

THESE BDI CNRS-CNES Philippe SOLER

Modélisation thermo-hydraulique des boucles à pompage capillaire (de type LHP) : influence de la répartition du fluide sur les transferts de chaleur et de masse au sein de l'ensemble cœur/réservoir



**V. Platel (directeur de thèse), S. Dutour, JL. Joly, J. Lluc
LAPLACE – Université Paul Sabatier - TOULOUSE**



**L. Tadrist (directeur de thèse), S. Launay
IUSTI - Polytech' Marseille – Université de MARSEILLE**



**A. Larue de Tournemine, Xavier Coste
CNES – Service de Thermique - TOULOUSE**

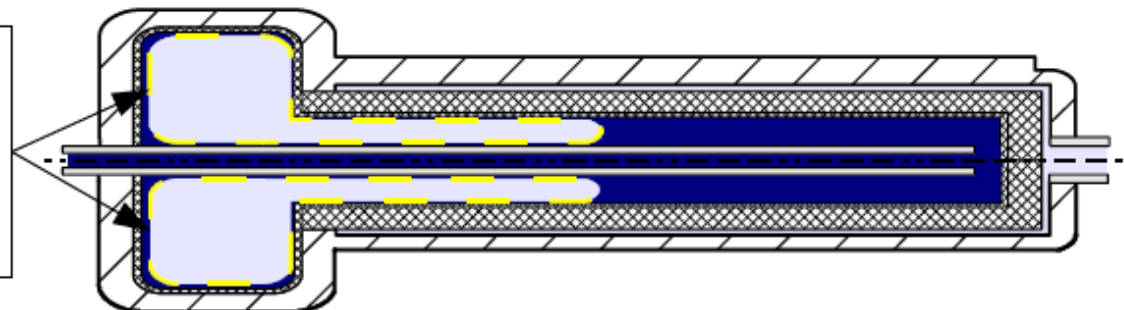
Analyse par le GdR des résultats de l'expérience en microgravité COM2PLEX :

- Ecart entre les essais environnements terrestre et μ -gravitaire (évaporateur cylindrique)

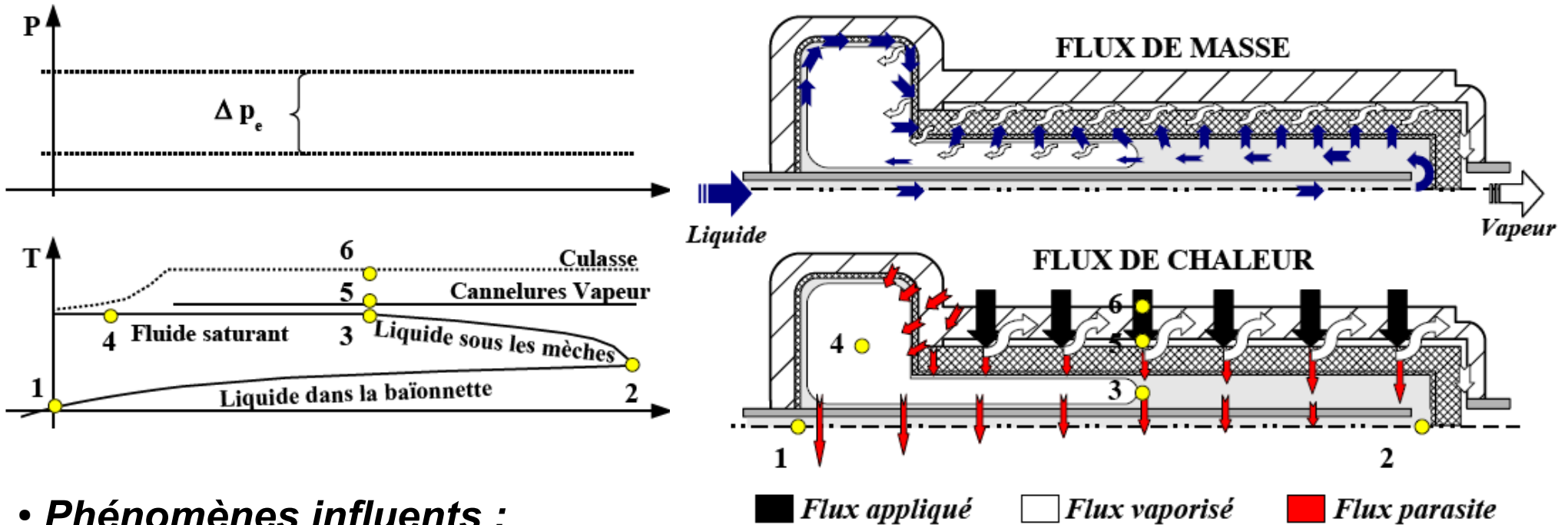
Autres problèmes connus dans la littérature :

- En régime stabilisé : hysteresis
 - En régime dynamique : Instabilités dynamiques (oscillations de températures, overshoot, ...)
 - Démarrages
- **Forte sensibilité au flux parasite (fraction non vaporisée du flux appliqué entrant dans le coeur) au niveau de l'ensemble évaporateur-réservoir**

!!!!!!! Point de fonctionnement du système imposé par le bilan d'énergie de cette zone saturante !!!!!!! (soumis au flux parasite)



- 1 à 5% de la charge thermique appliquée à la boucle :
 - Chemin 1 : Diffusion à travers la culasse métallique et la mèche secondaire
 - Chemin 2 : Diffusion à travers la mèche primaire et la mèche secondaire



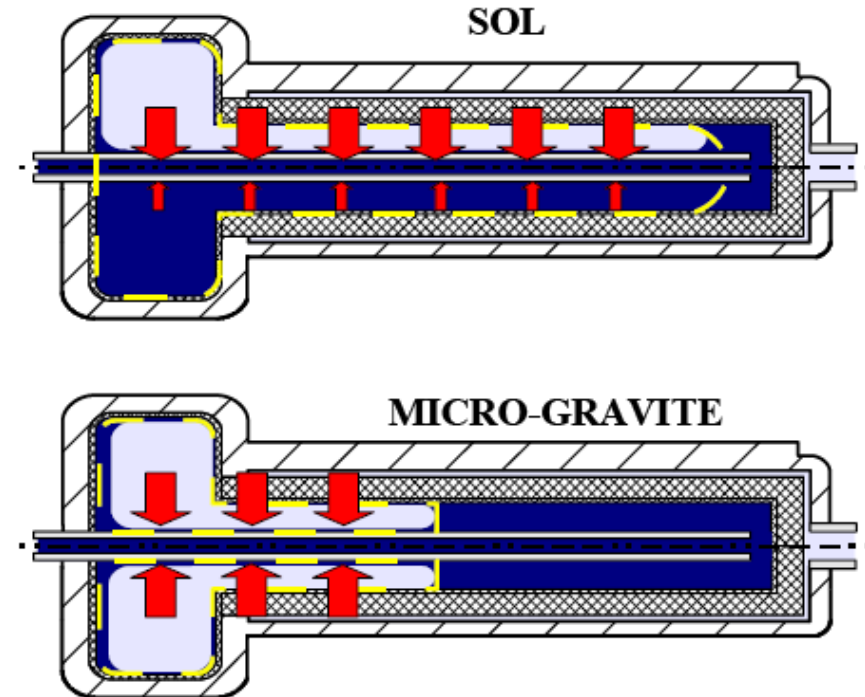
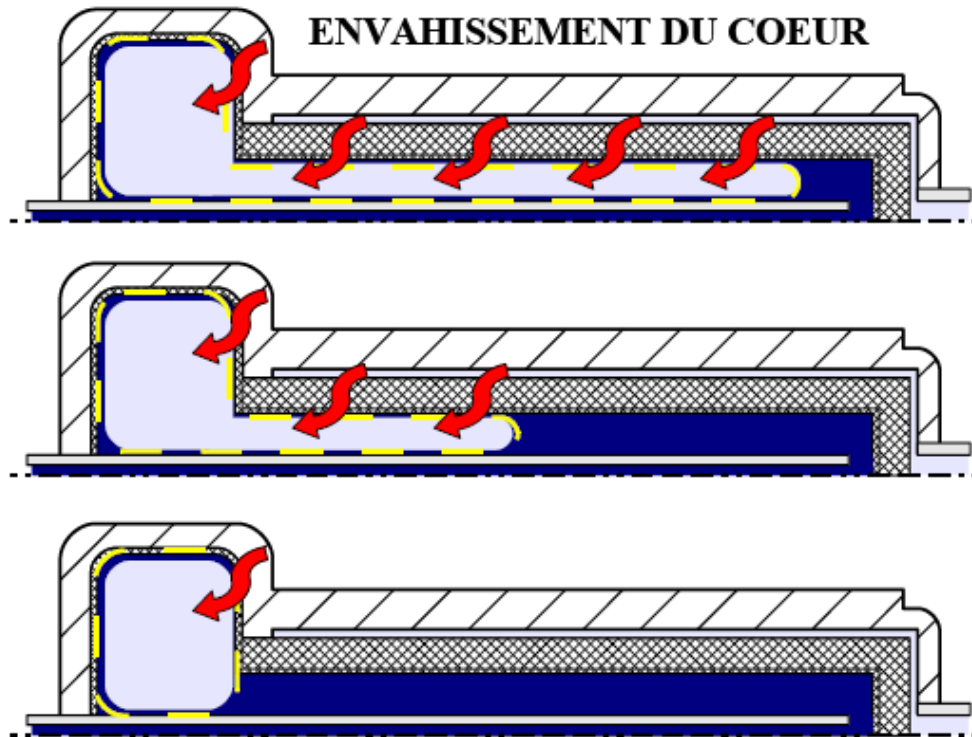
• **Phénomènes influents :**

- Structuration du front de vaporisation dans le poreux (pompage capillaire, transferts massiques et thermiques, percolation...)
- Répartition et mouvement du fluide dans le coeur (interzone mèche/baïonnette)

Impact de la répartition (présumée) du fluide dans le coeur

Laplace

École polytechnique
université de Marseille



- Modulation du flux traversant les mèches et entrant dans la zone à saturation
- Modification des transferts entre la zone de saturation et la baïonnette : en régimes d'échanges, en surface de transfert, ...

Impact de la répartition du fluide dans le coeur : besoin en sous-refroidissement

Laplace

$$\dot{m}c_p (T_R - T_{in}) = \underbrace{G (T_v - T_R) + \phi_{p,culasse}}_{\text{Imposé}} + \underbrace{\int_0^{X_R} \frac{G}{L_w} (T_R - T_c(x)) dx - \int_0^{X_R} \Gamma c_p (T_R - T_c(x)) dx}_{\text{Impact de la répartition du fluide}}$$

Impact de la baïonnette :

$$\int_0^{X_R} (T_R - T_c(x)) dx$$

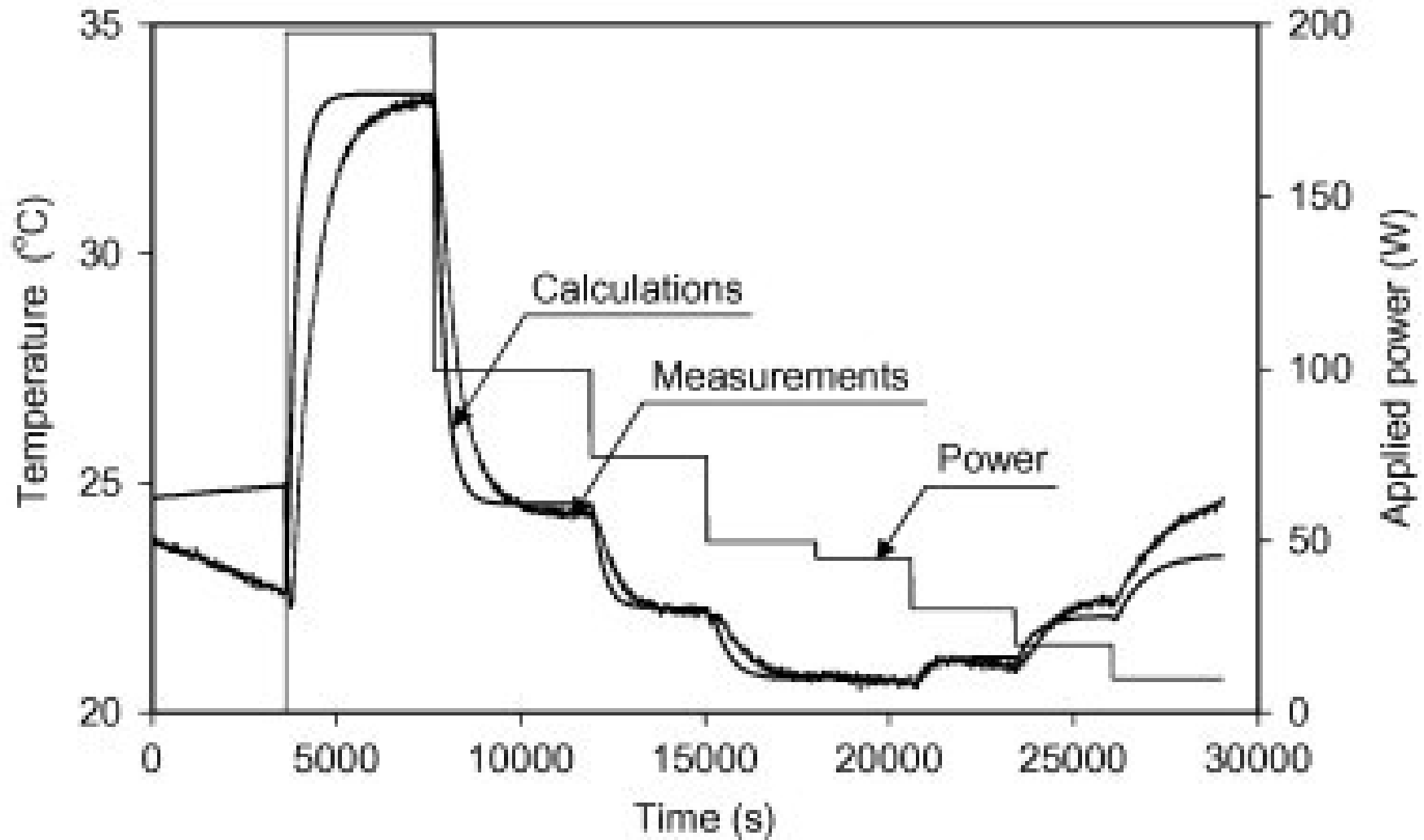
Modélisation et simulation du comportement du système avec prise en compte des modifications des flux associées aux mouvements et à la répartition du fluide dans la boucle et en particulier dans le coeur.

Littérature : 3 modèles dynamiques de système

- S. Launay, V. Platel, S. Dutour and JL Joly « Transient modeling of LHP for the oscillating behaviour study » J.of Thermophysics and Heat Transfer 21 (3) 2007
- V.V. Vlassov, R.R. Riehl « Mathematical model of a loop heat pipe with cylindrical evaporator and integrated reservoir » ATE, 28 (8-9)2008
- T. Kaya, R. Pérez, C. Gregori, A. Torres « Numerical simulation of transient operation of loop heat pipes » ATE, 28 (8-9) 2008

→ **Flux parasite** : Résistance thermique (paramètres ajustables) ou corrélation issue de résultats expé sur le dispositif ➡ Pas de modélisation réelle du flux parasite et de son interaction avec le fluide...

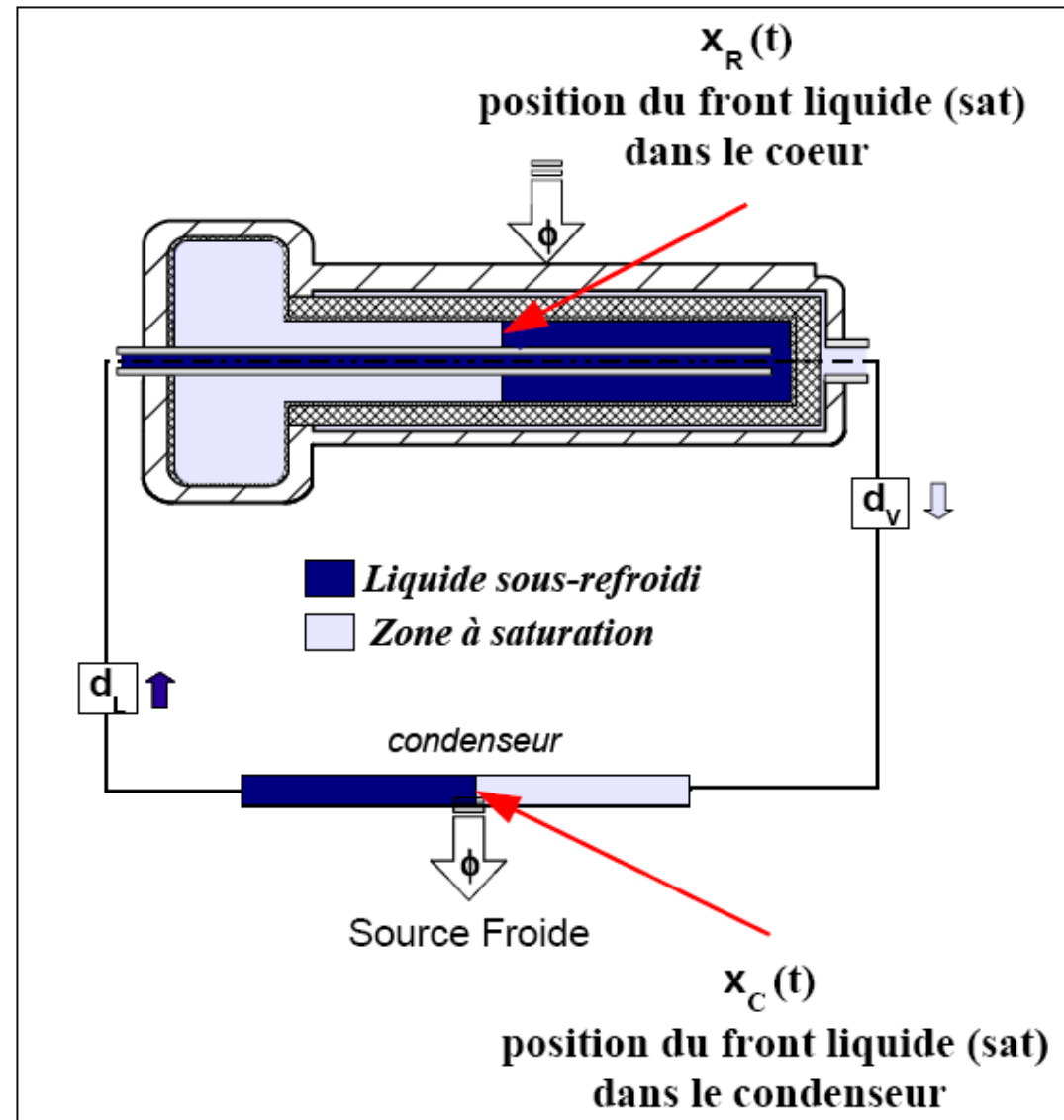
+ **Problème commun** : temps de réponse trop rapide (par rapport à l'exp.) lors des sauts de puissances...



•T. Kaya, R. Pérez, C. Gregori, A. Torres, ATE, 28 (8-9) 2008

Modèle du système = Découpage/Raccordement de sous-modèles dynamiques obtenus à partir des bilans de masse, de quantité de mouvement et d'énergie.

- **Culasse** : modèle diffusif : réseau de résistances thermiques
- **Mèche primaire** : fonctionnement idéal cad front de vaporisation uniforme à sa surface externe, conductance convecto-diffusive;
- **Fluide** : suivi du mouvement des fronts $x_R(t)$ et $x_C(t)$
 - **Zones diphasiques** : à saturation, température et pression uniformes, taux de vide et coefficient d'échange moyens (pas de description spatiale);
 - **Zones Liquide sous refroidi** : régime de transfert dominé par le transport et les échanges avec la paroi (description spatiale 1D).



Détermination de la longueur de la zone de liquide sous-refroidi dans le coeur = bilan d'énergie à la frontière mobile (X_r)

$$T_{1\varphi,\beta}(t) = T_{2\varphi}(t) \quad \text{et donc} \quad \frac{\partial T_{1\varphi,\beta}}{\partial t} = \frac{dT_{2\varphi}}{dt}$$

$$\rho_l S_c c_{pl} \frac{\partial T_{2\varphi,\beta}}{\partial t} = -\rho_l S_c c_{pl} (v - v_{\Sigma,\beta}) \frac{\partial T_{1\varphi,\beta}}{\partial x} + \pi (D_{wi} \dot{q}_{p,1\varphi} - D_{be} \dot{q}_{1\varphi,b})$$

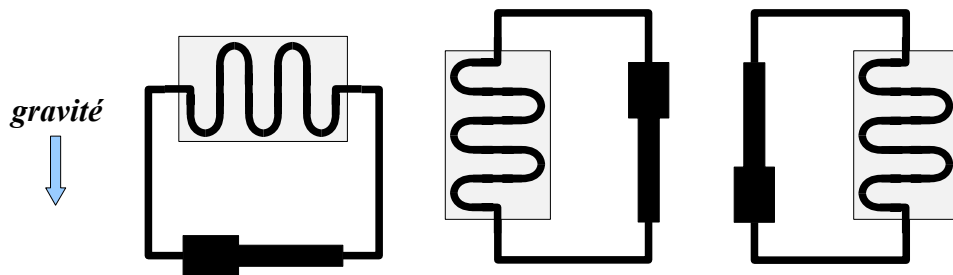
$$v_{\Sigma,\beta} = \frac{d\beta}{dt} = v_\beta + \frac{\pi (D_{be} \dot{q}_{1\varphi,b} - D_{wi} \dot{q}_{p,1\varphi}) + \rho_l S_c c_{pl} \frac{dT_{2\varphi}}{dt}}{\rho_l S_c c_{pl} \frac{\partial T_{1\varphi,\beta}}{\partial x}}$$

Boucle EHP/CNES :

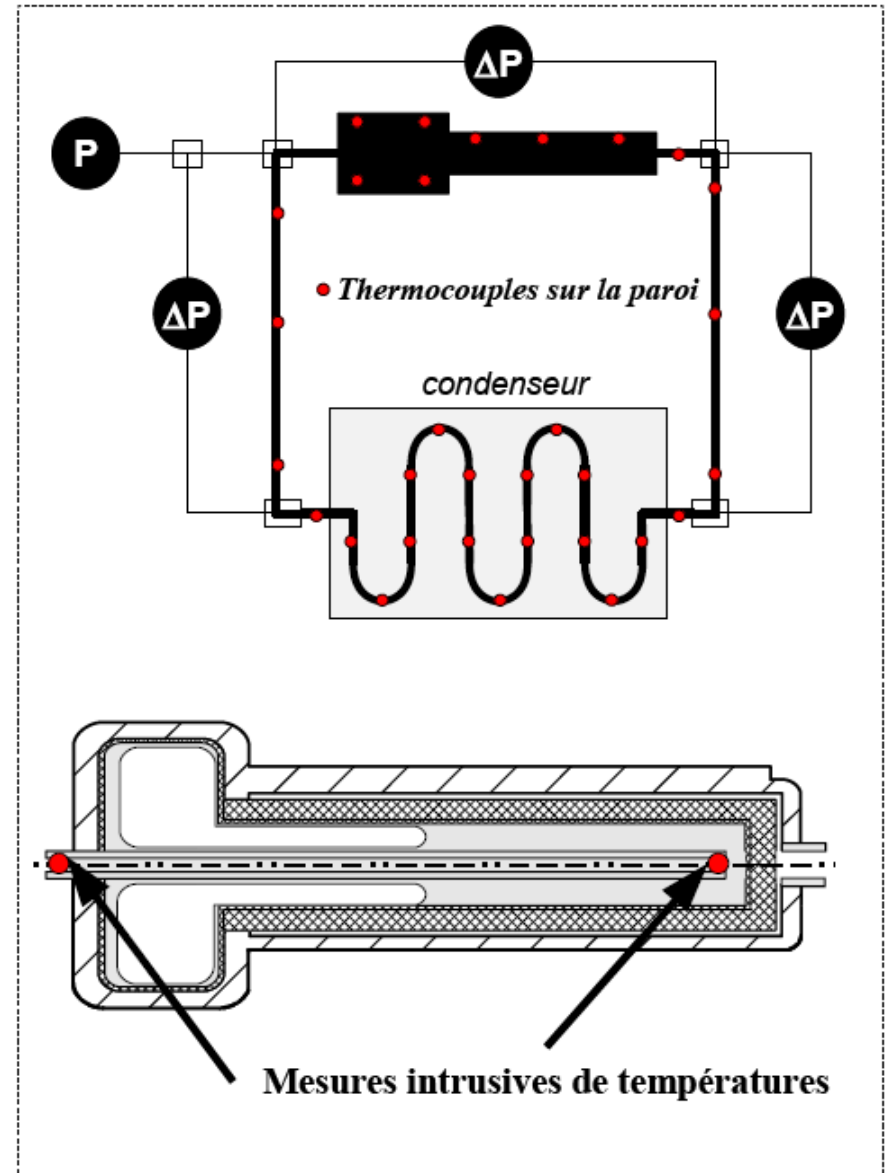
- fluide NH3
- Instrumentation conséquente : classique + spécifique (thermocouples intrusifs)

Données expérimentales de la littérature :

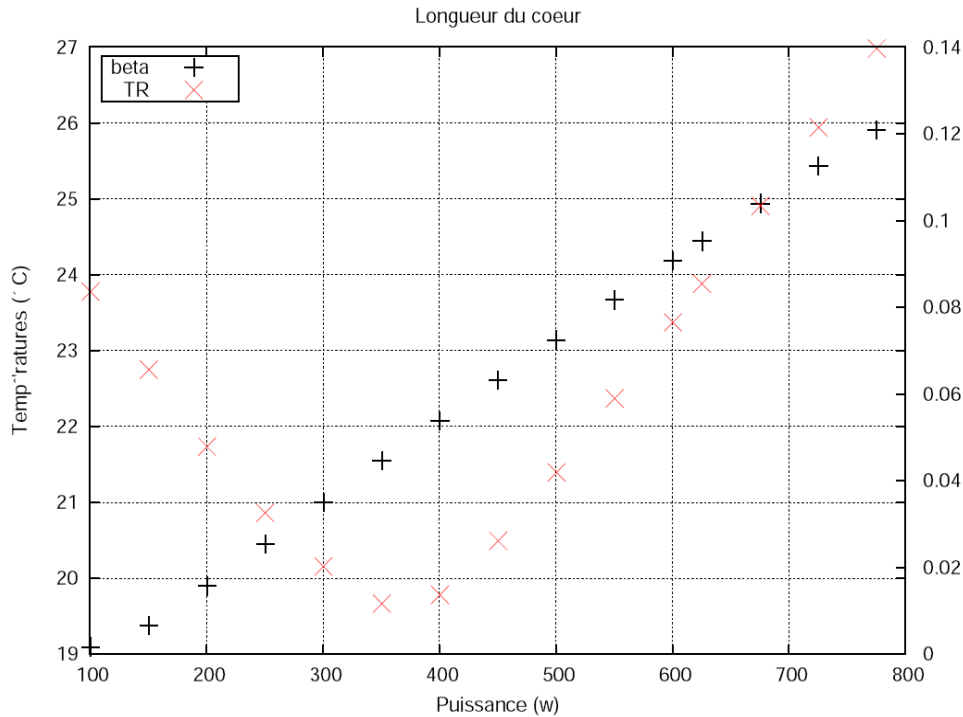
- tests de référence avec des données en régime dynamique : Wrenn et al., Kaya et al.
- tests avec inclinaison : Chen et al.



- visualisations directes : Ochterbeck et al.



Dispositif monté dans le cadre de la thèse



• **LHP de la littérature (Wrenn et al.)
100 à 800 W, fluide NH₃, mèches
métalliques**

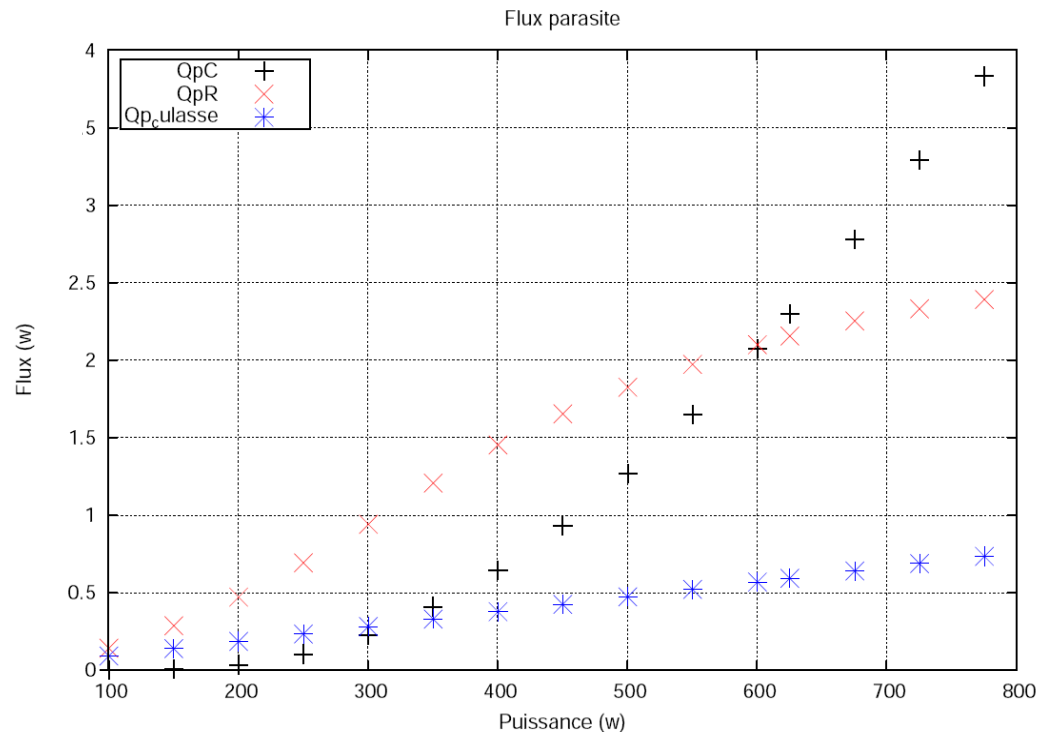
→ **Envahissement du coeur avec la
puissance :**

ratio $X_R(t) / L_{mèche} = 0\% \text{ à } 30\%$

• **Flux parasite total : 0.2 W à 8 W**

• **Répartition des flux parasites :**

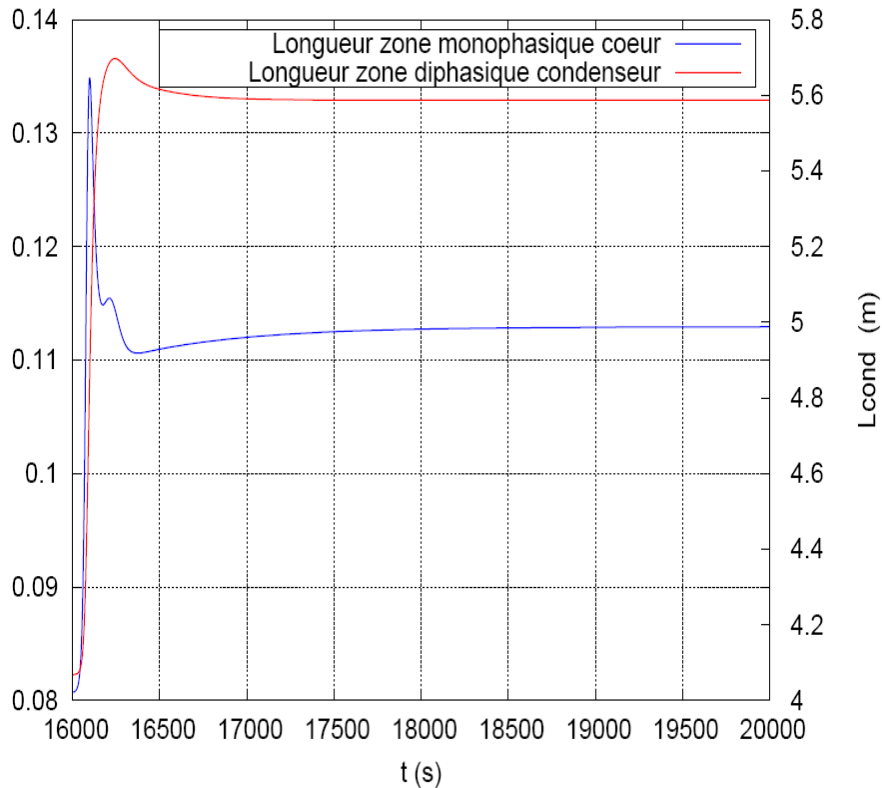
- À faible flux : coeur = culasse
- A fort flux : coeur >> culasse + forte absorption du flux parasite par le liquide sous-refroidi en bout de baïonette



Résultats de modélisation : régime dynamique

Laplace

École polytechnique
Université de Marseille



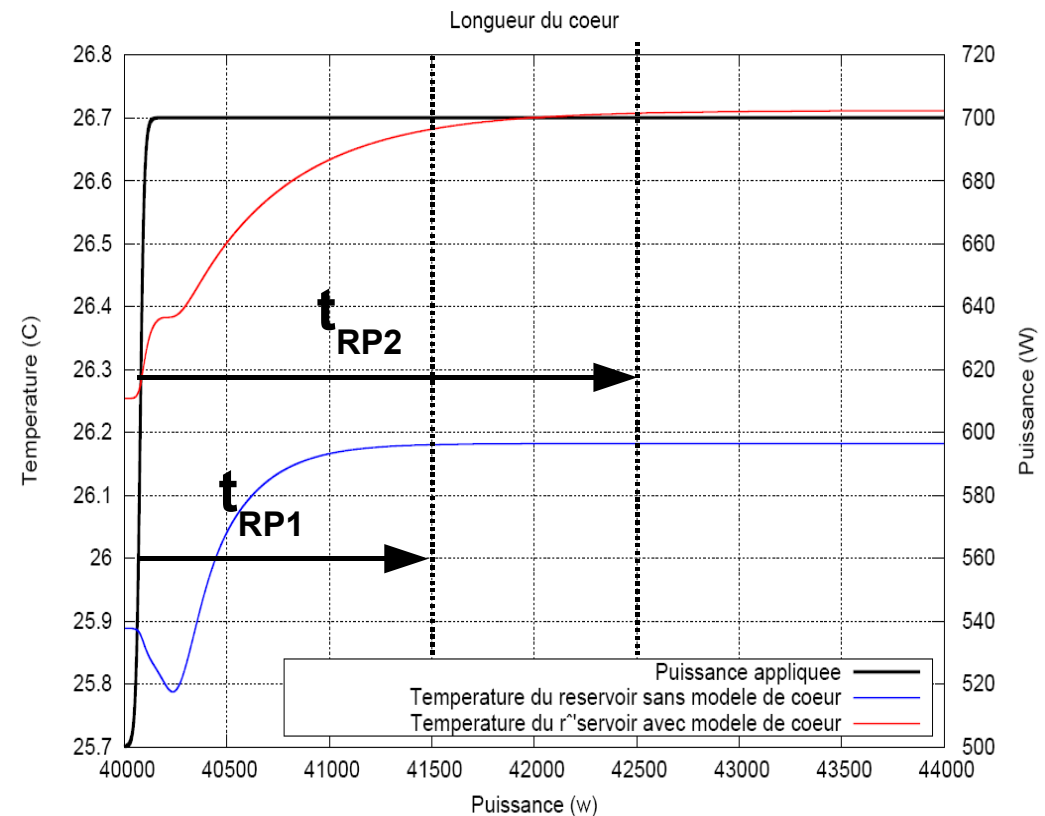
• **Mouvement des fronts de liquide dans le condenseur (noir) et au sein du coeur (rouge) :**

➡ **$X_r = 15\% \text{ à } 30\%$**

• **Amélioration de la réponse du système lors de sauts de puissance (ci-contre passage de 500 W à 700 W)**

➔ **Modèle (S. Launay et al.) sans prise en compte de la répartition des phases :**
 $t_{RP1} = 1500s$

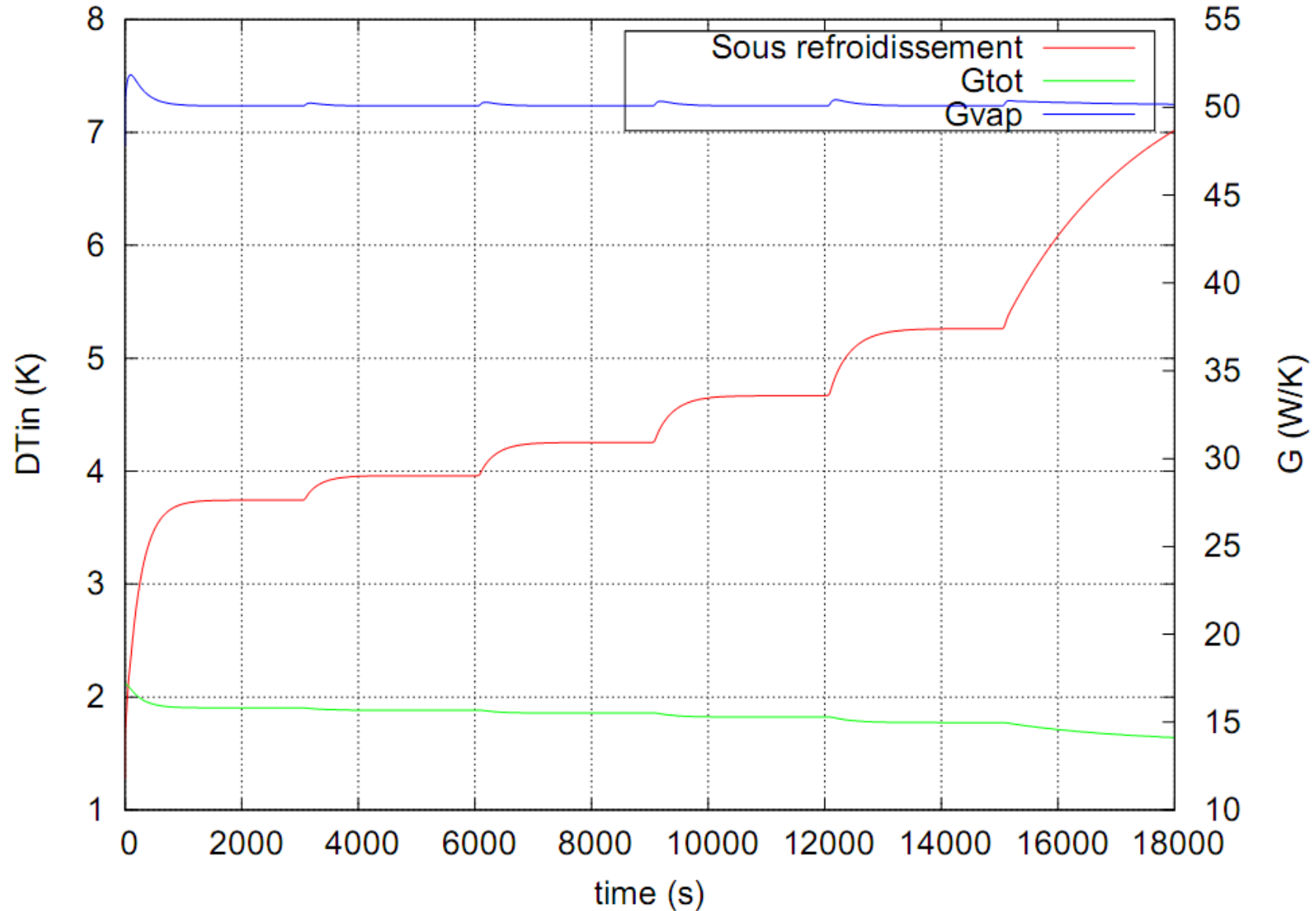
➔ **Modèle proposé : $t_{RP2} = 2500s$**



Résultats de modélisation : régime dynamique

Laplace

École polytechnique
université de Marseille



Impact de la répartition du fluide dans le coeur : besoin en sous-refroidissement

Laplace

$$\dot{m}c_p (T_R - T_{in}) = \underbrace{G (T_v - T_R) + \phi_{p,culasse}}_{\text{Imposé}} + \underbrace{\int_0^{X_R} \frac{G}{L_w} (T_R - T_c(x)) dx - \int_0^{X_R} \Gamma c_p (T_R - T_c(x)) dx}_{\text{Impact de la répartition du fluide}}$$

Augmentation/diminution du sous-refroidissement $G - \dot{m}c_p > 0$

$$G - \dot{m}c_p < 0$$

Impact de la baïonnette : $\int_0^{X_R} (T_R - T_c(x)) dx$