

Influence de l'inclinaison de surface sur l'ablation d'un solide soumis à un jet de liquide chaud

Asma DJERMOUNE^{1,2,*}, Alexandre LECOANET², Nathalie SEILER², Nicolas Rimbart¹, Michel Gradeck¹

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

² CEA, DES, IRESNE, DTN, SMTA, Cadarache, F13108, Saint-Paul-Lez-Durance, France

*(auteur correspondant : asma.djermoune@univ-lorraine.fr)

Résumé - Cette étude expérimentale analyse l'influence de l'inclinaison d'une surface solide sur l'ablation induite par l'impact d'un jet d'eau à surface libre. Des essais menés sur un bloc de glace pour différentes vitesses, températures et angles d'inclinaison mettent en évidence trois régimes d'ablation : film, transition et piscine. L'augmentation de l'inclinaison accélère la transition vers le régime de piscine, tout en retardant le remplissage complet de la cavité en raison d'un drainage en aval. Malgré ces modifications hydrodynamiques, la vitesse d'ablation au point de stagnation demeure quasi constante pour des inclinaisons $\geq 20^\circ$, tandis qu'une diminution est observée à 0° et 10° en régime de piscine.

Nomenclature

D_j	Diamètre du jet (m)	y_0	Profondeur de la cavité (m)
H	Hauteur entre la buse et le solide (m)	ΔT	Écart de température, $T_j - T_s$ ($^\circ\text{C}$)
r	Rayon de la cavité (m)	θ	Angle d'inclinaison ($^\circ$)
t	Temps (s)	t_{pe}	Temps de début de transition vers le régime de piscine
T_j	Température du jet ($^\circ\text{C}$)	$t_{end_{pe}}$	Temps de fin de transition vers le régime de piscine
V_j	Vitesse du jet à la sortie de la buse (m.s^{-1})		
V_{abl}	Vitesse d'ablation		

1. Introduction

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la mitigation des accidents graves avec fusion du cœur dans les réacteurs nucléaires à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) de quatrième génération. Lors d'un tel accident, la fusion du cœur conduit à la formation d'un mélange radioactif à haute température, appelé « *corium* ».

Afin de limiter les conséquences d'un tel accident, deux dispositifs de sûreté peuvent être intégrés dans les nouveaux RNR-Na : des « *tubes de déchargement* », destinés à transférer le corium vers la partie inférieure de la cuve, et un « *récupérateur de corium* », conçu pour le recevoir et assurer son refroidissement à long terme [1, 2, 3]. Toutefois, cette architecture soulève une autre problématique de sûreté, car le corium atteignant ainsi le récupérateur sous la forme d'un jet à très haute température ($\approx 3000\text{ K}$) est susceptible d'entraîner une ablation locale, voire un percement. Ce risque est principalement lié au fort gradient thermique entre le jet de corium et le matériau utilisé pour le récupérateur.

La prise en compte de ce risque est essentielle pour garantir l'intégrité du récupérateur lors de la phase de relocalisation. L'intensité de l'ablation dépend notamment de la température et de la composition du corium, en particulier de sa nature métallique ou oxyde.

Plusieurs auteurs ont investigué l'ablation thermique d'un solide par un jet liquide de même nature afin de mieux comprendre les mécanismes physiques et les transferts thermiques [4, 5, 6]. Saito *et al.* [7] ont notamment observé deux régimes d'ablation : un régime de film et un régime

de piscine, ce dernier apparaissant lorsque la cavité est remplie de liquide. Ces régimes ont depuis été confirmés par d'autres travaux [5].

Dans le cadre du projet ESFR-SIMPLE, l'un des objectifs est d'identifier des solutions permettant de protéger le récupérateur de corium [8]. Parmi les stratégies envisagées figurent des *plots sacrificiels* qui, placés sous les tubes de déchargement, pourraient être inclinés afin de limiter l'ablation. L'étude de l'effet de l'inclinaison sur l'ablation sous l'impact d'un jet apparaît ainsi essentielle pour la conception de ces dispositifs.

L'influence de l'inclinaison sur les transferts thermiques a été étudiée. Baghel *et al.* [9] ont montré que le maximum de transfert ne coïncide pas nécessairement avec le point de stagnation en raison des effets de cisaillement et de turbulence. Beitelmal *et al.* [10] ont démontré que l'angle d'impact modifie significativement la distribution locale du nombre de Nusselt. Plus récemment, Talapati *et al.* [11] ont observé qu'une inclinaison accrue entre l'axe du jet et la normale à la surface cible renforce l'asymétrie du champ thermique et déplace la zone de transfert maximal. Ces travaux identifient ainsi l'angle d'impact comme un paramètre clé du transfert thermique.

2. Matériel et méthodes

Afin de mieux comprendre les mécanismes locaux de transfert thermique et de fusion dans cette configuration, une méthodologie de recherche basée sur l'utilisation de matériaux simulants a été développée [12]. Le dispositif expérimental HAnSoLO (Hot Ablation of a Solid by a Liquid – Observation), conçu par Lecoanet *et al.* [5], permet d'étudier l'ablation d'un bloc de glace sous l'impact d'un jet d'eau chaude à surface libre. Ce système vise à reproduire une phénoménologie représentative de l'ablation d'un récupérateur métallique par un jet issu de la phase métallique du corium [12].

Des expériences menées avec le dispositif HAnSoLO, basé sur le couple eau/glace, ont permis d'observer en temps réel l'évolution de l'ablation. Elles confirment l'existence des deux régimes rapportés dans la littérature, film et piscine, dont la transition dépend principalement de la température et de la vitesse du jet. Un schéma simplifié du dispositif est présenté en Figure 1.

Une matrice expérimentale, inspirée des travaux de Lecoanet [5] et Avrit [6], a été élaborée pour d'étudier l'influence des paramètres du jet et de l'inclinaison de la surface (θ) sur la dynamique d'ablation. Dans le dispositif HAnSoLO, l'inclinaison correspond à l'angle entre l'axe horizontal et la surface d'impact (Figure 1). Les expériences ont été enregistrées à l'aide d'une caméra rapide fonctionnant à une cadence de 30 images par seconde, avec un temps d'ouverture (temps d'exposition) de 1,07 ms.

3. Résultats expérimentaux d'ablation d'une surface inclinée

3.1. Régimes d'ablation

Lors des expériences menées, les régimes d'ablation précédemment rapportés dans la littérature ont également été observés pour différents angles d'inclinaison. Par ailleurs, en plus du régime de film, et du régime de piscine, un nouveau régime intermédiaire a été identifié. Lorsque le jet impacte la surface, la cavité atteint une certaine profondeur et le liquide commence à s'accumuler dans la partie amont de la cavité. Cependant, la cavité n'est pas entièrement remplie. L'eau peut encore s'écouler par la partie aval de la cavité. La figure 2 montre l'accumulation

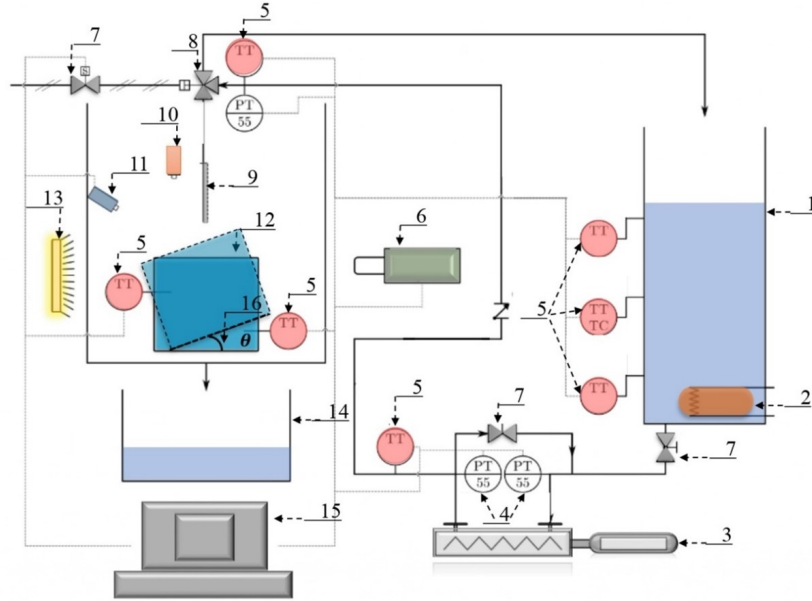


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental. 1. Réservoir d'eau; 2. Thermoplongeur; 3. Pompe; 4. Transmetteurs de pression; 5. Thermocouples; 6. Caméra rapide; 7. Vanne; 8. Vanne trois voies pneumatique; 9. Buse; 10. Caméra infrarouge; 11. Go Pro Caméra conventionnelle; 12. Bloc de glace; 13. Éclairage; 14. Cuve de rétention; 15. Pc de contrôle et d'acquisition; 16. Angle d'inclinaison. [13]

de liquide du côté amont et l'écoulement du côté aval de la cavité pendant la transition vers le régime de piscine pour une expérience avec un angle $\theta = 30^\circ$. Ce régime représente la transition vers le régime de piscine.

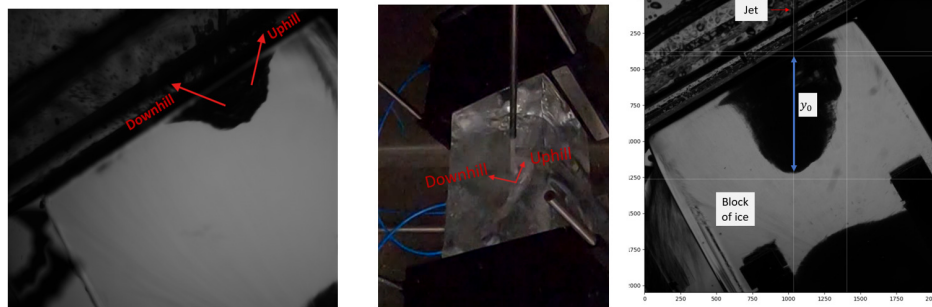


Figure 2 : À gauche : image de la cavité capturée par la caméra rapide ($\theta = 30^\circ$). Au centre : image de la cavité prise par la gopro au même instant. Les flèches rouges indiquent l'accumulation en amont et le drainage en aval. À droite : illustration de la définition de y_0 . [13]

Les graphes de la Figure 3 illustrent l'évolution de la profondeur ablatée au point de stagnation ($r = 0$), désignée y_0 , telle que définie dans la figure 2, en fonction du temps t , pour des expériences réalisées avec une vitesse de jet $V_j = 5 \text{ m/s}$, une température de jet $T_j = 50^\circ\text{C}$, et différents angles d'inclinaison de la surface impactée ($\theta = \{10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 45^\circ\}$). La Figure 3 indique également t_{pe} , le temps de début de la transition vers le régime de piscine, ainsi que t_{endpe} , l'instant auquel la transition se termine et le régime de piscine est atteint. Ces instants sont déterminés visuellement par l'analyse des vidéos enregistrées par la caméra conventionnelle.

L'analyse des résultats de la figure 3 montre que, lorsque l'angle d'inclinaison augmente, la transition vers le régime de piscine (cercles verts) se produit plus rapidement, comme le montrent les courbes bleues de la figure 4. Une hypothèse possible est qu'avec l'augmentation de l'inclinaison, la paroi amont de la cavité agit comme une barrière, empêchant l'eau de s'échapper de ce côté. Une inclinaison plus forte entraîne une élévation plus marquée de la paroi amont par rapport à l'horizontale, limitant davantage l'évacuation de l'eau de ce côté. Ce qui peut expliquer pourquoi la transition vers le régime de piscine intervient plus tôt lorsque l'angle d'inclinaison augmente.

Cependant, bien que la transition débute plus tôt, la cavité ne se remplit pas immédiatement d'eau. Le temps nécessaire pour atteindre un remplissage complet (triangles orange) augmente significativement avec l'angle d'inclinaison, comme le montrent les courbes rouges de la figure 4. Cette augmentation s'explique par le fait que la paroi aval de la cavité est plus basse que l'horizontale, ce qui facilite l'évacuation du liquide de ce côté, sous l'effet de la gravité. Ce drainage progressif empêche ainsi le remplissage immédiat de la cavité. Cela explique le régime intermédiaire qui correspond à la transition vers le régime de piscine.

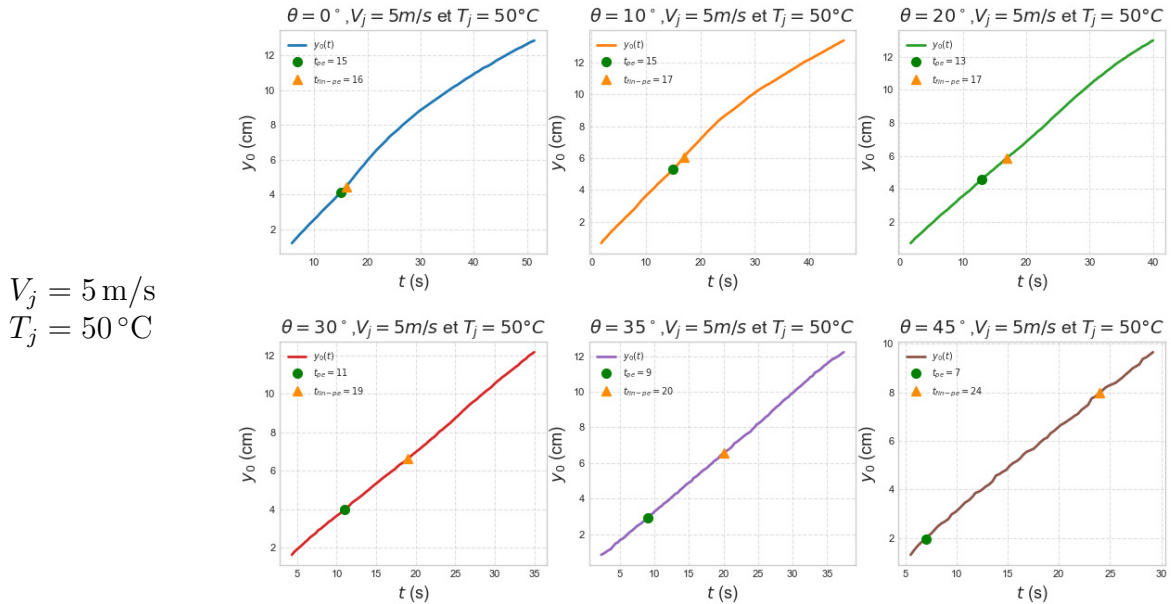


Figure 3 : Exemples d'évolution temporelle de la profondeur de cavité (y_0) pour $V_j = 5 \text{ m/s}$. Les cercles verts et triangles orange indiquent respectivement le début de la transition vers le régime de piscine (t_{pe}) et le remplissage complet de la cavité (t_{endpe}), identifiés à partir des vidéos [13].

3.2. Effet de l'inclinaison sur la vitesse d'ablation au point de stagnation

Les résultats présentés à la Figure 5, illustrant l'évolution de la profondeur de la cavité le long de l'axe du jet (voir Figure 2), permettent d'analyser la dynamique d'ablation pour différentes inclinaisons de surface. Selon la littérature, lors de l'impact d'un jet sur une surface plane en régime de film, la vitesse d'ablation demeure constante [12, 4, 5, 7, 14, 15]. Cela a également été confirmé dans le cas de l'impact d'un jet sur une surface inclinée lors de nos expériences. La relation simplifiée $y_0(t) = V_{abl} \cdot t$ est alors utilisée, où V_{abl} correspond à la pente de la courbe $y_0(t)$, permettant d'estimer directement la vitesse d'ablation à partir des données expérimentales.

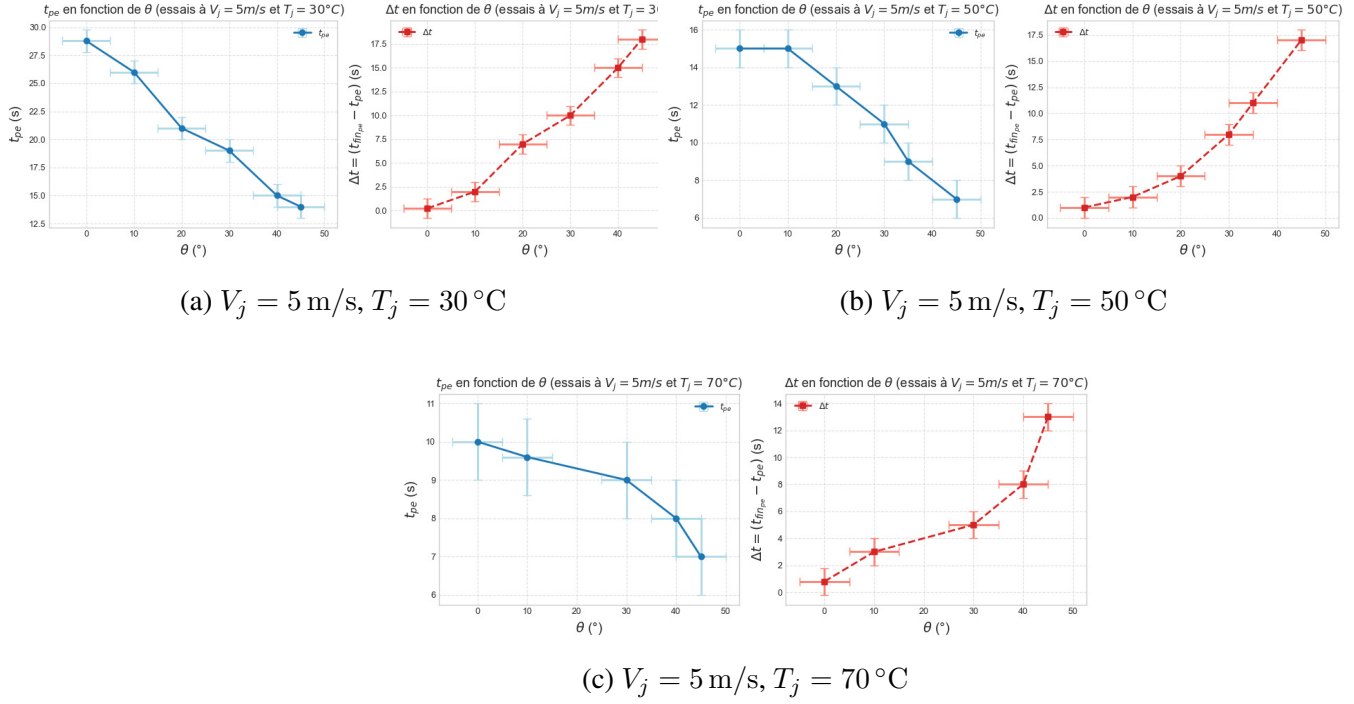


Figure 4 : Temps de transition vers le régime de piscine (t_{pe}) et durée de transition (Δt), définie par $\Delta t = t_{end,pe} - t_{pe}$, en fonction de l'angle d'inclinaison [?].

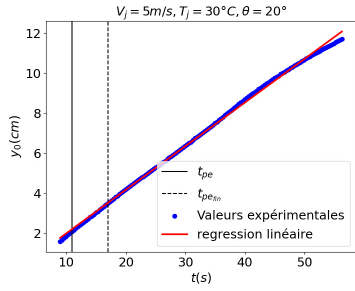
En régime de piscine, la vitesse d'ablation diminue généralement en raison du remplissage de la cavité, qui modifie les transferts thermiques et limite l'évacuation du liquide fondu. Toutefois, pour une surface inclinée, la vitesse d'ablation au point de stagnation reste globalement constante au cours des trois régimes identifiés (film, transition et piscine) (Figure 6a). Une déviation des courbes apparaît néanmoins en fin de régime de piscine pour les inclinaisons de 20° et 30° , suggérant que l'augmentation de l'angle retarde l'établissement complet de ce régime. À 45° , bien que le régime de piscine soit atteint, la durée de l'essai ne permet probablement pas d'observer la diminution de vitesse typique. Ces observations mettent ainsi en évidence l'influence de l'inclinaison sur la dynamique du régime de piscine, à travers une modification des temps caractéristiques associés à son établissement.

L'analyse des courbes de profondeur au point de stagnation (Figure 6a) montre qu'à partir de $\theta = 20^\circ$, l'évolution de la cavité est quasi linéaire, indiquant une vitesse d'ablation quasi constante durant les trois régimes. Cette tendance est confirmée par une régression linéaire appliquée à l'ensemble des données. En revanche, pour 0° et 10° , une diminution de la vitesse est observée en régime de piscine (Figure 6a).

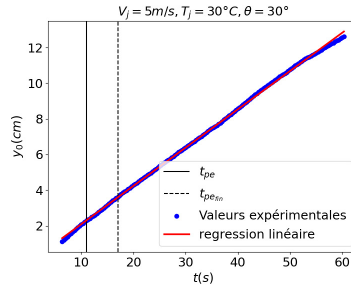
3.3. Effet de l'inclinaison sur la vitesse d'ablation en amont et en aval

La Figure 6b présente l'évolution de la profondeur de cavité mesurée en amont du point d'impact ($+2D_j$), en aval du point d'impact ($-2D_j$) et au point de stagnation pour une expérience réalisée à $V_j = 5$ m/s, $T_j = 50^\circ\text{C}$ et $\theta = 40^\circ$. Une asymétrie marquée est observée, caractérisée par une ablation plus rapide en amont que dans la région aval.

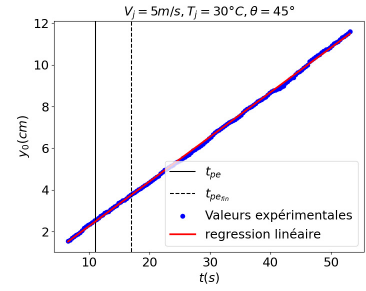
Ce comportement est cohérent avec la littérature relative aux jets inclinés, qui met en évidence une redistribution asymétrique du champ de vitesse et des transferts thermiques [10, 16].



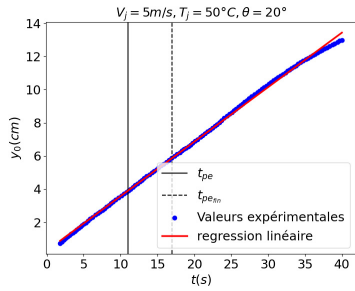
(a) $\theta = 20^\circ$, $T_j = 30^\circ\text{C}$



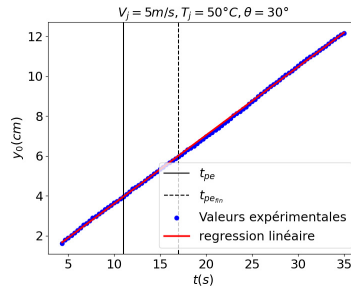
(b) $\theta = 30^\circ$, $T_j = 30^\circ\text{C}$



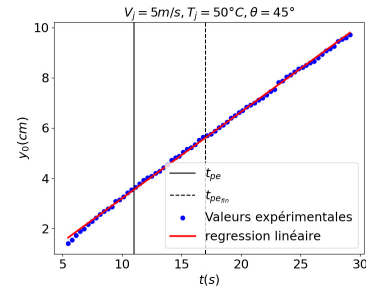
(c) $\theta = 45^\circ$, $T_j = 30^\circ\text{C}$



(d) $\theta = 20^\circ$, $T_j = 50^\circ\text{C}$

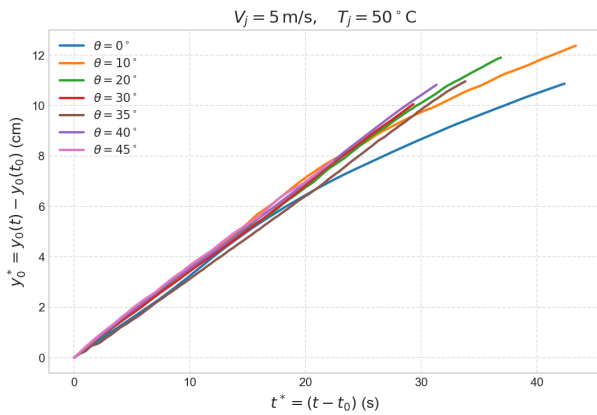


(e) $\theta = 30^\circ$, $T_j = 50^\circ\text{C}$

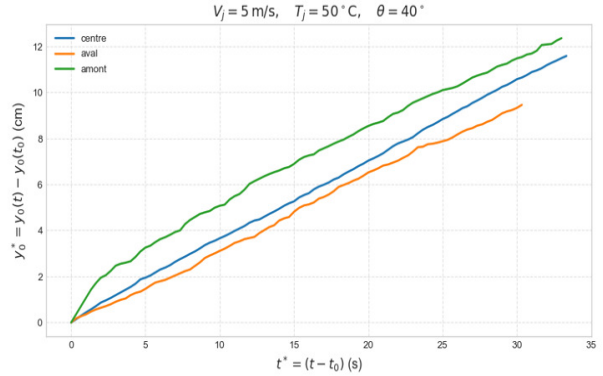


(f) $\theta = 45^\circ$, $T_j = 50^\circ\text{C}$

Figure 5 : Régression linéaire sur les courbes $y_0(t)$ pour $V_j = 5 \text{ m/s}$, et $T_j \in \{30^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}\}$, avec inclinaisons $\theta \in \{20^\circ, 30^\circ, 45^\circ\}$.



(a) Évolution de la profondeur de cavité en fonction du temps. Les données sont issues d'expériences réalisées avec une vitesse de jet $V_j = 5 \text{ m/s}$, une température de jet $T_j = 50^\circ\text{C}$, et différents angles d'inclinaison de la surface impactée (θ).



(b) Évolution de la profondeur de cavité en fonction du temps, mesurée en aval ($+2D_j$), en amont ($-2D_j$) et au point de stagnation, pour une expérience réalisée avec $V_j = 5 \text{ m/s}$, $T_j = 50^\circ\text{C}$ et $\theta = 40^\circ$.

Figure 6 : Évolution de la profondeur de la cavité en fonction du temps

Par ailleurs, l'asymétrie de l'écoulement favorise le développement de structures turbulentes et intensifie le mélange thermique dans la zone amont, ce qui contribue à augmenter la convection locale. Une telle redistribution des mécanismes de transfert fournit une explication plausible de l'accélération de la vitesse d'ablation observée expérimentalement. Ces résultats mettent ainsi en évidence le rôle de l'inclinaison dans la structuration des transferts thermiques.

4. Conclusions

Ce travail présente une investigation expérimentale de l'impact d'un jet liquide à surface libre sur une surface inclinée. Différents angles d'inclinaison ont été étudiés.

Les expériences réalisées mettent en évidence les deux régimes d'ablation classiquement décrits dans la littérature : (i) le régime de film, durant lequel l'eau s'écoule librement hors de la cavité, et (ii) le régime de piscine, correspondant au remplissage complet de cette dernière. Un régime intermédiaire de transition a également été observé. Dans ce régime, l'eau commence à s'accumuler dans la partie amont de la cavité alors que la partie aval permet encore l'évacuation du liquide. La cavité n'est donc pas totalement remplie, mais l'écoulement devient progressivement contraint.

L'effet de l'inclinaison sur cette dynamique est notable. Une augmentation de l'angle d'impact accélère l'entrée dans le régime de transition, car l'obstruction de la partie amont limite l'évacuation du liquide. Toutefois, même si la transition apparaît plus tôt, le passage complet au régime de piscine est plus long lorsque l'inclinaison augmente : le remplissage global de la cavité est ainsi retardé pour des angles plus élevés. Une étude approfondie sera menée par la suite afin de comprendre les phénomènes physique qui gouvernent.

Références

- [1] François Gauché. Generation IV reactors and the ASTRID prototype : Lessons from the fukushima accident. *Comptes Rendus Physique*, 13(4) :365–371, 2012.
- [2] F. Payot, C. Journeau, C. Suteau, F. Serre, M. Gradeck, N. Rimbart, A. Lecoanet, and A. Miassoedov. A new experimental R&D program associated with the corium jet impingement on the ASTRID core catcher sacrificial material. In *Proceedings of the 18th International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 18)*, Charlotte, United States, April (2018).
- [3] F. Serre, F. Payot, C. Suteau, L. Trotignon, E. Batyrbekov, A. Vurim, A. Pakhnits, V. Vityuk, S. Kubo, A. Katoh, Y. Tobita, K. Kamiyama, K. Matsuba, and J. Toyooka. R&D and experimental programs to support the ASTRID core assessment in severe accidents conditions. In *Proceedings of the 16th International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 16)*, San Francisco, United States, April (2016).
- [4] K Sato, A Furutani, M Saito, M Isozaki, K Suganuma, and S Imahori. Melting attack of solid plates by a high-temperature liquid jet [ii]—erosion behavior by a molten metal jet. *Nuclear engineering and design*, 132(2) :171–186, 1991.
- [5] Alexandre Lecoanet, Michel Gradeck, Frederic Payot, Christophe Journeau, Nathalie Seiler, and Nicolas Rimbart. Model for core catcher ablation and cavity shape in the film regime. *Nuclear Engineering and Design*, 414 :112591, 2023.
- [6] Antoine Avrit, Asma Djermoune, Alexandre Lecoanet, Nathalie Seiler, Michel Gradeck, and Nicolas Rimbart. Etude expérimentale de l'effet de la rugosité sur l'ablation d'une paroi solide par un jet liquide. In *Congrès français de thermique, ICUBE*, Juin 2024, Strasbourg, France.

- [7] M.Saito, K. Sato, A. Furutani, M. Isozaki, S. Imahori, and Y. Hattori. Melting attack of solid plates by a high temperature liquid jet - effect of crust formation. *Nuclear Engineering and Design*, 121 :11–23, Juillet 1990.
- [8] N. Seiler, X. Gaus-Liu, M. Gradeck, N. Rimbert, A. Lecoanet, C. Journeau, R. Clavier, B. Bigot, B. Fluhrer, and T. Cron. Evaluation results of core catcher innovation measures. Deliverable D6.3 ESFR-SIMPLE Project, CEA, March 2023.
- [9] A. Baghel, A. Sridharan, and J. Srree Murallidharan. Experimental and numerical study of inclined free surface liquid jet impingement. *International Journal of Thermal Sciences*, 154 :106389, 2020.
- [10] Abdmonem H. Beitelmal, Michel A. Saad, and Chandrakant D. Patel. The effect of inclination on the heat transfer between a flat surface and an impinging two-dimensional air jet. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(2) :156–163, 2000.
- [11] S. Talapati et al. Influence of inclined unconfined circular air jet impingement on local heat transfer characteristics of smooth flat plate. *International Journal of Thermal Sciences*, 197 :108848, 2024.
- [12] A. Lecoanet, M. Gradeck, X. Gaus-Liu, T. Cron, B. Fluhrer, F. Payot, C. Journeau, and N. Rimbert. Ablation of a solid material by high temperature liquid jet impingement : An application to corium jet impingement on a SFR core-catcher. *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, 8(1) :NERS–21–1042, (2022).
- [13] Asma Djermoune, Alexandre Lecoanet, Nathalie Seiler, Nicolas Rimbert, and Michel Gradeck. Investigation of the effects of surface inclination on the ablation of a solid by the impact of a hot liquid jet : implications for sodium-cooled fast reactor safety. In *International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-21)*, Septembre 2025, Busan, South Korea.
- [14] M. Epstein, M. J. Swedish, J. H. Linehan, G. A. Lambert, G. M. Hauser, and L. J. Stachyra. Simultaneous melting and freezing in the impingement region of a liquid jet. *AIChE Journal*, 26(5) :743–751, (1980).
- [15] D. A. Powers. Erosion of steel structures by high-temperature melts. *Nuclear Science and Engineering*, 88(3) :357–366, (1984).
- [16] S.S. Pawar and M. Ibrahim. Numerical investigation of heat transfer characteristics of an inclined circular jet impinging on a flat surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 136 :1016–1031, 2019.

Remerciements



Ce projet a reçu un financement au titre du programme HORIZON-EURATOM-2021-NRT-01 dans le cadre de la convention de subvention n° 101059543.