



Thesis proposal for a Doctoral position 2025-2028

Title	Droplet dynamics and solidification
Supervisor	Sebilleau Julien INP, ENSHEIT Julien.sebilleau@imft.fr
Second Supervisor	Stiti Mehdi CNRS Julien.sebilleau@imft.fr
Laboratory	IMFT

Research project description

The solidification of droplets plays a key role in various industrial applications, including additive manufacturing, metallurgy, aeronautics, microelectronics, and energy storage systems. This phenomenon is also crucial for addressing issues such as icing, which affects wind turbine energy efficiency, aviation safety, and the reliability of electrical grids. Droplet solidification, often occurring in motion or upon impact with a cold substrate, is a complex subject with multiple scientific challenges:

- **Droplet dynamics and coupled solidification:** The growth of the solid phase depends on droplet dynamics, which are influenced by velocity and diameter.
- **Supercooling:** Droplets can remain in a supercooled state before solidifying (i.e., remaining liquid at temperatures below the freezing point) in a random manner. This poorly understood phenomenon complicates modeling.
- **Solidification modes:** After nucleation, solidification follows different pathways (Figure 1). A solid shell may form on the surface, limiting heat exchange, or a solid nucleus may migrate internally due to vortices. These modes depend on the solid growth rate, internal flow, and mechanical constraints.
- **Impact on a solid substrate:** When a droplet spreads on a cold substrate, solidification and dynamic deformations interact. This can lead to complex configurations, such as the formation of a peak at the top of the droplet (Figure 1).

These phenomena involve multi-scale and unsteady processes, posing experimental and numerical challenges. Advances in numerical simulation provide promising tools, but obstacles remain, particularly in integrating supercooling and droplet interactions in sprays and emulsions. On the experimental side, several limitations hinder understanding:

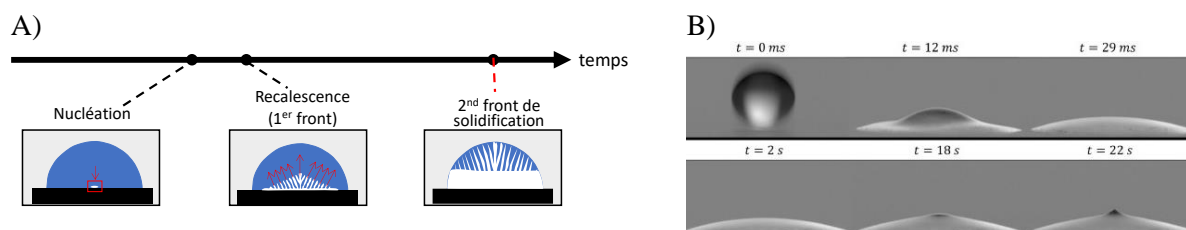
- **Optical distortions:** Refractive index differences between phases and the convexity of the solidification front disrupt internal droplet observations.
- **Heat and mass transfer measurements:** Precise measurements of temperature, solid fraction, and wall heat fluxes are rare.

- **Light diffusion:** In solids such as ice, the crystalline structure and air bubbles increase light scattering, complicating analysis.

Despite these challenges, developing tools to study these coupled processes remains crucial for better understanding droplet solidification and its industrial implications.

The primary objective of this PhD project is to develop innovative measurement techniques to overcome current obstacles in studying droplet solidification. To achieve this, **Laser-Induced Fluorescence (LIF)** will be implemented to measure temperature and ice fraction in supercooled water droplets, as well as to visualize the solidification front dynamics and reconstruct its geometry. **Two-color LIF imaging** will be developed to measure temperature and ice fraction during droplet solidification. Additionally, a **μ PIV (Micro-Particle Image Velocimetry)** method will be considered to study the velocity field within the droplet during solidification. Furthermore, **X-ray tomography** available at IMFT will be used to precisely determine the convexity of the solidification front. Finally, for droplets in contact with a cold substrate, **thermosensitive paints** will be developed to quantify heat transfer at the droplet/substrate interface. The development of these techniques will form the first part of the project.

The second part of the project will focus on the **experimental study of water droplet icing**, considering fundamental configurations: impact of isolated supercooled droplets, multiple droplet impacts, and droplet runoff on cold surfaces subjected to a tangential airflow. A novel database will be constructed using the developed quantitative measurement techniques. Thanks to these innovative measurement techniques and developed models, we aim to answer fundamental questions such as: **What is the significance of convective effects on mass and heat transfer when a droplet moves rapidly in cold air? What role does the internal flow induced by aerodynamic shear play in solidification speed? What are the different solidification regimes during impact on cold surfaces subjected to a shearing airflow?**



A) Different phases associated with the solidification of a supercooled droplet. B) Impact of a droplet ($We = 65$) on a supercooled substrate at a temperature of -10°C .

Références :

1. Lyu, S., Zhu, X., Legendre, D. & Sun, C. Liquid encapsulation in a freezing sessile drop. *Droplet 2*, e90 (2023).
2. Koldeweij, R. B. J. et al. Initial solidification dynamics of spreading droplets. *Phys. Rev. Fluids* 6, L121601 (2021).
3. Stiti, M. et al. Characterization of supercooled droplets in an icing wind tunnel using laser-induced fluorescence. *Exp. Fluids* 62, 169 (2021).
4. Stiti, M., Castanet, G., Labergue, A. & Lemoine, F. Icing of a droplet deposited onto a subcooled surface. *Int. J. Heat Mass Transf.* 159, 120116 (2020).
5. Karlsson, L., Ljung, A.-L. & Lundström, T. S. Comparing Internal Flow in Freezing and Evaporating Water Droplets Using PIV. *Water* 12, 1489 (2020).
6. Fontanarosa, D., Vodopivec, M., Zhu, Y., Koos, E. & Vetrano, M. R. Thermo-sensitive coatings for fast transient heat transfer. in (9th European Thermal Sciences Conference (Eurotherm 2024), 2024).



Proposition de sujet de thèse – Contrats Doctoraux MESRI 2025-2028

Titre du sujet	Dynamique des gouttes et solidification
Direction de thèse	Sebilleau Julien INP, ENSHEIT julien.sebilleau@imft.fr
Codirection de thèse	Stiti Mehdi CNRS mehdi.stiti@imft.fr
Laboratoire	IMFT

Description du sujet

La solidification des gouttes joue un rôle clé dans des applications industrielles variées, notamment la fabrication additive, la métallurgie, l'aéronautique, la microélectronique et les systèmes de stockage d'énergie. Ce phénomène est également crucial pour résoudre des problèmes comme le givrage, qui impacte l'efficacité énergétique des éoliennes, la sécurité aérienne et la fiabilité des réseaux électriques. La solidification des gouttes, souvent en mouvement ou lors d'un impact sur un substrat froid, est un sujet complexe marqué par plusieurs défis scientifiques :

- **Dynamique des gouttes et solidification couplée** : La croissance de la phase solide dépend de la dynamique des gouttes, influencée par leur vitesse et leur diamètre.
- **Surfusion** : Les gouttes peuvent rester surfondues avant de solidifier (goutte liquide pour des température inférieure à la température de solidification) de manière aléatoire. Ce phénomène, encore mal compris, complique la modélisation.
- **Modes de solidification** : Après la nucléation, la solidification suit différents chemins (Figure 1). Une coque solide peut se former en surface, limitant les échanges thermiques, ou un noyau solide¹ peut migrer à l'intérieur sous l'effet des tourbillons². Ces modes dépendent de la vitesse de croissance du solide, des flux internes et des contraintes mécaniques.
- **Impact sur substrat solide** : Lorsqu'une goutte s'étale sur un substrat froid, la solidification et les déformations dynamiques interagissent. Cela peut aboutir à des configurations complexes, comme la formation d'une pointe au sommet de la goutte (Figure 1).

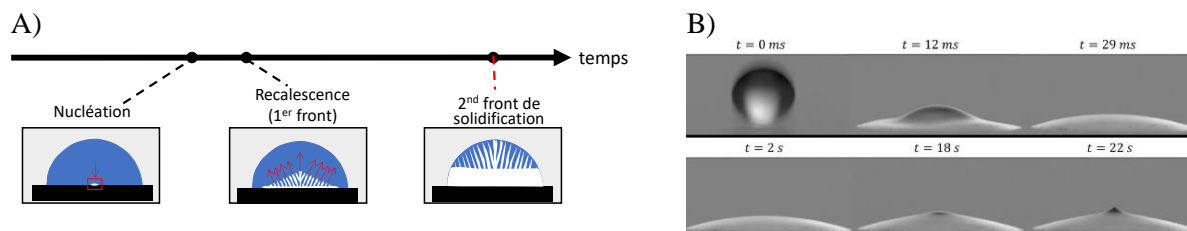
Ces phénomènes impliquent des processus multi-échelles et instationnaires, posant des défis expérimentaux et numériques. Les avancées en simulation numérique offrent des outils prometteurs, mais des obstacles demeurent, notamment pour intégrer la surfusion et les interactions entre gouttes dans les sprays et émulsions. Sur le plan expérimental, plusieurs limites freinent la compréhension :

- **Distorsions optiques** : Les différences d'indice de réfraction entre phases et la convexité du front solide perturbent les observations internes des gouttes.
- **Transferts de chaleur et de masse** : Les mesures précises de température, de fraction solide et des flux thermiques pariétaux sont rares.

- **Diffusion lumineuse** : Dans les solides comme la glace, la structure cristalline et les bulles d'air augmentent la diffusion de la lumière, compliquant l'analyse.

Malgré ces défis, développer des outils pour étudier ces processus couplés reste crucial pour mieux comprendre la solidification des gouttes et ses implications industrielles. Le principal objectif de cette thèse est de *développer des techniques de mesure innovantes* qui permettront de surmonter les principaux obstacles actuels à *l'étude de la solidification des gouttes*. Pour cela, la technique de Fluorescence Induite par Laser (LIF) pour mesurer la température, la fraction de glace dans des gouttes d'eau surfondue³, ainsi que pour visualiser la dynamique du front de solidification et reconstruire sa géométrie⁴ sera mis en œuvre. Nous développerons l'imagerie LIF deux couleurs³ pour mesurer la température et la fraction de glace lors de la solidification de gouttes. Il sera envisagé de développer une méthode de μ PIV pour étudier le champ de vitesse dans la goutte en cours de solidification⁵. De plus, La tomographie à rayon X disponible à l'IMFT pourra être mise en œuvre pour déterminer précisément la convexité du front de solidification. Enfin, Pour les gouttes en contact avec un substrat froid, nous développeront des peintures thermosensibles⁶, afin de quantifier les transferts de chaleur à l'interface goutte/substrat. Le développement de ces techniques constituera le premier volet du projet.

Le second volet du projet sera consacré à l'étude expérimentale du givrage de gouttelettes d'eau, en considérant des configurations fondamentales : l'impact de gouttes isolées surfondues, les impacts de gouttes multiples, puis le ruissellement de gouttes sur des surfaces froides soumises à un flux d'air tangentiel. Une base de données inédite sera construite à l'aide des techniques mesures quantitatives développées. Grâce à des techniques de mesure innovantes et des modèles développés, nous devrions pouvoir répondre à des questions fondamentales telles que : *quelle est l'importance des effets convectifs sur les transferts de masse et de chaleur quand une goutte se déplace rapidement dans l'air froid ? Quel rôle jouent l'écoulement interne engendré par le cisaillement aérodynamique sur la vitesse de solidification ? Quels sont les différents régimes de solidification lors d'un impact sur des surfaces froides soumises à un flux d'air cisailant ?*



A) Différentes phases associées à la solidification d'une goutte surfondue. B) Impact d'une goutte ($We=65$) sur un substrat sous-refroidi à une température de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Références :

1. Lyu, S., Zhu, X., Legendre, D. & Sun, C. Liquid encapsulation in a freezing sessile drop. *Droplet 2*, e90 (2023).
2. Koldewij, R. B. J. et al. Initial solidification dynamics of spreading droplets. *Phys. Rev. Fluids* 6, L121601 (2021).
3. Stiti, M. et al. Characterization of supercooled droplets in an icing wind tunnel using laser-induced fluorescence. *Exp. Fluids* 62, 169 (2021).
4. Stiti, M., Castanet, G., Labergue, A. & Lemoine, F. Icing of a droplet deposited onto a subcooled surface. *Int. J. Heat Mass Transf.* 159, 120116 (2020).
5. Karlsson, L., Ljung, A.-L. & Lundström, T. S. Comparing Internal Flow in Freezing and Evaporating Water Droplets Using PIV. *Water* 12, 1489 (2020).
6. Fontanarosa, D., Vodopivec, M., Zhu, Y., Koos, E. & Vetrano, M. R. Thermo-sensitive coatings for fast transient heat transfer. in (9th European Thermal Sciences Conference (Eurotherm 2024), 2024).