

# Point d'avancement de thèse

---

Luc FAVRE

19 mai 2022

Directrice :

Catherine COLIN

Co-directeur :

Stéphane MIMOUNI

Tuteur industriel :

Stéphane PUJET



# Sommaire

Modélisation Partition du Flux

Glissement et décollage

Modélisation du temps d'attente

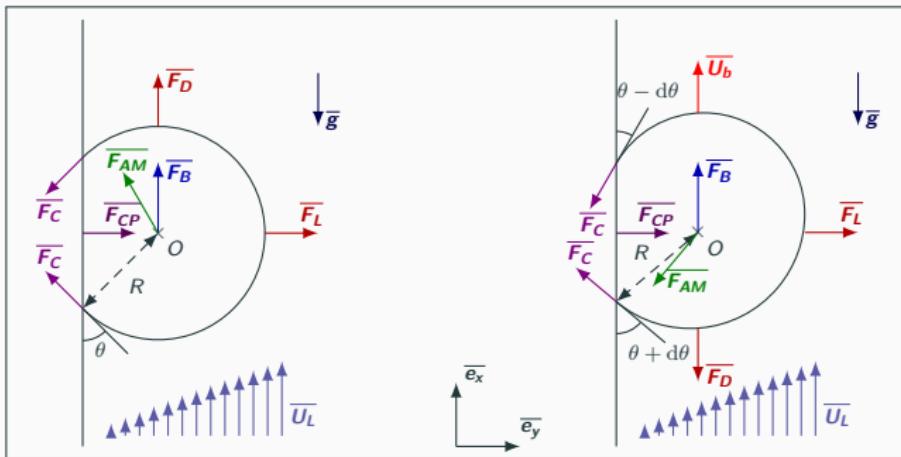
Calculs DEBORA

Proposition plan de manuscrit

## **Modélisation Partition du Flux**

---

# Bilan des forces et détachement



Représentation des forces agissant sur une bulle en écoulement vertical

Prédiction du détachement par glissement (ATH22) :

$$C_{AM,x} \frac{K^2 J a_w^2}{Pr} + \frac{Re_b}{Fr} + \frac{3}{8} C_D Re_b > \frac{3}{2} \frac{f_{C,x}}{Ca} ; \quad f_{C,x} = 2.5 \sin(\theta)^2 \cos(\theta)^2 \frac{d\theta}{(\pi/2)^2 - d\theta^2}$$

avec  $C_{AM,x} = 1.9089$  (Van Der Geld) ou  $1.78125$  (Duhar) et  $C_D$  de Shi et al..

# Vitesse de glissement

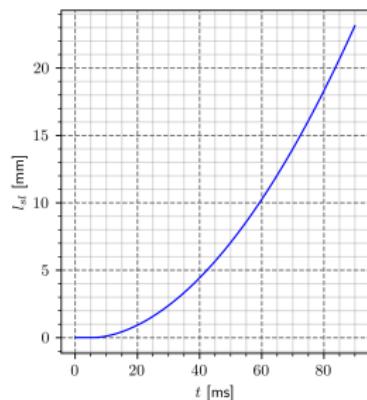
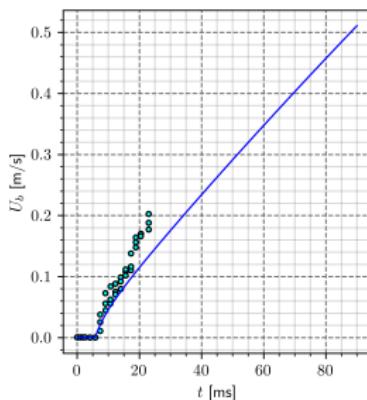
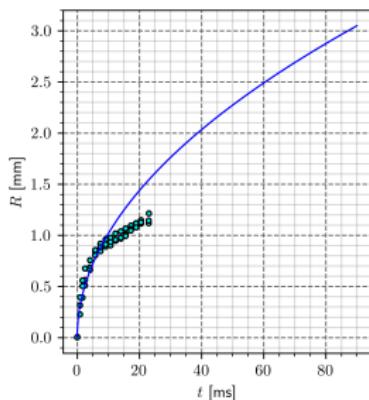
Accélération de la bulle :

$$\rho_V \frac{d(V_b U_b)}{dt} = F_D + F_b + F_{AM,x} ; \quad V_b = \frac{4}{3} \pi R^3 ; \quad R(t) = K J a_w \sqrt{\eta_L t}$$

$$\left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_V} C_{AM,x2}\right) \frac{\partial U_b}{\partial t} = \frac{3}{8} \frac{1}{R} C_D \frac{\rho_L}{\rho_V} U_{rel} |U_{rel}| + \left(\frac{\rho_L}{\rho_V} - 1\right) g + \left(\frac{\rho_L}{\rho_V} C_{AM,x1} U_{rel} - 3 U_b\right) \frac{\dot{R}}{R}$$

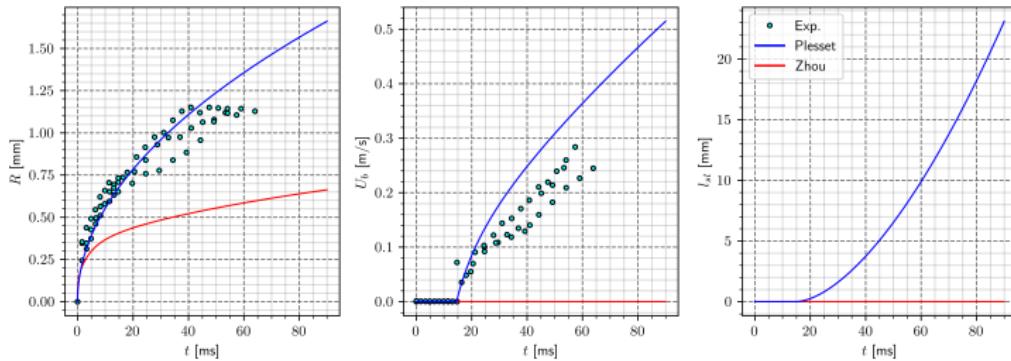
avec  $C_{AM,x1} = 1.9089$ ,  $C_{AM,x2} = -0.63629$  (Van Der Geld) ou  $C_{AM,x1} = 1.78125$ ,  $C_{AM,x2} = -0.59375$  (Duhar).

Maity (2000) :  $\Delta T_w = 5.9^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_L = 0.7^\circ\text{C}$ ,  $U_{L,bulk} = 0.0\text{m/s}$  --  $K=1.4$ ,  $\theta=45^\circ$ ,  $d\theta=15^\circ$

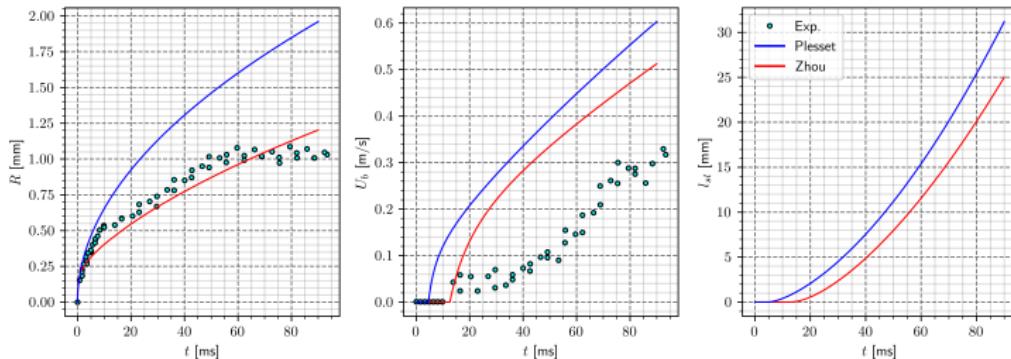


# Comparaisons avec mesures de Maity (2000)

Maity (2000) :  $\Delta T_w = 5.0^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_L = 0.6^\circ\text{C}$ ,  $U_{L,bulk} = 0.077 \text{ m/s}$  -  $K=0.9$ ,  $\theta=45^\circ$ ,  $d\theta=15^\circ$

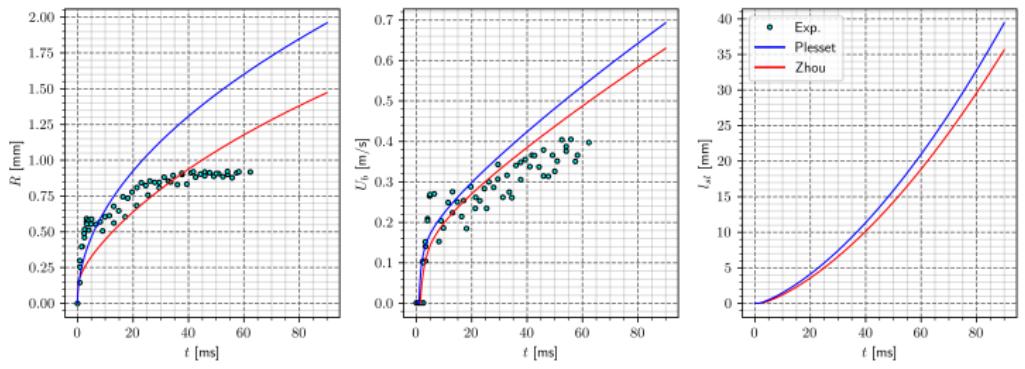


Maity (2000) :  $\Delta T_w = 5.9^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_L = 0.3^\circ\text{C}$ ,  $U_{L,bulk} = 0.15 \text{ m/s}$  -  $K=0.9$ ,  $\theta=45^\circ$ ,  $d\theta=15^\circ$



## Comparaisons avec mesures de Maity (2000)

Maity (2000) :  $\Delta T_w = 5.9^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_L = 0.3^\circ\text{C}$ ,  $U_{L,bulk} = 0.25\text{m/s}$  - -  $K=0.9$ ,  $\theta=45^\circ$ ,  $d\theta=15^\circ$



- Ordre de grandeur vitesse et accélération OK
- Loi de croissance imprécise car diffusion pure et indépendance à  $\Delta T_L$ 
  - ⇒ Impact sur terme  $R/\dot{R}$  et équation  $R_d$
  - ⇒  $K$  global →  $R$  sous-estimé premiers instants, surestimé en glissement

## Diamètre de décollage

Écoulement vertical : compétition masse ajoutée vs. portance, rôle forces capillaires faible (compensation entre pression de contact et tension de surface).

Décollage si :

$$\begin{aligned} F_L > F_{AM,y} \implies & \frac{1}{2} \rho_L \pi R^2 C_L U_{rel}^2 > \rho_L V_b \left[ C_{AM,y1} \frac{\dot{R}^2}{R} + C_{AM,y2} \ddot{R} + C_{AM,y3} \frac{U_{rel}^2}{R} \right] \\ \implies & \frac{\rho_L}{\rho_V} \left( \frac{C_L}{8} + \frac{C_{AM,y3}}{3} \right) + \frac{K^4 \text{Ja}_w^4}{\text{Pr}^2 \text{Re}_b^2} \left( \frac{\rho_L}{\rho_V} (C_{AM,y1} - C_{AM,y2}) - 1 + \frac{1}{3} \right) > 0 \end{aligned}$$

avec  $C_{AM,y1} = -1.1356$ ,  $C_{AM,y2} = -0.2699$  et  $C_{AM,y3} = 0.00877$  (Van Der Geld).

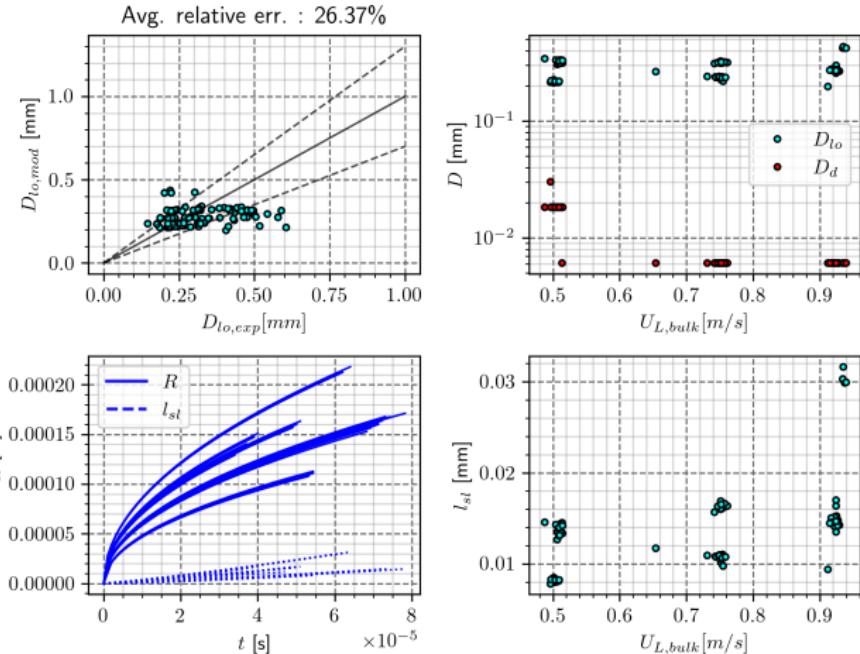
Limite supérieure par longueur capillaire :  $D_b < L_c$ .

Test sur 89 mesures de Situ (2005)

- problème de non-convergence si  $C_{AM,y1} \neq C_{AM,y2}$
- Choix plus simple  $C_{AM,y1} = C_{AM,y2} = -1/2$

# Données de Situ

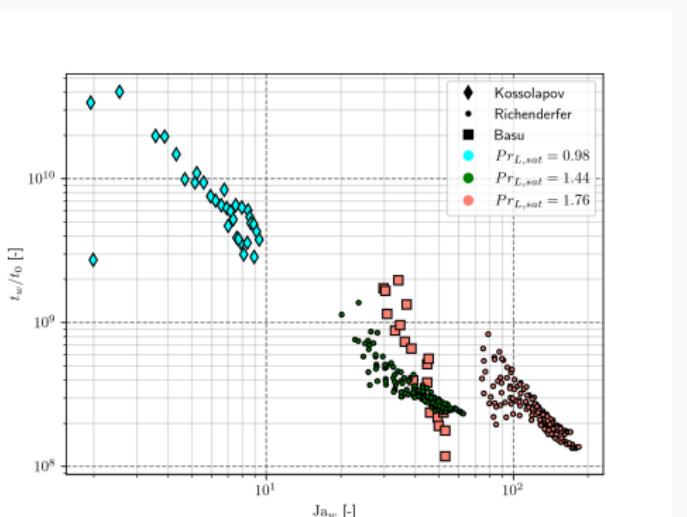
Résultats obtenus sur les données de Situ :



- Ordre de grandeur OK
- Indépendance à  $\Delta T_L$  : loi  $R(t)$
- $R_d$  et  $l_{si}$  faibles
- $dt = 10^{-6}$ s dans résolution itérative

# Données exp. temps d'attente

- **Richenderfer** :  $P = 1$  et  $2$  bars -  $\Delta T_L = 5, 10$  et  $20^\circ\text{C}$  -  $G = 1000, 1500$  et  $2000 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
- **Basu** :  $P = 1$  bar -  $\Delta T_L = 8.35, 23.25, 38.5$  et  $46.5^\circ\text{C}$  -  $G \approx 346 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
- **Kossolapov** :  $P = 10.5$  bars -  $\Delta T_L = 10^\circ\text{C}$  -  $G = 500, 1000$  et  $2000 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$

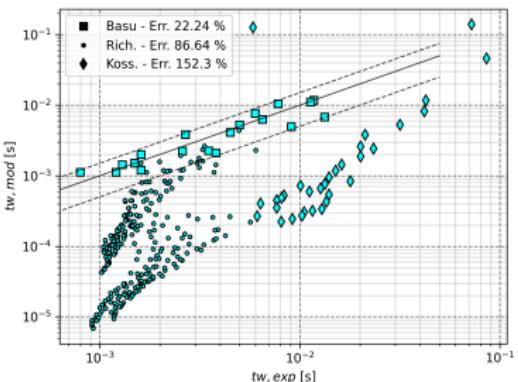


Ensemble des mesures exp. vs.  $\text{Ja}_w$

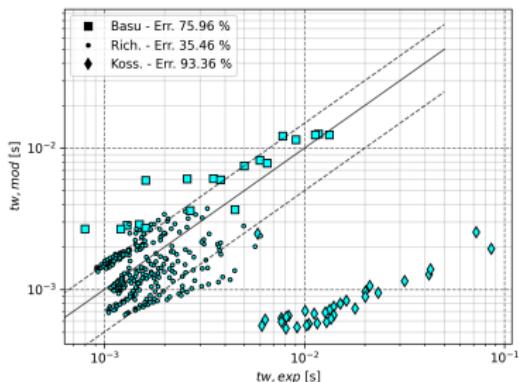
- Adimensionnement  $t_w/t_0$  avec  $t_0 = \left(\frac{\mu_{L,sat}}{\sigma}\right)^2 \nu_{L,sat}$
- Dépendance nette à  $\text{Ja}_w$
- Longs temps d'attente pour Kossolapov → cohérent ? Moyenne sur événements de nucléation et pas par site.

# Données exp. temps d'attente

- Corrél. Basu :  $t_w = 139 \Delta T_w^{-4.1}$
- Corrél. Kommajosyula :  $t_w = 0.0061 Ja_L^{0.63} / \Delta T_w$



Corrél. Basu vs. mesures exp.

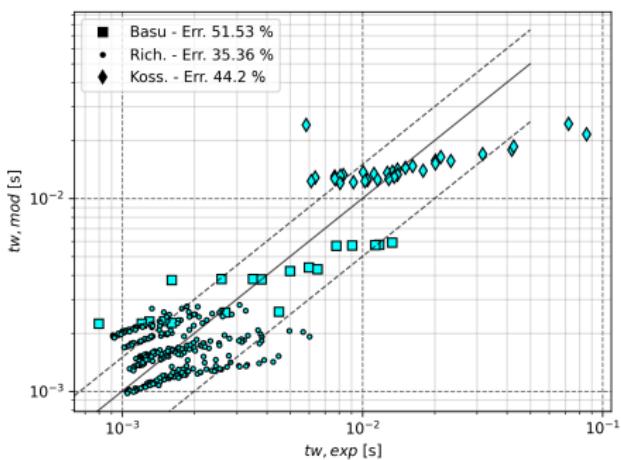


Corrél. Kommajosyula vs. mesures exp.

- Kommajosyula meilleur que Basu : dépendance en  $Ja_L$  ?
- Sous-estimation systématique sur Kossolapov

# Proposition corrélation

- De la forme  $t_w/t_0 = a_0 \frac{\Delta T_L}{\Delta T_w}^{a1} \frac{\rho_L}{\rho_V}^{a2} \Pr_{L,sat}^{a3}$
- Régression :  $a_0 = e^{60.55}$ ,  $a1 = 0.320$ ,  $a2 = -7.3$  et  $a3 = 23.356$



Test nouvelle corrélation vs. mesures exp.

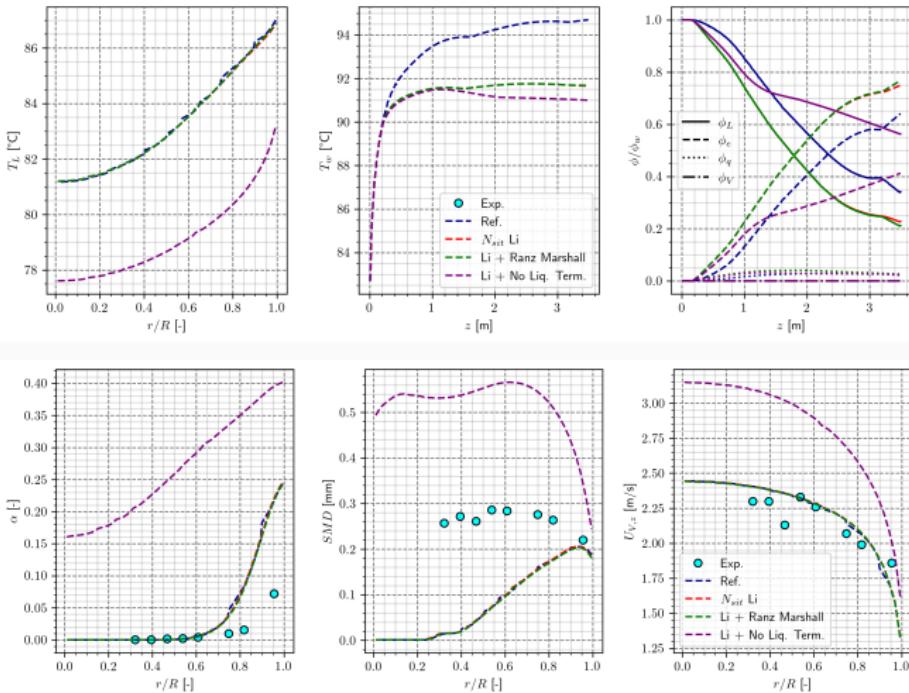
- Amélioration globale des prédictions
  - Présence données Kossolapov → augmentation  $t_w$  avec  $P$  : Physique ?
  - Choix des paramètres de dépendance pertinents ?
  - Utilisation de  $\Delta T_L$  : problème en CFD quand  $T_L > T_{sat}$  en paroi
- ⇒ Estimation plutôt de  $t_w \times f$  ?  
Couplé avec calcul semi-analytique de  $t_g$   
1→ obtention  $f$ .

## **Calculs DEBORA**

---

# Impact changement de la partition du flux ?

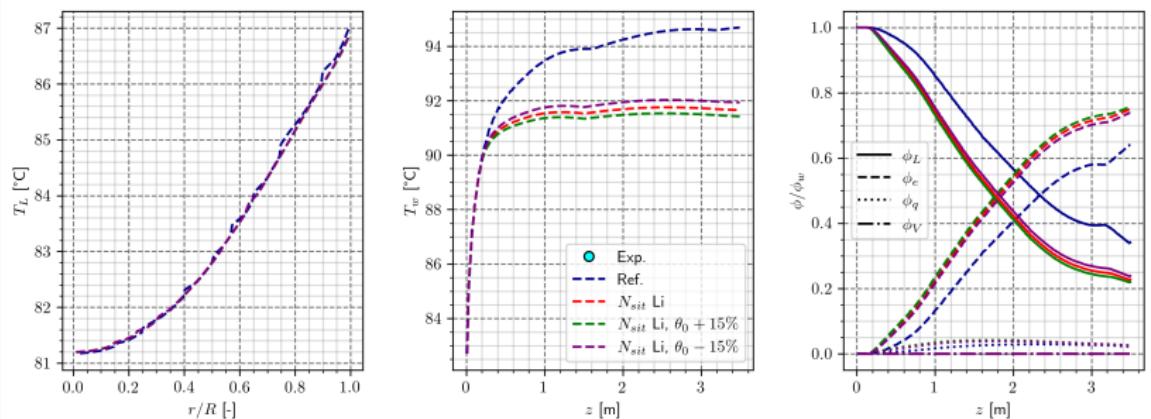
- Tests sur cas 30G2P26W16Te62 : Modélisation réf.,  $N_{sit}$  de Li et al.,  
Manon-Berne → Ranz-Marshall, aucun transfert d'enthalpie vers le liquide



Terme interfacial d'enthalpie vers le liquide semble contrôler la compensation observée entre HFP  
et  $\alpha / T_L$

## Sensibilité $\theta_0$ dans $N_{sit}$ ?

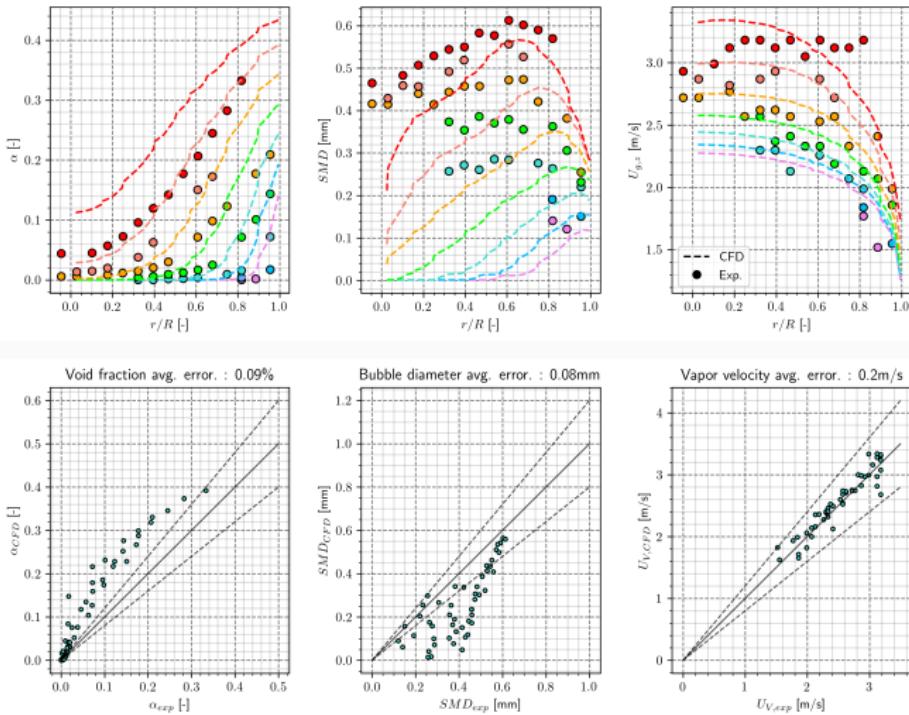
- Li et al (2018) :  $N_{sit} = N_0 (1 - \cos(\theta_0)) \left( \frac{T_c - T_{sat}}{T_c - T_0} \right)^\gamma \exp(f(P)) \Delta T_w^{A(P)\Delta T_w + B(P)}$
- $\theta_0 = 41.37^\circ$ , test avec  $\theta_0 + 15\%$  et  $\theta_0 - 15\%$  sur cas 30G2P26W16Te62



- Faible sensibilité de  $\theta_0$  sur HFP obtenue, petit impact sur  $T_w \rightarrow$  environ  $\pm 0.25^\circ\text{C}$

# Série 30G2P26W16 - Ensemble des cas

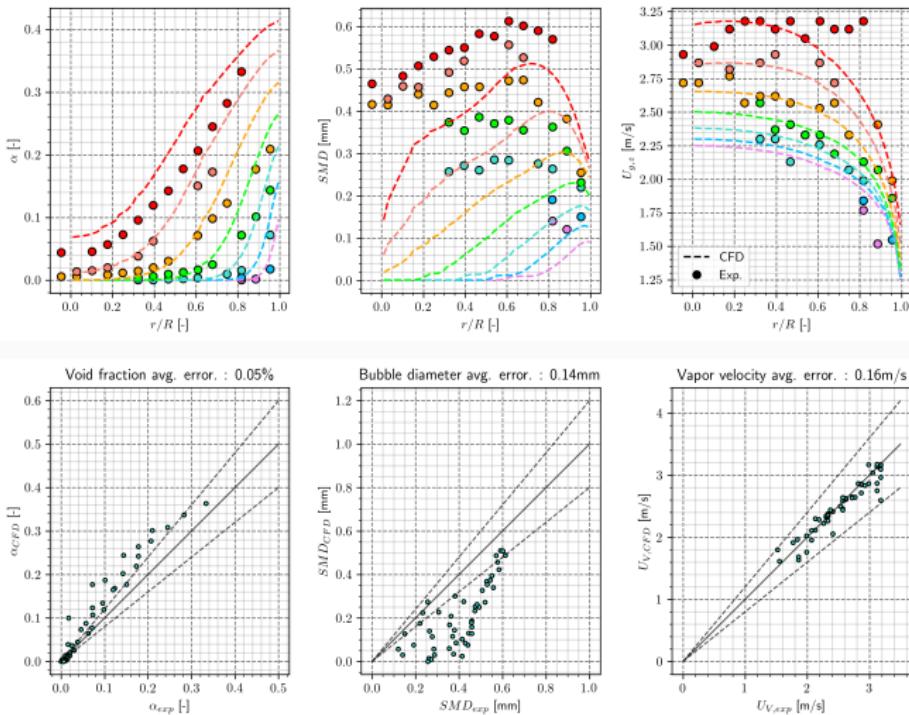
- $G = 2000 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ,  $P = 26 \text{ bars}$ ,  $\phi_w = 73.9 \text{ kW/m}^2$ , de  $\Delta T_{L,in} = 28.85^\circ\text{C}$  à  $\Delta T_{L,in} = -16.85^\circ\text{C}$



Résultats CFD avec modélisation de référence. Profils radiaux (haut) et erreurs agrégées (bas).

# Série 30G2P26W16 - Ensemble des cas + correction flux

- $G = 2000 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ,  $P = 26$  bars,  $\phi_{w,corr} = 0.94 \times 73.9 \text{ kW/m}^2$ , de  $\Delta T_{L,in} = 28.85^\circ\text{C}$  à  $\Delta T_{L,in} = -16.85^\circ\text{C}$ . Flux corrigé réduit de 4%.



Résultats CFD avec flux corrigé. Profils radiaux (haut) et erreurs agrégées (bas).

## **Proposition plan de manuscrit**

---

# Plan du manuscrit

- Introduction
- CFD modeling of multiphase flows
  - Eulerian equations
  - NCFD closures and approach
  - Heat Flux Partitioning in NCFD
- Validation of boiling flows in PWR conditions
  - The DEBORA case
    - Presentation of the experiment and campaigns
    - Analysis of the exp. results (profiles, non-dimensional numbers, consistency of the measurements)
    - Testing some correlations against exp. meas. (Gnielinski, Frost & Dzakowic)
  - NCFD simulations of DEBORA cases
    - Results over C3000/C800 campaign in same conditions
    - Correction of wall heat flux regarding overestimation of  $\alpha$ ,  $T_{liq}$  and  $T_w$
- Some sensitivity to model choice (interfacial area, forces)
- Development of a new Heat Flux Partitioning model
  - State of the art and bibliography (from correlations to mechanistic models)
  - Bubble growth
    - Previous approaches
    - Proposition of derivation for a new static growth law
    - Validation against DNS from Urbano *et al.*
    - Limitations : estimation of the thermal BL thickness  $\delta_{th}$
  - Wait time and frequency
    - Previous approaches
    - Study of exp. measurements
    - Testing of former correlations
    - Proposition of a new data-based formulation

# Plan du manuscrit

- Development of a new Heat Flux Partitioning model
  - Bubble detachment and lift-off diameter
    - Previous approaches
    - Force balance approaches + detail of each forces (CL CD from Shi, added mass clean calculation, etc.)
    - Dimensional analysis of the vertical force balance (ATH22)
    - Departure diameter and comparison w/ exp (ATH22)
    - Sliding and bubble velocity + exp. comp.
    - Lift-off diameter
  - Nucleation site density
    - Previous approaches
    - Comparison of models against exp. data from literature (Kossolapov, Zhou, Borishanskii, Richenderfer), importance of pressure
- Nucleation site interaction and suppression
- Sliding suppression and coalescence between bubbles
- Global testing of the model
  - Gathering of exp. measurements (Jens-Lottes, Kossolapov, Kennel)
  - Analysis of exp. results (value ranges, non-dimensional numbers, sensitivity to flow parameters)
  - Predictions of  $T_w$  using the new model vs. other models
- NCFD implementation of the model
  - Step by step implementation : influence of single law modifications ?
  - Total implementation results and observed problematics
  - Conclusions and limitations

# Plan du manuscrit

- Towards industrial geometry
  - DEBORA-Promoteur experiment (NURETH19)
    - Presentation of the experiment
    - Analysis of experimental results (void fraction profiles, bubble diameter estimations, comparison w/ simple tube)
    - NCFD simulations of DEBORA case in 3D and DEBORA-Promoteur cases
    - Results + some model sensibilities such as added mass
  - AGATE-Promoteur experiment (NURETH19)
    - Presentation of the experiment
- Comments and vizualisation of exp. results
- NCFD simulation of AGATE-Promoteur case
- Results + sensitivity over turbulence (LES, RANS) and wall law (roughness)
- Conclusions
- General conclusion
- + derniers résultats qui arriveront (implémentation, KATHY et qqs petits test de CHF ?)