

# Etude de l'ablation d'une surface solide par un jet chaud.

Célien Zacharie<sup>1</sup>, Nicolas RIMBERT<sup>1</sup>, Miloud HADJ ACHOUR<sup>1</sup>, Frédéric PAYOT<sup>2</sup>, Alexandre LECOANET<sup>2</sup>, Michel GRADECK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000 Nancy, France

<sup>2</sup>CEA/DEN/CAD/SESI/LSMR/Bât. 212, 13108 Saint Paul Lez Durance Cedex, France

\*(auteur correspondant : celien.zacharie@univ-lorraine.fr)

**Résumé** - Cet article traite de l'ablation d'une structure solide impactée par un jet de liquide chaud. Ce type de phénomène peut survenir lors d'un accident nucléaire grave avec fusion du cœur comme dans les accidents survenus à Three Mile Island ou à Fukushima. Selon le déroulement de tels accidents, un jet de corium à haute température (>2000°C) peut impacter directement la cuve du réacteur et compromettre l'intégrité de la seconde barrière de confinement. L'occurrence de ce phénomène est prise en compte dans les scénarios de sûreté nucléaire du projet de réacteur européen à neutrons rapides, ASTRID<sup>1</sup>. Pour ce réacteur de 4<sup>ème</sup> génération, la démonstration de sûreté intégrera la fusion hypothétique du cœur en s'appuyant sur des éléments de conception. Ainsi, plusieurs dispositifs de prévention et de mitigation des accidents graves existeront au sein du réacteur. En particulier, des tubes de déchargement relient le cœur fissile à un plateau récupérateur. En cas de fusion, le corium sera rapidement déchargé via ce chemin préférentiel et étalé sur ce plateau où il sera plus facile de le refroidir. La conception (matériau, géométrie et épaisseur) du récupérateur nécessite de prendre en compte la phénoménologie d'impact de jet. Dans notre étude, l'interaction du jet de corium avec le plateau récupérateur sera simulée en utilisant une analogie glace-eau ; l'idée étant de pouvoir visualiser en temps réel la cinétique d'ablation de la structure solide en utilisant de la glace transparente. Il a ainsi été possible de visualiser l'ablation, de mesurer la vitesse du front de fusion et enfin d'estimer le coefficient de transfert thermique pendant la formation de la cavité en utilisant un modèle analytique. Ce sont ces résultats qui seront exposés et analysés.

## Nomenclature

$C_p$	chaleur massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
$D$	diamètre, m	$\delta$	épaisseur, m
$H$	Hauteur de chute, cm	$\rho$	masse volumique, $kg.m^{-3}$
$h_i$	enthalpie du milieu $i$ , $J.kg^{-1}$	$\nu$	viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$
$k$	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
$L$	chaleur latente, $J.kg^{-1}$	$m$	ablation
$Pr$	nombre de Prandtl	$i$	interface entre les deux milieux
$q$	flux de chaleur, $W.m^{-2}$	$J$	jet
$T$	température, K	$mp$	fusion
$V$	vitesse, $m.s^{-1}$	$S$	solide
		$W$	paroi

## 1. Introduction

L'accident de Three Mile Island a démontré que la fusion du cœur d'un réacteur nucléaire était possible. Ce scénario est maintenant pris en compte dès la conception des futures centrales de 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> générations. Dans le projet de réacteur ASTRID<sup>1</sup> de type réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (ESFR), des tubes de déchargement du corium ont été prévus pour

---

<sup>1</sup> Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration, réacteur de IV<sup>ème</sup> génération

vider le cœur fissile de son corium vers un dispositif de mitigation appelé le plateau récupérateur situé dans le fond de cuve (figure 1). Cependant, en raison de la différence de température de fusion entre le corium et le plateau (matière métallique), une fusion et ablation plus ou moins rapide de ce dispositif est possible.

Des expériences visant à caractériser expérimentalement l'ablation d'un solide par un jet de liquide ont déjà été faites par le passé [1], [2], par exemple des systèmes NaCl/Etain et  $Al_2O_3$ /Acier ont été étudiés. Pour ces expériences, un procédé de chauffage par induction permettait d'atteindre la fusion de l'alumine ( $Al_2O_3$ ) ou du sel ( $2054^\circ C$  et  $800^\circ C$ ) lesquels sont ensuite déversés sous forme de jet sur des parois d'étain ou d'acier, respectivement. Les paramètres importants dans ces essais sont : le débit volumique du jet injecté ( $Q_v$ ), la vitesse du jet, la température du jet ( $T_j$ ), la température de l'interface solide ( $T_s$ ), la durée du jet ( $t_j$ ), la distance entre la buse et l'interface solide ( $H$ ), l'angle d'inclinaison de la plaque ( $\theta_s$ ), la nature du jet et du solide donc leurs propriétés thermodynamiques, thermiques et dynamiques.

Ils ont notamment mis en évidence que lorsque la profondeur de la cavité formée dépassait 3 à 4 fois le diamètre du jet, la vitesse d'ablation diminuait fortement. Ce ralentissement est connu sous le nom de phénomène de « pool effect ». Dans cette situation, un bain liquide se forme dans la cavité qui, de par sa thermo-hydraulique différente de celle du jet, diminue le flux de chaleur à la paroi.

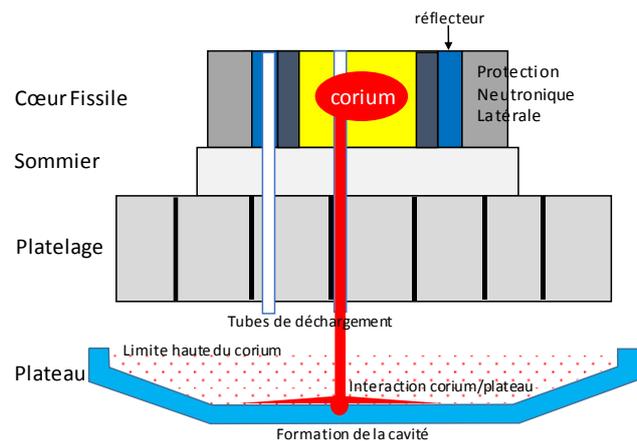
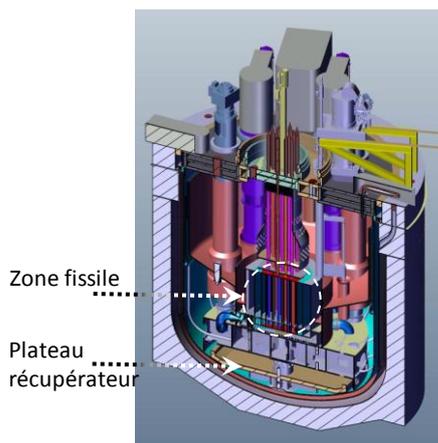


Figure 1 : Vue en coupe du réacteur ASTRID Figure 2 : Vue schématique du cœur et de l'interaction du jet de corium avec le plateau

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet européen Euratom H2020 (ESFR SMART<sup>2</sup>), il s'agit d'améliorer la connaissance sur le sujet et de développer une physique pour aider à la conception du plateau récupérateur (figures 1 et 2). Une expérience avec le système eau/glace est dans un premier temps mise en œuvre afin de mesurer la cinétique de l'ablation dans différentes conditions.

<sup>2</sup> European Sodium Fast Reactor Safety Measures Assessment and Research Tools

## 2. Analyse du problème et modélisation

### 2.1. Analyse des différents scénarios

En considérant deux milieux continus non miscibles même en cas de fusion, quatre scénarios sont envisageables vis-à-vis de l'impact de jet sur une structure solide, comme schématisés sur la figure 3. Ces configurations dépendent (i) de la température de fusion des matériaux, de la température du solide et du liquide et bien sûr (ii) des transferts thermiques, à savoir la conduction thermique dans le solide et la convection forcée du au liquide ; tous ces paramètres conditionnant la cinétique d'ablation (i.e vitesse d'ablation,  $V_m$ ). Comme nous supposons dans notre cas que la température du liquide ( $T_{J, \infty}$ ) est supérieure à la température de la paroi solide ( $T_W$ ), une couche limite thermique se développe entre les deux matériaux et, bien sûr, une couche limite dynamique:

- Cas 1: le jet de liquide, initialement à  $T_J$ , frappe la surface solide (initialement à  $T_S$ ) sans changement de phase. Cela signifie que la température du liquide reste supérieure à sa température de fusion ( $T_{J, mp}$ ) et que la température du solide reste inférieure à sa température de fusion ( $T_{S, mp}$ ).  $T_{J, \infty} > T_J > T_{J, mp}$ ,  $T_i = T_W > T_S$  et  $T_{S, mp} > T_S$

- Cas 2: lorsque le jet de liquide frappe la surface solide, son refroidissement suffit à abaisser sa température jusqu'à son point de fusion. Une croûte solide se forme au niveau de la paroi solide. Par conséquent,  $T_{J, \infty} > T_J > T_{J, 0}$  mais  $T_{J, 0} < T_{J, mp} < T_i = T_W < T_{S, mp}$

- Cas 3: lorsque le jet de liquide heurte la surface solide, son refroidissement n'est pas suffisant pour abaisser sa température jusqu'à son point de fusion mais le chauffage de la paroi solide est suffisant pour ablater le solide. Un cratère se forme au niveau de la paroi solide. L'interface entre les deux milieux est illustrée en noir épais sur la figure 3.

Par conséquent,  $T_{J, \infty} > T_J > T_{J, mp} > T_i > T_W > T_{S, mp}$

- Cas 4: lorsque le jet de liquide heurte la surface solide, son refroidissement suffit à abaisser sa température jusqu'à son point de fusion et, en même temps, le chauffage de la paroi suffit à la liquéfier. Un film liquide du solide fondu (en noir épais figure 3) se forme sous une croûte (en jaune sur la figure 3) due à la solidification partielle du jet.  $T_J < T_{J, mp} > T_i > T_W > T_{S, mp}$

Dans cet article, on s'intéressera uniquement au cas 3 dans lequel le flux de chaleur apporté est suffisant pour qu'il y ait un échauffement et un changement de phase de la structure solide sans formation de croûte.

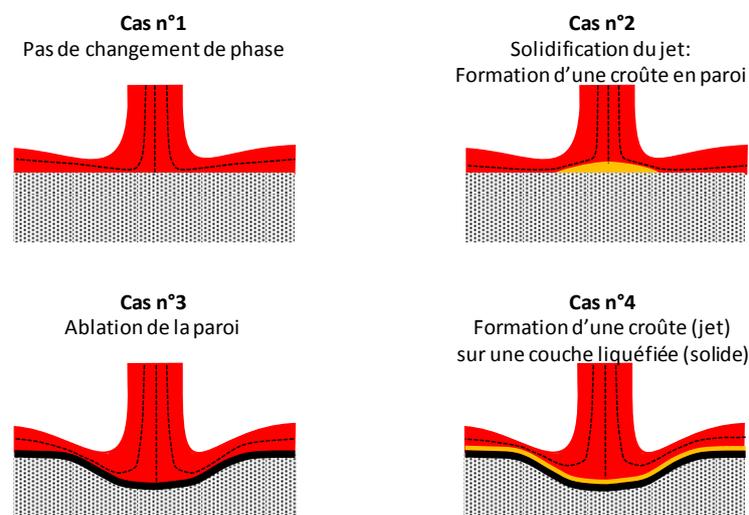


Figure 3 : scénarios envisagés lors de l'interaction liquide/solide

## 2.2. Modèle analytique visant à l'estimation de la cinétique d'ablation et des transferts

Les travaux de Swedish et al. [3] effectués sur l'ablation de différents solides par un jet chaud se sont basés sur le problème de Roberts [4] qui traitait de l'ablation d'un solide par un jet d'air chaud. Ils constituent l'une des premières études sur l'ablation par jet impactant. Swedish et al. [3] considèrent l'impact d'un jet laminaire sur une fine couche de liquide provenant de la fusion de la paroi solide. Le problème est résolu en considérant les équations classiques de quantité de mouvement, d'énergie et de continuité pour le jet et la couche ablatée en faisant l'hypothèse que le problème est stationnaire et l'épaisseur de la couche  $\delta$  constante ; cette couche de liquide provenant de la fusion du solide et non miscible avec le jet constitue une résistance thermique entre le jet et la paroi solide. L'approche de Swedish et al. [3] simplifie nettement le problème réel (cf figure 4) mais reste tout de même valide tant que le jet n'est pas noyé (i.e pas de « pool effect »). Les grandeurs physiques prises en compte dans ce modèle sont décrites figure 4. On considère un modèle 2D axisymétrique, sans mélange. La température  $T_i$  à l'interface des deux milieux n'est pas facile à mesurer, mais elle représente une grandeur essentielle pour pouvoir évaluer le flux de chaleur transmis par le jet, ce transfert de chaleur gouvernant la vitesse de fusion (ou d'ablation)  $V_m$ .

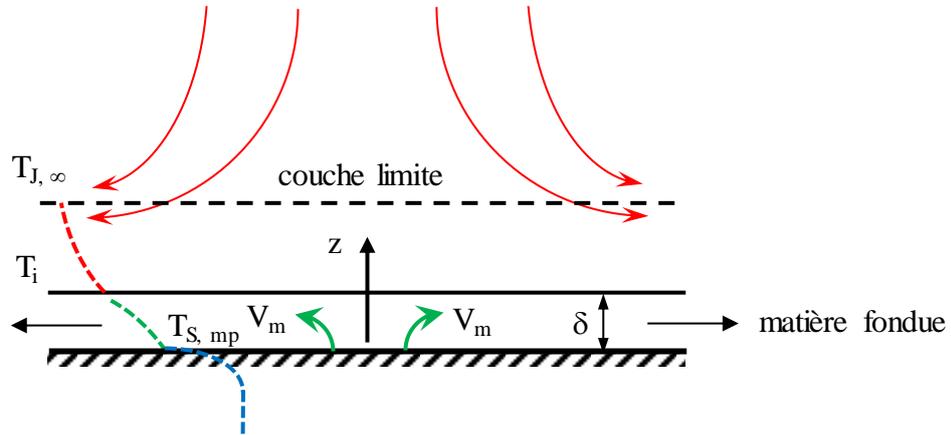


Figure 4 : vue schématique de l'ablation et grandeurs associées

Le modèle conduit à l'estimation de la vitesse d'ablation :

$$V_m = \frac{q}{\rho_S [L_{S,mp} + C_{p,S}(T_{S,mp} - T_S)]} = \frac{k_J (T_J - T_i) \sqrt{V_J / (\nu D_J)} \Pi'(0)}{\rho_S [L_{S,mp} + C_{p,S}(T_{S,mp} - T_S)]} \quad (1)$$

Ce modèle traduit le fait que l'énergie transmise par le fluide sert uniquement à porter le solide à sa température de fusion et le fondre.  $\Pi'(0)$  est le gradient de température adimensionnel en absence de fusion ; il est fonction du nombre de Prandtl du jet. Pour un jet d'eau, ce coefficient est estimé à  $0,553.Pr^{1/3}$ , [4]. Plus récemment, Sato et al. [1] ont exprimé la vitesse d'ablation en fonction du nombre de Reynolds du jet et de son nombre de Prandtl :

$$V_m = \frac{0,0152 \rho_J C_{p,J} V_J (T_J - T_{S,mp}) Re^{-0,08} Pr^{-0,2}}{\rho_S [L_{S,mp} + C_{p,S}(T_{S,mp} - T_S)]} \quad (2)$$

Si on applique les conditions de saut [5] entre la couche de liquide ablatée et la paroi solide à la température  $T_{S,mp}$ , il est possible d'obtenir une relation similaire.

En effet, l'expression de la condition de saut pour une variable  $\alpha$  quelconque s'exprime [5]:

$$a_1(w - \vec{V}_1 \cdot \vec{n}_1) - a_2(w - \vec{V}_2 \cdot \vec{n}_2) = (\vec{\alpha}_1 - \vec{\alpha}_2) \cdot \vec{n}_1 \quad (3)$$

où  $a_i$  représente la grandeur extensive volumique dans la zone  $i$ ,  $w$  est la vitesse de l'interface,  $\vec{n}_1 = -\vec{n}_2 = \vec{n}$  est le vecteur normal à l'interface,  $\vec{V}_i$  est la vitesse du milieu  $i$  par rapport à l'interface,  $\vec{\alpha}_i$  est la densité de flux correspondant à la grandeur  $a_i$ .

Appliquée à l'enthalpie, la masse volumique et la qdm, on obtient respectivement (indice 1, couche ablatée et indice 2, solide) :

$$\rho_1 h_1 (V_m - V_{ln}) - \rho_2 h_2 V_m = q_1 - q_2 \quad (4)$$

$$\rho_1 (V_m - V_{ln}) - \rho_2 V_m = 0 \quad (5)$$

$$\rho_1 \vec{V}_1 (V_m - V_{ln}) = (\vec{\pi}_1 - \vec{\pi}_2) \cdot \vec{n} = (p_2 - p_1) \cdot \vec{n} \quad (6)$$

où  $h_i$  représente l'enthalpie du milieu  $i$ ,  $\vec{\pi}_i = -p\vec{I} + \vec{\tau}$  est le tenseur de Cauchy ( $p$ , la pression et  $\vec{\tau}$ , le tenseur des contraintes qu'on néglige).

L'équation (6) projetée sur la tangente ( $V_{lt} \cdot V_m = V_{lt} \cdot V_{ln}$ ) et l'équation (5) ( $V_{ln} \neq V_m$ ) permettent d'écrire  $V_{lt} = 0$ . Finalement, en combinant les équations (4) et (5), on obtient une expression de la vitesse d'ablation :

$$V_m = \frac{q_1 - q_2}{\rho_2 (h_1 - h_2)} \quad (7)$$

En considérant que  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_s$ , la différence d'enthalpie entre la couche ablatée (notée 1) et le solide (noté 2) n'est autre que  $L_{S,mp}$ . De plus, si on considère que le flux de chaleur  $q_2 = V_m \cdot \rho_s C_{p,s} (T_{S,mp} - T_s)$ , on obtient finalement :

$$V_m = \frac{q_1 - V_a \cdot \rho_s C_{p,s} (T_{S,mp} - T_s)}{\rho_s L_{S,mp}} \quad (8)$$

D'où l'expression de la vitesse d'ablation :

$$V_m = \frac{q_1}{\rho_s [L_{S,mp} + C_{p,s} (T_{S,mp} - T_s)]} \quad (9)$$

La densité de flux  $q_1$  peut être exprimée à l'aide d'une loi de Newton,  $h_{conv}(T_J - T_{S,mp})$  et le coefficient de convection déterminé par une corrélation du type  $Nu = Cte Re^\alpha \cdot Pr^\beta$  conduit à :

$$V_m = \frac{Cte Re^{\alpha-1} \cdot Pr^{\beta-1} \rho_J C_{p,J} V_J (T_J - T_{S,mp})}{\rho_s [L_{S,mp} + C_{p,s} (T_{S,mp} - T_s)]} \quad (10)$$

Cette dernière relation nous servira à estimer le nombre de Nu (i.e identification de  $Cte$ ,  $\alpha$  et  $\beta$ ) connaissant la vitesse d'ablation. Précisons que le nombre de Reynolds est estimé à l'impact du jet, le diamètre du jet est corrigé tenant compte de l'accélération gravitaire qui diminue le diamètre (cette correction est mineure car  $H \sim 2\text{cm}$ ). La température  $T_s$  de la glace est aussi un

paramètre inconnu que nous n'avons pas mesuré mais que nous avons estimée à  $-5^{\circ}\text{C}$ . Il est à noter que la chaleur latente de fusion ( $L_{S,mp}=333 \text{ kJ.kg}^{-1}$ ) étant nettement plus importante que la chaleur sensible ( $C_{p,s}=2,06 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  à  $0^{\circ}\text{C}$ ), une erreur sur cette température n'engendre qu'un faible biais sur l'estimation du nombre de Nusselt.

### 3. Expériences et résultats

#### 3.1. Description de l'expérience

L'expérience « HAnSoLO<sup>3</sup> » mise en place au LEMTA vise dans un premier temps à pouvoir visualiser le front d'ablation formé par l'impact d'un jet d'eau chaude à température variable sur un parallélépipède de glace transparente, figure 5. Il est à noter que nous ne sommes pas strictement dans le cas de « deux milieux non miscibles » mais cette expérience est préliminaire à celle qui suivront avec des jets de métaux liquides. Pour produire de la glace transparente, il est nécessaire de dégazer l'eau se congelant tout en assurant un transfert de chaleur 1D ; ceci est assuré dans un moule parallélépipédique placé dans un congélateur et isolé sur ses quatre faces latérales tandis que la face supérieure sert à le remplir et à dégazer et la face inférieure (en métal conducteur) sert à extraire le flux et assurer une condition 1D (non représenté sur la figure 5).

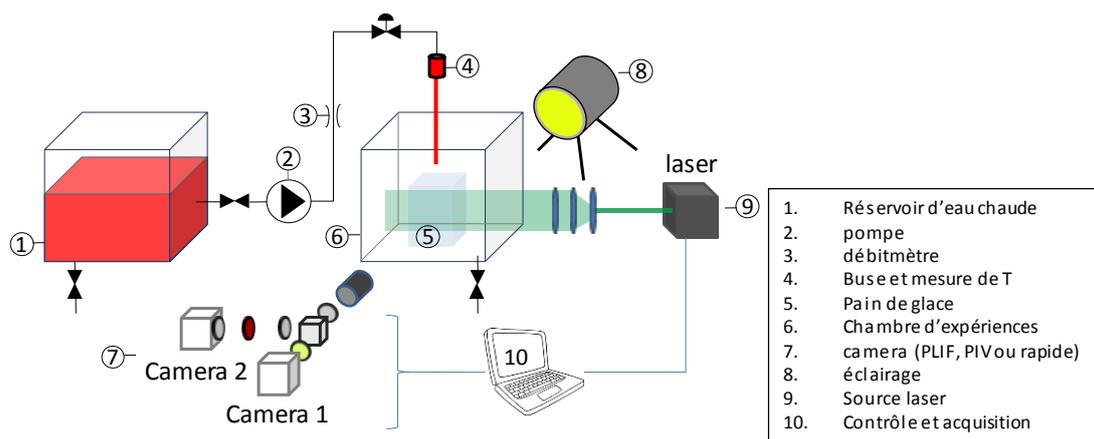


Figure 5 : vue schématique de l'expérience HAnSoLO

A l'heure actuelle, les dispositifs PLIF et PIV ne sont pas exploités et seule la visualisation rapide (utilisant une caméra Phantom v710) du front d'ablation est disponible. Pour les essais présentés ci-dessous, le diamètre de la buse est de 1mm ou 1,2mm, la température du jet est fixée à  $30^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$  et  $70^{\circ}\text{C}$ , et les vitesses du jet  $V_j$  (tenant compte de la hauteur de chute) sont comprises entre  $2,5$  et  $11 \text{ m.s}^{-1}$ .

#### 3.2. Analyse des résultats

Les visualisations ont permis de mettre en évidence trois régimes différents : un régime d'impact avec formation d'un film ruisselant, le splashing correspondant au début de la formation de la cavité, puis le « pool effect » dont le début correspond au moment où le ruisseau n'arrive plus à s'évacuer de la cavité. Une illustration de ces trois régimes est donnée figure 6. Notons qu'il n'est pas possible pour le moment d'accéder à l'épaisseur de film du ruisseau.

<sup>3</sup> Hot Ablation of SOLid by LIquid jet - Observations

Un traitement d'image utilisant le logiciel libre ImageJ permet d'obtenir la profondeur de la cavité en fonction du temps et finalement la vitesse d'ablation  $V_m$  (figure 7). Ensuite, nous procédons à une estimation non-linéaire afin d'identifier les paramètres  $Cte$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  et en déduire une corrélation du nombre de Nusselt valide dans les domaines  $2,55 < Pr < 5,42$  et  $3,8 \cdot 10^3 < Re < 1,2 \cdot 10^4$ . Ainsi dans le domaine de splashing, l'évaluation de la corrélation en utilisant les données expérimentales et l'équation (10) donne

$$Nu = 0,121 Re^{0,6} \cdot Pr^{0,8} \quad (11)$$

Cette corrélation est différente de celle de Sato et al. [1], ( $Nu = 0,0152 \cdot Re^{0,92} \cdot Pr^{0,8}$ ) dont le domaine de validation est différent (i.e.  $0,0095 < Pr < 0,20$  and  $4,1 \cdot 10^4 < Re < 4,9 \cdot 10^5$ ). Notons que la forme de la cavité obtenue par Sato et al. [1] est similaire à la forme que nous obtenons dans l'essai pris comme exemple, figure 8. Cependant la forme peut dépendre des conditions hydrodynamiques et de la température du jet.

Sur la figure 7, la vitesse d'ablation est constante pendant le régime de splashing et diminue progressivement lorsque le régime de « pool effect » est atteint.

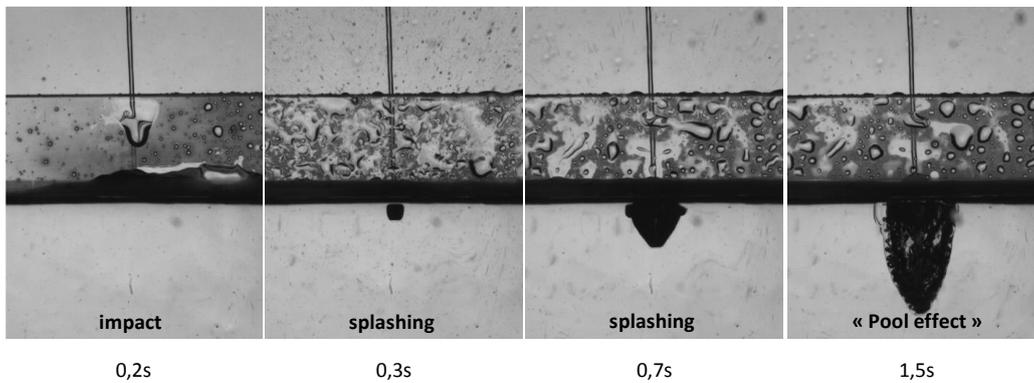


Figure 6 : exemples de visualisation,  $T_J = 70^\circ\text{C}$ ,  $V_J = 4,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $D_J = 1 \text{ mm}$

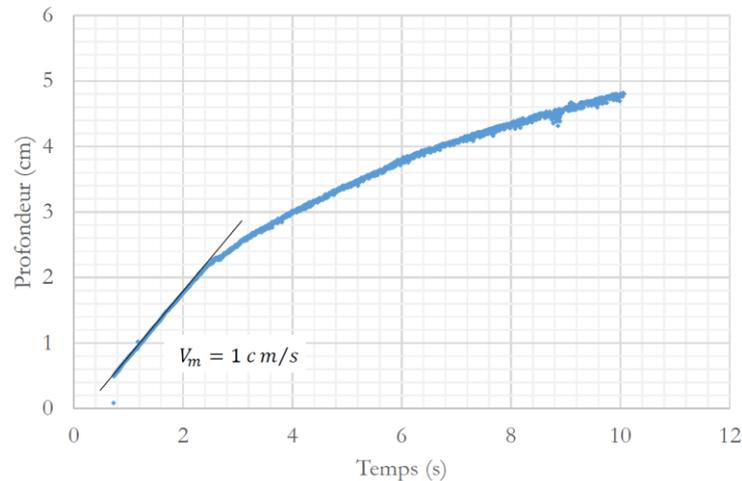


Figure 7 : profondeur et vitesse d'ablation,  $T_J = 70^\circ\text{C}$ ,  $V_J = 4,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $D_J = 1 \text{ mm}$



Figure 8 : forme de cavité obtenue par Sato et al. [1]

Jet étain/étain,  $T_j=350^\circ\text{C}$ ,  $V_j=4,8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $D_j=10\text{mm}$ , épaisseur solide = 10cm

## 4. Conclusion

Ce travail préliminaire vise à étudier la phénoménologie d’ablation d’une paroi par un jet chaud afin d’apporter des éléments à la conception du récupérateur de corium placé en fond de cuve du futur réacteur à neutron rapide refroidi au sodium ASTRID. Notons que dans le cas d’ASTRID, les nombres de Reynolds du jet de corium seraient supérieurs à  $10^5$  au lieu de  $10^3$  dans notre étude et les nombres de Prandtl inférieurs à 1, au lieu de 5 ici. Egalement, dans le cas réacteur le jet traverse une phase liquide (sodium) au lieu d’une phase gaz dans notre dispositif expérimental. Ces premiers essais avec l’expérience HAnSOLO constituent une nouveauté car à notre connaissance, il n’existe pas de donnée sur la formation en temps réel de la cavité. De manière à se rapprocher des conditions « réacteur », des futurs essais sont planifiés avec des diamètres de jet plus grands, des nombres de Reynolds plus élevés, d’autres couples liquides/solides. Enfin, il nous apparaît également important de pouvoir modéliser l’hydrodynamique et les transferts dans la zone hors impact et pour cela, il faudra appréhender le problème du film ruisselant ascendant.

## Références

- [1] K. Sato, A. Furutani, M. Saito, M. Isozaki, K. Sukanuma, 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, Vol. 132, Issue 2, 1991, Pages 171-186.
- [2] A. Furutani, S. Imahori, K. Sato, M. Saito, Erosion behavior of a solid plate by a liquid jet – effect of molten layer, Nuclear Engineering and Design, Volume, 132, 1991, Pages 153-169G.
- [3] M. Swedish, M. Epstein, and John H. Linehan et al. Surface ablation in the impingement region of a liquid jet, AIChE Journal, Vol. 25, 630–638, 1979.
- [4] L. Roberts, On the melting of a semi-infinite body of ice placed in a hot stream of air, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 4, 1958, pp 505-528.
- [5] J.-M. Delhaye, Jump conditions and entropy sources in two-phase systems, Local instant formulation, International Journal of Multiphase Flow, 1:395–409, 1974.

## Remerciements



The research leading to these results has received funding from the Euratom research and training programme 2014-2018 under grant agreement No 754501