

# Calculs par éléments finis : mais à quoi ça sert quand on fait de la cryogénie ?

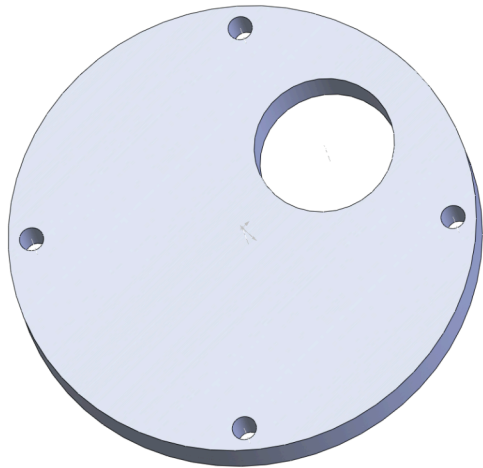
*F. THOMAS*

*ILL / Bureau des Projets et Calculs*

# Plan :

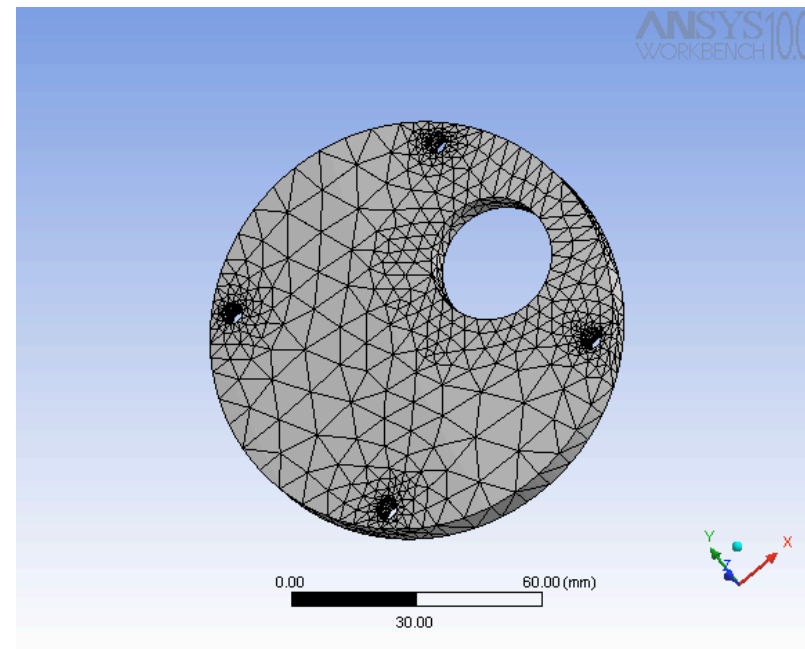
- Introduction : qu'est ce qu'un modèle éléments finis ?
- Moi, je sais tout faire à la main, je n'ai pas besoin de calculs savants...
- De toute façon, c'est trop compliqué et ça ne donne aucun résultat...
- Conclusion.

## Qu'est ce qu'un modèle éléments finis ?



### Pièce mécanique :

- 1 élément.
- 1 calcul, *si on y arrive...*

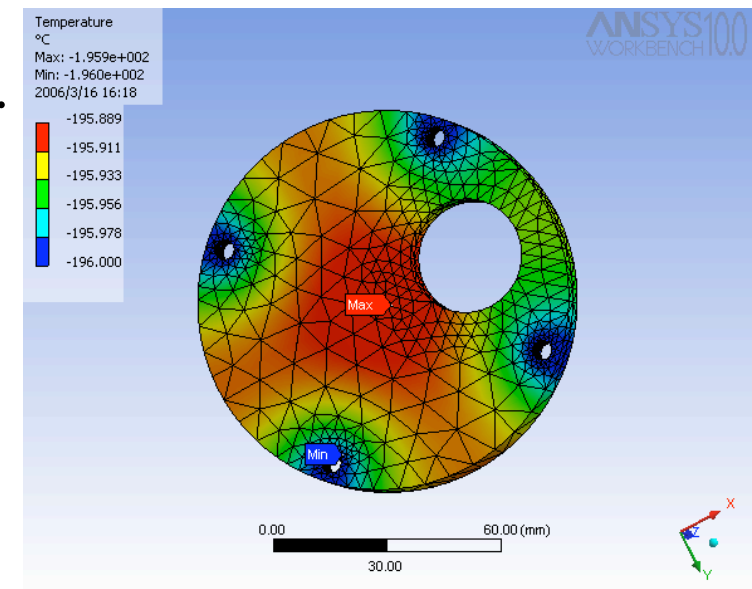


### Modèle éléments finis :

- 8231 éléments.
- 13378 nœuds (calculs).

# Modèle éléments finis :

- Principes de base :
  - Découper la pièce à étudier en formes géométriques élémentaires (maillage).
  - Définir les conditions aux limites (température d'une surface,...) et les chargements (rayonnement,...).
  - Résoudre sur chaque nœud du maillage.
  - Afficher le résultat.



# Qui travaille ?

- *Maillage (mesh)* : c'est l'ingénieur et l'ordinateur / le logiciel de façon itérative.
- Définition des chargements et des conditions aux limites (*pre-processing*) : c'est l'ingénieur.
- Résolution du modèle (*solve*) : c'est l'ordinateur / le logiciel.
- Affichage et interprétation des résultats (*post-processing*) : c'est l'ingénieur.

**Configuration :**

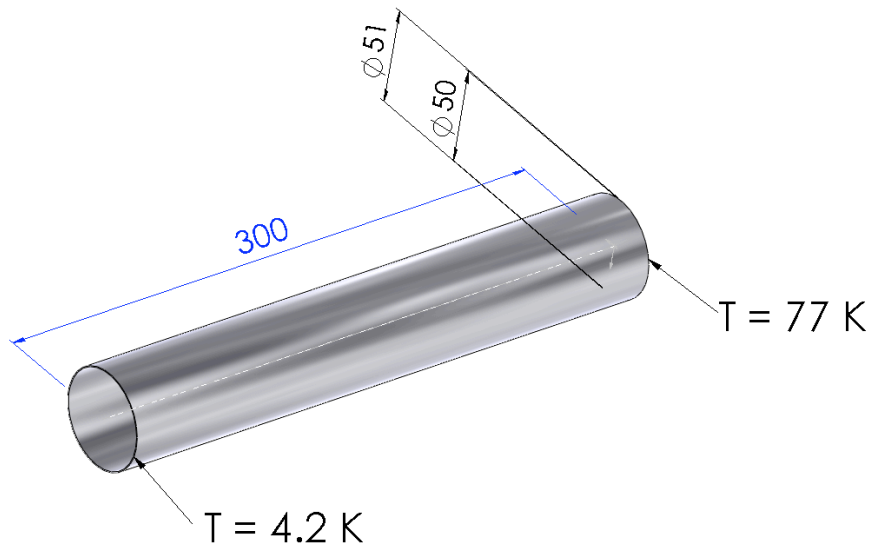
**ANSYS 10 / Intel Xeon 64 Bi-pro 3.2GHz 4Go RAM**

Bon, mais est-ce que finalement, on ne peut pas tout calculer à la main ?

**... oui, vous avez raison... dans les cas simples.**

**... mais ce n'est pas forcément un gain de temps !**

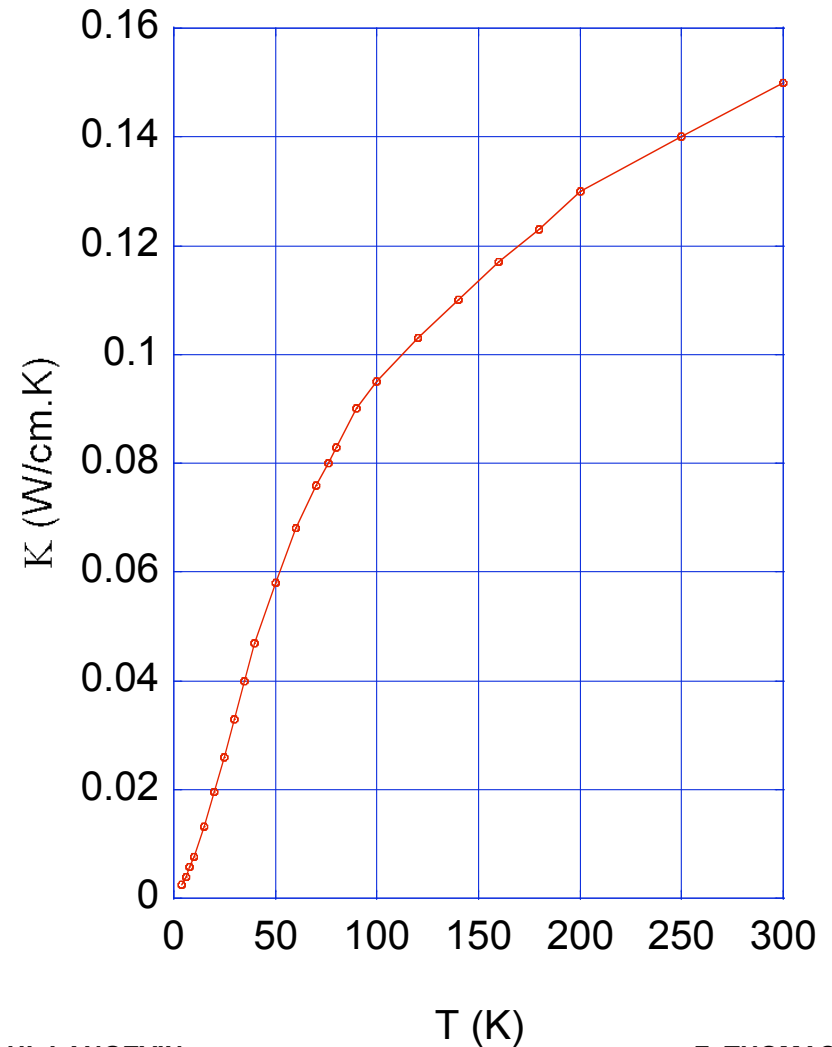
## Exemple :



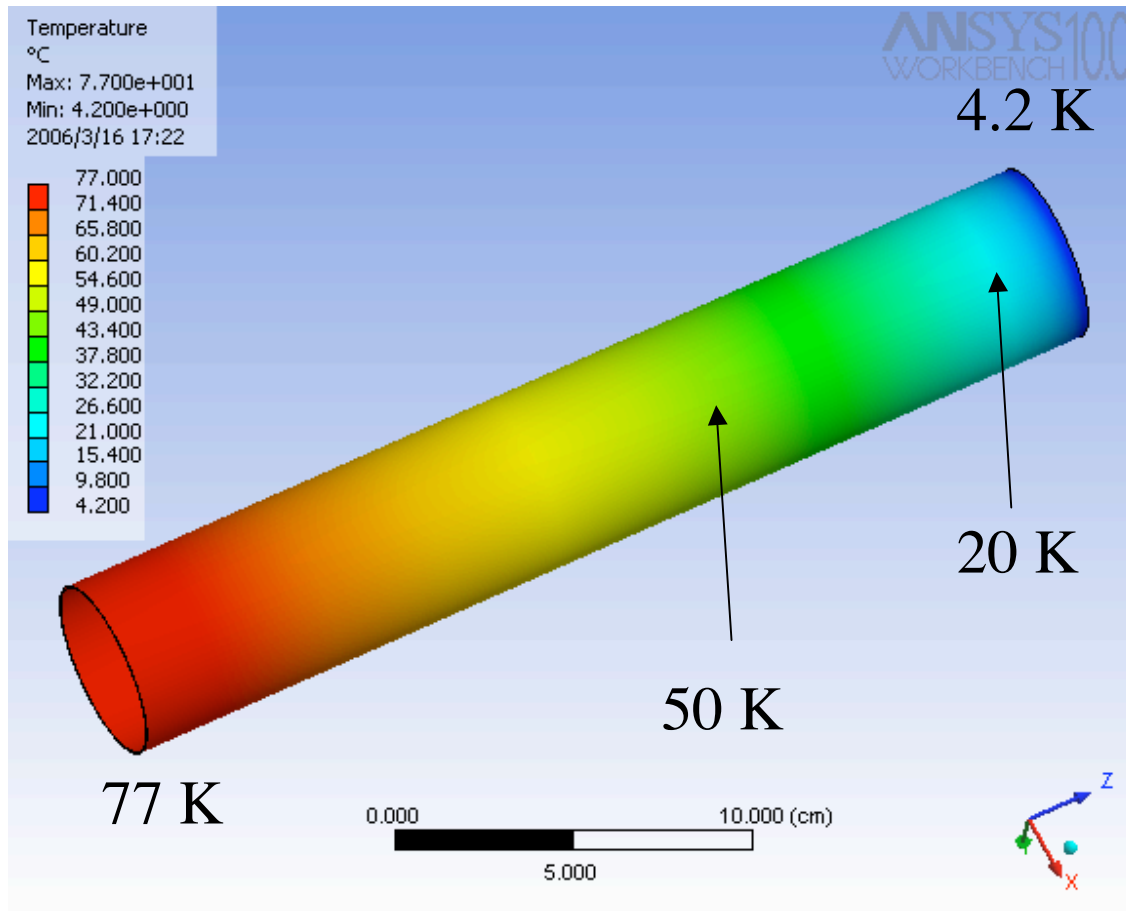
Tube inox thermalisé :

Quel est le profil de température dans la longueur ?

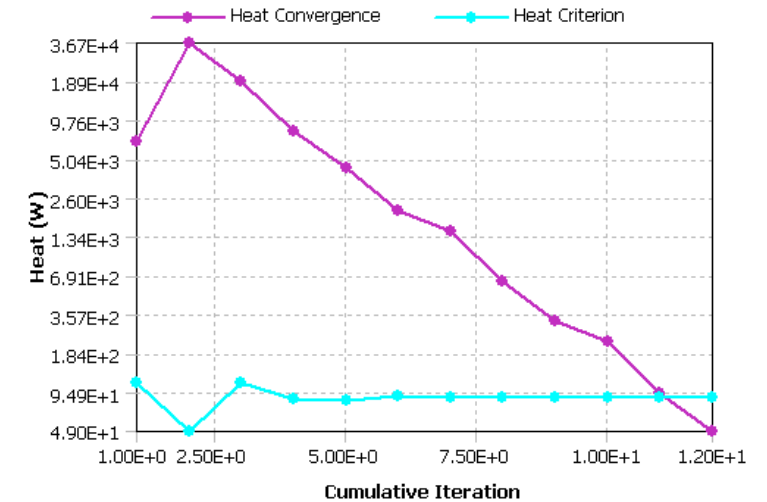
Conduction thermique de l'inox



# Réponse :



# Calcul non linéaire :



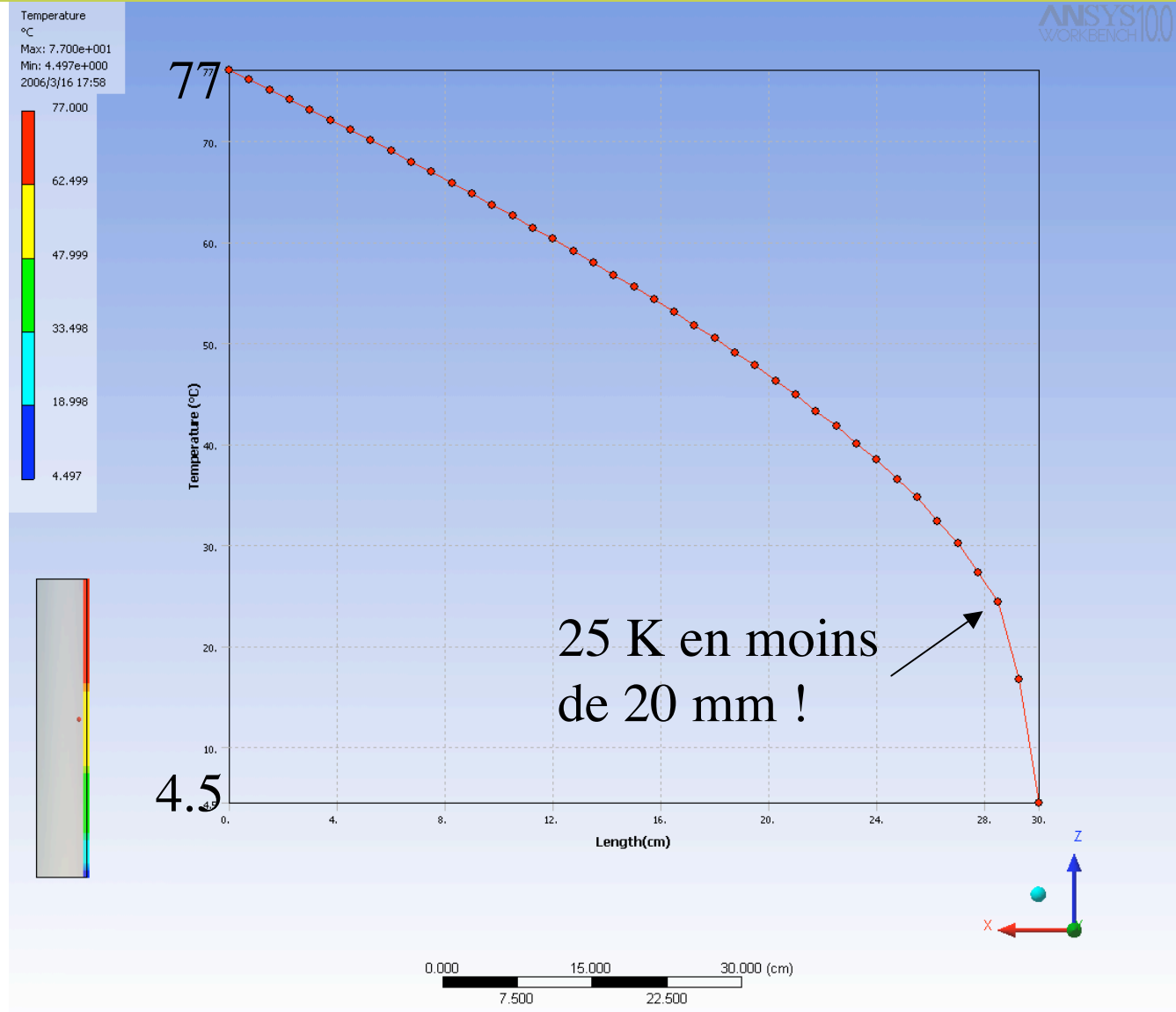
*Converge en 12 itérations (5 min).*

**Le profil de température n'est pas linéaire !**



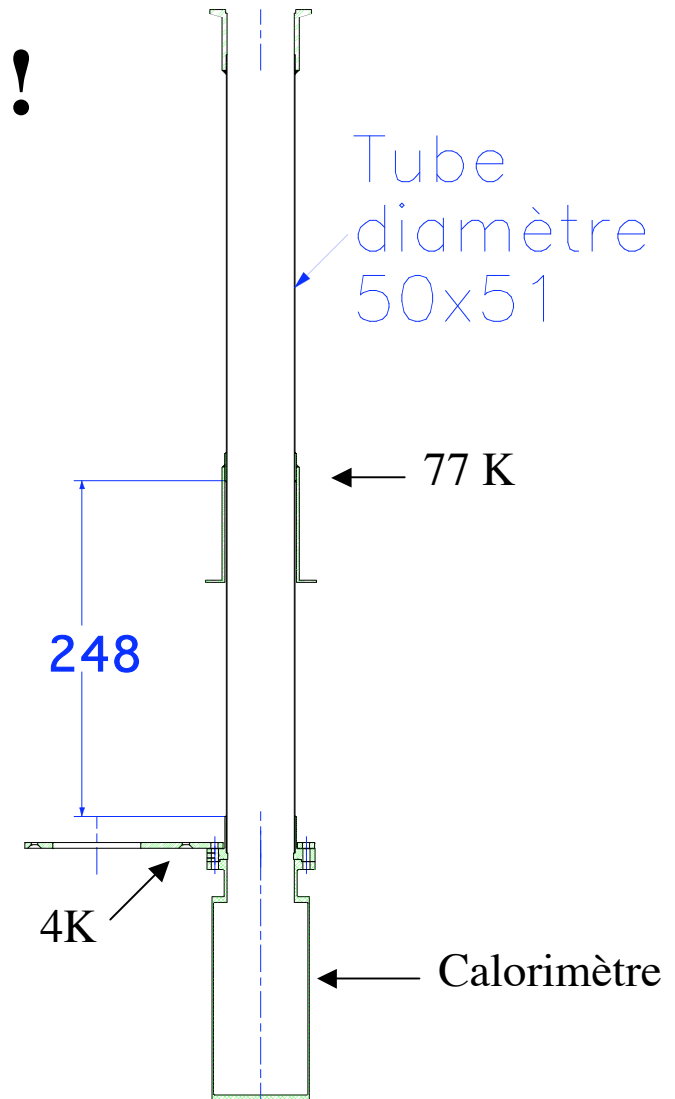
# Profil de température suivant la longueur du cylindre.

*C'est beaucoup plus rapide à calculer qu'à la main...et ça donne la puissance arrivant sur le 4K : 90 mW.*



## Exemple simple... mais utile !

- Modélisation simple :
  - 37083 éléments.
  - 257913 nœuds.
- Représentatif d'un vrai système :  
le puits échantillon d'un cryostat Pulse Tube.
- Utile par exemple pour concevoir un insert (dilution,  $^3\text{He}$ ,...) pour ce cryostat.



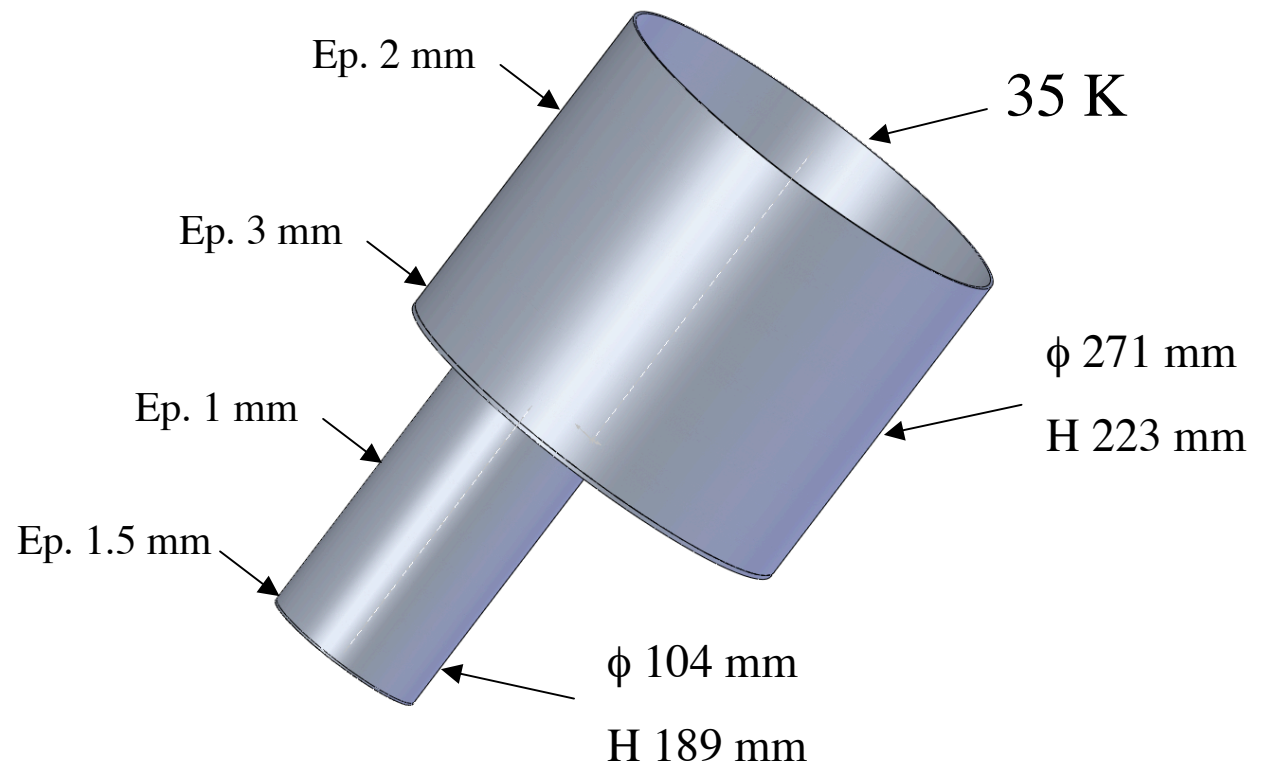
**OK, pour ce modèle académique.**

**Mais sur des pièces un peu plus compliquées,  
est-ce que ça ne va pas être le bazar ?**

C'est sur que ça ne va pas se simplifier, mais on y arrive.

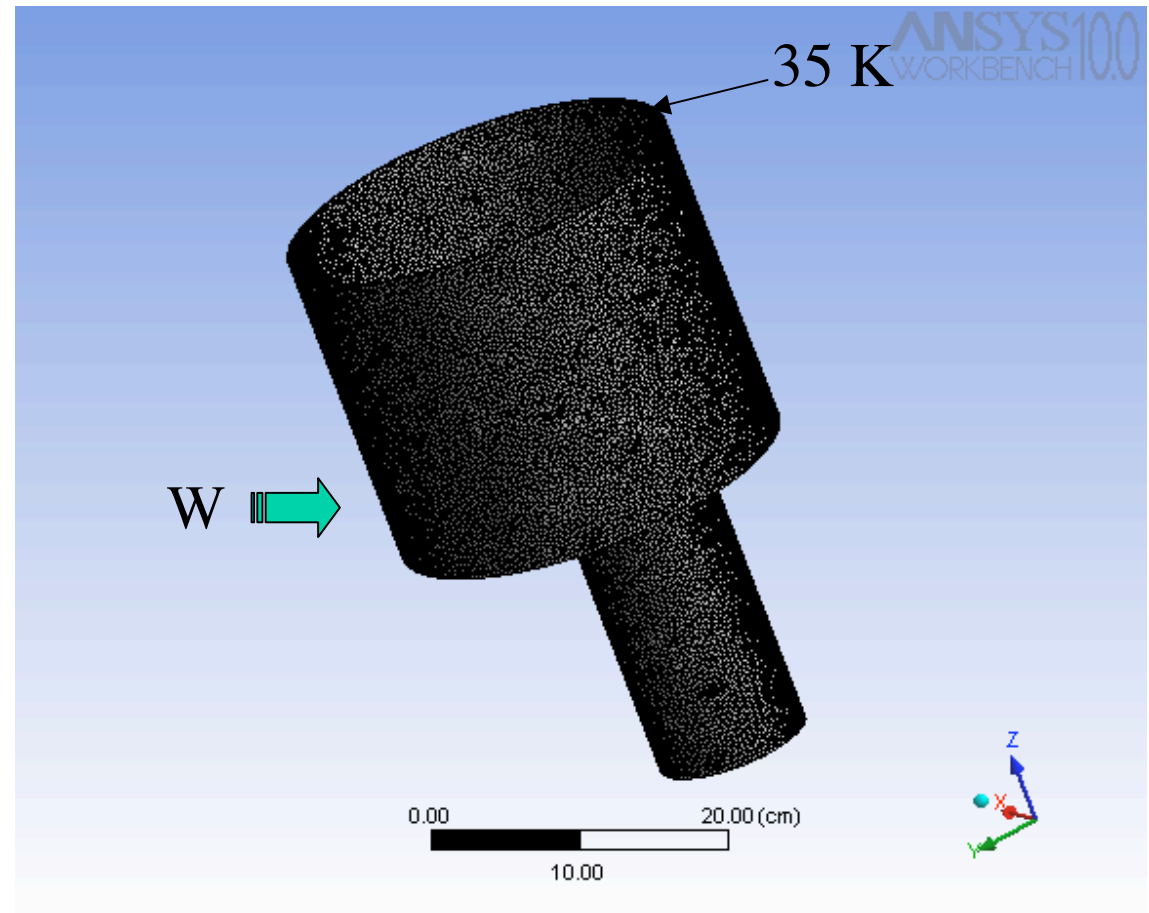
# Ecran 1<sup>er</sup> étage d'un cryostat Pulse Tube :

- Ecran anti-rayonnement thermalisé sur le premier étage de la machine.
- Pièce en aluminium.
- Pièce compliquée pour le calcul à la main :
  - Géométrie pas de révolution.
  - Epaisseurs différentes.
- Objectif : avoir la carte de température de la pièce.



## Modèle éléments finis :

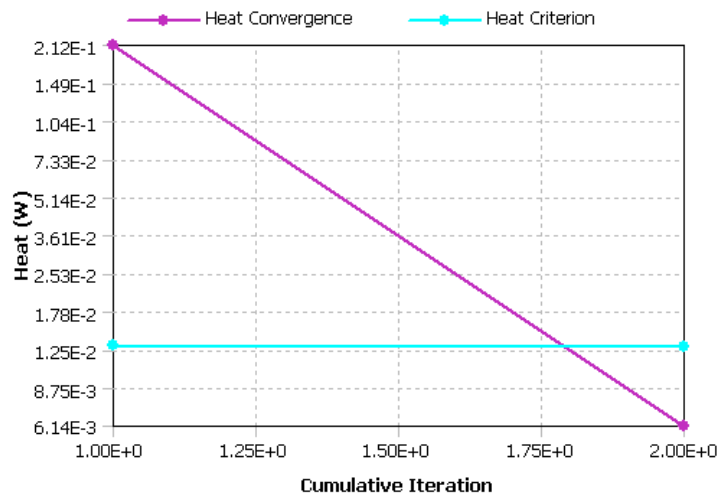
- 129920 éléments.
- 254933 nœuds.
- Modèle vite lourd car les épaisseurs sont faibles. On ne met qu'une seule maille dans l'épaisseur.
- Chargements :
  - Rayonnement sur les surfaces extérieures.
  - Thermalisation à 35 K.



# Modèle fortement non linéaire : convergence ?

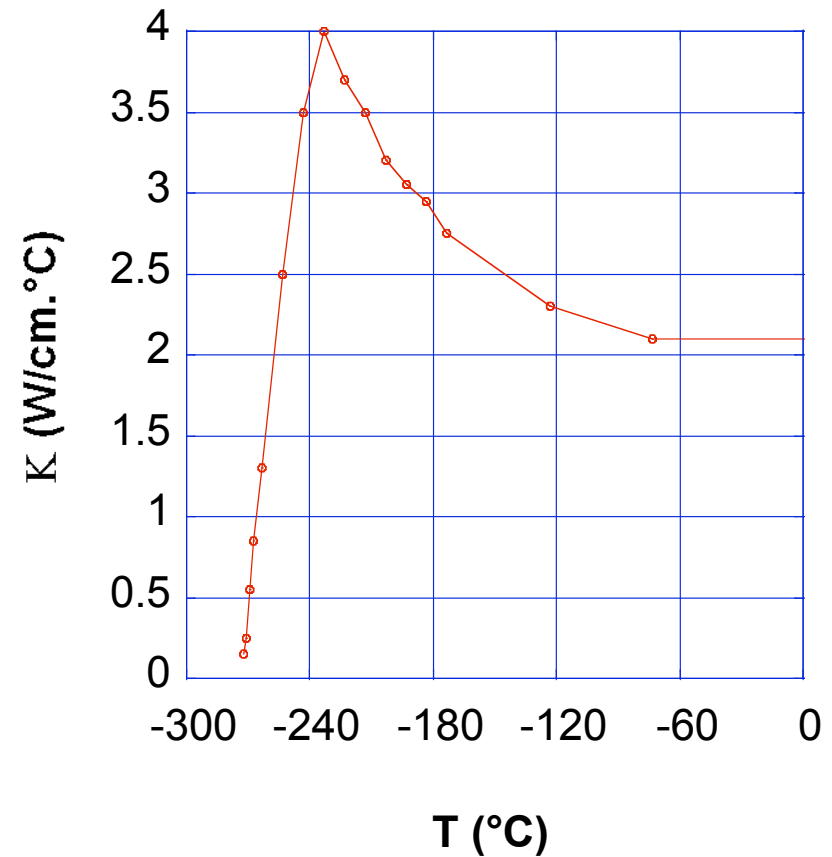
Rayonnement :

$$W \propto (T_f^4 - T_i^4)$$



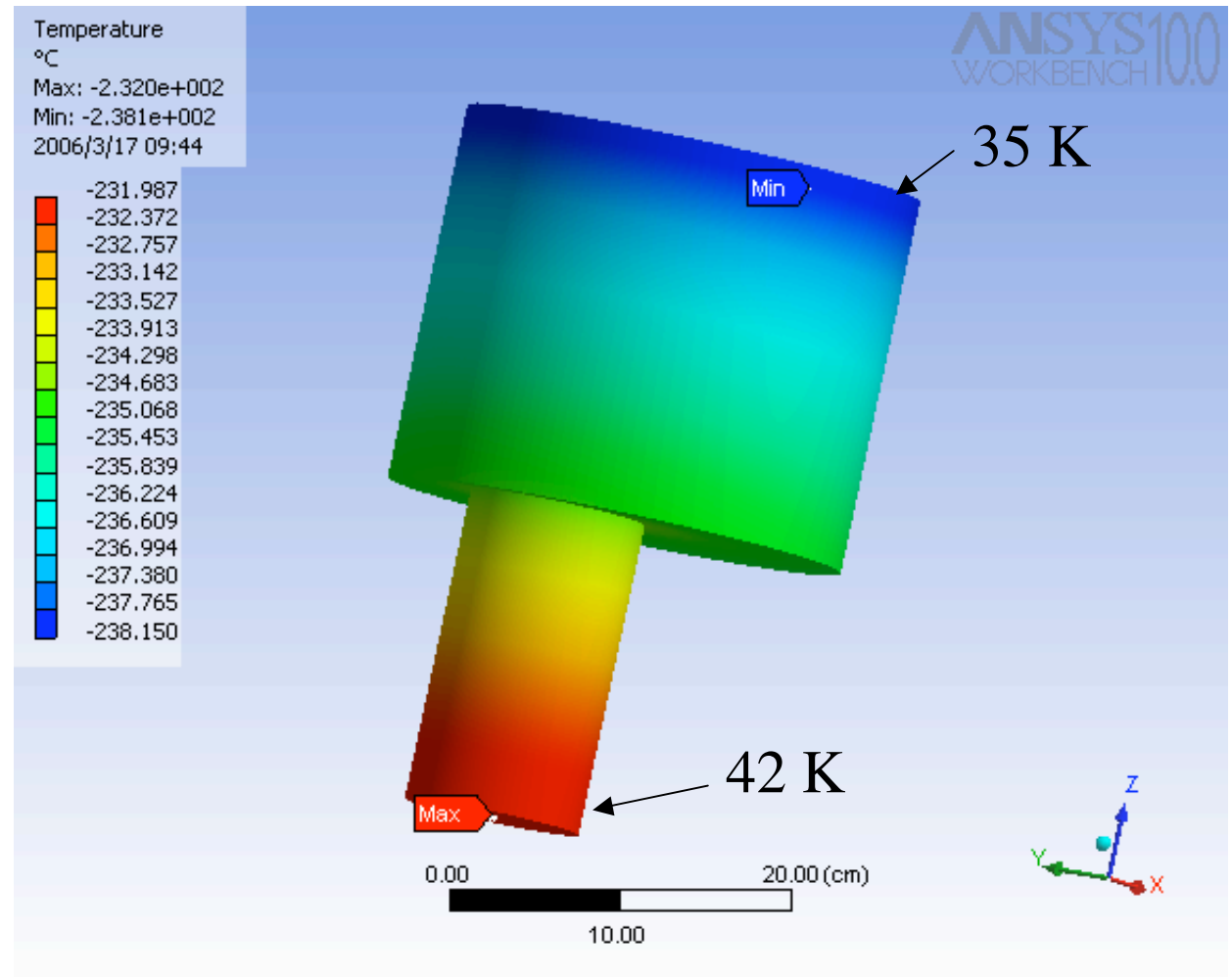
Converge bien (2 itérations) car les chargements sont faibles (13 W de rayonnement).

Conduction thermique :



## Résultat :

- Gradient faible : 7 K
- Pas de point chaud.
- Ecran bien conçu.
- Pas besoin de super-isolant.



## On peut faire mieux : on peut essayer de calculer le temps de refroidissement.

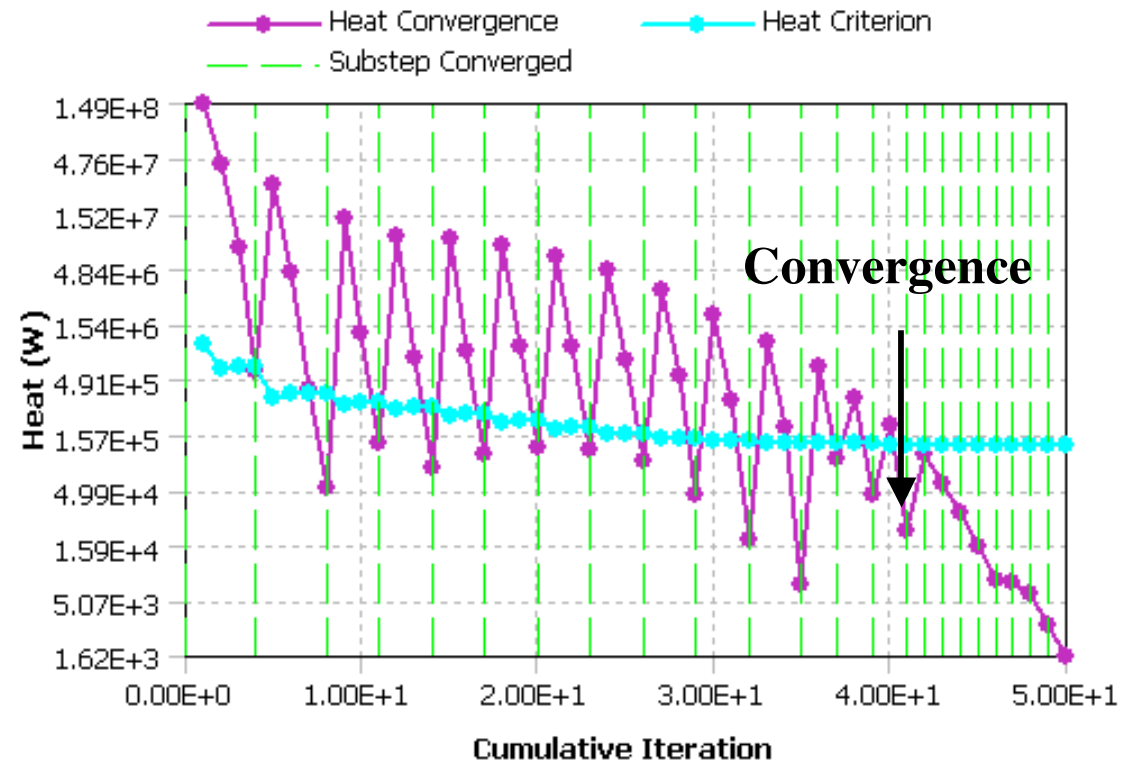
- C'est ce qui s'appelle faire un calcul thermique transitoire.
- Hypothèses :
  - à  $t = 0$ , on applique tous les chargements (bride à 35 K et rayonnement) sur une pièce à 22°C.
  - pour simplifier le calcul, on suppose que la chaleur spécifique est constante (et égale à sa valeur à l'ambiante de  $C_p = 0.8 \text{ J/g.K}$ ) sur la plage de température considérée.
- On calcule donc un **majorant** du temps de refroidissement. C'est ce qui nous intéresse dans la pratique : *c'est le temps qu'on rajoute au temps de refroidissement de la machine seule.*



## Remarques :

- Le calcul avec  $C_p(T)$  n'est pas plus compliqué. Il est juste plus long !
- On a mis  $T_b$ , la température de la bride, à 35 K à  $t = 0$ . On peut faire un chargement en  $T_b(t)$ . C'est encore plus long à calculer.

## Convergence :



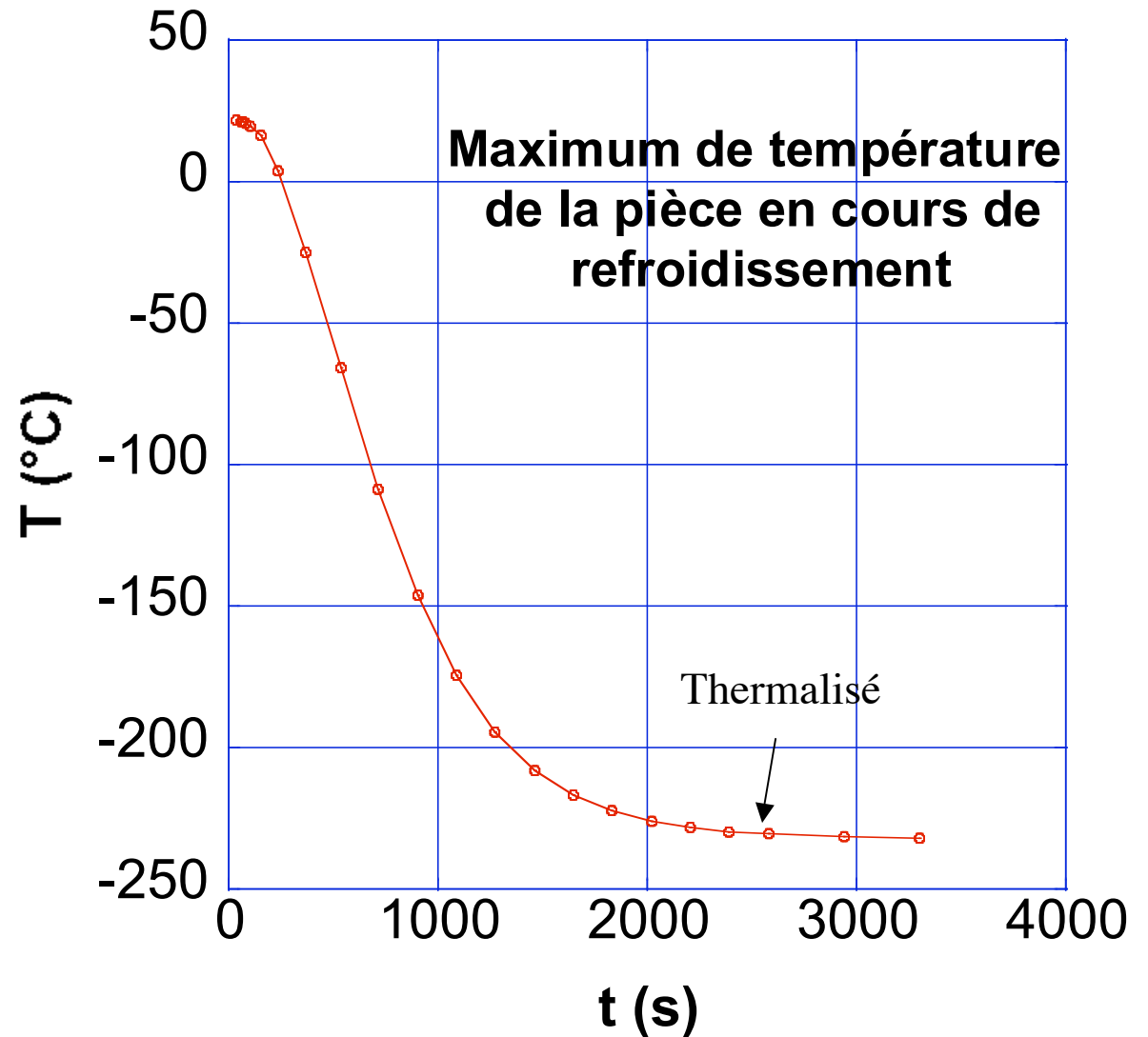
*20 min de calcul sur 50 itérations en temps.  
Convergence après 42 itérations.*

**Résultat :**

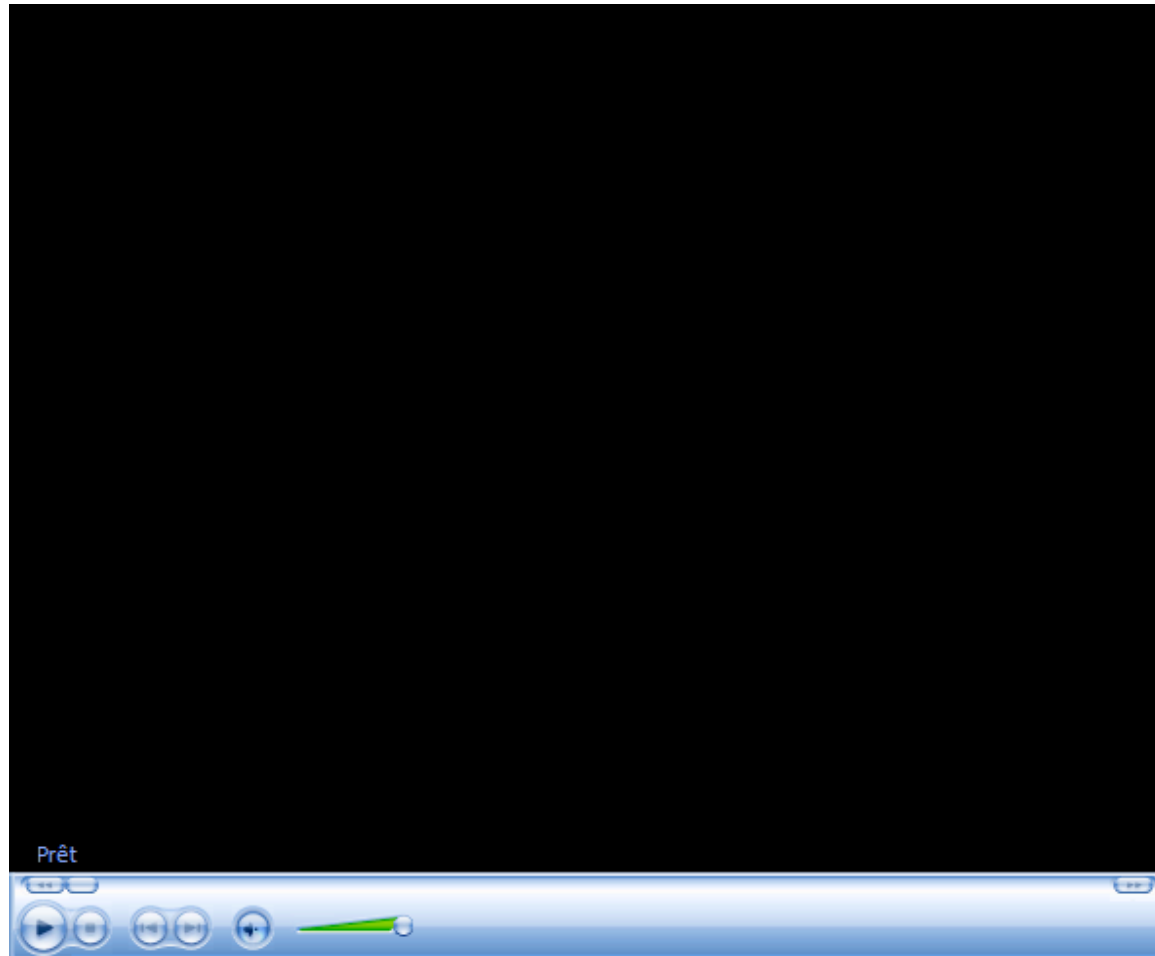
**Temps de  
thermalisation :**

**40 à 45 min**

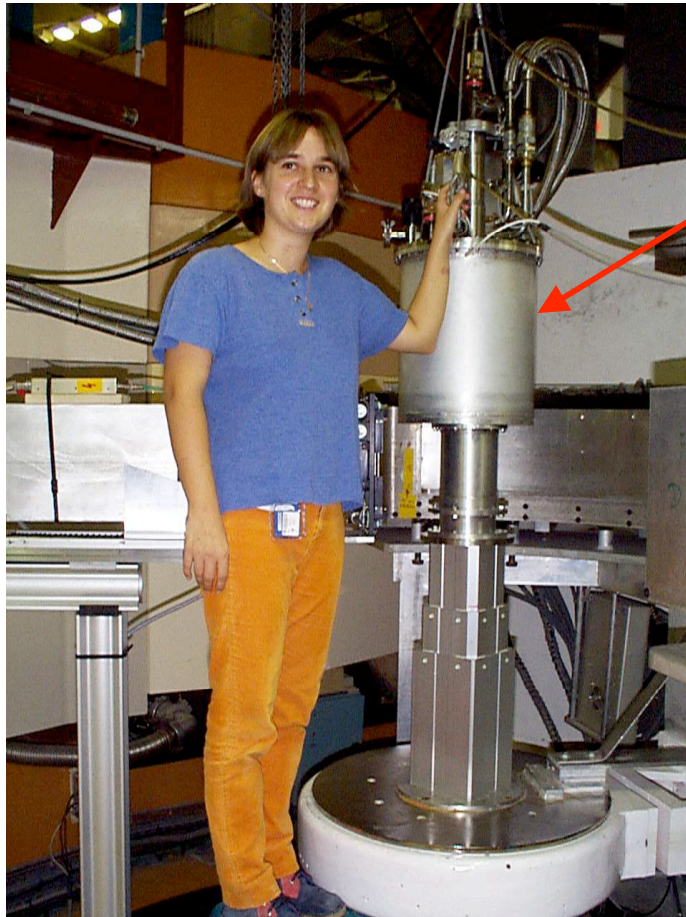
(2400 à 2700 s)



## Vidéo (rapide...) du refroidissement de l'écran :

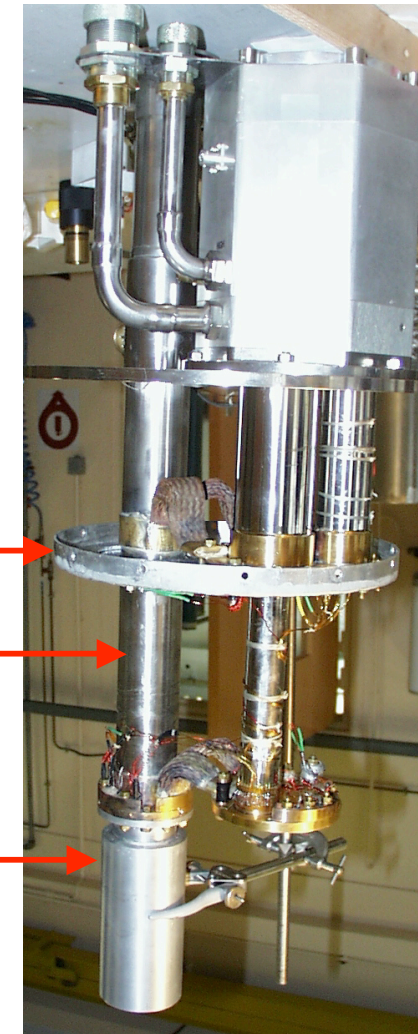


# A quoi ressemble le matériel en vrai ?



Montage sur D2B

# Machine ouverte



Enceinte extérieure

Bride 35 K

Tube  $\phi$  50 x 51

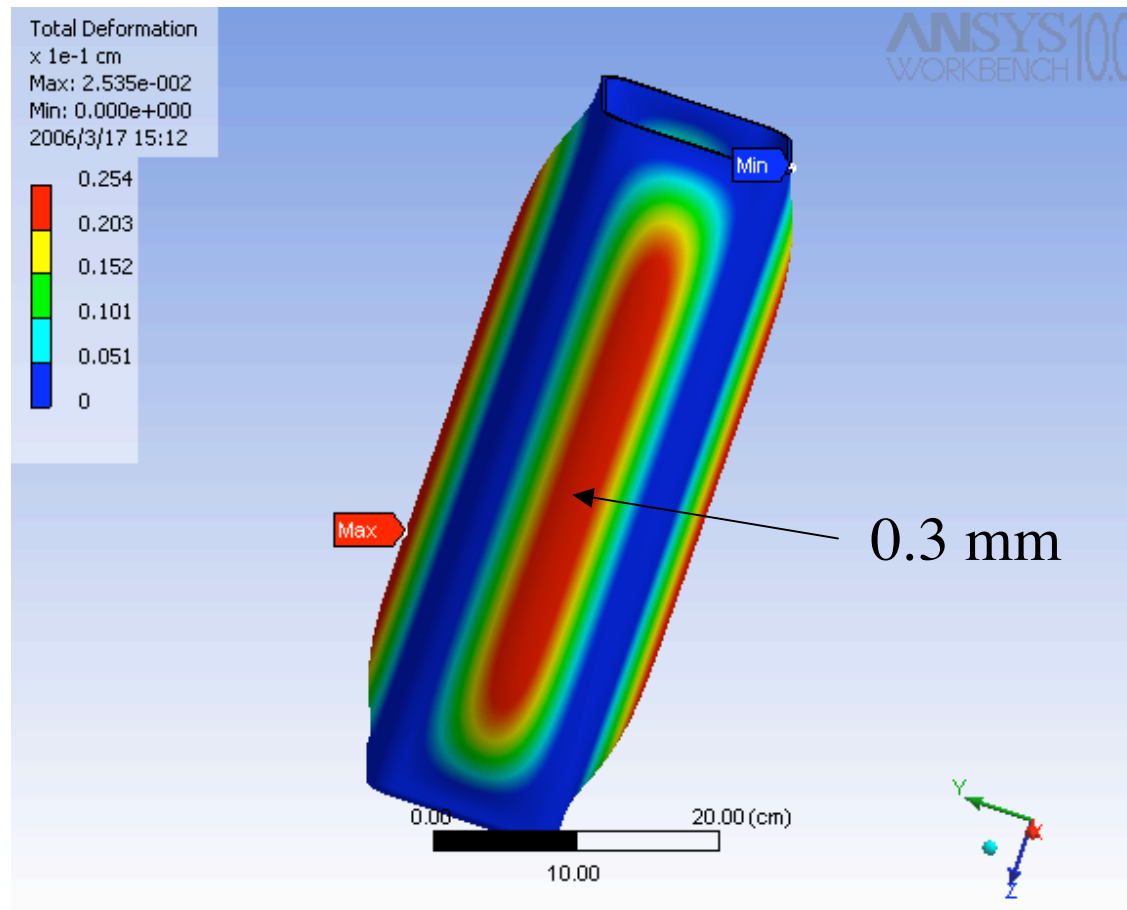
Calorimètre

## Conclusion :

- Le calcul par éléments finis permet de dimensionner thermiquement le cryostat au moment de sa conception.
- Il donne accès à **la carte des températures** dans les différentes pièces du cryostat mais aussi à leur **temps de refroidissement**.
- **C'est facile** : on a juste à sous-traiter les calculs emmerdants à la conception au Bureau des Projets et Calculs.

...mais ce n'est pas tout...

# On peut aussi faire de la tenue au vide !



Déformation  
d'un calorimètre  
carré avec un  $\Delta$   
P de 1 bar

## *Merci à :*

- Maurice De Palma, Jean-Paul Gonzales (SANE)
- Emmanuelle Suard, Ludovic Gendrin (D2B)
- Michel Thomas (BPC)