

Étude de l'évolution du front de glace d'une goutte d'eau impactant une surface sous-refroidie : comparaison entre simulations et expériences

Study of the ice front evolution in a droplet impinging on a cold substrate : Comparisons between simulation and experimental data.

Mehdi STITI¹, Guillaume CASTANET¹, Alexandre LABERGUE¹, Fabrice LEMOINE¹

¹Laboratoire Énergies Mécanique Théorique et Appliquée, Université de Lorraine, CNRS
2 avenue de la forêt de Haye – 54518 Vandœuvre-lès-Nancy.

*(auteur correspondant : mehdi.stiti@univ-lorraine.fr)

Résumé - Un dispositif expérimental a été mis en place pour permettre l'étude du front de solidification d'une goutte impactant une surface froide. L'utilisation de la Fluorescence Induite par Laser permet d'obtenir des informations sur l'évolution du front de solidification horizontal dans une goutte au cours du temps. Une reconstruction d'images couplant deux caméras (vue de côté et vue par-dessus) permet de tenir compte de la déformation de la goutte durant sa solidification. Ces mesures permettent de valider les hypothèses de front de solidification sphérique.

Mots-clés : Impact ; Fluorescence Induite par Laser ; Solidification ; Expérimental ; Simulation.

Abstract - An experimental setup is implemented in order to study the solidification of a drop impinging a cold substrate. The use of the Laser Induced Fluorescence provides information on the evolution of the horizontal solidification front in a drop over time. A reconstruction of images linking two cameras (side view and top view) allows taking into account the deformation of the drop during its solidification. These measurements allow validation of spherical solidification front assumptions

Keywords: Impact; Laser Induced fluorescence; Solidification; Experimental; Simulation.

Nomenclature

c	Concentration, mol.L ⁻¹	σ	tension superficielle, N.m ⁻¹
F	Facteur de transformation	λ	Longueur d'onde, m
h	Hauteur, m	ϕ	rendement de fluorescence
I_f	Intensité de fluorescence		
k	conductivité thermique, W.m ⁻¹ .K ⁻¹		
R	Rayon, m		
t	Temps, s		
T	Température, °C		
u	Vitesse, m.s ⁻¹		
V	Volume, m ³		

Symboles grecs

ρ Masse volumique, kg.m⁻³

Indices et exposants

m Fusion

L Liquide

I Glace

s substrat

cw Parois froide

Nombre adimensionnelle

We Nombre de Weber

1. Introduction

Pendant leur vol, les avions peuvent rencontrer des conditions de givrage pouvant engendrer de graves dangers. Les conditions de givrage sont caractérisées par la présence d'eau sur fondue responsable de l'accumulation de glace sur les surfaces des avions réduisant ainsi les performances de vol [1]. Il est indispensable de comprendre les mécanismes de solidification d'une goutte [2][3][4] [5], afin de concevoir des surfaces pouvant réduire les effets du givrage.

2. Étude expérimentale

Cette section décrit l'approche expérimentale mise en œuvre pour reconstruire l'évolution du front de glace à l'intérieur d'une goutte impactant une surface solide sous-refroidie. La méthode de mesure repose sur la Fluorescence Induite par Laser (LIF). Le principe de la LIF consiste à dissoudre un colorant fluorescent dans l'eau. De récentes recherches [6] ont mis en évidence que la fluorescence en phase liquide est supérieure à celle en phase solide. Le signal de fluorescence en phase solide est donc négligeable devant celui en phase liquide. En conséquence, une mesure de la dynamique de solidification est possible.

2.1. Dispositif expérimental

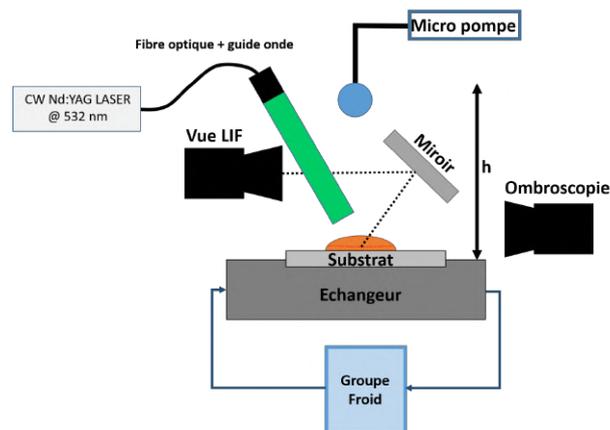


Figure 1 : Dispositif expérimental

Une goutte impacte une surface froide dont la température est contrôlée à l'aide d'un échangeur. Dans cet article, seuls des impacts sur une surface en duralumin seront présentés, même si la nature de cette dernière peut être modifiée afin d'observer l'effet de la surface sur le phénomène de solidification. Les propriétés thermique du duralumin ainsi que de l'eau sont présentées dans le Tableau 2.1.

	ρ [$kg.m^{-3}$]	k [$W.m^{-1}.K^{-1}$]	C_p [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]	D [$m^2.s^{-1}$]	e [$J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$]
Duralumin	2700	145	897	$0,6 \times 10^{-5}$	$1,9 \times 10^4$
Eau (20 °C)	1000	0,6	4180	$1,5 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^3$
Glace (0 °C)	917	2.2	2050	$1,2 \times 10^{-6}$	2×10^3

Tableau 2.1 : Propriétés thermophysique des substrats et de l'eau

Comme décrit en Figure 1, la goutte (diamètre $2,6 \text{ mm}$) se détache d'une seringue de $400 \mu\text{m}$ de diamètre lorsque la tension de surface qui la maintient au contact de la paroi ne permet plus de compenser son poids. Le détachement se produit donc pour un diamètre de goutte de $2,6 \text{ mm}$. La vitesse d'impact (u) de la goutte en chute libre dans l'air augmente avec la distance h_{chute} entre le substrat et la seringue. Ce qui rend possible un contrôle de la dynamique d'impact. La température de surface du substrat est régulée à l'aide d'un système de refroidissement. Un liquide réfrigérant circule en circuit fermé à l'intérieur d'un support en aluminium sur lequel est posé le substrat. Une mesure de température de surface du substrat est réalisée avant chaque impact afin de s'assurer que cette dernière est stable. L'étude est réalisée dans un environnement non contrôlé en humidité. La conséquence est la présence d'une fine couche de glace avant chaque impact. La présence de givre permet également une grande répétabilité du phénomène étudié. Un laser continue vert ($\lambda = 532 \text{ nm}$, Ventus LaserQuantum) est utilisé pour l'excitation de traceurs fluorescents. Un guide d'onde, consistant en un ensemble de fibres optiques, est utilisé pour l'illumination de la goutte. Une caméra rapide (Phantom V710) et un miroir placé au-dessus de la goutte permettent de réaliser une vue par-dessus lors de la dynamique d'impact et de solidification de la goutte.

Observation directe de la solidification d'une goutte

Une caméra rapide placée sur le côté permet de suivre l'évolution de la goutte pendant l'impact durant la phase de solidification. La Figure 2 présente des images d'ombroscopie avec une vue de côté de l'impact d'une goutte. La température de la goutte est de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ et la surface en duralumin est à une température de $-9,4 \text{ }^\circ\text{C}$. L'impact se fait à un Weber de $We = 65 = (\rho u^2 \nu) / \sigma$. On constate que la goutte reste figée à son étalement maximal. La masse volumique de la glace étant inférieure à celle de l'eau liquide, une augmentation du volume de la goutte est observée durant sa solidification.

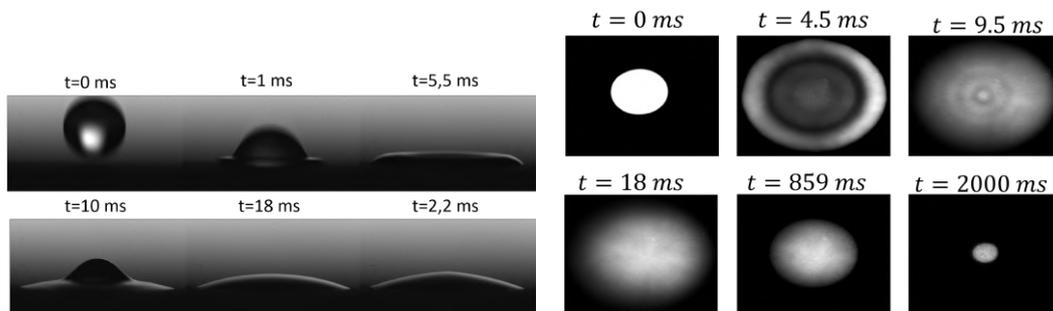


Figure 2 : Impact d'une goutte sur un substrat de duralumin à une température de $-9,4 \text{ }^\circ\text{C}$ et un We de 65. Gauche : Ombroscopie avec vue de cotée. Droite : Vue par LIF par-dessus

Observation de la solidification par LIF

L'objectif est ici d'utiliser la LIF pour obtenir un aperçu du processus de solidification à l'intérieur d'une goutte. La Figure 2 présente des images en fluorescence de l'impact d'une goutte dans les conditions décrites précédemment. Pendant la phase initiale d'étalement, des oscillations de fluorescence sont observées en raison des ondes de surface. À $t = 4.5 \text{ ms}$, le bourrelet au bord de la goutte peut clairement être observé (une reconstruction de ce dernier est aussi possible), ce qui n'était pas le cas par la vue de côté. Après la phase d'étalement, la goutte ayant adopté une forme d'équilibre, le champ de fluorescence devient uniforme. Le signal

de fluorescence décroît ensuite pendant la phase de solidification indiquant une diminution de l'épaisseur liquide. Afin d'obtenir des informations quantitatives sur la dynamique de front de solidification dans la goutte, différentes étapes de traitement d'images ont été mises en place. Le signal de fluorescence en phase solide est négligeable par rapport à celui en phase liquide [6] [7] (pas de signal dans la phase solide à partir de 18 *ms*). Il est donc possible d'envisager une mesure d'épaisseur liquide durant le processus de solidification. Il s'agit donc ici d'une mesure indirecte du front de glace et de sa dynamique au cours du temps.

2.2. Mesure d'épaisseur liquide par LIF

La fluorescence de la partie solide étant négligeable devant celle de la partie liquide, une mesure d'épaisseur liquide est possible durant la solidification d'une goutte d'eau. À partir de la mesure d'épaisseur liquide, il est possible de manière indirecte de remonter à la dynamique de front de glace dans la goutte. Le but est donc d'utiliser des mesures de LIF pour obtenir des informations sur la dynamique de solidification d'une goutte impactant une surface sous-refroidie. La molécule fluorescente est excitée par le laser et l'intensité résultante est mesurée. La Rhodamine 6G a été sélectionnée pour cette étude, car son signal de fluorescence ne dépend pas de la température lorsqu'elle est excitée à 532 *nm* [8]. Par conséquent, la reconstruction du front de glace ne sera pas affectée par une variation de température comme cela aurait pu être le cas pour d'autres colorants. Le rendement quantique de fluorescence de la Rhodamine 6G (environ 0,95 [9]) ainsi que sa grande absorption à 532 *nm*, nous ont orienté vers le choix de cette molécule pour optimiser la collection du signal de fluorescence. La détection du signal se fait à l'aide d'un filtre passe-haut à 542 *nm*, permettant ainsi de maximiser la collection du signal non réabsorbé et de retirer la participation du laser. La haute solubilité de ce colorant dans l'eau, nous permet de faire l'hypothèse que le phénomène de thermophorèse est négligeable [10]. Il est donc possible de faire l'hypothèse que la concentration en colorant est constante au cours du temps dans les deux phases (liquide et solide). Localement, dans la goutte, le signal de fluorescence émit par les molécules peut être défini tel que :

$$dF(M) = I_0(M)\phi\epsilon C dV \frac{d\omega}{4\pi} \quad (1)$$

Avec I_0 le champ local d'excitation dans la goutte au point M , ϕ le rendement quantique de fluorescence, C la concentration en traceur fluorescent, ϵ le coefficient d'absorption molaire à la longueur d'onde du laser et dV un volume infinitésimal. Une partie du laser peut être absorbée par le traceur fluorescent ($\epsilon(\lambda = 532\text{nm}) = 12 \times 10^4 \text{ L/mol.cm}$). Dans cette étude, une concentration de $5 \times 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$ de Rhodamine 6G est utilisée. En utilisant cette concentration, une erreur maximale de 5% est générée par l'absorption du laser dans la goutte pour une hauteur de 1 *mm*. Une seconde erreur peut provenir du phénomène de réabsorption du signal de fluorescence. En effet, il existe des conflits spectraux avec la bande spectrale utilisée (chevauchement des spectres d'absorption et d'émission). Une erreur inférieure à 1% pour une hauteur de 1 *mm* peut être estimée. Le signal de fluorescence résultant a donc pour expression :

$$I_f = KI_0(x, y)\phi\epsilon CH \quad (2)$$

Avec, K une constante optique liée à la transmission du signal par l'optique de détection, et H la hauteur de la goutte. En désignant par $I_{f,ref}$ le niveau de signal de référence lorsque l'épaisseur du liquide est H_{ref} . h a donc pour expression :

$$H = H_{ref} \frac{I_f}{I_{f,ref}} \quad (3)$$

Ainsi, il est possible de déterminer l'épaisseur du liquide h à tout moment à condition d'avoir une référence au même endroit (même éclairage $I_0(x, y)$).

2.3. Mesure d'épaisseur liquide

Nous présenterons ici le post-traitement des images permettant la mesure d'épaisseur liquide dans une goutte. Les différentes étapes du post-traitement sont décrites en Figure 3 dans le cas d'une goutte impactant une surface en duralumin à 20 °C.

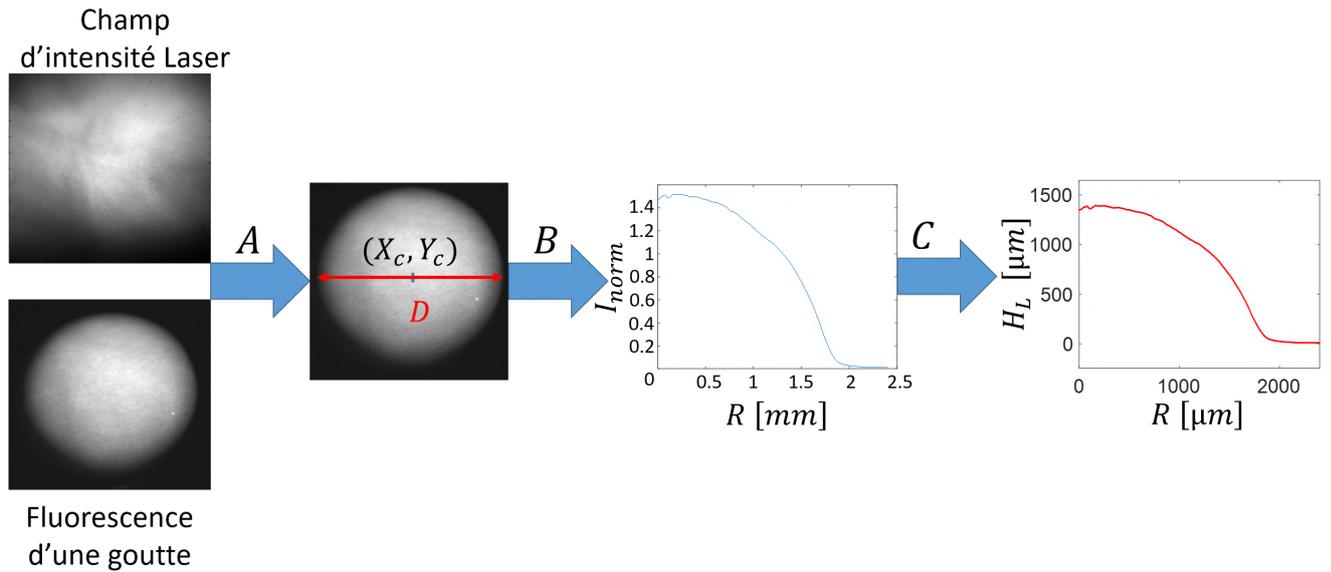


Figure 3 : Post-traitement des images

- A) L'intensité de fluorescence de la goutte est mesurée et soustrait du bruit. Il a été montré en Section 3 que l'intensité de fluorescence dépend du champ d'intensité laser. Une image du champ d'intensité laser est obtenue par la fluorescence d'une plaque de perplex. En calculant le rapport entre les deux images, nous obtenons alors une intensité de fluorescence dépendant simplement de l'épaisseur au cours du temps.
- B) Afin de maximiser le rapport signal/bruit, une moyenne axysymétrique à partir du centre de la goutte est calculée. Un signal de fluorescence en fonction du rayon est alors obtenu ($I_f(R)$).
- C) En connaissant le volume initial de la goutte (V_0), il est possible de calculer un facteur de transformation F permettant d'obtenir une épaisseur liquide en fonction du signal de fluorescence précédent.

$$F = \frac{\int_0^{+\infty} 2\pi R I_f dR}{V_0} \quad (4)$$

Une comparaison entre la mesure de hauteur liquide par LIF et par ombroscopie de côté est présentée en Figure 4. Un bon accord entre les deux vues est obtenu. L'erreur maximale pouvant être observée sur le bord de la goutte peut être attribuée à la réflexion diffuse de la goutte sur la plaque de duralumin.

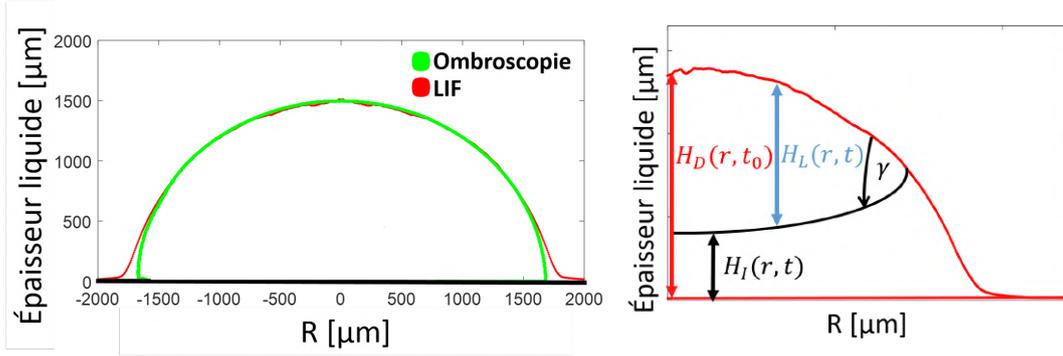


Figure 4 : Gauche : Comparaison de la mesure de hauteur par LIF (vue de dessus) et ombroscopie (vue de côté). Droite : Schéma solidification d'une goutte

2.4. Mesure de hauteur de glace

Deux différents types de reconstruction peuvent être mis en place, en prenant ou non en compte la variation de volume induit par le phénomène de solidification.

Avec volume fixe

Intéressons-nous maintenant à la méthode de mesure d'épaisseur de glace au cours du temps. Une goutte liquide à une température de +20 °C impact un substrat solide à une température inférieure à 0 °C. Le profil initial de la goutte (H_{goutte}) est mesuré à un instant t_0 lorsque la goutte est stable. Le calcul de l'épaisseur de glace (H_{glace}) en fonction du temps est ensuite déterminé à partir de la mesure d'épaisseur liquide au cours du temps :

$$H_{glace}(R, t) = H_{goutte}(R, t_0) - H_{liquide}(R, t) \quad (5)$$

La Figure 4 présente un schéma des grandeurs mesurées. Il convient de noter que le profil initial de la goutte est obtenu à un instant t_0 et n'est pas recalculé au cours du temps. Avec ce traitement d'images, la variation de volume de la goutte durant la solidification n'est pas prise en compte. Un exemple de la dynamique du front de solidification est présenté en Figure 5.

Prise en compte de la variation de volume

Des mesures d'ombroscopie sur le côté permettent d'obtenir des informations sur la variation de volume de la goutte. Il est maintenant possible en utilisant les mesures d'ombroscopie de corriger la forme de la goutte au cours du temps afin de prendre en compte la variation de volume. La hauteur de glace corrigée est alors :

$$H_{glace,corr}(R, t) = H_{goutte}(R, t) - H_{liquide}(R, t) \quad (6)$$

La Figure 5 présente un exemple de correction. Il peut être observé que dans le cas du front de glace corrigée, ce dernier apparaît plus sphérique que dans le cas non corrigé. La Figure 5 représente un exemple d'ajustement du front de solidification par un cercle équivalent à un instant donné. Cet ajustement permet une première validation de la sphéricité du front de solidification [2].

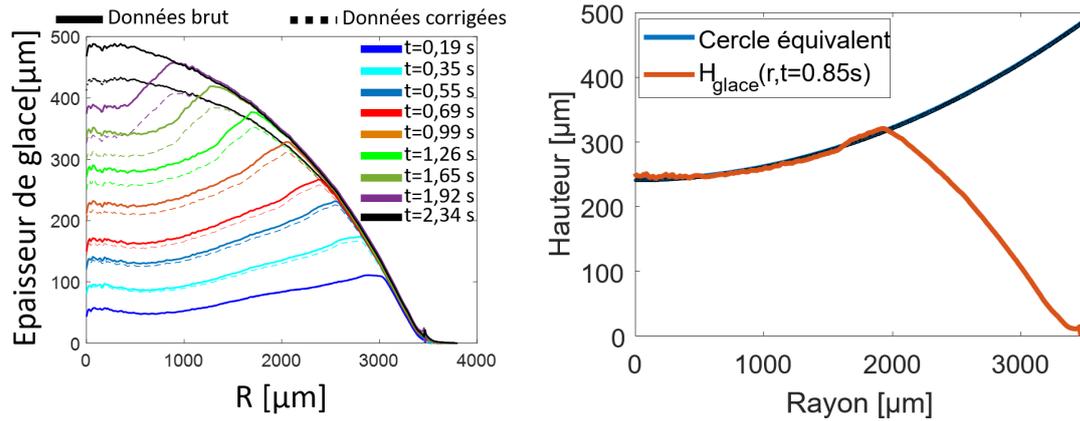


Figure 5 : Gauche : Comparaisons des fronts de glace obtenus en négligeant et en tenant compte de l'expansion de volume. Droite : Ajustement du front de glace par un cercle équivalent

3. Comparaison avec simulations numériques

Une comparaison des résultats avec des simulations numériques prenant en compte les échanges entre la goutte et le substrat est mis en place. Le modèle de Stefan est utilisé dans la goutte afin de résoudre le problème de solidification. La résolution couplée entre le fluide et le substrat permet de prendre en compte l'influence du substrat sur la dynamique du front de solidification. Le schéma de résolution est résumé en Figure 6. Il est possible de montrer que la dynamique du front peut se mettre sous la forme[5] :

$$X(t) = \sqrt{D_{eff}.t} \quad (7)$$

Avec $X(t)$ la position du front au cours du temps et D_{eff} la diffusivité effective prenant en compte les propriétés thermophysique du substrat, de l'eau liquide et de la glace. Numériquement, la résolution de la solidification d'une goutte est réalisée sans prise en compte de la variation de volume de celle-ci. La comparaison entre expériences et simulations numérique est donc réalisée sur les expériences non corrigées. La Figure 6 présente une comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour une goutte à 20 °C impactant une paroi en Duralumin à une température de $-9,4$ °C. Il est possible d'observer une bonne correspondance entre les résultats expérimentaux et numériques au centre de la goutte. Les profils de glace expérimentaux sont plus sphériques que les profils numériques.

4. Conclusion

Il est possible à partir de mesures de LIF de déterminer l'épaisseur liquide au cours du temps et ainsi de déterminer la dynamique de front de solidification. À l'aide de visualisation couplée, il est possible de prendre en compte la variation de volume de la goutte au cours de la solidification afin d'obtenir une conservation de la masse dans le traitement d'images. Il est donc possible à partir de mesures de LIF de déterminer la dynamique de solidification d'une goutte et de mettre en évidence la forme sphérique du front de glace. Ainsi, il serait intéressant dans la suite d'utiliser cette technique pour étudier l'effet de la surface sur la forme du front de glace.

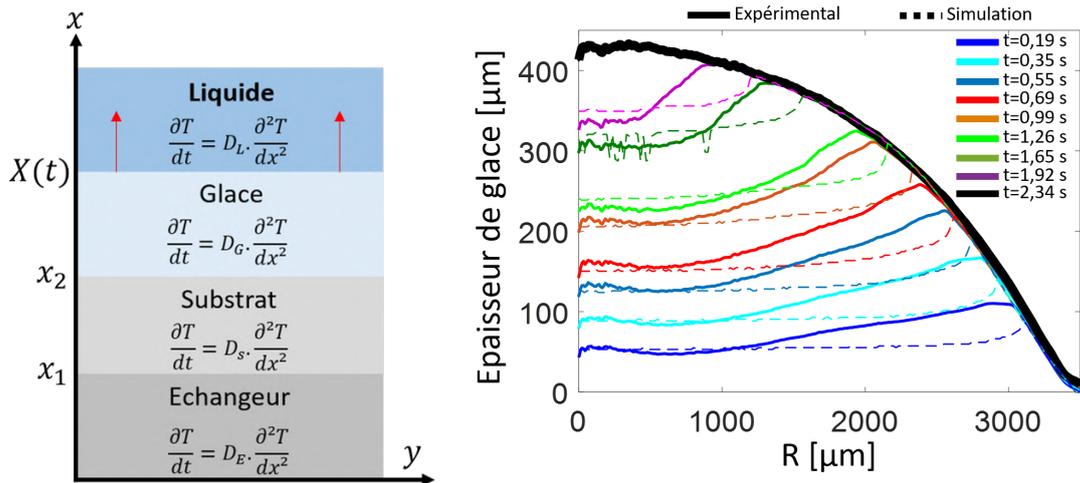


Figure 6 : Gauche : Schéma de résolution numérique. Droite : Comparaison entre front de solidification expérimentaux et numériques

Références

- [1] Cebeci, T; Kafyke, F. (2003) Aircraft icing.. *Annual Review Fluid Mechanics*, **35**(1), 11–23.
- [2] Marín, A. G., Enríquez, O. R., Brunet, P., Colinet, P., and Snoeijer, J. H. (2014) Universality of tip singularity formation in freezing water drops. *Physical Review Letters*, **113**(5), 1–5.
- [3] Hindmarsh, J. P., Sederman, A. J., Gladden, L. F., Wilson, D. I., and Johns, M. L. (2005) Rapid measurement of dispersion and velocity in freezing drops using magnetic resonance methods. *Experiments in Fluids*, **38**(6), 750–758. <https://doi.org/10.1007/s>, **38**(6), 750–758.
- [4] Schremb, M., Webert, T., and Tropea, C. (2017) Experimental Investigation of Supercooled Water Drops Impacting onto a Smooth Ice Surface : Interaction of Fluid Flow and Phase Change. *Proceedings of the 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, (June).
- [5] Thiévenaz, V., Seón, T., and Josserand, C. (2019) Solidification dynamics of an impacted drop. *Journal of Fluid Mechanics*, **874**(Jones 1996), 756–773.
- [6] Stiti, M., Labergue, A., Lemoine, F., Leclerc, S., and Stemmelen, D. (2019) Temperature measurement and state determination of supercooled droplets using laser-induced fluorescence. *Experiments in Fluids*, **60**(4), 1–13.
- [7] Shishkin, I., Alon, T., Dagan, R., and Ginzburg, P. (2016) Rhodamine B as a probe for phase transition in liquid solutions.
- [8] Chaze, W., Caballina, O., Castanet, G., and Lemoine, F. (2016) The saturation of the fluorescence and its consequences for laser-induced fluorescence thermometry in liquid flows. *Experiments in Fluids*, **57**(4).
- [9] Kubin, R. F. and Fletcher, A. N. (1982) Fluorescence quantum yields of some rhodamine dyes. *Journal of Luminescence*, **27**(4), 455–462.
- [10] Marcellini, M., Noirjean, C., Dedovets, D., Maria, J., and Deville, S. (2016) Time-Lapse, in Situ Imaging of Ice Crystal Growth Using Confocal Microscopy. *ACS Omega*, **1**(5), 1019–1026.