

Etude expérimentale de l'effet de la rugosité sur l'ablation d'une paroi solide par un jet liquide

Antoine AVRIT^{1,2}, Asma DJERMOUNE^{1,2,*}, Alexandre LECOANET¹, Nathalie SEILER¹, Michel GRADECK², Nicolas RIMBERT²

¹CEA, DES, IRESNE, DTN, SMTA, Cadarache, F-13108, Saint-Paul-lez-Durance, France

² Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000, Nancy, France

*(auteur correspondant : asma.DJERMOUNE@cea.fr)

Résumé -

Dans le cadre de l'amélioration de la sûreté nucléaires, la présente étude se concentre sur l'ablation thermique du récupérateur de corium d'un RNR-Na par le biais de l'étude expérimentale de l'impact d'un jet chaud sur une surface soliderugueuse. Dans ce contexte, des expériences ont été réalisées avec un système simulant (glace transparente / eau). La rugosité des blocs de glace transparente était contrôlée. Les conditions expérimentales ont été déterminées pour être les plus représentatives possibles d'un réacteur nucléaire. Il a été observé que la rugosité de la surface exerce une influence notable, augmentant considérablement la vitesse d'ablation du solide.

Nomenclature

B	Nombre de fonte, $B = \frac{c_{p,j}(T_j - T_f)}{L + c_{p,s}(T_f - T_{s,ini})}$	Pr	Nombre de Prandtl, $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$
c_p	Chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	Re	Nombre de Reynolds, $Re = \frac{D_j V_j}{\nu}$
D_{bu}	Diamètre de la buse, m	r	Rayon de la cavité, m
d_{c-c}	Distance centre à centre, m	t	Temps, s
D_{cyl}	Diamètre du cylindre, m	T_j	Température de jet, °C
D_j	Diamètre du jet, m	V_j	Vitesse du jet à la sortie de la buse, m/s
H	Distance entre la buse et le solide impacté, m	$V_{f,0}$	Vitesse d'ablation, m/s
h_{cyl}	Hauteur du cylindre, m	y_0	Profondeur ablatée, m
k_r	Taille caractéristique de rugosité, m	δ	Épaisseur de la couche limite hydrodynamique, m
L	Chaleur latente de fusion, $J.kg^{-1}$		
L	Largeur de la pièce d'aluminium, m		
Nu_0	Nombre de Nusselt de jet au point de stagnation, $Nu_0 = \frac{hD_j}{\lambda}$		

1. Introduction

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la mitigation des accidents nucléaires graves avec fusion du cœur dans les réacteurs nucléaires à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na), appartenant à la quatrième génération. Lors d'un tel accident, la fusion du cœur conduit à la formation d'un mélange radioactif de combustible nucléaire et d'éléments fondus issus du cœur, appelé "corium", susceptible d'engendrer une éventuelle excursion de puissance. Afin de limiter les conséquences d'un accident grave et prévenir l'excursion de puissance, deux dispositifs peuvent être implémentés au sein des nouveaux RNR-Na [1]. Ces dispositifs sont d'une part, "des tubes de déchargement", installés à l'intérieur du cœur du réacteur, conçus pour transférer le corium vers la partie inférieure de la cuve du réacteur. Et d'autre part, un "récupérateur de corium", destiné à recevoir ce corium et améliorer son refroidissement sur le long terme.

Cependant, ce nouveau design soulève une nouvelle problématique de sûreté liée à la résistance thermique du récupérateur de corium. En effet, le corium pourrait atteindre le récupérateur sous

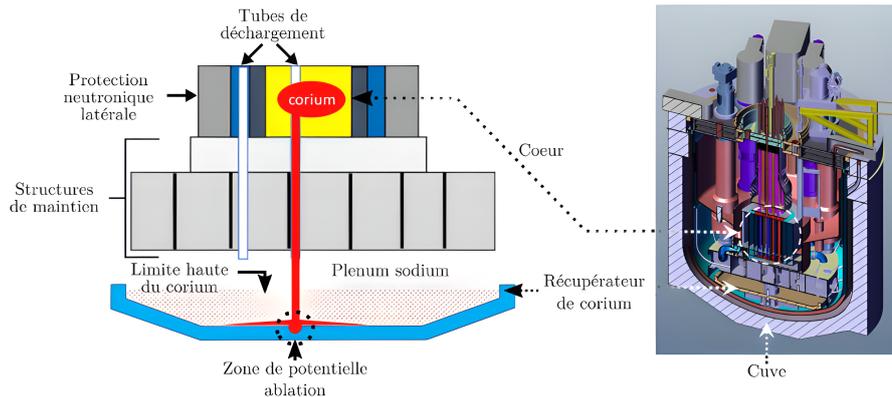


Figure 1 : Coupe d'un RNR-Na illustrant la formation et le transfert du Corium .

forme de jet chaud (~ 3000 K) ce qui peut induire un risque d'ablation locale et de percement du récupérateur, comme illustré dans la Figure 1. Ceci est dû à la forte différence entre la température initiale du jet de corium et la température de fusion du matériau du récupérateur. Il est nécessaire de prendre ce risque en compte pour pouvoir assurer l'intégrité du récupérateur de corium durant cette phase de relocalisation. Il convient de noter également que l'ablation dépendra également de la température et de la composition du corium (phase métallique ou phase oxyde). À cet égard, Lecoanet et al. [2] ont étudié les différentes interactions possibles lors de l'impact du corium sur le récupérateur et ont conclu que l'impact d'un jet d'acier cohérent à surface libre sur un récupérateur en acier est le cas le plus pénalisant pour la sûreté.

De plus, on ne peut pas écarter la possibilité que la surface du récupérateur soit rugueuse, notamment du fait que le récupérateur reste plusieurs années en fond de cuve. Aussi, des aspérités peuvent être créées à la surface du récupérateur lors de la relocalisation du corium. Dans la littérature, Lienhard et Gabour [3] ont étudié de façon expérimentale l'impact d'un jet avec transferts thermiques sur une paroi rugueuse. Ils constatent que la rugosité peut augmenter les transferts. Ce travail présente les travaux expérimentaux menés pour étudier l'ablation d'un bloc de glace par un jet d'eau en surface libre sur une surface rugueuse.

Dans le passé, des études sur l'ablation thermique d'un solide par un jet liquide de même nature que ce solide (il s'agit d'eau) ont été réalisées afin de comprendre les mécanismes physiques et les transferts thermiques. Saito et al., [4] ont réalisé des expériences pour étudier l'ablation d'un solide (étain ou acier) par un jet liquide ($NaCl$ ou Al_2O_3), et sont les premiers à avoir fait la distinction entre le régime de film et le régime de piscine. Le régime de piscine succède au régime de film lorsque la cavité se remplit de liquide. Ces régimes ont été observés lors des autres études [2], [4] et de même Tani et Sato [5] ont réalisé des expériences en acier / acier, plus proches de ce qui est investigué ici. Ces expériences sont très précieuses à une échelle macroscopique mais ne nous permettent pas de comprendre les phénomènes physiques locaux gouvernant le transfert de chaleur et la fonte du métal. C'est pourquoi, une méthodologie de recherche et développement considérant une situation simplifiée et utilisant des matériaux simultants, permettant la visualisations, a été mise en place. Des expériences instrumentées ont été réalisées en laboratoire à petite échelle [6] [7] et [8] sur le dispositif HAnSoLO, qui permettent d'étudier l'ablation d'un bloc de glace par un jet d'eau en surface libre.

2. Dispositif expérimental HAnSoLO

Le dispositif expérimental utilisé pour effectuer les expériences d’ablation d’une surface solide par un jet de liquide chaud est désigné sous le nom de ”Hot Ablation of a Solid by a Liquid - Observation” (HAnSoLO). Ce système a été élaboré et détaillé par Lecoanet et al.[6]. Il a pour but de reproduire la phénoménologie qui est représentative de l’ablation d’un récupérateur métallique par un jet constitué de la phase métallique du corium, et d’examiner le processus d’ablation d’un bloc de glace sous l’impact d’un jet d’eau à surface libre. Par ailleurs, il n’est pas complètement sans lien avec le cas réel du réacteur (comme cela a été démontré par Lecoanet et al. [2]). Les valeurs des nombres adimensionnels caractéristiques de ce problème sont fournies dans le Tableau 1.

Le nombre adimensionnel	HAnSoLO	Cas réacteur [9]
Nombre de Reynolds Re	$1.2 \times 10^4 - 1.5 \times 10^5$	$\sim 10^6$
Nombre de Prandtl Pr	2.5 - 5.5	$\sim 0.1 - 0.6$
Nombre de fonte B	0.3 - 0.9	$\sim 0.25 - 0.95$

Tableau 1 : Les nombres adimensionnels et caractéristiques du dispositif expérimental HAnSoLO et d’un jet de corium en cas accidentel d’un réacteur nucléaire.

On constate que la gamme de nombre de Reynolds est inférieure d’un ordre de grandeur à celui potentiellement attendu pour un accident grave, mais l’écoulement du fluide reste turbulent dans les deux cas, Lienhard [10] donne une limite à $Re = 4000$. La gamme de nombre de fonte est bien adaptée. Quant à la gamme de Prandtl, elle est supérieure à l’unité pour l’eau et inférieure pour le corium. Cette différence peut avoir un impact sur le transfert de chaleur entre le jet et le solide. Cependant, l’eau a été choisi pour les expériences dans le but de mieux comprendre la phénoménologie de l’ablation. Le principal avantage des expériences eau/glace est qu’elles permettent de visualiser l’évolution de la surface ablatée, car le système est entièrement transparent.

Le système HanSoLO est le suivant : dans un réservoir on chauffe de l’eau jusqu’à la température de jet voulue T_j , qui passe ensuite, dans une pompe à débit contrôlé pour obtenir la vitesse du jet voulue V_j . Le fluide sort ensuite par une buse, de diamètre D_j . Le jet sortant de la buse impacte ainsi un bloc de glace transparent parallélépipédique qui est placé dessous (à une distance initiale contrôlée H). Une caméra rapide est placée face au bloc impacté, afin d’enregistrer l’évolution de la cavité créée lors de l’ablation.

Un schéma simplifié du système HAnSoLO ainsi qu’une image du jet impactant la surface d’un glaçon dans ce dispositif sont représentés sur la Figure 2.

3. Expériences considérées

Des expériences de jet d’eau à surface libre (Figure 2) impactant un bloc de glace présentant une surface initialement rugueuse ont été réalisées avec HAnSoLO. Ceci a pour but d’étudier l’effet de la rugosité sur la dynamique d’ablation et comparer les résultats avec ceux des expériences de jet à surface libre sur une surface lisse réalisées par Lecoanet [6] (à $H/D_j = 10$). Les températures et les vitesses initiales utilisées dans ces expériences ainsi que celles considérées

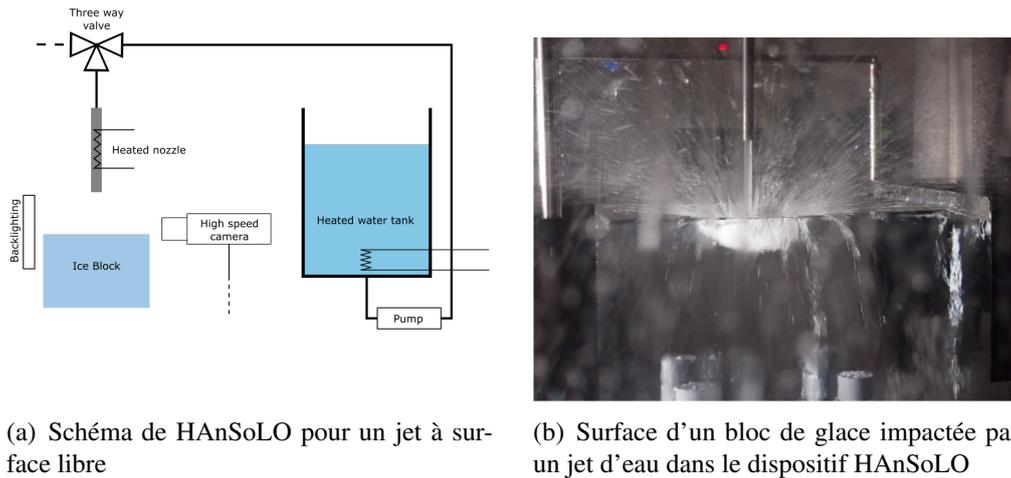


Figure 2 : Représentation du dispositif HAnSoLO

pour les expériences avec une surface lisse sont les suivantes :

$$V_j \in \{1.1, 2.5, 5.0, 7.5, 10\} \text{m/s}, \quad T_j \in \{30, 50, 70\}^\circ\text{C}.$$

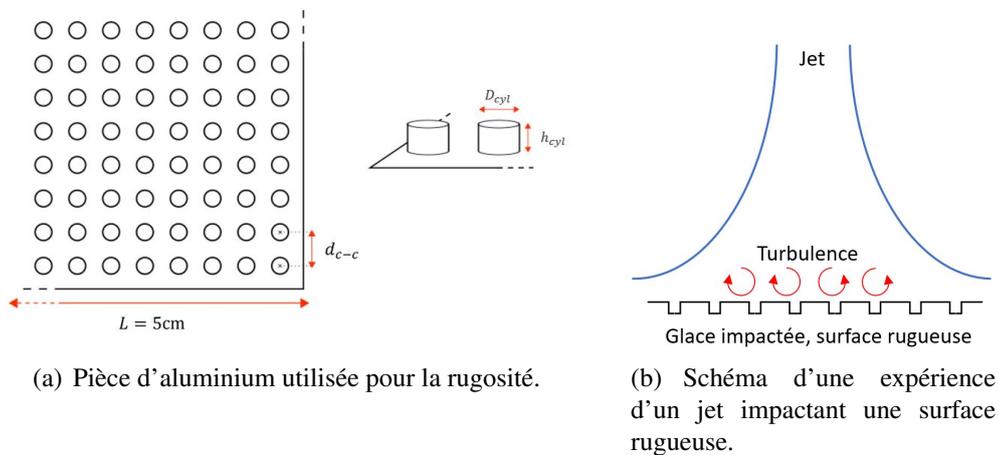


Figure 3 : Schéma des expériences réalisées avec un jet à surface libre impactant une surface rugueuse.

Afin d'obtenir une surface initialement rugueuse autour du point de stagnation, la méthode appliquée ici consiste à utiliser une pièce carrée d'aluminium munie de cylindres régulièrement espacés, disposés à la surface de façon régulière dans les directions horizontale et verticale. Un schéma de la pièce d'aluminium est donné en Figure 3(a). Cette pièce est apposée sur la surface de la glace, puis retirée. Le jet impacte alors la surface de la glace présentant une rugosité régulière, pour faciliter le contrôle de la taille caractéristique de la rugosité k_r . Un schéma de la rugosité de la surface de la glace obtenue lors des expériences est illustré dans la Figure 3(b). On désigne par D_{cyl} le diamètre et h_{cyl} la hauteur des cylindres, ce qui est un choix arbitraire. On considère dans les expériences que la taille caractéristique de rugosité k_r est $k_r = D_{cyl} = h_{cyl}$. Plusieurs valeurs de k_r ont été testées afin d'analyser l'influence de k_r sur la vitesse :

$$k_r \in \{0.2, 0.5, 1\} \text{mm}.$$

4. Résultats expérimentaux et analyse

4.1. Comparaison entre les résultats d'ablation pour une surface initialement rugueuse et une surface lisse

Afin de comprendre la phénoménologie de l'ablation, un algorithme de traitement d'images est utilisé sur les images capturées par la caméra pour localiser automatiquement la position de l'interface solide-liquide [6].

On désigne par y_0 la profondeur ablatée au point de stagnation ($r = 0$). La Figure 4 présente les courbes de profondeur obtenues à $Re \simeq 5.4 \times 10^4$ et $Pr \simeq 3.6$ pour une vitesse de jet $V_j \simeq 5.1$ m/s et une température du jet $T_j \simeq 50^\circ\text{C}$ pour une expérience de jet impactant une surface lisse, et une expérience de jet impactant une surface initialement rugueuse de taille caractéristique de rugosité $k_r = 1$ mm. Dans le cas de la surface rugueuse, une forte augmentation de la vitesse d'ablation est observée par rapport au cas avec une surface lisse. Une explication pourrait être que la rugosité provoque une augmentation de la production d'énergie cinétique turbulente, ce qui induit ainsi une augmentation des transferts par rapport à un cas sans rugosité.

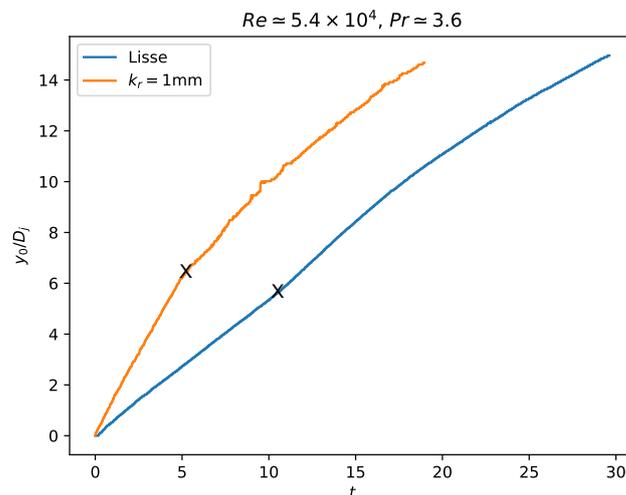


Figure 4 : Courbe de y_0/D_j pour deux expériences de jet impactant une surface lisse et une surface rugueuse dont la taille caractéristique des rugosités est $k_r = 1$ mm. Les croix noires désignent le moment du passage en régime de piscine.

On représente ainsi en Figure 5 les cavités capturées par la caméra pour les expériences précédentes, cf. Figure 4. On observe deux cavités qui présentent des formes très différentes, selon la présence ou non de rugosité à la surface. La forme de cavité obtenue dans le cas d'une surface rugueuse semble être approximativement cylindrique, et semble être moins étendue dans la largeur que la forme de cavité obtenue pour le cas d'une surface lisse.

4.2. Résultats d'ablation au point de stagnation

Selon la Figure 4, peu importe l'état de surface de la surface impactée, la vitesse de l'ablation $V_{f,0} = \frac{dy_0}{dt}$ reste approximativement constante au début de l'ablation, tant qu'on est en régime de film [6]. Cette vitesse d'ablation peut être calculée en déterminant la pente de la courbe de

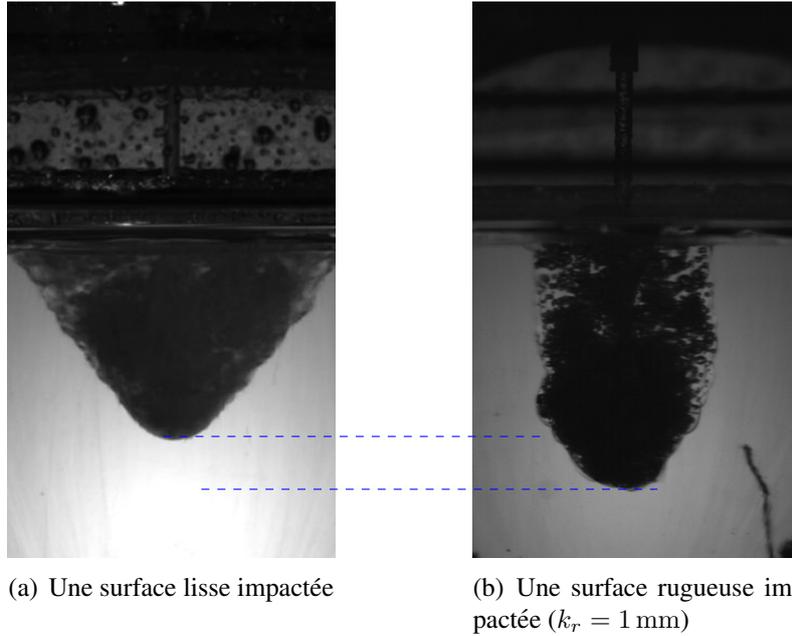


Figure 5 : Images issues de l'enregistrement par la caméra rapide, présentant la forme des cavités obtenues à $t = 10$ s et $V_j = 5.1$ m/s pour $Re \simeq 5.4 \times 10^4$ et $Pr \simeq 3.6$.

y_0 en fonction de t avant le régime de piscine. Pour les expériences illustrées à la Figure 4, par exemple :

$$V_{f,0} = \begin{cases} 3.2 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1} & \text{pour le cas lisse} \\ 6.4 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1} & \text{pour le cas rugueux} \end{cases}$$

On constate que la vitesse d'ablation double lorsque la surface est rugueuse par rapport au cas d'une surface lisse.

On définit ensuite le nombre de Nusselt au centre du jet, noté Nu_0 , comme un nombre adimensionnel utilisé pour caractériser les transferts thermiques. Ce dernier peut être corrélé à la vitesse de l'ablation $Nu_0 \propto V_{f,0}$.

Toujours dans le régime de film, les valeurs de Nu_0 obtenues dans ces deux expériences sont comparées en Figure 6 en fonction de la rugosité utilisée et la valeur de Re .

Selon la littérature, l'impact de la rugosité sur un écoulement le long de la paroi dépend de la taille caractéristique k_r de la rugosité. Lorsque la valeur de k_r est relativement petite, l'interaction des éléments rugueux avec l'écoulement est négligeable. En revanche, une taille k_r suffisamment grande peut entraîner une déstabilisation des couches limites près de la paroi, ce qui peut modifier considérablement l'écoulement localement et même globalement si la déstabilisation se propage au-delà de la couche limite.

Les Figures 6 montrent qu'il existe deux régimes d'ablation en fonction de la taille caractéristique de la rugosité k_r . Lorsque la taille de rugosité k_r est suffisamment importante, on obtient l'expression reliant Nu_0 et Re suivante :

$$Nu_0 \simeq 0.0068 Re$$

On remarque que l'exposant obtenu dans cette étude lorsque la rugosité est importante est proche de ce qui a été obtenu par Gilpin [11] pour des surfaces rugueuses (exposant à 0.8 pour

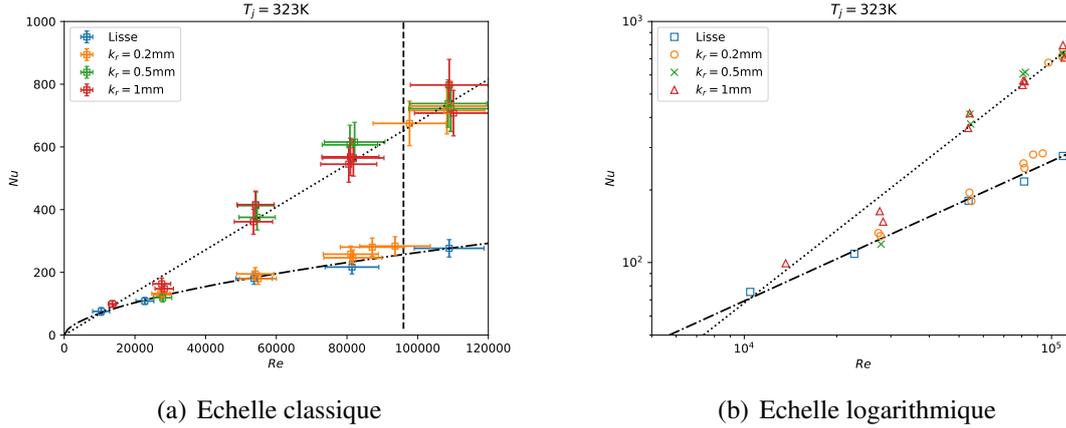


Figure 6 : Profils de Nu_0 , en régime de film. Les lignes en pointillées représentent la relation $Nu_0 \propto Re$, les lignes pointillées avec des tirets représentent la relation $Nu_0 \propto Re^{0.57}$ et la ligne verticale pointillée représente la valeur critique $Re_c(k_r = 0.2 \text{ mm}) = (9.5 \pm 1.1) \times 10^4$.

une rugosité non-contrôlée). Les points expérimentaux pour $k_r = 0.2 \text{ mm}$ à faible nombre de Reynolds suivent la relation établie par Lecoanet [6] pour un jet d'eau impactant un bloc de glace lisse :

$$Nu_0 \propto Re^{0.57}.$$

Ce qui indique que l'écoulement se comporte comme si la surface était lisse tant que $k_r = 0.2 \text{ mm}$ et $Re < Re_c$.

Selon la Figure 6, la valeur de Nu_0 obtenue pour les expériences à $k_r = 0.2 \text{ mm}$ augmente considérablement à partir d'une valeur critique Re_c de Re . Les points expérimentaux semblent rejoindre les points obtenus pour des valeurs de k_r plus élevées lorsque $Re > Re_c$, ce qui entraîne une nouvelle dynamique vérifiant $Nu_0 \simeq 0.0068 Re$, c'est le "régime rugueux".

La valeur obtenue pour Re_c est :

$$Re_c(k_r = 0.2 \text{ mm}) = (9.5 \pm 1.1) \times 10^4.$$

Elle est définie comme la moyenne entre la valeur expérimentale maximale de Re pour observer le régime lisse $Re_{max,lisse}(k_r = 0.2 \text{ mm}) = 93.6 \times 10^3$ et la valeur expérimentale minimale de Re pour observer le régime rugueux $Re_{min,rugueux}(k_r = 0.2 \text{ mm}) = 97.7 \times 10^3$.

Il semble que la transition entre le régime lisse et le régime rugueux dépende à la fois de Re et de k_r . L'hypothèse formulée est que la rugosité déstabilise la couche limite en proche de paroi, ce qui provoque une augmentation de la turbulence et donc une augmentation des transferts thermiques. La validité de cette hypothèse est en cours de vérification.

5. Conclusion

Dans cette étude l'effet de la rugosité de la surface impactée lors de son ablation par un jet à surface libre a été clarifié. Un régime d'ablation différent a été mis en évidence lorsque la taille caractéristique de la rugosité et le nombre de Reynolds sont suffisamment importants.

Le régime d'ablation rugueux observé présente des vitesses d'ablation plus élevées que le régime lisse décrit par Lecoanet [6]. Il a notamment été montré que $Nu_0 \propto Re$ pour le régime rugueux, ce qui signifie que les transferts dépendent donc plus fortement de Re en régime

rugueux. La forme de cavité obtenue dans le régime rugueux est moins large et plus profonde que celle du régime lisse ce qui a aussi été observé par Gilpin [11].

Pour $k_r = 0.2$ mm, lorsque la valeur de Re dépasse la valeur critique $Re_c \sim 9,5 \times 10^4$, Une transition du régime lisse vers le régime rugueux est observée.

Références

- [1] François GAUCHÉ. “Generation IV reactors and the ASTRID prototype : Lessons from the Fukushima accident”. In : *Comptes Rendus Physique* 13.4 (2012), p. 365-371.
- [2] Alexandre LECOANET et al. “Ablation of a Solid Material by High Temperature Liquid Jet Impingement : An Application to Corium Jet Impingement on a Sfr Core-Catcher”. In : *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science* (juin 2021). ISSN : 2332-8975. DOI : 10.1115/1.4051448. URL : <http://dx.doi.org/10.1115/1.4051448>.
- [3] LA GABOUR et JH LIENHARD. “Wall roughness effects on stagnation-point heat transfer beneath an impinging liquid jet”. In : (1994).
- [4] M SAITO et al. “Melting attack of solid plates by a high temperature liquid jet—effect of crust formation”. In : *Nuclear engineering and design* 121.1 (1990), p. 11-23.
- [5] Itiro TANI et Hiroshi SATO. “Boundary-layer transition by roughness element”. In : *Journal of the Physical Society of Japan* 11.12 (1956), p. 1284-1291.
- [6] A. LECOANET et al. “Study of the ablation consecutive to jet impingement on a meltable solid – Application to SFR core-catcher”. In : *Nuclear Engineering and Design* 377 (2021), p. 111147. ISSN : 0029-5493. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111147>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549321000996>.
- [7] Alexandre LECOANET et al. “Ablation D’un Bloc de Glace Transparente Par un Jet D’eau Chaude—Application à la Sûreté Des RNR-Na”. In : *Entropie* 20.4 (2020), p. 1-8.
- [8] Avrit ANTOINE et al. “Ablation of a Solid by an Immersed Jet”. In : (2023). DOI : 10.2139/ssrn.4515185. URL : <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4515185>.
- [9] F. BERTRAND et al. “Status of severe accident studies at the end of the conceptual design of ASTRID : Feedback on mitigation features”. In : *Nuclear Engineering and Design* 326 (jan. 2018), p. 55-64. ISSN : 0029-5493. DOI : 10.1016/j.nucengdes.2017.10.019. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.10.019>.
- [10] John H LIENHARD. “Heat transfer by impingement of circular free-surface liquid jets”. In : *18th National and 7th ISHMT-ASME, Heat and Mass Transfer Conference, Guwahati, India*. 2006.
- [11] R. R. GILPIN. “The Ablation of Ice by a Water Jet”. In : *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering* 2.2 (juin 1973), p. 91-96. ISSN : 0315-8977. DOI : 10.1139/tcsme-1973-0014. URL : <http://dx.doi.org/10.1139/tcsme-1973-0014>.

Remerciements

Le projet ESRF-SIMPLE est financé par l’Union européenne dans le cadre de la convention de subvention 101059543. Les points de vue et opinions exprimés sont toutefois ceux des auteurs uniquement et ne reflètent pas nécessairement ceux de l’Union européenne. L’Union européenne ne peut en être tenue pour responsable.