

Influence d'une source interne sur la température de Leidenfrost – application à un écoulement de type DFFB

Juan Esteban LUNA VALENCIA^{2*}, Arthur V.S OLIVEIRA³, Alexandre LABERGUE¹, Tony GLANTZ², Michel GRADECK¹

¹Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000 Nancy, France

²IRSN PSN/SEMIA/LEMC, B.P. 3, 13 115 St-Paul-Lez-Durance Cedex, France

³Department of Mechanical Engineering, Sao Carlos School of Engineering, University of Sao Paulo, Sao Carlos, Brazil

*(auteur correspondant : juan-esteban.luna@irsn.fr)

Résumé - Dans cet article, on va s'intéresser à l'influence d'une source thermique sur la température de Leidenfrost d'une paroi se refroidissant et soumise à un écoulement dispersé de vapeur d'eau et de gouttes. Cette température est intéressante à connaître car, passée cette limite en refroidissement, les coefficients de transferts thermiques augmentent fortement. Notre cas s'applique à un refroidissement d'assemblage d'un cœur de REP qui aurait subi un accident de perte de réfrigérant au primaire (accident de type APRP). Les expériences réalisées au cours de ce travail montrent que cette température est influencée par plusieurs paramètres dont la puissance résiduelle, source thermique due à la désintégration des produits de fission. C'est ce que nous allons montrer et analyser dans cet article.

Nomenclature

a diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$

C_p chaleur massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$

d_{10} diamètre moyen, m

e épaisseur, m

e_{L,e_w} effusivité, $W.K^{-1}.m^{-2}.s^{1/2}$

\dot{m}_L débit massique de liquide, kg/h

\dot{m}_V débit massique de vapeur, kg/h

Re nombre de Reynolds

T température, °C

T_{D0} température initiale des gouttes

T_{LFP} température de Leidenfrost, °C

T_{SPIN} température spinodale, °C

T_V température de vapeur, °C

u vitesse, m/s

We nombre de Weber

z variable d'espace, m

Symboles grecs

α fraction volumique

λ conductivité, $W.m^{-1}.K^{-1}$

ρ masse volumique, kg/m^3

Indices et exposants

0 initial

g goutte

L liquide

W paroi

Acronymes

LIF Laser Induced Fluorescence

LFP Leidenfrost

PDA Phase Doppler Anemometry

REP réacteur à eau pressurisée

1. Introduction

Lors d'un accident de perte de réfrigérant primaire (APRP), le cœur du réacteur perd son inventaire en eau et malgré l'arrêt automatique du réacteur par chute des barres de contrôle (qui provoque l'arrêt de la réaction en chaîne), la température des assemblages va augmenter rapidement du fait de la puissance résiduelle produite par le cœur ; cette puissance est due à la désintégration des produits de fission. Cette source thermique représente environ 7% de la puissance nominale du réacteur et elle décroît de façon exponentielle. Ainsi, même à l'arrêt,

l'existence de cette puissance résiduelle explique qu'il faille refroidir le réacteur et que la température des assemblages puisse augmenter très rapidement dans les premiers instants suivant l'arrêt car ils ne sont plus refroidis. Ce refroidissement va s'opérer par une injection d'eau « froide » par le bas des assemblages et il va donner lieu à un écoulement dispersé de vapeur d'eau et de gouttes (en anglais, dispersed flow film boiling ou DFFB) qui se propage dans tout l'assemblage assez rapidement car même si la vitesse de renoyage est faible, le débit de vapeur générée au front de trempe donnera lieu à des vitesses importantes de la vapeur et des gouttes entraînées. Par conséquent, cet écoulement joue un rôle primordial dans le refroidissement initial des crayons combustibles qui ne sont pas encore immergés dans l'eau.

Dans cet article, on va s'intéresser à l'influence de la puissance résiduelle sur la température de remouillage de la paroi qu'on associe ici à une transition de Leidenfrost s'agissant d'impacts de gouttes en paroi. En effet, les assemblages se refroidissant en aval de la zone de trempe, on va passer d'un écoulement de type DFFB sans mouillage de la paroi à un écoulement mouillant si la température de paroi passe en deçà du point de Leidenfrost (LFP). Des expériences réalisées sur l'expérience COLIBRI du LEMTA ont montré que cette température est influencée par plusieurs paramètres dont la puissance résiduelle. Avant d'analyser comment la température LFP évolue en fonction de la puissance résiduelle, on reviendra dans une brève analyse bibliographique sur la transition « Leidenfrost » puis on décrira le dispositif expérimental et enfin, on analysera les résultats expérimentaux.

2. Température de Leidenfrost - modèles récents

Une goutte posée de façon sessile ou impactant une paroi est en régime de Leidenfrost s'il n'y a aucun contact physique entre celle-ci et la paroi ; elle en est isolée par une mince couche de vapeur qui se forme instantanément. Le régime de Leidenfrost est donc un régime non mouillant. La température de Leidenfrost marque la fin du régime de film et marque donc la transition vers des régimes dit mouillants. Si on refroidit une paroi, la limite de Leidenfrost marquera la transition entre le régime à film vapeur vers des régimes d'ébullition. Typiquement, les profils temporels de température mesurés sont tels que présentés en figure 1.

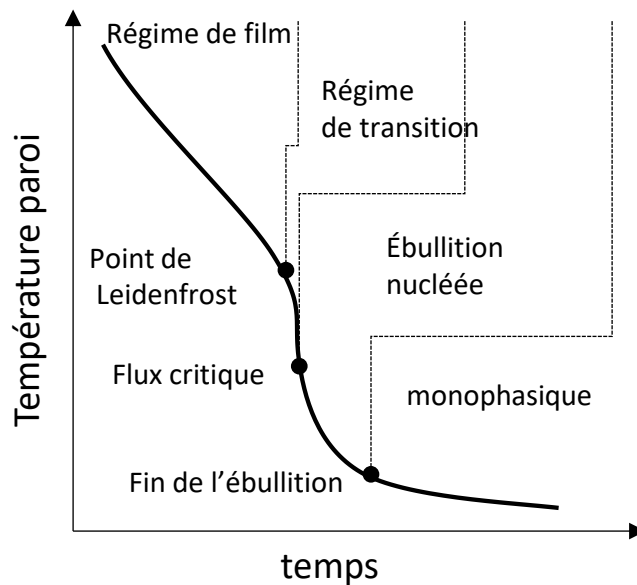


Figure 1 : courbe de refroidissement typique

La température de Leidenfrost pour une goutte sessile ou en impact a fait l'objet de nombreuses publications et elle est toujours supérieure à la température de saturation du liquide. Pour une goutte d'eau sessile, elle varie entre 162°C et 263°C en fonction de sa pureté et de la rugosité de la paroi mais pour une goutte en impact, elle est également fonction de la vitesse d'impact qui modifie l'étalement de la goutte de façon dynamique et donc l'écoulement de la vapeur sous celle-ci.

Bernardin et al. [1] ont donné la corrélation suivante :

$$T_{LFP} = 162 + 24.3u^{0.64} \quad (1)$$

Où T_{LFP} est exprimée en °C et la vitesse u (vitesse d'impact) en m/s. Une valeur de 162°C a été déterminée pour une goutte d'eau sessile posée sur une surface en aluminium. Une précision importante, cette relation est valide uniquement pour des gouttes d'eau impactant une surface parfaitement lisse. Leurs expériences montrent que si la surface est rugueuse, la transition s'opérera à une température plus faible. Cette relation est limitée car elle ne tient pas compte du diamètre de la goutte, permettant de définir un nombre de Reynolds à l'impact, ni des propriétés thermo-physiques de la paroi. Récemment, Castanet et al. [2] ont proposé un nouveau modèle tenant compte du caractère transitoire du contact entre la goutte et la paroi :

$$T_{LFP} = T_{SPIN} + f(We, Re) \frac{e_L}{e_W} (T_{SPIN} - T_{D0}) \quad (2)$$

T_{SPIN} est la température spinodale correspondant à la température maximale à laquelle un liquide peut être chauffé avant qu'il ne se vaporise spontanément. Elle peut être déterminée théoriquement à partir de l'équation d'état de Van der Waals. Pour l'eau pure à une pression de 1 bar, elle vaut 320.25°C ; T_{D0} est la température de la goutte avant impact. $f(We, Re)$ est une fonction qui dépend de la dynamique de l'impact et e_L , e_W sont respectivement l'effusivité du liquide et de la paroi.

3. Installation COLIBRI

La Figure présente une vue schématique du banc expérimental COLIBRI¹. Il se compose d'un système d'injection permettant la formation de gouttes d'eau, d'un système d'injection de vapeur surchauffée et d'une région tubulaire d'expérimentation et de métrologie. Cette région tubulaire est représentative d'un sous-canal de REP (cf thèses de JD Peña Carrillo [3] et JE Luna Valencia [4]).

La région tubulaire du banc expérimentale est composée de trois parties. Les parties en amont et aval de la zone d'essai ont un diamètre de 11.78 mm ($e=0.57\text{mm}$), correspondant au diamètre hydraulique équivalent d'un sous-canal représentatif non déformé d'un REP (i.e. le sous-canal pris entre quatre crayons combustible). La veine d'essai est amovible, permet de représenter un sous-canal partiellement déformé pour étudier différents taux de bouchage. Dans ce papier, on ne présente que des résultats pour un sous-canal intact ($D_h=11.78\text{mm}$).

¹ COoLIing of Blockage Region Inside a PWR Reactor

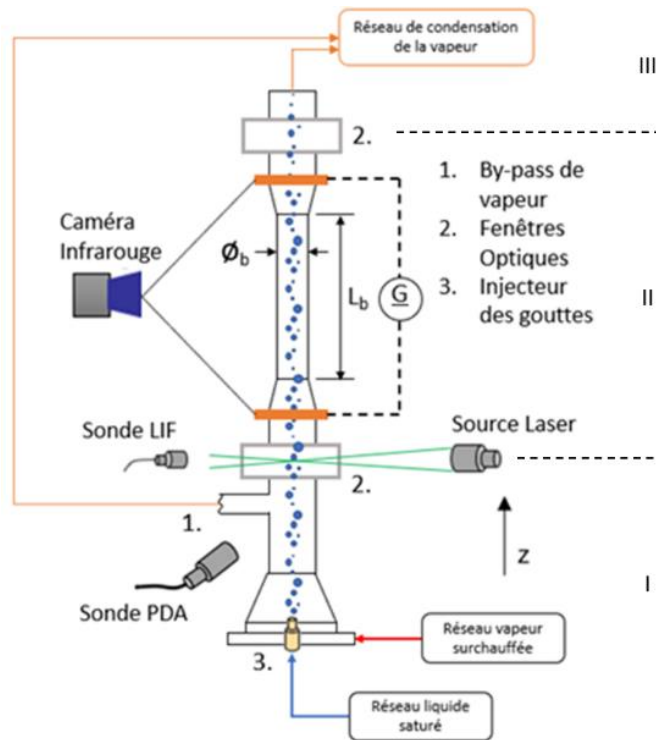


Figure2 : Schéma du banc expérimental COLIBRI

La veine d'essais est un tube en inconel 625 ; elle est chauffée par effet Joule en utilisant un générateur électrique (TDK Lambda GEN 10-300). Des fenêtres optiques en borosilicate sont placées en amont et en aval de cette partie afin d'effectuer de mesures optiques des caractéristiques des gouttes dans le tube (Vitesse, diamètre et température des gouttes). L'écoulement à goutte dispersées est obtenu en injectant de l'eau chauffé à 80°C (jet issu d'un injecteur de 700 μm en diamètre) qui se fragmente sous l'effet d'un flux de vapeur. Celle-ci est produite par générateur de vapeur à un débit massique maximale de 10 kg/h. Le débit massique, la température, et la pression de la vapeur sont mesurés en utilisant respectivement un débitmètre à orifices Rosemount®, un thermocouple type-K, et un transmetteur de pression Keller®. Des mesures de températures de gouttes réalisées par LIF à l'entrée de la veine [3][4] montrent qu'elles sont à saturation ou proche de la saturation.

Les expériences sont séquencées de la façon suivante : Les conditions d'injection de l'écoulement diphasique sont ajustées et la phase d'injection démarre. Ensuite, le générateur électrique est mis en route afin de chauffer la veine jusqu'à une température représentative d'un APRP. Une fois le régime quasi-stationnaire atteint, le générateur est coupé ou maintenu à une puissance représentative d'une puissance résiduelle et les mesures simultanées de thermographie infrarouge, PDA et LIF démarrent afin d'obtenir l'évolution de la température externe du tube et les propriétés thermo-hydrauliques de l'écoulement des gouttes lors du refroidissement du tube. De plus, la température d'injection de vapeur, des gouttes, les débits massiques d'injection de la vapeur et du liquide sont enregistrés.

4. Influence de la puissance résiduelle sur la température de Leidenfrost

Des expériences avec différentes puissances résiduelles ont été réalisées. Dans ces expériences, la veine d'essai est tout d'abord chauffé avec une puissance maximale de 6420

W/m (comme pour les expériences sans puissance résiduelle) jusqu'à atteindre une température initiale de tube proche de 800°C, assurant un régime de film vapeur en début d'essai. Au démarrage de l'essai, la puissance est réduite de 6420 W/m à la valeur définie pour chaque expérience (entre 500 et 2000 W/m). Les paramètres thermo-hydrauliques des expériences référencées C2-3, C2-9, C2-10, C2-11 et C2-12² sont résumés dans le tableau 1.

Numéro	\dot{m}_V [kg/h]	\dot{m}_L [kg/h]	α_g	Re _v	Puissance résiduelle	P _v [bar]	T _v à l'entrée
C2-3	3.1	8	1.4 10 ⁻³	4520	0 kW/m	1.3	270 °C
C2-9	2.97	7.7	1.7 x10 ⁻³	4403	0,47 kW/m	1.3	287 °C
C2-10	3.13	7.7	1.4 x10 ⁻³	4639	0,95 kW/m	1.3	259 °C
C2-11	2.95	7.7	2 x10 ⁻³	4374	1,44 kW/m	1.3	255 °C
C2-12	2.9	7.7	1.4 x10 ⁻³	4298	1,9 kW/m	1.3	260 °C

Tableau 1 : Paramètres thermo-hydrauliques des expériences

Pour chaque expérience, on réalise des mesures statistiques des distributions en taille et vitesse des gouttes à l'aide de la sonde PDA afin d'obtenir les caractéristiques de la population en entrée de veine d'essais. La figure 3 montre les distributions en taille et vitesse des gouttes en fonction du diamètre pour les différentes expériences. On remarque une légère variation entre les distributions malgré des débits de gouttes et de vapeur très proches d'une expérience à l'autre. Cela est dû aux inconvénients mentionnés précédemment du système d'acquisition PDA concernant l'analyse statistique, dans ce cas certaines expériences ont beaucoup plus de gouttes mesurées que d'autres.

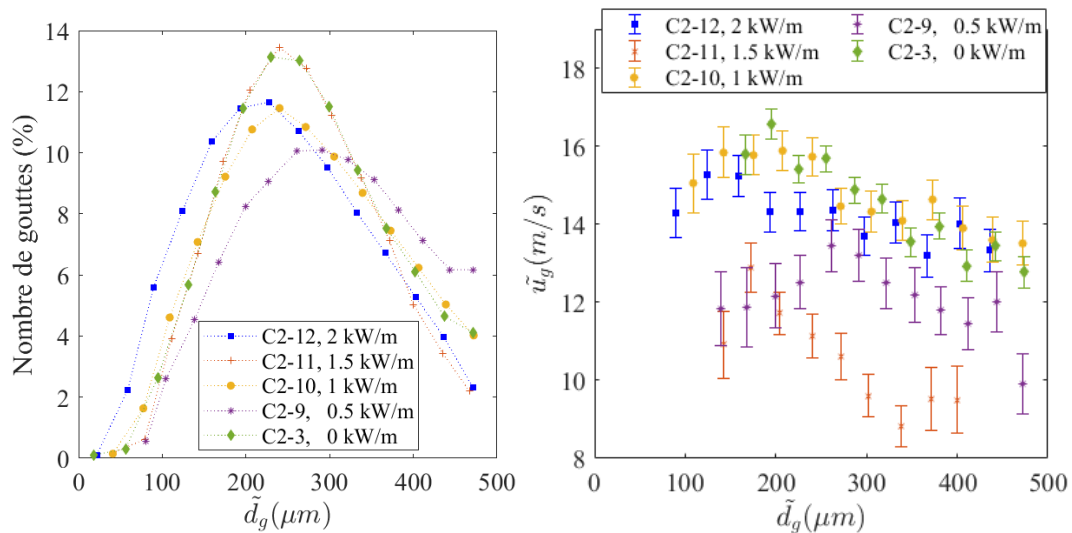


Figure 3 : Distributions en taille et vitesse de gouttes en fonction du diamètre

La température de paroi du tube est mesurée à l'aide d'une caméra infrarouge (Jade Cedip 3) équipée d'un filtre dans la bande spectrale [3,97-4,01] μm . Les cartogrammes de température sont donnés en Figure 4 et permettent de déterminer les évolutions locales de la température de paroi et ainsi déterminer la température de transition de Leidenfrost.

² Ces références sont identiques à celles utilisées

Expériences analysées	$\overline{u_g}$ en m/s	Diamètre moyen (d_{10}) en μm
C2-3	14.9	276
C2-9	12.2	297
C2-10	14.9	273
C2-11	10.5	266
C2-12	14.8	248

Tableau 2 : Principaux paramètres des gouttes

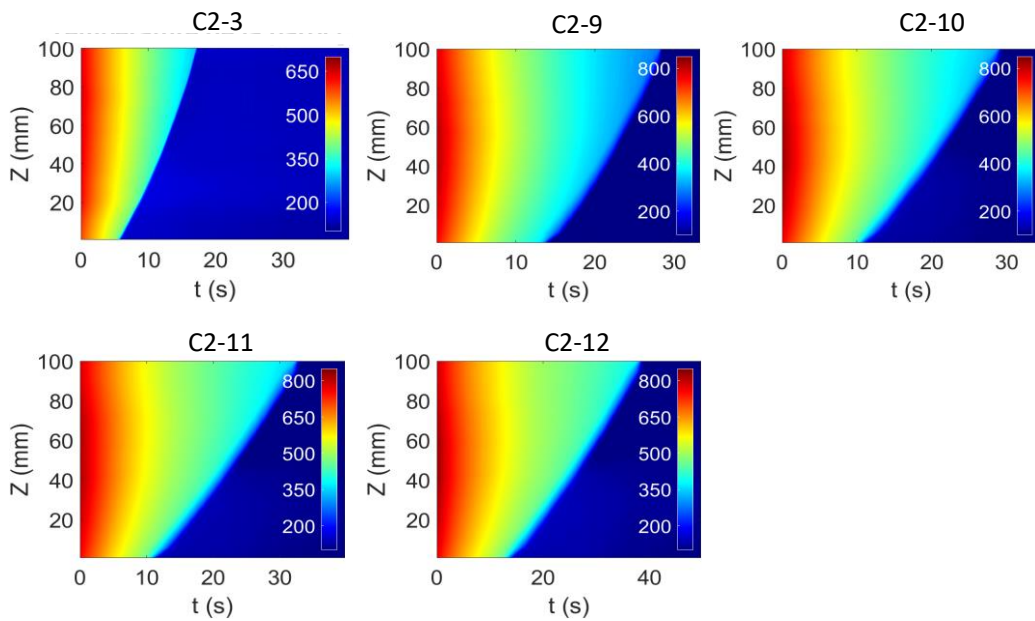


Figure 4 : Cartogramme des températures de paroi

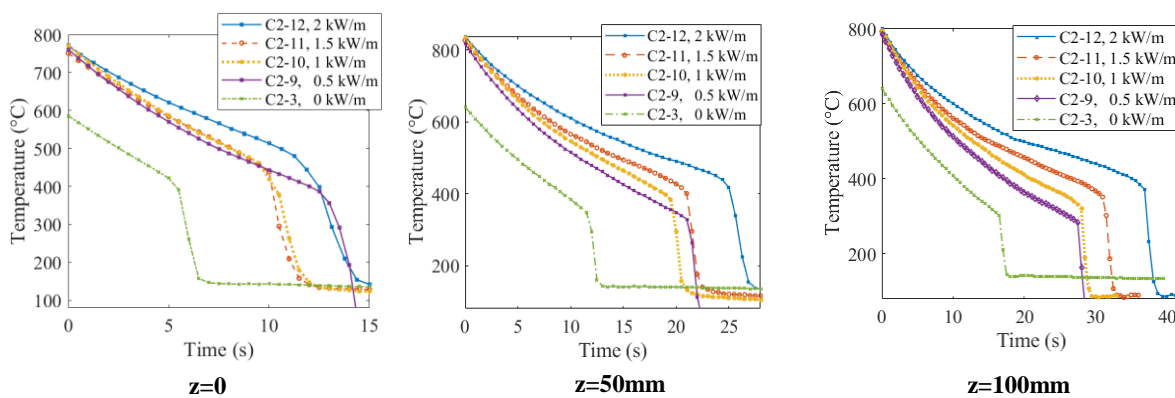


Figure 4 : Evolution de la température pour différentes positions

Sur la figure 4, on remarque clairement que la transition de Leidenfrost est retardée pour toutes les expériences avec puissance résiduelle (C-3 est réalisée sans puissance résiduelle, cf tableau 1). L'analyse n'est pas aisée car nous ne pouvons pas estimer la vitesse d'impact des

gouttes et nous travaillons aussi avec une population de gouttes avec des diamètres moyens proches mais différents, contrairement aux expériences faites par [1] et [2] qui ont conduit à proposer les modèles décrit par les relations (1) et (2). La comparaison de T_{LFP} ne peut donc que se limiter aux expériences C2-3, C2-10 et C2-11 qui ont des diamètres moyens très proches et compris entre 266 et 273 μm , on peut donc raisonnablement s'attendre à des nombres de Weber d'impact équivalent entre ces trois expériences. Ceci étant posé, on remarque que la température de Leidenfrost est de l'ordre de 480°C à $z=0\text{mm}$ pour les expériences avec puissance résiduelle et de 420°C pour l'expérience de référence (sans puissance résiduelle). A $z=50\text{mm}$, $T_{LFP} = 420^\circ\text{C}$, 400°C et 380°C respectivement pour une puissance de 1.5kW/m, 1kW/m et 0kW/m ; enfin à $z=100\text{mm}$, $T_{LFP} = 375^\circ\text{C}$, 350°C et 320°C respectivement pour une puissance de 1.5kW/m, 1kW/m et 0kW/m. La température de Leidenfrost diminue car la population de gouttes s'évaporant dans la veine d'essais, le diamètre moyen diminue et par conséquent, ces résultats sont consistant avec le modèle 2.

On va maintenant estimer la température de Leidenfrost à l'aide de la relation (2) qui ne tient pas compte d'une puissance résiduelle. Les propriétés de la paroi (inconel 625) et des gouttes sont les suivantes.

- Inconel 625 $\rho_W = 8440 \text{ kg/m}^3$; $\lambda_W = 15.6 \text{ W/m.K}$; $C_{pW} = 480 \text{ J/kg.K}$
- Liquide $\rho_L = 1000 \text{ kg/m}^3$; $\lambda_L = 0.6 \text{ W/m.K}$; $C_{pL} = 4180 \text{ J/kg.K}$

En appliquant le modèle (2), avec $f(We, Re) = \sqrt{5}$ (cf [2] valable pour des gouttes dont $We > 10$ et $Re > 100$), on obtient une température Leidenfrost de l'ordre de 363°C. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle obtenue expérimentalement mais on sous-estime la valeur expérimentale. Ceci peut s'expliquer par le fait que dans notre cas, les gouttes impactent la paroi à des nombres de Weber bien inférieurs à 10. L'ordre de grandeur donné par JD Peña Carrillo [3] est inférieur à $We=1$. Les gouttes se déformant très peu conduirait à un échauffement transitoire peu marqué et par ailleurs, les gouttes étant quasiment à saturation, l'échauffement transitoire des gouttes ne doit pas suivre le modèle donné par Castanet et al. [2].

L'existence d'une puissance résiduelle modifie la température de Leidenfrost. En effet, elle la décale vers des températures plus élevées. Le modèle de Castanet et al. [2] se base sur une estimation du champ de température dans le solide (considéré milieu semi-infini) et dans le liquide (milieu semi-infini également) par des modèle 1D transitoire mais dans notre cas, on doit tenir compte de la puissance résiduelle du solide donc ajouter le terme $\frac{\dot{q}}{a_W \rho_W C_{pW}}$, ce qui donne l'équation suivante à résoudre :

$$\frac{1}{\alpha_W} \frac{\partial T_W}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_W}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{a_W \rho_W C_{pW}} \quad (3)$$

Avec $T_W(z = \infty, t) = T_{W0}$; $T_W(z = 0, t = 0) = T_C$ et $T_W(z, t < 0) = T_{W0}$

Ayant pour solution :

$$T_W(z, t) = T_{W0} + (T_C - T_{W0}) \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{a_W t}} \right) + \frac{\dot{q} t}{\rho_W C_{pW}} \quad (4)$$

La solution de cette équation associée à une condition de température en paroi prise comme étant la température de contact ne conduit cependant pas à une expression de la température de Leidenfrost différentes des calculs de [2]. Ce modèle n'est donc pas adapté pour notre cas.

5. Conclusion

La température de Leidenfrost est influencée par la puissance résiduelle de la paroi qui a tendance à augmenter la valeur de la température quand la puissance résiduelle augmente. Cependant, l'analyse de ces expériences n'est pas aisée car dans notre cas, l'écoulement est polydisperse. La confrontation de nos estimations avec le modèle proposé par Castanet et al. [2] montre également que le modèle de Castanet et al. permet d'obtenir une valeur approchée acceptable mais ce modèle ne permet cependant pas de prendre en compte la puissance résiduelle qui, nous l'avons mesurée, décale T_{LFP} vers de plus hautes températures.

Références

- [1] J.D. Bernardin, I. Mudawar, A Leidenfrost point model for impinging droplets and sprays, *Journal of Heat Transfer*, 126 (2004), pp. 272-278
- [2] G. Castanet, O. Caballina, W. Chaze, R. Collignon, F. Lemoine, The Leidenfrost transition of water droplets impinging onto a superheated surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 160 (2020) 120126
- [3] J.D. Peña Carrillo, Étude expérimentale du transfert paroi/fluide dans le cas d'un écoulement vertical vapeur/gouttes dans une géométrie tubulaire, , *Thèse Université de Lorraine*, Université de Lorraine (2018)
- [4] J.E. Luna Valencia, Étude du refroidissement d'un assemblage combustible par un écoulement vertical vapeur/gouttes à l'échelle d'un sous-canal, *Thèse Université de Lorraine*, Université de Lorraine (2023)