



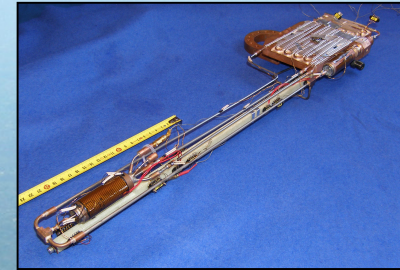
INSTITUT NANOSCIENCES
ET CRYOGÉNIE

la recherche, ressource fondamentale
research - a fundamental resource

SBT | SCIB | SPINTEC | SPRAM | SPSMS | SP2M

inac.cea.fr

BOUCLES FLUIDES CRYOGENIQUES A POMPAGE CAPILLAIRE



Ph GULLY

Groupe Cryoréfrigérateurs et Cryogénie Spatiale (GCCS)

Service des Basses Températures (SBT)

Institut Nanosciences et Cryogénie (INAC)

Direction des Sciences de la Matière (DSM)

CEA - Grenoble

Collaboration avec le TIPC (CAS)



Contexte

Fluides cryogéniques (impact sur la géométrie)

Spécificités des boucles fluides cryogéniques

Prototype du CEA SBT

Besoins de R&D pour les boucles fluides cryogéniques

Conclusion

CONTEXTE

Domaine spatial

Distribution de la puissance frigorifique dans les satellites

Refroidissement des détecteurs

Réfrigérateur



Détecteur



ΔT

x mètres

Ecoulement de chaleur

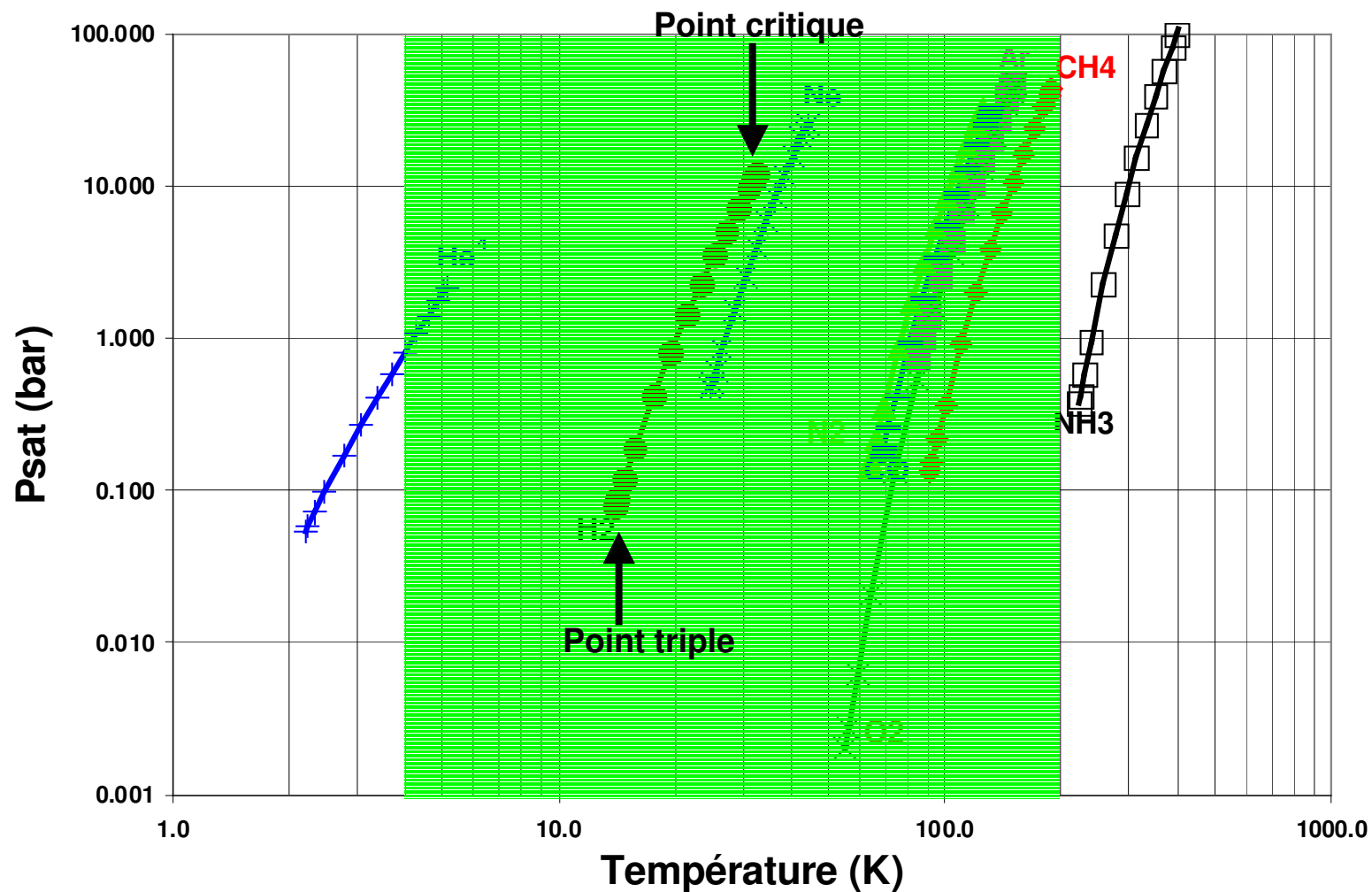
2 zones non couvertes

5K-13K

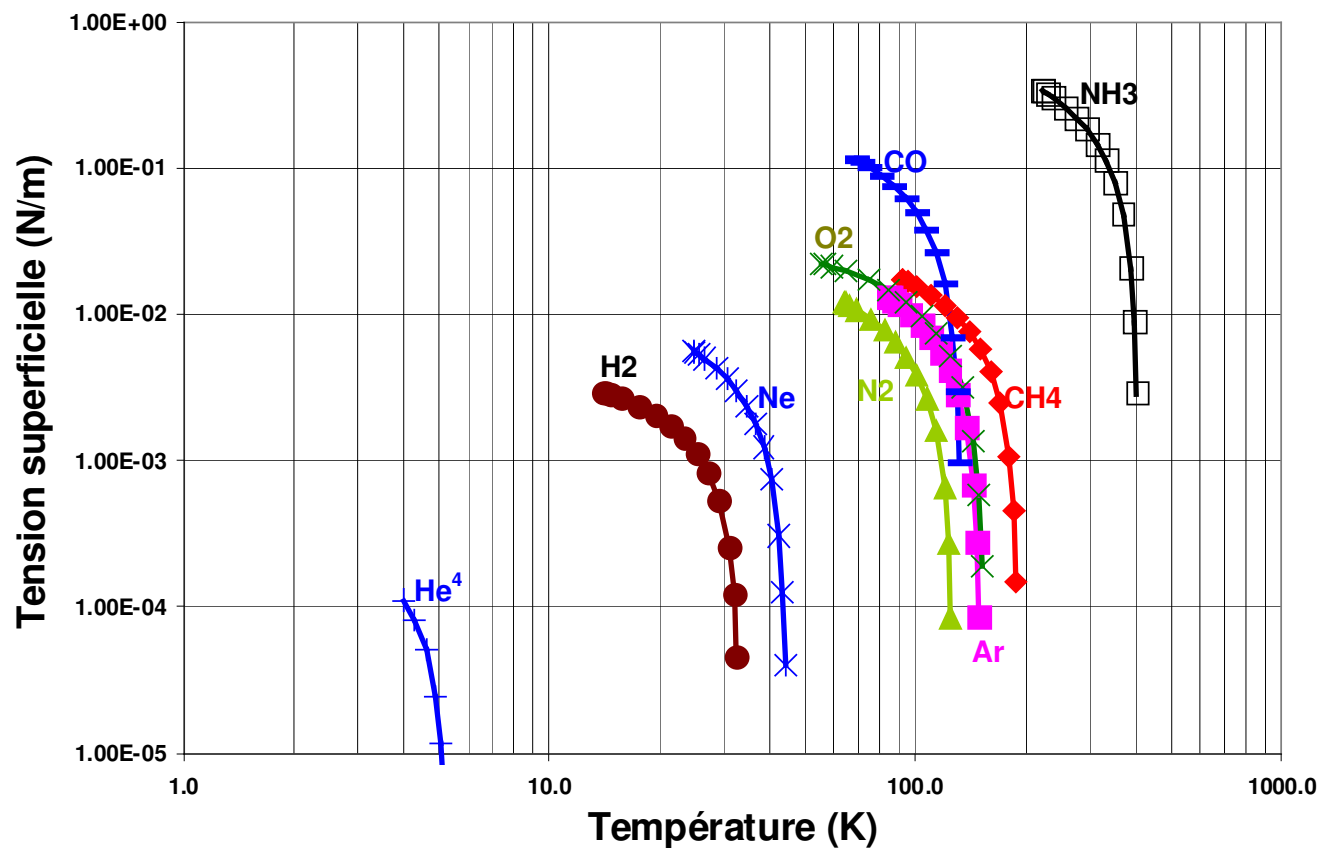
45K-55K

4K à 200K

1mbar à 50bar

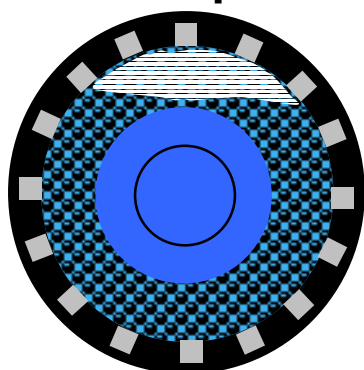


- Faible tension superficielle
- Faible pression capillaire (à géométrie donnée)
- Doit-on utiliser des mèches capillaires à pores plus petits?

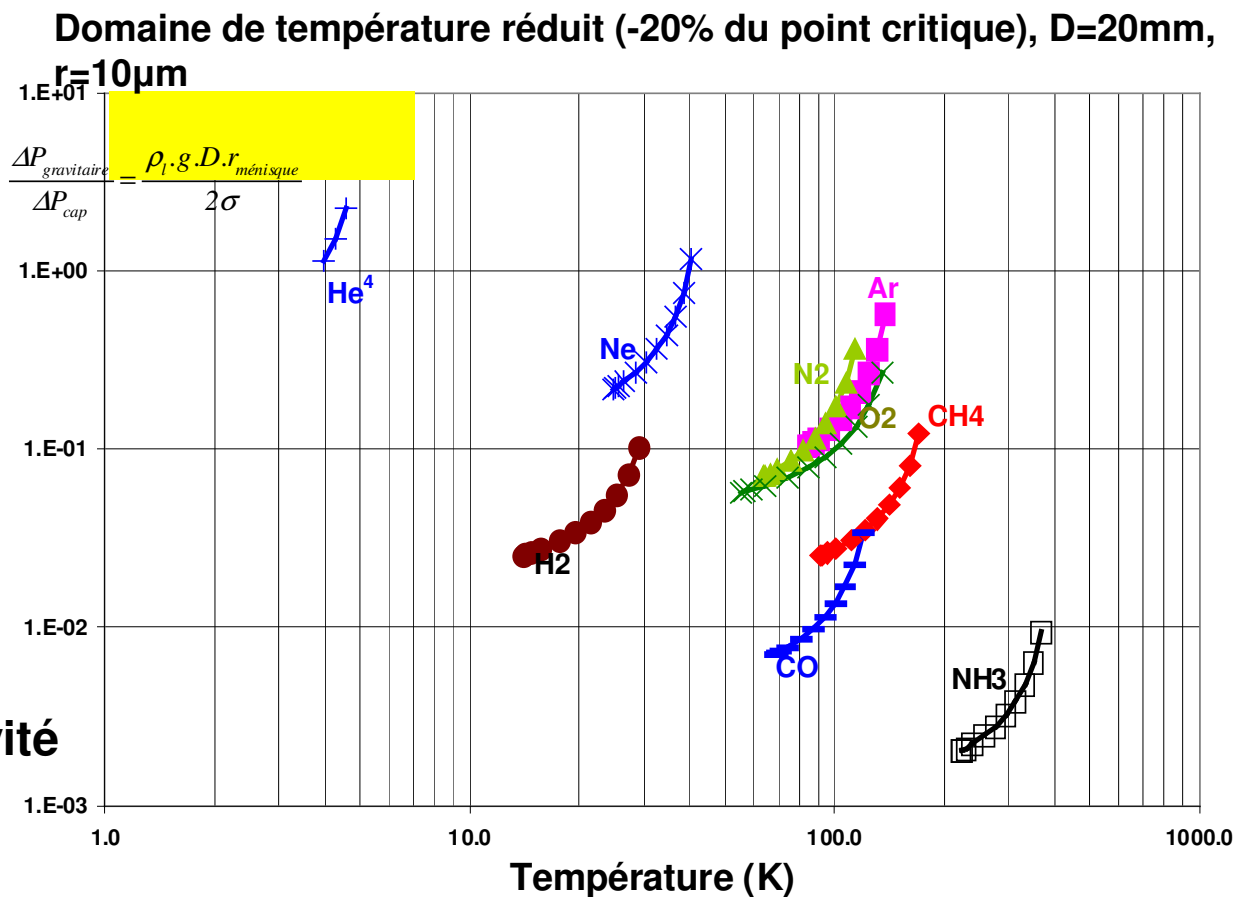


$$\frac{\Delta P_{gravitaire}}{\Delta P_{cap}} = \frac{\rho_l \cdot g \cdot D \cdot r_{ménisque}}{2\sigma}$$

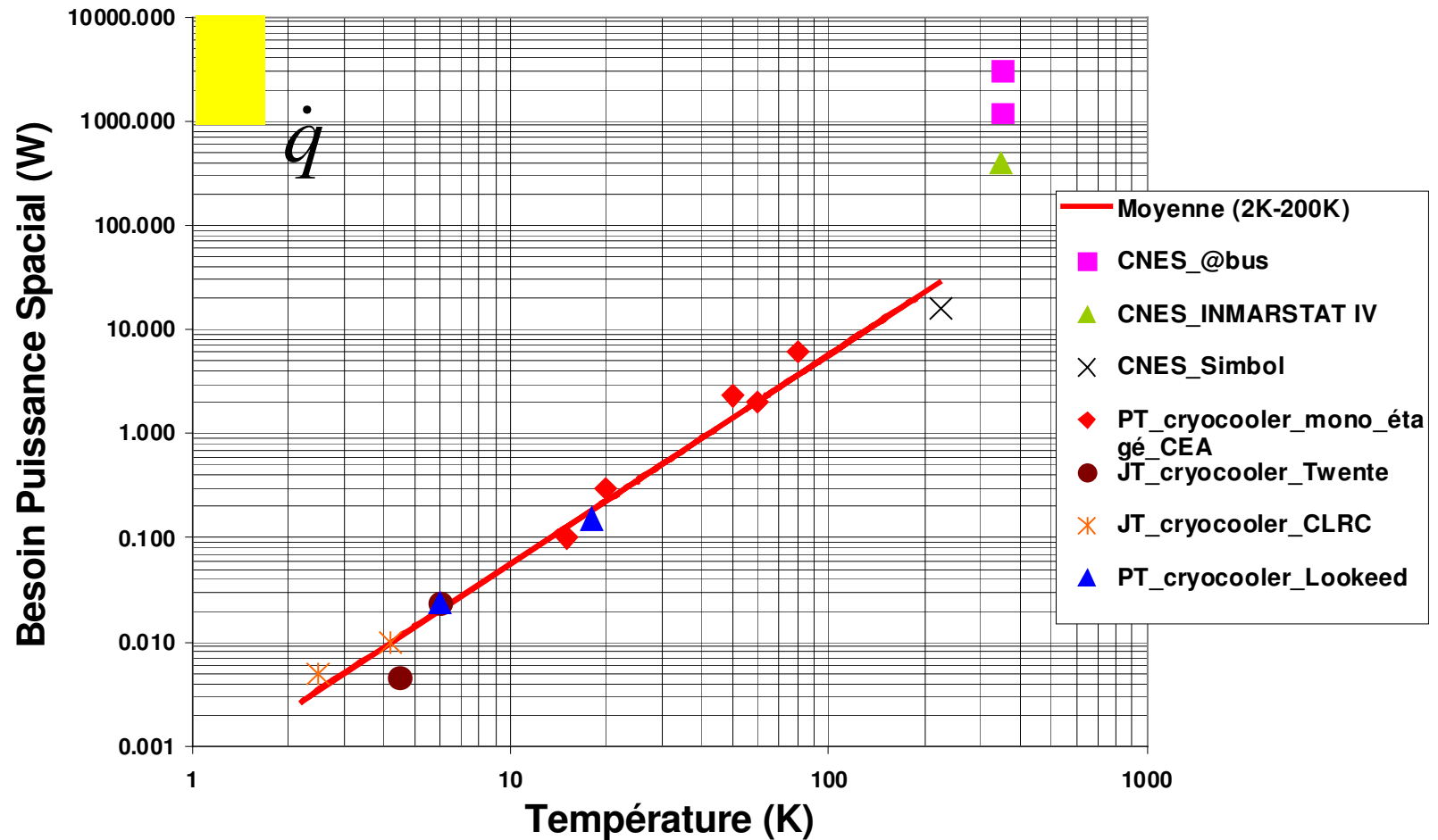
Dans l'évaporateur



Fonctionnement en contre-gravité



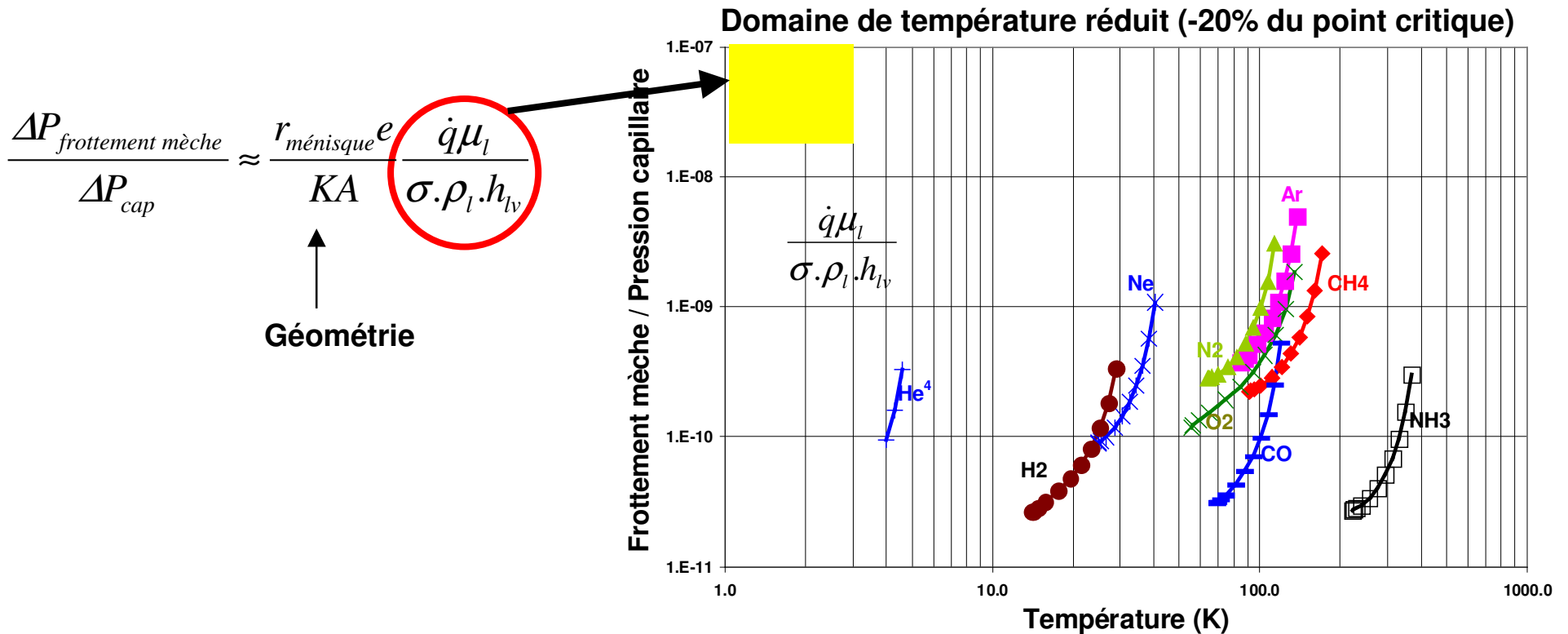
- Besoin de faible taille de pore pour He et Ne (1µm voire moins)
- Pour les autres fluides, ce n'est pas nécessaire, sauf si on veut un fonctionnement en contre gravité



La puissance diminue vers les basses températures !

Importance du rayonnement 300K : ~5mW/cm²

Comparaison des performances des fluides à géométrie donnée



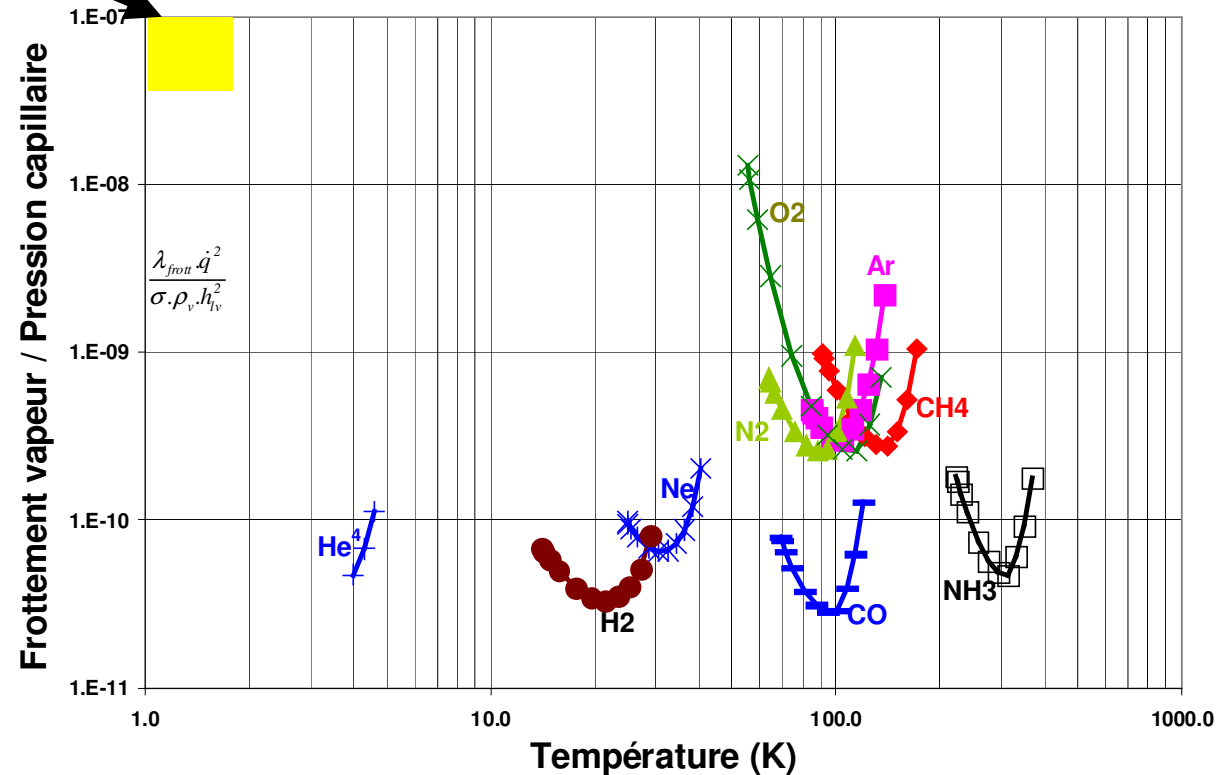
■ Certains fluides (H2, CO) sont meilleurs

$$\frac{\Delta P_{\text{frott vapeur}}}{\Delta P_{\text{Cap}}} = \frac{L \cdot r_{\text{ménisque}}}{4 \cdot D \cdot A^2} \cdot \frac{\lambda_{\text{frott}} \cdot \dot{q}^2}{\sigma \cdot \rho_v \cdot h_{lv}^2}$$

Géométrie

Comparaison des performances des fluides à géométrie donnée

Domaine de température réduit (-20% du point critique),
D=3mm



■ Certains fluides (He, H₂, Ne, CO) sont meilleurs

■ Attention à N₂, O₂, Ar, CH₄



LES FLUIDES CRYOGENIQUES : longueur de condensation

$$L_{Cond} = \frac{\dot{q}}{\chi \cdot \bar{h}_{Cond} \cdot \Delta T_{sub}}$$

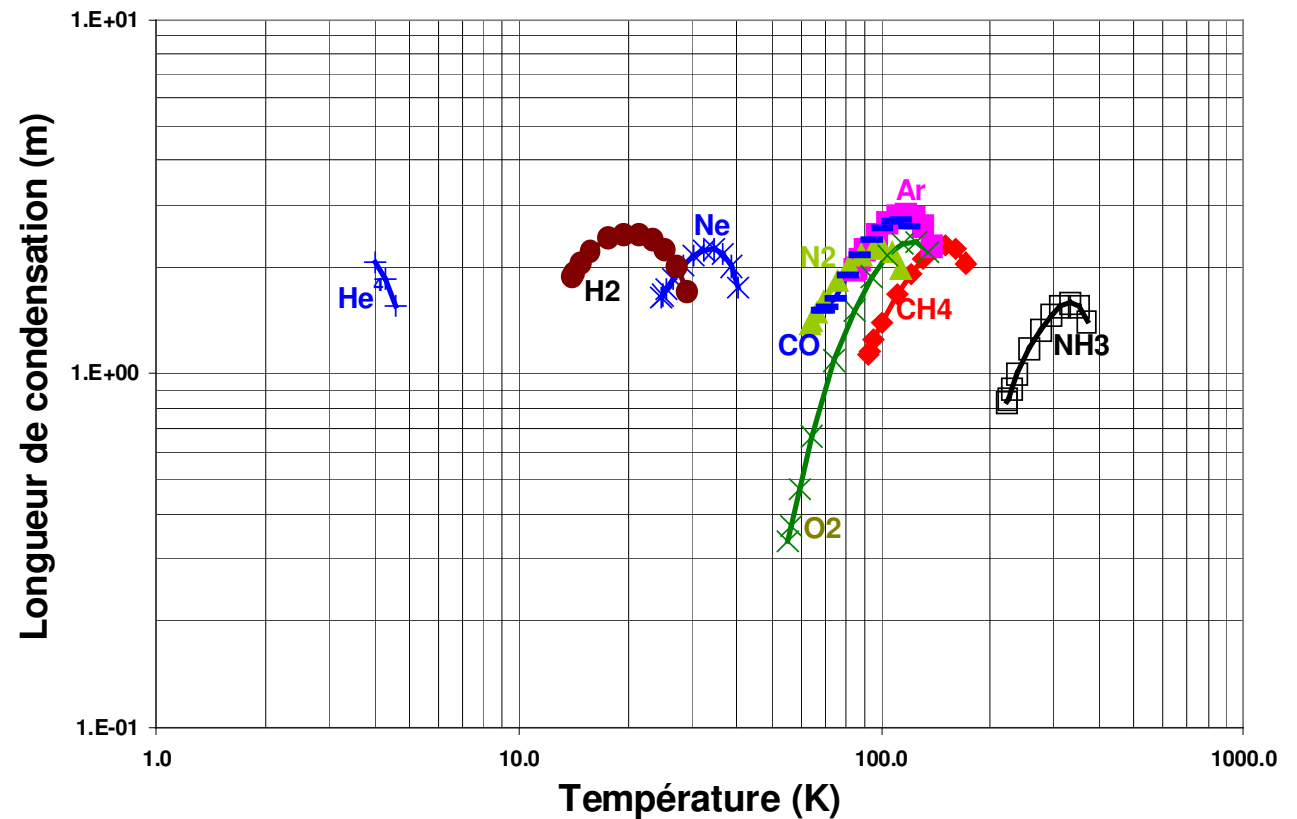
$$\Delta T_{sub} \sim T$$

■ A priori, des condenseurs de mêmes tailles!

Domaine de température réduit (-20% du point critique)

D=3mm, DTsub=1%T

Condensation de Shah

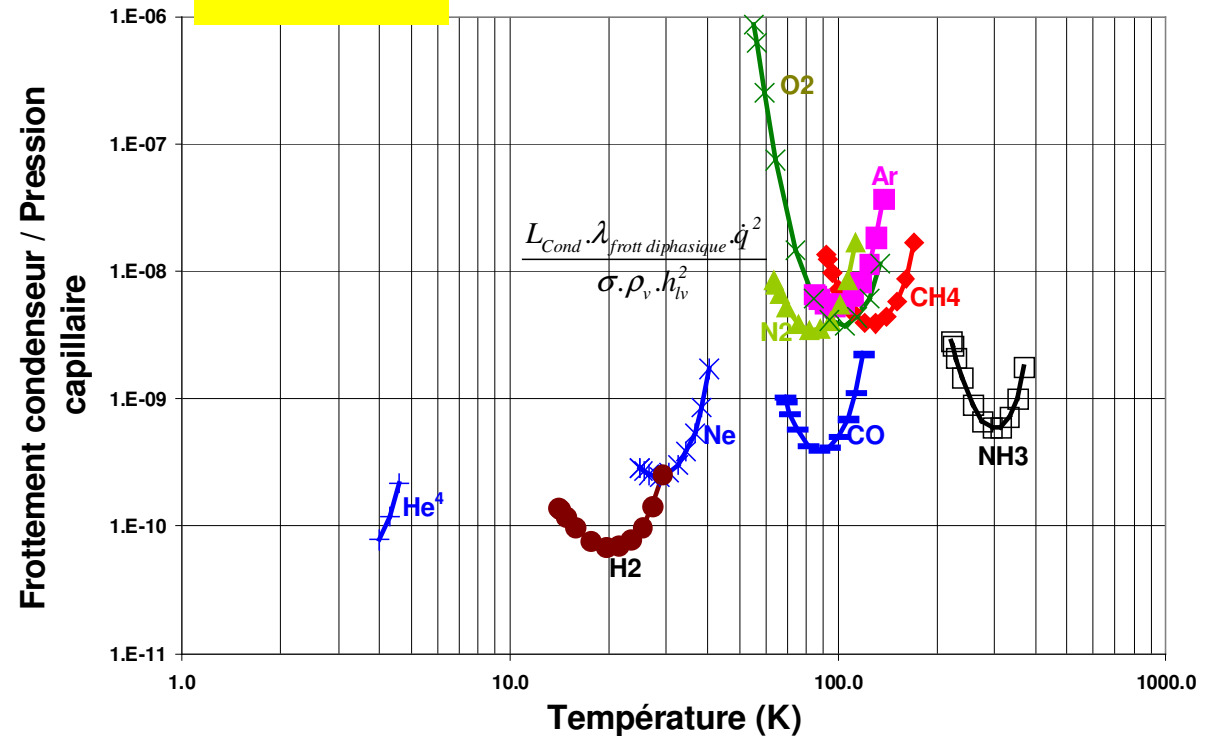


$$\frac{\Delta P_{\text{frott condenseur}}}{\Delta P_{\text{Cap max}}} = \frac{r_{\text{ménisque}}}{4.D.A^2} \frac{L_{\text{Cond}} \cdot \lambda_{\text{frott diphasique}} \cdot \dot{q}^2}{\sigma \cdot \rho_l \cdot h_{lv}^2}$$

↑
Géométrie

Domaine de température réduit (-20% du point critique)
D=3mm, DTsub=1%T **Frottement (annulaire)**

- Certains fluides (He, H2, Ne, CO) sont meilleurs
- Attention à N2, O2, Ar, CH4



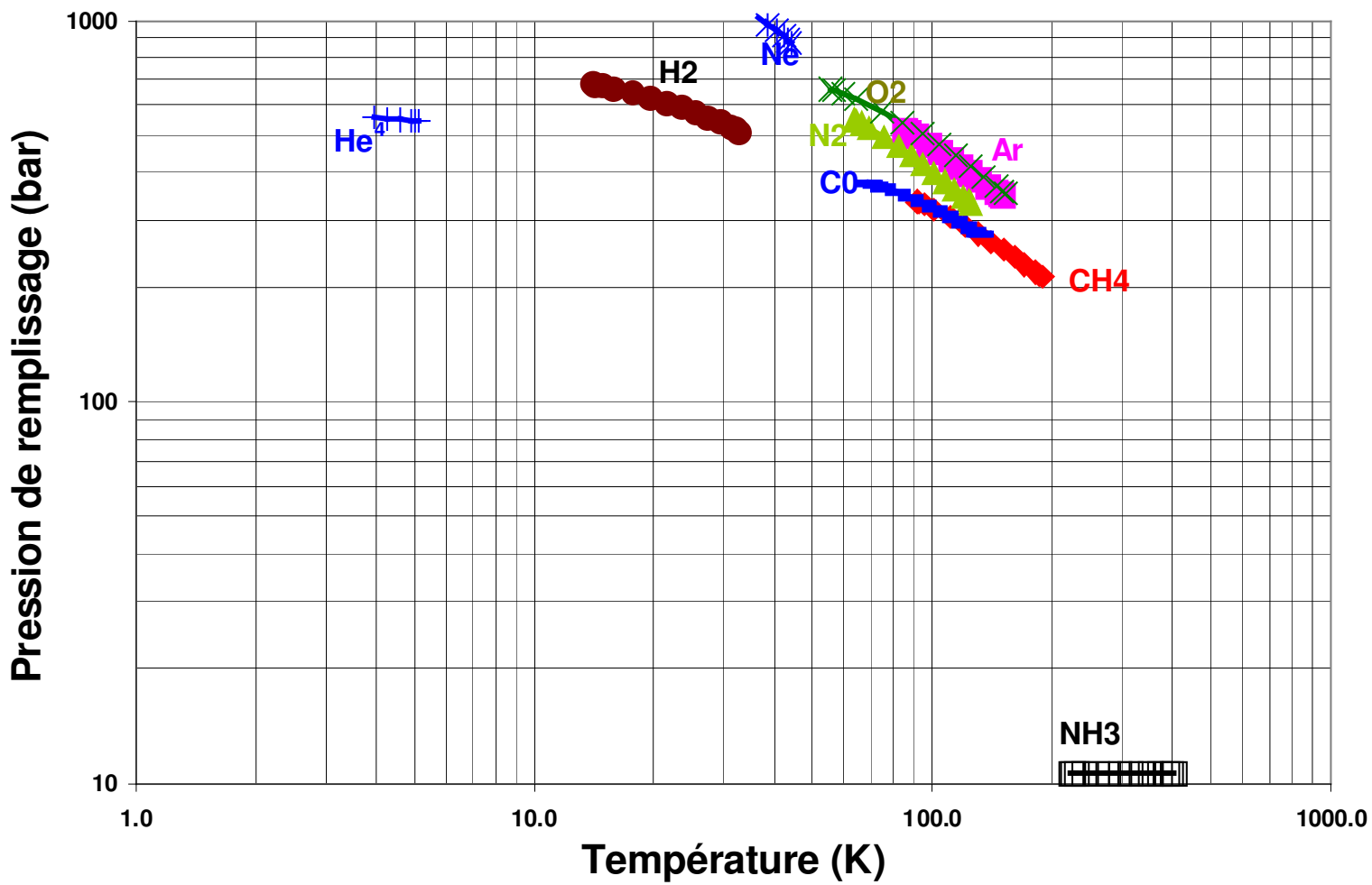
Comparaison des performances des fluides à géométrie donnée



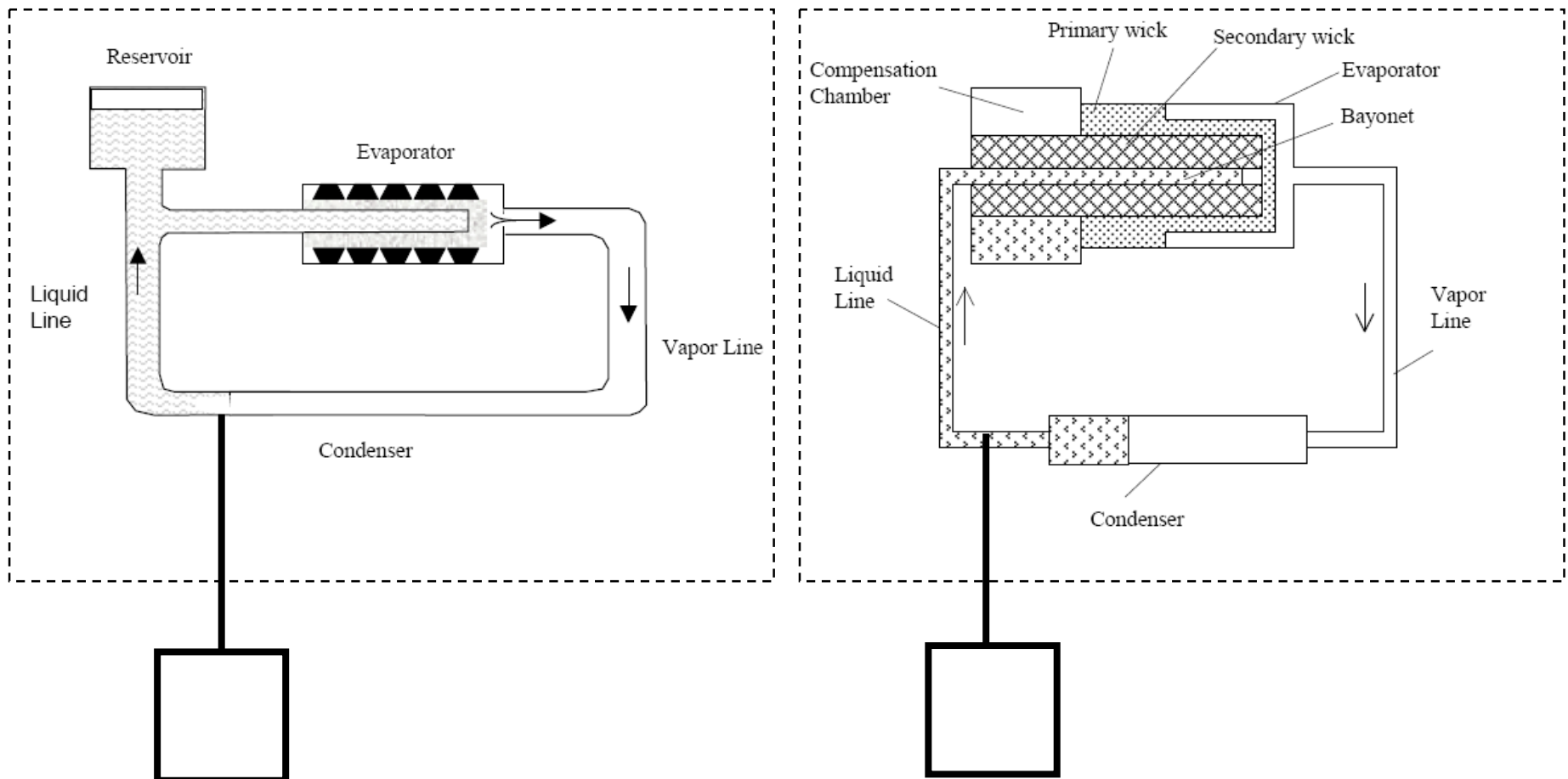
LES BOUCLES FLUIDES CRYOGENIQUES : Pression de remplissage à 300K

Taux de remplissage en liquide
à froid de 50%

Pression de remplissage très élevées et > à Pcritique



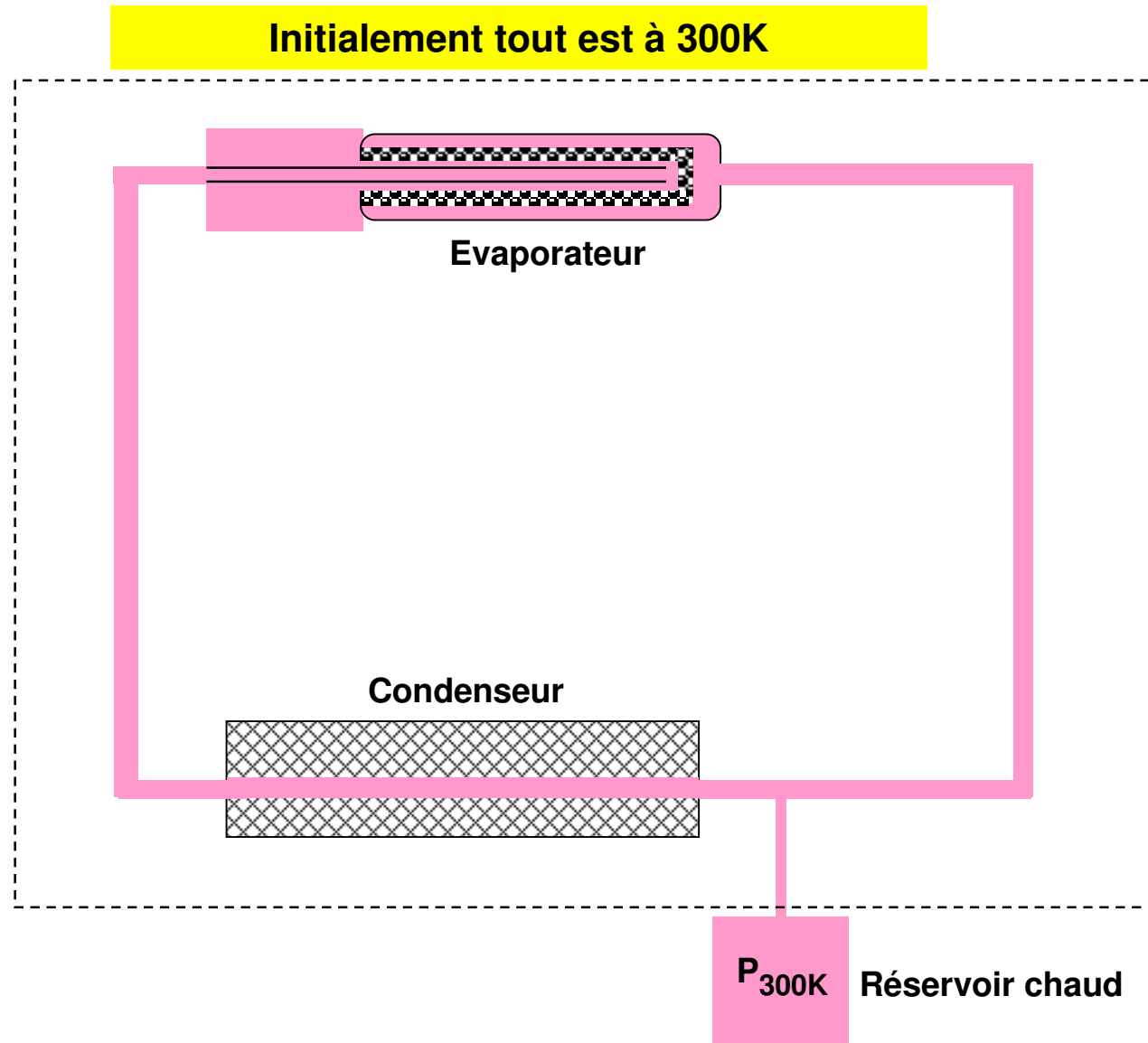
Réservoir "chaud"



$V_{\text{Réservoir chaud}} \gg V_{\text{boucle cryo}}$ afin d'avoir une pression de remplissage à $300\text{K} < P_{\text{critique}}$

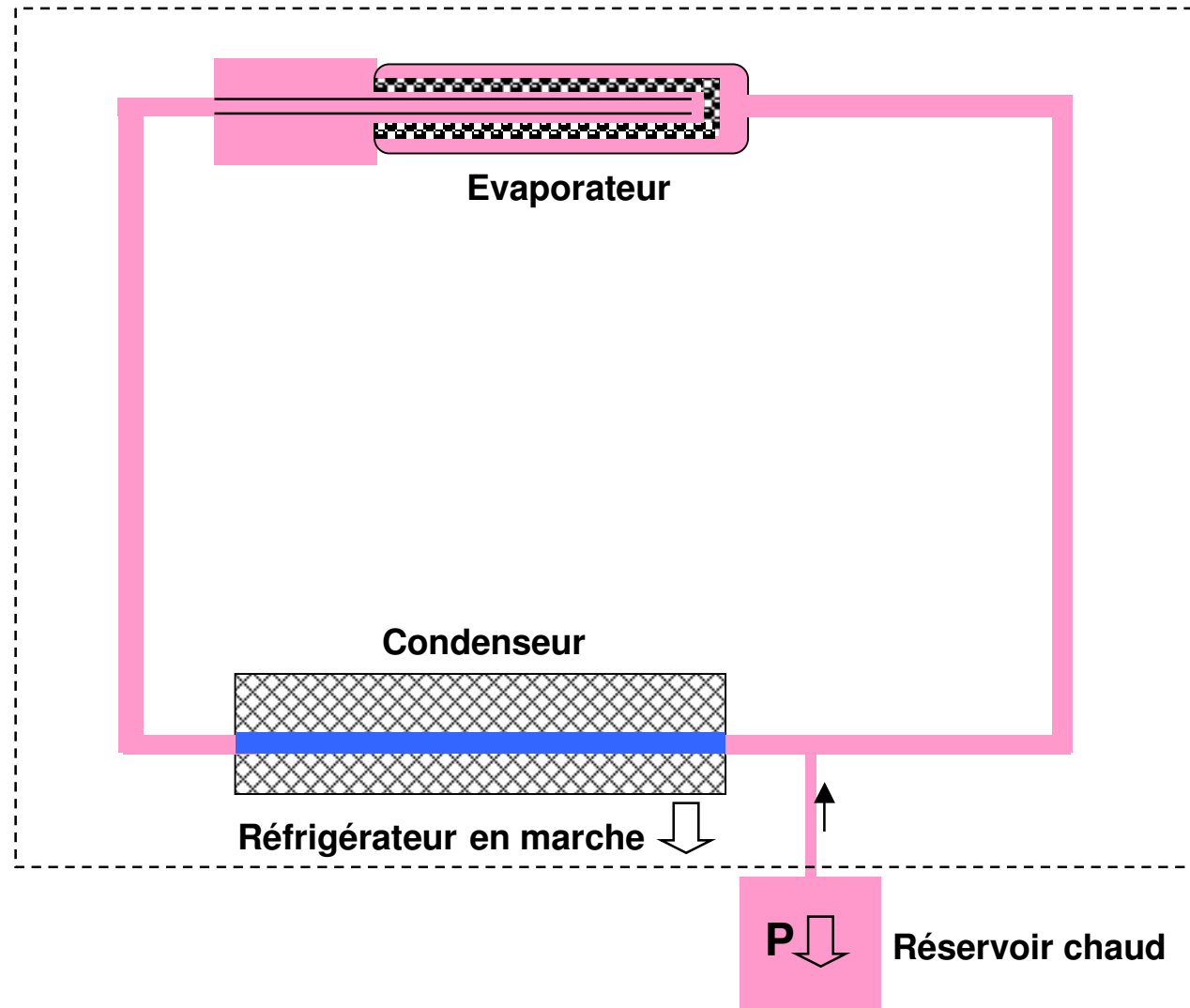
Transferts de masse et d'énergie entre partie froide et réservoir chaud

Le refroidissement



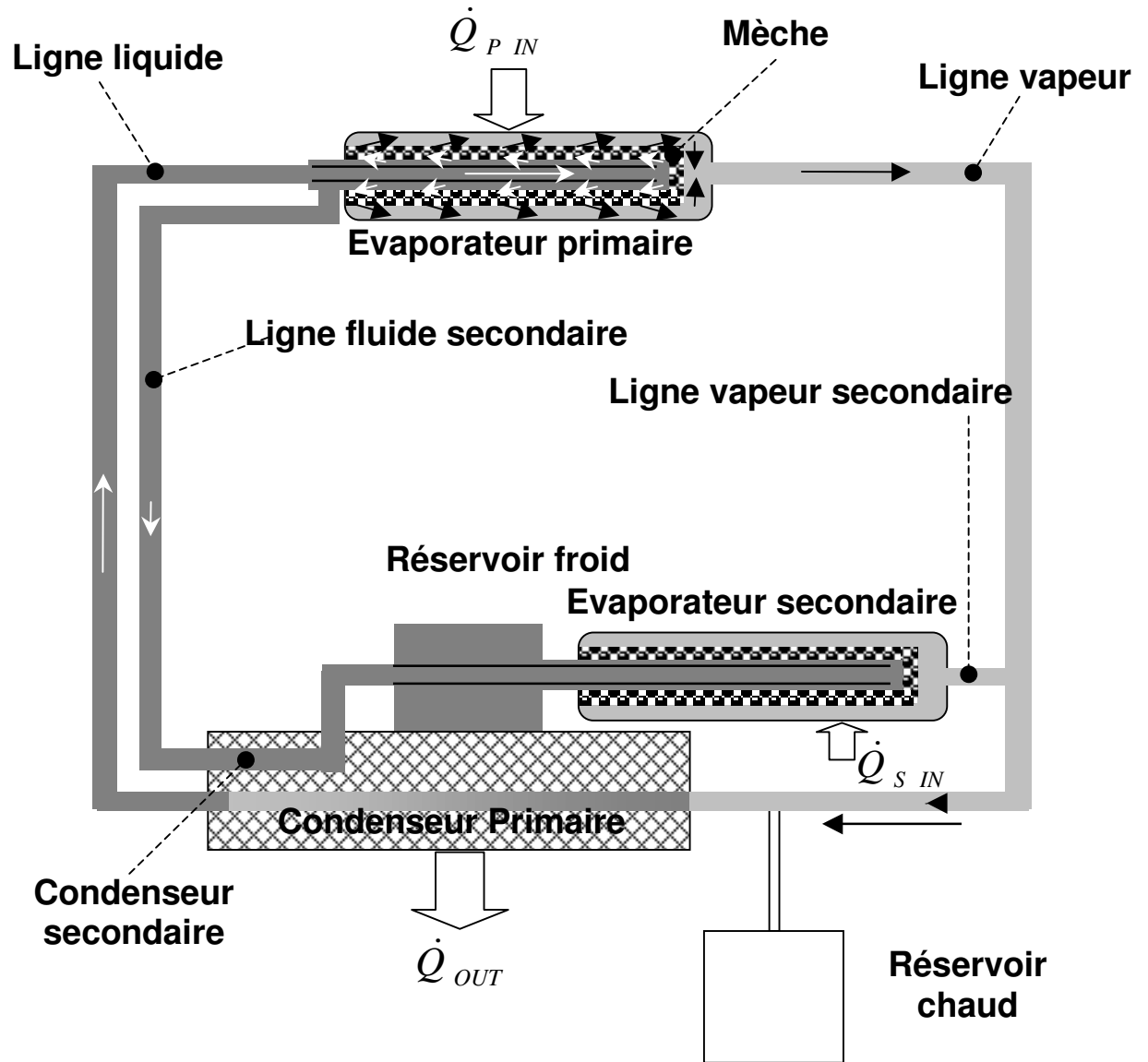
Le refroidissement en l'absence de gravité

Situation bloquée!



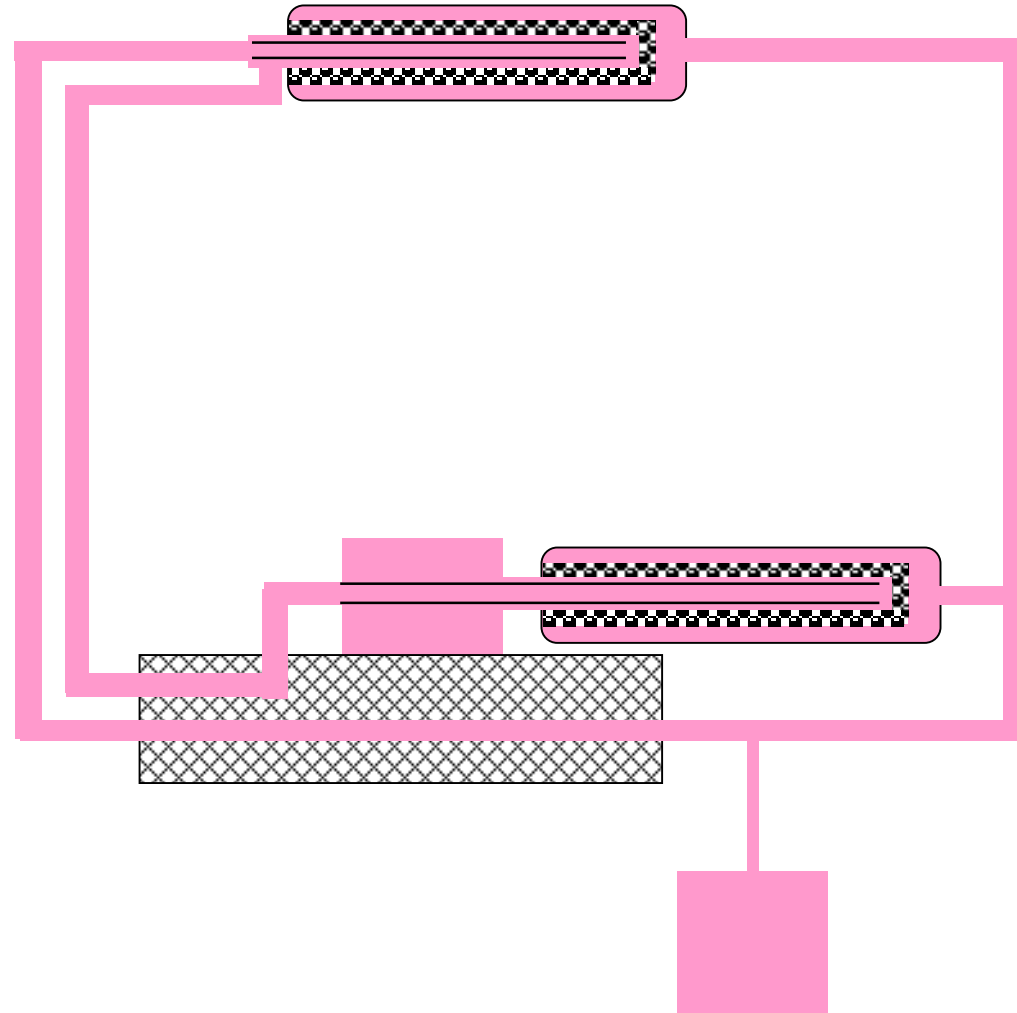
Circuit secondaire:

- *Refroidissement*
- *Compensation des pertes*

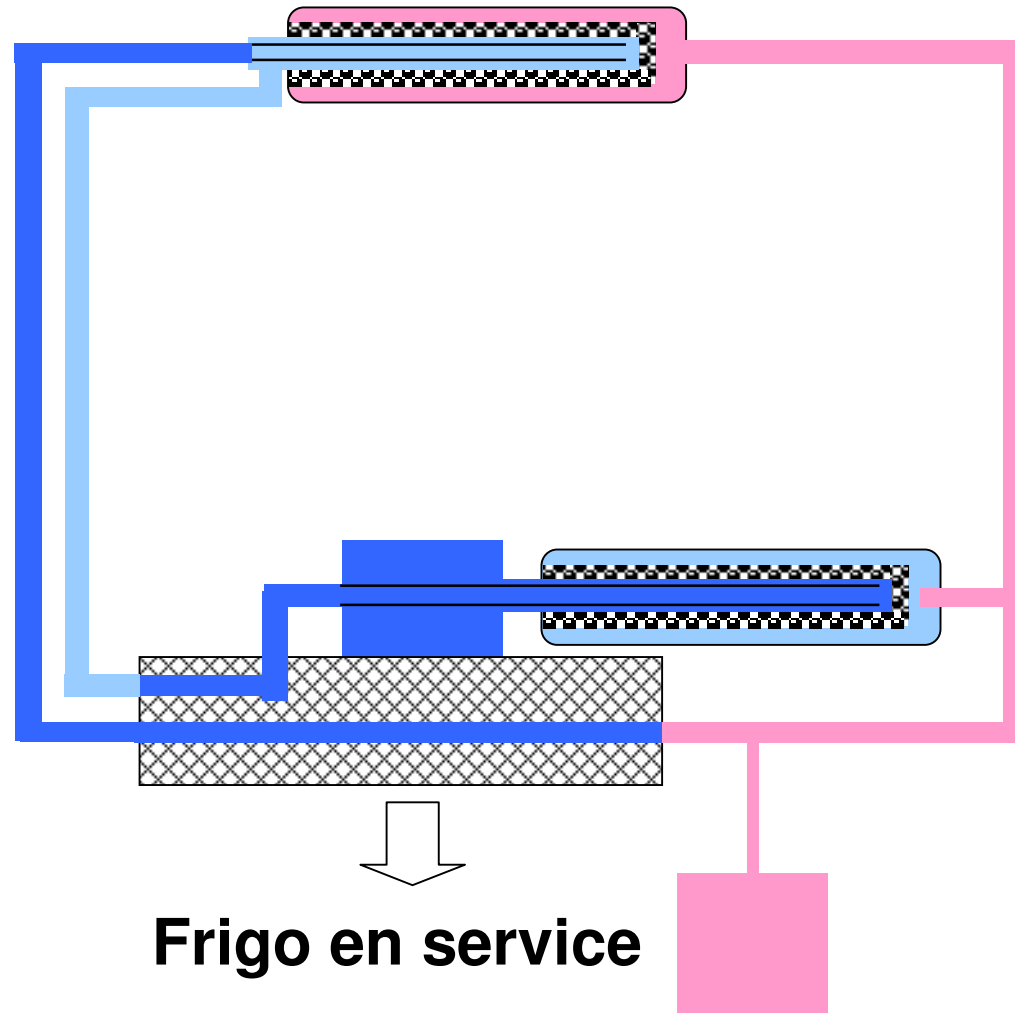


Le refroidissement (1)

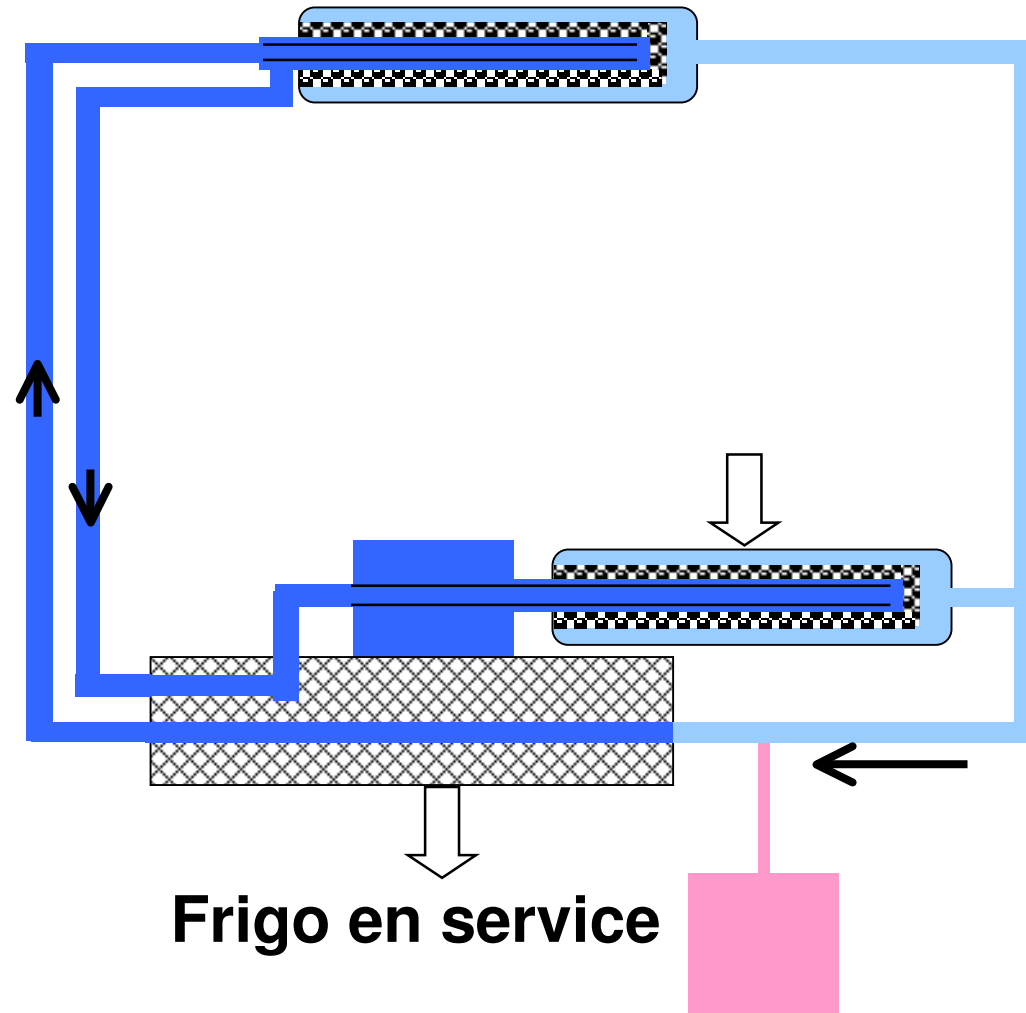
Isotherme à 300K



Le refroidissement (2)

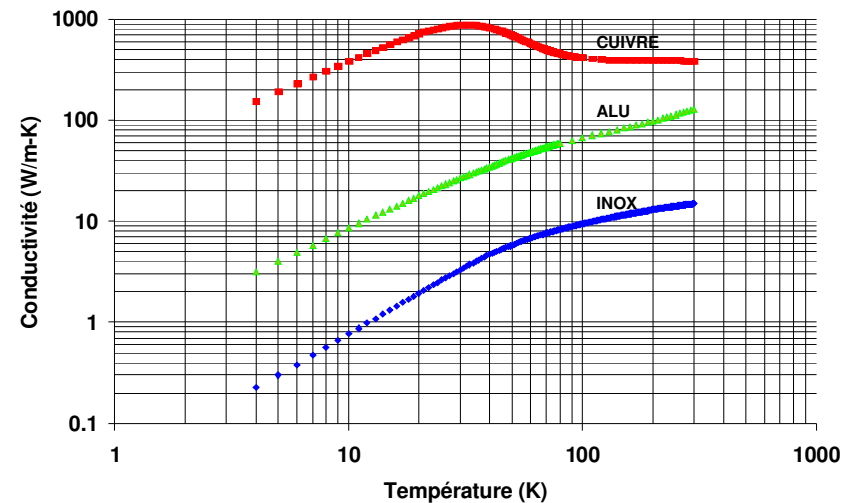
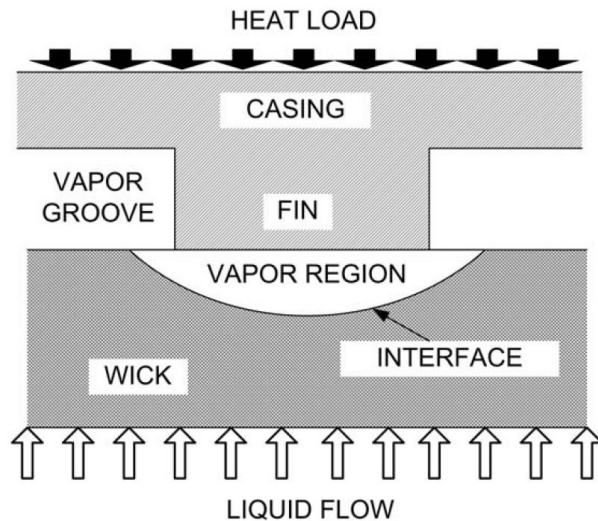


Le refroidissement (3)



Transferts de chaleur dans l'évaporateur

Baisse considérable de la conductivité thermique des matériaux: Quel impact sur les transferts de chaleur dans l'évaporateur (DT, pénétrations vapeur)?

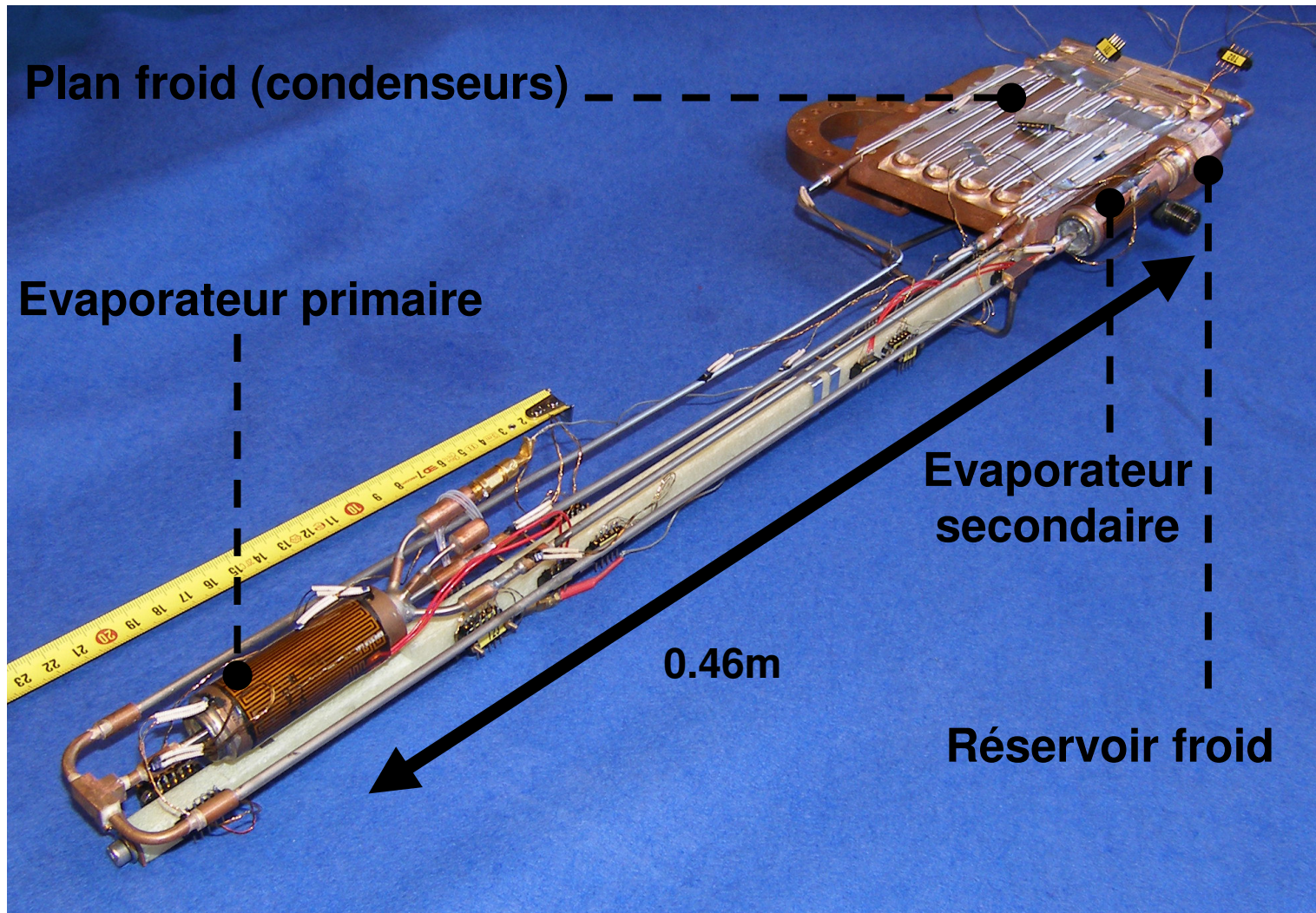


Besoin d'une recherche sur le sujet :

- *Travail en cours à l'IMFT (T. Coquard, C. Louriou)*
- *Améliorations souhaitées :*
 1. *Approche plus fine, à l'échelle du pore (transferts de chaleur au voisinage de la ligne de contact) (CEA-Grenoble, V. Nikolayev)*
 2. *Adaptation aux fluides cryogéniques*
 3. *Validation expérimentale*

La boucle fluide cryogénique du CEA/SBT

Conçue pour transporter 10 W à 80K avec de l'azote



EVAPORATEUR PRIMAIRE

1 entrée, 2 sorties

Baionette

Bâti en Cuivre 22ODx64L

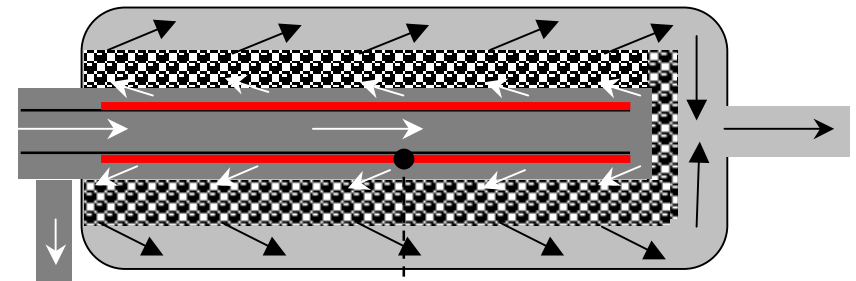
Mèche capillaire en inox (15 μ m pore, 35%porosité, 2 10⁻¹³ m² permeabilité)

Chauffage électrique

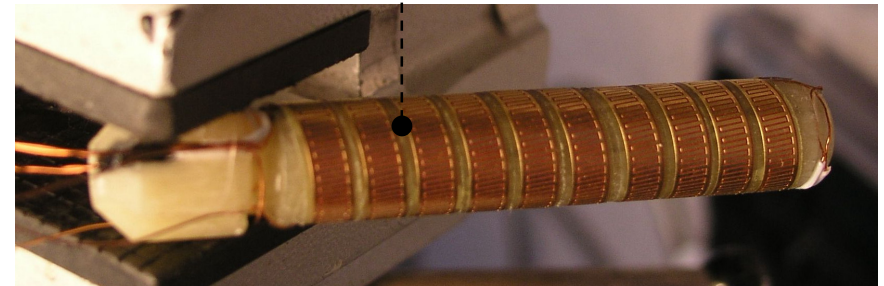
Instrumentation interne (sonde capacitive => taux de présence de vapeur)

EVAPORATEUR SECONDAIRE

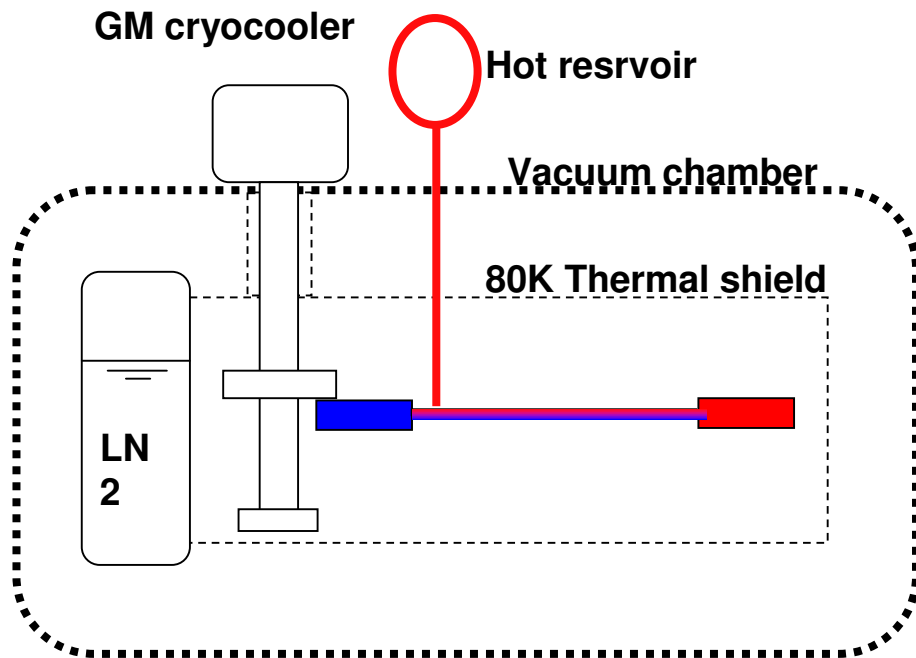
Identique au primaire, sans instrumentation



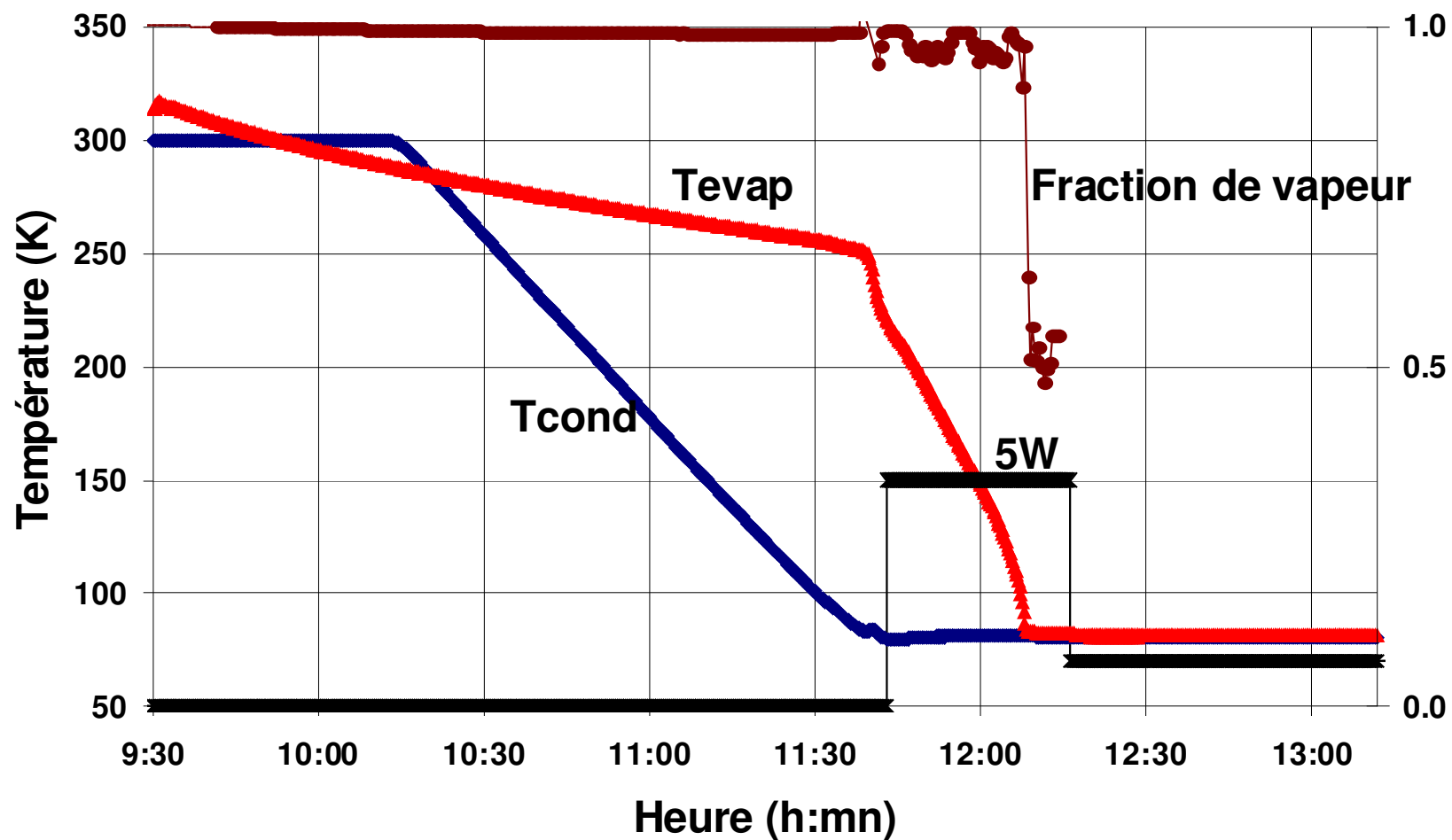
Sonde capacitive



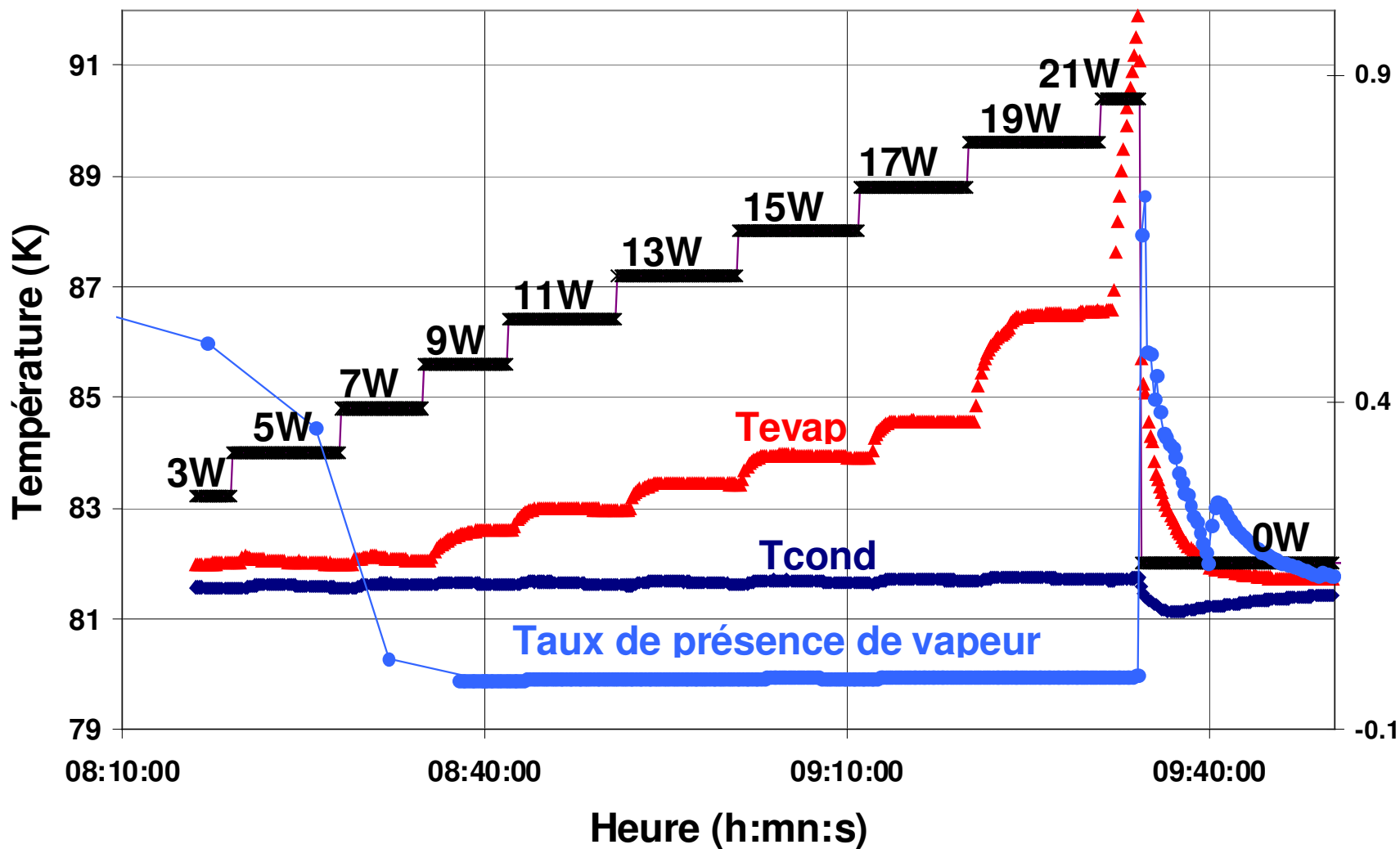
CRYOSTAT DE TEST



REFROIDISSEMENT: RESULTATS



SEQUENCE TYPIQUE DE TEST A FROID



Meilleure performance : 19W@5K



DES IDEES DE R&D pour la cryogénie

Transferts de chaleur au sein de l'évaporateur et validation expérimentale associée

Outil d'analyse "système" pour la prédiction du comportement des boucles, incluant les spécificités cryogéniques

(réservoir chaud, circuit secondaire, rayonnement), prédiction du DT et marge au désamorçage

Des moyens de caractérisation de mèche capillaire (rayon de pore, perméabilité):

Des compétences pour le design

Des compétences technologiques et d'expérimentation

Des moyens de test à froid

Des compétences de modélisation et d'analyses

Comparaison des fluides cryogéniques

Spécificités des boucles fluides cryogéniques

- **Réservoir chaud**
- **Refroidissement (circuit secondaire)**
- **Rayonnement extérieur**
- **Matériaux peu conducteurs** (Transferts de chaleur dans la mèche capillaire)
- **Mèches capillaires: faible rayon de pore ($1\mu\text{m}$ voire -) pour les très basses températures**

Evaluation d'une boucle fluide au CEA/SBT

- **Cryostat de test**
- **19W@5K à 80K avec de l'azote**

R&D :

- **Le CEA/SBT: un "labo" d'accueil idéal pour partager une R&D sur les boucles fluides cryogéniques**