

# Étude de l'ablation d'une paroi solide par un jet liquide

A. LECOANET<sup>a,b,\*</sup>, N. RIMBERT<sup>a</sup>, F. PAYOT<sup>b</sup>, M. GRADECK<sup>a</sup>

a. Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000, Nancy, France

b. CEA, DEN, Cadarache, DTN, SMTA, LEAG, F-13108, Saint-Paul-Lez-Durance, France

\*. Auteur correspondant : alexandre.lecoanet@univ-lorraine.fr

## Résumé :

*Cet article s'intéresse à l'ablation d'un solide impacté par un jet. Le contexte est celui de la mitigation d'accident grave pour un RNR-Na au cours duquel un corium peut se former. Sa température (> 2000 K) serait assez élevée pour ablater les structures de l'enceinte et donc rompre la deuxième barrière de confinement d'un réacteur nucléaire. Pour en limiter la masse et éviter une possible re-criticité, il est important d'évacuer le corium du cœur aussi rapidement que possible. Pour ce faire, des tubes de déchargements débouchant en dehors du cœur, en partie basse de l'enceinte, permettent de le décharger vers un récupérateur. Le récupérateur permet d'améliorer la gestion ultérieure du corium (refroidissement, re-criticité) en l'étalant. Lors de sa relocalisation vers le récupérateur, le corium traverse le fluide caloporteur (Na) sous forme de jet. Une fragmentation du jet est probable, mais il est aussi possible que tout ou partie du jet reste cohérent et que le récupérateur soit impacté directement. Une ablation significative peut s'en suivre, surtout si le corium et le récupérateur sont tous deux métalliques. Pour pouvoir dimensionner au mieux le récupérateur, ce cas « majorant » est le sujet des travaux présentés. Pour simuler le couple corium/récupérateur, le système eau/glace transparente est utilisé. Ainsi, une visualisation directe en temps réel, de l'interface entre le jet et la paroi solide est possible et permet d'obtenir l'évolution de la vitesse d'ablation au point d'impact du jet et son évolution au cours du temps.*

## Abstract :

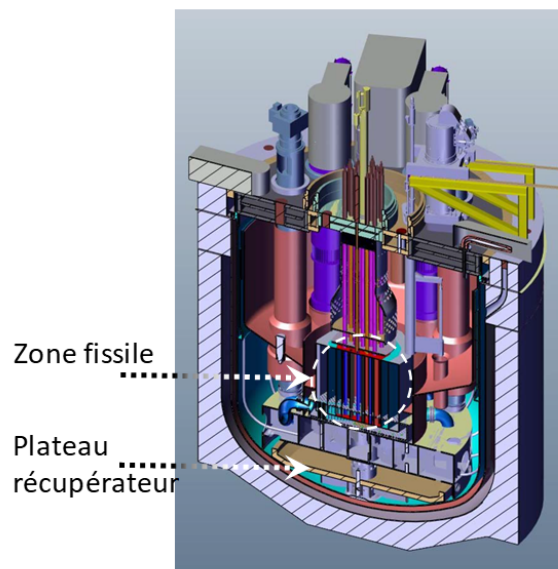
*Among the new safety features of a future European sodium cooled fast breeder the potential use of discharge tubes and a core-catcher is studied. In case of use of the discharge tubes, the possibility of the impact of a coherent jet onto the core-catcher cannot be ruled out. If it happens substantial ablation can occur. The work presented here aims at enhancing the understanding of the ablation of a solid by a hot liquid jet in this context. To tackle this issue, hot water and transparent ice are used. This allows the real-time tracking of the ablation front which has never been done before. The preliminary results presented here demonstrate the relevance of this approach. It has been confirmed that several regimes of ablation exist and that the ablation rate during the first one is constant. Future developments are foreseen to push the analysis beyond and get closer to the industrial case.*

**Mots clefs : Ablation, ESFR, corium, Impact de jet, Changement de phase, Interaction corium-structure, Récupérateur de corium**

## 1 Introduction :

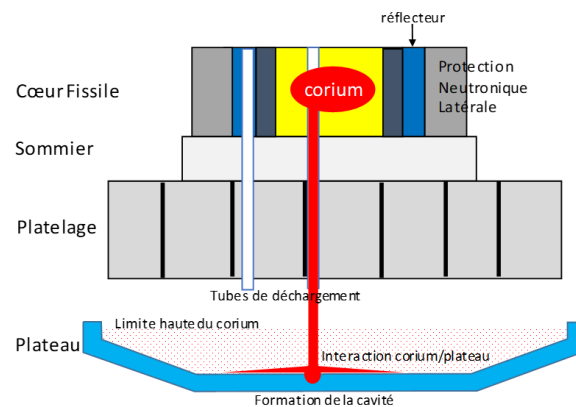
Les accidents nucléaires de Three Mile Island et de Fukushima ont démontré que la formation d'un corium était possible. Cette éventualité est maintenant prise en compte dès la phase d'étude de tout nouveau réacteur. Dans le cas d'un futur réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na) il est prévu de mettre en place de tubes de déchargement en cœur, appelés Dispositifs Complémentaires de Sûreté-Mitigation-Tubes de transfert (DCS-M-TT) [1]. Leur but est d'évacuer le corium de la zone fissile aussi rapidement que possible. Pour améliorer la prise en charge future du corium, notamment son refroidissement, il faut l'étaler au maximum. Pour ce faire et protéger la cuve, un récupérateur de corium est disposé en dessous de la structure de maintien du cœur (Fig. 1). Lorsque le jet de corium débouche des DCS-M-TT, il entre en contact avec le corium. Du fait de la différence de température entre le corium ( $> 2000\text{K}$ ) et le sodium ( $670\text{K}$  en service) dont la température d'ébullition est de  $1150\text{K}$  [2], une évaporation explosive est possible (mais ce n'est pas considéré ici). Après cette phase, le jet traversant le sodium devrait se fragmenter, mais il se peut que, localement du sodium reste en phase gazeuse autour du jet et préserve en partie l'intégrité du jet. Ainsi, la longueur de cohérence du jet de corium traversant le sodium est difficile à estimer. Pour s'assurer que le récupérateur reste opérationnel dans tous les cas de figure, il faut étudier la possibilité de l'impact direct de corium liquide sur le récupérateur ainsi que l'ablation qui peut s'en suivre. C'est dans ce cadre que la présente étude est menée.

FIGURE 1 – Coupe du démonstrateur industriel ASTRID qui est un exemple de réacteur nucléaire à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na) incluant des DCS-M-TT ainsi qu'un récupérateur de corium parmi ses dispositifs de sécurité.



La majorité des études qui ont été menées sur l'ablation d'une paroi solide par un jet liquide l'ont été dans un cadre industriel similaire au travail présenté ici. Néanmoins, ces études se sont centrées sur l'ablation d'une paroi de faible épaisseur. Deux grands types d'études expérimentales ont été menées. Les premières se sont basées sur une modélisation physique étayée par des expériences avec des matériaux simulant (eau/glace, eau/octane [3, 4], eau/paraffines [5]). Ces études ont montré que la fonte réduisait les transferts thermiques à l'impact et ce d'autant plus si les deux matériaux constitutifs du jet

FIGURE 2 – Coupe schématique d'un réacteur nucléaire équipé de tubes de déchargement et d'un récupérateur de corium en situation accidentelle.



et de la paroi impactée sont différents ; une couche de liquide provenant du solide se forme et isole en partie thermiquement ce dernier. Ces études ont été complétées par des études portant sur des systèmes prototypes plus représentatifs (NaCl/Sn [6], Sn/Sn [7] Fe/acier,  $UO_2$ /acier et  $ZrO_2$ /acier [8]). Le but de ces travaux était de prédire simplement la vitesse d'ablation de la paroi solide. Pour ce faire, Sato et al. [7] ainsi que Saito et al. [6] ont corrélé leurs résultats sous forme d'une relation donnant le nombre de Nusselt à l'impact en fonction des nombres de Reynolds et de Prandtl, similairement à ce qui est obtenu lors d'échanges thermiques par convection forcée.

Les études précédemment menées ont fait l'hypothèse que la vitesse d'ablation restait constante tout au long du processus. Néanmoins Saito et al. [6] ont montré que, passé une certaine profondeur de cavité, la vitesse d'ablation commençait à décroître. Ils ont appelé ce phénomène « pool-effect », car il apparaît au moment où le liquide ne peut plus sortir de la cavité sous forme de film. Alors, le liquide remplit la cavité, changeant les conditions d'impact du jet. Le but de cette étude, qui s'inscrit dans le projet H2020 (ESFR-SMART), est de donner des éléments de dimensionnement pour le récupérateur de corium d'un futur RNR-Na européen.

## 2 Différents scénarios possibles à l'impact :

Lors de l'impact d'un jet sur une paroi solide, quatre cas sont à distinguer suivant notamment la température du jet ainsi que des températures de fusion et de solidification des deux matériaux en présence. Ces cas sont représentés en Fig. 3.

**Cas n°1 :** Dans cette configuration, ni le solide ni le jet ne changent de phase. Cela peut se produire lorsque l'énergie cédée par le jet pendant l'impact n'est pas suffisante pour faire augmenter la température de la paroi solide jusqu'à son point de fusion ni pour faire baisser celle du jet en dessous de sa température de solidification. Ce cas est peu probable lors d'un accident nucléaire grave ; mais lors de tests avec des simulants, on peut se trouver dans cette configuration lors des premiers instants de l'impact. Un délai peut ainsi potentiellement être observé avant qu'il n'y ait ablation de la paroi impactée.

**Cas  $n^o2$  :** Dans ce cas, l'énergie extraite du jet est suffisante pour lui faire atteindre sa température de solidification, mais est insuffisante pour amener celle du solide à sa température de fusion. Cela peut arriver lors des premiers instants de l'impact. Pour savoir si cette croûte peut se former, Sato et al. [7], citant Epstein [9], proposent d'utiliser l'équation (1). Le bloc impacté ne possédant pas de source de chaleur, sa température ne peut qu'augmenter et, si la température du jet est supérieure à la température de fusion du solide, la croûte formée finirait par fondre de nouveau. L'ablation continuera alors suivant le cas  $n^o3$ . Pour évaluer le retard à l'ablation ( $t_{vie}$ ) dû à cette croûte, Sato et al. proposent d'utiliser l'équation (2).

$$T_{contact} = T_s + \frac{T_j - T_s}{1 + \sqrt{\frac{\rho_s C_{ps} k_s}{\rho_j C_{pj} k_j}}} \quad (1)$$

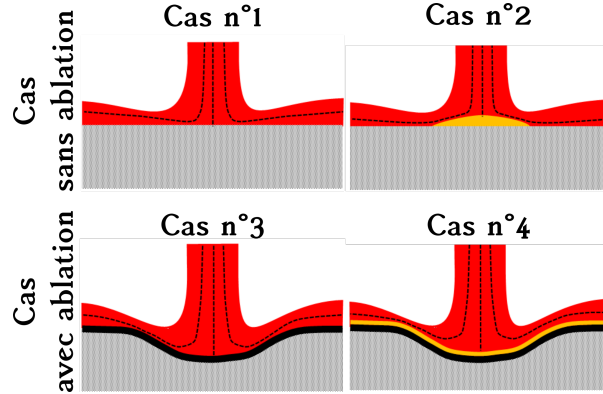
$$t_{vie} \sim \frac{\pi k_s^2 (T_{f,s} - T_s)^2}{4 \alpha_s q^2} \quad (2)$$

**Cas  $n^o3$  :** Le jet fournit assez d'énergie au solide pour lui faire atteindre sa température de fusion, mais n'en perd pas assez pour lui-même atteindre sa température de solidification. Il y a ablation de la paroi solide. C'est ce qui peut se passer si le jet et le solide impactés sont de même nature. Dans le cas d'un accident nucléaire grave, ce cas correspond à l'impact de la partie métallique du corium sur un récupérateur métallique. Cette configuration a notamment été étudiée par Sato et al. [7] et Powers [8]. Elle se retrouve à chaque fois que le point de fusion du solide impacté est supérieur à la température de solidification du matériau du jet. Si le jet et le solide ne sont pas de même nature, alors le liquide provenant du jet va isoler le solide. Ce mécanisme a été initialement étudié théoriquement par Roberts [10] dans le cas d'un bloc de glace soumis à un jet d'air puis par Swedish et al. [3] et Furutani et al. [5], dans le cadre de l'impact d'un jet liquide.

**Cas  $n^o4$  :** Lorsque la température de solidification du matériaux du jet est supérieure à la température de fusion du matériau de la cible solide, alors il peut se former une croûte sur le solide en-dessous de laquelle ce dernier continuera à fondre. Au-dessus de la paroi solide, il y aura donc une couche de liquide provenant de la fonte du solide sur laquelle reposera une croûte qui peut être plus ou moins stable. Cette dernière isole thermiquement le solide et induit une réduction de la vitesse d'ablation. Ce cas a été étudié théoriquement par Epstein et al. [4] et expérimentalement par [6]. Il peut se rencontrer lors de l'impact de corium composé d'oxydes sur un récupérateur de corium métallique.

Le cas induisant la plus grande vitesse d'ablation est le cas  $n^o3$ . C'est l'objet de notre étude.

FIGURE 3 – Descriptifs des phénomènes possibles lors de l’impact d’un jet de liquide chaud sur une paroi solide.



### 3 Modélisations existantes de la vitesse d’ablation :

Pour modéliser la vitesse de fonte de la paroi, il faut modéliser les transferts entre la phase liquide et la phase solide. On peut appliquer les conditions de saut d’enthalpie à la paroi [11]. On obtient en notant  $V_f$  la vitesse de fonte comprise comme la vitesse de déplacement de l’interface solide liquide, et  $q$  le flux de chaleur.

$$q_j - q_s = L\rho_s V_f \quad (3)$$

Le flux de chaleur dans le solide s’exprime comme suit.

$$q_s = \rho_s C_{ps} V_f (T_{f,s} - T_{0,s}) \quad (4)$$

Pour caractériser les transferts convectifs entre le jet et le solide lorsqu’il y a fonte, un coefficient effectif de transfert ( $h_{eff}$ ) est défini.

$$q_j = h_{eff} (T_j - T_{f,s}) \quad (5)$$

La vitesse d’ablation peut alors être exprimée.

$$V_f = \frac{h_{eff} (T_j - T_{f,s})}{\rho_s [L + C_{ps} (T_{f,s} - T_{0,s})]} \quad (6)$$

Le coefficient  $h_{eff}$  est le plus souvent exprimé à l’aide d’une corrélation expérimentale du type de l’équation (7). Les expressions de  $Re$  et  $Nu$  changent avec les méthodes.

$$Nu_f = K Re^n Pr^m \quad (7)$$

On peut citer l’approche de Swedish et al. [3] qui, pour rendre compte de l’ablation d’un solide par un jet de même nature, proposent d’utiliser une corrélation préexistante pour obtenir un coefficient d’échange convectif et de la corriger pour inclure l’effet de la fonte et obtenir le  $h_{eff}$ . La corrélation

qu'ils préconisent est celle de Sitharamayya et al. [12], équation (8) dans laquelle les nombres de Reynolds et de Prandtl du jet sont calculés à la sortie de la buse. Les propriétés thermiques utilisées pour les calculs sont évaluées à la température  $T = (T_{j,0} + T_{f,s}) / 2$ . La correction [13] proposée par Epstein [13] relie les nombres de Nusselt avec et sans fonte en faisant intervenir le nombre de fonte  $B$  défini par l'équation (10). Dans cette analyse, la chaleur sensible représentée par le terme  $C_{p,s} (T_{f,s} - T_{0,s})$  dans l'équation (6) est négligée.

$$Nu = 0.5077 Re^{0.523} Pr^{0.33} \quad (8)$$

$$Nu = \frac{B}{\ln(1+B)} Nu_f \quad \text{avec} \quad Nu = \frac{hd}{k}, \quad Nu_f = \frac{h_{eff} d}{k} \quad (9)$$

$$B = \frac{C_{p,j} (T_{j,0} - T_{f,s})}{L + C_{p,s} (T_{f,s} - T_{s,0})} \quad (10)$$

Une autre étude, faisant référence dans le même cas de figure dans le domaine du nucléaire, est celle menée par Sato et al. [7]. Elle propose de reprendre l'équation (6) et de déterminer empiriquement le coefficient  $h_{eff}$ . Leurs expériences ont été menées avec les couples jet / cible étain / étain et acier inoxydable / acier. Ils obtiennent la corrélation (11) qui donne la vitesse d'ablation (12). Les plages de validité de cette corrélation sont :  $0.0095 < Pr < 0.20$ ,  $4, 1.10^4 < Re < 4, 9.10^5$ . Le nombre de Reynolds utilisé est celui à l'impact évalué avec la vitesse du jet et le diamètre du jet à l'impact (relations (13) et (14))<sup>1</sup>. Cette précision est important dans le cas où le jet est produit par accélération gravitaire, sinon, en première approximation il est possible de prendre les paramètres en sortie de buse.

$$Nu_f = 0.0152 Re^{0.92} Pr^{0.8} \quad (11)$$

$$V_f = 0.0152 \frac{\rho_j C_{p,j} (T_j - T_{f,s}) Re_j^{-0.08} Pr_j^{-0.2} V_j}{\rho_s [L + C_{p,s} (T_{f,s} - T_{s,0})]} \quad (12)$$

$$V_j = \sqrt{V_{0j}^2 + 2gH} \quad (13)$$

$$D_j = D_{0j} \sqrt{\frac{V_{0j}}{V_j}} = D_{0j} \sqrt{\frac{V_{0j}}{\sqrt{V_{0j}^2 + 2gH}}} = D_{0j} \left( 1 + \frac{2gH}{V_{0j}^2} \right)^{-1/4} \quad (14)$$

## 4 Description de l'expérience HANSoLO :

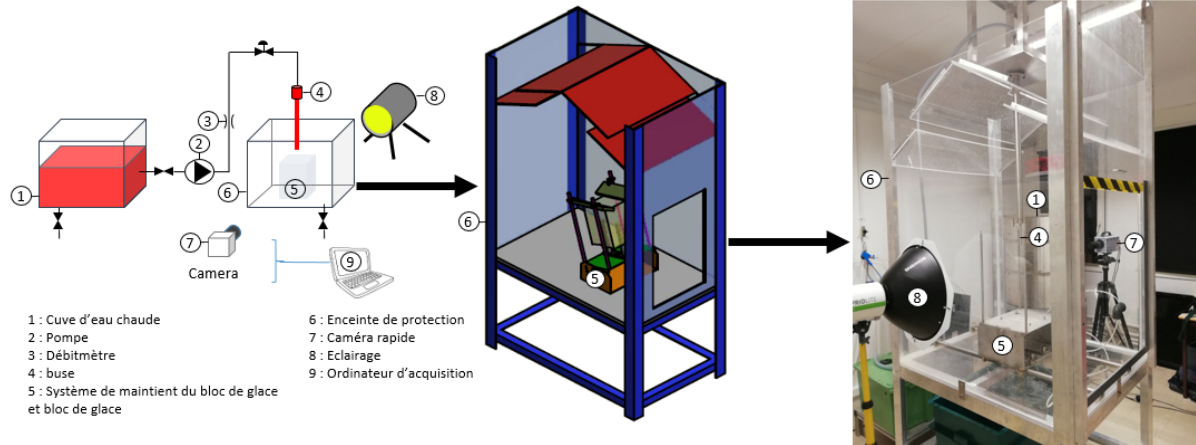
Pour étudier la problématique de l'ablation d'une paroi solide par un jet liquide avec le couple simulant eau / glace transparente l'expérience HANSoLO<sup>2</sup> est en cours de montage au LEMTA. La figure (4) donne, de gauche à droite, le schéma de principe du montage, un schéma de l'enceinte de protection et une photo de l'enceinte existante. Ce dispositif permettra de réaliser des impact avec des diamètres

1. Ces corrections ne prennent pas en compte la tension superficielle.

2. **Hot Ablation** of **Solid** by **Liquid jet** – **Observations**

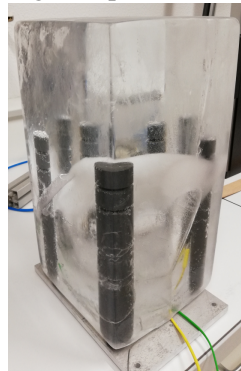
de buse allant jusqu'à 1 cm, des vitesses jusqu'à 10 m/s, des températures jusqu'à 80 °C. Le suivi de l'ablation se fera à l'aide d'une caméra rapide.

FIGURE 4 – Schéma de principe du montage HAnSoLO.



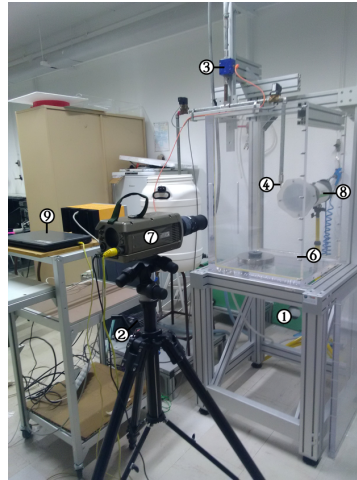
Pour obtenir de la glace transparente, il est important d'assurer une solidification directionnelle et d'empêcher la formation de bulles sur le front de solidification. Dans le but de déterminer la température initiale du bloc de glace des thermocouples seront pris dans le bloc. Seront aussi pris dans le bloc, des dispositifs de maintien (visibles sur la photographie reproduite en figure (5)).

FIGURE 5 – Exemple d'un bloc de glace qui sera utilisé dans l'expérience HAnSoLO.



Pour l'instant, seuls des tests préliminaires ont pu être fait et ce sont ces résultats qui sont présentés ici. Le dispositif utilisé pour effectuer ces premiers tests est similaire au dispositif détaillé en figure (4), la différence majeure étant l'extension des intervalles de variation des variables d'entrées. Ainsi, deux diamètres ont été testés : 1 mm et 1,2 mm et trois températures 30 °C, 50 °C et 70 °C ; les vitesses des jets étant comprises entre 2,5 m.s<sup>-1</sup> et 11 m.s<sup>-1</sup>. Le nombre de Reynolds a ainsi varié entre 3 100 et 32 000, l'intervalle de variation du nombre de Prandtl s'étendant de  $Pr = 2,56$  à  $Pr = 5,4$ . Un autre résultat a été obtenu avec un diamètre de buse de 3,2 mm, une température d'eau de 23 °C, une vitesse en sortie de buse de 5,7 m.s<sup>-1</sup>, ce qui correspond à un nombre de Reynolds de 19 500 et un nombre de Prandtl de 6,5. Tous les tests effectués jusqu'à présent l'ont été avec des vitesses d'enregistrement de 200 images par seconde.

FIGURE 6 – Photographie de l’installation utilisée pour effectuer les premiers tests. La légende est la même que celle de la figure (4).



## 5 Analyse des résultats :

Une succession de régimes a été identifiée. Un exemple de visualisations de l'évolution de la forme de la cavité au cours de l'ablation est donné en figure 7. Le jet commence par s'étaler sur la paroi solide et forme un film ruisselant, puis le jet commence à creuser la paroi solide, une nappe liquide se forme avec un certain angle initial par rapport à la surface ablatée, elle se rapproche ensuite de la paroi et la rejoint. Un arrondissement de la cavité est alors visible à la sortie de la cavité. Nous supposons que cet arrondissement correspond à l'apparition d'un ressaut hydraulique circulaire en sortie de cavité. Lors de cette première phase, beaucoup d'éclaboussures sont produites par le film ruisselant. Ces éclaboussures se réduisent significativement avec l'apparition du ressaut. L'ablation continue jusqu'à ce que le film s'effondre et que la cavité soit remplie d'eau ; c'est le « pool-effect » pendant lequel de l'air est entraîné avec le jet formant une piscine d'eau et de bulles. Le temps de transition est inférieur à la seconde. On reste ensuite en « pool-effect » jusqu'à la fin de l'expérience. Dans le cas présenté en figure (7), la cavité dans la phase initiale prend une forme conique, dans certains tests avec des jets plus fins et chaud, des formes parabolique ont été observées. Nous supposons aussi la possibilité d'un autre régime pour les grandes profondeurs d'ablation dans lequel l'air entraîné avec le jet n'atteindrait pas le fond de la cavité, ce qui changerait l'hydrodynamique dans la cavité, car les bulles générées par l'entraînement d'air agitent le liquide dans la cavité. La figure (8) montre côte à côte une image prise lors des tests au LEMTA et une image rapportée par Sato et al. [7]. On voit clairement des similitudes entre les formes des deux cavités. Néanmoins, Sato et al. n'ont pas fait état dans leur publication de « pool-effect ».

L'analyse des images à l'aide du logiciel libre « ImageJ » nous a permis d'obtenir l'évolution de la profondeur en fonction du temps. Un exemple de cette évolution est donné en figure (9). Dans cet exemple la vitesse d'ablation obtenue avant le « pool-effect » est constante et égale à  $0,23 \text{ cm/s}$  puis elle décroît. Une première analyse semble indiquer que cette décroissance serait linéaire, mais d'autres tests sont nécessaires pour pouvoir l'affirmer avec certitude. L'analyse des résultats déjà obtenus a pu confirmer que la vitesse dans la première phase de l'ablation est constante jusqu'à l'apparition du « pool-effect » comme supposé par Saito et al. [6]. La comparaison des résultats obtenus avec ceux de la méthode proposée par Swedish et al. [3], rappelée plus tôt dans le document, montre un écart relatif maximum



FIGURE 7 – Illustration de l'évolution de la forme de la cavité au cours du temps. Les images correspondent au test effectué avec de l'eau à 23 °C, un diamètre de jet de 3,2 mm et une vitesse de 5,7 m.s<sup>-1</sup>.

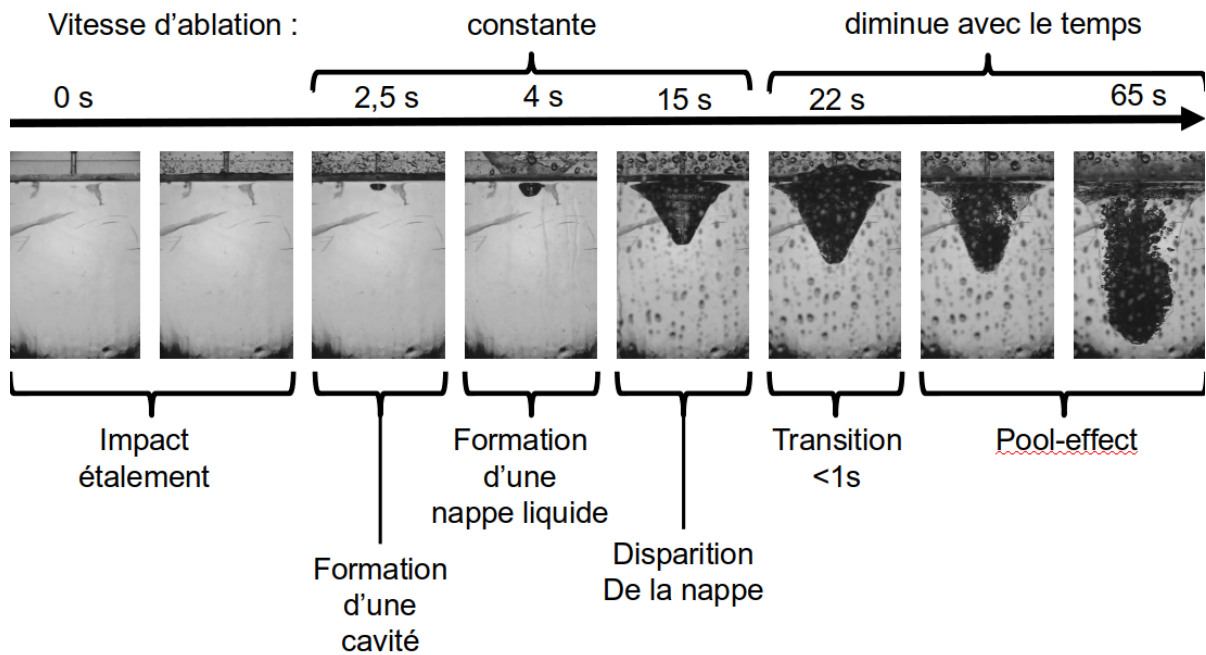


FIGURE 8 – Comparaison entre une photographie de la cavité pendant le « pool-effect » après 65 s d'impact pour le test avec de l'eau à 23 °C, un diamètre de jet de 3,2 mm et une vitesse de 5,7 m.s<sup>-1</sup> (à gauche) et une photographie de la cavité obtenue par Sato et al. [7] lors d'un jet étain/étain d'une température de 350 °C, une vitesse de 4,8 m.s<sup>-1</sup> et un diamètre de 10 mm (à droite).

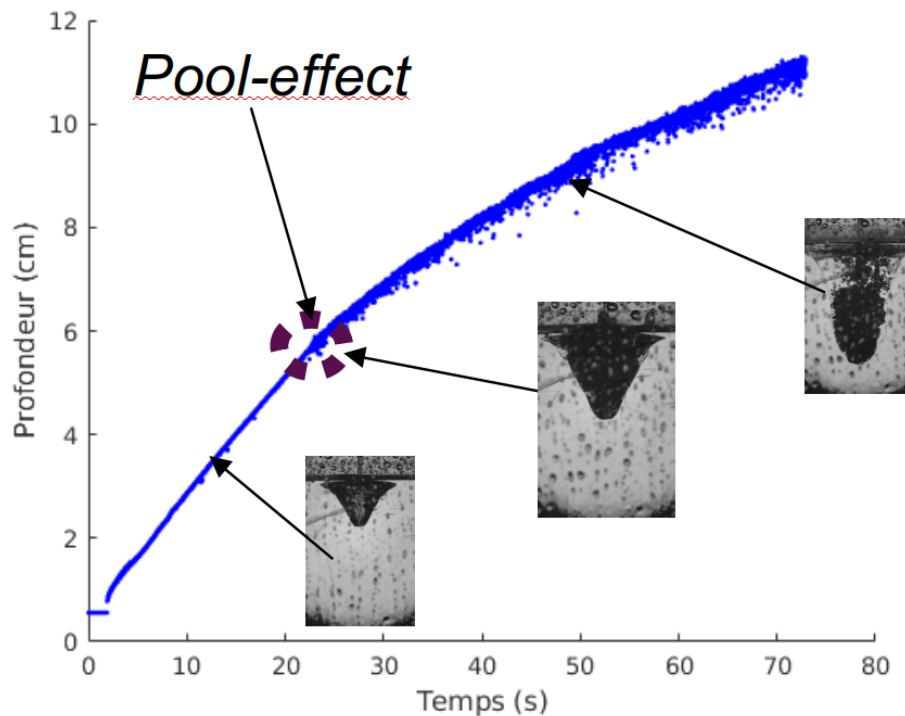


de 31% (erreur calculée en divisant par la valeur expérimentale). La méthode de Swedish et al. [3] sous-évalue systématiquement la vitesse d'ablation. Une première analyse des résultats obtenus, suivant la méthode utilisée par Sato et al. [7] et rappelée dans la section précédente, donne la corrélation suivante pour un diamètre de jet de 1 mm :

$$Nu = 0,121 Re^{0,6} . Pr^{0,8}, \quad Re \in [3, 8.10^3 - 1, 2.10^4], \quad Pr \in [2, 55 - 5, 42] \quad (15)$$

Saito et al. [6], dans l'article où ils nomment le « pool-effect », donnent comme critère d'apparition que la profondeur de la cavité soit supérieure à quatre fois le diamètre du jet. Lors des tests effectués au LEMTA, la profondeur de cavité à laquelle le « pool-effect » apparaît varie de 8 à plus de 30 fois le diamètre du jet. Donc, un meilleur critère que celui proposé par Saito et al. [6], doit être déterminé.

FIGURE 9 – Exemple d'évolution de la profondeur de la cavité au point d'impact dans le cas du test effectué avec de l'eau à 23 °C, un diamètre de jet de 3,2 mm et une vitesse de 5,7 m.s<sup>-1</sup>.



## 6 Conclusion :

L'étude présentée ici vise à donner des éléments de compréhension pour améliorer le dimensionnement du récupérateur de corium d'un futur RNR-Na européen. En situation accidentelle, le nombre de Reynolds attendu à l'impact serait de l'ordre de  $10^6$  et les diamètres de jet d'environ 8 cm. Ainsi, les premiers essais effectués au LEMTA ont démontré la pertinence de l'utilisation du système eau / glace transparente pour étudier le phénomène d'ablation d'une paroi solide par un jet liquide. L'originalité de l'approche présentée réside dans la possibilité de suivre le front d'ablation en temps réel, ce qui, à notre connaissance, est une nouveauté. Les prochains développements ont pour objectif de se rapprocher des conditions réelles en augmentant notamment les nombres de Reynolds accessibles ainsi que les diamètres de jet. Aussi, pour enrichir les réflexions concernant la géométrie du récupérateur de corium, des impacts sur des parois inclinées seront menées. Le but final étant d'arriver à prévoir l'apparition du régime de « pool-effect » et nous pensons que ce ne sera possible qu'en améliorant notre compréhension de l'hydrodynamique du film ruisselant remontant la cavité formée par l'ablation et les transferts thermiques associés.

## 7 Glossaire :

ASTRID	<i>Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration</i>
DCS-M-TT	Dispositif Complémentaire de Sûreté-Mitigation-Tube de transfert
ESFR-SMART	<i>European Sodium Fast Reactor Safety Measures Assessment and Research Tools</i>
HAnSoLO	<b>H</b> ot <b>A</b> blatio <b>N</b> of <b>S</b> olid by <b>L</b> iquid jet – <b>O</b> bservations
LEMTA	Laboratoire Énergies et Mécanique Théorique et Appliquée
RNR-Na	Réacteur à Neutrons Rapides (RNR) refroidi au sodium (Na)

## 8 Nomenclature :

### Lettres latines

$B$	Nombre de fonte	$\frac{C_{p,j}(T_{j,0}-T_{f,s})}{L+C_{p,s}(T_{f,s}-T_{s,0})}$	-
$C_p$	Capacité thermique massique	-	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$d$	Diamètre du jet	-	$m$
$h$	Coefficient de transfert thermique	-	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$k$	Conductivité thermique	-	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$L$	Chaleur latente de fusion	-	$J.kg^{-1}$
$Nu$	Nombre de Nusselt	$Nu = \frac{hl}{k}$	-
$Pr$	Nombre de Prandtl	$Pr = \frac{\mu/\rho}{k/\rho C_p}$	-
$q$	Flux thermique	$h_{eff}(T_j - T_{f,s})$	-
$Re$	Nombre de Reynolds	$Re = \frac{\rho V l}{\mu}$	-
$t$	Temps	-	$s$
$T$	Température	-	$K$
$V$	Vitesse	-	$m.s^{-1}$

### Indices

0	Initial
$eff$	Effectif (avec fusion)
$f$	Fusion
$j$	Jet
$s$	Solide

### Lettres grecques

$\alpha$	Diffusivité thermique	$\frac{k}{\rho C_p}$	$m^2.s^{-1}$
$\mu$	Viscosité dynamique	-	$Pa.s = kg.m^{-1}.s^{-1}$
$\nu$	Viscosité cinématique	$\frac{\mu}{\rho}$	$m^2.s^{-1}$
$\rho$	Masse volumique	-	$kg.m^{-3}$

## Références

- [1] F. Bertrand, N. Marie, A. Bachrata, V. Brun-Magaud, J.B. Droin, X. Manchon, K. Herbreteau, B. Farges, B. Carluéc, S. Poumerouly and D. Lemasson, Status of severe accident studies at the end of the conceptual design of ASTRID : Feedback on mitigation features, Nuclear Engineering and Design, 326 (2018) 55–64.
- [2] C. Latgé, Les propriétés physiques et chimiques du sodium, in : Commissariat à l'énergie atomique - Direction de l'énergie nucléaire Les réacteurs nucléaires à caloporteur sodium, CEA Saclay, Éditions du Moniteur, Paris, France, 2014, pp. 23–27.
- [3] M. J. Swedish, M. Epstein, J. H. Linehan, G. A. Lambert, G. M. Hauser, L. J. Stachyra, Surface ablation in the impingement region of a liquid jet, AIChE Journal, 24 (1979) 630–638.
- [4] M. Epstein, M. J. Swedish, J. H. Linehan, G. A. Lambert, G. M. Hauser, L. J. Stachyra, Simultaneous melting and freezing in the impingement region of a liquid jet, AIChE Journal, 26 (1980) 743–751.
- [5] 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, 132 (1991) 153–169.
- [6] M. Saito, K. Sato, A. Furutani, M. Isozaki, S. Imahori, Y. Hattori, Melting attack of solid plates by a high-temperature liquid jet – Effect of crust formation, Nuclear Engineering and Design, 121 (1990) 11–23.
- [7] 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 (1991) 171–186.
- [8] D. A. Powers, Erosion of Steel Structures by High-Temperature Melts, Nuclear Science and Engineering, 88 (1984) 357–366.
- [9] M. Epstein, The growth and decay of a frozen layer in forced flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, 19 (1976) 1281–1288.
- [10] L. Roberts, On the melting of a semi-infinite body of ice placed in a hot stream of air, Journal of Fluid Mechanics, 4 (1958) 505–528.
- [11] J. M. Delhaye, Jump conditions and entropy sources in two-phase systems. Local instant formulation, International Journal of Multiphase Flow, 1 (1974) 395–409.
- [12] S. Sitharamayya, K. S. Raju, Heat transfer between an axisymmetric jet and a plate held normal to the flow, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 47 (1969) 365–368.
- [13] M. Epstein, The effect of melting on heat transfer to submerged bodies, Letters in Heat and Mass Transfer, 2 (1975) 97–103.

## 9 Remerciements :



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