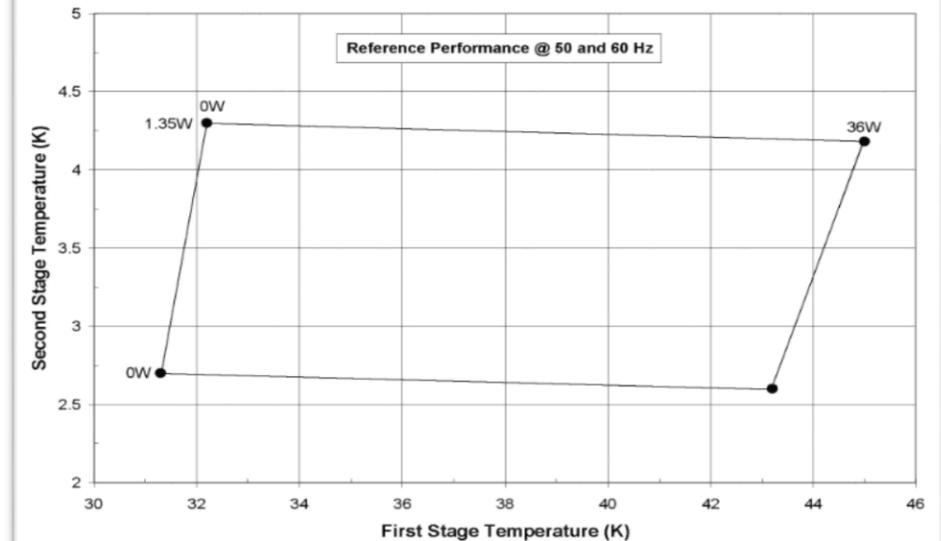


- Les deux étages sont relativement indépendants

PT410-RM Cryorefrigerator Capacity Curve



PT415-RM Cryorefrigerator Capacity Curve



# Modélisation des caractéristiques

```
{ MODELE POLYNOMIAL PT410 CryoMech
```

```
  P1st in [0,40] W
```

```
  P2nd in [0,1.5] W
```

```
}
```

```
// fit 2nd order with crossterm
```

```
T1=3.01541667E+01+3.09750000E-01*P1+3.43750000E-04*P1^2+9.33333333E-01*P2-2.33333333E-01*P2^2+3.45000000E-02*P1*P2
```

```
T2=2.50500000E+00-1.32500000E-02*P1+2.50000000E-04*P1^2+2.59333333E+00*P2-6.00000000E-01*P2^2-4.00000000E-03*P1*P2
```

```
{ MODELE POLYNOMIAL PT415 CryoMech
```

```
  P1st in [0,40] W
```

```
  P2nd in [0,1.5] W
```

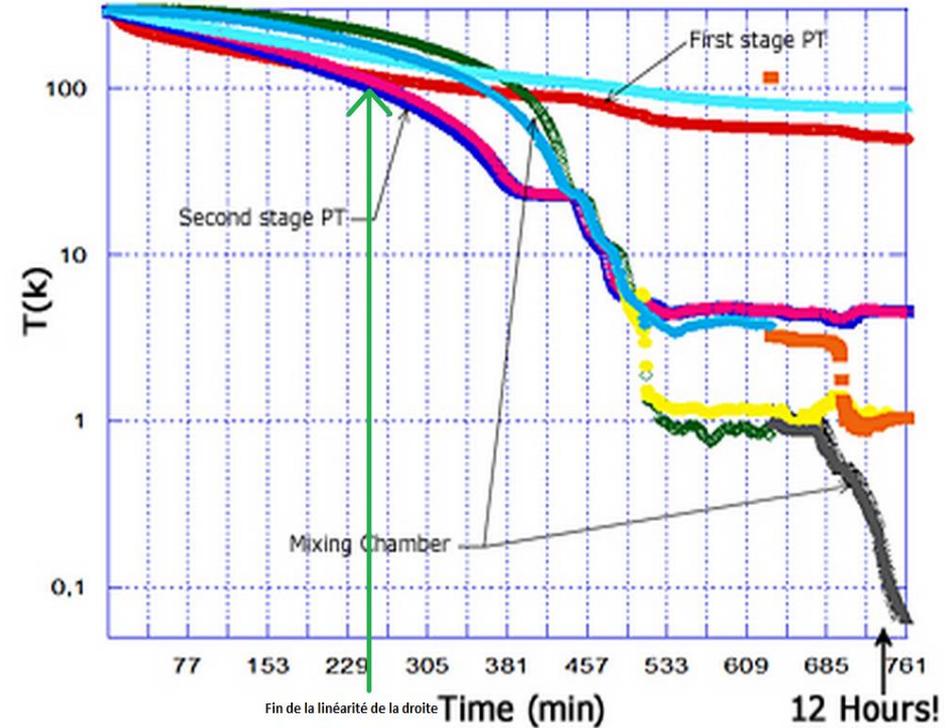
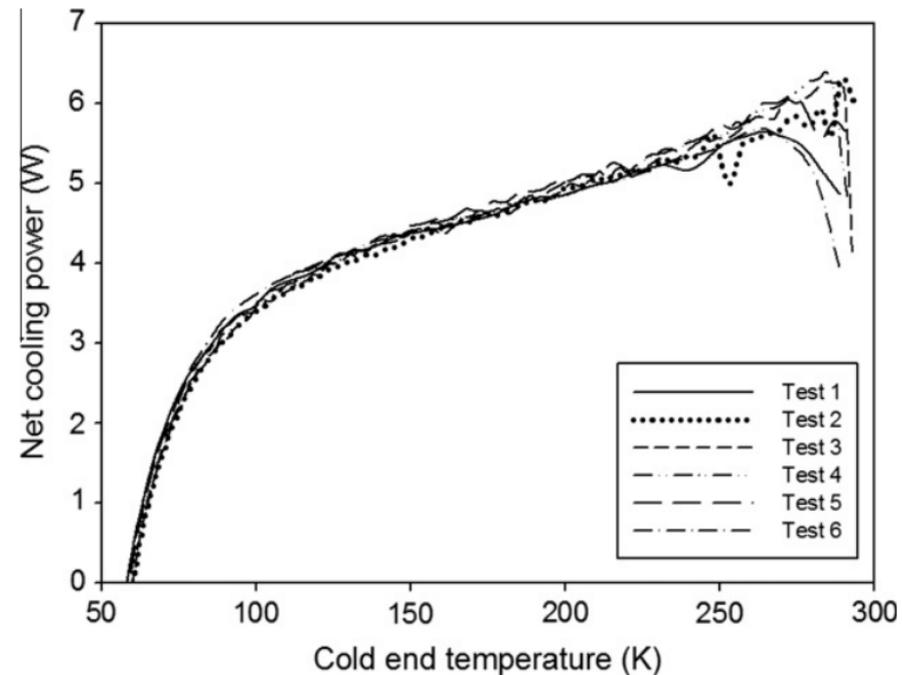
```
}
```

```
// fit 2nd order without crossterm
```

```
T1=3.12750000E+01+3.08750000E-01*P1+7.66666667E-01*P2
```

```
T2=2.82500000E+00-8.75000000E-03*P1+1.23333333E+00*P2
```

# Et en dehors du domaine garanti?



Il faut pourtant ce genre d'information pour évaluer le temps de mise en froid...

# Questions 3.3

# Bilan thermique du cryostat

- Charges conductives
- Charges radiatives

⇒ Étages isothermes

- Bilan thermique étage #i :

$$0 = [ P_r(i-1,i) - P_r(i,i+1) ] + [ P_k(i-1,i) - P_k(i,i+1) ] - P_{ref}$$

$$P_{r,filtre} = \sigma \cdot S_{filtre} \cdot (T_{i-1}^4 - T_i^4)$$

$$P_{r,écran} = \sigma \cdot E \cdot S_{écran} \cdot (T_{i-1}^4 - T_i^4)$$

$$P_k = S/l \cdot [ I_k(T_{i-1}) - I_k(T_i) ]$$

- Système algébrique non linéaire (inconnues = températures)

# Charge conductives

$$\dot{Q}_k = \frac{S}{l} \cdot (I_k(T_2) - I_k(T_1))$$

- T1 est la température de l'étage froid
  - T2 est la température de l'étage chaud
  - S est la section du lien
  - L est la longueur du lien
- Critère de dimensionnement des supports

Traction ou rupture:

$\sigma_{adm}/k$  ou  $\sigma_{adm}/\Delta I_k$  ( $I_k$  = intégrale de conductivité)

Flambage ou raideur:

$p_{cr} = \pi^2 \cdot E \cdot I / L^2$  (I est l'inertie de la barre)  $\Rightarrow E/k$

MATERIAU	$\sigma_{0.2}$ MPa	E GPa	$I_k$ (W/m) 300K-50K	$I_k$ (W/m) 50K-4K	$I_k$ (W/m) 4K-1K
304L	406 460 547	190 205 201	2941	135	0.40
6061-T6 A1	282 332 345	68 79 87	33510	2815	17.7
TA6V	1000 1350 1800	120	1336	78.2	0.80
G10-CR	414 703 758	28 34 36	157.1	9.75	0.12

Tableau 2 : Propriétés de quelques matériaux pour la réalisation des supports

# Charges radiatives

Sur base des données géométriques, on estimera la puissance radiative avec la formule suivante :

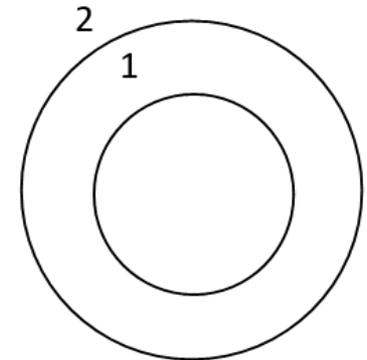
$$\dot{Q}_r = \sigma E \cdot A_1 \cdot (T_2^4 - T_1^4)$$

Avec E (CONTE, p.11), valable pour des sphères concentriques ou des cylindres concentriques longs en réflexion diffuse :

$$E = \frac{e_1 \cdot e_2}{e_2 + \frac{A_1}{A_2} \cdot (1 - e_2) \cdot e_1}$$

1 = surface réceptrice 2 = surface émettrice ( $T_1 < T_2$ )

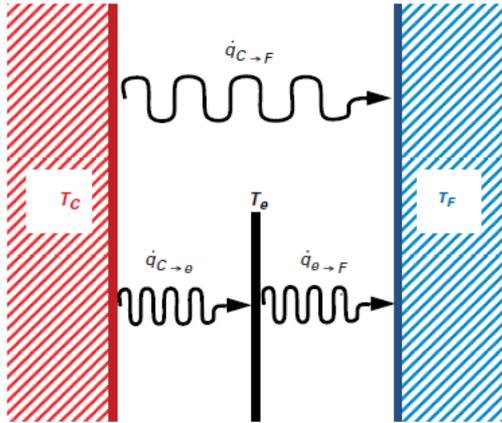
$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ )



**Tableau 9 – Émissivité totale normale  
de quelques métaux**

Métal	$T$ (K)	$\epsilon_n$
Acier inoxydable 18-8	300	0,20
	80	0,12
	4	0,10
Aluminium brut commercial	300	0,25
	80	0,12
	4	0,07
Aluminium poli mécanique	300	0,20
	80	0,10
	4	0,06
Aluminium poli électrolytique	300	0,15
	80	0,08
	4	0,04
Chrome	300	0,08
Cuivre poli mécanique	300	0,10
	80	0,06
	4	0,02
Étain	300	0,050
	80	0,012
	4	0,013
Laiton poli	300	0,03
	80	0,03
	4	0,02
Nickel	300	0,05
	80	0,02
Or	300	0,02
	80	0,01
Argent	300	0,02
	80	0,01
	4	0,005

# Ecran libre



Si on considère l'échange radiatif entre deux écrans de même émissivité  $e$  et de même surface  $A$ , le flux radiatif ( $W/m^2$ ), se réduit à :

$$\dot{Q}''_{r,0} = \sigma e \cdot (T_2^4 - T_1^4)$$

Car  $E \sim e$  si  $e \ll 1$

Si on introduit une surface qui a les mêmes propriétés entre les deux qui n'est pas refroidie, on a :

$$\dot{Q}''_{r,1} = \sigma e \cdot (T_2^4 - T_S^4) = \sigma e \cdot (T_S^4 - T_1^4)$$

La température d'équilibre de l'écran est donc :

$$T_S^4 = \frac{(T_2^4 + T_1^4)}{2}$$

Et le flux de chaleur :

$$\dot{Q}''_{r,1} = \frac{\dot{Q}''_{r,0}}{2}$$

Il est facile de généraliser cette formule si on introduit  $N$  écrans libres :

$$\dot{Q}''_{r,N} = \frac{\dot{Q}''_{r,0}}{N + 1}$$

C'est le principe de la superisolation.

# Superisolation

Pour évaluer les performances de la super-isolation, on utilise la conductivité effective d'une épaisseur de multicouche (30-50 couches/cm de Mylar aluminisé) [adaptation de D.G.Gilmore, ed., Spacecraft Thermal Control Handbook, AIAA 2012] :

$$k_{eff} = a \cdot \left( \frac{T_H - T_C}{2} \right) + b \cdot \frac{(T_H^{4.67} - T_C^{4.67})}{T_H - T_C} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$a = 1.905E-7 ; b = 2.907E-15 \quad [S.I.]$$

Arbitrary units

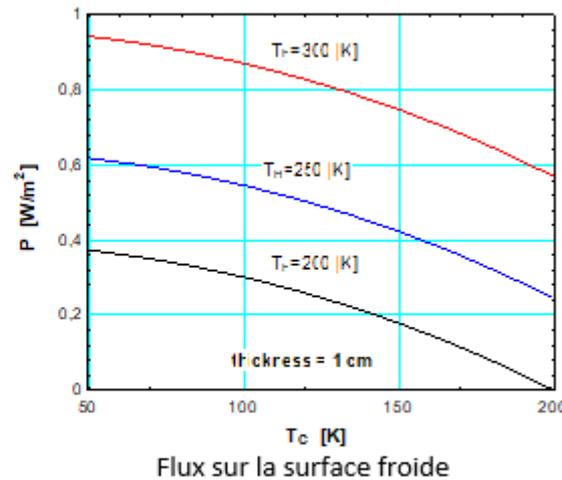
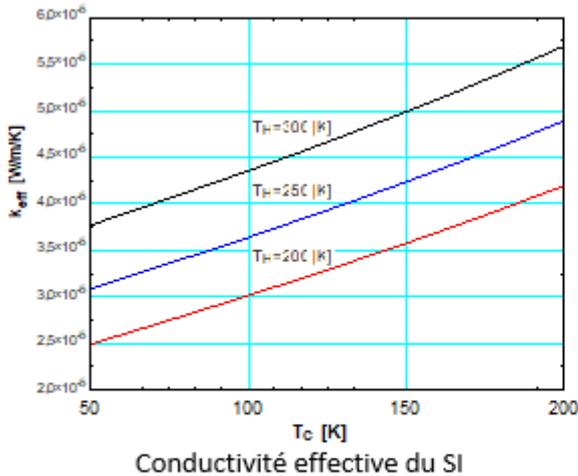
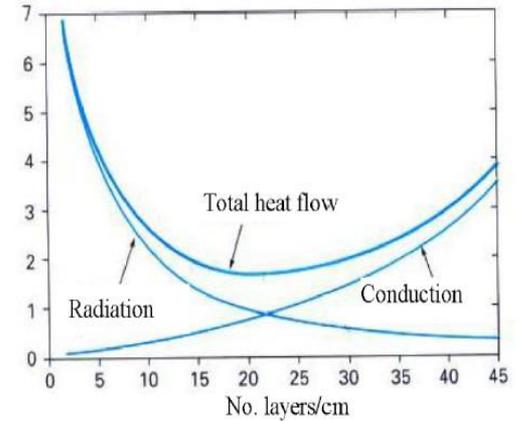


Figure 13 : Performance de la superisolation

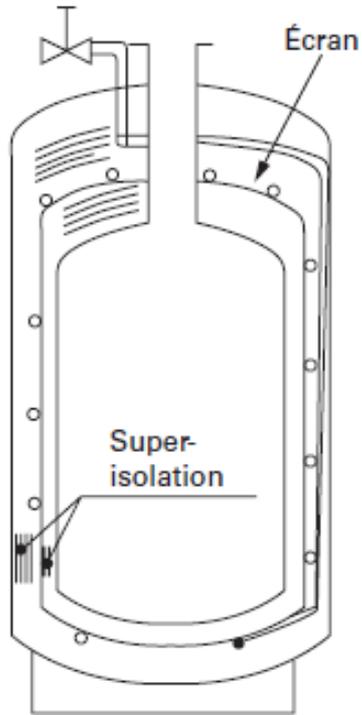
Une formulation plus explicite avec le nombre de couches est donnée par la formule suivante (densité optimale de 15-20 couches/cm):

$$q_{\text{total}} = \left[ \frac{\beta}{N+1} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \right] + \frac{\alpha}{N+1} \cdot \frac{T_1 + T_2}{2} \cdot (T_1 - T_2)$$

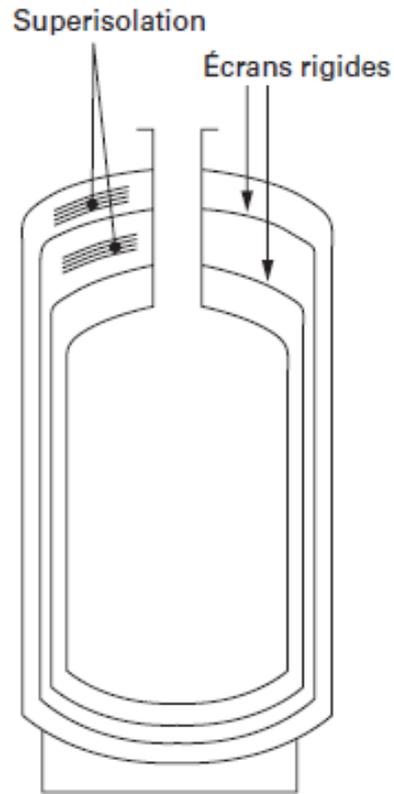
$$\alpha = 1.401 \cdot 10^{-4} \quad (S.I.)$$

$$\beta = 3.741 \cdot 10^{-9} \quad (S.I.)$$

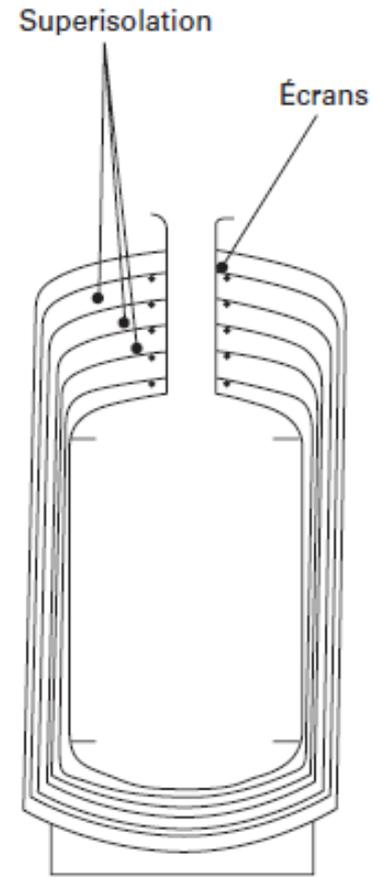
<https://cds.cern.ch/record/1974062/files/CERN-2014-005-p353.pdf>



(a) écrans rigides refroidis par les vapeurs froides



(b) écrans rigides avec super-isolation et refroidis par le col



(c) multi-écrans super isolés et refroidis par le col

Rem: réservoir d'hélium perte < 1 L/j (soit < 30 mW)

# Conduction dans les écrans

GEOMETRIE	ECART DE TEMPERATURE MAXIMUM
Plaque circulaire de diamètre D	$\Delta T_1 = \frac{1}{16} \cdot \frac{q''}{ke} \cdot D^2$
Cylindre de longueur L, diamètre D, fermé à l'extrémité	$\Delta T_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{q''}{ke} \cdot L^2 + \frac{1}{4} \cdot \frac{q''}{ke} \cdot D \cdot L$
Cylindre de longueur dont les extrémités ont une température imposée	$\Delta T_3 = \frac{1}{8} \cdot \frac{q''}{ke} \cdot L^2$

Tableau 4 : Calcul du gradient thermique dans une géométrie cylindrique

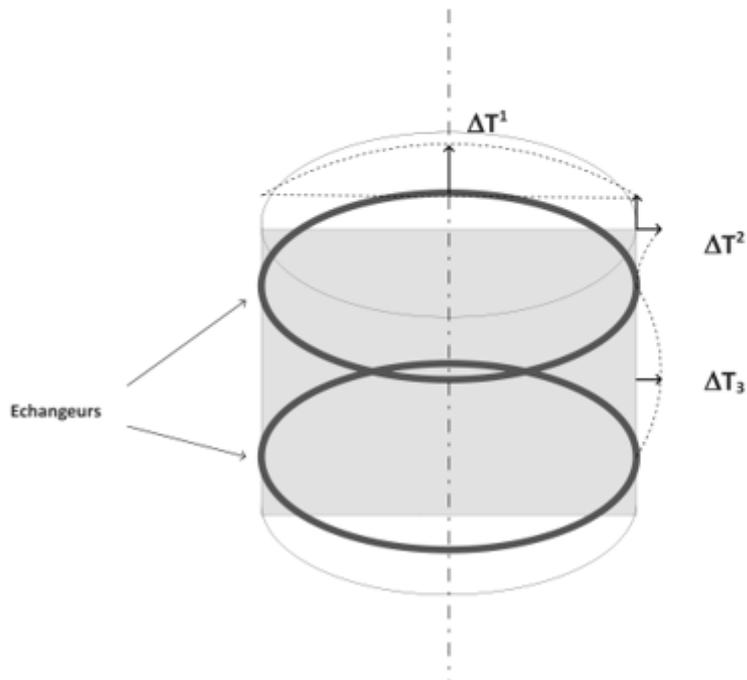


Figure 14 : Calcul du gradient de température dans une géométrie cylindrique

# Temps de mise en froid

- L'énergie à extraire et la puissance disponible...

$$t = \frac{\Delta E}{P}$$

- A regarder aussi:
  - Couplage thermique des masses ( $t = C/G$ )
  - Diffusion de la chaleur ( $D = k/\rho.c$  [m<sup>2</sup>/s] et  $t \sim L^2/D$ )

Questions 4.7 !