

Etude de l'influence de la solidification sur le processus de fragmentation d'une goutte de métal liquide dans l'eau

Miloud Hadj Achour, Nicolas Rimbert, Michel Gradeck

▶ **To cite this version:**

Miloud Hadj Achour, Nicolas Rimbert, Michel Gradeck. Etude de l'influence de la solidification sur le processus de fragmentation d'une goutte de métal liquide dans l'eau. 25ème Congrès Français de thermique, May 2017, Marseille, France. hal-01579128

HAL Id: hal-01579128

https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01579128

Submitted on 30 Aug 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude de l'influence de la solidification sur le processus de fragmentation d'une goutte de métal liquide dans l'eau

Miloud HADJ ACHOUR[1,2,*], Nicolas RIMBERT[1,2], Michel GRADECK[1,2]

[1] LEMTA, UMR 7563, Université de Lorraine, Vandœuvre-Lès-Nancy, 54518, France
[2] LEMTA, UMR 7563, CNRS, Vandœuvre-Lès-Nancy, 54518, France
[*](auteur correspondant : miloud.hadj-achour@univ-lorraine.fr)

Résumé - Cette étude porte sur la compréhension fine des phénomènes de fragmentation liquide-liquide et a pour objectif principal l'analyse et la modélisation de l'interaction corium-eau qui est une possibilité dans la progression d'un accident grave d'une centrale nucléaire. Des expériences de fragmentation de gouttes de métal liquide dans de l'eau sont menées dans le but de comprendre l'influence des transferts thermiques et de la solidification sur les processus. Une visualisation rapide permet de suivre l'atomisation des gouttes ; les fragments solides sont ensuite tamisés pour déterminer des statistiques de taille. Les résultats montrent clairement une influence importante de la solidification sur le processus de fragmentation et la distribution finale des gouttes.

Nomenclature

Cp	capacité thermique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
D	diamètre, m
Hf	chaleur de fusion, J/kg
k	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
MMD	diamètre moyen, m
q"	flux de chaleur, W/m^2
S	partie symétrique du tenseur gradient de vitesse
SMD	diamètre de Sauter, m
t	temps, s
T	température, K
U	vitesse, m/s
Pr	nombre de Prandtl
Re	nombre de Reynolds
We	nombre de Weber
Oh	nombre d'Ohnesorge
Symboles grecs	
δ	épaisseur de la croûte, m
μ	viscosité, Pa.s
ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
σ	tension de surface, N/m
Ω	partie antisymétrique du tenseur gradient de vitesse
Indices	
0	conditions initiales
A	eau (milieu ambiant)
L	métal liquide
app	apparent
elas	élastique (élasticité de la croûte)
frag	fragmentation
fus	fusion
sup	surchauffe du métal (T_L-T_{fus})

1. Introduction

L'un des accidents graves que peut subir un réacteur nucléaire est la fusion du cœur. Suite à cela, en cas de percement de la cuve, un jet de corium pourra potentiellement interagir avec l'eau contenu dans le puits de cuve. Cette interaction conditionne la formation du lit de débris en fond de cuve et finalement son refroidissement. Dans ce cas, il s'agit de comprendre les mécanismes de fragmentation d'un jet ou d'une goutte en vue de leur modélisation. Si le processus de fragmentation d'une goutte a été largement étudié dans le passé par Hsiang and Faeth [1], Landeau et al. [2] et Nicholls [3], notamment dans la configuration liquide/gaz avec un rapport de densité élevé ou dans le cas liquide/liquide avec un rapport de densité faible, peu de résultats expérimentaux existent dans le cas des rapports de densité intermédiaires, Gelfand [4], Kim et al. [5]. Nos objectifs sont de décrire les mécanismes de dispersion d'une phase dans une autre et d'analyser les mécanismes de fragmentation pour un rapport de densité de 8.

Les modes de fragmentation ont été identifiés visuellement et dépendent principalement du nombre de Weber hydrodynamique, du nombre d'Ohnesorge et du nombre de Reynolds :

$$We = \frac{\rho_A D_0 U_L^2}{\sigma} \quad , \quad Oh = \frac{\mu_L}{\sqrt{\sigma \rho_L D_0}} \; , \; \mathrm{Re} = \frac{\rho_A D_0 U_L}{\mu_L} \tag{1}$$

Afin de prendre en compte l'effet de la solidification sur la tension de surface apparente, un nombre de Weber modifié est proposé. Il prend en compte l'effet du transfert thermique et de la solidification via un modèle basé sur l'hypothèse de la formation d'une croûte solide.

Dans chaque configuration les fragments sont récupérés puis tamisés. De la distribution finale des particules, des grandeurs telles que la moyenne, le diamètre de Sauter sont calculées. Ces résultats nous permettent de mesurer l'influence de la température du réfrigérant (l'eau) sur le processus de fragmentation.

Après une présentation du dispositif expérimental et du plan d'expériences, les résultats expérimentaux seront discutés. Une simulation numérique directe est également abordée en utilisant le code open source Basilisk développé par Popinet [7]. Finalement, le modèle de solidification basé sur l'hypothèse de la formation d'une croûte solide sera appliqué afin d'analyser les données expérimentales.

2. Dispositif expérimental

L'expérience consiste en un système générateur de gouttes à la demande, d'une piscine d'eau de 500 litres, équipée d'un système de contrôle de température, d'un équipement de tamisage, d'une caméra rapide afin de suivre la déformation et la fragmentation de la goutte ainsi que d'un projecteur à LED, voir Figure 1.

Le contact intempestif eau/métal en fusion peut provoquer des explosions de vapeur, phénomène physique résultant de la vaporisation de l'eau, avec projections de métal liquide et expansion volumique créant une onde de pression. Afin d'éviter ces risques et surtout dans le but d'utiliser des instruments optiques nous avons opté pour un alliage à bas point de fusion, le métal de Field. Le métal de Field est alliage eutectique d'indium, d'étain et de bismuth avec une température de fusion de 62°C. Les propriétés physiques ont été mesurées au sein de notre laboratoire, voir Tableau 1.

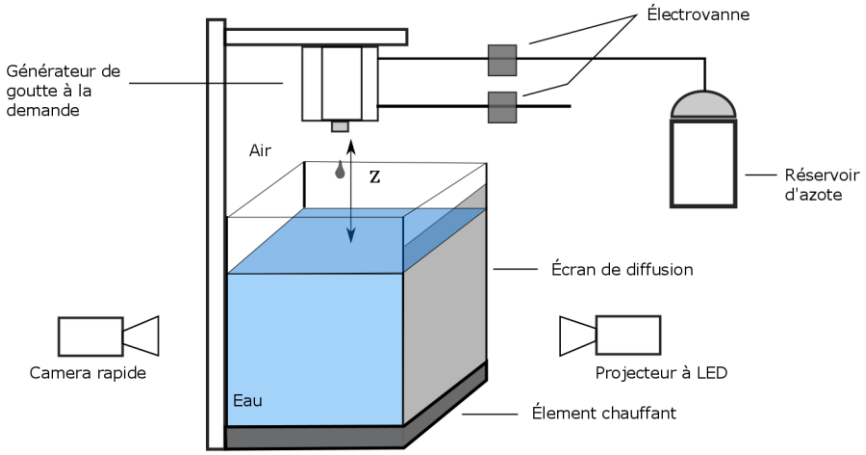


Figure 1. *Dispositif expérimental*

L'une des particularités du métal est sa tension de surface importante, σ = 0.4 N/m. Cette propriété physique est très sensible à la température et à l'oxydation, Xu et al. [8]. Comme on peut le remarquer sur la Figure 2, les gouttes formées ne sont pas sphériques et présentent une

forme particulière, assez proche d'une larme. Afin d'assurer la reproductibilité des expériences nous avons défini un rapport géométrique pour valider les gouttes avec L/D = 2, voir Figure 2. Lors des injections nous avons obtenu une marge d'erreur de 4 %.

	ρ	k	μ	Cp	Hf
	$kg.m^{-3}$	W/(m.k)	Pa.s	J/(Kg.K)	J/Kg
Métal de Field	7994	5.44	0.01	300	26415
Eau	997	0,6071	0.001	4185	334000

Tableau 1 : Propriétés physiques du métal de Field et de l'eau

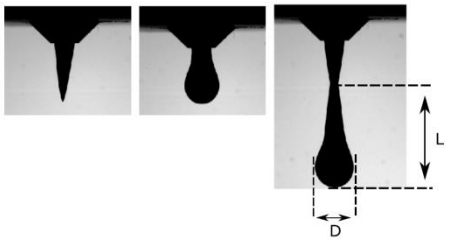


Figure 2. *Goutte formée au niveau de la buse juste avant le détachement.*

3. Plan d'expériences

Un plan d'expériences de 24 essais a été effectué, voir Tableau 2. Les gouttes ont une masse de 0.27g (D_0 = 4mm) et une température initiale de 85°C. Pour chaque nombre de We, la température de la piscine d'eau est fixée à 28°C, 40°C et enfin 50°C. 50°C représente la température maximale permise pour l'eau afin d'obtenir des fragments solides, au-delà le métal reste longtemps à l'état liquide avant la récupération. La vitesse initiale des gouttes avant leur pénétration dans l'eau est variée de 0.5 m/s à 3.5 m/s. Afin de converger statistiquement, un nombre important de gouttes est nécessaire pour chaque Weber (de l'ordre de 200). La vitesse est calculée à l'aide de la hauteur de chute, sans tenir compte des effets de trainée qui sont ici négligeables :

$$U = \sqrt{2gz} \tag{2}$$

We	*z (cm)*	*U (m/s)*	*Re*
118	60	3.43	13809
99	50	3.13	12606
79	40	2.80	11275
59	30	2.42	9765
39	20	1.98	7973
20	10	1.40	5637

Tableau 2 : Conditions initiales des expériences

Afin d'appréhender la dynamique temporelle, Ranger et Nicholls [3] ont établi expérimentalement un temps caractéristique de fragmentation donné par la relation suivante :

$$t_{frag} = \frac{U_0\left(\frac{\rho_L}{\rho_A}\right)}{D_0} \tag{3}$$

Selon la littérature le temps de fragmentation observé expérimentalement d'une goutte liquide dans un gaz est d'environ cinq fois le temps de Ranger et Nicholls [3]. Dans ce qui suivra, le temps physique sera normalisé par le temps de Ranger et Nicholls [3],

$$t^* = \frac{t}{t_{frag}} \tag{4}$$

4. Résultats expérimentaux

4.1. L'impact de la goutte et les régimes de fragmentation

Sur la Figure 3, on observe l'impact d'une goutte de métal de Field sur la surface libre de l'eau. Vraisemblablement, on n'observe aucune déformation ni formation de cavité. Ainsi nous supposons que toute l'énergie cinétique initiale est transférée dans la déformation et la création de surface lors de la fragmentation.

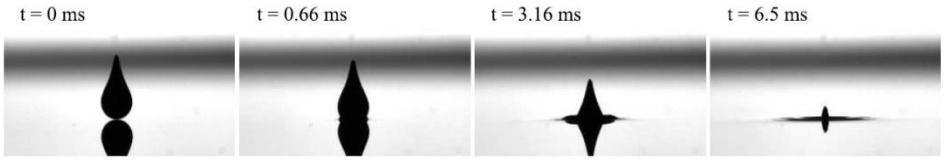


Figure 3. *Impact de la goutte de métal liquide à la surface de l'eau*

La goutte ayant pénétré la piscine d'eau, se déforme en un sac sphérique mince muni d'un anneau liquide épais dont le rayon augmente avec le temps. Par la suite, une instabilité de Taylor se développe à l'interface du sac et des trous apparaissent avec la formation de ligaments qui se fragmentent en produisant des fines gouttelettes. Enfin, l'anneau liquide se fragmente à son tour sous l'effet d'une instabilité de Rayleigh plateau produisant des gouttelettes avec des tailles plus importantes, voir Figure 4.

En fonction de l'intensité des perturbations hydrodynamiques définie par le nombre de Weber, la goutte peut soit se déformer si le nombre de Weber est en dessous d'une certaine valeur où se fragmenter au delà. Cette limite de fragmentation est appelée Weber critique et elle est établie expérimentalement à We=12 pour une goutte sphérique. On peut voir différents cas Figure 5 : pour We < 12 nous avons une déformation de la goutte alors que pour We >12, une fragmentation. Nous avons observé deux régimes de fragmentation, le premier pour un intervalle de We entre 12 et 20 qui est dû à un mécanisme d'étirement de la goutte et le second pour un We entre 20 et 120, dû à la formation d'un sac et son éclatement. Ce dernier est nommé régime de fragmentation en sac, puisque la goutte se déforme en un sac mince puis se fragmente. Dans la Figure 6, nous avons obtenu une goutte solidifiée dans la forme sac avec les conditions suivantes : We = 40, T_L = 85 °C et T_A = 20 °C. Dans ce dernier régime, la goutte se déforme pour former une nappe creuse (forme d'une demi sphère), l'épaisseur de la nappe diminue jusqu'au moment où elle se perce et génère de fines gouttelettes. Au moment de la rupture, la nappe est percée en plusieurs endroits, comme montré Figure 7. Les ligaments constitués forment une structure de type « toile d'araignée », suivant un processus de restructuration et de drainage, jusqu'à leur rupture. Malgré la déformation de la goutte, une grande quantité de volume reste dans l'anneau liquide.

La Figure 8, présente les résultats numériques obtenus par DNS[1], on remarque qu'ils sont fidèles aux expériences. Le critère lambda 2 nous permet de clairement d'identifier le cœur des

[1] DNS : Direct Numerical Simulation

structures tourbillonnaires, qui sont le mécanisme responsable de la déformation des gouttes, voir thèse de Castrillon Escobar [9]. Ce critère consiste à chercher les valeurs propres du tenseur $S^2+\Omega^2$. Les zones où les valeurs propres sont négatives ($\lambda 2 < 0$) correspondent à des régions à pression minimale locale due au mouvement tourbillonnaire.

Dans l'air le rapport de densité est d'environ 1000 et le mécanisme de déformation est dû à la répartition de pression alors que dans le cas d'une goutte de métal dans l'eau le rapport de densité est seulement de 8 à 10, donc l'énergie contenue dans les structures tourbillonnaires est suffisante pour déformer la goutte jusqu'à sa fragmentation.

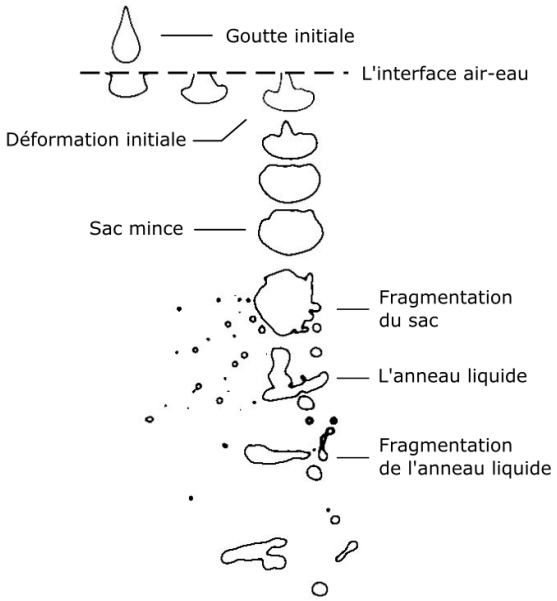


Figure 4. *Déformation puis fragmentation d'une goutte de métal liquide, We = 59.*

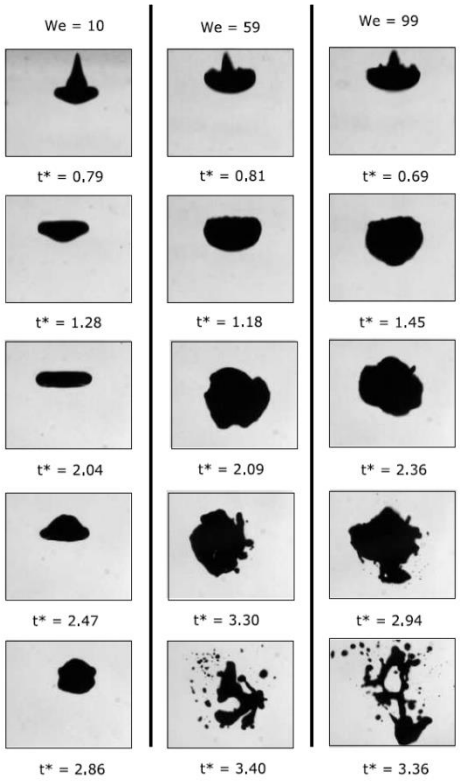


Figure 5. *Régimes de fragmentation*

Dans les Figure 9 et 10, nous avons tracé la moyenne et le diamètre de Sauter obtenus à la suite du tamisage. De ces résultats on peut clairement établir une corrélation entre d'une part le régime de fragmentation, la température du réfrigérant et le taux de fragmentation. Le rapport trouvé entre le diamètre moyen et le diamètre de Sauter est entre 1 et 1,5 ce qui est cohérent avec les résultats de littérature Jalaal and Mehravaran [10]. La valeur maximale est de 0,5 pour We = 20, puisque c'est un régime de fragmentation par étirement les gouttes ont une probabilité importante de se séparer en deux. Pour des nombres de Weber plus importants, le taux de fragmentation augmente. Lorsque la température de l'eau diminue, une croute solide se forme. Ainsi la taille des plus fines goutteles sera limitée par l'épaisseur de croûte formée. Cette croute va jouer le rôle d'une peau élastique qui va s'ajouter à l'effet de la tension de surface.

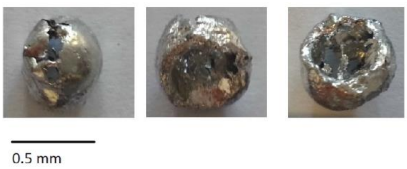


Figure 6. Goutte solidifiée dans l'étape de déformation en sac

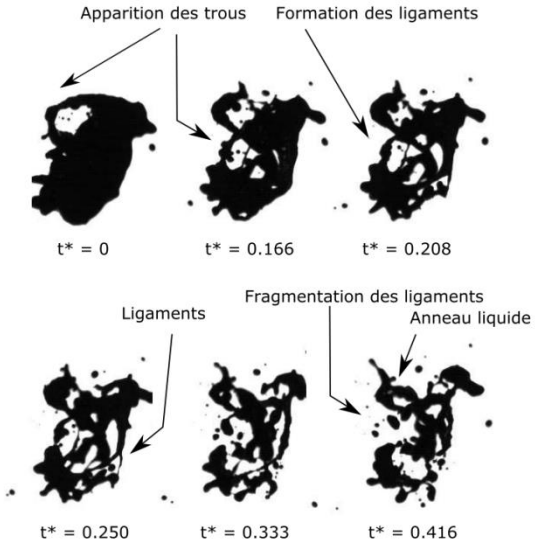


Figure 7. *Images expérimentales des étapes de fragmentation du sac*

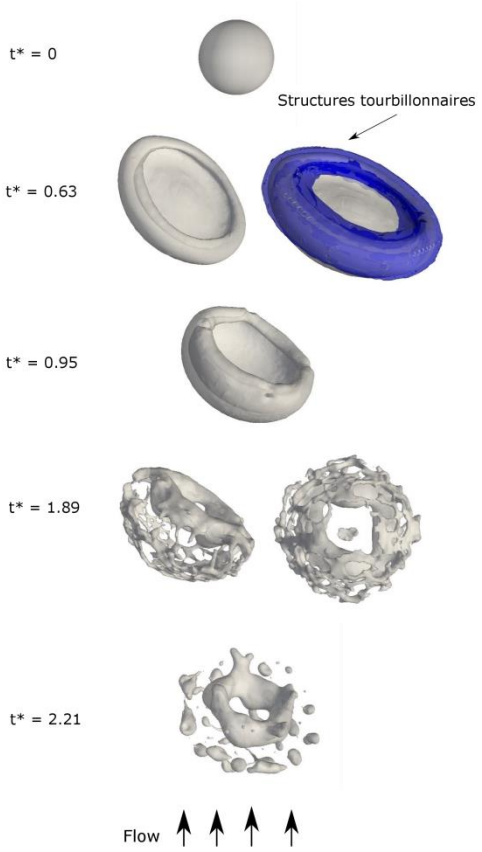


Figure 8. *Résultats numériques obtenus par DNS, We = 40.*

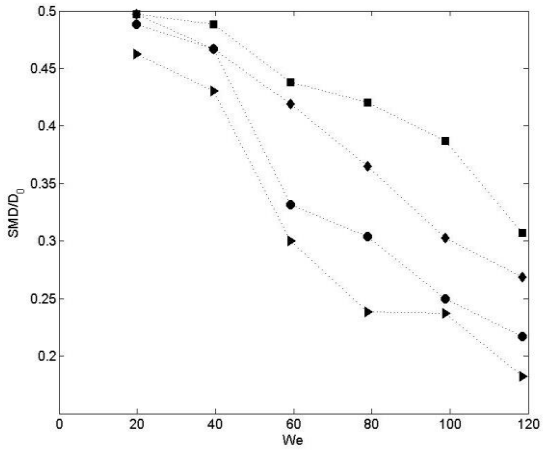


Figure 9. Diamètre de Sauter en fonction de We pour différentes températures du réfrigérant $T_{gouttes,ini}$= 85°C.

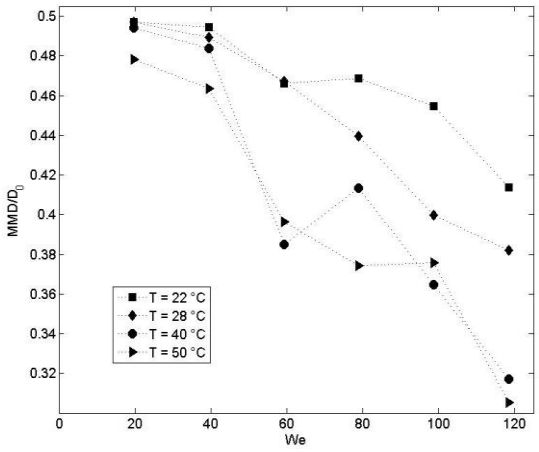


Figure 10. *Diamètre moyen normalisé en fonction de We pour différentes températures du réfrigérant $T_{gouttes,ini}$= 85°C.*

5. Modèle de solidification et application

Suite aux résultats précédents, nous voulons comprendre comment la dynamique de solidification influe sur le taux de fragmentation. Le modèle physique adopté est le modèle de solidification d'Haraldsson et al. [11], basé sur l'hypothèse de la formation d'une croute solide uniforme autour de la goutte. Cette croute solide va modifier les propriétés physiques telles que

la tension de surface, prise en compte par le nombre de Weber et la rhéologie, par le nombre d'Ohnesorge. Ainsi l'objectif est de définir un critère de fragmentation basé sur un nombre de Weber local avec une tension de surface apparente. L'épaisseur maximale de cette croûte sera celle obtenue au temps de fragmentation dans le cas sans solidification (T_A = 50°C). Dans notre cas, ce temps est considéré comme le moment à partir duquel on observe l'éclatement du sac. Nous avons déterminé expérimentalement une relation entre le temps de fragmentation et le We, donnée par :

$$t_{frag} = 8(We-12)^{-0.25}(1+2.2Oh^{1.6})t_{RN} \tag{7}$$

La goutte est supposée sphérique, l'épaisseur de la croute est mince. Le temps de solidification est estimé comme la somme des temps nécessaires à refroidir la croute jusqu'à sa température de fusion plus le temps nécessaire à la formation d'une croute d'épaisseur δ,

$$t_{sol} = t_{\sup} + t_{fus} \tag{8}$$

où $t_{\sup} = \dfrac{\rho_L Cp_L \Delta T_{\sup} \delta}{q''}$ et $t_{fus} = \dfrac{\rho_L Hf_L \delta}{q''}$

où le flux de chaleur convectif est évalué à l'aide de cette relation :

$$q'' = \frac{k_A}{D_0}\left(2 + 0.6\,\mathrm{Re}^{0.5}\,\mathrm{Pr}^{1/3}\right)\left(T_L - T_A\right) \tag{7}$$

Ainsi l'épaisseur de la croûte à t_{frag} est obtenue par la relation suivante:

$$\delta(t_{frag}) = \frac{tq''}{\rho_L\left(Cp_L\Delta T_{\sup} + Hf\right)} \tag{8}$$

La mince croûte formée par solidification est caractérisée par un module d'élasticité de 9.25 GPa (voir Shan et al. [12]), afin de définir le We_{app} selon Haraldsson et al. [11], nous exprimons l'énergie élastique en énergie surfacique, par la relation suivante :

$$\sigma_{elas} = \frac{E\delta^3}{12(1-\nu^2)^3 D_0^3} \tag{9}$$

où E est le module de Young, D_0 le diamètre initial.

Le nombre de Weber modifié est ainsi obtenu:

$$We_{app} = \frac{\rho_A D_0 U_L^2}{\sigma_{app}} \tag{10}$$

où la tension apparente est: $\sigma_{app} = \sigma + \sigma_{elas}$

5.1. Application du modèle

Dans la Figure 11, nous avons tracé le diamètre de Sauter en fonction du We_{app}. On observe que l'écart des points dû à la température est beaucoup moins important que pour les résultats initiaux de la Figure 10. Cela valide l'hypothèse de l'influence de la croûte sur le taux de fragmentation. L'énergie apportée initialement n'est plus dissipée seulement en déformation, mais doit aussi casser la mince peau solide formée autour. Ainsi la distribution finale des gouttes est limitée par cette épaisseur solide, puisque le We_{app} sera plus faible et par conséquent les gouttelettes formées à la suite de la fragmentation seront stables.

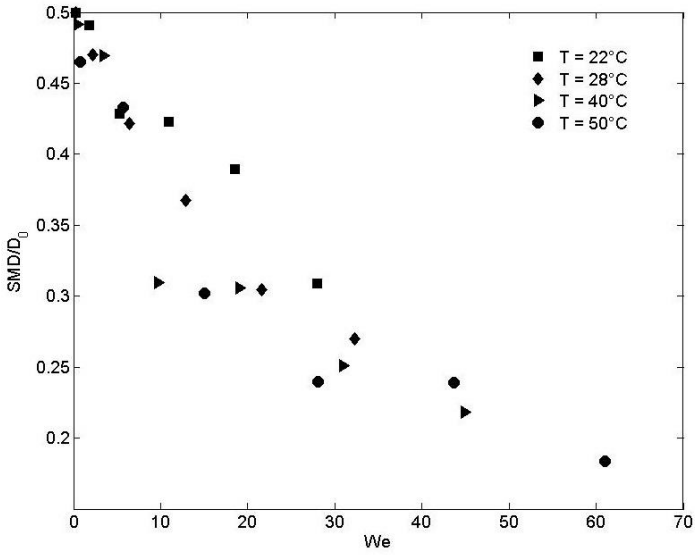


Figure 11. *Diamètre en fonction du We_{app} et de la température du réfrigérant. Pour une température initiale des gouttes à 85°C.*

6. Conclusion

Dans cette étude, nous avons mis en évidence les mécanismes possibles de fragmentation dans le cas du système eau-métal. Cela nous a permis d'identifier trois régimes, un régime sans fragmentation pour un We en dessous de 12, un régime de fragmentation par étirement pour un We entre 12 et 20 et enfin un régime de fragmentation en sac pour les We plus importants. Le mécanisme du régime en sac semble être dû à l'action des vortex qui déforme le sac jusqu'au point de rupture. Les résultats montrent une influence importante de la solidification sur la dynamique de fragmentation. Un modèle thermique basé sur l'hypothèse de la formation d'une croûte solide autour de la goutte est proposé, les résultats du modèle sont cohérents avec les résultats expérimentaux.

Références

[1] Hsiang and Faeth, Int. J. Multiph. Flow **21**, 545 (1995).
[2] Landeau et al., J. Fluid Mech. **749**, 478 (2014).
[3] Nicholls, (1968).
[4] Gelfand, Prog. Energy Combust. Sci. **22**, 201 (1996).
[5] Kim et al., (1983).
[6] Chou and Faeth, Int. J. Multiph. Flow **24**, 889 (1998).
[7] Popinet, J. Comput. Phys. **190**, 572 (2003).
[8] Xu et al., Phys. Fluids **24**, 63101 (2012).
[9] Castrillon Escobar, Thesis (2016).
[10] Jalaal and Mehravaran, Int. J. Multiph. Flow **47**, 115 (2012).
[11] Haraldsson et al., Heat Mass Transf. **37**, 417 (2001).
[12] Shan et al., Smart Mater. Struct. **22**, 85005 (2013).

Remerciements

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet AnR RSNR ICE financé par l'Etat français et géré par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du programme d'investissements d'avenir portant la référence n° ANR-10-RSNR-01.