

UNIVERSITE DE LIMOGES

ECOLE DOCTORALE

**Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Énergétique et
Aéronautique**

Université de Limoges

Thèse N°

Thèse

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES

spécialité :

Sciences Des Matériaux Céramiques et Traitements de Surface

Présentée et soutenue par

Nabil Ferguen

le 21 octobre 2009

**Contribution à la modélisation de l'étalement et de la
solidification de gouttes millimétriques en chute libre
et micrométriques en projection plasma**

Thèse dirigée par Pierre Fauchais et Armelle Vardelle

JURY :

Président	M. Vardelle	Professeur des Universités
Rapporteur	D. Gobin	Directeur de Recherche, Université Paris 11
Rapporteur	R. Bolot	Maître de Conférences/HDR, UTBM
Examineur	J. Cedelle	Maître de Conférences, Université Paris 10
Examineur	C. Lebot	Maître de Conférences, ENSCPB
Directeur de thèse	P. Fauchais	Professeur Émérite, Université de Limoges
Directeur de thèse	A. Vardelle	Professeur des Universités

À ma très précieuse
et chère famille : ma mère
Yasmina et mon père Chérif,
mes sœurs : Meriem, Nora,
Kahina et mes frères :
Djamel et Adel



Remerciements

Ce travail de recherche a été réalisé à l'Université de Limoges, au laboratoire Sciences des Procédés Céramique et Traitements de Surface (UMR - CNRS 6638)

Tout d'abord, je voudrais exprimer ma sincère reconnaissance à madame le professeur A. Vardelle et à monsieur le professeur émérite P. Fauchais, d'avoir encadré ma thèse. Leurs qualités scientifiques et leurs conseils avisés m'ont beaucoup apporté, et m'ont été précieux pour l'aboutissement de ce travail de recherche.

Mes remerciements s'adressent à messieurs D. Gobin, directeur de recherche à l'université Paris 11 et R. Bolot, Maître de conférences/HDR à l'UTBM, pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ma thèse. Je remercie également L'ensemble des membres du jury qui ont bien voulu me faire l'honneur de juger ce travail.

Je remercie vivement mademoiselle J. Cedelle maître de conférences à l'université Paris 10 pour m'avoir fait partager son expérience et ses connaissances. Je remercie également monsieur C. Lyphout pour son aide durant son stage de DEA. Un grand merci aussi à messieurs S. Goutier et T. Lavaud du laboratoire SPCTS.

J'adresse de chaleureux remerciements à toute l'équipe de la spécialité Matériaux à l'ENSIL, je remercie notamment monsieur C. Chazelas et monsieur C. Le Niniven. Je voudrais remercier également tout le personnel de l'ENSIL et particulièrement l'équipe informatique.

Enfin, Je voudrais exprimer du fond du cœur ma reconnaissance et mes vifs remerciements à ma famille pour son amour et son soutien, et je remercie chaleureusement ma tante Malika et son mari Larbi pour leur soutien.

*« Celui qui veut la vérité sans voile
doit chercher ses secrets lui-même, et
faire tous ses efforts pour les
obtenir »*

Ibn Tufayl (1105-1185)

Résumé

Ces travaux de recherche se situent dans le cadre d'une meilleure compréhension de la construction d'un revêtement par projection plasma. Ils portent sur l'étude numérique de la formation des lamelles dont l'empilement sur le substrat conduit au revêtement. Le modèle, tridimensionnel, permet d'étudier l'impact, l'étalement et la solidification d'une goutte métallique ou céramique sur un substrat et l'évolution de la température du substrat. Il prédit la morphologie de la lamelle et les éclaboussures éventuelles lors de la phase d'étalement. Les équations du modèle sont résolues avec le code "Drop" développé par Simulent Inc. Les simulations numériques ont d'abord été appliquées à l'impact de gouttes de cuivre et d'alumine de taille millimétrique sur substrats lisses. Une étude préliminaire a permis de déterminer les dimensions optimales du maillage dans la goutte et dans le substrat. Puis, l'effet des différents paramètres d'impact de la goutte (vitesse, température); de ceux du substrat (température) et de ceux de l'interface (angle de contact, résistance thermique de contact) sur la formation de la lamelle a été étudié. Les résultats ont été comparés à des résultats expérimentaux obtenus dans les mêmes conditions en prenant en compte une résistance thermique de contact variable à l'interface goutte/substrat. Les calculs ont ensuite porté sur l'impact de gouttes micrométriques, de zircone et de cuivre, dans les conditions typiques de projection plasma, sur des substrats lisses et des substrats rugueux. En particulier, l'influence de la nature du substrat et celle des dimensions des colonnes qui modélisent la rugosité du substrat ont été étudiées.

Mots clés :

Projection plasma, construction du revêtement, formation d'une lamelle, impact de goutte, solidification, simulation numérique, méthode VOF.

Abstract

These research work aim to provide a better understanding of coating formation by plasma spraying. They deal with the numerical study of splat formation of which stacking on the substrate leads to the coating. The 3-D model makes it possible to study the impact, flattening and solidification of metal or ceramic droplet on a substrate and to predict the evolution of substrate temperature. It projects the morphology of the splat and possible splashing during the flattening phase. The equations of the model are solved by using the code "Drop" developed by Simulent Inc. The numerical simulations were, first, applied to the impact of millimetric copper and alumina drops impacting on smooth substrates. A preliminary study enabled to determine the optimal dimensions of the grid in the drop and substrate. Then, the effect of the various parameters of impact of the drop (speed, temperature); those of the substrate (temperature) and those of the interface (contact angle, thermal resistance) on the formation of the splat was studied. The results were compared with experimental results obtained under the same conditions while taking into account a variable thermal resistance. Then, calculations related to the impact of micrometric drops, zirconia and copper, under the typical conditions of plasma spraying on smooth and rough substrates, were carried out. In particular, the effect of the nature of the substrate and that of the dimensions of the columns which model the roughness of the substrate were studied.

Key Words :

Plasma spraying, coating formation, splat formation, droplet impact, solidification, numerical simulation, VOF method

Table des matières

page de garde	i
Remerciements	iii
Résumé	v
Abstract	vi
Tables des matières	x
Nomenclature	xi
Introduction	1
1 Étude bibliographique	5
1.1 Génération d'un dépôt en Projection plasma	5
1.1.1 Principe Général	5
1.1.2 Construction du dépôt	10
1.1.3 Propriétés des dépôts	11
1.2 Formations des lamelles	12
1.2.1 Temps caractéristiques	12
1.2.2 Début d'impact	14
1.2.3 Modes d'impacts - nombre de Sommerfeld	15
1.2.4 Étalement de la lamelle	17
1.2.4.1 Paramètres d'impact - nombres adimensionnels	17
1.2.4.2 Résistance thermique de contact	19

1.2.5	Aspects physiques de la surface du substrat	21
1.2.5.1	Topographique de la surface	21
1.2.5.2	Développement de la couche d'oxyde	21
1.3	Études expérimentales de la formation des lamelles	23
1.3.1	Formes des lamelles en projection plasma	23
1.3.2	Difficultés de l'étude expérimentale de l'impact des gouttes	25
1.3.3	Mesures sur des gouttes millimétriques	25
1.3.3.1	Dispositif de chute libre de gouttes millimétriques	25
1.3.3.2	Visualisation de l'impact	26
1.3.3.3	La température de transition	28
1.3.4	Mesures sur des gouttes micrométriques	29
1.3.4.1	Développement des pyromètres de mesure	29
1.3.4.2	Visualisation de l'impact splashing	30
1.3.4.3	Visualisation de l'étalement	30
1.3.4.3.1	Par une caméra rapide :	30
1.3.4.3.2	Photographie de l'impact :	32
1.3.5	Résultats expérimentaux sur la formation de la lamelle	33
1.3.5.1	Effet de la température de transition	33
1.3.5.1.1	Modification de la surface du substrat :	33
1.3.5.1.2	Désorption des adsorbats et des condensats :	34
1.3.5.1.3	Résistance thermique de contact :	34
1.3.5.2	Influence de la fusion du substrat	35
1.3.5.3	Cas d'un substrat rugueux	36
1.4	Modélisation de l'impact et formation de la lamelle	38
1.4.1	À l'impact de la goutte	38
1.4.1.1	Premiers instants de l'impact	38
1.4.1.2	Déformation et phénomène de splashing	39
1.4.2	L'étalement - modèles analytiques	39
1.4.2.1	Étalement sans solidification	41
1.4.2.2	Effet de l'angle de contact dynamique	43
1.4.2.3	Étalement avec solidification	45
1.4.2.4	Prédiction de la forme d'une lamelle	47
1.4.3	Modèles Numériques	48
1.4.3.1	Rôle de la simulation numérique	48
1.4.3.2	Modèles numérique 2D	48
1.4.3.3	Modèles numérique 3D	51
1.5	Conclusions du chapitre	53
2	Le code numérique Simulent-Drop	55
2.1	Méthodes générales de suivi des interfaces	55

2.2	Domaine de calcul et conditions aux limites	56
2.2.1	Géométrie du domaine	57
2.2.2	Conditions aux limites	58
2.2.2.1	Conditions aux limites de l'écoulement	58
2.2.2.2	Conditions aux limites thermiques	58
2.3	Méthodologie numérique	59
2.3.1	Équations dynamiques	59
2.3.2	Équations de l'énergie	61
2.3.2.1	Dans la goutte	61
2.3.2.2	Dans le substrat	62
2.3.2.3	À l'interface lamelle-substrat	62
2.3.3	Solidification	63
2.3.4	Modélisation de la surface libre	63
2.3.5	Méthode de projection	66
2.3.6	Maillage de la goutte : le CPR	66
2.3.7	Maillage du substrat	68
2.4	Le cycle de calcul	68
2.5	procédure de simulation	69
2.6	conclusion du chapitre	69
3	Étude sur des gouttes millimétriques	71
3.1	Validation expérimentale	71
3.2	Étude de sensibilité aux maillages	72
3.2.1	Le maillage de la goutte : le CPR	73
3.2.2	Le Maillage du substrat	77
3.2.2.1	Épaisseur du substrat	78
3.2.2.2	Densité du maillage	80
3.3	Influence de la vitesse d'impact de la goutte - tension de surface	84
3.4	Effet de l'angle de contact	96
3.5	Variation de la résistance thermique de contact	114
3.6	Influence de la température du substrat	122
3.7	Température initiale de la goutte à l'impact	129
3.8	Impact d'une goutte millimétrique en céramique	133
3.9	Conclusion du chapitre	137
4	Étude sur des gouttes micrométriques	138
4.1	Le maillage de la goutte : influence du CPR	139
4.2	Comparaison entre des gouttes millimétriques et micrométriques	141
4.3	Impact sur un substrat lisse	146
4.3.1	Comparaison entre une goutte céramique et une goutte métallique	146
4.3.2	Influence des propriétés thermiques du substrat	153

4.4 Impact sur un substrat rugueux	161
4.5 conclusion du chapitre	171
Conclusion générale	172
Annexe	178
Bibliographie	192

Nomenclature

Nombres adimensionnels

Fr	nombre de Froud	$(= \frac{v_i^2}{gd_0})$
Ma	nombre de Mach	$(= \frac{v}{C})$
Oh	nombre de Ohnesorge	$(= (\frac{We}{Re^2})^{\frac{1}{2}})$
Re	nombre de Reynolds	$(= \frac{\rho_i v L}{\mu_i})$
We	nombre de Weber	$(= \frac{\rho_i v^2 L}{\sigma_i})$
Bi	nombre de Biot	$(= \frac{hd}{k})$
Ec	nombre d'Eckert	$(= \frac{v^2}{C_p(T-T_m)})$
Ja	nombre de Jakob	$(= c_s(T_f - T_{sub})/h_f)$
Ste	nombre de Stefan	$(= \frac{C_p(T_f - T_{sub})}{L})$
Pe	nombre de Peclet	$(= \frac{\rho_i C_p}{k_i})$
Pr	nombre de Prandtl	$(= \frac{Pe}{Re})$

Symboles

C_s	Célérité du son dans le liquide
d_0	Diamètre initial de la goutte
D_{max}	Diamètre maximale de la goutte
E_D	Énergie de dissipation visqueuse
E_K	Énergie cinétique de la goutte à l'impact
E_S	Énergie de surface
f	Fraction fluide
F^{ST}	Force de tension de surface
H	Hauteur du pic
h	Enthalpie
L	Distance entre deux pics
N	Nombre de maille
Q	Flux de chaleur
p	Pression
R_a	Rugosité moyenne arithmétique
R_c	Creux maximal
R_p	Hauteur maximale de sallie

... suite de la page précédente...

R_t	Rugosité totale
R_v	Profondeur maximale de creux
R_z	Hauteur moyenne de profil
R_{th}	Résistance thermique de contact
σ	Tension de surface
s^*	Épaisseur solide adimensionnée
S_K	Skewness
T	Température
t	Temps
t^*	temps adimensionné
t_c	temps caractéristique
$T_{0,g}$	Température initiale de la goutte
T_f	Température de fusion
T_w	Température du substrat au centre d'impact
u	Composante de vitesse radiale
v_i	Vitesse d'impact
W	Largeur du pic
Δp_s	Saut de pression à travers l'interface liquide-gaz
ΔT	Écart de température
Δt	Pas de temps
$\Delta x_i,$	$\Delta y_j,$ Dimensions de la maille
Δz_k	
σ	Interface liquide-gaz
σ_{sg}	Interface solide-gaz
σ_{sl}	Interface solide-liquide
μ	Viscosité dynamique
μ_f	Viscosité dynamique au point de fusion
ξ_{max}	facteur d'étalement
θ_a, θ_r	Angles d'avancée et de recul
θ_d	Angle dynamique

Indices et exposants

i, j, j	indices de maille
l	liquide

 Indices et exposants

(cont.)	(cont.)
$n, n+1,$	indices temporelle
0	Initial
sl	solide-liquide
sg	solide-gaz
sub	Substrat
T	Transposée
w	relatif au substrat, centre de l'impact
$*$	Sans dimension

Acronymes

AISI	American Iron Steel Institute
CPR	Cells per radius
<i>HSV</i>	High Speed Video
MAC	Marker-And-Cell
MFA	Microscopie à Force Atomique
MEB	Microscopie Électronique à Balayage
PLIC	Piecewise Line Interface Calculation
RF	Radio Fréquence
SLIC	Simple Linear Interface Calculation
VOF	Volume Of Fluid
YSZ	Yttrium stabilized zirconia

Introduction

En projection plasma, le dépôt est formé par l'écrasement et l'empilement successif des particules fondues et accélérées sur la pièce à recouvrir où elles s'étalent et se solidifient. Les particules suivantes arrivant ainsi sur des lamelles déjà solidifiées. L'écrasement des particules et leur solidification, d'abord sur le substrat puis sur les couches déjà déposées, conditionnent la microstructure du dépôt et donc ses propriétés qui dépendent du contact réel entre les lamelles empilées, de la porosité, de l'inclusion de particules infondues ou mal fondues, des fissures à l'échelle microscopique (à l'intérieur des lamelles) ou macroscopique (à l'intérieur du dépôt).

Afin de mieux comprendre les phénomènes impliqués, de nombreuses études expérimentales et de modélisation ont déjà été effectuées sur des gouttes impactant sur un substrat. En projection plasma, la difficulté de ces études est que la taille moyenne des gouttes à l'impact n'est que de quelques micromètres et les temps d'étalement et de solidification ne sont que de quelques microsecondes [1]. Expérimentalement on peut observer les particules en vol, à l'impact et pendant leur étalement sur le substrat par des moyens pyrométriques, permettant de suivre l'évolution de la température de la particule durant son étalement et sa solidification [2] et [3]. Cependant, afin d'interpréter ces signaux il est nécessaire de suivre également l'évolution de la forme des particules. Malheureusement deux difficultés interviennent :

La première est la nécessité d'utiliser un objectif de microscope dont la profondeur de champ n'est que de quelques dizaines de micromètres ce qui oblige à travailler sur des substrats lisses.

La deuxième difficulté, est l'absence de caméra pouvant prendre des images tous les 100 nanosecondes.

On s'est donc rabattu sur des images prises à des temps différents mais pour des particules différentes supposées avoir les mêmes paramètres d'impact. Afin de faciliter ces études on a également travaillé sur des particules millimétriques, dans des conditions de chute libre, afin d'avoir des temps d'impact de plusieurs millisecondes et de pouvoir filmer les phénomènes mis en jeu. Malheureusement, de telles conditions ne permettent pas d'avoir à la fois des similitudes dynamique et thermique parfaites entre les conditions de chute libre et celles de la projection plasma.

Ces études ont montré la difficulté de comprendre les phénomènes d'étalement et de solidification liés d'une part aux paramètres de la particule à l'impact (taille, vitesse, température, état de fusion, angle d'impact), et d'autre part à ceux du substrat (température, angle de contact, couche d'oxyde, adsorbats et condensats, rugosité micrométrique et nanométrique, etc.). Tous les travaux expérimentaux sur des substrats lisses ont mis en évidence l'existence d'une température de transition : désorption des adsorbats et modification de l'état de surface améliorant ainsi la mouillabilité goutte-substrat.

La température de transition (T_t) du substrat est un paramètre important dans la formation des lamelles car elle conduit à l'amélioration de la qualité de contact lamelle/substrat. Cette qualité de contact à l'interface peut être modélisée par une résistance thermique de contact. Pour les substrats préchauffés au dessus de T_t , la résistance thermique de contact (R_{th}) correspond à des valeurs comprises entre 10^{-7} et $10^{-8} \text{ m}^2.K.W^{-1}$, alors qu'au dessous de T_t , les valeurs de R_{th} sont autour de $10^{-6} \text{ m}^2.K.W^{-1}$ ([2]). Pour des substrats lisses, au delà de T_t il a été montré que l'adhérence des lamelles et des dépôts était supérieure (3 à 4 fois) à celle obtenue sur des substrats froids même si, d'une manière générale, l'adhérence sur des substrats lisses est relativement faible ($< 30 \text{ MPa}$). En parallèle à ces études, des modèles mathématiques ont été développés, basés sur le principe de la conservation de l'énergie, ainsi que sur des modèles phénoménologiques permettant de prédire le degré d'étalement des lamelles après impact [4] et [5]. Avec le développement des outils informatiques, des modèles ont été mis au point en 3D et en régime transitoire permettant alors de simuler numériquement la déformation d'une goutte, après impact, et sa solidification sur un substrat.

Cependant, il faut souligner que le point le plus délicat, à savoir le contact réel de la particule à l'étalement sur le substrat et en général caractérisé par une résistance thermique de contact (R_{th}) constante. Dans la réalité, ceci n'est pas nécessairement vrai car le contact à l'interface lamelle/substrat n'est pas parfait (mouillabilité, angle de contact avec la surface, rugosité, etc.). La résistance thermique de contact varie dans le temps le long de l'interface car en particulier la pression de contact diminue lorsque la goutte s'étale. Elle a cependant, un effet considérable sur le processus de solidification comme l'a montré l'étude de Dhiman et al. [6].

À partir de ces travaux, un modèle numérique complexe a été mis au point par Mostaghimi et son équipe ([7], [8], [9], [10], [11]) qui permet d'étudier l'impact, l'étalement et la solidification de gouttes sur une surface solide ; il prévoit alors la forme des lamelles et les éclaboussures éventuelles. Ce modèle est mis en application dans un code numérique commercial, Simulent Drop (<http://www.simulent.com/>).

Notre travail a donc consisté en une étude systématique des conditions d'impact grâce au modèle numérique, Simulent Drop, d'abord pour des particules millimétriques puis pour des particules micrométriques. Notre étude a consisté également à déterminer l'influence des conditions d'impact de la goutte (vitesse, température, angle de contact, tension de surface etc.) et celles du substrat (température, diffusivité thermique, rugosité) sur les processus d'étalement et de solidification de gouttes. Les résultats des simulations ont ensuite été comparés avec des résultats expérimentaux lorsqu'ils étaient disponibles [12] et [13].

Cependant dans un dépôt réel, l'adhérence est obtenue par un effet mécanique, mais là encore la température de transition T_t intervient. Sur un substrat lisse conventionnellement sablé [14] et [15] et préchauffé au delà de T_t l'adhérence est accrue de 3 à 4 fois. Cette adhérence dépend de la hauteur des pics et de la distance entre eux [15]. En effet, il faut que le liquide puisse pénétrer dans les creux et les interstices avant de se solidifier et de créer une force de frottement importante grâce à sa contraction autour des pics lors de sa solidification. C'est pourquoi le modèle numérique que nous avons utilisé, nous permet de considérer une surface rugueuse "idéale" en imposant des dimensions caractéristiques à des colonnes uniformément réparties sur la surface pour simuler l'impact de gouttes sur un substrat rugueux.

Successivement :

Le premier chapitre est consacré à une présentation bibliographique de notre connaissance actuelle sur la formation d'une lamelle, brique élémentaire d'un dépôt en projection plasma. En particulier, nous passons en revue les études théoriques et expérimentales sur les différentes phases de la formation de la lamelle : impact, étalement et solidification sur un substrat, et les aspects physiques de ces phases. Enfin, nous abordons le développement des modèles numériques (à 2D et à 3D) de l'impact et de la solidification de gouttes sur un substrat.

Le chapitre 2 commence par un rappel sur les méthodes numériques utilisées pour la modélisation des interfaces dans les écoulements diphasiques : à savoir les méthodes "de suivi de front" et les méthode de "suivi volumétrique". La méthodologie du code numérique que nous avons utilisé, Simulent Drop, est alors décrite avec l'influence des paramètres de maillages. Puis nous présentons la procédure de simulation et le traitement des données issues des simulations numériques.

Le chapitre 3 est consacré à l'étude de l'impact de gouttes de cuivre et d'alumine de taille millimétrique sur des substrats en acier inoxydable, soit chauds soit froids. Dans un premier temps, nous définissons les maillages optimaux pour nos conditions d'étude, et nous analysons l'influence des paramètres d'impact de la goutte (vitesse et température), des paramètres du substrat (température) et des paramètres de l'interface lamelle/substrat (résistance thermique de contact, tension de surface) sur les processus d'étalement et de solidification d'une goutte de cuivre. Nous terminerons le chapitre par l'étude de l'impact d'une goutte millimétrique d'alumine.

Le chapitre 4 traite de l'impact de gouttes de zircon et de cuivre de taille micrométrique dans des conditions typiques de la projection par plasma sur des substrats lisses et des substrats rugueux. Après avoir fixé le maillage de la goutte, nous comparons l'impact de deux gouttes micrométriques (zircon et cuivre), et de deux gouttes de cuivre millimétrique et micrométrique ayant le même nombre de Weber à l'impact. Nous analysons l'effet de la diffusivité du substrat sur l'étalement et la solidification de la lamelle. Enfin, nous montrons que le processus de solidification et l'adhérence des lamelles sur un substrat rugueux ne dépendent pas seulement de la hauteur des pics, caractérisée par le paramètre de rugosité R_a , mais aussi des paramètres dimensionnels constituant cette rugosité : largeur des pics et distance entre eux.

1.1 Génération d'un dépôt en Projection plasma

Dans ce premier chapitre, nous décrivons les mécanismes qui conduisent à la formation d'un revêtement en projection plasma et nous intéressons plus particulièrement à ceux qui régissent la formation des lamelles qui forment le revêtement par empilements successifs. Nous présentons d'abord les principaux paramètres relatifs aux gouttes qui impactent et au substrat et discutons de leur effet sur la formation des lamelles. Nous décrivons ensuite brièvement les techniques expérimentales qui sont utilisées pour observer l'étalement et la solidification des gouttes sur le substrat. Nous terminons, enfin, le chapitre par une présentation des modèles analytiques et numériques proposés dans la littérature pour étudier la formation des lamelles.

1.1.1 Principe Général

La projection plasma permet de déposer des matériaux de différentes natures : métalliques, alliages métalliques, céramiques, cermets ou encore des polymères. Les matériaux sont introduits, sous forme pulvérulente (diamètre des particules de poudres $< 100 \mu\text{m}$) dans la source de chaleur (jet de plasma) grâce à un injecteur et un gaz porteur. Dans le jet de plasma, les particules sont fondues ou semi-fondues et accélérées avant d'impacter sur le substrat préalablement préparé et éventuellement préchauffé. Ainsi, le dépôt est formé par l'écrasement et l'empilement successif de ces particules sur le substrat, comme représenté schématiquement sur la Fig. 1.1.

Les principales caractéristiques de la projection plasma par rapport aux autres techniques de projection thermique, ont une vitesse de jet de plasma importante ($< 2\,400 \text{ m.s}^{-1}$), et des températures du gaz pouvant atteindre $14\,000 \text{ K}$ [16]. Le jet de plasma présente une bonne capacité à transférer la chaleur grâce à une conductivité thermique élevée (fonction de la nature des gaz plasmagènes) et la quantité de mouvement grâce à une viscosité importante autour de $10\,000 \text{ K}$.

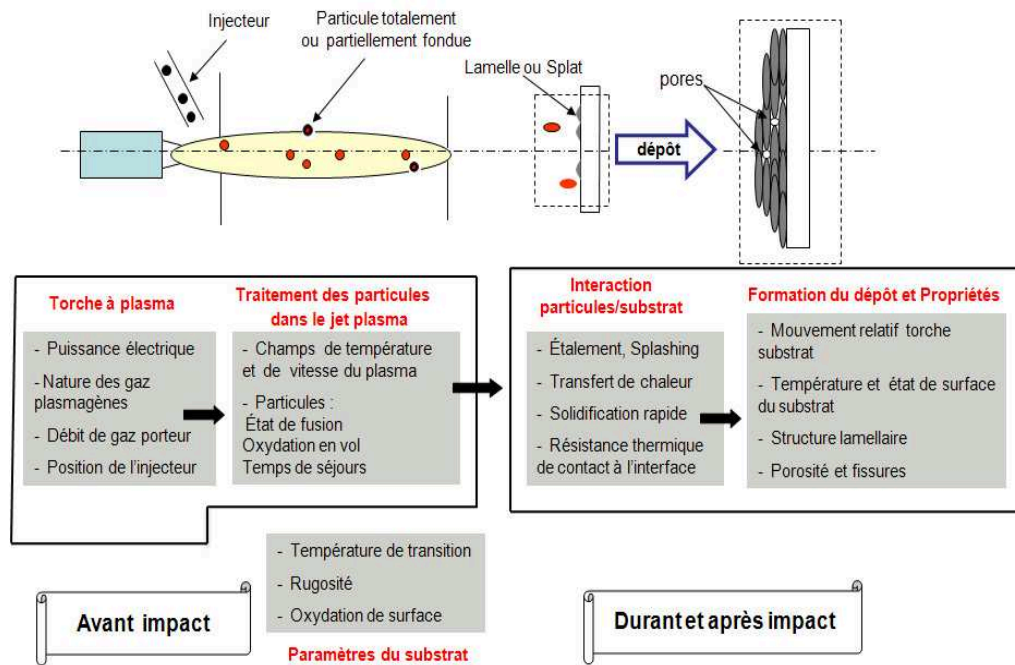


FIGURE 1.1 – Schéma d'un procédé de dépôt par projection plasma

L'injection des particules dans la source thermique est un des paramètres clés du procédé . En effet, pour avoir le traitement souhaité, les particules doivent, en général, atteindre le cœur du jet de plasma où règne les températures et les vitesses les plus élevées (voir Fig. 1.2) . Plus loin, dans le panache du jet, elles sont moins chauffées et, de plus, décélérées . Cependant, la poudre injectée dans le jet de plasma présente une distribution granulométrique qui entraîne une distribution de quantité de mouvement des particules et donc une distribution de trajectoires dans le jet de plasma . Les trajectoires suivies par les particules conditionnent leur temps de séjour dans l'écoulement plasma et peuvent affecter considérablement leurs paramètres d'impact sur le substrat .

Les travaux de M. Vardelle [17], par exemple, sur l'influence des conditions d'injection sur le traitement de particules d'alumine, ont permis d'optimiser les vitesses d'injection des particules en fonction de la distribution granulométrique de la poudre, du débit du gaz porteur, du diamètre interne de l'injecteur et de son inclinaison par rapport à l'axe de la torche .

Dans le jet de plasma, les particules sont soumises à des flux de chaleur qui dépassent 10^8 W.m^{-2} [18] et leur fusion dépend, outre leurs propriétés thermiques, de leurs temps de séjour dans le jet et de leur taille [19] .

À l'impact, les particules en fusion arrivent sous forme de gouttes qui, sous l'effet de leur énergie cinétique, s'écrasent sur la surface du substrat ou sur les particules déjà déposées . Les premières particules qui arrivent sur le substrat forment la couche initiale du dépôt . Il est essentiel que cette couche, d'une part, adhère solidement au substrat, et d'autre part, assure une bonne liaison avec les autres lamelles qui forment le dépôt .

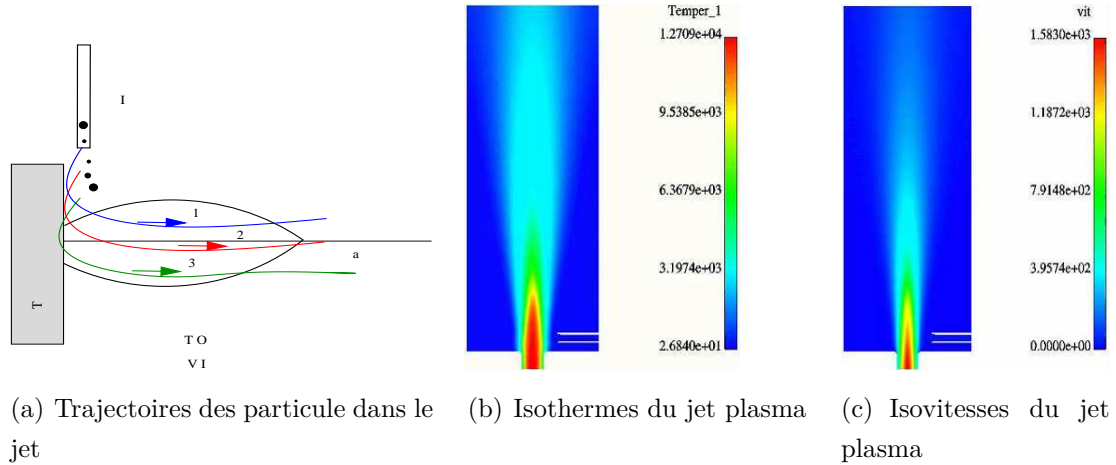


FIGURE 1.2 – Cartographie des températures et des vitesses d'un jet de plasma. Argon (45Nl/min)-Hydrogène (15Nl/min)- 600 A- diamètre de tuyère : 8 mm

Lors de l'impact d'une particule, en fonction de ses paramètres intrinsèques (taille, température, degré de fusion, vitesse), la soudaine décélération provoque sa déformation et génère des pressions de l'ordre de quelques dizaines de GPa [20]. Cette pression est localisée au point d'impact et les phénomènes de compressibilités du liquide agissent pendant des temps extrêmement courts (quelques centaines de nanosecondes après l'impact). Ensuite, la pression force la goutte à s'écouler latéralement à la surface du substrat sous forme d'une lamelle et la pression décroît fortement au fur et à mesure que l'étalement progresse. Au cours de cet étalement, la lamelle se refroidit et cède sa chaleur (chaleur sensible et chaleur latente) essentiellement au substrat par conduction¹ et sa solidification commence à l'interface lamelle-substrat avant même que son étalement ait pris fin.

L'apparition de la phase solide au cours de l'étalement dans des zones déterminées de la lamelle, peut entraîner la perturbation de l'écoulement de la phase liquide et favoriser l'apparition de doigts liquides périphériques ou encore, dans certains cas, favoriser le phénomène d'éclaboussure (splashing), phénomènes qui affectent la microstructure du dépôt, réduisant considérablement la qualité et les propriétés du dépôt.

Des études expérimentales ont montré que les vitesses de refroidissement d'une lamelle, en projection plasma, peuvent atteindre 10^6 à 10^9 K/s [21]. Cette vitesse dépend essentiellement de la qualité du contact entre la goutte et la surface et aussi des propriétés thermiques de la goutte et du substrat. Le processus de solidification : nucléation, croissance cristalline et formation de phases, conditionnent, en grande part, les propriétés thermo - mécaniques du dépôt.

1. On estime que les pertes de chaleur par rayonnement sont $< 3\%$ pour des particules de zirconium à 3 200 K.

Les propriétés et la microstructure du dépôt sont donc fortement liées à la façon dont les particules impactent la surface du substrat et à leur solidification ultérieure. Ces mécanismes agissent en particulier sur la qualité d'adhérence entre le dépôt et le substrat ou avec les couches préalablement déposées [2]. L'organigramme de la Fig. 1.3 résume les paramètres contrôlant la microstructure et les propriétés d'un dépôt obtenu par projection plasma.

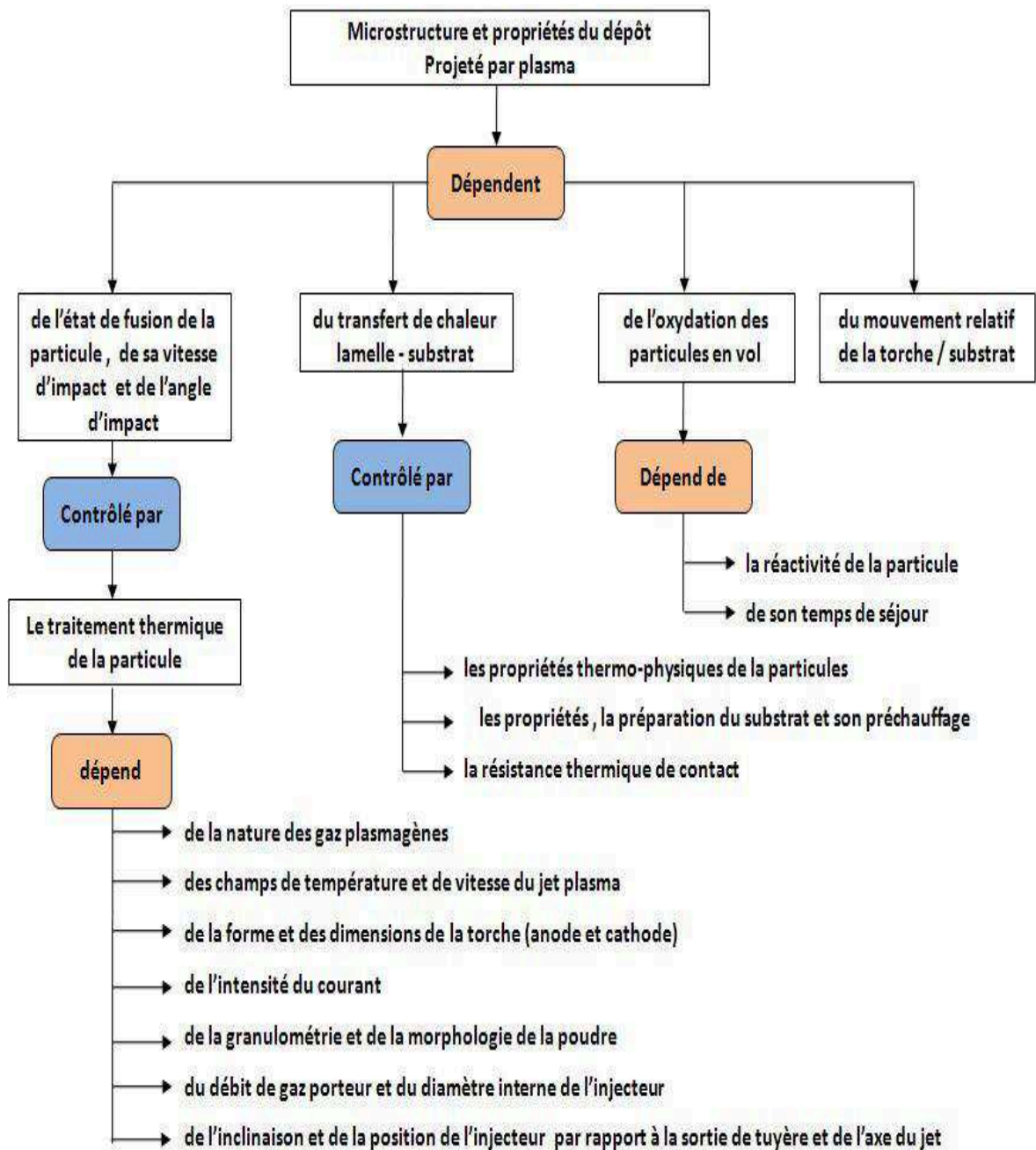


FIGURE 1.3 – Organigramme regroupant les principaux paramètres du procédé contrôlant la microstructure et les propriétés d'un dépôt en projection plasma à l'air.

1.1.2 Construction du dépôt

Les dépôts obtenus en projection plasma, présentent macroscopiquement une structure lamellaire, et microscopiquement sont constitués de lamelles. Ces dernières ont une structure colonnaire pour les céramiques et certains métaux et certains alliages, une structure localisée essentiellement au centre de la lamelle, pour les métaux et les alliages présentent plus généralement une structure granulaire. La taille de ces colonnes ou des granules étant de l'ordre de quelques centaines de nanomètres [12] et [22]. Ces dépôts peuvent aussi contenir des inclusions, des défauts et de la porosité, générés au cours des interactions entre lamelles ou entre le dépôt et le substrat ou encore entre passes successives [23]. La Fig. 1.4 schématise la structure et les propriétés d'un dépôt obtenu en projection plasma et les différents contacts qui s'établissent en son sein et avec le substrat.

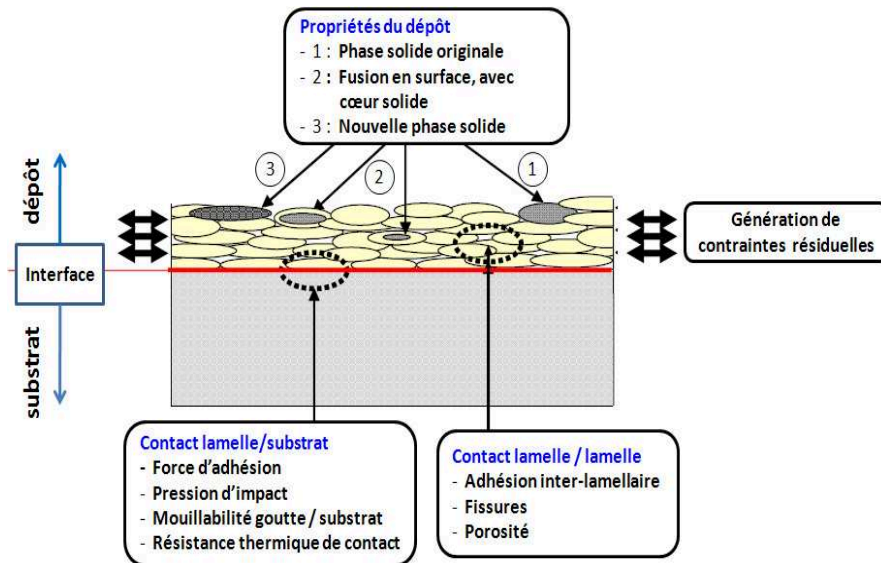


FIGURE 1.4 – Facteurs contrôlant les propriétés d'un dépôt projeté par plasma

Les dépôts métalliques contiennent souvent des inclusions d'oxyde, cela s'explique par la réactivité des particules métalliques avec l'air ambiant entraîné par le jet plasma. Tous les dépôts subissent des contraintes qui s'établissent principalement lors du refroidissement des lamelles (contraintes de trempe), puis lors du refroidissement du dépôt. Dans ce dernier cas, les contraintes sont dues au différentiel de dilatation thermique entre le dépôt et le substrat (en supposant que pendant la réalisation du dépôt le refroidissement et l'épaisseur des passes étaient tels qu'aucun gradient thermique ne s'est développé dans le dépôt). Les dépôts céramiques relaxent ces contraintes par fissuration à diverses échelles : à l'échelle microscopique (trempe) et à l'échelle macroscopique (contraintes thermiques) [24].

Outre la fissuration, la formation des dépôts s'accompagne de la génération de porosité, qui est souvent plus importante dans les céramiques que dans les métaux et les alliages. Cette porosité et les fissures, si elles sont contrôlées (en particulier l'orientation de ces dernières) peuvent, dans certains cas, être un avantage par exemple pour des dépôts de zircone utilisés comme barrières thermiques.

La porosité des dépôts peut se présenter sous forme de pores globulaires ou inter-lamellaire ; la différence de morphologie des pores étant liée à l'état de fusion et à la vitesse d'impact des particules [25]. La porosité globulaire est due principalement à une fusion incomplète ou à une re-solidification des particules. La porosité interlamellaire, orientée parallèlement au dépôt, est liée à la faible cohésion entre les lamelles, ou encore à un mauvais contact de la périphérie de la lamelle avec le substrat ou les couches déjà déposées. Ce dernier mécanisme est connu dans la littérature sous l'appellation "curling up". Ce phénomène peut s'expliquer par plusieurs facteurs tels que la relaxation des contraintes internes dues aux dilatations thermiques, à la tension de surface de la goutte liquide, à la rugosité de la surface du substrat ou encore à la surfusion de la particule. Fukanuma, H. [26] a observé que la plupart des zones poreuses sont localisées en périphérie de la lamelle à une distance du centre d'environ 0,6 fois le rayon de la lamelle.

Les fissures interlamellaire, orientées perpendiculairement aux lamelles, sont dues à la relaxation des contraintes thermiques sous l'effet des différences de coefficients de dilatation thermique entre le dépôt et le substrat [24], alors que les fissures présentes dans les lamelles sont dues à la relaxation des contraintes de trempe lors de leur refroidissement [27]. La morphologie des lamelles et le contact entre elles contrôlent dans une large mesure, la microstructure du dépôt et ses propriétés. La maîtrise de la microstructure du dépôt exige donc une compréhension détaillée des mécanismes qui régissent l'écoulement et le transfert de chaleur durant l'impact de la goutte et sa solidification sur le substrat.

1.1.3 Propriétés des dépôts

Comme nous venons de l'expliquer, les propriétés thermophysiques du dépôt dépendent de la façon dont les lamelles se déposent sur le substrat, et des processus de refroidissement et de solidification [28] et [29]. Ainsi, le mécanisme par lequel s'effectue le dépôt de la particule sur un substrat sont importants, de même que la manière dont la particule s'étale pour former la lamelle et se solidifie après son impact sur le substrat.

Les conditions intrinsèques d'impact de la goutte (taille, vitesse, température, degré de fusion) affectent considérablement son comportement lors de son écoulement sur le substrat. Par exemple, une faible vitesse d'impact ne permet pas une bonne adhérence interlamellaire et conduit à une augmentation de la porosité ce qui affecte les performances mécaniques du dépôt [30].

Les conditions d'impact affectent la microstructure du dépôt en conditionnant : la taille et la distribution de la porosité, l'inclusion d'oxydes, les contraintes résiduelles, les micro - et macro - fissures [31]. Un autre point essentiel est la formation de la couche initiale du dépôt où les premières lamelles sont en contact avec le substrat. Cette couche constitue le support des particules suivantes, et dans une certaine mesure est responsable du dépôt final en particulier de son adhésion et de sa cohésion [32] et [33].

En conclusion, il s'avère que les propriétés thermomécaniques d'un dépôt réalisé par projection plasma sont fonction des contacts entre les lamelles empilées et que la qualité de ces contacts dépend des paramètres des particules à l'impact (taille, vitesse, température, degré de fusion) et de ceux du substrat (température, couche d'oxyde sur un substrat métallique, et rugosité de surface aux échelles micro - et nano - métriques) [16].

1.2 Formations des lamelles

1.2.1 Temps caractéristiques

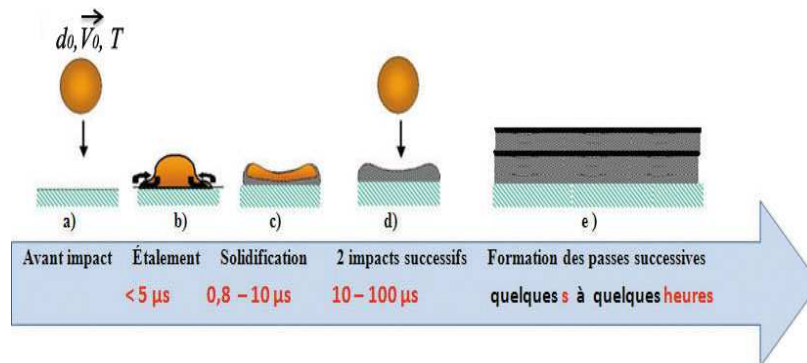


FIGURE 1.5 – Temps caractéristiques de la formation d'une lamelle en projection plasma.

En projection plasma, les temps caractéristiques qui accompagnent le processus de formation de la lamelle sont à l'échelle de la microseconde. Ce niveau d'échelle rend très difficile voir quasi impossible les observations en temps réel, en particulier lors de l'étalement de la lamelle. le processus de formation d'une lamelle en projection plasma se déroule en trois étapes essentielles (voir Fig. 1.5) : *i*) l'impact initial (début d'impact), *ii*) l'étalement et *iii*) le refroidissement et la solidification qui commencent avant la fin de l'étalement.

La Fig. 1.5 schématise le processus et les temps caractéristiques qui accompagnent la génération d'un dépôt en projection plasma. On peut distinguer les phases suivantes :

- a) Début d'impact : la pression générée lors de l'impact favorise un bon contact goutte - substrat au point d'impact ;
- b) Étalement du matériaux fondu : l'écoulement de la goutte est sensible à la qualité du contact avec le substrat ; elle affecte son adhérence et peut entraîner la formation de la porosité ;
- c) Refroidissement et solidification : les vitesses de trempe et de solidification conditionnent la structure de la lamelle : ses phases cristallines, la taille des grains, les microcontraintes (trempe) ;
- d) Impact d'une autre goutte au même point : la nouvelle goutte impacte toujours sur une lamelle déjà solidifiée ;
- e) Formation des passes successives : cette étape prend quelques secondes à quelques heures selon les dimensions des pièces traitées . Durant cette étape, il peut y avoir la formation de macrocontraintes .

En projection plasma, la durée d'étalement de la goutte est inférieure à $5 \mu s$; l'étalement maximal correspond au maximum de mouillage de la lamelle liquide sur la surface solide du substrat . Avant que l'étalement ne prenne fin, la goutte se refroidit et des phases solides commencent à se développer au sein du bain liquide (au voisinage de l'interface goutte/substrat) . L'étape de solidification prend fin au bout de quelques dizaines de microsecondes .

Le dépôt en projection plasma est formé par l'empilements des lamelles, l'intervalle de temps entre deux impacts successifs au même endroit pouvant être estimé entre 10 et $100 \mu s$. Par ailleurs, la solidification de la lamelle ne prend que quelque μs (voir Fig.1.5) . Il convient donc de considérer que la formation d'une lamelle peut être considérée comme un événement indépendant des interactions avec les autres lamelles et ces interactions n'affectent donc pas l'étude de la formation d'une lamelle .

Le processus de formation de la lamelle couple à la fois des aspects dynamiques et des aspects thermiques . Au cours de la phase d'étalement, la lamelle subit une trempe importante qui peut atteindre $10^9 K/s$ ce qui provoque une solidification rapide . Cette situation correspond à un bon contact entre la lamelle et le substrat et favorise une solidification régulière de la lamelle qui va affecter sa structure et conditionner ses propriétés . L'apparition de la phase solide dans certaines zones privilégiées de la lamelle peut entraîner une perturbation de l'écoulement de sa phase liquide caractérisée par l'apparition de doigts liquides périphériques (phénomène de "digitation") ou encore conduire à la formation d'éclaboussures (phénomène de "splashing"), ce qui diminue considérablement le contact entre les lamelles ou entre les lamelles et le substrat et affecte les propriétés thermomécaniques des dépôts .

1.2.2 Début d'impact

Quand la goutte liquide heurte la surface du substrat, sous l'effet de son énergie cinétique, la soudaine décélération (et déformation) produit une pression très élevée de l'ordre de quelques centaines de MPa, plus importante que la pression classique du coup de bélier (Water - Hammer) [34], définie par l'éq. 1.1.

$$p = \rho c v_i \quad (1.1)$$

où ρ , c et v_i sont respectivement : la masse spécifique du liquide, la vitesse de l'onde de pression et la vitesse d'impact .

L'onde de pression se propage dans la goutte et met en compression la matière liquide, en contact immédiat avec le point d'impact, sans pour autant atteindre toute la goutte (i.e. la déformation de l'apex de la goutte se produit en retard par rapport à l'instant du contact [35]). La Fig. 1.6 schématise l'impact d'une goutte liquide sur une surface solide ainsi que la région liquide mise en compression .

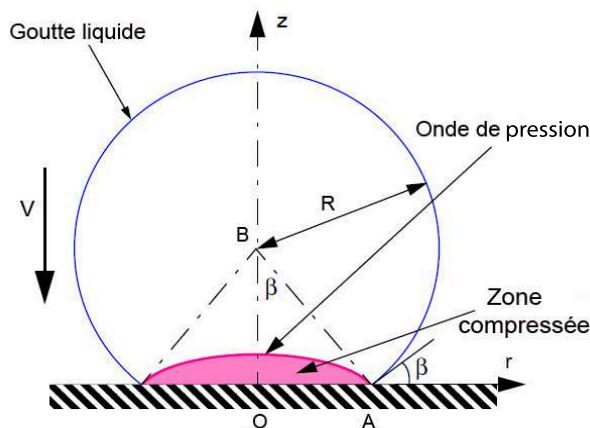


FIGURE 1.6 – Impact d'une goutte liquide (ligne bleu) sur une surface rigide . La zone de compression (couleur magenta) est délimitée par le front d'impact et le substrat . D'après [36]

La Fig. 1.6 schématise le comportement d'une goutte à l'impact sur une surface solide pendant la phase dite compressible . L'impact génère des ondes de pressions qui croissent vers le haut de la goutte en formant une enveloppe . Cette dernière, sépare la partie liquide comprimée du reste de la goutte non affecté par la compression . Le point A (voir Fig. 1.6), situé à l'extrémité de l'enveloppe de pression, en contact avec la ligne triple (de la goutte) se déplace radialement et rapidement et il dépend de l'angle beta ($\propto \frac{1}{\beta}$) . Au fur et à mesure que cette enveloppe croit et augmente en volume, l'angle β augmente également réduisant ainsi le déplacement du point A et par conséquent l'onde de pression se détache de la ligne de contact .

La pression d'impact est ensuite rapidement dissipée et la goutte liquide s'étale sous forme d'un film mince . Dans la zone d'étalement la vitesse radiale d'étalement peut atteindre jusqu'à trois fois la vitesse initiale d'impact [37] .

Les phénomènes de compressibilité observés au début de l'impact sont extrêmement complexes d'après Heymann, F.J. [38]. Selon ce dernier la pression dans la zone de compression n'est pas uniforme et peut atteindre des valeurs maximales au voisinage de la ligne contact. La pression au début de l'impact peut s'élever jusqu'à quelques dizaines de GPa [5], et est fonction des propriétés de la goutte liquide, étant en particulier sensible à sa masse volumique ρ et proportionnelle au carré de la vitesse d'impact v_i [39], [40], [41] et [38], implicitement donnée par l'éq. 1.2

$$p \propto \rho v_i^2 \quad (1.2)$$

La plupart des études réalisées sur les phénomènes de compressibilité du liquide ont été réalisées sur des gouttes sans prendre en compte les effets thermiques. Armster et al. [20] expliquent que la compressibilité d'une goutte peut être caractérisée par le nombre de Mach ($= \frac{v_p}{c_s}$) où v_i est la vitesse initiale d'impact de la goutte et c_s est la célérité du son dans le liquide ($\sim 3\,000 \text{ m.s}^{-1}$ pour de l'eau par exemple), et les pressions peuvent atteindre 6 000 MPa dans le cas de l'impact d'une goutte métallique sur une surface solide. Une pression élevée et la discontinuité au point A (point triple) peuvent entraîner l'éjection de gouttes submicroniques, ce qui affecte cependant très peu le volume de la goutte [20].

Cette forte pression, générée au début de l'impact de la goutte, joue un rôle important en terme de qualité de contact. En effet, en projection plasma les lamelles adhèrent au substrat essentiellement par un mécanisme d'accrochage mécanique aux aspérités de la surface du substrat, ainsi que les interstices doivent être remplis par le liquide à l'impact pour avoir un maximum de contact liquide-surface solide (utile pour un bon transfert de chaleur), une forte pression favorisant cette situation. Par ailleurs, il arrive que ces interstices soient le siège de poches d'air durant l'étape d'étalement ce qui à pour conséquence de diminuer le transfert de chaleur de la lamelle vers le substrat du fait du caractère isolant de l'air.

Les effets de compressibilité observés durant les tous premiers instants de l'impact d'une goutte liquide, se produisent donc à des échelles de temps très courtes (quelques centaines de ns) et peuvent donc être considérés comme négligeables dans l'étude de la formation des lamelles en projection plasma (ns contre μs pour l'étalement).

1.2.3 Modes d'impacts - nombre de Sommerfeld

Le comportement d'une goutte impactant sans solidification ($t <$ quelques centaines de ns) sur une surface solide dépend à la fois de ses propriétés d'écoulement, des conditions de surface et de son énergie de déformation. Point de vue bilan dynamique à l'impact, l'énergie cinétique initiale de la goutte est convertie en travail visqueux (déformation de la goutte) et en énergie de surface en fin d'étalement (effet de tension de surface).

Les modes d'impact de gouttes liquides observés au début de l'impact sur une surface solide sont en général de trois types : i) le rebond, ii) le dépôt et iii) l'éclaboussure (éjection de gouttelettes secondaires). Afin de caractériser ces différents modes d'impacts, Mundo et al. [42] ont introduit un paramètre adimensionnel K , appelé nombre de *Sommerfeld*, qui prend en compte les propriétés d'écoulement exprimées par les nombres de Reynolds (Re) et de Weber (We). Le paramètre K , identifie les différents régimes d'impact et est calculé comme suit :

$$K = \sqrt{We\sqrt{Re}} \quad (1.3)$$

La Fig. 1.7 schématise les différents modes d'impact d'une goutte liquide en fonction du nombre de *Sommerfeld*. On peut remarquer que quand le paramètre K est faible ($K < 3$), la goutte rebondit, et pour $K \geq 57,7$, des gouttelettes secondaires sont éjectées à l'impact alors que pour des valeurs de K intermédiaires la goutte se dépose sur la surface.

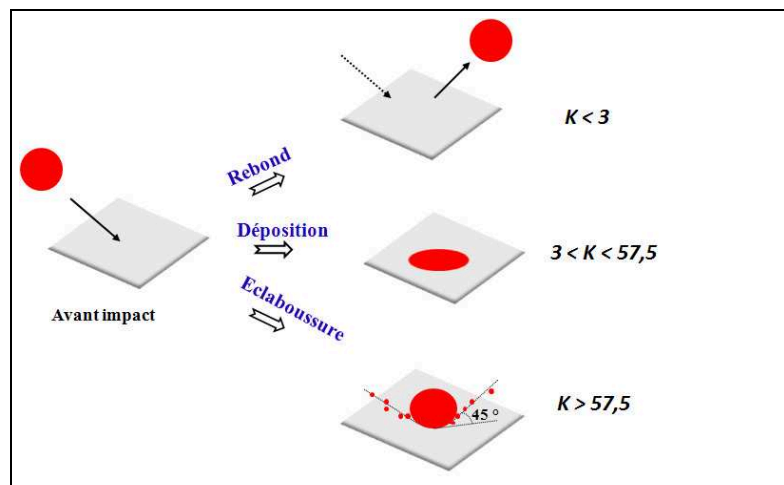


FIGURE 1.7 – Différents cas d'impact de gouttes sur une surface solide, le nombre de Sommerfeld caractérisant les différents impacts.

Cependant, le paramètre de *Sommerfeld* K tient compte uniquement de l'aspect dynamique de ce qui se passe au début de l'impact. Dans le cas de la projection thermique, et en projection plasma en particulier, les valeurs de K qui identifient les transitions des modes d'impact sont relativement modifiées [44]. Cette situation découle du fait que dans les procédés cités précédemment, des paramètres thermiques s'ajoutent tels que la fusion plus ou moins de la particule affectant fortement la viscosité, ce qui modifie fortement l'impact. De plus, les paramètres du substrat tels que sa rugosité de surface et sa température sont à prendre en compte lors de l'impact et influencent fortement la qualité du contact entre la goutte et le substrat.

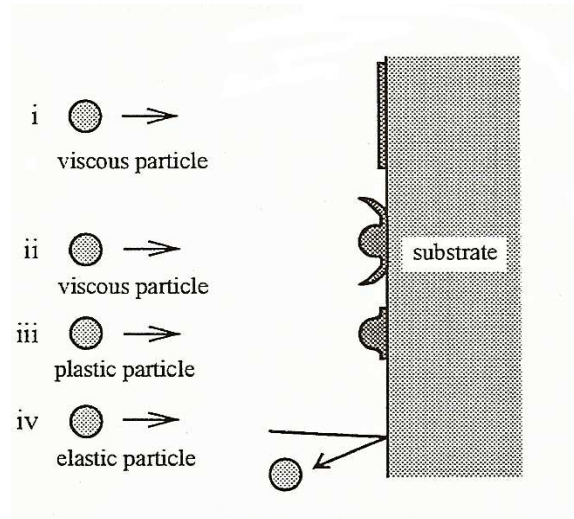


FIGURE 1.8 – Interactions possibles entre une goutte chauffée et un substrat. D'après Fukanuma [43]

Fukanuma et Ohmori [43] ont donné une autre classification complémentaire de celle donnée par Mundo pour décrire l'impact d'une particule sur une surface solide (voir Fig. 1.8) selon son degré de fusion. Sur la Figure 1.8 on peut discerner les cas suivants :

- i) la particule fondue visqueuse impacte et s'étale sous forme d'un film mince,
- ii) la particule fondue visqueuse impacte avec formation d'éclaboussure en périphérie, seule sa partie centrale étant en contact avec le substrat,
- iii) comportement plastique après impact : la goutte se déforme plastiquement,
- iv) comportement élastique après impact : la goutte rebondit sur la surface.

1.2.4 Étalement de la lamelle

1.2.4.1 Paramètres d'impact - nombres adimensionnels

Les paramètres physiques qui influent directement sur l'étalement de la goutte impactant sur la surface du substrat sont : le diamètre initial de la goutte d_0 , sa vitesse initiale d'impact v_0 et sa direction, sa masse volumique ρ , sa viscosité à l'état liquide μ , sa tension de surface σ , l'angle de contact liquide - solide θ et son enthalpie. Tous ces paramètres rendent les phénomènes, associés à l'impact, complexes à quantifier et il est difficile de prédire la prédominance de l'un par rapport à l'autre. L'emploi des nombres sans dimension de Reynolds et de Weber permet de regrouper ces paramètres physiques :

Le nombre de Reynolds mesure l'importance relative des effets d'inertie par rapport aux effets visqueux et est défini par :

$$Re = \frac{\rho v_0 d_0}{\mu} \quad (1.4)$$

Le nombre de Weber mesure l'importance relative des effets d'inertie par rapport aux effets de tension de surface ; il est défini par :

$$We = \frac{\rho v_0^2 d_0}{\sigma} \quad (1.5)$$

La mesure des effets de viscosité par rapport aux effets de tension de surface est donnée par le nombre d'Ohnesorge (Oh) défini par :

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho d_0 \sigma}} \quad (1.6)$$

L'effet capillaire (Ca) mesure quant à lui l'importance relative des effets de la vitesse d'impact par rapport aux effets de tension de surface ; il est défini par :

$$Ca = \frac{We}{Re} = \frac{\mu v_0}{\sigma} \quad (1.7)$$

Les nombres de Re et de We sont souvent utilisés pour décrire la dynamique de l'impact d'une goutte, le nombre d'Ohnesorge (Oh) apparaît dans l'étude des cas d'impact d'une goutte à faible nombre de Weber [45].

Au début de l'impact, l'étalement d'une particule liquide est favorisé par une vitesse d'impact relativement grande [2] et sa viscosité joue alors un rôle important car elle gouverne son écoulement. De même, l'effet de la température est un facteur important qui affecte la viscosité, cette dernière décroît lorsque la température de la goutte croît conformément à l'éq. 1.8, et donc une température élevée favorise la phase d'étalement sans nécessiter une vitesse d'impact importante.

$$\mu = \mu_f \exp\left(\frac{E}{RT_p}\right) \quad (1.8)$$

où E est l'énergie d'activation, T_p est la température de la particule et μ_0 est la viscosité dynamique au point de fusion de la particule.

Souvent, dans les modèles d'impact de goutte, le degré d'étalement d'une lamelle (diamètre final de la lamelle rapporté au diamètre initial de la particule qui impacte) est corrélé aux nombres de Reynolds et de Weber. De nombreuses études d'impact de gouttes en particulier dans des conditions de la projection plasma utilisent cette approche [4], [40], [46] et [47].

Le processus d'étalement et celui de formation de la lamelle ne dépendent pas seulement des paramètres intrinsèques de la particule qui impacte mais également de la nature du substrat et de sa préparation en projection plasma.

Les études réalisées sur l'étalement de lamelles en projection plasma sont, en majeure partie, réalisées pour des substrats lisses et très peu sur des substrats rugueux. En effet, les lamelles projetées sur un substrat rugueux sont assez difficiles à caractériser, en particulier pour les observations optiques du fait du problème lié à la profondeur de champ du microscope utilisé, qui est souvent inférieure à la rugosité de la surface qui peut être caractérisée alors par la rugosité totale² (R_t). Pour contrecarrer cette difficulté, les études fondamentales sont généralement réalisées sur des substrats lisses. Les lamelles observées en projection plasma sur substrats lisses ont soit *i*) une forme de disque soit *ii*) une forme déchiquetée [48], [49] [22], [50], [51] et [52]. Ce point sera discuté au § 1.3.

1.2.4.2 Résistance thermique de contact

La solidification intervient avant la fin de l'étalement de la lamelle, et la connaissance du champ de température et des flux de chaleur échangés à l'interface lamelle - substrat est d'une importance cruciale car ils conditionnent la morphologie de la lamelle et donc les propriétés du dépôt. A l'interface lamelle-substrat les phénomènes thermiques (refroidissement et solidification) sont régis essentiellement par la qualité du contact thermique établi entre la lamelle et le substrat. Ce contact peut être modélisé par une résistance thermique de contact. Cette dernière étant définie originellement dans le cas d'un contact entre deux surfaces solides. Le contact n'étant pas parfait à cause de la rugosité présente à la surface de chacune des deux surfaces, le contact est supposé s'établir uniquement sur une fraction de la surface apparente [53].

D'autres phénomènes peuvent modifier la qualité du contact à l'interface lamelle-substrat tels que la mouillabilité de la goutte vis-à-vis du substrat ou encore le développement d'une couche d'oxyde à la surface du substrat.

Par unité de surface à l'interface, la résistance thermique de contact est définie par [54] :

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{Q} \quad (m^2.K/W) \quad (1.9)$$

où ΔT est l'écart de température à l'interface entre les deux surfaces et Q le flux de chaleur normal aux surfaces.

Un contact non parfait entre deux solides modifie fortement l'échange de chaleur à l'interface comme le montre la Fig. 1.9 (a). Physiquement les lignes de flux de chaleur convergent, d'une part, vers les zones de contacts (micro-contacts) et produisent ce qu'on appelle le phénomène de constriction et, d'autre part, aussi vers les espaces interstitiels qui jouent le rôle d'isolant thermique non parfait. Ce phénomène de constriction est à l'origine de la résistance thermique de contact [55] et provoque donc un gradient de température à l'interface (voir Fig. 1.9 (b)).

2. C'est la distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux.

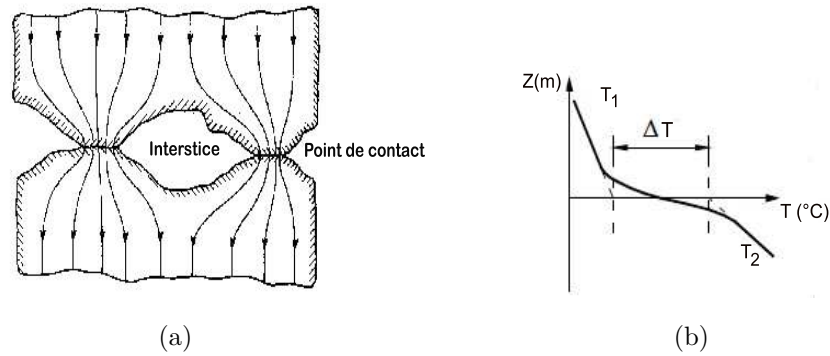


FIGURE 1.9 – Phénomène de constriction à travers une surface rugueuse : a) Les lignes de flux de chaleur (en traits noirs) convergent vers les points de contact, b) chute de température à l'interface .

L'effet de la température du substrat joue un rôle important dans le processus du refroidissement de la lamelle durant son étalement . Ainsi il a été expérimentalement montré que le refroidissement d'une lamelle liquide s'étalant sur un substrat en acier inoxydable poli miroir à température ambiante mais ayant subi un préchauffage à 673 K était moins bon que sur le même substrat maintenu à 673 K [13].

Cette différence de comportement peut s'expliquer par la présence d'adsorbats et de condensats en surface qui peuvent empêcher le liquide de remplir la totalité des cavités offertes par les irrégularités de surface et qui piègent ainsi des poches d'air ou de vapeur d'eau dans les crevasses . De plus, la pénétration du liquide dans les interstices du substrat est d'autant meilleure que la pression de contact est élevée, or celle-ci est maximale au point d'impact et diminue lors de l'étalement de la lamelle et donc, plus son rayon est grand, moins bon est le contact .

Ceci amène donc au problème de la résistance thermique de contact (R_{th}) variant avec le rayon de la lamelle dans le temps . En outre, lors de la phase de solidification, R_{th} varie également du fait que le contact entre la lamelle solidifiée et le substrat diminue avec la rétraction du liquide . Actuellement il n'existe pas de relation générale qui permette de prédire la valeur de la résistance thermique de contact, cependant des mesures expérimentales permettent de l'estimer . Il est généralement admis que dans les conditions de projection plasma, des valeurs de la résistance thermique de contact de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-7} $m^2.K/W$ caractérisent un bon contact entre la lamelle et le substrat, alors qu'un mauvais contact correspond à des valeurs de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-5} $m^2.K/W$ [2].

1.2.5 Aspects physiques de la surface du substrat

1.2.5.1 Topographique de la surface

Mellali et al. [14] ont montré que le dépôt adhère faiblement sur des substrats froids et polis. En projection plasma, le substrat subit généralement une opération de sablage destinée à produire une certaine rugosité de surface, adaptée à la taille des particules projetées. Ceci est essentiel pour que les lamelles s'accrochent aux aspérités lors de leur refroidissement selon un mécanisme illustré par le schéma de la Fig. 1.10. Mellali et al. [14], ont montré également que le chauffage du substrat favorise l'adhérence des lamelles avec le substrat, mais aussi entre lamelles : globalement l'adhésion - cohésion du dépôt est multipliée par un facteur de 2 à 4 sur un substrat préchauffé. La rugosité de surface a tendance à diminuer le degré d'étalement de la lamelle. Par exemple, Moreau et al. [49] ont montré que le degré d'étalement d'une lamelle de Molybdène est réduit d'un facteur 2 quand la rugosité moyenne du substrat³ (R_a) passe de 0,5 à 9,2 μm .

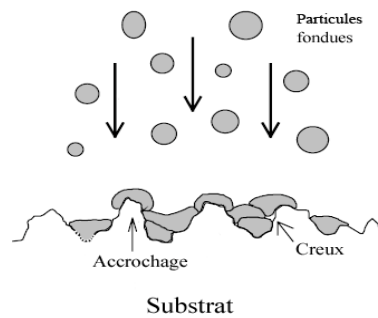


FIGURE 1.10 – *Accrochage mécanique des particules fondues sur les aspérités de la surface*

1.2.5.2 Développement de la couche d'oxyde

Le préchauffage d'un métal entraîne une modification de la couche d'oxyde superficiel : sa composition chimique, sa rugosité et son épaisseur sont modifiées. Ainsi, plusieurs auteurs s'accordent sur le fait que la rugosité moyenne de surface R_a , définie par l'éq. 1.10, de métaux et d'alliages (excepté pour l'or et le platine) croît avec le préchauffage du substrat. La Fig. 1.11 montre la croissance de la couche d'oxyde sur un acier inoxydable après préchauffage.

3. Rugosité arithmétique : écart moyen arithmétique par rapport à la ligne moyenne de la rugosité

Cette modification de la couche d'oxyde s'accompagne aussi de la modification de la rugosité de surface à l'échelle nanométrique [56] et [13].

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx \quad (1.10)$$

avec $z(x)$ hauteur locale de la surface à l'abscisse x et L distance entre deux points de la surface.

La modification de la rugosité à l'échelle nanométrique a conduit Fukumoto et al. [56] à introduire d'autres paramètres que le R_a , pour caractériser la topographie d'une surface : Ils ont ainsi utilisé le paramètre d'asymétrie ou "Skewness" en anglais (S_k), défini par l'éq. 1.11. Ce paramètre croit vers des valeurs positives lors du préchauffage du substrat et la forme des lamelles évolue d'une morphologie déchiquetée vers une forme de disque.

$$S_k = \frac{1}{R_q^3} \int_{-\infty}^{+\infty} (z - m)^3 \phi(z) dz \quad (1.11)$$

où z est la hauteur du pic, R_q représente l'écart moyen quadratique du profil évalué, m est sa valeur moyenne et $\phi(z)$ est la fonction de distribution d'amplitude de la rugosité de la surface.

Une analyse par MFA⁴ [13] de la surface d'un acier inoxydable 304L à température ambiante (voir la Fig. 1.12 (a)) ensuite soumise à un préchauffage à 673 K (voir la Fig. 1.12 (b)) montre clairement une modification de la surface par développement d'une certaine rugosité à l'échelle nanométrique. Physiquement le "Skewness" représente le nombre de pics par rapport à celui des creux (voir la Fig. 1.12 (c)). Par exemple, une surface ayant subi un préchauffage et qui présente un $S_k \sim 1$, présente plus de pics que de creux à sa surface par rapport à une surface non préchauffée dont le $S_k \sim 0$.

Ces résultats montrent que le changement de la topographie de la surface à l'échelle nanométrique, dans le cas d'un acier inoxydable 304L, affecte considérablement les propriétés de mouillage de la goutte [52] à la surface du substrat et modifie fortement la dynamique d'écoulement durant la phase d'étalement. Il s'avère alors que, le préchauffage du substrat métallique est un paramètre clé dans le processus de formation de la lamelle.

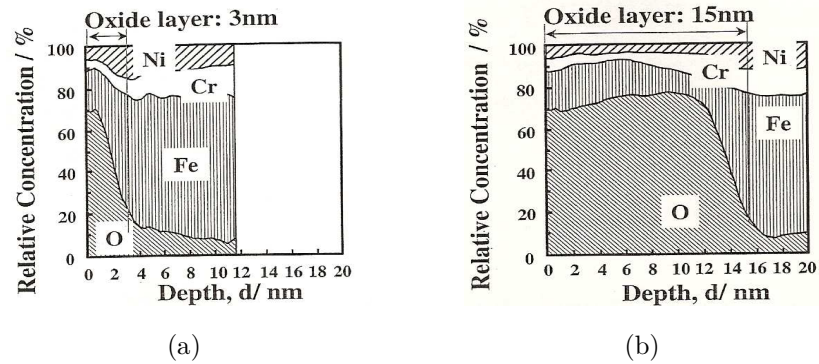


FIGURE 1.11 – Profil de la couche d'oxyde d'un acier inoxydable type AISI304L : a) substrat poli à $0,3 \mu\text{m}$ et b) substrat préchauffé à 673 K après polissage à $0,3 \mu\text{m}$. D'après [57].

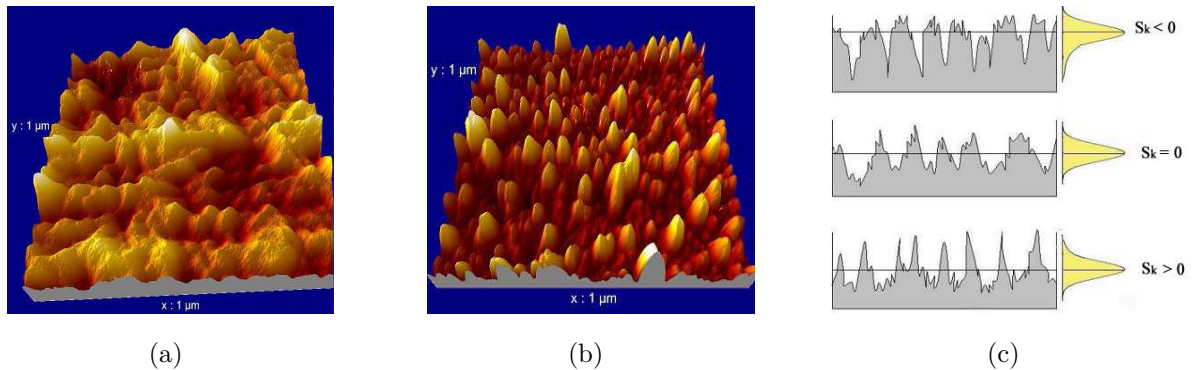


FIGURE 1.12 – Micrographie par AFM de l'état de surface d'un acier 304 L poli miroir ($1 \times 1 \mu\text{m}^2$) a) non préchauffée, b) préchauffée à 673 K et c) Symétrie de surface pour R_a identique. D'après [52]

1.3 Études expérimentales de la formation des lamelles

1.3.1 Formes des lamelles en projection plasma

En projection plasma, les particules qui impactent le substrat doivent être dans un état fondu pour former un dépôt qui présente de bonnes propriétés thermomécaniques [58]. Plusieurs études ont été consacrées à la façon dont les lamelles se forment, afin d'établir un lien entre les paramètres d'impact et les propriétés du dépôt. Kudinov et al. [23] ont répertorié les principales morphologies qui peuvent être observées après impact de particules céramiques sur un substrat dans les conditions de la projection plasma (voir Fig. 1.13).

La Fig. 1.13 montre une classification assez large des formes des lamelles, depuis une forme de disque jusqu'à des formes déchiquetées, en fonction de l'état de fusion et de la vitesse d'impact des particules. Cependant, cette classification des morphologies des lamelles doit être complétée en tenant compte des conditions du substrat (en particulier sa température). Les références de la Fig. 1.13 sont réunies dans le Tableau 1.1.

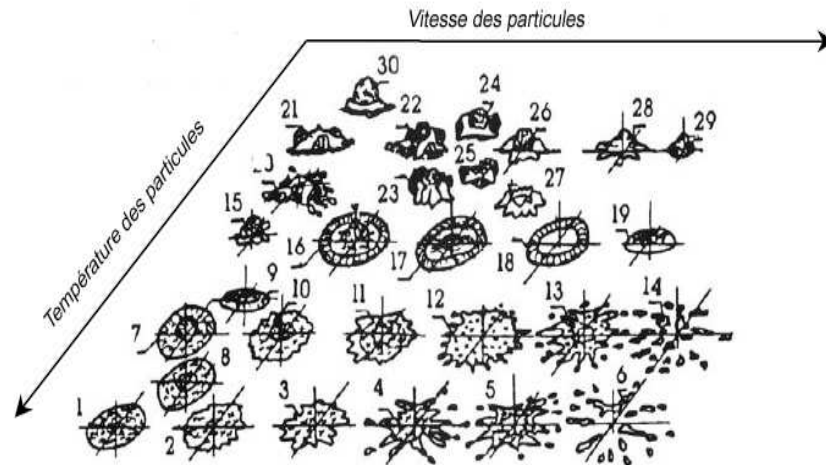


FIGURE 1.13 – Représentation schématique des lamelles obtenues par projection plasma de particules d'alumine sur un substrat froid [23].

TABLE 1.1 – Références de la Figure 1.13

n° des particules	État de fusion des particules avant impact
1, 2, 3, 4, 5 et 6	Particules totalement fondues
7, 8, 9, 10 et 11	Particules totalement fondues avec inclusion de poches de gaz
12, 13 et 14	Particules surfondues avec évaporation de matière
15	Particule fondue en surface
16, 17, 18 et 19	Particules durcies en surface et fondues à cœur
20, 21 et 30	Particules dont la surface est solidifiée et le cœur fondu
22, 23, 24, 25, 26, 27 et 30	Une couche liquide intermédiaire existe entre un cœur non fondu et la couche supérieure resolidifiée
28 et 29	état solide avec haute vitesse d'impact

1.3.2 Difficultés de l'étude expérimentale de l'impact des gouttes

L'étude expérimentale de la formation des lamelles dans les conditions de la projection thermique est confrontée à deux contraintes majeures :

- i) Les temps caractéristiques : dans les conditions de la projection plasma, le temps d'étalement de la lamelle est de l'ordre de quelques microsecondes et celui de la solidification complète, qui commence avant la fin de l'étalement, est de l'ordre de quelques microsecondes ou plus,
- ii) Les dimensions caractéristiques : une goutte de $30\ \mu\text{m}$ projetée par plasma, aura après étalement un diamètre qui peut atteindre $120\ \mu\text{m}$ avec une épaisseur d'autant plus faible qu'elle est bien fondue et que sa vitesse d'impact est élevée : des épaisseurs de l'ordre de $0,6\ \mu\text{m}$ peuvent ainsi être obtenues.

Idéalement, pour suivre tout le processus de l'évolution de la particule, durant son étalement, les images doivent être prises avec une périodicité de quelques dixièmes de μs . Ceci reste encore impossible, les caméras ultra-rapides disponibles sur le marché permettant un enregistrement de 100 images consécutives pour 1 million d'images par seconde avec un temps d'exposition de $500\ \text{ns}$ [59]. Il convient donc pour mener une étude sur ces phénomènes, de considérer des échelles de temps plus longues et de s'intéresser à l'étude de gouttes millimétriques.

1.3.3 Mesures sur des gouttes millimétriques

L'étude expérimentale sur des gouttes de taille millimétrique présente une voie d'investigation complémentaire pour la compréhension des phénomènes physiques qui régissent la formation des lamelles. À cette échelle, l'impact puis l'étalement de la goutte sont plus faciles à observer puisque le temps d'étalement de la goutte est de l'ordre de quelques ms (contre quelques μs en projection plasma). Ainsi, des caméras rapides avec un temps d'enregistrement de l'ordre de 4 500 images/s suffisent pour suivre le processus d'étalement de la goutte après l'impact

1.3.3.1 Dispositif de chute libre de gouttes millimétriques

Fukumoto et al. [60] ont développé un dispositif permettant d'étudier l'impact de gouttes millimétriques en chute libre sur une surface solide, voir Fig. 1.14. Le dispositif est composé d'un système de génération de gouttes utilisant un système d'induction RF pour la fusion du matériau métallique, d'un pyromètre bichromatique ($50\ \text{ns}$) permettant de mesurer la température de la goutte et d'une caméra rapide pour l'imagerie (4 500 images/s) ; l'ensemble des mesures est recueilli par une station d'acquisitions de données.

Cependant, l'induction RF ne permet que la fusion des métaux, ce qui en limite son application pour des matériaux à haut point de fusion comme les céramiques. Par la suite, le système de chauffage a été modifié par Cedelle et al. [61] pour inclure un plasma inductif, voir Fig. 1.15 et pourvoir ainsi fondre des céramiques. Les résultats obtenus par [61] sur l'impact de gouttes de cuivre nous ont servis pour valider les résultats du code numérique qui sera décrit dans le chapitre 3.

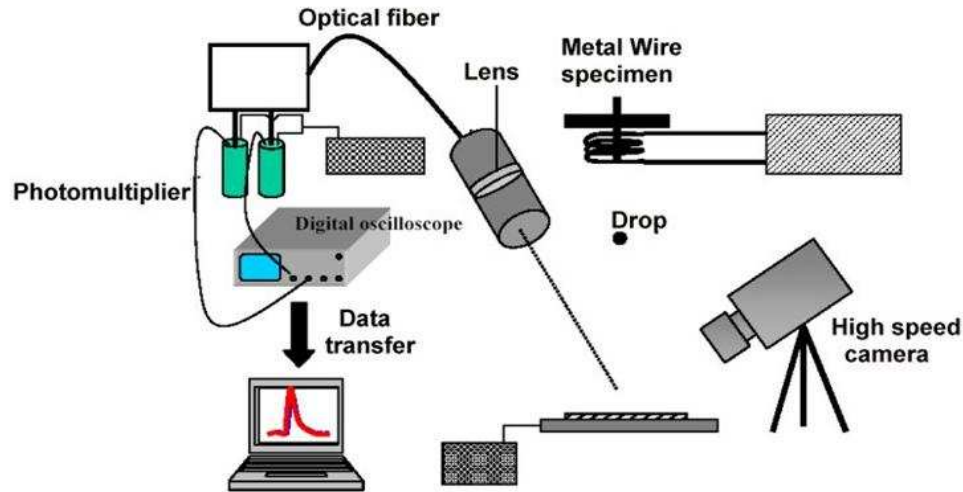


FIGURE 1.14 – Dispositif expérimental de chute libre de goutte millimétriques avec fusion par induction RF (métal), avec suivi de la température à l'impact grâce à un pyromètre [62].

1.3.3.2 Visualisation de l'impact

La Fig. 1.16 montre les séquences d'impact d'une goutte de cuivre ($d_0 = 2,6$ mm, $v_i = 4$ m/s) sur un substrat en acier inox. 304L à température ambiante. Elle met en évidence le phénomène de "flattening splashing" qui est du à l'effet de la température du substrat.

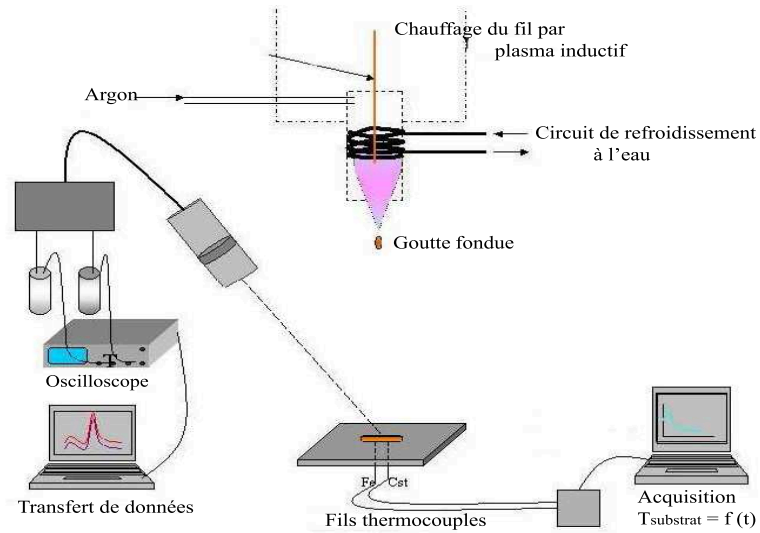


FIGURE 1.15 – Dispositif de chute libre de gouttes millimétriques (métal ou céramique) avec fusion à l'aide d'un plasma d'argon RF à pression atmosphérique, avec suivi de la température à l'impact par un pyromètre et des thermocouples [52].

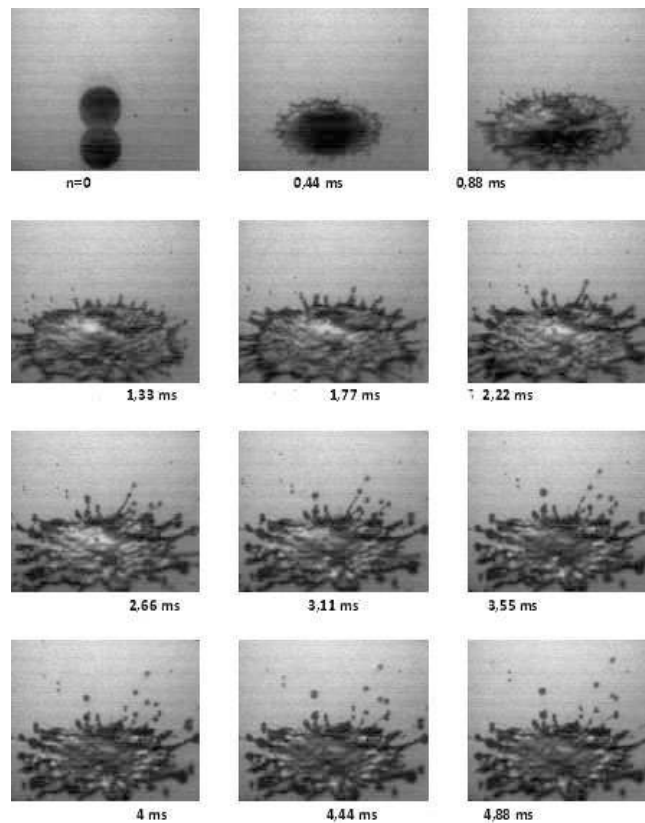


FIGURE 1.16 – Impact et étalement d'une goutte de cuivre ($d_i = 2,1 \text{ mm}$, $v_i = 4 \text{ m/s}$) sur un substrat froid en acier inox 304L poli miroir. Un temps de 44 ms sépare deux photographies successives, d'après [62]

1.3.3.3 La température de transition

Les résultats expérimentaux montrent que, quand on augmente la température du substrat, les formes des lamelles projetées subissent une transition de morphologie : d'une forme déchiquetée sur un substrat à température ambiante, tend vers une forme de disque plus homogène sur un substrat préchauffé, comme l'illustre le schéma de la Fig. 1.17.

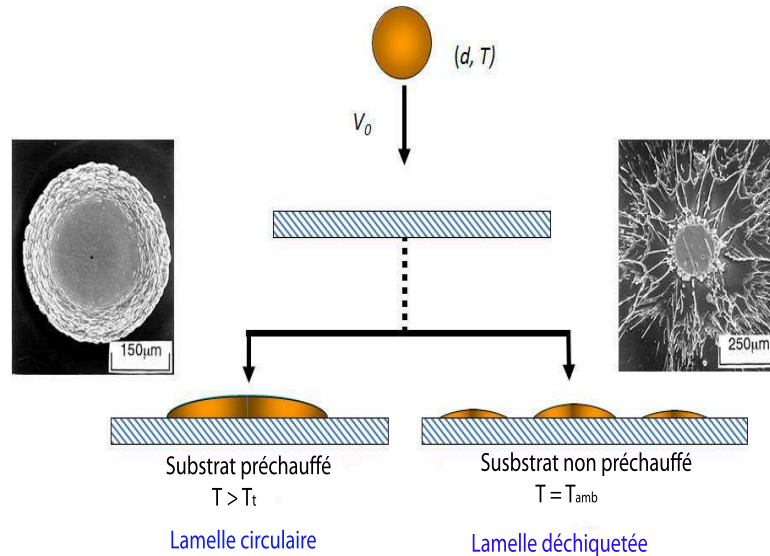


FIGURE 1.17 – Effet de la température de transition (T_t) sur la morphologie des lamelles

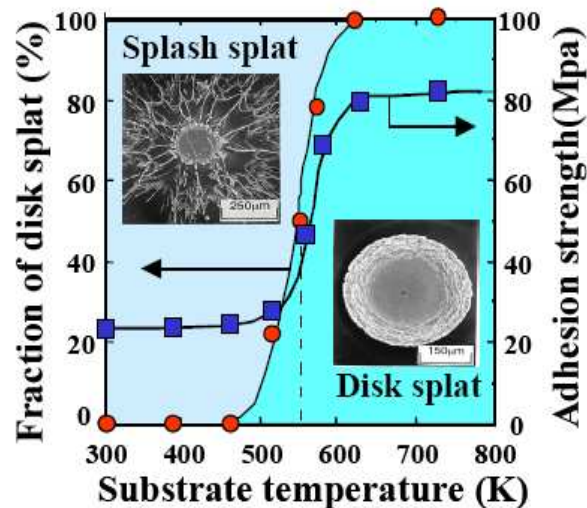


FIGURE 1.18 – Dépendance à la température du substrat de la fraction en forme de disque des lamelles et de l'adhésion du dépôt : gouttes de Ni projetées sur un acier inoxydable AISI304 (d'après [63])

La transition de morphologie se produit pour une température critique dans un domaine relativement étroit de température. Cette température critique est appelée généralement *température de transition* (notée T_t) et fut introduite par par Fukumoto et al. [63]. Elle correspond la température pour laquelle plus de 50 % des lamelles ont une forme de disque. La Fig. 1.18 montre l'évolution de la fraction des lamelles sous forme de disque en fonction de la température du substrat pour des particules de nickel projetées sur un acier inoxydable de type AISI 304.

Fukumoto et al. [63] ont identifié la température de transition (T_t) pour différents métaux (Ni, Cu, Cr, Mo et Cu-Zn) et différents oxydes (Al_2O_3 , T_iO_2 et YSZ⁵) projetés sur un substrat d'acier inoxydable de type AISI 304 dans une gamme de température comprise entre 318 et 610 K. Des résultats similaires ont été obtenues pour différents matériaux : nickel, alliage à base de nickel (Ni-Cr, Ni-Al) aluminium, étain, cuivre, molybdène, alliage de titane (TA6V)) sur différents substrats (acier inoxydable AISI304, cuivre, or, Al-Si-Cu, inconel, verre et YSZ) [64], [65], [66], [61] et [67].

Cependant, le phénomène de splashing a été observé également pour des températures de substrat maintenues au-dessus de T_t mais avec des nombres de Reynolds (Re) et de Weber (We) suffisamment importants. Dans ces conditions, Li et al [68] ont observé le splashing des lamelles de cuivres obtenues pour des valeurs de $Re > 50\,000$.

Pendant le préchauffage du substrat, le contrôle de la température ainsi que la durée du préchauffage est d'un grand intérêt tant pour la formation de la couche d'oxyde à la surface du substrat que pour la morphologie des lamelles. McDonald et al [69] ont montré que le chauffage d'un acier inoxydable à 650 °C favorise le splashing, alors qu'avec une température de surface du substrat à 350 °C les lamelles obtenues ont une forme de disque. Les mesures effectuées par Haure [70] vont dans ce sens et montrent que la composition de la couche d'oxyde à 650 °C est une hématite et une spinelle de nickel.

1.3.4 Mesures sur des gouttes micrométriques

1.3.4.1 Développement des pyromètres de mesure

Un pyromètre rapide avec un temps de réponse de 50 ns placé à 45 ° par rapport à l'axe de la trajectoire de la particule (quelques particules sélectionnées) permet de mesurer le rayonnement thermique de la particule durant son vol et pendant son étalement, ensuite ce rayonnement est converti en signaux électriques. Ces derniers permettent d'évaluer la vitesse de la particule en vol lors de son passage entre deux-points de mesure, sa température de surface ainsi que de calculer la vitesse de refroidissement de la lamelle au contact du substrat.

5. Yttrium Stabilized Zirconia

1.3.4.2 Visualisation de l'impact splashing

Au moment de l'impact, comme Armster et al. [20] le long de la ligne de contact au point triple. Des gouttelettes se détachent et sont alors éjectées loin du point d'impact sous forme de gouttelettes secondaires dans une direction oblique par rapport à la surface du substrat. Ce phénomène, observé immédiatement au moment de l'impact, est appelé le *prompt splashing* ou impact splashing. Escure et al. [44] l'ont observé dans les conditions de la projection plasma et la formation de ces gouttelettes a été corrélée au nombre de *Sommerfeld* (K) qui caractérise l'écoulement de la goutte.

La Fig.1.19 [62] montre le phénomène d'impact splashing d'une particule de zircone ($d = 30 \mu\text{m}$ et $v_i = 200 \text{ m/s}$) après impact suivant la normale à la surface d'un substrat en acier inoxydable préchauffé. On voit la formation et l'éjection de gouttelettes secondaires de faible taille (probablement, $< 1 \mu\text{m}$) projetées avec des vitesses comprises entre 15 et 20 m/s (inférieures à la vitesse initiale d'impact) en faisant un angle entre 30° et 60° avec la normale au substrat. Les éjections sont observées pour des conditions du nombre de Sommerfeld $K > 30$ indépendamment de la température du substrat qui a été variée, lors de l'expérience, de la température ambiante jusqu'à 0,7 fois sa température de fusion. Cependant, cette perte de masse provoquée par l'éjection des gouttelettes est faible comparée à la masse de la particule.

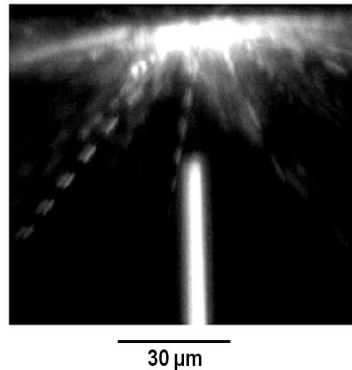


FIGURE 1.19 – Visualisation du phénomène d'impact splashing d'une particule de zircone ($d = 30 \mu\text{m}$ et $v_i = 200 \text{ m/s}$) et de l'éjection de gouttelettes secondaires au début de l'impact sur un acier inoxydable préchauffé. [62]

1.3.4.3 Visualisation de l'étalement

1.3.4.3.1 Par une caméra rapide : Shinoda et al [71] ont utilisé une caméra rapide (HSV⁶) capable d'enregistrer 10^6 images/s, incorporée dans l'installation montrée sur la Fig. 1.20. Elle permet de visualiser l'impact et l'étalement des particules dans les conditions de la projection plasma. L'évolution de la température de la particule au cours de l'étalement est

6. High Speed Video

suivie par un pyromètre à deux couleurs pendant que la caméra rapide observe l'impact de la particule. La Fig. 1.21 représente un signal typique du pyromètre et montre comment il est coordonné avec la caméra et les phases d'enregistrement. Les images, prises par la caméra rapide (HSV), de l'impact de gouttes YSZ projetées par plasma sur un substrat en verre à température ambiante révèlent que le temps d'étalement de la lamelle est de l'ordre de 5 à 8 μs , alors que sur un substrat chauffé, ce temps est de l'ordre de 2 à 3 μs . L'enregistrement d'images successives de l'impact devient alors quasiment impossible.

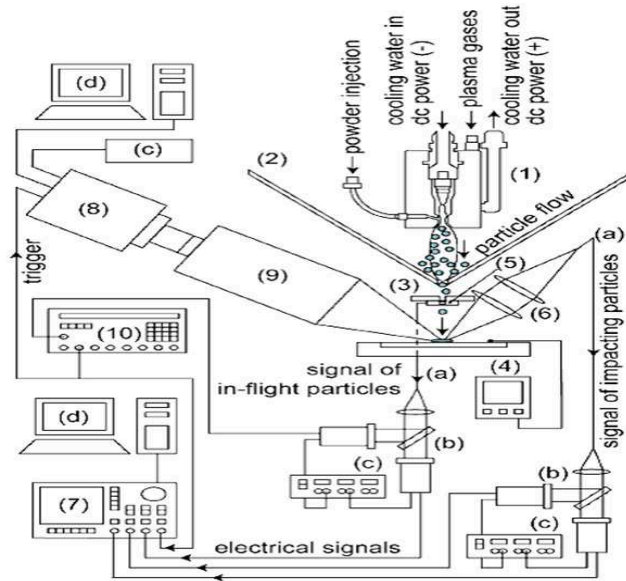


FIGURE 1.20 – Schéma de l'installation de visualisation de l'impact dans les conditions de la projection plasma 1/ torche à plasma d'arc, 2/ masque spatial pour la sélection des particules, 3/second orifice de sélection, 4/ substrat instrumenté avec des thermocouples, 5/ détecteur en vol, 6/ lentilles, 7/ oscilloscope, 9/ microscope et 10/ chronomètre digital (d'après [71]).

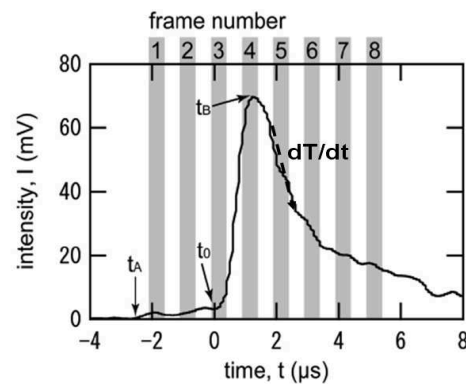


FIGURE 1.21 – Évolution du rayonnement thermique d'une goutte après impact. La zone hachurée correspond à la période d'enregistrement par la caméra HSV (d'après [71]).

1.3.4.3.2 Photographie de l'impact : Mehdizadeh et al. [72] ont mis au point une installation de photographie d'images d'une seule particule durant son étalement pour une gamme de temps donnée. La variation de cette gamme de temps pour différentes particules, supposées identiques à l'impact (particules de mêmes diamètre, température et vitesse) permet d'obtenir des photographies à différents instants de l'étalement. La Fig. 1.22 montre le schéma expérimental de cette installation.

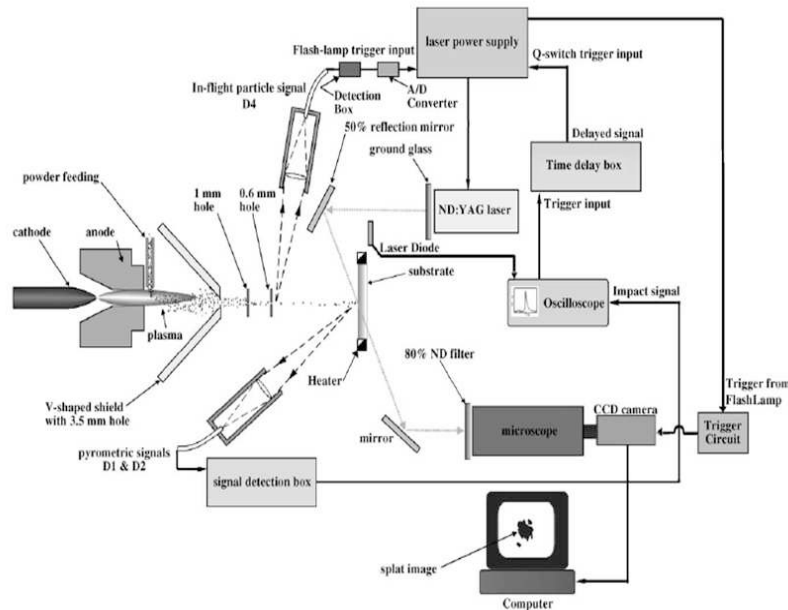


FIGURE 1.22 – Schéma d'une installation expérimentale pour la photographie de l'impact d'une particule sur un substrat en verre (d'après [72])

Les analyses pyrométriques combinées aux observations par caméra, montrent que des particules de Mo, Ni et YSZ projetées sur un substrat en verre porté à une température inférieure à la température de transition (T_t), s'étaient beaucoup plus que sur un substrat de même nature, mais porté à une température au dessus de T_t . De plus, les lamelles présentent un cœur solidifié et des digitations (doigts liquides) sont formées en périphérie. Des observations similaires ont été rapportées pour des substrats en acier inoxydable [50] et [61].

Les vitesses de refroidissement, mesurées sur les surfaces de substrats maintenus au-dessus de T_t pendant la phase de refroidissement des lamelles, sont beaucoup plus élevées (jusqu'à 100 fois) que celles obtenues sur une surface froide ($T_{sub} < T_t$) [61] et [73]. Ceci indique bien qu'un bon contact s'est établi entre la lamelle et le substrat et ce résultat est confirmé par les études de Fukumoto [67].

1.3.5 Résultats expérimentaux sur la formation de la lamelle

Les mesures sur la formation de lamelles, sont en général, réalisées sur un substrat plat et lisse ($R_a < 0,05 \mu\text{m}$ pour un métal poli et $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ pour les céramiques), dans le milieu ambiant et, dans la plupart des cas, avec une incidence normale au substrat.

1.3.5.1 Effet de la température de transition

1.3.5.1.1 Modification de la surface du substrat : le préchauffage d'une surface métallique au-dessus de T_t [65], [74], [75], [73], [66] ou un traitement par un laser assez puissant pour modifier la couche d'oxyde [76], [77] entraîne les phénomènes suivants : modification de l'épaisseur de la couche d'oxyde, désorption des adsorbats et des condensats et changement de la rugosité de la surface à l'échelle nanométrique. Les morphologies des lamelles obtenues présentent alors une forme de disque avec une vitesse de refroidissement plus élevée (faible résistance thermique de contact) et des vitesses d'étalement plus importantes que sur un substrat froid. La question qui se pose alors est de savoir quel est le paramètre dominant dans la détermination de la forme de la lamelle.

Les travaux de Cedelle et al. [61] montrent que le préchauffage d'un substrat en acier inoxydable AISI 304 (avec $S_k > 0$) améliore la mouillabilité des gouttes de cuivre posées à sa surface. Lorsque des particules de Ni et YSZ sont projetées sur un tel substrat préchauffé, le temps d'étalement est réduit et les vitesses de trempe sont plus rapides comparées à celles sur un substrat non préchauffé. Il est vraisemblable que la modification de S_k (éq. 1.11) et la désorption des adsorbats contrôlent ce phénomène.

Cette conclusion est confortée par les études de Fukumoto et al. [77] pour des lamelles de cuivre obtenues sur un substrat AISI 304 traité par laser avec une puissance variant de 0 à 90 W/m². La valeur de R_a reste globalement inchangée, pratiquement celle du substrat poli, jusqu'à une puissance laser de 50 W/m². Au-delà de cette valeur R_a augmente, de même que S_k qui prend des valeurs positives et le pourcentage des lamelles en forme de disque varie linéairement avec l'augmentation de S_k .

Malgré ces études expérimentales, de nombreuses questions subsistent, car la plupart des résultats expérimentaux sont incomplets : l'analyse de la couche d'oxyde n'est pas donnée, ainsi que les vitesses de trempe, ou la détermination de la résistance thermique de contact, ou les vitesses d'étalement et ainsi de suite. D'autres observations qui ont été déjà présentées, concernent le phénomène de splashing des gouttes sur des substrats préchauffés au-dessus de T_t mais impactant avec des nombres de Reynolds à l'impact suffisamment élevés. Par exemple, Li et al. [68] ont montré que malgré un substrat préchauffé au-dessus de T_t , le splashing est observé pour des particules de cuivre pour un $\text{Re} > 50\,000$.

1.3.5.1.2 Désorption des adsorbats et des condensats : Quand une particule en fusion impacte sur une surface froide, l'échange thermique entre cette dernière et la goutte provoque une évaporation des contaminants présents à la surface du substrat (adsorbats et condensats) créant ainsi une pression sous la goutte en étalement, empêchant alors l'établissement d'un bon contact, excepté dans la partie centrale qui présente un bon contact du fait de la pression d'impact (impact initial). La goutte s'étale alors sans solidification pour atteindre son maximum d'étalement formant une fine lamelle. Une portion du liquide commence à se désintégrer dans la partie centrale en cours de solidification, et parfois des zones dépourvues de matières sont observés également dans cette partie de la lamelle.

Le chauffage d'un substrat en or [77] ou en YSZ [61] au-delà de la température de transition (723 K et 533 K respectivement) montre que les lamelles présentent une forme de disque. L'effet du préchauffage n'induit aucune modification de la rugosité (R_a), et dans les deux cas la valeur du Skewness (S_k) ne change pas et reste négative. Il semble donc, dans ce cas, que le seul phénomène physique qui induit la formation de lamelles en forme de disque soit la désorption des adsorbats et des condensats. Pour déterminer l'effet de la rugosité de surface sur la morphologie des lamelles, un acier inoxydable AISI 304 a été poli (produisant un $S_k < 0$) ensuite préchauffé jusqu'à 673 K (augmentant le S_k jusqu'à 0,895) et ensuite revêtu d'une couche d'or de quelques nanomètres [77], le *splashing* se produit que ce soit sur un substrat préchauffé ou non, indiquant que le S_k n'est pas le facteur dominant.

1.3.5.1.3 Résistance thermique de contact : les mesures de la résistance thermique de contact ont été réalisées essentiellement sur des gouttes millimétriques, impactant sur un substrat, en mesurant la variation de la température à la surface de la lamelle par un pyromètre optique [52] ou encore la variation de la température du substrat par des thermocouples [78]. La détermination des valeurs de la résistance thermique de contact peut être obtenue par comparaison des résultats de modèles numériques ou analytiques (généralement 1D) et les mesures expérimentales de la variation de température du substrat et des gouttes.

Moreau et al. [79] ont mesuré les vitesses de refroidissement de particules de molybdène impactant sur divers substrats au moyen d'un pyromètre à deux couleurs. La résistance thermique de contact a été calculée à l'aide d'un modèle numérique (différences finies) monodimensionnel du refroidissement d'une lamelle sur un substrat; elle varie dans une gamme de 10^{-5} à 10^{-7} $\text{m}^2\text{K.W}^{-1}$ suivant les conditions de préchauffage du substrat.

McDonald et al. [69] ont étudié l'impact de gouttes de YSZ sur des substrats en verre et en inconel pour deux températures : ambiante et 400 °C. Un pyromètre à deux couleurs permet de collecter le rayonnement thermique émis par la surface de la lamelle durant son étalement et d'en déduire la vitesse de trempe des gouttes. Un modèle analytique a été développé pour calculer les valeurs de la résistance thermique de contact à l'interface lamelle/substrat.

Les calculs montrent que les valeurs de cette résistance sont beaucoup plus faibles sur un substrat préchauffé (ou chauffé) que sur un substrat maintenu à température ambiante. Les vitesses de trempe sont plus importantes pour un substrat préchauffé, comparées à celles obtenues pour un substrat froid, ce qui est attribué à la faible résistance thermique de contact dans le premier cas.

Le Tableau 1.2 résume les valeurs de la résistance thermique de contact mesurées pour différents couples particule/substrat en fonction de la température du substrat (d'après [69]).

TABLE 1.2 – Mesures de R_{th} pour différentes températures de substrat [69].

Matériaux/Substrats	T_{sub} (°C)	R_{th} ($m^2.K.W^{-1}$) $\times 10^{-7}$
Mo/Verre	27	490 ± 55
	400	$6,5 \pm 1,0$
Mo/Inconel	27	190 ± 15
	400	$12 \pm 2,0$
	préchauffé ; 27	55 ± 10
Zircone/Verre	27	220 ± 30
	400	$10 \pm 3,0$

Du fait des grandes vitesses de trempe ($> 10^8$ K/s) pendant le début de la phase d'étalement de la goutte, son contact avec le substrat est quasiment parfait en son centre, il s'ensuit que la goutte subit un refroidissement assez élevé ce qui déclenche une nucléation hétérogène au contact du substrat. Fukumoto et al. [67] expliquent que le splashing de la lamelle observé durant son étalement sur un substrat froid est probablement dû à une solidification rapide qui se produit dans la partie de la goutte en contact direct avec le substrat, ou encore à une mauvaise mouillabilité de la surface du substrat.

1.3.5.2 Influence de la fusion du substrat

La projection de particules de Molybdène sur un substrat en acier inoxydable montre que le substrat subit une fusion locale au centre d'impact (l'effusivité du Mo est supérieure à celle de l'acier). Cette fusion locale déforme le substrat localement sous l'effet de l'impact de la goutte car il est alors au-dessus de la température de fusion. L'écoulement de la lamelle liquide se trouve donc fortement modifié, *ipso facto* la lamelle se désintègre et "splash" (voir Fig. 1.23).

Le cas des morphologies des lamelles de Mo est particulier, les lamelles obtenues sur un substrat en acier inoxydable qu'il soit chauffé ou non (jusqu'à 400 °C) ont leur partie périphérique qui "splash" et la partie centrale qui se désintègre. Par contre, ces lamelles observées sur un substrat en Mo préchauffé à 200 °C, ont bien une forme de disque.

Cette singularité de morphologie, qui est dûe à la déformation locale du substrat, trouve son origine dans la différence des effusivités thermiques qui est plus importante pour le Mo [80] et [81] ainsi que dans celle des points de fusion, largement plus  lev e pour Mo que pour l'acier inoxydable (environ 2600  C contre 1500  C). La fusion locale du substrat peut ainsi crée une discontinuité de contact (avec la goutte en fusion) et diminuer la résistance thermique de contact [82].

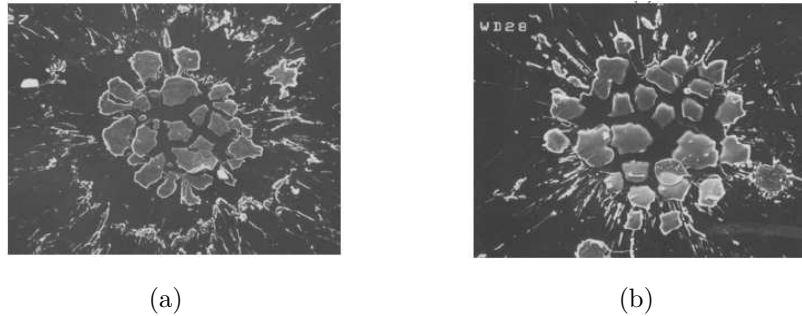


FIGURE 1.23 – Morphologies de lamelles de Mo d epos es sur une surface d'acier inox. pr echauff e respectivement   a) 200  C et b) 400  C (d'après [81])

1.3.5.3 Cas d'un substrat rugueux

Comme nous l'avons déjà soulign e dans ce manuscrit, en projection plasma le substrat doit subir une opération de sablage, permettant de crée une rugosité et doit ˆetre adaptée à la taille des particules pour que les lamelles adh erent au substrat [14] et [72] par un mécanisme d'accrochage mécanique. Cependant, une telle rugosité perturbe fortement la dynamique de l'écoulement de la lamelle liquide, car cette dernière est contrainte d'une part de surmonter les pics (de quelques μm de hauteur) et d'autre part de s'écouler à travers les vallées. Ainsi la lamelle voit son diamètre d'étalement se réduire (par rapport à une surface lisse : $R_a < 0,05 \mu\text{m}$) et son épaisseur devenir plus importante (refroidissement plus lent).

L'étape de déformation de la goutte est une étape cruciale dans la formation d'un d epˆot en projection plasma [75]. En particulier sur un substrat rugueux, non seulement l'écoulement de la lamelle liquide est fortement modifi e, mais cela peut également affecter le transfert de chaleur qui dépend de la manière dont la lamelle va couvrir la surface du substrat [59].

Plusieurs études ont d emontr e l'existence d'une faible corrélation entre le paramètre de rugosité moyenne R_a et les propriétes d'adhérence d'un d epˆot en projection plasma, ce paramètre prenant en compte l'effet de la hauteur des pics. Cependant, le paramètre de rugosité R_a ne suffit pas à lui seul pour expliquer la dynamique de l'écoulement de la goutte ou encore l'apparition du phénomène de splashing observ e sur des substrats rugueux [83], [42].

Un autre aspect sous-jacent à cette rugosité doit être pris en compte : les études analytiques et expérimentales [84] et [59] montrent l'effet drastique que peut avoir la géométrie des pics et leur espacement sur la formation de la lamelle.

Shinoda et al. [59] ont conduit une étude expérimentale sur l'impact de gouttes d'alumine (d : 35 - 55 μm , v_i : 90 m/s) sur des substrats rugueux en quartz préchauffés à 700 K, avec des surfaces rugueuses artificielles c'est à dire des formes de micro-géométrie implantées par une méthode lithographique. Quatre formes géométriques ont été étudiées (voir Fig. 1.24) : linéaire, cylindrique, pilier et triangulaire, et disposées sous forme de rangées distantes de x . La valeur moyenne de rugosité $R_a = 0,5 \mu\text{m}$ et l'espacement entre ces rugosités noté x a été varié de 4 à 20 μm (voir Fig. 1.24).

Les résultats montrent que les morphologies des lamelles d'alumine présentent une forte anisotropie : elliptique, circulaire, formation de digitations, due à leur déformation sur les différents modèles géométriques présentés (voir Fig. 1.24). De plus, ces résultats révèlent aussi que pour un impact de goutte micrométrique sur un substrat rugueux, des cavités sont formées et localisées sous la lamelle et remplies d'air ambiant.

Ces résultats soulignent donc, l'importance du contrôle de la géométrie de la rugosité à l'échelle micrométrique lors de la formation des lamelles pour comprendre les mécanismes d'adhérence dans les conditions de projection plasma.

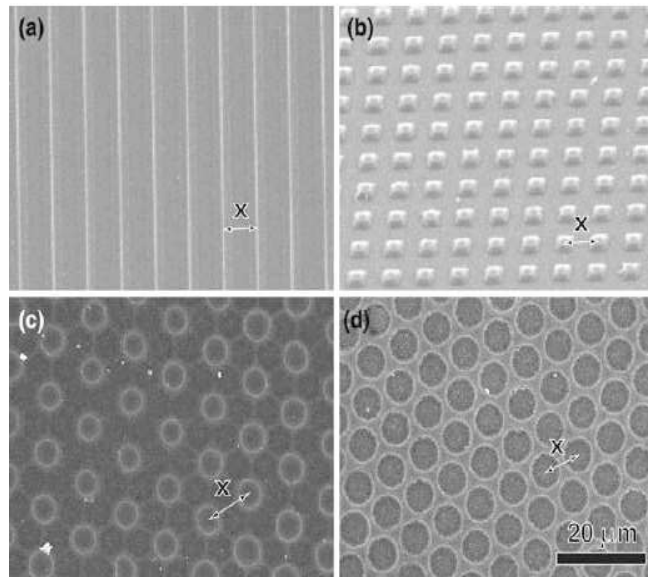


FIGURE 1.24 – Observation au MEB de la rugosité artificielle produite sur des substrats pour l'impact de gouttes [59].

1.4 Modélisation de l'impact et formation de la lamelle

1.4.1 À l'impact de la goutte

1.4.1.1 Premiers instants de l'impact

La phase d'impact est très courte (quelques ns) mais aussi très complexe car différentes situations d'impact peuvent être imaginées [37]. A l'impact de la goutte sur une surface rigide, Heymann [38] a trouvé que la matière liquide adjacente à la zone d'impact est fortement compressée alors que le reste de la goutte ne subit pas cette déformation, et que la vitesse de l'onde dépasse largement la vitesse du son. Durant ces instants, l'onde de pression reste attachée au bord du contact (Fig. 1.25 (a) et 1.25 (b)). Par la suite, des différences de densités et de pressions émergent de la surface libre produisant un phénomène de splashing.

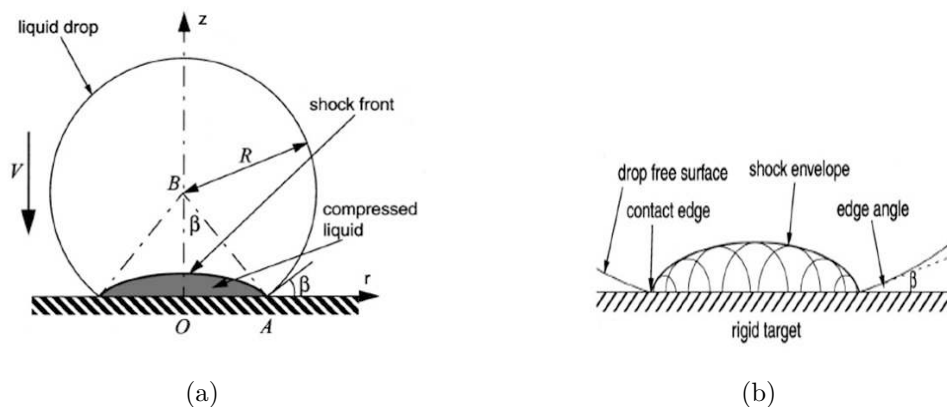


FIGURE 1.25 – (a) Impact d'une goutte liquide sphérique sur une surface rigide. La matière compressée (couleur grise) est délimitée par l'onde de pression et la surface libre de la goutte. (b) Construction géométrique de l'évolution de l'onde de pression sous forme d'une enveloppe. D'après [85].

Pour une goutte liquide, une estimation de la pression développée dans la zone de liquide en compression est équivalente à la pression du coup de bélier ($\rho c v_i$). En projection thermique, le nombre de Mach ($= v_i/c$) est très inférieur à 1, puisque la vitesse d'impact est très inférieure à la célérité du son dans le liquide ($\sim 3\,000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) on considérant que les effets de compressibilité sont négligeables [20]. Les modèles d'impact considèrent généralement que le fluide est incompressible.

1.4.1.2 Déformation et phénomène de splashing

Quand la pression se relâche dans la goutte liquide, son étalement est précédé par un film mince (voir Fig. 1.26) qui émerge avec des vitesses radiales beaucoup plus importantes que la vitesse initiale [37], qui diminuent avec le temps ($\propto \sqrt{t}$) [86] si la goutte reste stable durant son étalement et forme un disque.

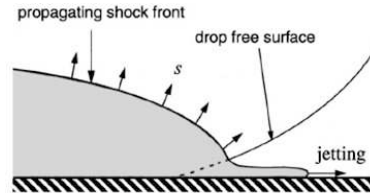


FIGURE 1.26 – Un film mince précède l'étalement de la goutte liquide juste après son impact.
D'après [85]

Le mince film liquide qui émerge du front d'étalement est décéléré et devient instable, probablement du fait des instabilités de Rayleigh-Taylor et des doigts liquides se développent [87] et [88] et croissent jusqu'à ce qu'ils se détachent sous forme de gouttelettes secondaires. Ce début de splashing est connu sous le nom de "prompt splashing". Mundo et al. [42] suggèrent que la couronne qui se développe et se détache de la partie centrale de la goutte, cas extrême du splashing, se produit quand l'énergie totale de la goutte excède la quantité d'énergie dissipée par viscosité durant l'étalement.

Vardelle et al. [89] ont tenté de trouver une corrélation entre le début du splashing en projection thermique et le nombre de *Sommerfeld* (K), défini par l'éq. 1.3. Des résultats [42] montrent que lors de l'impact de gouttes d'eau et d'éthanol sur une surface solide, le splashing se produit quand $K > 57,7$. Les mesures effectuées pour des gouttes d'alumine projetées par projection plasma [90] montrent que le paramètre K dépend de plusieurs facteurs en plus des nombres de Reynolds et de Weber, incluant la température de la goutte, la température du substrat et l'angle d'impact. Fukumoto et Nishiyama [60] ont proposé une nouvelle formulation du paramètre d'impact qui tient compte de la température du substrat et de la vitesse d'impact pour prédire quand le splashing peut se produire.

1.4.2 L'étalement - modèles analytiques

Des modèles phénoménologiques furent les premiers à être développés. Jones [91] et Madejski [4] en ont été les pionniers. Ils ont tenté de trouver une expression analytique permettant de calculer le diamètre maximal (D_{max}) que peut atteindre une lamelle après impact d'une goutte

métallique (diamètre initial d_0) sur une surface solide. Le modèle le plus utilisé et qui fut redéveloppé par la suite est celui de Madejski [4].

Le point commun de départ de ces modèles est le principe de conservation de l'énergie avant et après impact. Le modèle de Madejski [4] explique, par un bilan énergétique que l'énergie cinétique initiale de la goutte est convertie à l'impact en travail de dissipation visqueuse et en énergie de surface, voir l'éq.1.12.

$$E_K = E_D + E_S \quad (1.12)$$

où

- $E_K (J)$: énergie cinétique de la goutte avant impact,
- $E_D (J)$: énergie de dissipation visqueuse,
- $E_S (J)$: énergie de surface.

L'énergie cinétique de la goutte avant impact (E_K) est donnée par :

$$E_K = \left(\frac{1}{2}\rho v_i^2\right) \left(\frac{1}{6}\pi d_0^3\right) \quad (1.13)$$

Dans son modèle, Madejski émet l'hypothèse que la solidification commence à l'impact négligeant de ce fait un possible effet de surfusion. Le calcul de la solidification est basé sur un modèle 1D de Stefan, où le front de solidification est unidirectionnel, contrôlé seulement par le transfert de chaleur par conduction (la lamelle et le substrat sont considérés comme des milieux semi-infini). Ainsi, il déduit que le degré d'étalement ξ_{max} ($= D_{max}/d_0$) est fonction des paramètres dynamiques via les nombres adimensionnels de Reynolds, de Weber et du paramètre de solidification k exprimé par le coefficient de diffusivité thermique via le nombre de Peclet, d'après les relations 1.14 et 1.15.

$$\xi_{max} = f(Re, We, k) \quad (1.14)$$

$$k = 6\varepsilon^2 U \frac{\rho_s}{\rho_l} \sqrt{\frac{\varepsilon}{Pe}} \quad (1.15)$$

où les indices s et l dénotent la masse volumique dans les régions solide et liquide respectivement, U est une constante liée à la solidification, et $\varepsilon = R_0/D$ est le rapport du rayon du métal liquide (supposé en forme de disque) à l'instant du contact initial rapporté au diamètre initial de la goutte.

1.4.2.1 Étalement sans solidification

Le modèle de Madejski [4] a été développé en supposant que la phase d'étalement n'était pas affectée par la phase de solidification ($k = 0$). Cette hypothèse considère que la solidification ne commence qu'après que la lamelle ait achevé son étalement [91]. Ainsi donc, le problème est simplifié en découplant la dynamique de la thermique. Des résultats théoriques et expérimentaux ont montré que cette hypothèse est justifiée pour certaines conditions [4], [92], [93], [94]. Si $Re > 100$ et $We > 100$, il obtient l'expression suivante du degré d'étalement ξ_{max} ($= D_{max}/d_0$) :

$$\frac{3 \xi_{max}^2}{We} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\xi_{max}^2}{1,2941} \right)^5 = 1 \quad (1.16)$$

En projection plasma, le nombre de We varie généralement entre 1 000 et 10 000, ce qui permet de supposer que les effets de tension de surface sont négligeables devant les effets de l'écoulement visqueux au début de l'étalement. Le degré d'étalement de la lamelle peut alors être simplifié selon l'éq. 1.17 :

$$\xi_{max} = 1,2941 Re^{0,2} \quad (1.17)$$

Dans la plupart des modèles, le calcul du degré d'étalement est corrélé aux nombres adimensionnels de Reynolds et de Weber ainsi qu'à l'angle de contact θ . Le Tableau 1.3 résume les principales corrélations prédisant le calcul du degré d'étalement maximal (ξ_{max}) en négligeant la solidification. Il est nécessaire de souligner que le D_{max} calculé reste assez différent dans certains cas du diamètre réel de la lamelle obtenue en projection plasma, du fait de certains phénomènes non pris en compte. Étant donné que la goutte est liquide, elle est sujette aux phénomènes d'oscillations tels que les instabilités de type Rayleigh-Taylor.

Différents travaux ont cherché à améliorer le modèle Madejski pour y inclure l'effet de la tension de surface, de la solidification et de la résistance thermique de contact. Ils montrent que le degré d'étalement de la lamelle est fonction des nombres de Reynolds, de Weber, de Prandtl et de Jakob [46], [95], [47], [96].

TABLE 1.3 – Principales corrélations prédisant le degré d'étalement d'une lamelle

Modèle	Degré d'étalement	Hypothèses du modèle
Jones ^a (1971)	$\xi_{max} = 1,059 Re^{\frac{1}{6}}$	- Énergies de tension de surface et de solidification négligeables . - Le travail visqueux est équivalent à celui d'une matière visqueuse écrasée entre deux plaques .
Madejski, (1976)	$\frac{3\xi_{max}^2}{We} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\xi_{max}}{1,2941}\right)^5 = 1$	- Weber > 100 et Re > 100 , - Pas de solidification , - Écoulement laminaire .
Collings et al. (1990)	$\xi_{max} = \left(\frac{We}{3(1-\cos\theta_e)}\right)^{0,5}$ avec θ_e angle de contact ^b	- Effet visqueux négligeable , - Présence d'un film gazeux entre la particule et le substrat ($\theta_e = \pi$) .
Chandra et al. (1991)	$\frac{3[(1-\cos\theta_e)\xi_{max}^2-4]}{We} + \frac{9}{Re} \xi_{max}^4$	- Effets des forces visqueuses (traitement simplifié)
Yoshida et al. (1992)	$\xi_{max} = 0,83 Re^{0,21}$	- Modèle numérique .
Bennett et al. (1993)	$\frac{3[(1-\cos\theta_e)\xi_{max}^2-4]}{We} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\xi_{max}}{1,2941}\right)^5 = 1$	- Combinaison entre les modèles de Madejski et Collings et al.
Fukanuma et al. (1994)	$\frac{6\xi_{max}^2}{We} + \frac{1}{Re} (1,06.\xi_{max})^6 = 1$	- Énergie de surface négligeable .
Bertagnoli et al. (1995)	$\xi_{max} = 0,925 Re^{0,2}$	- Modèle numérique .

a. Premier pour la formulation d'un modèle en " Rotatory Atomization "

b. entre les phases liquide et solide à l'équilibre

1.4.2.2 Effet de l'angle de contact dynamique

L'angle de contact d'une goutte sur une surface est une propriété caractéristique du mouillage. Young [97] fut le premier à établir une expression liant l'angle de contact aux tensions de surfaces solide-liquide-gaz, voir Fig. 1.27. Or, les mesures expérimentales réalisées sur des angles de mouillage [98], [99] et [100] montrent que l'angle n'est pas statique mais plutôt dynamique. Dans ce cas, la goutte entre dans une phase initiale d'avance pour atteindre un angle limite d'avance ($\theta = \theta_a$), suivi d'une phase de retrait du liquide jusqu'à atteindre un angle limite de recul ($\theta = \theta_r$). La Fig. 1.28 (a) montre la définition de l'angle de contact d'une goutte liquide mouillant une surface inclinée.

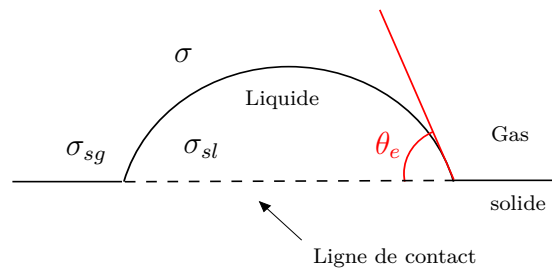


FIGURE 1.27 – La ligne de contact et l'angle de contact d'équilibre θ_e .

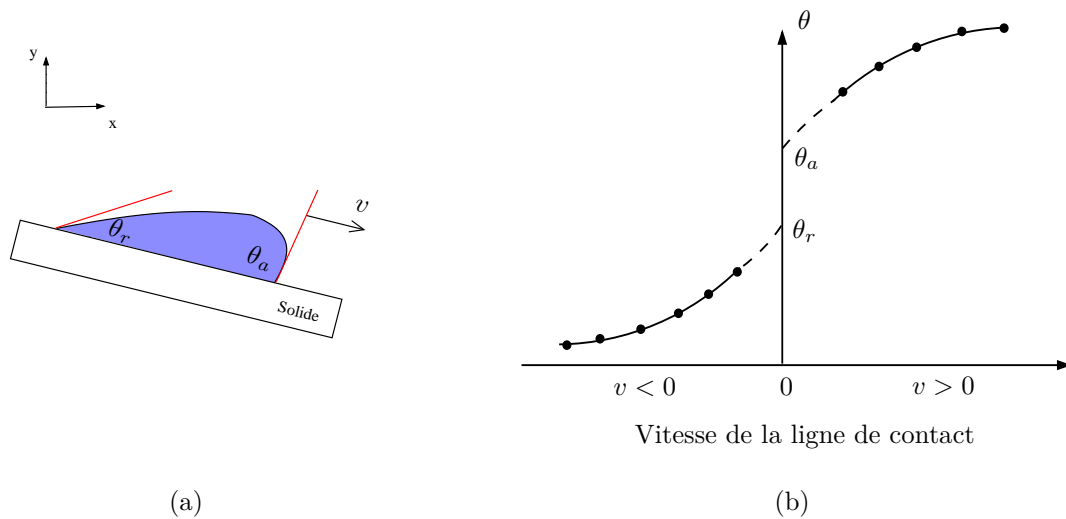


FIGURE 1.28 – Dépendance de l'angle de contact dynamique θ avec la vitesse de la ligne triple.

(a) schéma illustrant l'angle dynamique que fait une goutte liquide sur un plan incliné, (b) quand $v > 0$ la ligne de contact avance, et si $v < 0$ la ligne de contact recule (d'après [100]).

Dussan, E.B. [100] explique que la variation de l'angle de contact est liée au déplacement de la ligne de contact (ligne triple), voir Fig. 1.28 (b). Quand celle-ci se déplace avec une vitesse $v > 0$, l'angle de contact croît jusqu'à atteindre une limite appelé angle d'avance ($\theta = \theta_a$), et quand $v < 0$ l'angle de contact décroît jusqu'à atteindre une limite appelée angle de recul ($\theta = \theta_r$). Pasandideh-Fard et al. [7] se sont intéressés à mesurer l'angle de contact d'une goutte liquide impactant sur une surface solide en fonction de l'ajout d'un surfactant⁸ (par ppms) dans la goutte. La Fig. 1.29 montre l'évolution de l'angle de contact sous l'effet du surfactant, ce dernier agissant principalement en diminuant l'angle de recul de la goutte i.e. en fin d'étalement.

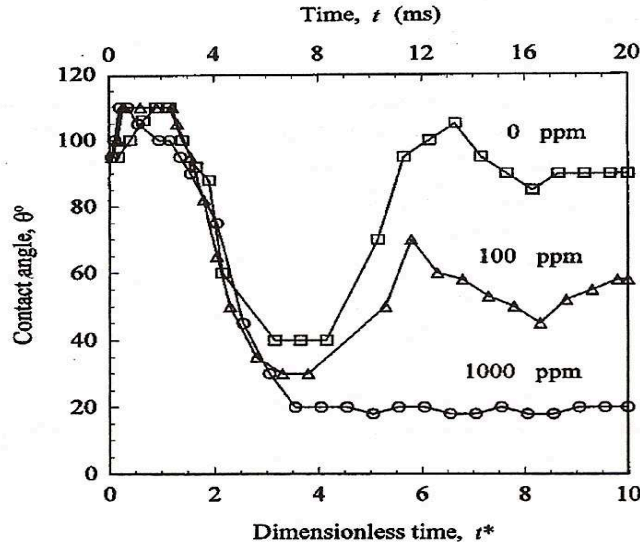


FIGURE 1.29 – Evolution de l'angle de contact durant l'étalement d'une goutte liquide (0 ppm), et avec ajout de surfactant à 100 et 1 000 ppm. D'après [7].

En tenant compte de l'angle dynamique et en se basant sur la formulation du degré d'étalement établi par Chandra et Avedisian [40], Pasandideh-Fard et al. [7] ont obtenu une autre expression exprimant le degré d'étalement ξ_{max} en fonction de l'angle d'avancé (θ_a) :

$$\xi_{max} = \frac{D_{max}}{d} = \sqrt{\frac{We + 12}{3(1 - \cos\theta_a) + 4\left(\frac{We}{\sqrt{Re}}\right)}} \quad (1.18)$$

Les mesures expérimentales de l'étalement, réalisées sur différentes gouttes impactant sur diverses surfaces de substrat dans une large gamme des valeurs de Weber ($26 < We < 641$) et de Reynolds ($213 < Re < 35\,339$), montrent un bon accord avec les valeurs de l'éq. 1.18 pour des valeurs de We importantes (autour de 219 par exemple) et des divergences pour des valeurs plus faibles (autour de 26 par exemple).

⁸ L'ajout du surfactant permet d'atténuer la tension de surface ce qui fait que la goutte liquide a tendance à créer une surface de contact plus large durant l'étalement.

Si la valeur maximale que peut prendre le terme du dénominateur $(1 - \cos\theta_a)$ est de 2, et si le rapport $\frac{We}{\sqrt{Re}}$ est plus grand en comparaison, la valeur de l'angle d'avance a peu d'effet sur le degré d'étalement (ξ_{max}) et par conséquent les effets capillaires peuvent être négligés dans la modélisation de l'impact de la goutte [7] :

$$We \gg \sqrt{Re} \quad (1.19)$$

Si $We \gg 12$, l'éq. 1.18 se réduit à :

$$\xi_{max} = 0,5 Re^{0,25} \quad (1.20)$$

L'angle de contact peut être affecté par la température, ce qui a conduit Attinger et al. [101] à s'intéresser au cas d'une goutte en fusion. À partir des hypothèses de Pasandideh-Fard et al. [7], ils ont établi une expression du degré d'étalement prenant en compte l'effet Marangoni, voir éq. 1.21, .

$$\begin{aligned} \frac{1}{12} \left(1 + \frac{1}{Fr}\right) + \frac{1}{We} &= \frac{1}{\xi_{max}^2} \left(\frac{1}{18Fr}\right) \\ &+ \xi_{max}^2 (1 - \cos\theta_a) \left(\frac{1}{We} + \frac{Ma}{6Re}\right) + \xi_{max}^2 \left(\frac{1}{3\sqrt{Re}}\right) \end{aligned} \quad (1.21)$$

où Ma et le nombre de Marangoni, qui prend en compte la variation de la tension de surface et qui est fonction de la température; il est calculé par :

$$Ma = \frac{\left(\frac{d\sigma}{dT}\right) (\Delta T)}{\alpha \mu} \quad (1.22)$$

où ΔT est l'écart de température entre deux valeurs extrêmes (min. et max.) le long de la surface de la lamelle. α et μ représentent respectivement la diffusivité thermique et la viscosité dynamique du matériau.

1.4.2.3 Étalement avec solidification

Des résultats prenant en compte l'effet de la solidification durant le processus d'étalement ($k > 0$) ont été obtenus numériquement par J. Madejski [4]. Ils montrent que le degré maximum d'étalement (ξ_{max}) n'est sensible aux valeurs de k que pour de faibles valeurs du nombre de Weber. Par contre, dans une situation extrême (valeurs de We et de $Re \rightarrow \infty$) ξ_{max} est fonction de k (voir éq. 1.23). Les résultats théoriques obtenus semblent être relativement en bon accord avec ceux obtenus par l'expérience [93].

$$\xi_{max} = 1,5344 k^{-0,395} \quad (1.23)$$

Si la solidification et l'étalement se produisent simultanément, cela peut contraindre l'écoulement et réduire ainsi le diamètre maximal d'étalement.

Dans les modèles, l'effet de cette solidification est représenté en supposant que la vitesse est nulle dans la phase solide [7]. Si s^* est l'épaisseur solidifiée adimensionnée pour une goutte qui a atteint son diamètre maximal ($s^* = \frac{s}{d_0}$, où s est l'épaisseur solidifiée) le degré d'étalement est [86] :

$$\xi_{max} = \frac{D_{max}}{d} = \sqrt{\frac{We + 12}{\frac{8}{3} We s^* + 3(1 - \cos\theta_a) + 4\left(\frac{We}{\sqrt{Re}}\right)}} \quad (1.24)$$

Dans l'hypothèse d'un transfert de chaleur 1D et si la résistance thermique de contact est négligeable, le nombre de Stefan ($= \frac{C_p \Delta T}{L}$) est faible, s^* croît avec le temps adimensionné t^* ($= t v_0 / d_0$) [102] :

$$s^* = \sqrt{2t^* \frac{Ste}{Pe}} \quad (1.25)$$

Sachant que le temps t_c pour que la lamelle atteigne son degré maximal d'étalement est [7] :

$$t_c = \sqrt{\frac{8d_0}{3v_0}} \quad (1.26)$$

En combinant les équations 1.24, 1.25, et 1.26, le degré maximum d'étalement d'une lamelle en tenant compte de l'influence de la solidification est donné par [86] :

$$\xi_{max} = \frac{D_{max}}{d} = \sqrt{\frac{We + 12}{We s^* + 3(1 - \cos\theta_a) + 4\left(\frac{We}{\sqrt{Re}}\right) + We \sqrt{\frac{(3Ste)}{(4Pe)}}}} \quad (1.27)$$

La quantité $We \sqrt{\frac{(3Ste)}{(4Pe)}}$ au dénominateur de l'éq. 1.27 caractérise la solidification et détermine si cette dernière affecte l'étalement ou non. Ainsi, Pasandideh-Fard et al. [86] ont établi le critère suivant : si $\sqrt{\frac{Ste}{Pr}} \ll 1$, l'étalement de la lamelle n'est pas affecté par la solidification (le nombre de Prandtl $Pr = Pe/Re$).

Cependant, le degré d'étalement obtenu par l'éq. 1.27 pour une lamelle d'étain n'est pas en bon accord avec l'expérience : $\xi_{max} = 2,9$ par le calcul contre $\xi_{max} = 2,5$ par la mesure [86]. Cette divergence est due à l'hypothèse que la résistance thermique de contact est négligeable dans le modèle. Cela montre clairement l'effet drastique que peut avoir une résistance thermique de contact dans la formation d'une lamelle et en particulier durant son processus de refroidissement.

Les résultats d'analyse du refroidissement d'une lamelle [103] montrent que la résistance thermique de contact ne peut être négligée que pour des valeurs du nombre de Biot > 30 . Notons que, la valeur du nombre de Biot, relative au calcul du degré d'étalement présenté précédemment, était largement inférieure à 30 ($\sim 6,8$ pour un $h = 2 \times 10^5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$).

1.4.2.4 Prédiction de la forme d'une lamelle

Dhiman et al. [6] ont proposé un paramètre adimensionnel Θ lié à la solidification pour prédire la forme finale d'une lamelle : soit une forme de disque, soit une forme fragmentée soit encore une forme déchiquetée avec des digitations. Quand la goutte impacte sur le substrat, elle s'étale sous forme d'un film mince d'épaisseur h . Si le substrat est porté à une température inférieure à la température de fusion de la goutte, la phase solide, d'épaisseur s , croît au sein de la lamelle liquide en étalement. Le paramètre de solidification Θ est défini par le rapport de l'épaisseur solidifiée rapportée à l'épaisseur de la lamelle :

$$\Theta = \frac{s}{h} \quad (1.28)$$

Dhiman et al. [6] ont développé une expression analytique pour calculer la valeur de Θ en fonctions des paramètres Re , We , Ste , Pe et Bi . Suivant les valeurs de Θ , on peut prévoir la forme finale de la lamelle et le mécanisme responsable mis en jeu. Trois situations sont possibles :

- i) Si la croissance de l'épaisseur solide est faible ($s \ll h$, ou $\Theta \ll 1$), l'étalement n'est pas affecté par la solidification et la lamelle se rompt de l'intérieur. La lamelle sera fortement fragmentée autour d'une partie centrale de très faible diamètre,
- ii) Si l'épaisseur solide croît de façon importante ($s \sim 0.1 h$ à $0.3 h$, ou $\Theta \sim 0.1$ à 0.3), elle va retenir la lamelle liquide qui s'étale moins, ce qui augmente son épaisseur. Dans ce cas, la lamelle à une forme de disque,
- iii) Si l'épaisseur solide croît beaucoup plus vite ($s \sim h$, ou $\Theta \sim 1$) que la vitesse d'étalement, ce dernier sera perturbé. Des doigts liquides (digitations) seront observés en périphérie de la lamelle.

La comparaison avec des photographies [6] de différentes formes de lamelles montrent que les valeurs du paramètre de solidification donnent une assez bonne prédiction des formes finales des lamelles.

1.4.3 Modèles Numériques

1.4.3.1 Rôle de la simulation numérique

Malgré les progrès technologiques accomplis, en particulier dans la photographie ultra rapide, la validation des prédictions théoriques par les modèles expérimentaux reste délicate, en particulier lorsque les échelles temporelles et spatiales sont très petites. De ce fait, la simulation numérique offre une alternative comme moyen d'investigation qui permet d'avoir un aperçu des résultats expérimentaux et d'aider à leur interprétation.

Plusieurs méthodes numériques ont été proposées dans la littérature pour étudier les écoulements multiphasiques, chacune ayant ses avantages et ses inconvénients [104]. Elles sont basées sur la résolution des équations de conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement. Ces équations de conservation sont résolues soit par une méthode utilisant les différences finies, de volumes finis ou éléments finis. Dans le cas d'une goutte qui s'étale sur une surface, il y a déformation de la surface libre et le choix du type de maillage dépend de la manière dont est effectué le couplage des équations avec cette interface.

La déformation de la goutte peut être exprimée selon deux approches fondamentales. Dans l'approche Lagrangienne, l'interface est explicitement représentée et le calcul utilise un maillage mobile pour suivre sa déformation à chaque instant, Fukai [105], [106] and Zhao et al. [107] ont adopté cette approche. Cependant, si les déformations sont trop importantes, il est intéressant d'utiliser un maillage fixe, c'est l'approche Eulerienne où l'interface est implicitement représentée par une méthode "volume de fluide"⁹. Par exemple, Harlow and Shanonn [109], Hatta et al. [110], Pasandideh-Fard [7] et Bussmann et al. [11] et [10] ont adopté cette approche.

D'autres techniques qui combinent les deux approches Eulerienne et Lagrangienne ont été utilisées par Zheng et Zhang [111]. Ces différentes méthodologies seront décrites dans le chapitre 2 lors de la description du code de calcul utilisé dans notre étude (Simulent Drop).

1.4.3.2 Modèles numérique 2D

Les premières simulations réalisées sur l'impact de gouttes liquides furent réalisées par Harlow et Shanonn [109]. Dans leur modèle, la goutte liquide est considérée sphérique, les équations de Navier-Stokes sont exprimées en coordonnées cylindriques (avec symétrie axiale) pour un fluide incompressible, et les équations sont discrétisées par la méthode des différences finies avec une méthode de suivi de front par des marqueurs¹⁰ pour suivre les déformations de la surface libre de la goutte. Leurs résultats sont appliqués aux instants où les effets d'inertie dominant (c'est à

9. Volume of Fluid Method [108]

10. Marker-and-Cell Method [112] et [113]

dire les premiers instants après l'impact), mais la tension de surface n'était pas prise en compte dans le modèle.

Hatta et al. [110] ont aussi utilisé la méthode de suivi de front par des marqueurs pour obtenir une solution des équations de Navier-Stokes incluant les effets liés à la dissipation visqueuse et à la tension de surface.

Beaucoup de modèles ont été implémentés pour tenir compte de la solidification dans l'étude de l'impact de gouttes fondues sur une surface solide froide. Tsurutani et al. [114] ont aussi utilisé un modèle de transfert de chaleur pour étudier le refroidissement de gouttes sur une surface chaude.

Fukai et al. [105] ont publié une étude théorique de la déformation d'une goutte métallique sphérique impactant sur une surface en tenant compte de la tension de surface. Le modèle théorique est résolu numériquement par la méthode des éléments finis avec suivi d'interface. Les résultats portent sur l'effet de la vitesse d'impact, du diamètre de la goutte, de la tension de surface et des propriétés du matériau sur la dynamique de déformation de la goutte liquide sans la solidification.

Les simulations réalisées [105] sur les processus d'étalement de gouttes d'eau et d'étain montrent que l'effet de tension de surface intervient à la fin de ce processus et il est beaucoup plus faible pour une goutte d'étain comparé à une goutte d'eau. Ceci est due à la valeur du nombre de Weber plus importante pour l'étain que pour la goutte d'eau (100 contre 10 ou 1,4). Il faut noter que l'effet de solidification n'est pas pris en compte dans ces simulations qui ne prédisent pas si la goutte éclabousse ou non.

Zhao et al. [107] ont complété le modèle dynamique de Fukai et al. [105] et [106] pour étudier le refroidissement d'une goutte liquide durant son étalement sur un substrat. Le modèle numérique couple à la fois les phénomènes dynamiques et les phénomènes thermiques. La Fig. 1.30 présente les résultats numériques de l'impact d'une goutte d'eau sur un substrat en verre et en aluminium. Ils montrent que le transfert de chaleur est orienté principalement dans la direction radiale, le temps caractéristique du transfert de chaleur est comparable aux échelles de temps de la déformation de la goutte. La comparaison de résultats obtenus sur des gouttes de cuivre, d'acier et de verre avec des résultats expérimentaux [115] montre que la condition pour laquelle la lamelle s'étale d'abord et se refroidit ensuite n'est pas toujours valide.

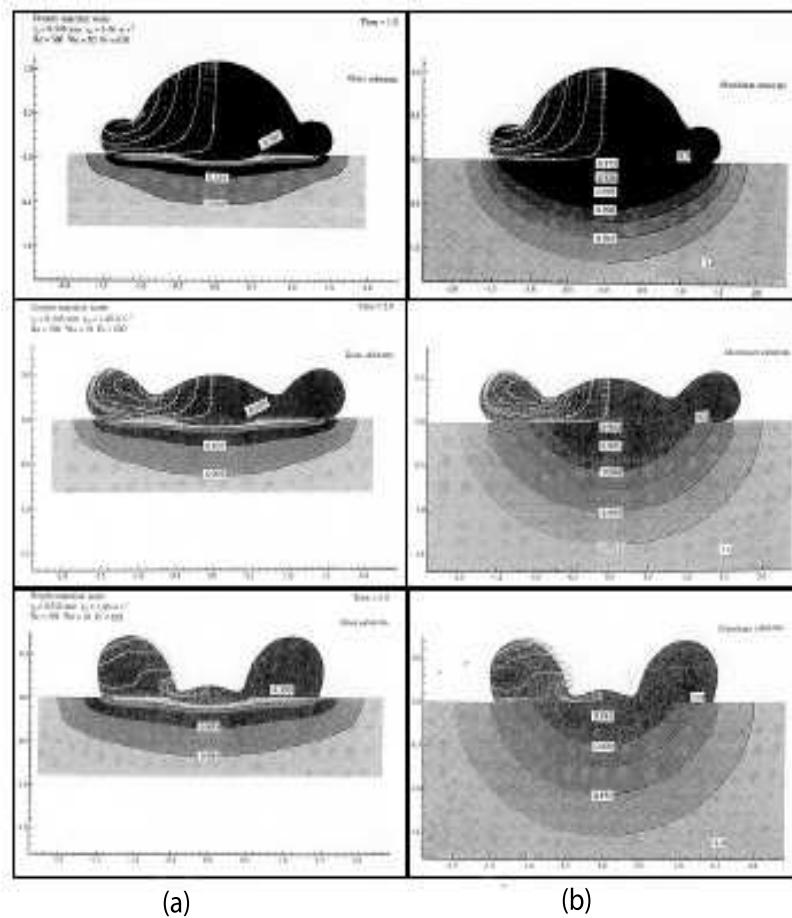


FIGURE 1.30 – Simulation numérique des phénomènes dynamiques de l'étalement et du transfert de chaleur durant l'impact d'une goutte d'eau ($Re = 500$, $We = 10$ et $Fr = 360$) sur des substrats en (a) verre et (b) en aluminium. D'après [107]

Liu et al. [116] ont présenté une étude numérique de la formation des micro-pores durant l'impact de gouttes sur un substrat dans des conditions similaires à celles de la projection thermique. Le modèle, basé sur la méthode des différences finies, utilise un maillage fixe pour le transfert de chaleur qui suit le modèle de Madejski [4] et utilise une approche 1D de transfert de chaleur de Stefan. Leurs résultats relatifs à l'interface liquide-solide, prédisent que le mauvais contact en périphérie de la lamelle est responsable de la formation des micro-porosités, et que l'adhérence entre la lamelle et le substrat, ainsi que les paramètres d'impact (vitesse d'impact importante) doivent être corrélés avec les paramètres du substrat tels que sa température.

La résistance thermique de contact entre la goutte et le substrat, bien qu'elle soit importante, a été souvent négligée dans les modèles numériques [117], Trapaga et al. [118], et Bertagnolli et al. [119]. D'autres travaux ont introduit l'effet de la résistance thermique de contact, et expliquent la sensibilité de leurs résultats aux valeurs de cette résistance à l'interface [120], [121], [96] et [122].

En particulier, Mostaghimi et al. [9] ont introduit la résistance thermique de contact entre la goutte et le substrat et ont montré son importance durant les phases d'étalement et de solidification. Le modèle a été complété [86] par un modèle 2D axisymétrique d'impact de gouttes millimétriques. L'impact de gouttes d'étain a été étudié numériquement et expérimentalement, les valeurs de la résistance thermique de contact étant estimées par une comparaison des courbes de refroidissement numérique et expérimental. Bien que la résistance thermique de contact varie suivant le rayon de la lamelle, le modèle a montré que les résultats peuvent être acceptables en utilisant une résistance thermique de contact constante.

1.4.3.3 Modèles numérique 3D

Trapaga et Szekely [123] ont utilisé le logiciel FLOW-3D pour étudier l'impact de gouttes dans les conditions de la projection thermique sans considérer la solidification. Les premiers résultats préliminaires concernaient les instants après l'impact et étaient destinés à montrer l'effet de la modélisation axisymétrique.

Liu et al. [124] et [125] et Delplanque et al. [126] ont utilisé une version modifiée du logiciel RIPPLE pour un écoulement incompressible avec surface libre [127] pour simuler l'impact et la solidification de gouttes dans les conditions de la projection thermique. Le but de leur simulation est de prédire la formation de la porosité entre la partie solidifiée de la goutte et le substrat. Tong et Holt [128] ont aussi ajouté la phase de solidification dans le code RIPPLE pour l'étude de l'impact de gouttes en projection thermique.

Pasandideh-Fard et al. [86] se sont intéressés à l'impact et à la solidification de gouttes sur une surface en incorporant un algorithme de solidification dans le modèle cité précédemment pour l'étude de gouttes d'eau [7].

Zhang et al. [129] ont utilisé un modèle basé sur une méthode dite "smoothed particle hydrodynamic" ¹¹ pour étudier l'impact et la solidification d'une goutte sur un substrat rugueux dans les conditions de la projection plasma. Cette méthode présente l'avantage de traiter d'importantes déformations avec un maillage adaptatif et permet de suivre plusieurs interfaces.

Le modèle 3D le plus évolué est proposé dans le code numérique Simulent Drop développé par Mostaghimi et ses co-auteurs (<http://www.simulent.com/>). Le code est conçu pour étudier l'impact d'une goutte individuelle ou de plusieurs gouttes sur une surface solide dans les conditions typiques de la projection thermique. Le modèle est basé sur une approche volume de fluide et peut simuler l'interface liquide-solide de façon adéquate. Les équations de Navier-Stokes, en coordonnées cartésienne 3D, sont résolues par la méthode des différences finies. La tension de surface est modélisée comme une force de volume qui agit à la surface libre et l'angle de contact est appliqué comme une condition aux limites à la ligne triple. La masse volumique du liquide est supposée identique à celle du solide et l'équation d'énergie est exprimée suivant une forme enthalpique. Le détail du modèle est présenté dans le chapitre 2.

11. Cette méthode a été développée au début pour le domaine astrophysique [130] et ensuite la méthode a été étendue au domaine de la mécanique des fluides [131]

1.5 Conclusions du chapitre

Les nombreux paramètres qui interviennent lors de l'impact d'une particule fondue sur un substrat sont :

- Les paramètres d'impact de la particule : son diamètre, sa vitesse et sa température (contrôlant sa viscosité) et enfin son angle d'impact .
- Les paramètres du substrat : ses propriétés thermophysiques, et sa température, et le développement ou non d'une couche d'oxyde dont l'épaisseur varie de quelques dizaines de nanomètres à une centaine de nanomètres suivant le métal ou l'alliage considéré, sa rugosité tant à l'échelle micrométrique (obtenue généralement par sablage ou attaque au jet d'eau à haute pression : quelques dizaines de MPa) qu'à l'échelle nanométrique (avec la formation de la couche d'oxyde) . Cette dernière rugosité est caractérisée par le paramètre d'asymétrie ou "Skewness" de la surface qui joue un rôle clef sur la mouillabilité de la goutte . Le préchauffage permet de diminuer les adsorbats et les condensats à la surface et de modifier le Skewness (par une couche d'oxyde à la surface d'un métal ou d'un alliage) .

Lors de l'impact les phénomènes suivants peuvent avoir lieu :

- Si le nombre de Weber est très élevé la particule peut complètement éclater peu après l'impact comme cela a été observé pour des gouttes d'eau . Lorsque ce phénomène ne se produit pas, des gouttelettes sont éjectées dès lors que le nombre de Sommerfeld est supérieur à une valeur comprise entre 30 et 60 pour la projection plasma : l'impact splashing se produisant dans les cent premières nanosecondes de l'impact en projection plasma . Dans tous les cas, la pression d'impact est très élevée (quelques GPa) localisée sur une surface relativement restreinte [20] .
- L'étalement de la particule se produit sans que les phénomènes de solidification interviennent avec une diminution régulière de la pression lorsque le rayon de la particule augmente en cours d'étalement .
- Le refroidissement de la lamelle lors de son contact avec le substrat est fonction de certains paramètres : la résistance thermique de contact, le rapport des effusivités thermiques substrat-lamelle et l'épaisseur de la lamelle . De plus, une bonne mouillabilité pourrait être un avantage pour le refroidissement de la lamelle .
- Les phénomènes de solidification vont alors intervenir et modifier l'étalement :
 - lorsque le contact est mauvais entre la particule en cours d'étalement et le substrat, par exemple du fait de la pression due à la présence d'adsorbats et de condensats, qui

créent une couche gazeuse à haute pression [132] entre le substrat et la goutte, où celle-ci peut d'abord s'étaler puis se contracter. Lors de cette contraction, des obstacles, tels qu'une aspérité ou une bulle, peuvent entraîner la déchirure de cette feuille liquide qui se contracte. Seule la zone centrale où le contact est bon (du fait de la pression d'impact) va se solidifier par transfert thermique vers le substrat.

- lorsque le contact est bon (préchauffage ayant entraîné l'élimination des adsorbats et condensats par exemple), deux cas peuvent se produire : la solidification intervient avant l'étalement et gêne ce dernier en produisant un obstacle à l'étalement et entraîne ainsi la formation de doigts (digitation liquide) et de gouttelettes.
 - la solidification intervient vers la fin de l'étalement et la lamelle résultante conserve une forme de disque.
- Le phénomène de solidification est contrôlé en grande partie par la résistance thermique de contact entre le liquide qui s'étale et le substrat, résistance thermique de contact qui évolue avec le rayon de la particule (la pression diminuant le long de celle-ci).
- Enfin, le phénomène de nucléation dont découle la solidification et la microstructure des lamelles dépend aussi de l'angle de contact liquide-substrat qui lui-même est fonction de l'état de rugosité de la surface à l'échelle nanométrique.

Chapitre 2

Le code numérique Simulent-Drop

Avant de décrire les équations mathématiques et la méthodologie numérique du code "Simulent-Drop[®]" conçu pour la simulation de l'impact de gouttes et de leur solidification, en considérant l'écoulement de la goutte avec surface libre, il est utile de rappeler les méthodes numériques utilisées pour la modélisation des interfaces dans les écoulements diphasiques. Ces méthodes de "*suivi d'interfaces*" permettent de représenter l'interface à chaque instant et de déterminer sa morphologie durant la phase d'étalement.

2.1 Méthodes générales de suivi des interfaces

Dans la simulation des écoulements diphasiques, il est nécessaire pour déterminer complètement l'écoulement [133] :

- i) de résoudre les équations dans les deux phases,
- ii) de représenter l'interface dans l'espace,
- iii) de caractériser le mouvement de l'interface.

On distingue parmi les méthodes de suivi d'interfaces, les méthodes de "*suivi de front*" (front tracking en anglais) où l'interface est *explicitement* représentée par des points marqueurs (sans masse) [134] distribués sur la surface et connectés entre eux par des fonctions splines cubiques (voir la Fig. 2.1 (a)), ou encore où l'interface est attachée à la surface d'un maillage mobile (voir Fig. 2.1 (b)).

Les méthodes de suivi de front sont reconnues pour être plus précises, mais elles présentent quelques difficultés qui rendent leur mise en oeuvre assez difficile et coûteuse en terme de mémoire de stockage. Par exemple, dans la méthode des marqueurs, il faut constamment stocker les coordonnées des points ce qui en limite leur nombre; de plus il faut s'assurer aussi d'une distribution homogène des marqueurs sur l'interface, ce qui implique un remaillage périodique de l'interface et limite leur application à de faibles déformations de l'interface.

Dans la seconde catégorie des méthodes de calcul d'interface, on trouve des méthodes de "*suivi volumétrique*", dans lesquelles l'interface est *implicitement* représentée.

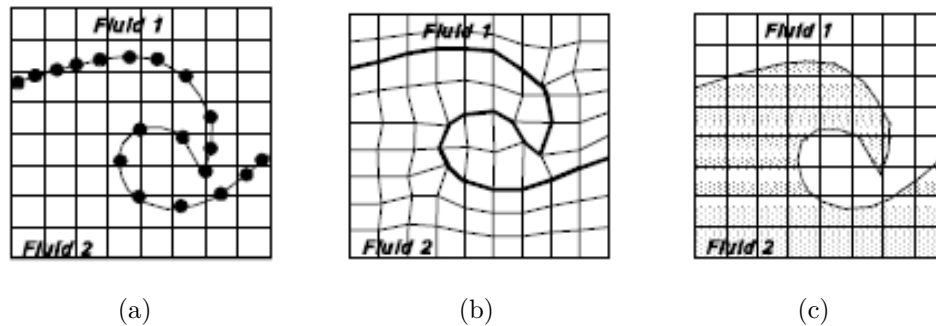


FIGURE 2.1 – Méthodes de représentation d'une interface [135]. (a) et (b) méthodes de suivi d'interface, respectivement par marqueurs des particules et par un maillage mobile qui suit l'interface, et (c) la méthode VOF.

Dans cette approche, l'interface qui sépare deux fluides peut être considérée comme le lieu de changement des propriétés physiques (la viscosité ou la densité par exemple). Cette discontinuité à l'interface peut être caractérisée par une fonction de phase. Parmi ces méthodes implicites on distingue deux grandes méthodes : la méthode de "volume de fluide" (Volume Of Fluid, VOF en anglais) [136] et [108], représentée par la Fig. 2.1 (c), et la méthode dite de "ligne de niveau" (level set en anglais) [137]. Dans chacune de ces méthodes, la fonction de phase représente respectivement la fraction volumique d'un fluide par rapport à l'autre, et la distance par rapport à l'interface.

La méthode volume de fluide (VOF) est bien adaptée à la simulation d'une interface qui subit une forte déformation durant l'écoulement. Cependant, comme l'interface est décrite implicitement, cette méthode ne donne pas une information précise sur sa position durant son advection par l'écoulement et ne permet pas de déterminer exactement sa topographie. Alors, la construction de l'interface se fait par des approximations géométriques qui doivent être associées aux données relatives à la fraction volumique contenue dans chaque cellule (maille). La Fig. 2.2 (a) montre un exemple de construction d'une interface par la méthode VOF, après approximation par des droites dans la méthode SLIC (Simple Line Interface Calculation, en anglais) [136], voir Fig. 2.2 (b), ou encore par des droites affines, dans la méthode PLIC (Piecewise Linear Interface Calculation, en anglais) [138], voir Fig. 2.2 (c).

2.2 Domaine de calcul et conditions aux limites

Le code numérique Simulent-Drop est basé sur les hypothèses suivantes :

- Le fluide est incompressible, newtonien et laminaire .
- Les contraintes tangentielles appliquées à la surface de la goutte sont négligeables (goutte à surface libre) .

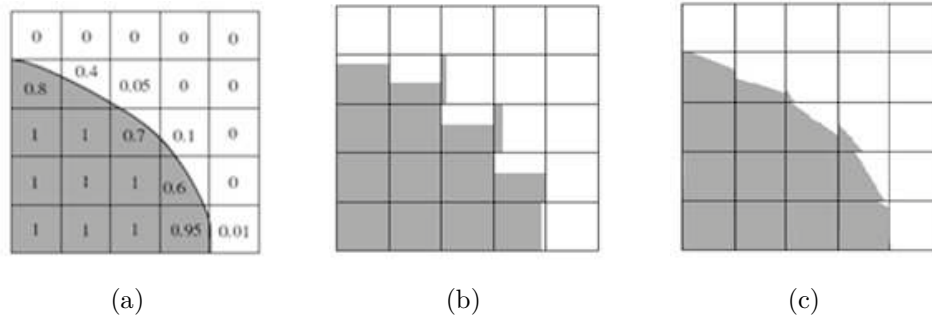


FIGURE 2.2 – Construction de l'interface par approximation dans la méthode VOF. (a) interface réelle après reconstruction à l'aide des données fractions de volume, (b) approximation par des droites verticales, dans la méthode SLIC, et (c) approximation par droites affines dans la méthode PLIC

- La dissipation visqueuse dans la goutte est négligeable .
- La phase gazeuse environnante n'interagit pas avec la goutte .
- Le substrat est dépourvu d'impuretés à sa surface et ne s'oxyde pas .
- La résistance thermique de contact est constante durant l'étalement et la solidification de la goutte .
- Les transferts de chaleur par convection et rayonnement sont négligeables, seul le transfert de chaleur par conduction est considéré .
- Les masses volumiques du matériau à l'état liquide et solide sont égales et constantes¹ .

2.2.1 Géométrie du domaine

Le domaine de calcul est composé de deux sous domaines parallélépipèdes rectangles (voir Fig. 2.3), le premier correspond au domaine de la goutte (de couleur rouge), dans lequel sont résolues les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie durant les phases d'impact, d'étalement et de solidification . Le second, situé en dessous représente le substrat (de couleur noire) sur lequel le domaine de la goutte évolue, et où seule l'équation de la chaleur est résolue .

La surface du substrat est un plan commun aux deux parties du domaine de calcul, représentée par le plan 11 . Dans le cas d'impact de gouttes suivant la normale au substrat, celles-ci peuvent être modélisées sur un quart du domaine afin de réduire le temps de calcul, et la forme finale de la lamelle est restituée par symétrie, représentée par les plans 7, 8, 9 et 10 . Enfin, les frontières extérieures du domaine de calcul sont représentées par les plans 1, 2, 3, 4, 5 et 6 .

1. Par exemple la valeur pour l'étain diffère de moins de 4% ce qui ne devrait pas avoir d'effet significatif sur l'écoulement de la goutte

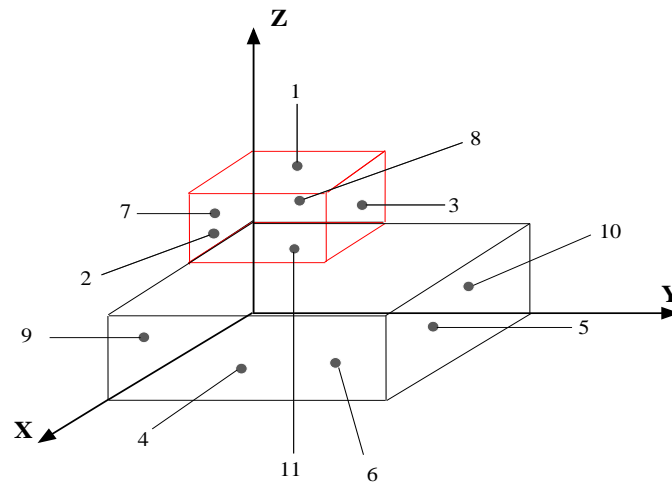


FIGURE 2.3 – Représentation du domaine de calcul : goutte et substrat

2.2.2 Conditions aux limites

2.2.2.1 Conditions aux limites de l'écoulement

Les frontières du sous domaine de la goutte sont supposées à parois rigides, les plans 7 et 8 sont affectés d'une condition de "glissement" permettant de modéliser un plan de symétrie où aucune force n'est appliqué à l'écoulement du fluide. Les plans 1, 2, 3 et 11 sont affectés d'une condition de "non-glissement" qui permet de modéliser une surface qui interagit normalement avec le fluide en opposant une surface à l'écoulement.

2.2.2.2 Conditions aux limites thermiques

Elles sont de trois types :

1. *Condition adiabatique* : elle concerne, d'une part, les frontières du domaine affectées de la condition de glissement (les plans de symétrie), et d'autre part, la surface libre de la lamelle (l'interface liquide - gaz).
2. *Température constante* : elle concerne les frontières extérieures du domaine, les plans 1, 2, 3, 4, 5 et 6 de la Fig. 2.3. Dans le substrat, les frontières extérieures du domaine sont suffisamment éloignées de la zone d'impact pour ne pas être thermiquement affectées.
3. *Température initiale* : cette condition est appliquée seulement à la surface du substrat (surface d'impact), plan 11 de la Fig. 2.3. Ensuite, cette température évolue, au cours du temps au contact de la goutte en fusion.

2.3 Méthodologie numérique

2.3.1 Équations dynamiques

Les équations de conservation de la quantité de mouvement et de la masse dans la phase liquide sont exprimées en régime instationnaire transitoire et en géométrie tridimensionnelle :

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} \cdot \tilde{\tau} + \frac{1}{\rho} \vec{F}_b \quad (2.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.2)$$

où \vec{V} est le vecteur vitesse ($m.s^{-1}$), p la pression (Pa), ρ la masse volumique ($kg.m^{-3}$), et F_b les forces de volume (N) qui agissent sur le fluide. Si le fluide est supposé newtonien et incompressible, le tenseur de contraintes de viscosité s'exprime par :

$$\tilde{\tau} = \mu (\vec{\nabla} \vec{V} + (\vec{\nabla} \vec{V})^T) \quad (2.3)$$

où μ est la viscosité dynamique ($Pa.s$) du liquide et l'indice supérieur T correspond à la transposée.

Les équations dynamiques (éqs. 2.1 et 2.2) sont écrites dans un référentiel eulérien et permettent de décrire la dynamique à l'intérieur de la goutte. Cependant, le modèle prend en compte le mouvement de la surface libre de la goutte, qui subit des déformations. Ceci est effectué par la méthode VOF (volume of fluid) (§ 2.3.4) dans laquelle on définit une fonction scalaire f tel que :

$$f = \begin{cases} 1 & \text{dans la phase liquide} \\ 0 & \text{en dehors de la phase} \end{cases}$$

La fonction f est passivement advectée par le fluide, et satisfait à l'équation 2.4.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} f = 0 \quad (2.4)$$

La tension de surface agit comme une force sur l'interface liquide-gaz, elle dépend de la courbure de la surface. La condition aux limites d'interface qui caractérise le mouvement de deux fluides est représentée par la condition de Landau et Lifshitz [139] :

$$(p_1 - p_2 - \sigma \kappa) n_i = (\tilde{\tau}_{1,ik} - \tilde{\tau}_{2,ik}) n_k \quad (2.5)$$

où p_1 et p_2 sont les pressions de part et d'autre de l'interface, n_i est la composante de la normale \hat{n} dirigée vers le fluide 1, σ est la tension de surface interfaciale ($J.m^{-2}$), et κ la courbure totale (m^{-1}) :

$$\kappa = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2.6)$$

où R_1 et R_2 sont les rayons (m) de courbures principaux.

Dans l'hypothèse où les contraintes de cisaillement sont supposées nulles, et la tension de surface constante, l'éq. 2.5 se réduit à l'équation de Laplace caractérisant le saut de pression, Δp_s , à travers l'interface liquide-gaz :

$$\Delta p_s = p_l - p_g = \sigma \kappa \quad (2.7)$$

Pour modéliser les effets liés à la tension de surface qui agissent à la surface libre de la goutte, une méthode consiste à intégrer la force superficielle dans l'équation de la quantité de mouvement (eq. 2.1) (Brackbill et al. [140]) et à appliquer toutes les forces tangentielles agissant sur le contour de la surface à l'aide d'une fonction de Dirac ensuite sommée sur toute cette surface (eq. 2.8) :

$$F^{ST}(x) = \sigma \int_s \kappa(r) \hat{n}(r) \delta(x - r) dr \quad (2.8)$$

\hat{n} est la normale à l'interface dirigée vers le liquide, δ est la fonction de *Dirac*, le calcul d'intégrale se faisant le long de la surface libre S . κ représente la courbure moyenne locale de la surface [141], on a :

$$\widehat{atn} = \frac{\nabla f}{|\nabla f|}, \quad \kappa = -\nabla \cdot \hat{n} \quad (2.9)$$

Le signe de κ va déterminer la direction du produit ($\kappa(r) \times \hat{n}(r)$), i.e. la direction de la force de tension de surface et permettre alors d'évaluer la courbure moyenne de l'interface via l'éq. 2.9.

Le vecteur unitaire de l'éq. 2.8, défini au niveau de la ligne de contact solide-liquide-gaz, est fonction de l'angle de contact, voir Fig. 1.27. L'angle de contact n'est pas unique, il va en effet prendre des valeurs comprises entre un angle d'avancée θ_a et l'angle de recul θ_r , qui sont fonction de la vitesse de la ligne de contact. Le choix d'un angle statique peut être adopté dans le cas où la vitesse d'impact de la goutte est assez importante (conditions de projection plasma par exemple) tel que $We \gg \sqrt{Re}$ [86].

Les équations 2.1, 2.2, 2.4, et 2.8 sont résolues sur un maillage cartésien tridimensionnel composé de $N_x \times N_y \times N_z$ mailles, et discrétisées par la méthode des différences finies. La représentation des quantités scalaires (pression, température et fractions liquides ou solides) et vectorielles (vitesse) est effectuée sur maillage décalé de type MAC [112], tel que les quantités scalaires sont représentées au centre des mailles alors que les quantités vectorielle sont représentées aux centres des faces des mailles, voir Fig. 2.4.

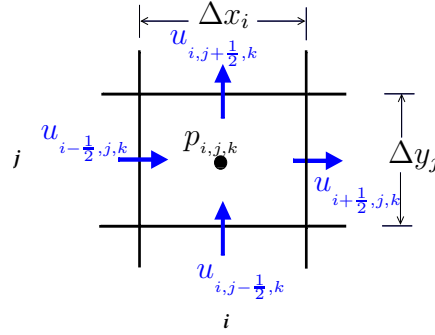


FIGURE 2.4 – Vue en 2D d'une maille (i, j, k) . u, v , et w (non visible) sont les composantes du vecteur vitesse représentées aux centres des faces de la maille et la pression p au centre de la maille.

2.3.2 Équations de l'énergie

2.3.2.1 Dans la goutte

L'évolution du champ de température dans la goutte est régie par la conservation de l'énergie. Celle-ci peut s'exprimer en fonction de deux variables dépendantes : la température (T) et l'enthalpie (h) (éq. 2.10).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)h = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (2.10)$$

où h est l'enthalpie du liquide (J/kg), ρ la masse volumique (kg/m^3), k la conductivité thermique ($W/m.K$) et T la température (K). La relation entre h et T s'écrit (Cao et al. 1989) :

$$T = T_m + \frac{1}{k} (h \beta + \phi) \quad (2.11)$$

où T_m est la température de fusion de la goutte,

l'équation de la chaleur peut être ramenée à une seule variable en fonction de l'enthalpie et on obtient alors la forme finale de l'équation de conservation de l'énergie (éq. 2.12). L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de résoudre l'équation de la chaleur dans les deux phases liquide et solide simultanément.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + (V \cdot \nabla)h = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\beta \nabla h) + \frac{1}{\rho} \nabla^2 \phi \quad (2.12)$$

avec ϕ est le terme source .

- où dans la phase solide :

$$h \leq 0; \quad \beta = \frac{k_s}{C_s}, \quad \phi = 0 \quad (2.13a)$$

- à l'interface liquide-solide :

$$0 < h < H_f; \quad \beta = 0, \quad \phi = 0 \quad (2.13b)$$

- et dans la phase liquide :

$$h \geq 0; \quad \beta = \frac{k_l}{C_l}, \quad \phi = \frac{H_f k_l}{C_l} \quad (2.13c)$$

où k_i et C_i sont respectivement la conductivité thermique ($W/m.K$) et la chaleur spécifique de la phase liquide et solide, $i = s$ et l respectivement pour la phase solide et la phase liquide .

2.3.2.2 Dans le substrat

Le transfert de chaleur vers le substrat se produit uniquement par conduction :

$$\rho_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \nabla \cdot (k_w \nabla T_w) \quad (2.14)$$

où c_w et k_w représentent respectivement la chaleur spécifique et la conductivité thermique, l'indice inférieur w faisant référence au substrat .

2.3.2.3 Á l'interface lamelle-substrat

Le contact thermique à l'interface lamelle-substrat est contrôlé par une résistance thermique de contact (R_{th}) :

$$R_{th} = \frac{(T - T_w)_{substrat}}{q} \quad (m^2.K/W) \quad (2.15)$$

où q ($W.m^{-2}$) est le flux de chaleur extrait de la goutte par le substrat . La valeur de R_{th} est introduite comme une valeur constante dans le modèle bien que celle-ci varie dans le temps et dans l'espace (durant l'étalement et la solidification de la goutte) .

2.3.3 Solidification

La résolution des équations de conservation de l'énergie à l'intérieur du domaine de calcul permet de déterminer la proportion de phase solide dans chaque maille. Pour déterminer le front de solidification, à chaque pas de temps, on définit un nouveau paramètre, la fraction de volume fluide, telle que $\Theta = 1$ pour une maille remplie de liquide et $\Theta = 0$ si la cellule contient seulement du solide, et $0 < \Theta < 1$ si les mailles se trouvent sur le front de solidification. Ainsi, les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement s'écrivent :

$$\nabla \cdot (\Theta V) = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial(\Theta V)}{\partial t} + (\Theta V \cdot \nabla)V = -\frac{\Theta}{\rho} p + \Theta \nu \nabla^2 V + \frac{\Theta}{\rho} F_b \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + V \Theta \cdot \nabla f = 0 \quad (2.18)$$

Pendant un cycle de calcul, les nouvelles valeurs d'enthalpie du système sont déterminées par les éqs. 2.13 a, b et c, et à l'aide d'un algorithme [142] permettant d'évaluer le taux de changement d'enthalpie dans une maille qui est égal à la vitesse du front de solidification que multiplie la chaleur latente de fusion. À partir des valeurs de Θ , la surface de la phase solide est déterminée de la même manière que la surface libre de la goutte (à partir de f).

2.3.4 Modélisation de la surface libre

La méthode VOF (§ 2.1) permet de résoudre le problème d'advection de la surface libre de la goutte (éq. 2.4). Cette méthode est bien adaptée au cas d'écoulements diphasiques, permettant ainsi de déterminer les fractions fluides contenues dans chaque cellule (cellule contenant du fluide où cellule vide) grâce la fonction scalaire f (éq. 2.4). Ainsi, les fractions fluide $f_{i,j,k}$ sont obtenues par intégration sur tout le volume de la maille $\Omega_{i,j,k}$:

$$f_{i,j,k} = \frac{1}{\Omega_{i,j,k}} \int_{\Omega_{i,j,k}} f d\Omega \quad (2.19)$$

Alors la densité massique $\rho_{i,j,k}$ qui apparaît dans l'éq. 2.23 est évaluée comme suit :

$$\rho_{i,j,k} = \rho_f f_{i,j,k} \quad (2.20)$$

où ρ_f représente la valeur (constante) de la masse volumique de la phase liquide.

Si $f_{i,j,k} = 1$, la maille est supposée complètement remplie de fluide, et pour $f_{i,j,k} = 0$, la maille est supposée vide. Si $0 < f_{i,j,k} < 1$ la maille contient une portion de l'interface et est appelée cellule d'interface.

Ensuite, à l'aide de la méthode des segments affines (méthode PLIC) [10] combinée aux données des fractions de volume dans chaque maille, on peut construire la surface libre. L'algorithme de reconstruction de la surface libre de la goutte comporte trois étapes (voir Fig. 2.5) :

1. Tout d'abord, une reconstruction approximative de l'interface, obtenue grâce aux valeurs des fractions fluide (scalaire f) à partir des flux de fluide traversant les faces de la maille.
2. Ensuite une construction d'une interface continue en repositionnant la limite solide-liquide dans chaque maille, tout en conservant la valeur de f .
3. Enfin, la forme finale de la surface libre est déterminée en fonction de la courbure de la surface en chaque point, de façon à ce que la contrainte normale appliquée à la surface soit continue. Au niveau de l'interface solide-liquide-gaz, la courbure est déterminée à partir de l'angle de contact (angle de mouillage).

En 3D, les lignes d'interfaces dans chaque maille deviennent des polygones et dépendent de l'intersection de cette interface avec les faces de chaque maille, voir Fig. 2.6.

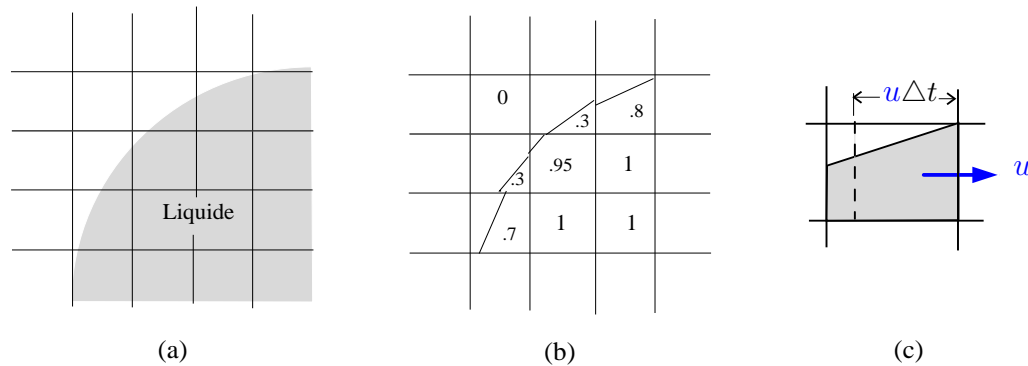


FIGURE 2.5 – Construction de la surface libre en 2D. (a) l'interface réelle après construction, (b) les fractions volumiques $f_{i,j}$ correspondantes dans chaque cellule et les lignes d'interfaces associées, et (c) pour u positive, la région grisée à droite de la ligne discontinue est advectée vers la maille adjacente pendant un pas de temps Δt .

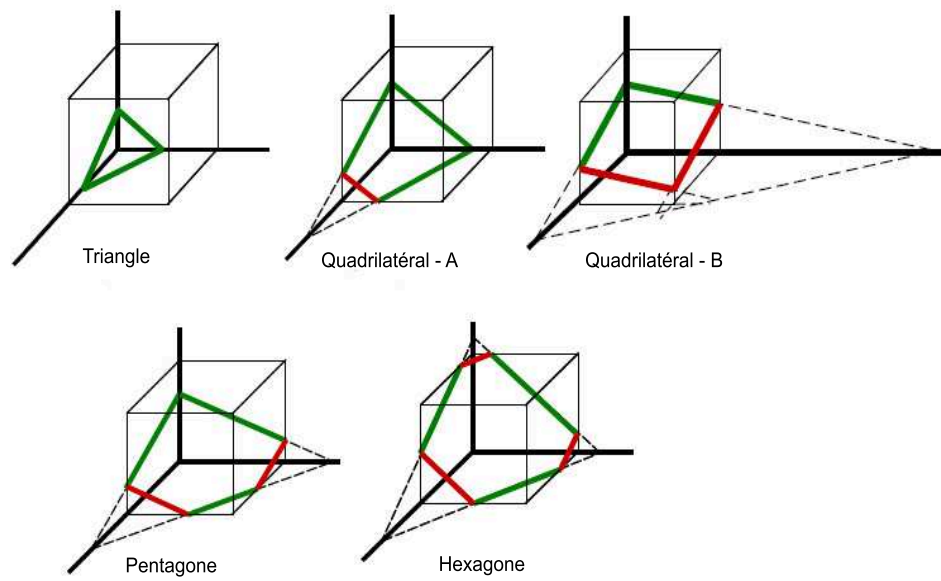


FIGURE 2.6 – Illustration des cinq cas possibles qui peuvent avoir lieu dans l'application de la méthode de Youngs en 3D.

2.3.5 Méthode de projection

Pour résoudre les équations de Navier-Stokes, le code utilise une méthode de projection [143] et [144]. Le principe de cette méthode consiste à découpler les effets de la diffusion de ceux de l'incompressibilité et à introduire un champ de vitesse intermédiaire obtenu en deux étapes. La méthode peut être résumée par les étapes suivantes :

- Un champ de vitesse intermédiaire V^* est calculé en utilisant une discrétisation du premier ordre, sans termes de gradient de pression :

$$\frac{\vec{V}^* - \vec{V}^n}{\Delta t} = -\vec{V}^n \cdot \nabla \vec{V}^n + \frac{1}{\rho} \nabla^2 \cdot \tilde{\tau}^n + \frac{1}{\rho} \vec{F}_b^n \quad (2.21)$$

- Ce champ de vitesse est ensuite projeté sur un champ de vitesse incompressible V^{n+1} :

$$\frac{\vec{V}^{n+1} - \vec{V}^*}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho^n} \nabla p^{n+1} \quad (2.22)$$

les indices supérieurs n et $n + 1$ étant respectivement les indices temporels aux pas de temps précédent et courant.

C'est cette méthode de projection qui assure la condition d'incompressibilité (éq. 2.2) et permet la conservation de la masse. A l'aide de la relation 2.22 sont obtenus le champ de vitesse V^{n+1} et la pression p , à condition de résoudre l'équation de Poisson sur la pression :

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho^n} \nabla p^{n+1} \right) = \frac{\nabla V^*}{\nabla t} \quad (2.23)$$

L'équation de la pression (éq. 2.23) est un système linéaire, symétrique, défini positif, sa résolution nécessite l'utilisation d'un solveur linéaire de type gradient conjugué, et peut être résolue par la méthode de Cholesky (Incomplete Cholesky Conjugate Gradient). Par la suite, le champ de vitesse à l'instant $n + 1$ est évalué via l'éq. 2.22.

2.3.6 Maillage de la goutte : le CPR

Le maillage de la goutte dépend du paramètre CPR (en anglais Cells Per initial droplet Radius), il définit le nombre de mailles par rayon initial de la goutte. Le choix du CPR conditionne le maillage du domaine dans lequel se produisent l'impact, l'étalement et la solidification. Les dimensions doivent être assez larges pour contenir la formation de la lamelle y compris l'éjection éventuelle de gouttelettes secondaires.

Le nombre de mailles dans chaque direction du domaine est calculé en fonction du CPR comme suit :

$$N_i = \frac{\text{Dimension du domaine}}{\text{Rayon de la goutte}} \times \text{CPR}$$

où N_i est le nombre de mailles suivant une direction principale du domaine de calcul. $i = X, Y$ et Z sont les directions principales (voir 2.7).

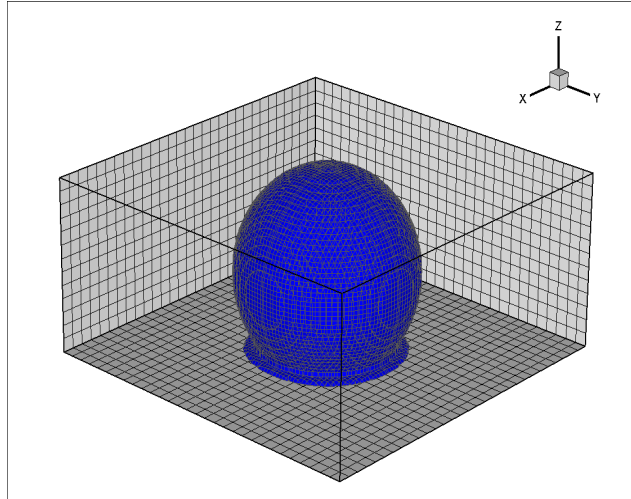


FIGURE 2.7 – Représentation du maillage du domaine de la goutte, quelques instants après l’impact. En réalité le maillage est en 3D et s’étend sur tout le volume du domaine.

Il s’avère donc que le choix du CPR est crucial pour les simulations et qu’il doit être adapté en particulier à nos conditions de simulation aussi bien pour des gouttes millimétriques que micrométriques. Le Tableau 3.5 montre la sensibilité du choix du CPR sur le paramètre de maille calculé pour deux gouttes : une goutte millimétrique et une goutte micrométrique.

TABLE 2.1 – Le paramètre de maille en fonction du CPR. Les résultats sont obtenus pour deux cas de diamètre de goutte.

CPR	Paramètre de maille (μm) pour :	
	$d_0 = 3 \text{ mm}$	$d_0 = 40 \mu\text{m}$
15	100	2,6
16	10,67	2,5
17	88,2	2,35
18	83,3	2,22
19	78,9	2,11
20	75	2

2.3.7 Maillage du substrat

Le plan (XOY) du substrat est pris identique à celui de la goutte (voir Fig. 2.3), le plan 11, physiquement il représente une surface commune entre la goutte et le substrat. Son maillage dépend donc de son épaisseur, dans la direction "Z" (voir Fig. 2.3). Le choix du maillage du substrat est crucial du point de vue thermique, car c'est vers lui que la goutte en fusion cède sa chaleur par conduction, chaleur qui diffuse alors en son sein. Comme son maillage est indépendant du CPR, il est alors possible de considérer comme un maillage non uniforme, cette configuration est essentielle pour étudier la thermique au voisinage de l'interface lamelle-substrat, et en particulier pour des substrats ayant une faible conductivité thermique telle que les substrats en acier ou en céramique.

L'étude de l'influence du maillage de la goutte et du substrat sur les résultats numériques est développée dans les chapitres 3 et 4.

2.4 Le cycle de calcul

Le cycle de calcul se déroule à chaque pas de temps Δt comme suit :

1. On calcule les composantes du champ de vitesse intermédiaire à travers les faces des mailles au temps $t + \Delta t$.
2. Puis on résout les équations de l'énergie :
 - a. Connaissant l'enthalpie de la goutte et le champ de température, on résout les éqs. 2.12 et 2.14. Le champ de température dans la goutte est obtenu via l'éq. 2.11.
 - b. Ensuite on calcule les nouvelles valeurs de la fraction volumique liquide à partir de l'enthalpie de la goutte via les éqs. 2.13 (a), (b) et (c).
3. On met à jour les conditions d'écoulement aux limites pour le domaine de calcul et à la surface libre de la goutte.
4. Par la résolution des équations d'énergie :
 - a. On impose les conditions aux limites thermiques à la surface libre, au front de solidification et au domaine de calcul.
 - b. À partir de l'équation de conservation du flux thermique à l'interface lamelle-substrat, au travers de la résistance thermique de contact (eq. 2.15), on calcule les températures dans la surface inférieure de la lamelle et dans la surface supérieure du substrat.
5. On calcule le nouveau champ de pression dans la goutte via l'éq. 2.23.
6. On calcule le champ de vitesse final via l'éq. 2.22.
7. On met à jour les conditions d'écoulement et la thermique à la surface libre.

8. On détermine la morphologie de la surface libre de la lamelle par advection du fluide via la méthode VOF.
9. On remet à jour les conditions aux limites de l'écoulement aux frontières du domaine de calcul et à la surface libre.
10. On incrémente le temps et on répète l'ensemble des étapes 1 - 9 jusqu'à la fin du calcul qui est imposée par une condition sur le temps total de calcul.

2.5 procédure de simulation

La procédure de simulation ainsi que le traitement des données sont résumés dans l'organigramme de la Fig. 2.8. Les données d'entrée permettent d'introduire les données physiques et numériques nécessaires pour la simulation relative à la goutte, au substrat et pour les conditions d'interfaces. Les données de sortie de calcul, sont obtenues sous forme de fichiers de données relatives aux fractions fluide (f), à la pression et au champ de vitesse dans la goutte (pv), à la température du substrat (T_{sub}) et au champ de température dans la goutte (T). D'autres fichiers intitulés : Historique, erreur et Drops contiennent des données relatives au déroulement de la simulation. Des fichiers de données *dump* et *dumpT* permettent de réaliser des suites de calculs. Les données brutes du calcul ont été traitées grâce au logiciel Tecplot (version TEC 360) à l'aide de macro pour en extraire des données exploitables et de représentations graphiques.

2.6 conclusion du chapitre

Ce chapitre résume les équations mathématiques et la méthodologie numérique suivie pour le code numérique Simulent Drop. Le modèle est basé pour l'écoulement liquide, sur la résolution des équations de Navier-Stokes, en considérant que l'interface liquide-gaz est une surface libre, le mouvement (déformation) de cette dernière étant déterminée par la méthode "volume de fluide"; et sur l'équation de conservation de l'énergie, par une méthode enthalpique pour calculer les proportions de la phase solide dans chaque maille.

Le maillage de la goutte dépend du paramètre CPR, dont le choix détermine le paramètre de maille du domaine de calcul de la goutte. Par contre, le maillage du domaine du substrat, suivant son épaisseur, est indépendant du paramètre CPR c'est pour cela que son épaisseur et le nombre de mailles doivent être choisis afin de ne pas affecter la diffusion de la chaleur en son sein lors de son contact avec la goutte.

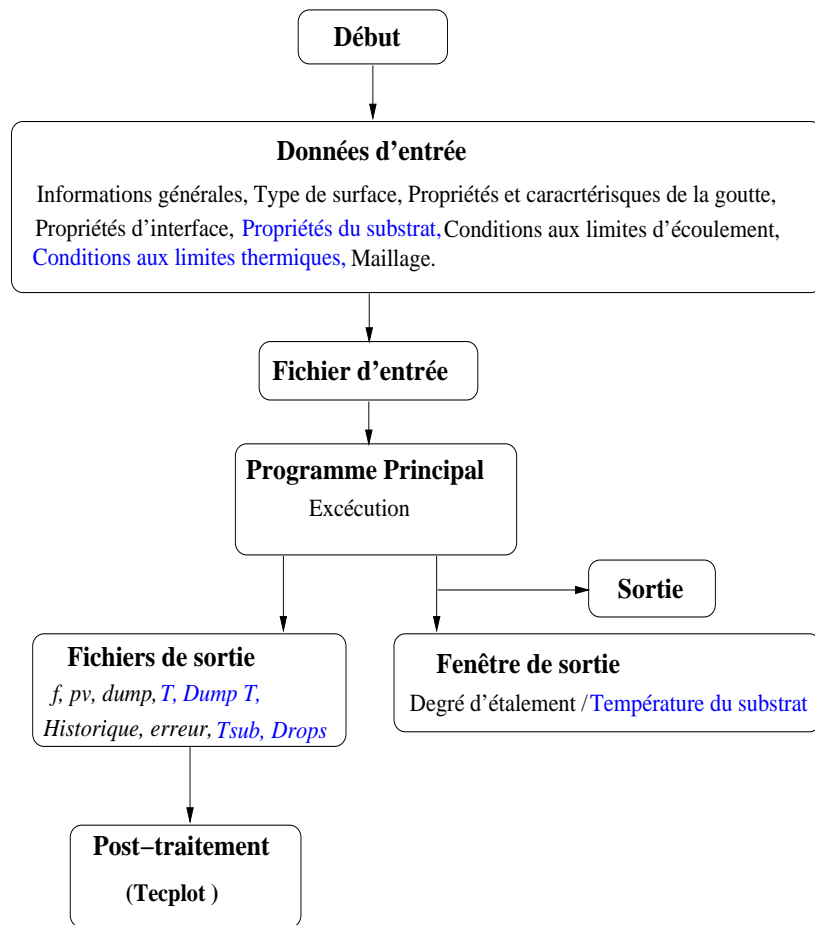


FIGURE 2.8 – Procédure de simulation du code numérique. Les textes en couleur bleue indiquent, que les équations d'énergie sont prises en compte durant la simulation.

Chapitre 3

Étude sur des gouttes millimétriques

Dans ce chapitre consacré à l'étude de l'impact de gouttes de cuivre et d'alumine de taille millimétrique sur substrat en acier, nous commençons, d'abord de valider notre approche par une étude sur l'impact de gouttes de taille millimétrique afin de nous aider à comprendre quels sont les mécanismes de la formation des lamelles en projection plasma, procédé pour lequel les revêtements sont construits par l'impact et l'empilement de gouttes micrométriques. Nous étudions ensuite l'influence des maillages utilisés dans la goutte et dans le substrat sur les résultats numériques obtenus avec le code Simulent Drop.

Une fois que les maillages optimaux sont définis pour nos conditions de l'étude, nous analysons, pour des gouttes de cuivre, l'influence des paramètres d'impact de la goutte (vitesse et température), des paramètres du substrat (température) et des paramètres de l'interface goutte/substrat (résistance thermique de contact, tension de surface) sur les processus de déformation et de solidification de la goutte. Nous terminons ce chapitre par une étude sur des gouttes millimétriques de céramique.

3.1 Validation expérimentale

Cedelle et al. [61] et [52] du Laboratoire "*Sciences des Procédés Céramiques et de Traitements de Surface*" en collaboration avec "*The advanced Joining Process Laboratory*" de Toyohashi au Japan ont mené une étude expérimentale sur l'impact et la solidification de gouttes millimétriques en condition de chute libre sur une surface solide et plane (§ 1.3.3.1). Cette étude, à laquelle nous nous sommes intéressés, a été réalisée sur des gouttes de cuivre impactant sur un substrat en acier inox qui a été préchauffé à deux températures. Le Tableau 3.1 résume les conditions d'impact.

Cette voie d'investigation est intéressante, car les échelles de temps, de l'ordre de la *ms* pour les processus dynamique et thermique, autorisent l'étude expérimentale non seulement de l'évolution de la température de la goutte, mais aussi de sa déformation. Cependant, cette étude ne représente pas réellement ce qui se passe en projection plasma parce qu'il est difficile d'avoir à

la fois une similitude hydrodynamique et une similitude thermique parfaites entre les conditions de chute libre et celles de la projection par plasma (voir Fig. 3.1). Un exemple de comparaison est donné dans le Tableau 3.2 pour une goutte micrométrique et une goutte millimétrique. On remarque que si les nombres de Reynolds et de Peclet des deux gouttes sont identiques pour ces conditions, leurs nombres de Weber sont différents.

TABLE 3.1 – Conditions expérimentales de l'impact de gouttes de cuivre utilisées dans les travaux de Cedelle et al. [61].

d_0	v_i	T_f	$T_{0,g}$	T_{sub}
(mm)	(m/s)	(° C)		(° C)
$(2,6 \pm 0,6)$	$(4 \pm 0,5)$	1083	1100-1300	25 et 400

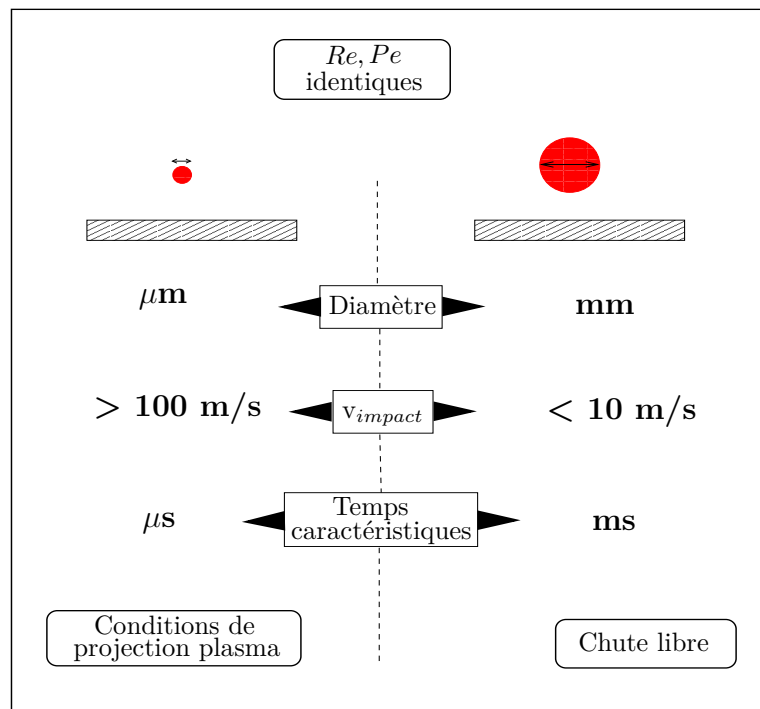


FIGURE 3.1 – Comparaisons des paramètres d'impact d'une goutte millimétrique (en chute libre) et d'une goutte micrométrique (en projection plasma).

3.2 Étude de sensibilité aux maillages

Les études publiées sur l'impact de gouttes millimétriques utilisant le code développé par Mostaghimi et son équipe de l'université de Toronto (<http://www.simulent.com/>) ne concernent que l'étude sur l'effet des paramètres physiques, mais à notre connaissance, aucune étude n'a

TABLE 3.2 – Nombres adimensionnels calculés à la température de fusion des deux gouttes dans des conditions de chute libre et de projection plasma .

Conditions de chute libre ^a			conditions de projection plasma ^b		
Re	We	Pe	Re	We	Pe
16 000	200	60	16 000	10 000	60

a. Goutte millimétrique : $d_0 = 2 \times 10^{-3} m$, $v_i = 4 m/s$

b. Goutte micrométrique : $d_0 = 40 \times 10^{-6} m$, $v_i = 200 m/s$

été présentée sur l'influence du maillage. Ils nous a donc paru utile dans un premier temps d'étudier l'effet de ce maillage sur les résultats obtenus avec le code Simulent Drop, d'autant que le problème étudié fait intervenir des phénomènes de refroidissement et de solidification.

3.2.1 Le maillage de la goutte : le CPR

Le maillage de la goutte est un domaine à repère cartésien, de $N_x * N_y * N_z$ mailles, respectivement, selon les directions x , y et z . Pour déterminer le nombre de mailles dans chaque direction du domaine, il faut d'abord définir le nombre de mailles par rayon de goutte en fixant une valeur du CPR¹ (§ 2.3.6). Ensuite le nombre de mailles dans chaque direction est déterminé en fonction du CPR.

Le plan d'impact (xoy) est un plan commun entre le domaine de la goutte et celui du substrat (cf. Fig. 3.2). Les dimensions des domaines de calcul pour nos simulations sont définies comme suit :

- i) Pour la goutte de cuivre de rayon 1,5 mm, les dimensions du domaine doivent être choisies de façon à ce qu'elles soient assez larges dans le plan d'impact, pour contenir le diamètre final que peut atteindre la lamelle mais aussi prendre en compte d'autres phénomènes qui peuvent avoir lieu tel que des éclaboussures par exemple.
Ainsi, nous avons fixé ce domaine à 8 mm de chaque côté (direction x et y) et à 4,5 mm dans la direction normale à ce plan (direction z).
- ii) Pour le substrat, et puisque le plan d'impact est commun avec celui de la goutte, il suffit de fixer une épaisseur assez importante pour que les flux de thermiques puissent diffuser en son sein et que la condition imposée à la limite inférieure n'influence pas la thermique dans la goutte. Nous avons estimé cette épaisseur à 3 mm.

Le nombre de mailles dans chaque direction du domaine (excepté dans l'épaisseur du substrat) est fonction du CPR. Il est calculé comme suit :

1. Cells Per Radius en anglais

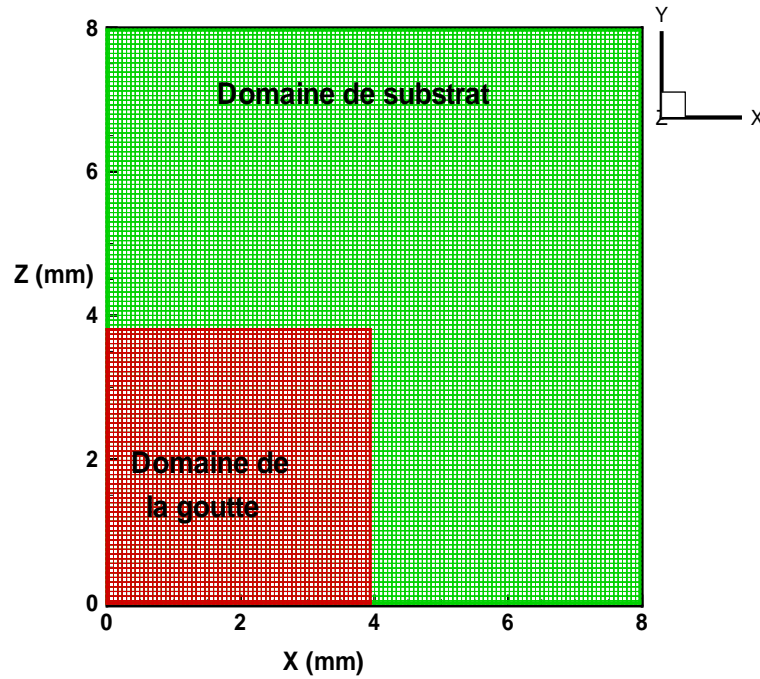


FIGURE 3.2 – Vue de dessus d’un maillage typique utilisé pour nos simulations . Le domaine de la goutte à l’impact (en couleur rouge) qui s’étale et se solidifie sur le domaine du substrat (en couleur vert).

$$N_d = \frac{L_d}{R_{0,g}} \times CPR \quad (3.1)$$

où N_{max} , L_d et $R_{0,g}$ représentent respectivement le nombre de mailles suivant l’une des directions principales du domaine, la longueur du domaine et le rayon initial de la goutte .

Le Tableau 3.3 résume le calcul du nombre de mailles dans chaque direction du domaine de calcul pour la goutte et le substrat .

Avant de procéder à l’étude de l’effet du maillage, il convient d’abord de fixer deux paramètres physiques essentiels pour nos conditions de simulation (Tableau 3.4) que sont les conditions liées à la qualité de contact entre la goutte de cuivre en fusion et le substrat d’un point de vue thermique et dynamique :

- i) D’un point de vue thermique, la qualité de contact est caractérisée par une résistance thermique de contact (R_{th}). La valeur de cette résistance thermique de contact a été estimée en comparant les températures du substrat calculées (à la surface) à celles obtenues expérimentalement pour un substrat initialement froid, voir Fig. 3.3 . Sur cette figure on constate que pour un $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ les courbes numérique et expérimentale de l’évolution de la température du substrat montrent un bon accord . Aussi, nous avons choisi cette valeur pour nos conditions de simulation .

TABLE 3.3 – Maillage du domaine de calcul pour un CPR de 16

Maillage	Direction	L_d (m)	N_d	N_{max}	Nb. de mailles
Goutte	X_d	0,008	$\frac{0,008}{0,0015} \times 16$	$I_{max} = 86$	355 008
	Y_d	0,008	$\frac{0,008}{0,0015} \times 16$	$J_{max} = 86$	
	Z_d	0,003	$\frac{0,0045}{0,0015} \times 16$	$K_{max} = 48$	
Substrat	X_d et Y_d identique à la goutte				295 840
	Z_{wd}	0,003	40	$K_{w_{max}} = 40$	

ii) D'un point de vue dynamique, le contact à l'interface goutte-substrat est caractérisé par l'angle de contact liquide-solide. Dans nos conditions physiques de simulation (voir Tab. 3.4) cet angle de contact varie entre deux valeurs limites (angle dynamique, voir § 1.4.2.2). Des études similaires [86] et [145] montrent bien une hystérésis de l'angle de contact dans ces conditions, voir Fig. 3.4. La difficulté est que les données expérimentales de ces valeurs ne sont pas toutes accessibles, et n'ayant pas trouvé les valeurs pour le cuivre, nous avons décidé dans un premier temps de travailler, pour cette étude paramétrique sur le maillage, avec des angles de $140^\circ - 40^\circ$, angles mesurés pour l'étain [86].

Les simulations ont donc été réalisées sur des gouttes de cuivre impactant sur un substrat d'acier avec les conditions réunies dans le Tableau 3.4.

TABLE 3.4 – Conditions de simulation de l'impact de gouttes de cuivre.

d_0 (mm)	v_i (m/s)	$T_{0,g}$ (° C)	T_{sub} (° C)	R_{th} (m ² K/W)	Angle de contact (°)	Re^a	We^a	Pe^a
3	4	1100 et 1215	25	10^{-6}	140-40	35294	294	275

a. calculé à la température de la goutte au moment de l'impact

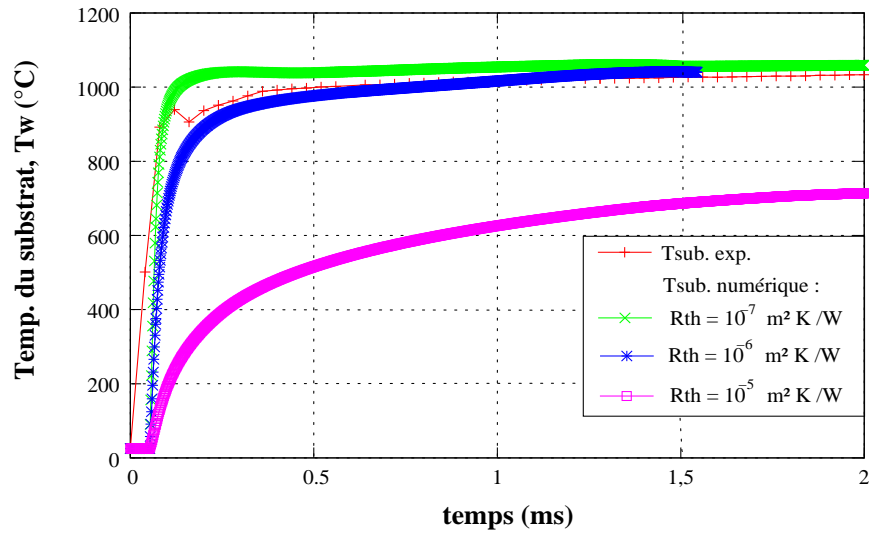


FIGURE 3.3 – Comparaison des courbes expérimentale et numérique de l'évolution de la température du substrat (initialement à 25 °C) pour différentes valeurs de R_{th} . Pour le substrat nous avons choisi le maillage donné dans le Tableau 3.3 qui est le même quelque soit le CPR.

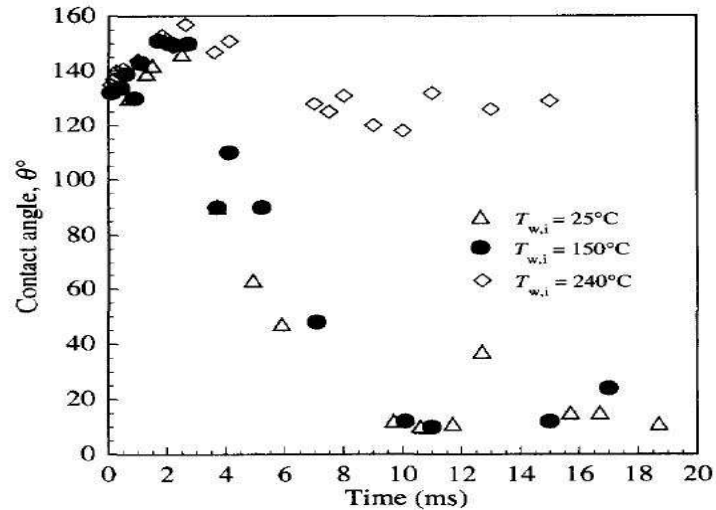


FIGURE 3.4 – Variation de l'angle de contact liquide-solide d'une goutte d'étain impactant sur une surface en acier en inox, variations mesurés à différentes températures initiales du substrat $T_{w,i}$ [86].

Les recommandations, données par le manuel du code, pour le choix du CPR sont d'utiliser des valeurs de CPR inférieures à 20. Nous avons cependant estimé que pour les gouttes millimétriques et les conditions de cette étude, il était intéressant de considérer des CPR plus élevés pour voir l'effet sur les résultats numériques. Les différentes valeurs du CPR que nous avons considéré ainsi que le paramètre de maille correspondant sont donnés dans le Tableau 3.5. Par exemple, un CPR de 23 pour une goutte de 1,5 mm de rayon conduit à une densité de maille de 15,33 mailles/mm soit une taille de maille égale à 65,2 μm .

TABLE 3.5 – Valeurs de CPR utilisées et tailles des mailles correspondantes.

CPR	nbr. maille/mm	taille de la maille (μm)
16	10,66	93,8
18	12	83,3
20	13,33	75
23	15,33	65,2
27	18	55,6

L'effet du CPR sur les morphologies finales des lamelles de cuivre prédites par la simulation est présenté par la Fig. 3.5. Ces morphologies sont comparées à celle d'une lamelle de cuivre obtenue expérimentalement. Les résultats présentés sur cette figure montrent que les morphologies des lamelles de cuivre (a)-(e) sont très sensibles au paramètre CPR : plus sa valeur augmente (i.e. le nombre de mailles dans la goutte augmente) plus le code traite avec précision la déformation de la goutte et les doigts liquides qui émergent de sa périphérie. Ainsi, un CPR égal de 23 conduit à un résultat assez cohérent avec la lamelle réelle ; de plus pour ce CPR on a les diamètres des lamelles qui sont équivalents.

Cette étude préliminaire sur l'effet du CPR nous amène à adopter un CPR de 23 pour la suite de nos simulations.

3.2.2 Le Maillage du substrat

Le but de cette étude est d'étudier l'influence du maillage dans le substrat, suivant son épaisseur, en particulier dans la zone interfaciale où s'établit le contact lamelle-substrat. Dans un premier temps, il nous faut déterminer l'épaisseur minimale du substrat acceptable pour le calcul de telle sorte qu'elle ne soit pas à la fois *i*) trop faible et affecte la diffusion de la chaleur en son sein, et *ii*) trop épaisse et augmente inutilement le maillage et par conséquent le temps de calcul.

Ensuite, nous nous intéressons à l'effet de la densité du maillage sur la diffusion de la chaleur dans le substrat suivant son épaisseur (direction z) pour un maillage uniforme et un maillage

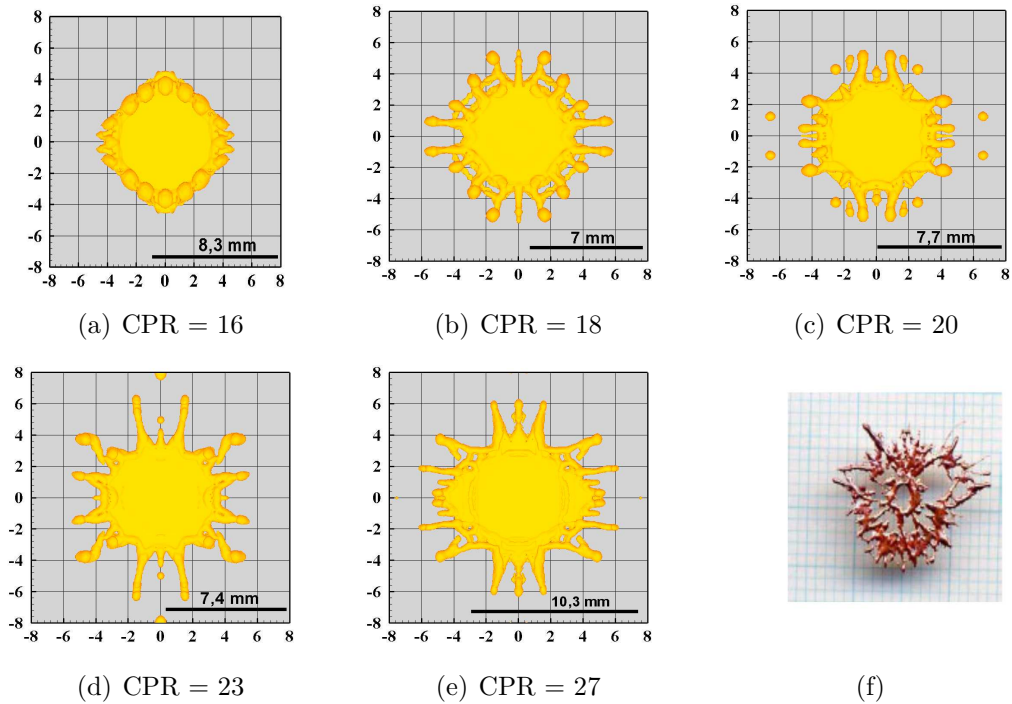


FIGURE 3.5 – Vue de dessus des morphologies des lamelles de cuivre (a)-(e) obtenues par simulation pour différentes valeurs du CPR et (f) morphologie de la lamelle. Le temps final de simulation est de 7 ms après l’impact. Le maillage du substrat est donné dans le Tableau 3.3.

non uniforme, ce qui nous permettra par la suite de déterminer l’épaisseur et le maillage adéquat pour le substrat et l’adapter à l’étude du problème physique de l’impact de gouttes millimétriques.

3.2.2.1 Épaisseur du substrat

La Fig. 3.6 montre la diffusion de la chaleur dans le substrat lors de l’étalement de la lamelle de cuivre au-dessus de sa surface dans le cas d’un maillage uniforme dans le substrat (voir cas 1, 2 et 3 du Tab. 3.6). On remarque que la diffusion est importante au voisinage de l’interface lamelle/substrat, mais au-delà d’une certaine épaisseur la diffusion de la chaleur est moins importante dans le substrat. Pour le cas (c) de la Fig. 3.6, la zone affectée thermiquement atteint presque 1 mm alors que pour le cas (a), de la même figure, cette zone est limitée à une épaisseur de 0,5 mm à un temps $t = 5$ ms après l’impact.

La diffusion de la chaleur dans le substrat est donc sensible au maillage et elle est d’autant plus importante que le nombre de mailles augmente ($N_w = 300$ mailles, cas (c)). Ceci s’explique par le fait qu’introduire un nombre de mailles important permet de raffiner le maillage du domaine de calcul et d’imposer ainsi un paramètre de maille plus faible (taille de maille), voir Tab. 3.6.

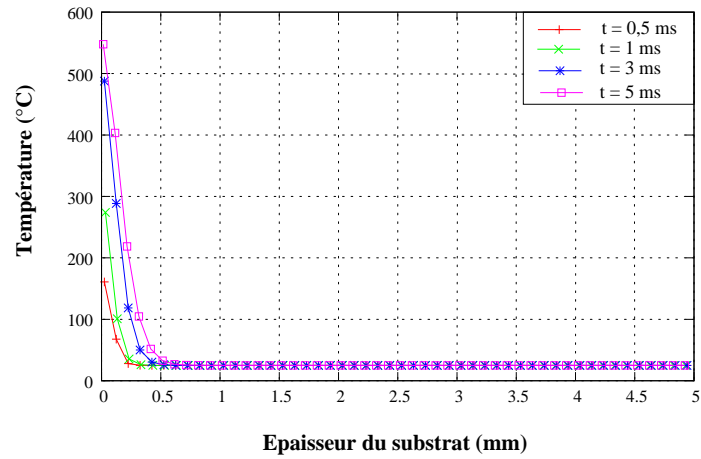
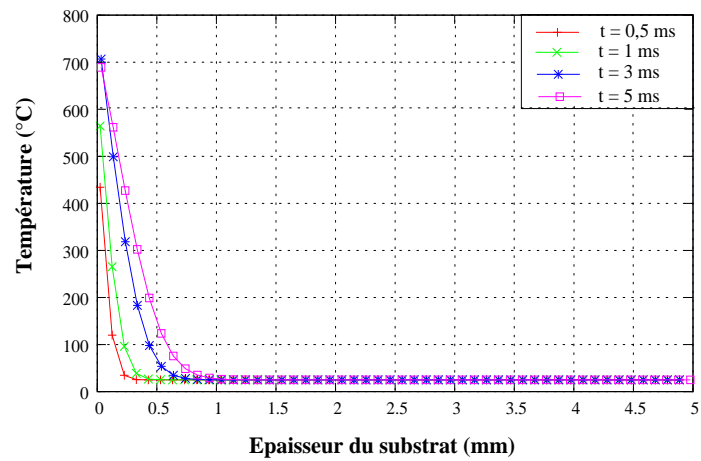
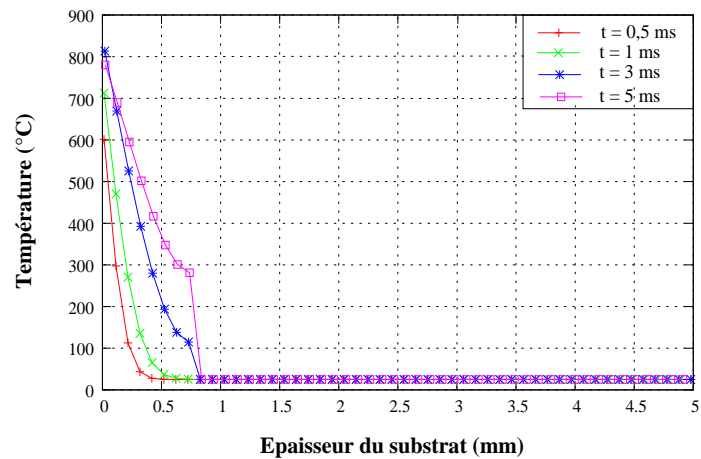
(a) $N_w = 50$ mailles(b) $N_w = 150$ mailles(c) $N_w = 300$ mailles

FIGURE 3.6 – Variation de la température dans le substrat pour différents maillages, lors de l'étalement d'une goutte de cuivre. Conditions d'impact du Tab. 3.5

Le raffinement du maillage est en particulier intéressant dans une zone critique du substrat i.e. au voisinage de l'interface lamelle/substrat où s'établit l'échange thermique (voir Fig. 3.7). Dans la suite de notre étude, nous avons choisi une épaisseur du substrat e_w à 3 mm, qui est suffisante pour ne pas affecter la diffusion de la chaleur en son sein.

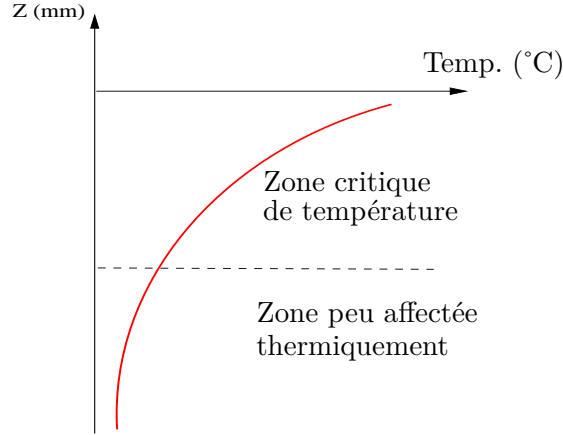


FIGURE 3.7 – Variation de la température dans le substrat suivant son épaisseur (axe z). La zone critique de température est au voisinage de l'interface lamelle/substrat ($z = 0$).

3.2.2.2 Densité du maillage

L'effet du maillage tient compte également du fait que notre substrat, en acier inoxydable, a une faible conductivité thermique ($\simeq 25 \text{ W/m.K}$ à température ambiante). Dans le cas d'un maillage du substrat non uniforme, son contrôle requiert de spécifier cinq paramètres :

- e_w : l'épaisseur du substrat,
- N_w : le nombre total de mailles dans le substrat,
- s_p : la distance à partir de laquelle est générée le maillage non uniforme,
- t_1 : la taille minimale de la maille dans la zone à maillage non uniforme
- n_1 : le nombre de mailles dans la zone à maillage non uniforme.

Le couple de valeurs (t_1, n_1) devra être choisi de sorte que le maillage soit raffiné au voisinage de la zone d'interface lamelle/substrat comme suit :

$$t_1 < \frac{e_w}{N_w} \quad ; \quad n_1 > \frac{s_p}{t_1} \quad (3.2)$$

Les caractéristiques du maillage uniforme et du maillage non uniforme (raffiné au voisinage de l'interface lamelle/substrat) sont réunies respectivement dans les Tableaux 3.6 et 3.7.

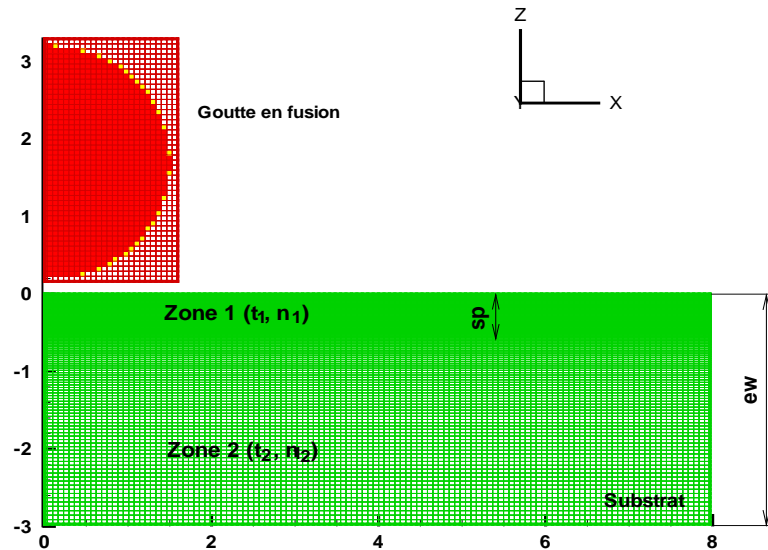


FIGURE 3.8 – Maillage typique du domaine de calcul (goutte et substrat) en 2D avec un maillage densifié près de l'interface. Chaque zone (1 et 2) est définie par le couple taille (t_i) et nombre de maille (n_i). $i = 1$ et 2 respectivement pour les zones 1 et 2.

La Fig. 3.8 montre un exemple typique du domaine de calcul en 2D (goutte et substrat) avec un maillage raffiné au voisinage de l'interface. L'épaisseur du substrat (e_w) est fixée à 3 mm. Le paramètre essentiel est la taille de la maille. Dans le cas, d'un maillage uniforme, la même taille de la maille (t_m) est imposée dans tout le substrat (suivant son épaisseur). Par exemple pour un nombre de maille total (N_w) de 150 la taille des mailles (t_m) est de $20 \mu\text{m}$ (voir la simulation N° 4 du Tableau 3.6), alors que, pour un maillage non uniforme la densification du maillage est réalisée sur une épaisseur s_p variant de 1 mm à $0,5 \text{ mm}$. Si on choisit par exemple un nombre de maille total $N_w = 100$ et une densification sur une épaisseur $s_p = 0,5 \text{ mm}$, on obtient une taille de maille de $15 \mu\text{m}$ en imposant 33 mailles dans la zone 1 avec maillage non uniforme (cf. Fig. 3.8).

TABLE 3.6 – Caractéristiques d'un maillage uniforme dans le substrat .

	N_w	e_w	t_m
		(mm)	(μm)
cas 1	300	5	16
cas 2	150	5	33
cas 3	50	5	100
cas 4	150	3	20
cas 5	100	3	30
cas 6	60	3	50
cas 7	40	3	75

TABLE 3.7 – Caractéristiques d'un maillage non uniforme dans le substrat .

	N_w	e_w	s_p	t_1	n_1
		(mm)	(mm)	(μm)	
cas 1	150	3	1	10	100
cas 2	100	3	1	15	50
cas 3	100	3	1	20	66
cas 4	100	3	0,5	15	33

Les Figs. 3.9 et 3.10 montrent l'évolution de la température dans le substrat au voisinage de l'interface dans la direction de l'étalement de la goutte. Il apparaît clairement que la température à l'interface goutte-substrat est très sensible à la taille de la maille dans le substrat qui peut affecter considérablement les gradients thermiques dans le substrat. On peut ainsi remarquer qu'à l'instant $t = 0,21 \text{ ms}$ après l'impact de la goutte, pour un substrat non uniforme, la température atteint facilement $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ avec un maillage non uniforme du substrat (avec $t_1 = 10 \text{ } \mu\text{m}$ (voir Fig. 3.10 a)), alors que cette température n'atteint pas $900 \text{ }^\circ\text{C}$ pour un maillage uniforme (avec $t_m = 15 \text{ } \mu\text{m}$ (voir Fig. 3.9 b)).

L'effet du maillage du substrat sur la température de l'interface lamelle/substrat va donc affecter le transfert de chaleur de la goutte vers le substrat particulièrement dans la zone interfaciale. Il est donc essentiel de déterminer le paramètre de maille approprié au cas de notre étude. Pour cela, nous avons comparé les températures du substrat obtenues avec différents maillages avec la température du substrat mesurée expérimentalement. Ces comparaisons sont résumées dans les Tableaux 3.6 et 3.7 et les Figs. 3.11 (a) et (b).

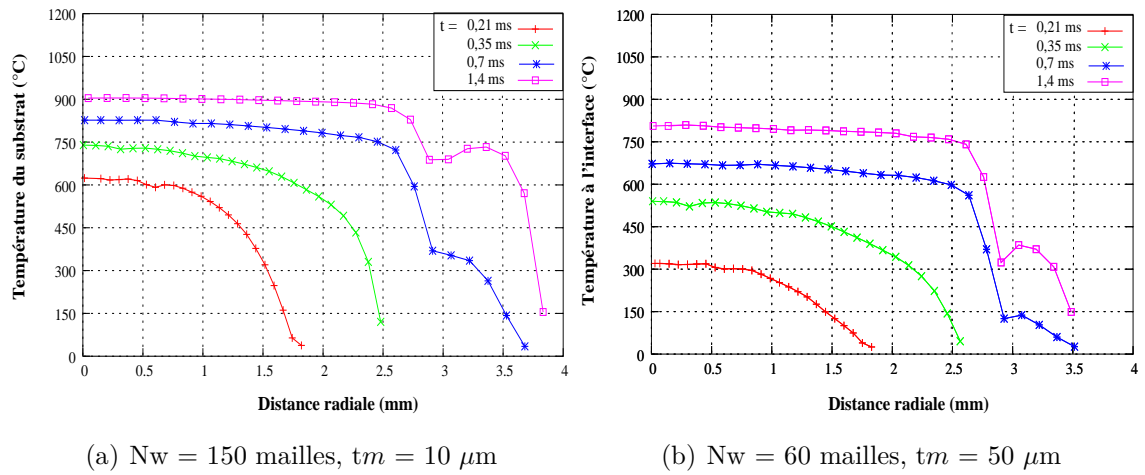


FIGURE 3.9 – Evolution de la température dans le substrat au voisinage de l'interface pour un maillage uniforme dans le substrat

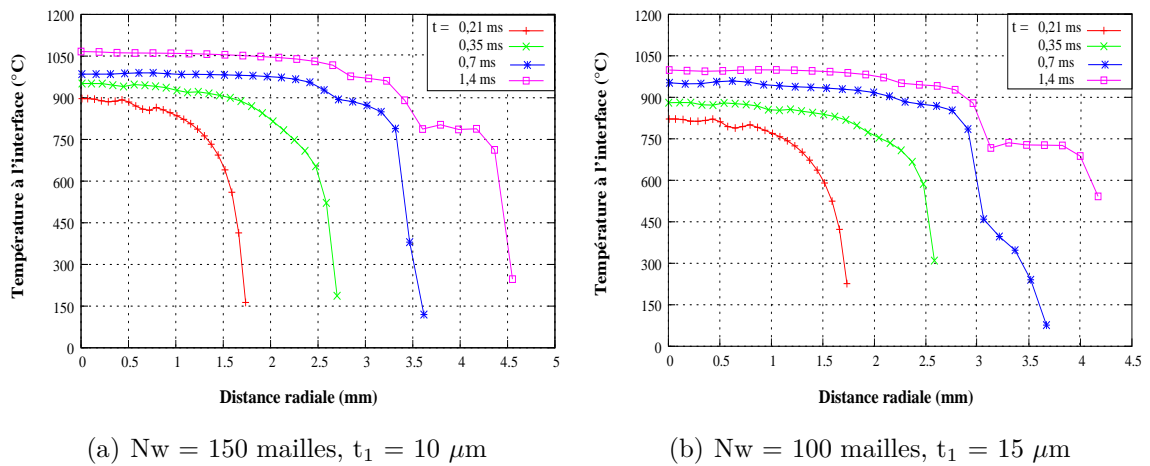


FIGURE 3.10 – Evolution de la température dans le substrat froid au voisinage de l'interface pour un maillage non uniforme dans le substrat

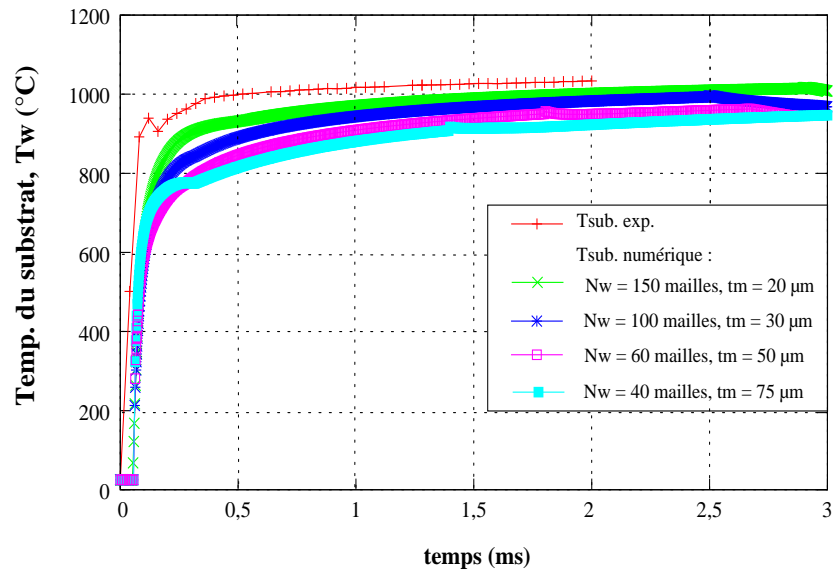
D'après les Figs. 3.11 (a) et (b), l'évolution de la température du substrat qui s'accorde le mieux avec les mesures expérimentales est celle obtenue avec un maillage non uniforme du substrat avec un nombre de mailles de 100 et un paramètre de maille de $15 \mu\text{m}$ (Fig. 3.11 (b)).

Ces résultats sur le maillage dans le substrat nous ont permis de déterminer les conditions de maillage qui nous paraissent les mieux adaptées aux conditions d'impact de gouttes de cuivre sur un substrat en acier inoxydable. Nous allons maintenant étudier l'influence des différents paramètres physiques relatifs à la goutte et au substrat.

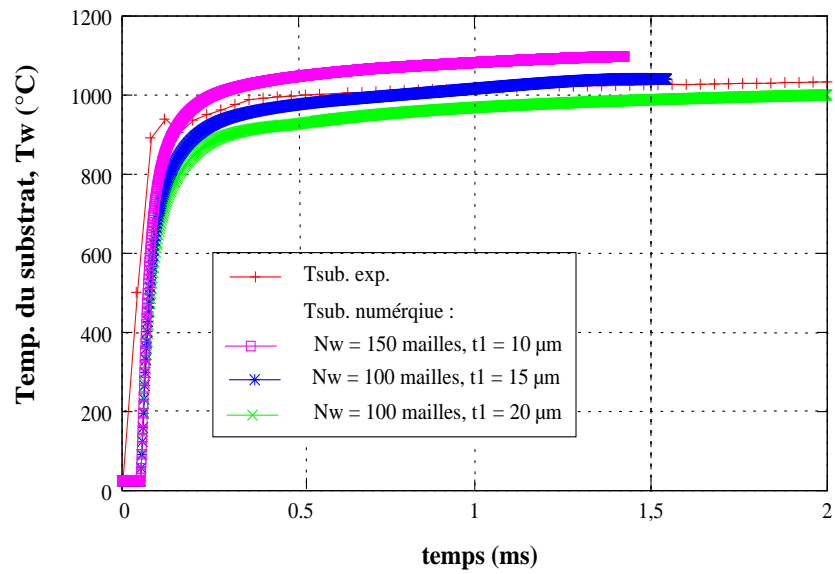
3.3 Influence de la vitesse d'impact de la goutte - tension de surface

L'augmentation de la vitesse d'impact de la goutte accroît son énergie cinétique et favorise ainsi sa déformation sur le substrat. Cependant, si cette énergie cinétique n'est pas suffisamment importante, cette déformation sera contrecarrée par les effets de tension de surface qui contribueront à réduire l'étalement de la goutte. La Fig. 3.12 montre des vues en perspective des morphologies de lamelles de cuivre prédites par les simulations, à l'instant $t = 2 \text{ ms}$ après l'impact sur des substrats froids. Ces morphologies ont été obtenues pour différentes vitesses d'impact : 2 m.s^{-1} ($Re = 17647$ et $We = 73$), 4 m.s^{-1} ($Re = 35294$ et $We = 294$) et 10 m.s^{-1} ($Re = 88235$ et $We = 1842$). On remarque, comme on pouvait s'y attendre, que l'augmentation de la vitesse d'impact de la goutte favorise son étalement avec l'apparition de doigts liquides qui émergent de sa périphérie, comme on peut l'observer sur la Fig. 3.12 (b) en fin d'étalement. Ces doigts liquides peuvent se rompre conduisant au phénomène de "splashing" de la goutte si l'énergie cinétique de la goutte qui impacte est suffisamment importante, voir Fig. 3.12 (c).

Par contre pour la vitesse d'impact de $v_i = 2 \text{ m.s}^{-1}$, la déformation de la goutte est faible son étalement limité (voir Fig. 3.12 (a) contre (b) et (c)). Les forces de tension de surface qui tendent à minimiser la surface de contact avec la surface du substrat jouent un rôle prépondérant : la goutte s'étale alors faiblement tout en accumulant de la matière sur son pourtour jusqu'à l'instant $t = 1 \text{ ms}$ (voir Fig. 3.13). Après la goutte liquide se rétracte vers l'intérieur, avant même d'achever sa phase d'étalement, ce qui conduit à la formation d'une partie centrale concave dans la goutte ($t = 4 - 6 \text{ ms}$).



(a) Maillage uniforme



(b) Maillage non uniforme

FIGURE 3.11 – Evolution de la température du substrat froid pour différents maillages comparée à l'évolution mesurée expérimentalement. Un maillage densifié est appliqué au voisinage de l'interface lamelle/substrat

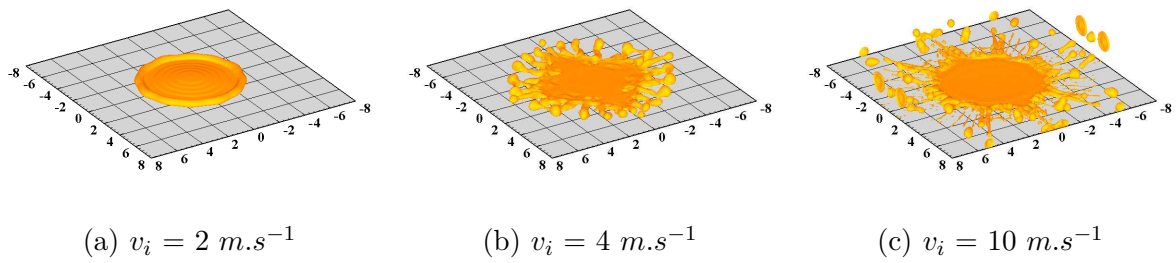


FIGURE 3.12 – Vue en perspective des morphologies de lamelles de cuivre, à l'instant $t = 2 \text{ ms}$, obtenue pour différentes vitesses d'impact : (a) $v_i = 2 \text{ m.s}^{-1}$, (b) $v_i = 4 \text{ m.s}^{-1}$ et (c) $v_i = 10 \text{ m.s}^{-1}$. Avec $d_0 = 3 \text{ mm}$ et $\theta_d = 100^\circ - 20^\circ$.

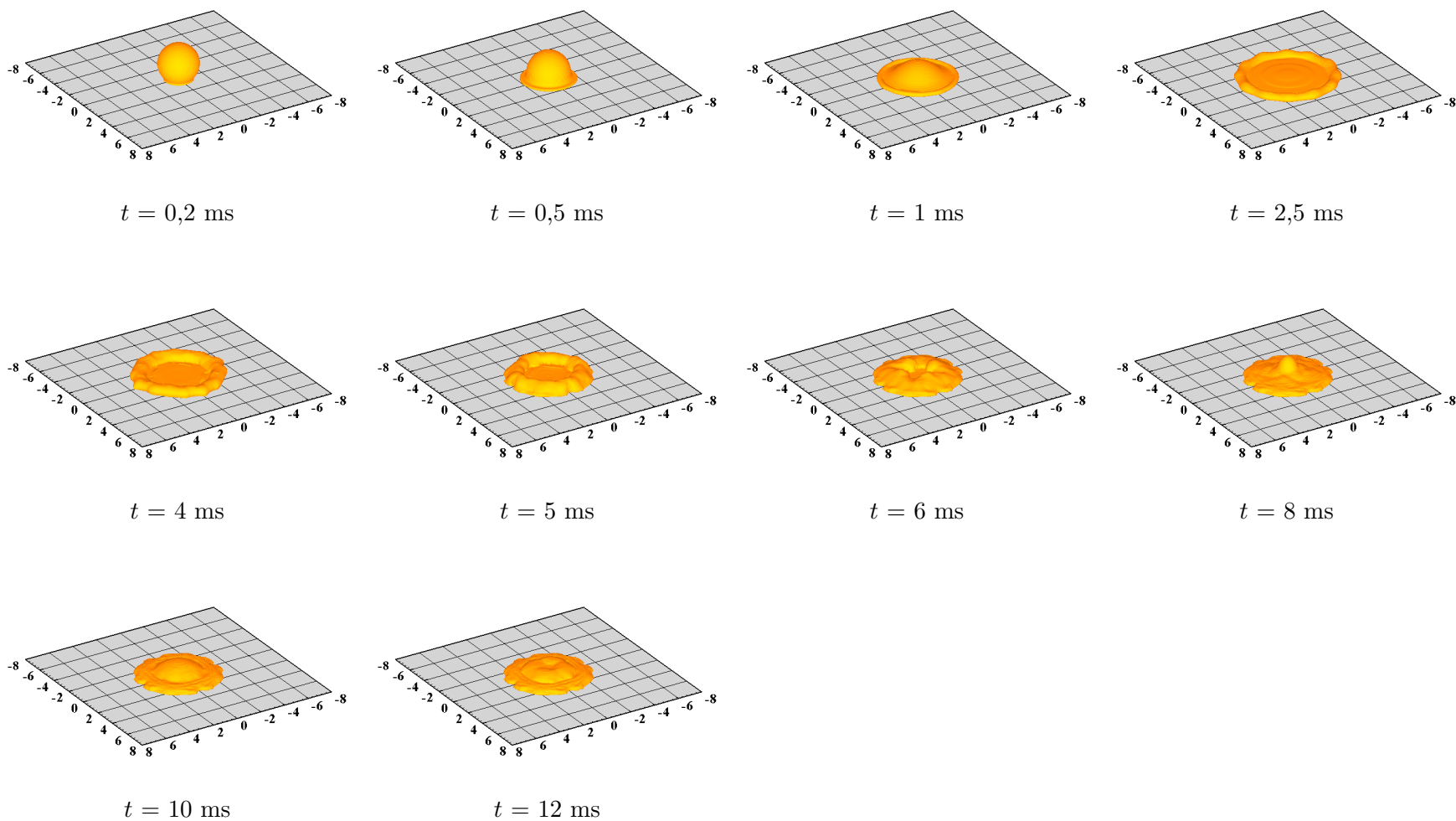


FIGURE 3.13 – Étalement et solidification d'une goutte de cuivre impactant à une vitesse $v_i = 2 \text{ m.s}^{-1}$ sur un substrat froid en acier inoxydable. $d_0 = 3 \text{ mm}$, $T_{sub} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$, et $\theta_d = 100^\circ\text{-}20^\circ$.

L'évolution du degré d'étalement de la goutte de cuivre pour des vitesses d'impact variant entre 2 et 10 m.s^{-1} est montrée sur la Fig. 3.14, cette dernière montre que le degré d'étalement dépend fortement de la vitesse d'impact. Ainsi, pour $v_i = 10 \text{ m.s}^{-1}$, la lamelle atteint un degré d'étalement maximal de 2,8 pour $t = 0,5 \text{ ms}$ après l'impact, alors que pour une vitesse d'impact plus faible $v_i = 2 \text{ m.s}^{-1}$ le degré d'étalement maximal n'est que de 1,9.

L'évolution du degré d'aplatissement² au centre de la lamelle (voir Fig. 3.15) montre qu'une vitesse d'impact relativement importante provoque une déformation plus rapide de la goutte sur le substrat. En effet, avec une vitesse d'impact $v_i = 10 \text{ m.s}^{-1}$, le degré d'aplatissement de la goutte, à l'instant $t = 1 \text{ ms}$, correspond à environ 5 % de son diamètre initial ce qui équivaut à une épaisseur de $0,15 \text{ mm}$, alors que cette épaisseur est de $1,5 \text{ mm}$ (équivalent à 50 % du diamètre initial) pour une vitesse d'impact $v_i = 2 \text{ m.s}^{-1}$ durant la même période d'étalement.

Au niveau de la thermique, la solidification intervient également durant la phase d'étalement de la goutte, ce qui peut perturber voire bloquer son étalement et provoquer le splashing (voir Figs. 3.12). La Fig. 3.16 montre l'évolution du gradient de température dans la goutte et dans le substrat durant la phase d'étalement pour des vitesses d'impact : de 2 et 4 m.s^{-1} . Avec une vitesse d'impact de 4 m.s^{-1} , la lamelle s'étale plus sur le substrat ce qui génère une surface de contact plus importante et favorise son refroidissement par conduction de la chaleur vers le substrat. Le front solide qui apparaît à l'interface lamelle/substrat se développe également plus rapidement dans la lamelle bloquant alors son étalement (voir Fig. 3.16 (a)). Alors que, pour la goutte impactant à faible vitesse (2 m.s^{-1}) et bien que la solidification intervienne dans la partie périphérique, celle-ci n'est pas suffisante pour empêcher la rétraction de la goutte liquide où le liquide recule vers l'intérieur de la goutte (voir Fig. 3.16 (b)).

2. L'épaisseur relative de la goutte rapportée à son diamètre initial

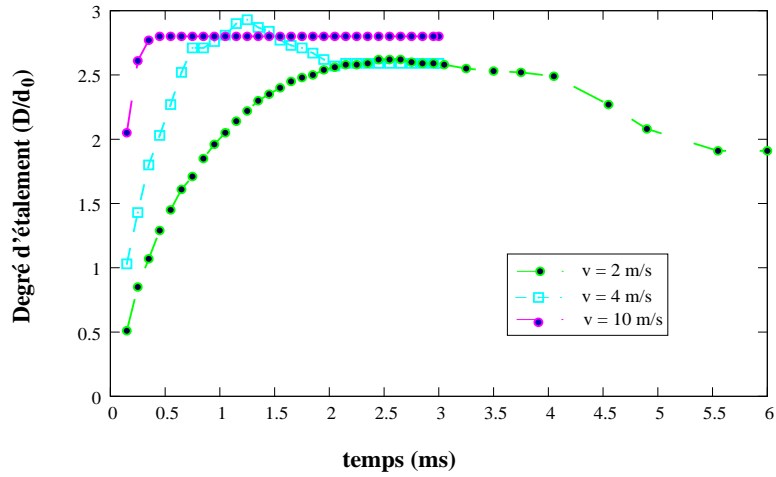


FIGURE 3.14 – Évolution du degré d'étalement d'une goutte de cuivre impactant sur un substrat froid avec différentes vitesses initiales : 2, 4 et 10 $m.s^{-1}$. Avec $d_0 = 3$ mm et $\theta_d = 100^\circ - 20^\circ$.

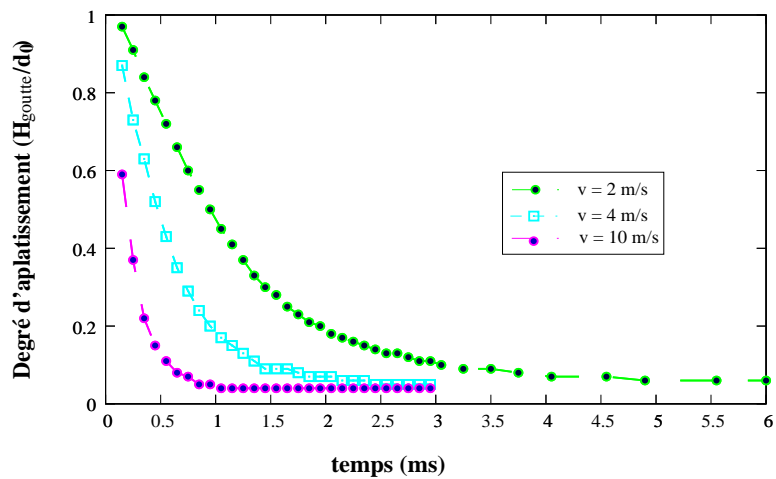


FIGURE 3.15 – Évolution du degré d'aplatissement d'une goutte de cuivre, au centre d'impact, avec différentes vitesses initiales : 2, 4 et 10 $m.s^{-1}$. Avec $d_0 = 3$ mm et $\theta_d = 100^\circ - 20^\circ$.

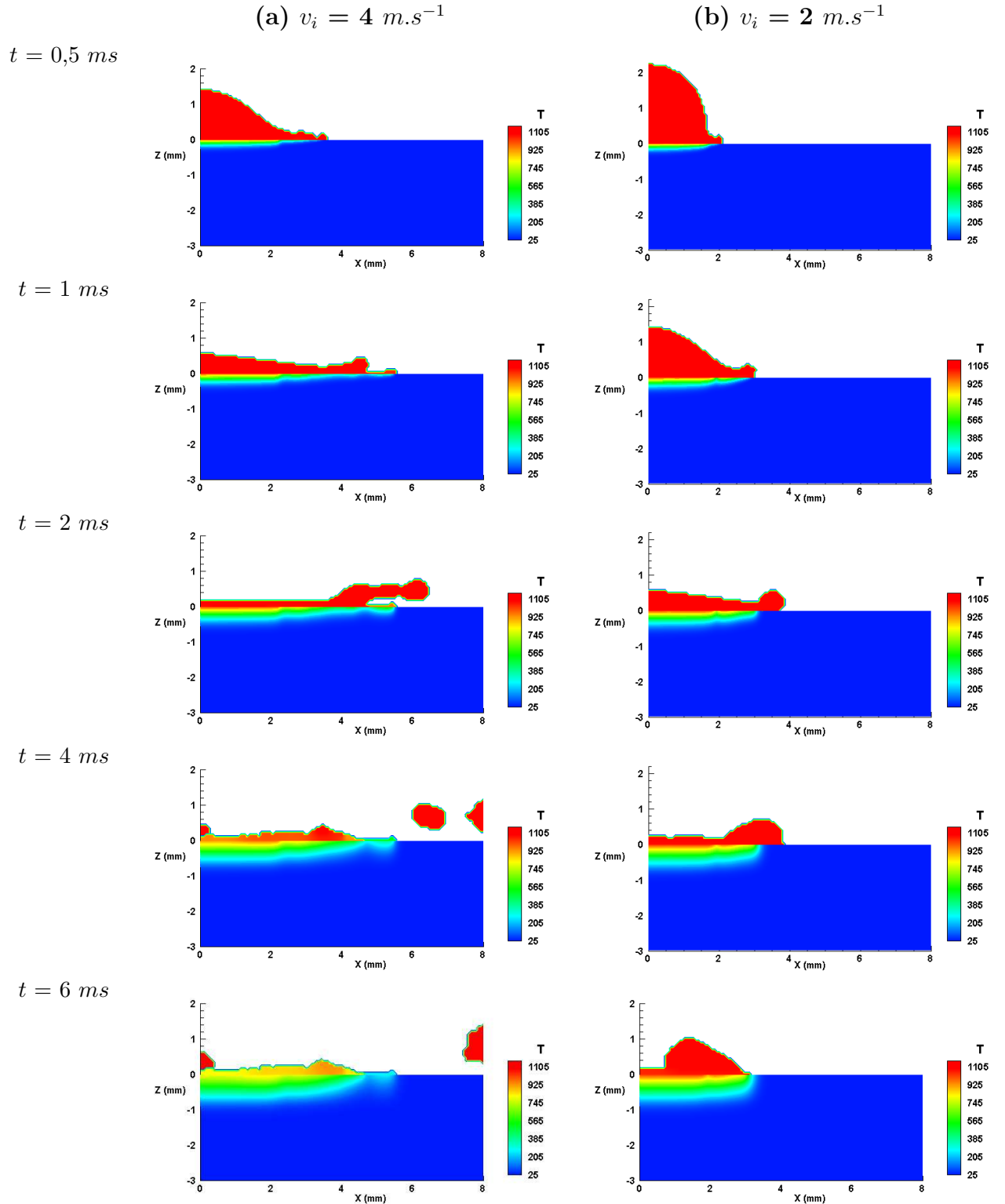


FIGURE 3.16 – Distribution du champ de température dans la goutte et dans le substrat froid pour des vitesses d'impact (a) $v_i = 4 \text{ m.s}^{-1}$ et (b) $v_i = 2 \text{ m.s}^{-1}$. $d_0 = 3 \text{ mm}$, $T_{0,g} = 1215 \text{ }^\circ\text{C}$ et $T_{sub} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ et $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$

Afin de comprendre l'influence de la tension de surface sur la phase d'étalement de la goutte de cuivre impactant sur un substrat, nous avons considéré une vitesse d'impact $v_i = 2 \text{ m.s}^{-1}$ et nous avons considéré trois cas d'étude :

- i) Tension de surface réelle (notée **sigma**),
- ii) Tension de surface réduite : la valeur de la tension de surface est réduite d'un facteur 3 (notée **sigma/3**),
- iii) Tension de surface augmentée : la valeur de la tension de surface est multipliée par 3 (notée **sigma \times 3**).

La Fig. 3.17 montre la variation de la tension de surface du cuivre en fonction de la température pour les trois cas d'étude cités ci-dessus.

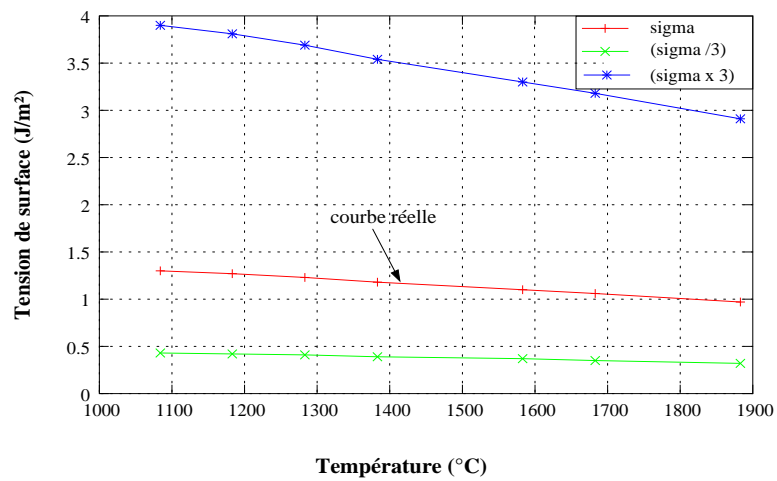


FIGURE 3.17 – Variation de la tension de surface du cuivre en fonction de la température calculée pour des valeurs réelles (courbe σ) et pour des valeurs modifiées : $\sigma/3$ et $\sigma \times 3$.

Les résultats des simulations numériques sur la morphologie des lamelles en considérant la valeur de la tension de surface réelle et les valeurs modifiées sont présentés sur la Fig. 3.18. On observe clairement l'effet de la tension de surface sur l'étalement et le comportement dynamique de la lamelle. Lorsque cette tension de surface est réduite dans un rapport 3 (cas (a) $\sigma/3$), la lamelle présente un comportement dynamique tout à fait différent par rapport aux cas (b) σ et (c) $\sigma \times 3$. La lamelle s'étale alors librement sans la contrainte de la tension de surface, mais l'apparition de la phase solide sur sa périphérie (partie la plus mince) déstabilise la partie liquide de la goutte qui se détache alors sous forme d'une couronne avec éjection de gouttelettes qui s'éloignent de la zone d'impact.

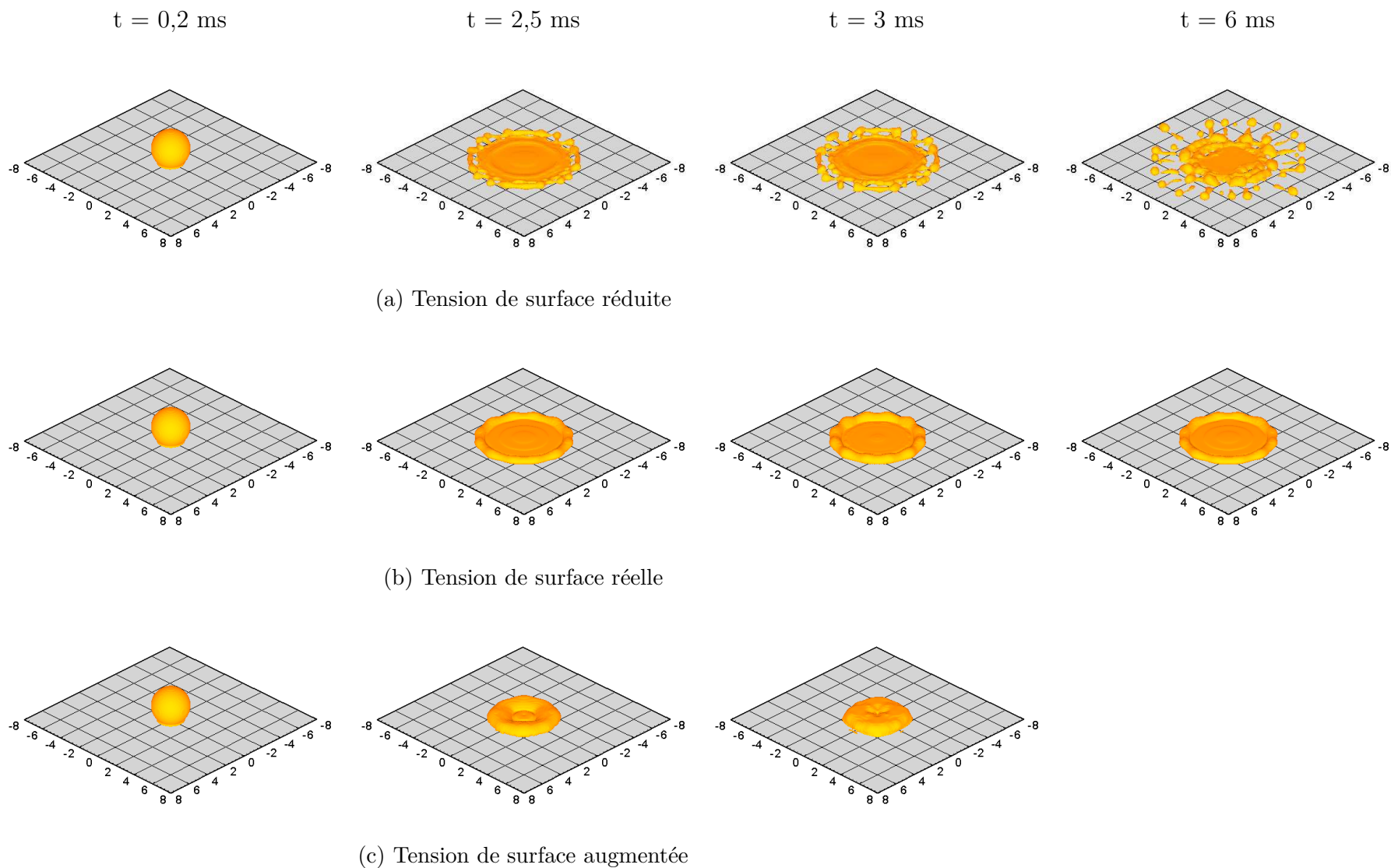


FIGURE 3.18 – Effet de la variation de la tension de surface sur l'étalement et la morphologie finale des lamelles de cuivre. La variation de la tension de surface avec la température est donnée par la Fig. 3.17. $d_0 = 1,5 \text{ mm}$ et $v_i = 2 \text{ m/s}$ et $T_{sub} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ et $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

La tension de surface affecte la phase d'étalement et agit essentiellement sur la zone périphérique de la lamelle (au niveau de la courbure). La Fig. 3.19 montre le profil de vitesse d'écoulement dans la goutte suivant sa diagonale à l'instant $t = 0,4 \text{ ms}$, profils obtenus dans plusieurs coupes de la goutte (direction z). On remarque que la vitesse d'écoulement devient importante dans la zone périphérique de la lamelle proche de l'interface : $z = 30, 70$ et $100 \mu\text{m}$, où on observe alors un film mince liquide qui précède la lamelle. Dès que l'on s'éloigne de l'interface vers l'apex et vers le centre de la goutte, la vitesse radiale devient beaucoup plus faible.

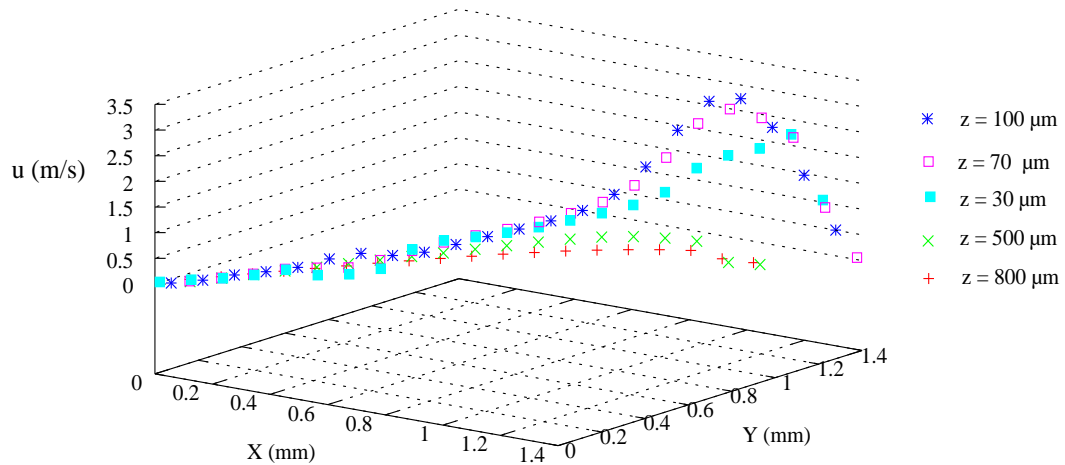


FIGURE 3.19 – Profil de la composante de vitesse u ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) dans la lamelle durant son étalement, à l'instant $t = 0,4 \text{ ms}$ après l'impact. La vitesse u est fonction de l'épaisseur de la goutte (direction z). Profil de vitesse obtenu pour le cas de la valeur réelle de la tension de surface. $T_{\text{sub}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ et $R_{\text{th}} = 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$

La Fig. 3.20 montre le profil de la composante u ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) de la vitesse radiale dans la goutte durant son étalement, avec comme paramètre variable la tension de surface. Durant les premiers instants d'étalement de la goutte, $t = 0,2$ à $0,4 \text{ ms}$, le profil de vitesse est quasiment le même, mais à partir de $t = 0,6 \text{ ms}$ la vitesse augmente dans la lamelle pour le cas d'une faible tension de surface (cas (a) $\sigma/3$). Par contre, avec une tension de surface plus grande, la vitesse est réduite dans la zone périphérique de la lamelle. Lorsque la valeur de la tension de surface est multipliée par 3 (cas (c)), la vitesse est pratiquement nulle dans la partie périphérique ce qui se traduit par un écoulement de la goutte plus limité. À l'instant $t = 0,7 \text{ ms}$ après l'impact, on observe que la vitesse devient nulle respectivement à des distances du centre de la goutte à 2 mm et 5 mm pour les cas (b) et (c), ce qui favorise l'apparition des phases solides dans la lamelle, voir Fig. 3.21 (b) et (c).

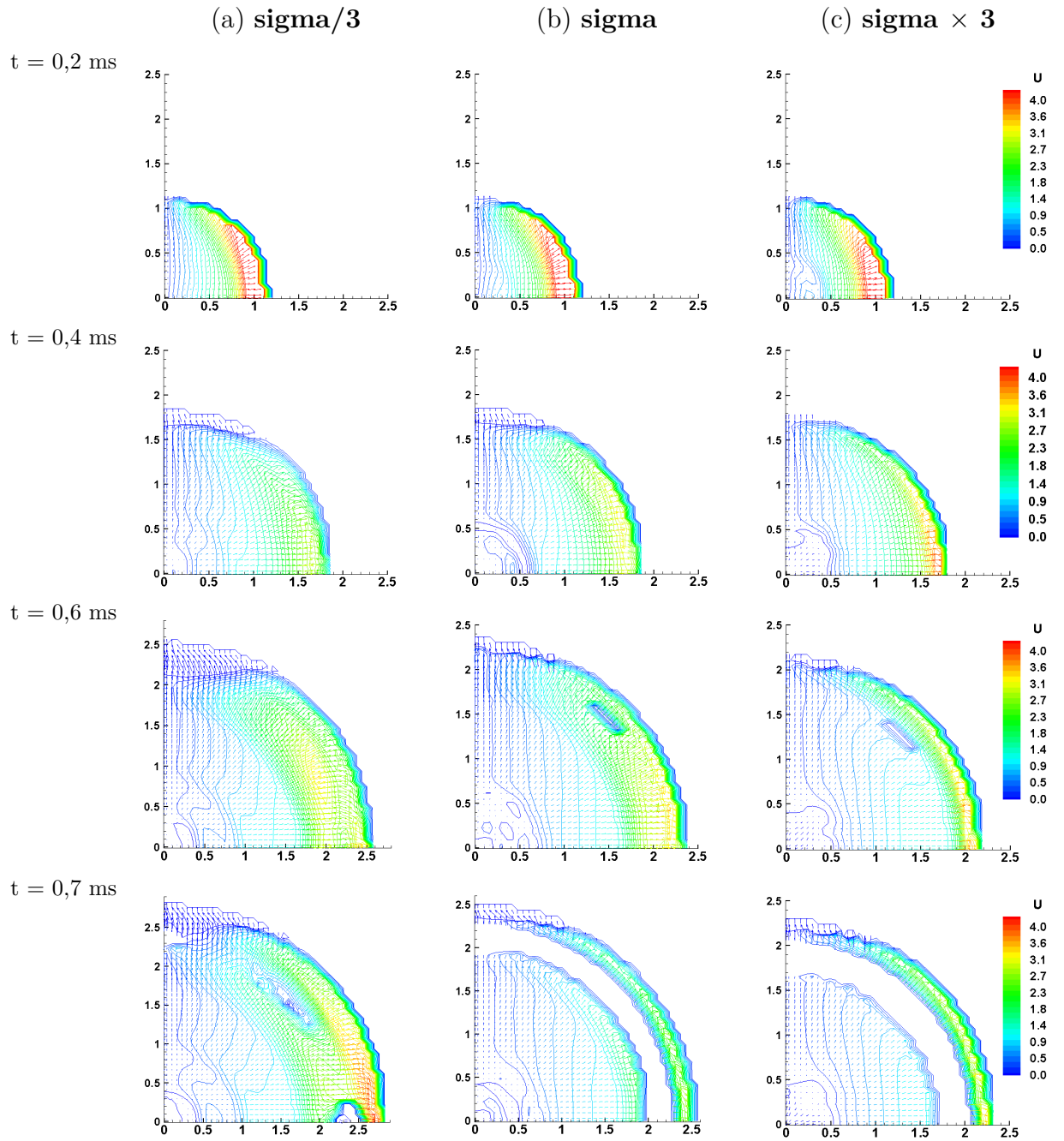


FIGURE 3.20 – Champ de la composante de vitesse u ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) dans la goutte, à une épaisseur $z = 30 \mu\text{m}$ de l'interface, en fonction de la valeur de la tension de surface. $v_i = 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $d_0 = 3 \text{ mm}$ et $T_{\text{sub}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

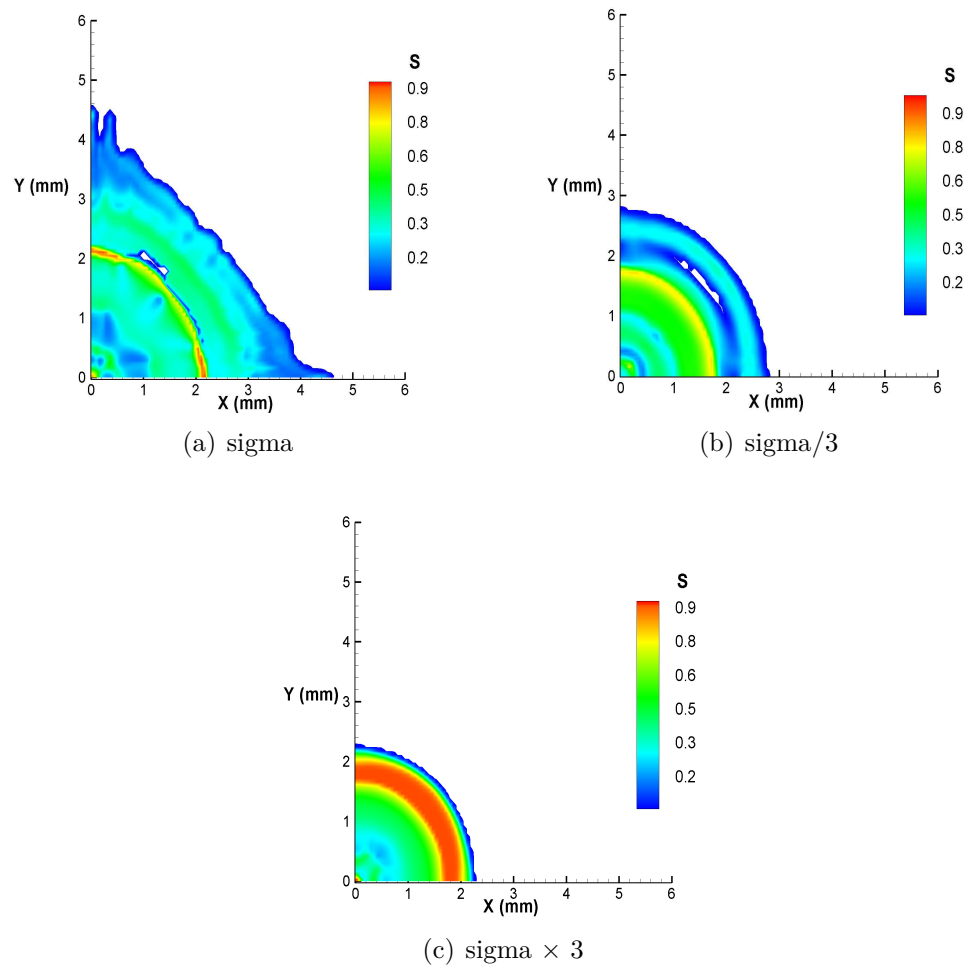


FIGURE 3.21 – Fractions solides dans la goutte durant son étalement à l'instant $t = 0,7$ ms, avec comme paramètre la valeur de la tension de surface. Fractions solides obtenues dans une épaisseur de la goutte à $z = 30 \mu\text{m}$ de l'interface. $T_{\text{sub}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.4 Effet de l'angle de contact

L'angle de contact d'une goutte liquide impactant sur une surface solide subit de forts changements au cours de l'étalement, ce qui affecte le processus d'étalement. L'angle de contact qui s'établit entre la goutte et la surface du substrat est supérieur à l'angle de contact à l'équilibre; il dépend de la nature de la surface d'impact, mais aussi de la température du substrat (voir la Fig. 3.4). L'étalement de la goutte est affecté par son angle de contact dynamique. Pour comprendre ce phénomène, nous nous proposons d'étudier son effet sur la dynamique et la solidification de la lamelle.

Fukai et al. [106] et Bussmann et al. [11] ont utilisé des données expérimentales d'angles de contact pour leurs modèles. Nous ne disposons pas de telles données pour nos simulations dans le cas de l'impact d'une goutte de cuivre. Cependant, nous avons fait varier l'angle de contact dynamique afin d'essayer de comprendre son effet sur chacune de ses composantes : l'angle de contact d'avancée (θ_a) et l'angle de contact de recul (θ_r).

Les Figs. 3.22 - 3.25 montrent la variation de la morphologie de la lamelle de cuivre durant les phases d'étalement et de solidification sur un substrat froid en acier, obtenues pour différentes valeurs de l'angle de contact dynamique. La Fig. 3.26 récapitule les différentes morphologies obtenues. Les paramètres d'impact sont réunis dans le Tableau 3.4. On remarque que l'angle de contact dynamique affecte considérablement la morphologie des lamelles, celle-ci pouvant avoir une forme circulaire ou encore subir le phénomène de splashing.

Au début de l'impact, la goutte s'étale et atteint son diamètre maximal après 1,5 ms quelque soit l'angle de contact. Ensuite, selon les valeurs des angles d'avancée (θ_a) et de recul (θ_r) différentes morphologies sont observées. En effet, pour un angle de recul θ_r constant de 20° , et en augmentant la valeur de θ_a la formation des doigts liquides qui émergent de la périphérie de la lamelle est inhibée, excepté pour le cas où $\theta_a = 120^\circ$. Enfin, la lamelle a tendance à avoir une forme plus cohérente lorsque $\theta_a = 160^\circ$, ceci s'explique par le fait qu'un angle d'avancée de 160° diminue l'étalement limitant ainsi la surface de contact de la lamelle avec le substrat. Cela peut être également constaté sur l'évolution du degré d'étalement donné par la Fig. 3.27, contrairement aux cas (où $\theta_a = 100^\circ$ ou 140°) pour lesquels la lamelle atteint son diamètre maximal au bout de 1 ms après l'impact, ensuite la goutte entre dans la phase de rétraction.

Lorsque l'on fait varier l'angle de contact de recul tout en maintenant constant l'angle de contact d'avancée, on remarque que la lamelle éclate et ceci est d'autant plus marqué que l'angle d'avancée est relativement faible ($\theta_a = 100^\circ$) pour des angles de reculs de $\theta_r = 40^\circ$ et 60° . Lorsque l'angle de recul est de 60° on observe sur la Fig. 3.25 que le liquide se rétracte d'une manière plus importante produisant le splashing de la lamelle jusqu'à sa désintégration à sa périphérie, réduisant ainsi son diamètre final, comme on peut l'observer sur l'évolution du degré d'étalement présenté sur la Fig. 3.28.

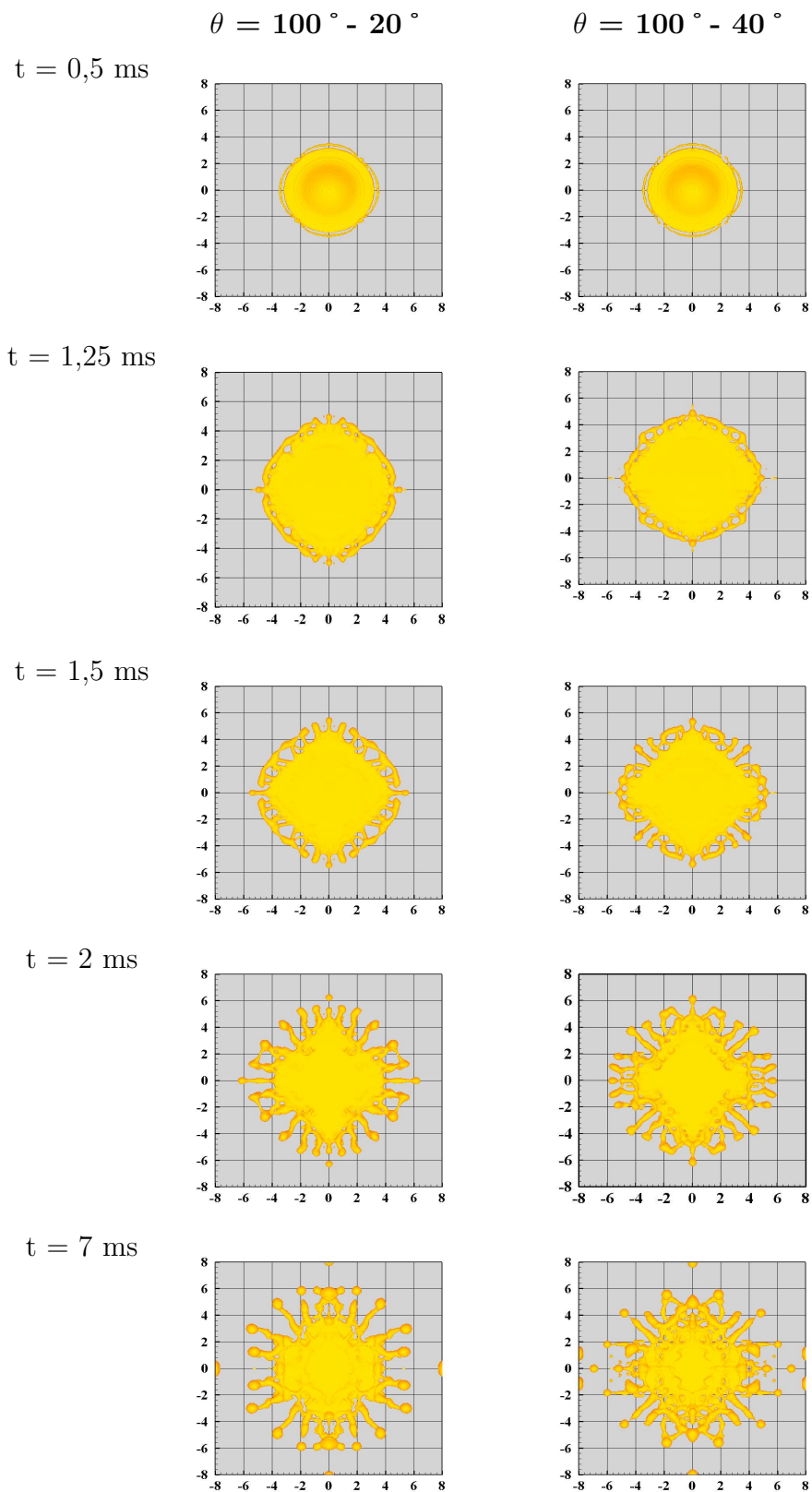


FIGURE 3.22 – Vues de dessus de la formation d'une lamelle de cuivre durant les phases d'étalement et de solidification, vues obtenues pour un angle d'avancée $\theta_a = 100^\circ$ et des angles de recul différents $\theta_r = 20^\circ$ et 40° . Paramètres d'impact : $d_0 = 3 \text{ mm}$ et $v_i = 4 \text{ m.s}^{-1}$, $T_{0,g} = 1215^\circ \text{ C}$ et $T_{\text{sub}} = 25^\circ \text{ C}$.

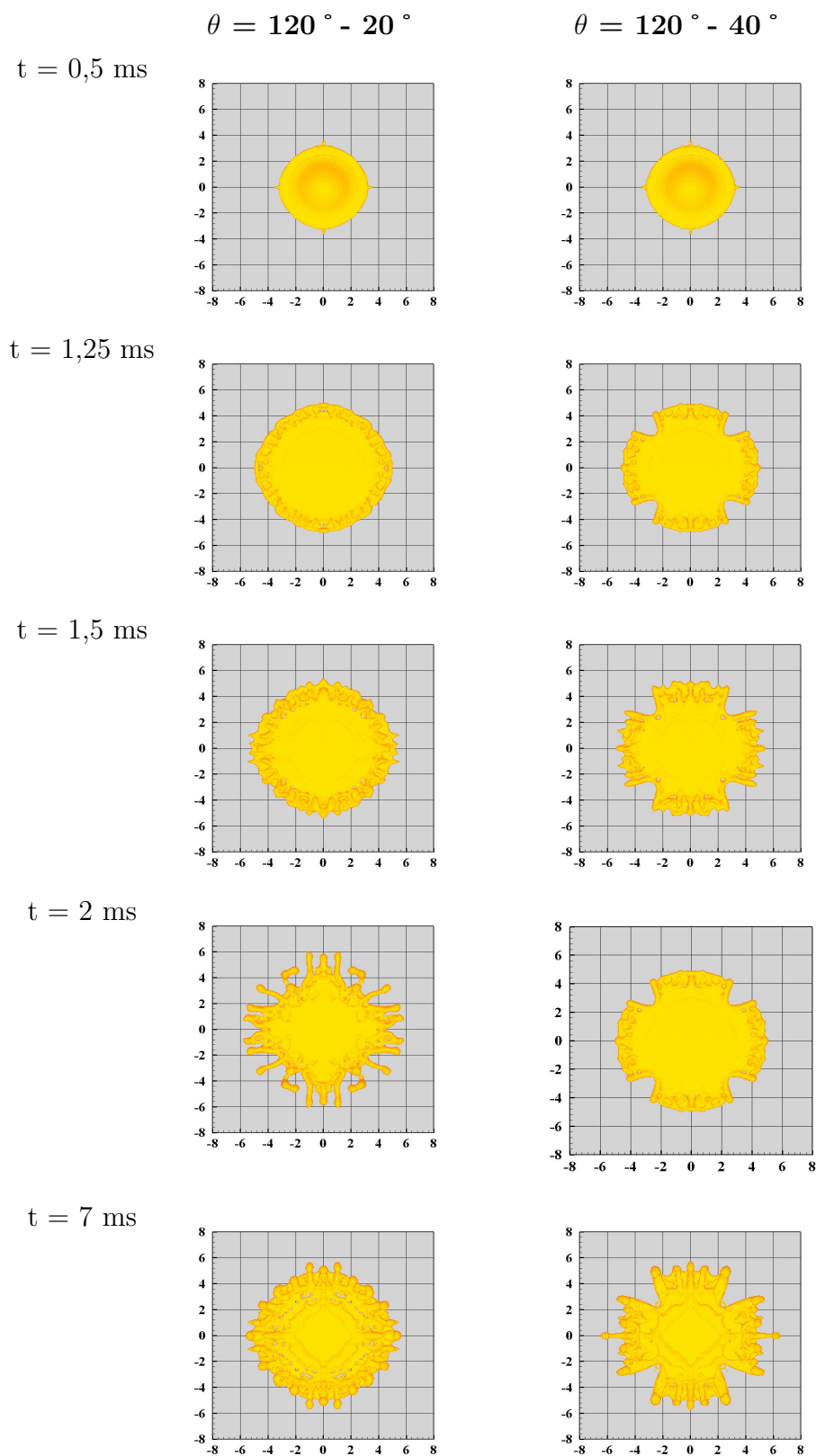


FIGURE 3.23 – Vues de dessus de la formation d'une lamelle de cuivre durant les phases d'étalement et de solidification, vues obtenues pour un angle d'avancée $\theta_a = 120^\circ$ et des angles de recul différents $\theta_r = 20^\circ$ et 40° . Paramètres d'impact : $d_0 = 3 \text{ mm}$ et $v_i = 4 \text{ m.s}^{-1}$, $T_{0,g} = 1215^\circ \text{ C}$ et $T_{sub} = 25^\circ \text{ C}$.

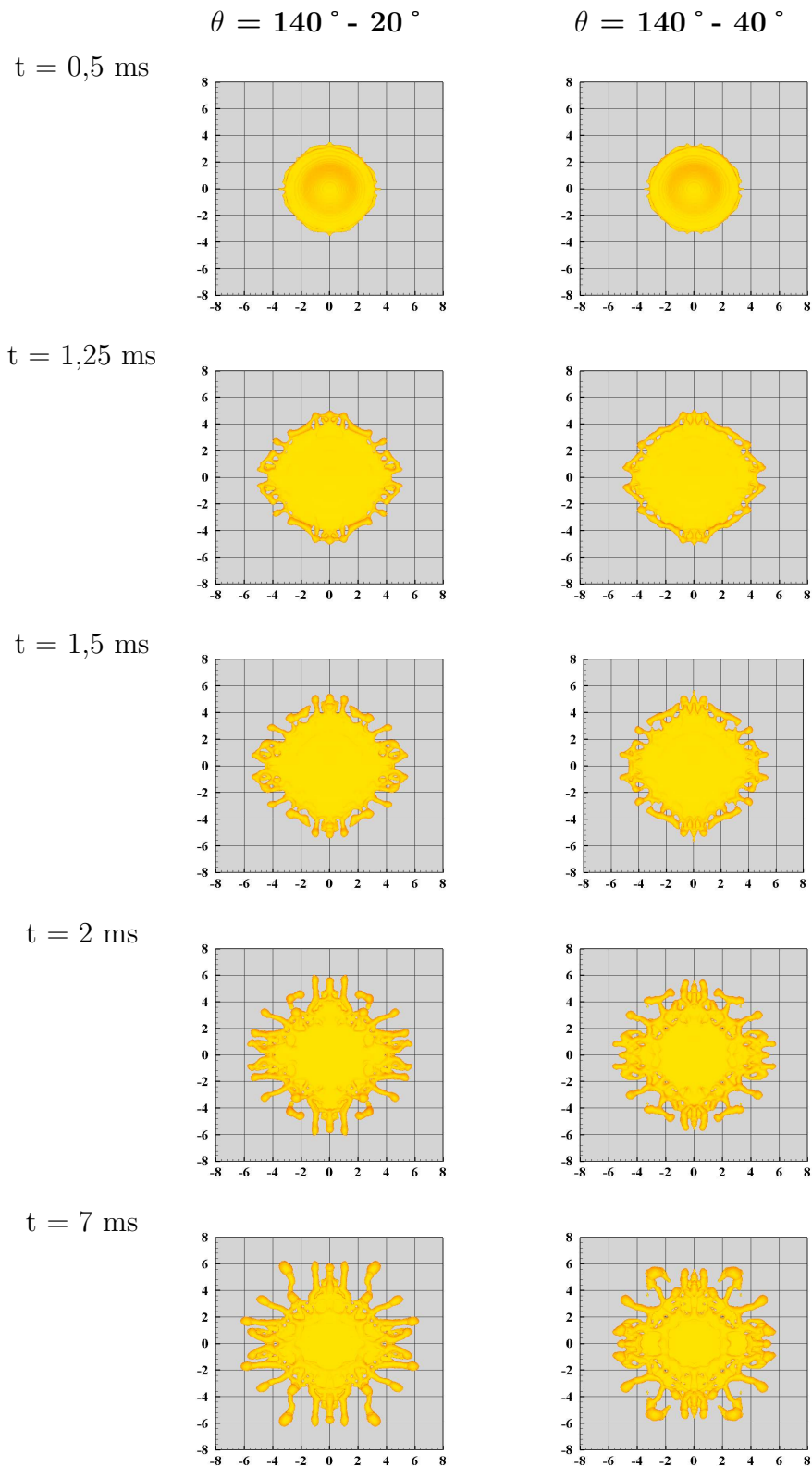


FIGURE 3.24 – Vues de dessus de la formation d'une lamelle de cuivre durant les phases d'étalement et de solidification, obtenues pour un angle d'avancée $\theta_a = 140^\circ$ et des angles de recul différents $\theta_r = 20^\circ$ et 40° . Paramètres d'impact : $d_0 = 3 \text{ mm}$ et $v_i = 4 \text{ m.s}^{-1}$, $T_{0,g} = 1215^\circ \text{ C}$ et $T_{sub} = 25^\circ \text{ C}$.

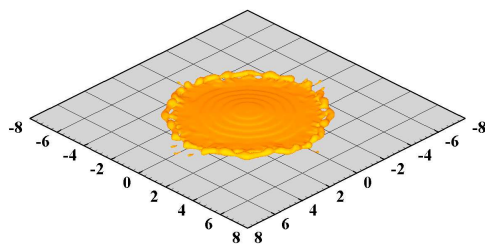
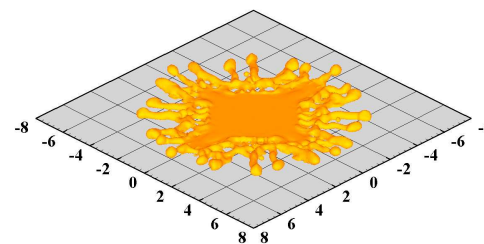
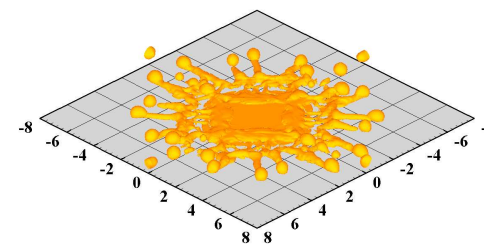
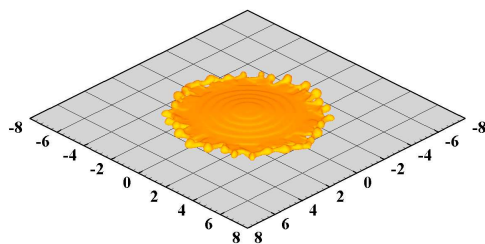
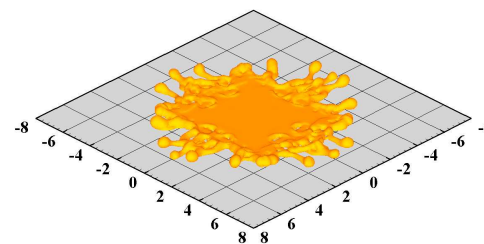
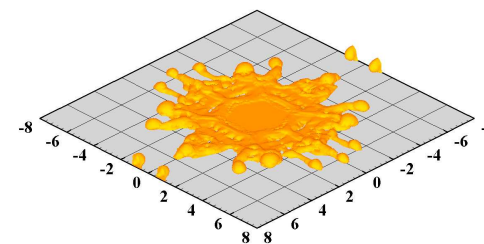
$\theta = 100^\circ - 60^\circ$

 $t = 1 \text{ ms}$

 $t = 2 \text{ ms}$

 $t = 5 \text{ ms}$
 $\theta = 160^\circ - 20^\circ$

 $t = 1 \text{ ms}$

 $t = 2 \text{ ms}$

 $t = 5 \text{ ms}$

FIGURE 3.25 – Vue en perspective de la formation d'une lamelle de cuivre, obtenue avec des angles dynamiques de $100^\circ - 60^\circ$ (θ_r relativement important) et $160^\circ - 20^\circ$ (θ_a relativement important). Paramètres d'impact : $d_0 = 3 \text{ mm}$ et $v_i = 4 \text{ m.s}^{-1}$, $T_{0,g} = 1215^\circ \text{ C}$ et $T_{\text{sub}} = 25^\circ \text{ C}$.

Le Tableau 3.26 montre les morphologies des lamelles de cuivre pour différentes valeurs de l'angle de contact dynamique.

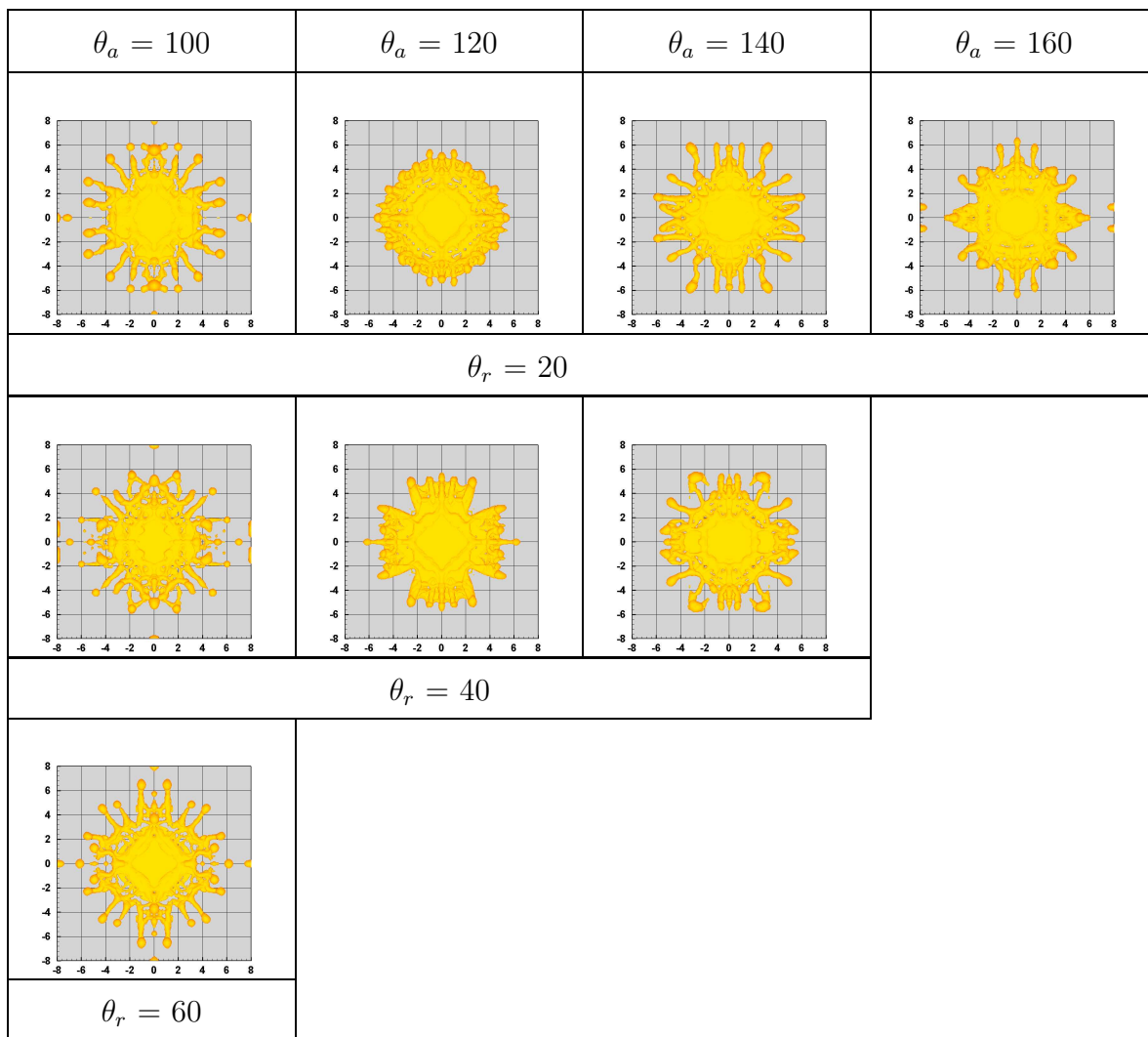


FIGURE 3.26 – Récapitulatif des morphologies des lamelles de cuivre obtenues pour différentes valeurs de l'angle de contact dynamique. Conditions d'impact : $d_0 = 3 \text{ mm}$ et $v_i = 4 \text{ m.s}^{-1}$, $T_{0,g} = 1215 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{sub} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ et $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$.

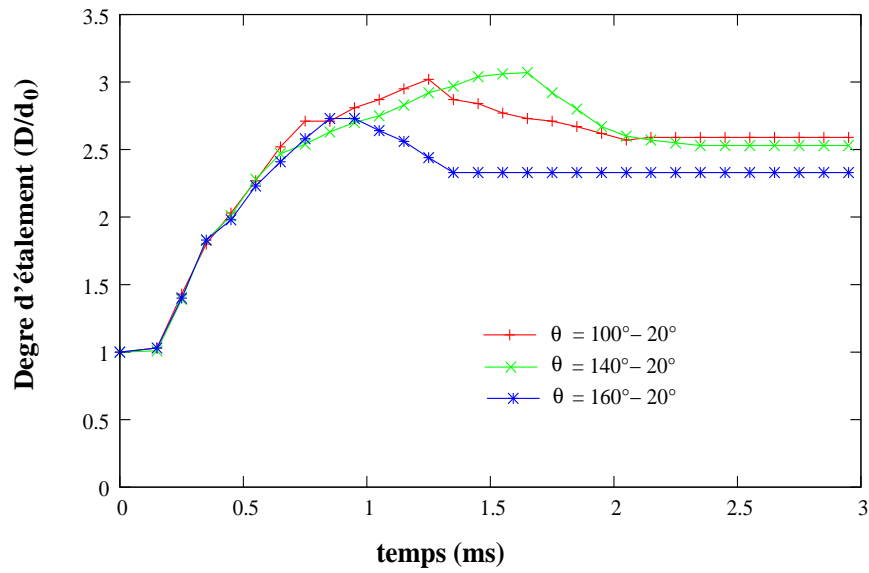


FIGURE 3.27 – Évolution du degré d'étalement de la goutte du cuivre à l'impact et durant son étalement sur un substrat froid, pour différentes valeurs de l'angle de contact d'avancée.

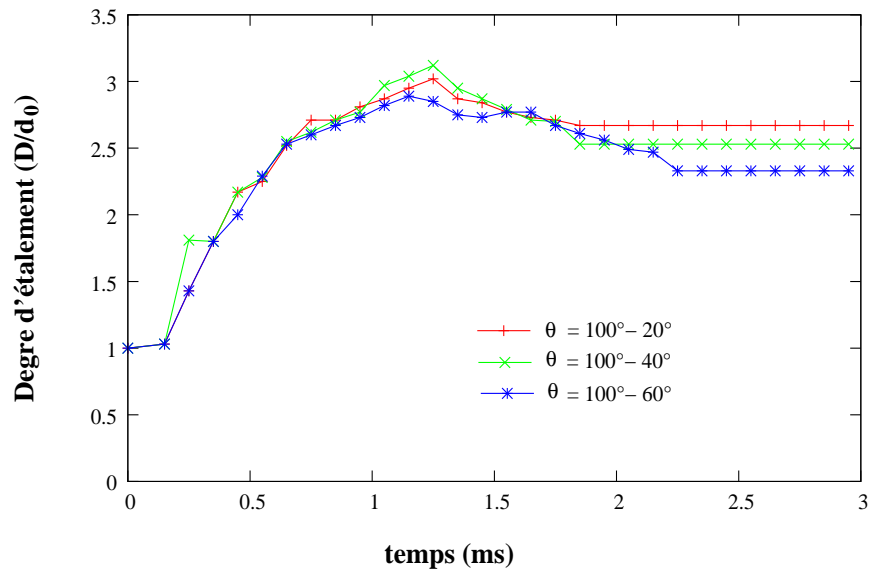


FIGURE 3.28 – Évolution du degré d'étalement de la goutte du cuivre à l'impact et durant son étalement sur un substrat froid, pour différents valeurs de l'angle de contact de recul.

L'étalement de la goutte liquide sur le substrat est contraint par le développement de la solidification qui diminue l'écoulement (dissipation de l'énergie cinétique). La Fig. 3.29 montre le début de solidification dans la goutte de cuivre durant son étalement près de l'interface, à l'instant $t = 1.5 \text{ ms}$, lorsque $\theta_d = 100^\circ - 20^\circ$. On remarque que le début de la solidification commence à la partie périphérique la plus mince et se développe vers le centre de la lamelle. La partie solidifiée contraint l'écoulement de la goutte; et entraîne la création de doigts liquides, émergeant de la périphérie.

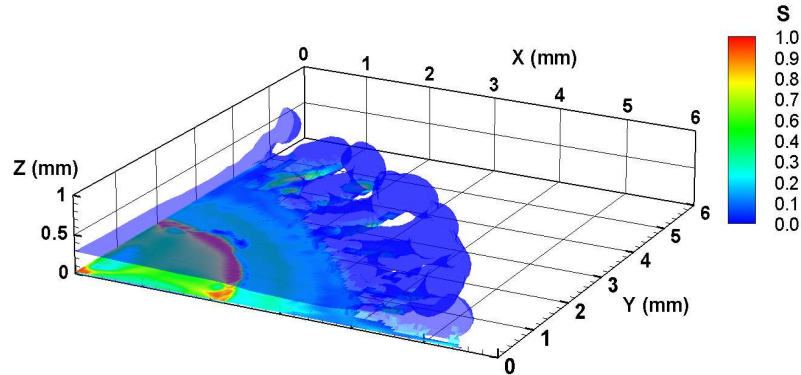
(a) $\theta = 100^\circ - 20^\circ$

FIGURE 3.29 – Évolution des fractions solides (S) dans une couche de la goutte distante de $z = 30 \mu\text{m}$ de l'interface lamelle-substrat, obtenue pour $\theta_d = 100^\circ - 20^\circ$. $t = 1,5 \text{ ms}$ après l'impact et $T_{sub} = 25^\circ\text{C}$.

Les Figs. 3.30 et 3.31 montrent l'évolution du processus de solidification (matière solide = 100 % dans chaque maille), et en particulier les fractions solides obtenues pour différents angles de contact dynamique. L'apparition de la phase solide dans la goutte (c'est à dire l'apparition de mailles complètement solidifiées) commence à partir d'un rayon de la lamelle égale à 2 mm , et croit vers le centre. Ce processus de solidification est assez comparable quelque soit l'angle de contact dynamique, mis à part le cas des angles $100^\circ - 60^\circ$. En effet, ce dernier cas présente un angle de recul relativement important, $\theta_r = 60^\circ$, qui va forcer la rétraction de la partie non solidifiée de la goutte, et provoquer un début de splashing à l'instant $t = 2,25 \text{ ms}$, voir la Fig. 3.31.

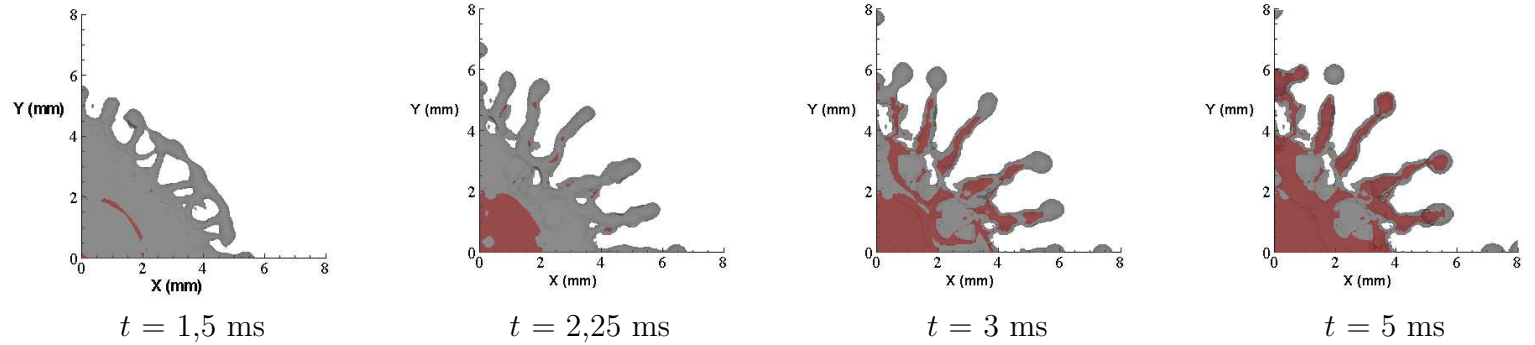
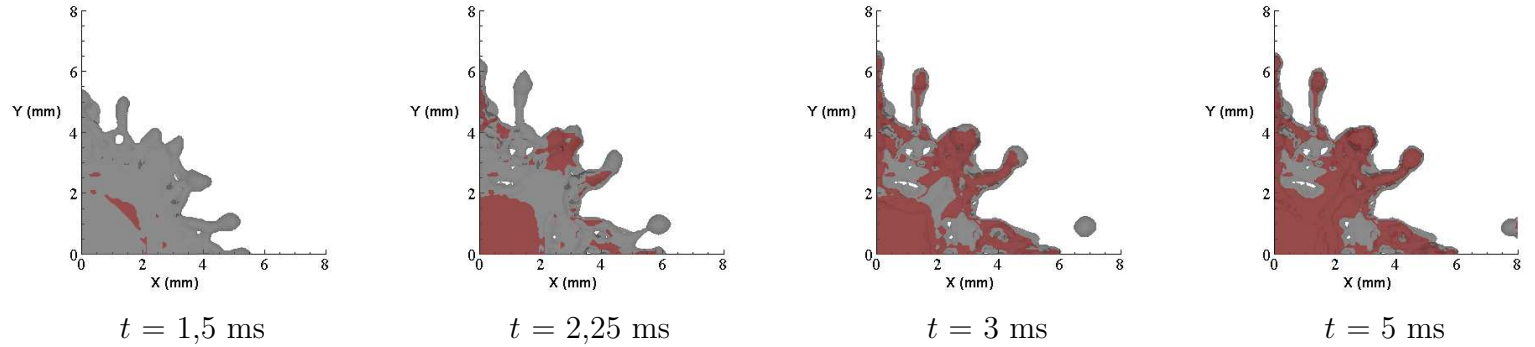
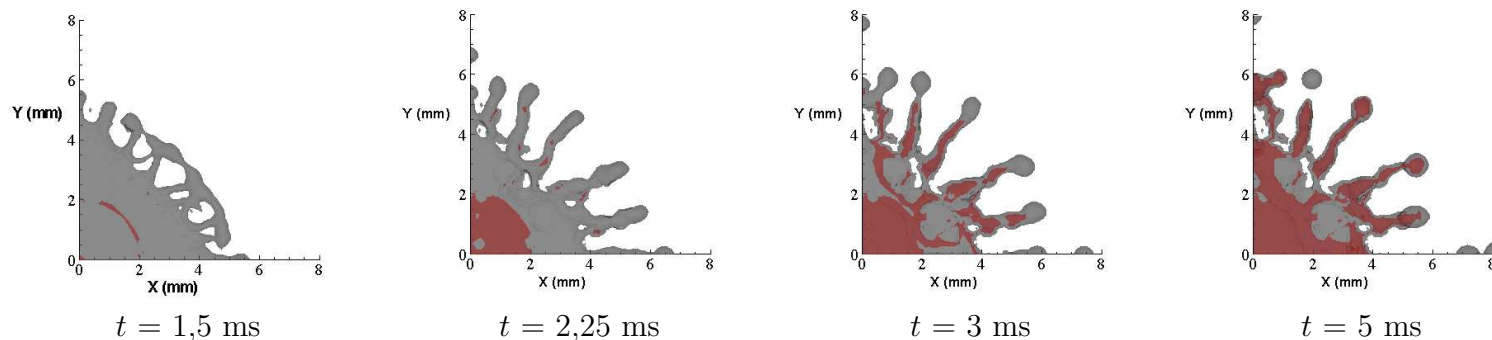
$\theta = 100^\circ - 20^\circ$

 $\theta = 160^\circ - 20^\circ$


FIGURE 3.30 – Vues de dessus du développement de la solidification (en couleur rouge) durant l'étalement de la goutte liquide (en couleur grise), étalement obtenu pour un angle de recul constant $\theta_r = 20^\circ$ et pour des angles d'avancée différents $\theta_a = 100^\circ$ et 160° . Paramètres d'impact : $d_0 = 3 \text{ mm}$ et $v_i = 4 \text{ m.s}^{-1}$, $T_{0,g} = 1215^\circ \text{C}$, $T_{sub} = 25^\circ \text{C}$ et $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2.K/W$.

$$\theta_d = 100^\circ - 20^\circ$$



$$\theta_d = 100^\circ - 60^\circ$$

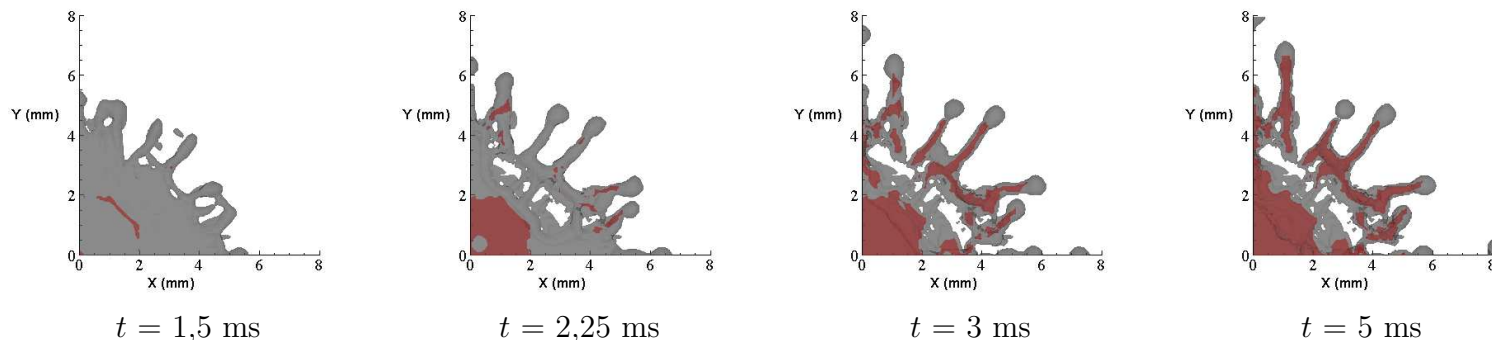


FIGURE 3.31 – Vues de dessus du développement de la solidification (en couleur rouge) durant l'étalement de la goutte liquide (en couleur grise), étalement obtenu pour un angle d'avancée constant $\theta_a = 100^\circ$ et pour des angle de recul différents $\theta_r = 20^\circ$ et 60° . Paramètres d'impact : $d_0 = 3 \text{ mm}$ et $v_i = 4 \text{ m.s}^{-1}$, $T_{0,g} = 1215^\circ \text{C}$, $T_{sub} = 25^\circ \text{C}$ et $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2.\text{K/W}$.

Afin expliquer l'influence drastique que peut avoir l'angle dynamique sur les formes des lamelles, et en particulier conduire au phénomène du splashing, il est intéressant d'analyser le comportement dynamique associé. La Fig. 3.32 montre l'évolution de la composante u ($m.s^{-1}$) de la vitesse radiale dans la goutte, près de l'interface ($z = 30 \mu m$), pour un angle de contact $\theta_r = 20^\circ$ et des valeurs de l'angle d'avancée θ_a de 100° et 140° . On observe, que l'étalement de la lamelle est plus important pour un angle $\theta_a = 100^\circ$, pour lequel son rayon atteint presque $5 mm$, $1 ms$ après l'impact, alors que pour un angle $\theta_a = 140^\circ$, son rayon n'est que de $4 mm$ pour les mêmes conditions. Au delà de $1 ms$, bien que l'étalement soit limité par l'apparition de la phase solide en périphérie (voir la Fig. 3.31), l'angle $\theta_a = 100^\circ$, force la partie non solidifiée de la goutte à s'écouler au-dessus de la partie solide interfaciale. Le liquide se projette alors sous forme de doigts liquides (digitations), dont l'apparition est favorisée par une vitesse d'écoulement plus importante que pour un angle de contact d'avancée $\theta_a = 140^\circ$.

Par contre, si on fait varier l'angle de contact de recul θ_r de 20° à 60° , l'étalement de la lamelle est tout à fait différent (voir Fig. 3.33). Le champ de vitesse radiale u ($m.s^{-1}$) dans une couche liquide, près de l'interface, est quasiment identique, durant les premiers instant d'étalement, $t = 0,8 ms$. Après, avec un angle $\theta_r = 60^\circ$, la goutte se rétracte et éclate, voir la Fig. 3.25.

La Fig. 3.35 montre l'épaisseur de la lamelle en fonction de l'angle de contact dynamique. On remarque, que la lamelle est moins épaisse lorsque θ_a est relativement faible (de l'ordre de 100°).

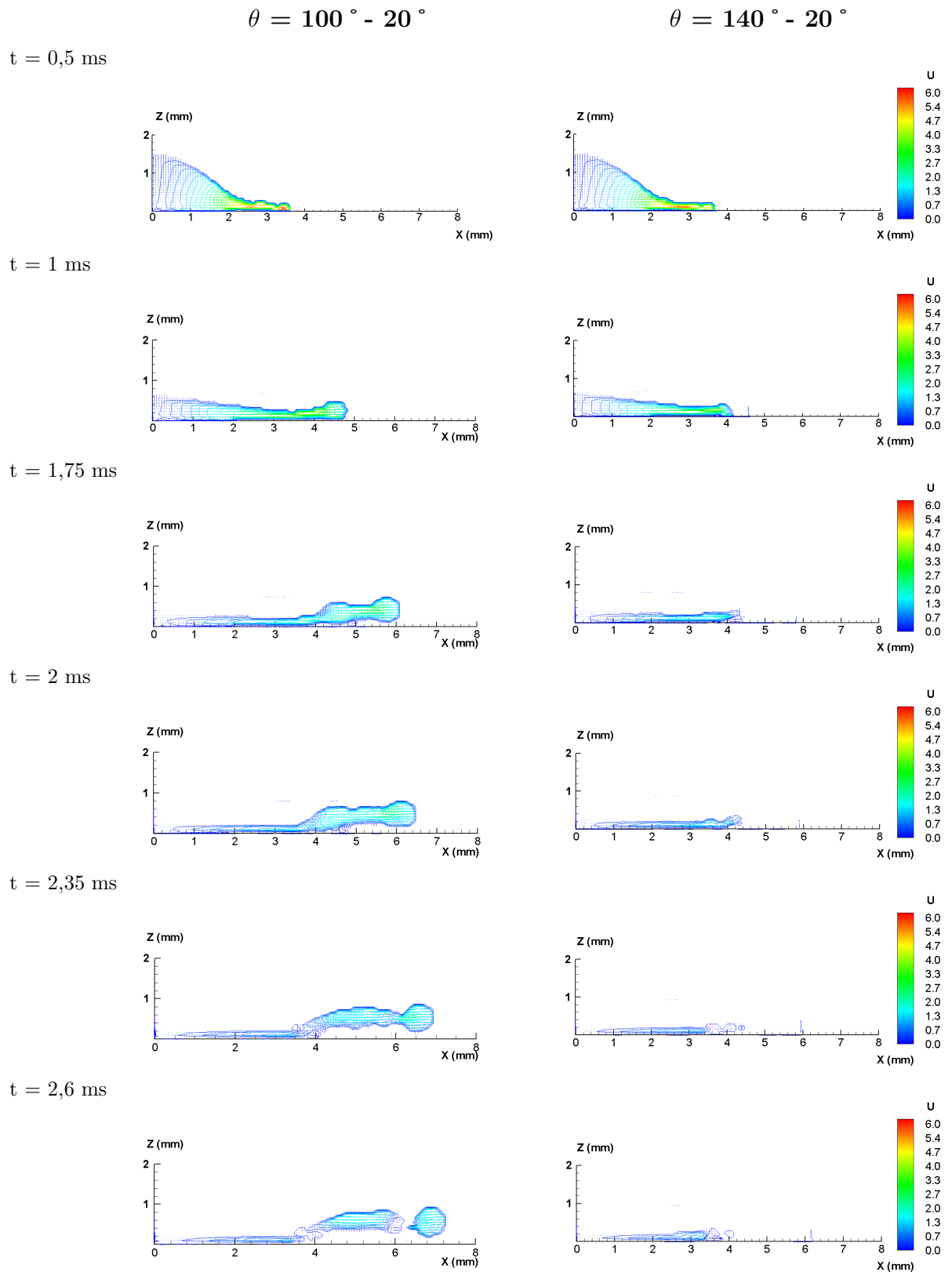


FIGURE 3.32 – Vues de profil du champ de vitesse, composante u ($m.s^{-1}$), dans la goutte durant le début d'étalement sur le substrat, vues obtenues pour un angle de recul constant $\theta_r = 20^\circ$ et pour des angles d'avancée différents $\theta_a = 100^\circ$ et 140° . Paramètres d'impact : $d_0 = 3 \text{ mm}$, $v_i = 4 \text{ m.s}^{-1}$ et $T_{sub} = 25^\circ \text{C}$.

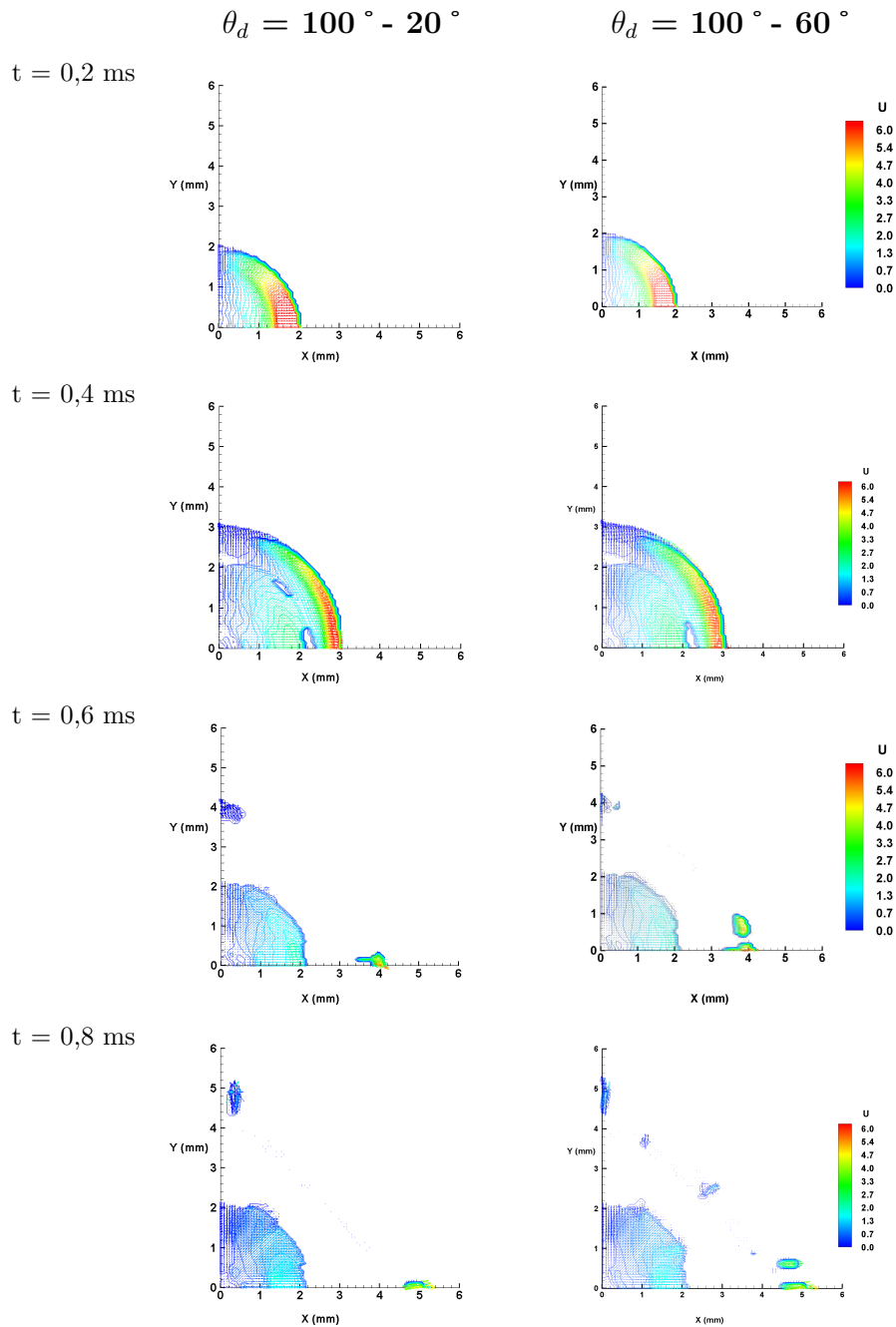


FIGURE 3.33 – Vues de dessus du champ de vitesse, composante u ($m.s^{-1}$), dans la goutte à une distance $z = 200 \mu m$ de l'interface, durant le début d'étalement sur le substrat, vues obtenues pour un angle d'avancée constant $\theta_a = 100^\circ$ et pour des angles de recul différents $\theta_r = 20^\circ$ et 60° . Paramètres d'impact : $d_0 = 3 \text{ mm}$, $v_i = 4 \text{ m.s}^{-1}$ et $T_{sub} = 25^\circ C$.

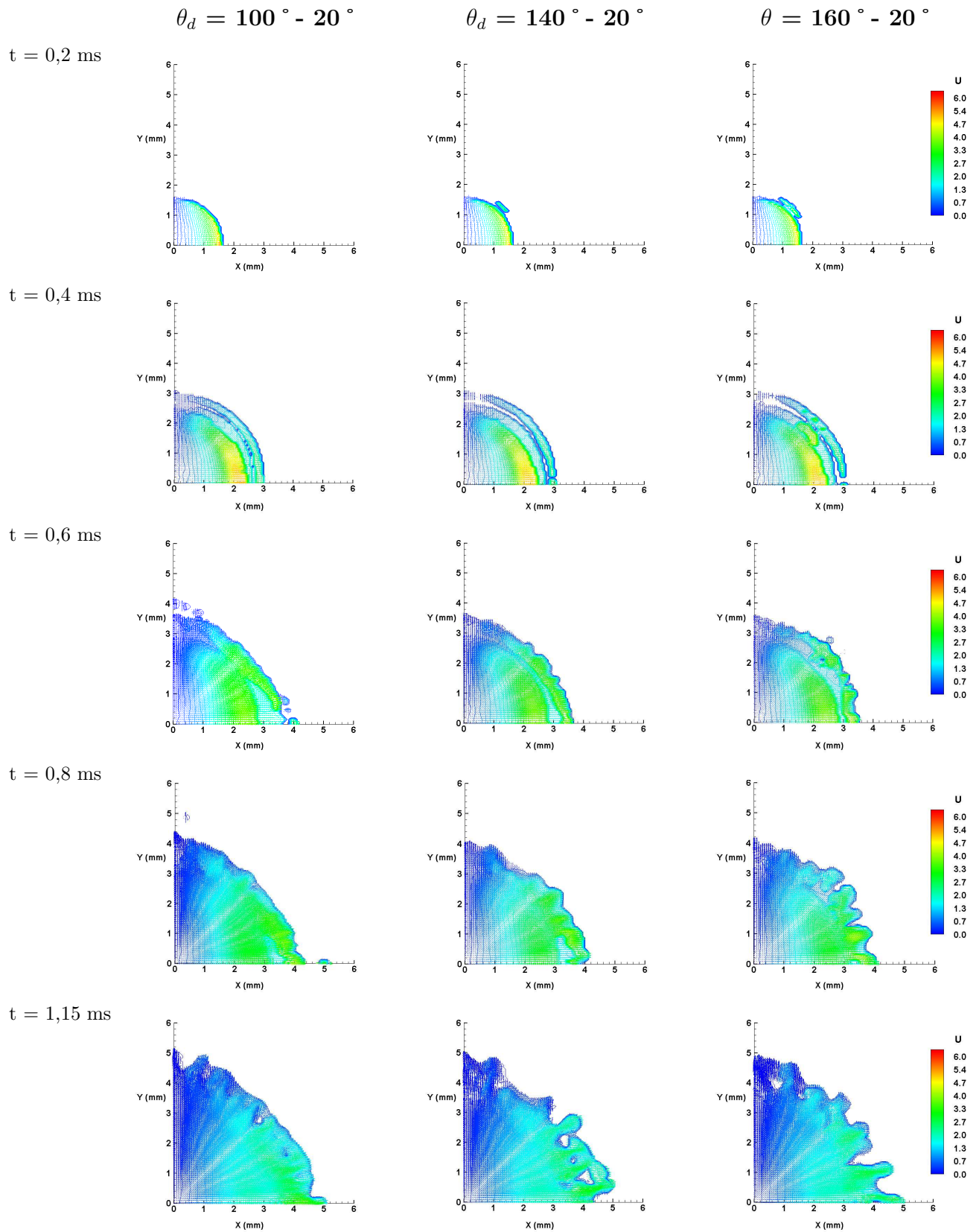


FIGURE 3.34 – Vues de dessus du champ de vitesse, composante u ($m \cdot s^{-1}$), dans la goutte à une distance $z = 200 \mu m$ de l'interface, durant le début d'étalement sur le substrat, vues obtenues pour un angle de recul constant $\theta_r = 20^\circ$ et pour des angles d'avancés différents $\theta_a = 100^\circ$, 140° et 160° . $d_0 = 3 \text{ mm}$ et $v_i = 4 \text{ m} \cdot s^{-1}$ et $T_{sub} = 25^\circ C$.

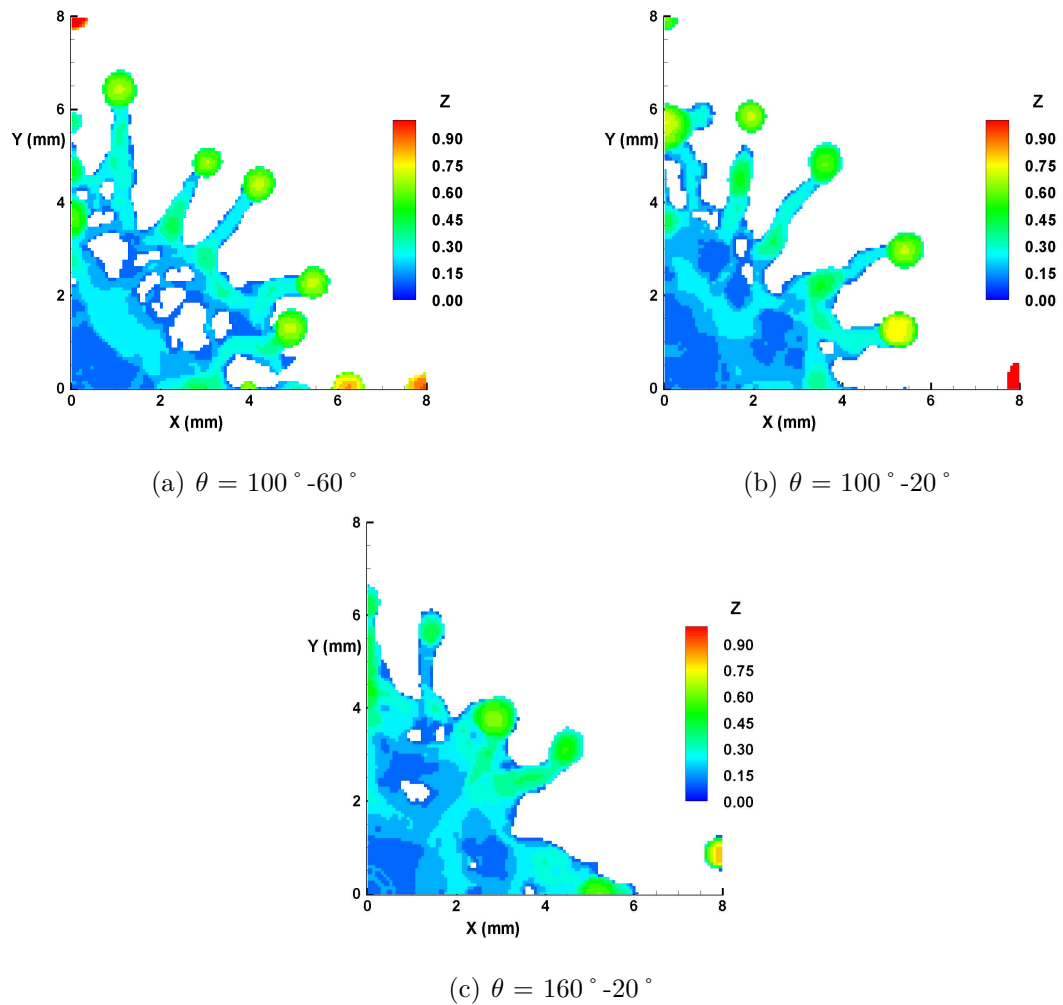


FIGURE 3.35 – Profils d'épaisseur des lamelles de cuivre obtenus à l'instant $t = 6.5$ ms après impact, pour différentes valeurs de l'angle de contact dynamique. $T_{sub} = 25$ °C

Afin de comparer les degrés d'étalement obtenus par simulation numérique avec les corrélations analytiques prenant en compte l'effet de la solidification dans la goutte durant son étalement, Pasandideh-Fard et al. [86] ont proposé une expression analytique reliant le degré d'étalement maximal que peut atteindre une lamelle aux nombres adimensionnels (Re , We , Pe , etc.). Cette expression est donnée par l'éq. 3.3.

$$\xi_{max} = \sqrt{\frac{We + 12}{\underbrace{3(1 - \cos\theta)}_A + \underbrace{4(We/\sqrt{Re})}_B + \underbrace{We\sqrt{(3Ste)/(4Pe)}}_C}} \quad (3.3)$$

La quantité du terme du dénominateur C de l'éq. 3.3 va déterminer si la solidification va affecter ou non l'étalement de la goutte. Selon le critère de Pasandideh-Fard et al. l'énergie cinétique peut être complètement dissipée durant l'étalement de la goutte via la solidification si le rapport $\sqrt{Ste/Pr} \ll 1$ (où $Pr = Pe/Re = \nu_l/\alpha_l$).

La Fig. 3.36 donne une comparaison du degré d'étalement maximal de la lamelle de cuivre calculé par l'éq. 3.3 (voir les Tableaux 3.8 et 3.9) et par simulation. On remarque, qu'il y a une légère divergence entre les valeurs, plus marquée pour $\theta_a = 160^\circ$. Ceci, peut être expliqué d'une part, parce que l'éq. 3.3 ne prend pas en compte l'effet de l'existence d'une résistance thermique de contact à l'interface lamelle/substrat (dans notre cas $R_{th} = 10^{-6} m^2.K/W$) et d'autre part, parce que l'écoulement radial de la lamelle peut être limité par un angle de contact d'avancée relativement important, voir la Fig. 3.32. Il faut noter également, que d'après la Fig. 3.26, un angle de contact de recul relativement important (cas d'un angle dynamique de $100^\circ - 60^\circ$) induit le "splashing" de la lamelle et modifie ainsi considérablement sa morphologie, en la comparant par exemple à celle obtenue avec un angle dynamique de $100^\circ - 20^\circ$.

TABLE 3.8 – Calcul des nombres adimensionnels

Re	We	Ste	Pe	Pr
35294	294	2,53	275,75	$7,81 \times 10^{-6}$

TABLE 3.9 – Calcul du degré d'étalement par l'éq. 3.3 et par simulation en fonction de l'angle de contact d'avancée

θ_a ($^\circ$)	A	B	C	ξ_{max}^a	ξ_{max}^b
100	3,51	6,27	24,49	2,99	2,6
140	5,29	6,27	24,49	2,91	2,53
160	5,81	6,27	24,49	2,89	2,33

- a. Corrélation
b. Simulation

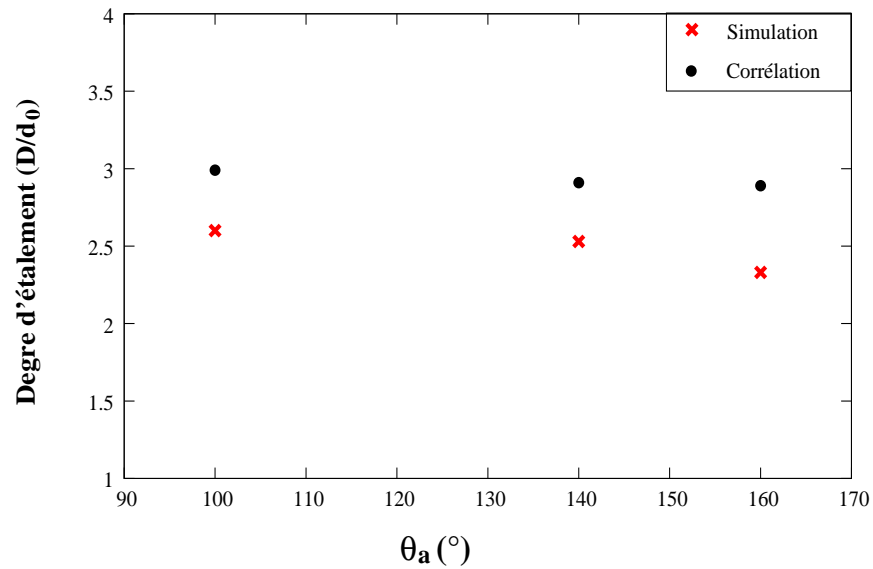


FIGURE 3.36 – Comparaison du degré maximal d'étalement de la lamelle de cuivre obtenu à partir de l'éq. 3.3 et par simulation en fonction de l'angle de contact d'avancée (θ_r). L'angle de contact de recul est maintenu constant ($\theta_r = 20^\circ$). $T_{sub} = 25^\circ\text{C}$

3.5 Variation de la résistance thermique de contact

Le phénomène de transfert de chaleur à travers l'interface lamelle-substrat est l'un des aspects les plus importants dans le processus de solidification de la lamelle. Ce transfert thermique est caractérisé par une résistance thermique de contact qui est, en général considérée comme constante dans les calculs, hypothèse qui n'est pas toujours valide lors de l'écrasement de la particule. Si on considère que le refroidissement de la lamelle est régi essentiellement par la qualité du contact interfacial, et comme ce contact n'est pas idéalement parfait (pression, mouillabilité, angle de contact avec la surface, rugosité, etc.), alors la résistance thermique de contact varie dans le temps et aussi le long de l'interface. Il faut également considérer qu'au sein de la lamelle des vitesses de refroidissement différentes conduisent à des modes de cristallisation différents [146]³ comme le schématise la Fig. 3.37.

Dans cette partie de l'étude, nous utilisons une résistance thermique de contact variable au cours des phases d'étalement en se basant sur la courbe d'évolution de R_{th} d'une goutte de cuivre obtenue à partir des mesures expérimentales de Cedelle, J. [13], voir Fig. 3.38.

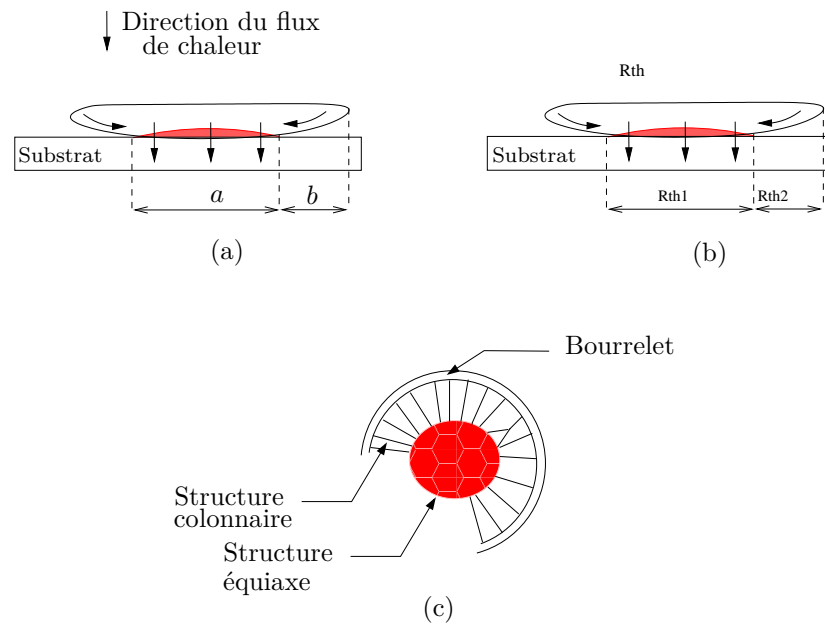


FIGURE 3.37 – *Modèle de refroidissement et croissance cristalline dans une lamelle. (a) et (b) direction du flux de chaleur et début de solidification au centre de la lamelle avec $R_{th1} < R_{th2}$ et (c) différents types de cristallisation (d'après [146]).*

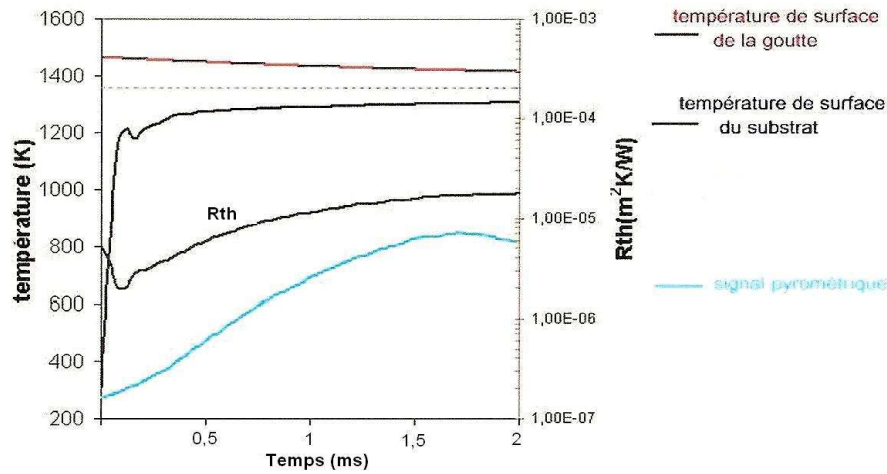


FIGURE 3.38 – Évolution de la résistance thermique de contact après l’impact d’une goutte de cuivre millimétrique sur un substrat froid en acier inoxydable [13].

Les valeurs de R_{th} utilisées pour la simulation de l’étalement et de la solidification d’une goutte de cuivre impactant sur un substrat froid en acier inoxydable (304L) sont données dans le Tableau. 3.10, les valeurs étant extraites de la Fig. 3.38. Sur cette figure, on remarque que la valeur de R_{th} décroît légèrement à l’impact puis augmente jusqu’à l’instant $t = 2 \text{ ms}$. Aussi, avons nous considéré deux valeurs limites de R_{th} : 2×10^{-6} et $6 \times 10^{-6} \text{ m}^2.K/W$ qui correspondent respectivement aux gammes de temps : $0 - 0,5 \text{ ms}$ et de $0,5 - 1 \text{ ms}$. Après, la valeur de R_{th} varie légèrement à la fin de la phase d’étalement, et nous avons pris alors des valeurs limites de R_{th} : 1×10^{-5} et $1,7 \times 10^{-5} \text{ m}^2.K/W$ qui correspondent respectivement aux gammes de temps : $1 - 2 \text{ ms}$ et $2 - 9 \text{ ms}$.

TABLE 3.10 – Variation de la résistance thermique de contact en fonction du temps. D’après Cedelle, J. [13]

temps (ms)	R_{th} ($\text{m}^2.K/W$)
0 - 0,5	2×10^{-6}
0,5 - 1	6×10^{-6}
1 - 2	1×10^{-5}
2 - 9	$1,7 \times 10^{-5}$

La Fig. 3.39 montre des vues de dessus d’une lamelle de cuivre pendant les phases d’étalement et la solidification sur un substrat en acier froid. Ces vues sont obtenues avec une résistance thermique de contact variable dans le temps et pour deux cas d’angles d’avancée $\theta_d = 100^\circ$ et 140° .

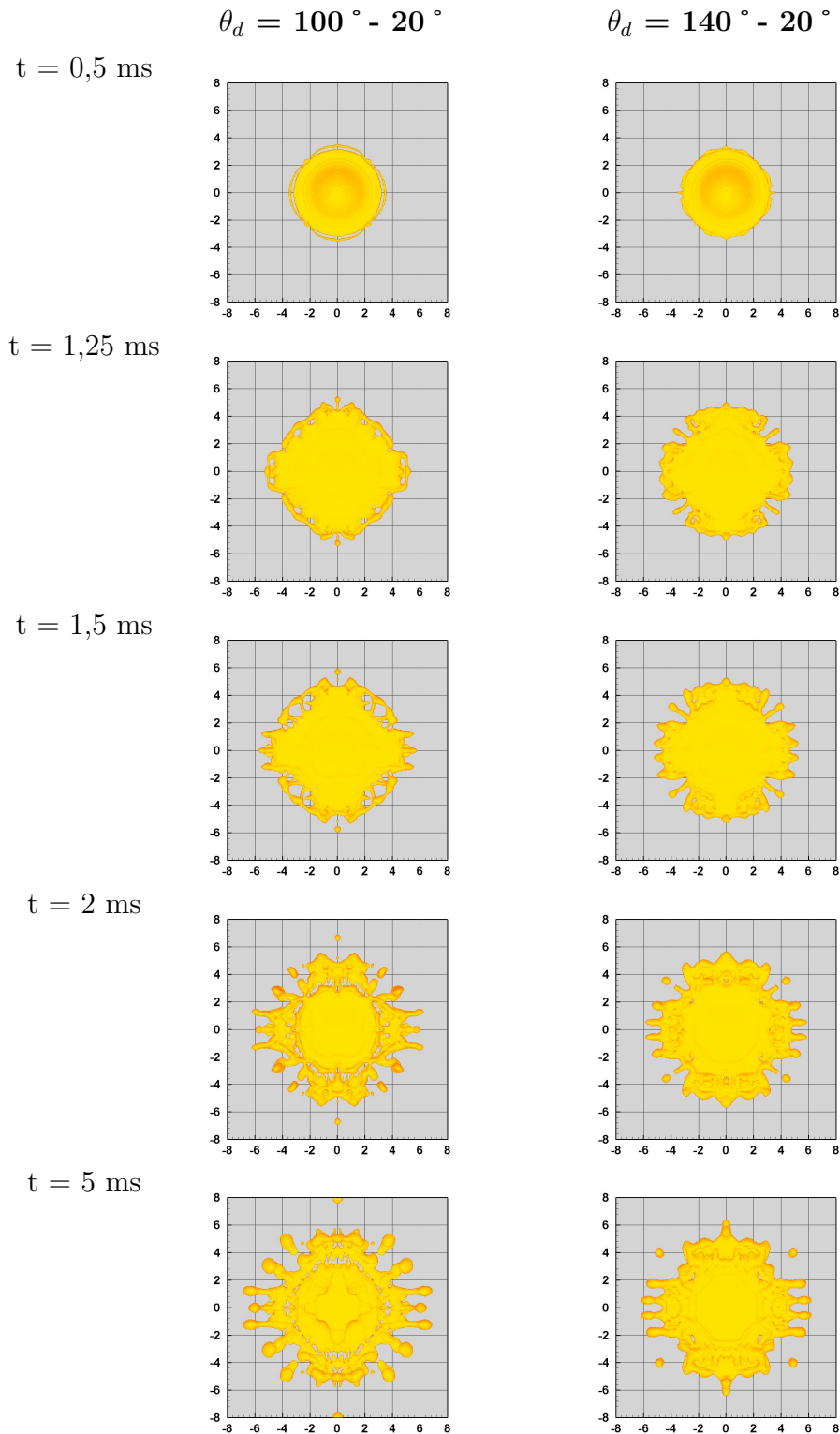


FIGURE 3.39 – Vues de dessus de la formation d'une lamelle de cuivre obtenue sur un acier inox. (304L) froid avec une R_{th} variable (voir Tab. 3.10), vues obtenues pour deux cas de l'angle de contact dynamique. $T_g = 1215 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{sub} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Échelle de graduation en mm.

On remarque que les morphologies obtenues sont différentes, pour un angle d'avancée plus faible on observe que 2 ms après l'impact une couronne périphérique se détache et que des doigts liquides apparaissent à l'instant $t = 1,5$ ms. Par contre, avec un angle d'avancée de 140° la morphologie de la lamelle est assez cohérente et relativement uniforme bien qu'à l'interface R_{th} soit plus élevée ($1,7 \times 10^{-5} m^2.K/W$).

La Fig. 3.40 montre l'évolution de la température du substrat, au centre d'impact, pour différents angles de contacts dynamiques, avec une résistance thermique de contact soit constante $10^{-6} m^2.K/W$, soit variable. On remarque que l'histoire de la température au centre d'impact est la même, quel que soit l'angle de contact, en dépit de la variation de R_{th} . Ceci s'explique par le fait que l'angle de contact agit au niveau de la ligne triple (en amont de la goutte)⁴.

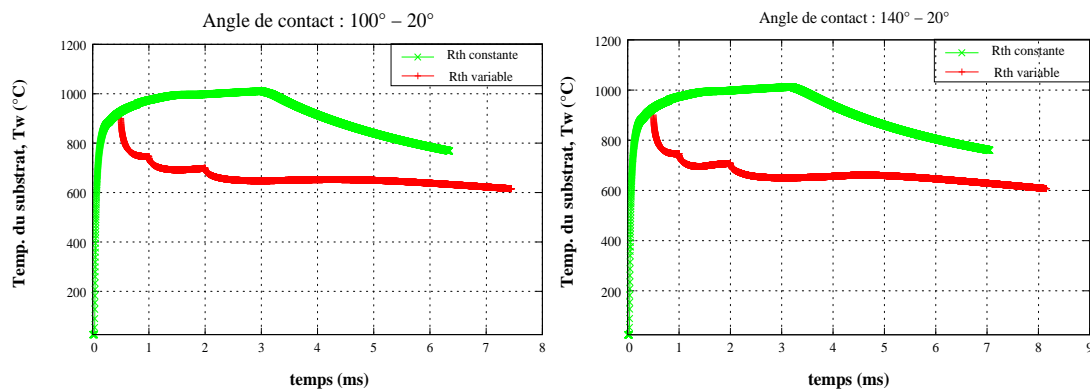


FIGURE 3.40 – Évolution de la température du substrat, au centre d'impact, durant l'étalement et la solidification de la lamelle pour deux cas d'angle d'avancée, courbes de température comparées pour des R_{th} : constante ($10^{-6} m^2.K/W$) et variable (voir Tab. 3.10). $T_g = 1215$ °C et $T_{sub} = 25$ °C.

Avec une R_{th} constante dans le temps ($10^{-6} m^2.K/W$), la température du substrat (à l'interface) croît pour atteindre près de 1000 °C à $t = 1$ ms après l'impact. Cette température se maintient jusqu'à l'instant $t = 3$ ms. Ensuite, la température diminue subitement pour atteindre 800 °C à $t = 6$ ms, du fait du refroidissement de la lamelle solide moins épaisse et de la dissipation de la chaleur dans le substrat.

Par contre, lors de l'application d'une R_{th} variable dans le temps, le long de l'interface lamelle-substrat, la température du substrat est beaucoup plus sensible, elle décroît au fur et à mesure que la résistance thermique de contact augmente et elle atteint, au bout de $0,5$ ms après l'impact, une température de 800 °, puis elle se refroidit progressivement par dissipation de la chaleur pour atteindre 600 °C à l'instant $t = 8$ ms.

4. La phase gazeuse n'est pas pris en compte dans les simulations

L'évolution de la température de surface du substrat pour une R_{th} constante est montrée sur la Fig. 3.41 (a) et est comparée avec le cas d'une R_{th} variable représenté sur les Figs. 3.41 (b) et (c). Avec une R_{th} constante, la température à l'interface augmente continûment jusqu'à 2,5 ms pour atteindre 1000 °C. Ensuite, le substrat se refroidit pour atteindre après 5 ms une température de 830 °C. Les températures observées pour des distances du centre de la lamelle de plus de 3 mm correspondent à la partie périphérique de la lamelle. Ces températures sont proches de celles au centre de la lamelle, qui sont assez élevées. Les minima de températures observés correspondent à l'apparition de zones solides en périphérie.

En revanche, quand la R_{th} varie dans le temps, la température varie également fortement. En effet, la température à l'interface qui était de 1000 °C jusqu'à 0,5 ms pour une R_{th} constante, décroît jusqu'à atteindre 750 °C à $t = 5$ ms, et les températures sur la partie périphérique, à une distance radiale de 2,75 mm, restent relativement faibles comparées à celles obtenues au centre de la goutte.

La conséquence de cette variation de température à l'interface est observée sur le développement de la phase solide au sein de la lamelle, voir la Fig. 3.42. Quand on applique une R_{th} variable dans le temps, le développement de la phase solide dans la lamelle, qui débute à l'instant $t = 1.5$ ms après l'impact, commence à sa périphérie puis se développe vers le centre. Ceci n'est pas le cas avec une R_{th} constante pour laquelle la phase solide est localisée dans la lamelle au voisinage de la région centrale, voir Fig. 3.42 (a) contre Fig. 3.42 (b). En effet, à partir de l'instant $t = 2$ ms, la R_{th} à l'interface devient assez élevée ($1,7 \times 10^{-5} \text{ m}^2.K/W$) par rapport au cas (a) ($\times 10^{-6} \text{ m}^2.K/W$). Ce contact interfacial imparfait limite le refroidissement de la lamelle (voir Fig. 3.41 (b)). Le matériau liquide moins visqueux s'étale alors plus facilement et on observe donc des doigts liquides plus épais, entraînant ainsi la rupture de la lamelle dans les régions où des phases solides se développent et où la lamelle est moins épaisse, voir Fig. 3.44 (a).

Par contre, pour un angle de contact dont l'angle d'avancée est plus élevé et une R_{th} variable dans le temps, on n'observe pas le même comportement comme on peut l'observer sur la Fig. 3.43, qui montre le comportement de la lamelle durant sa phase de solidification pour des angle d'avancée, $\theta_d = 100^\circ$ et 140° . On remarque que la phase solide se développe depuis la périphérie de la lamelle vers son centre, mais lorsque $\theta_d = 140^\circ$, il n'y a pas de rupture dans la lamelle. Avec cet angle de contact, l'étalement est plus lent (voir partie angle de contact) et la lamelle devient plus épaisse (voir 3.44 (b)) et même si la solidification se développe, elle n'est pas suffisante pour déstabiliser l'écoulement et provoquer une rupture dans la lamelle.

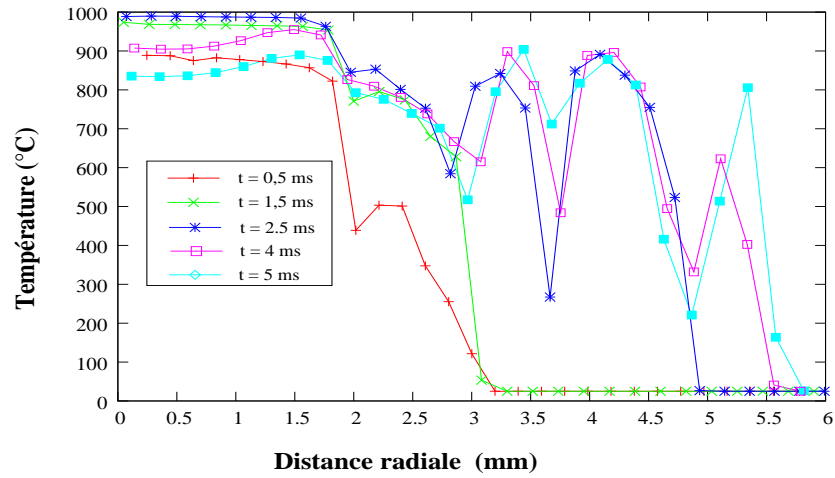
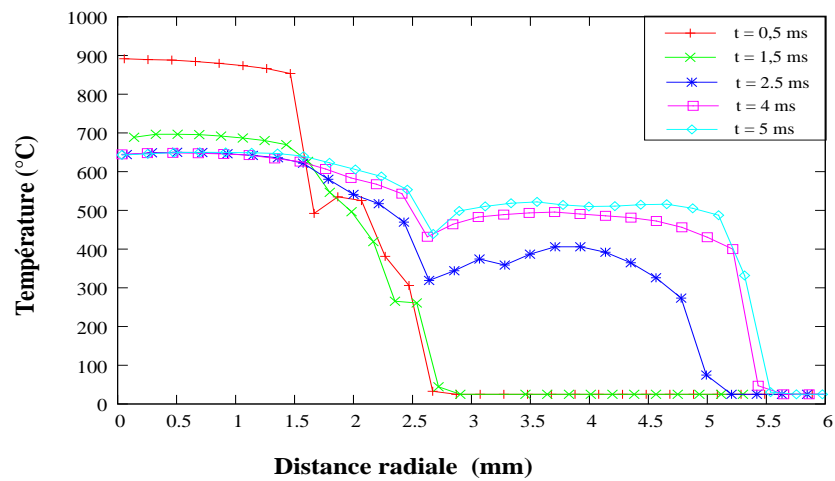
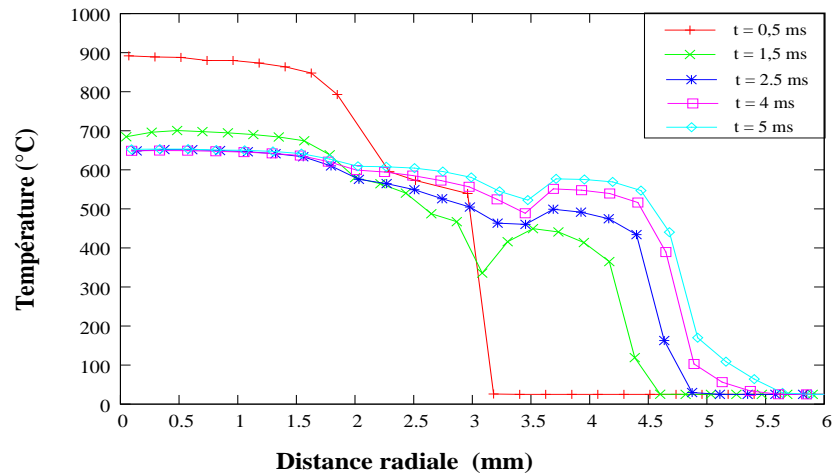
(a) R_{th} constante et $\theta_d = 100^\circ - 20^\circ$ (b) R_{th} variable et $\theta_d = 100^\circ - 20^\circ$ (c) R_{th} variable et $\theta_d = 140^\circ - 20^\circ$

FIGURE 3.41 – Évolution de la température à la surface du substrat (interface) au contact avec la lamelle avec (a) R_{th} constante et (b) et (c) variable (voir Tab. 3.10), courbes de températures obtenues dans la direction diagonale de la lamelle. $T_{0,g} = 1215^\circ\text{C}$, $T_{sub} = 25^\circ\text{C}$.

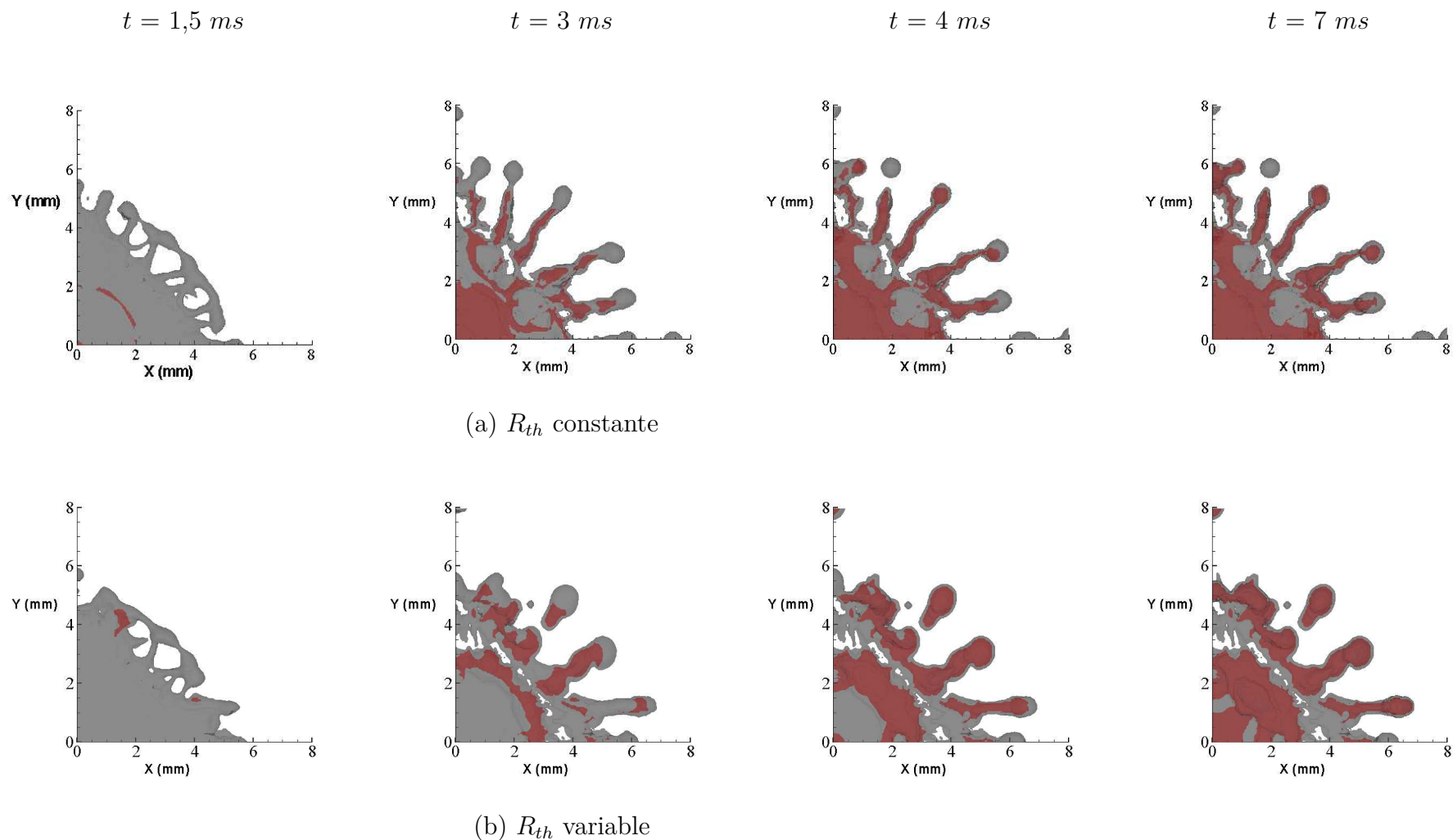


FIGURE 3.42 – Vues de dessus du début de solidification (en couleur rouge) durant l'étalement de la goutte liquide (en couleur grise), vues obtenues pour $\theta_d = 100^\circ - 20^\circ$ avec application d'une (a) R_{th} constante ($10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$) et (b) variable (voir Tab. 3.10). $d_0 = 3 \text{ mm}$, $T_{0,g} = 1215^\circ \text{C}$ et $T_{sub} = 25^\circ \text{C}$.

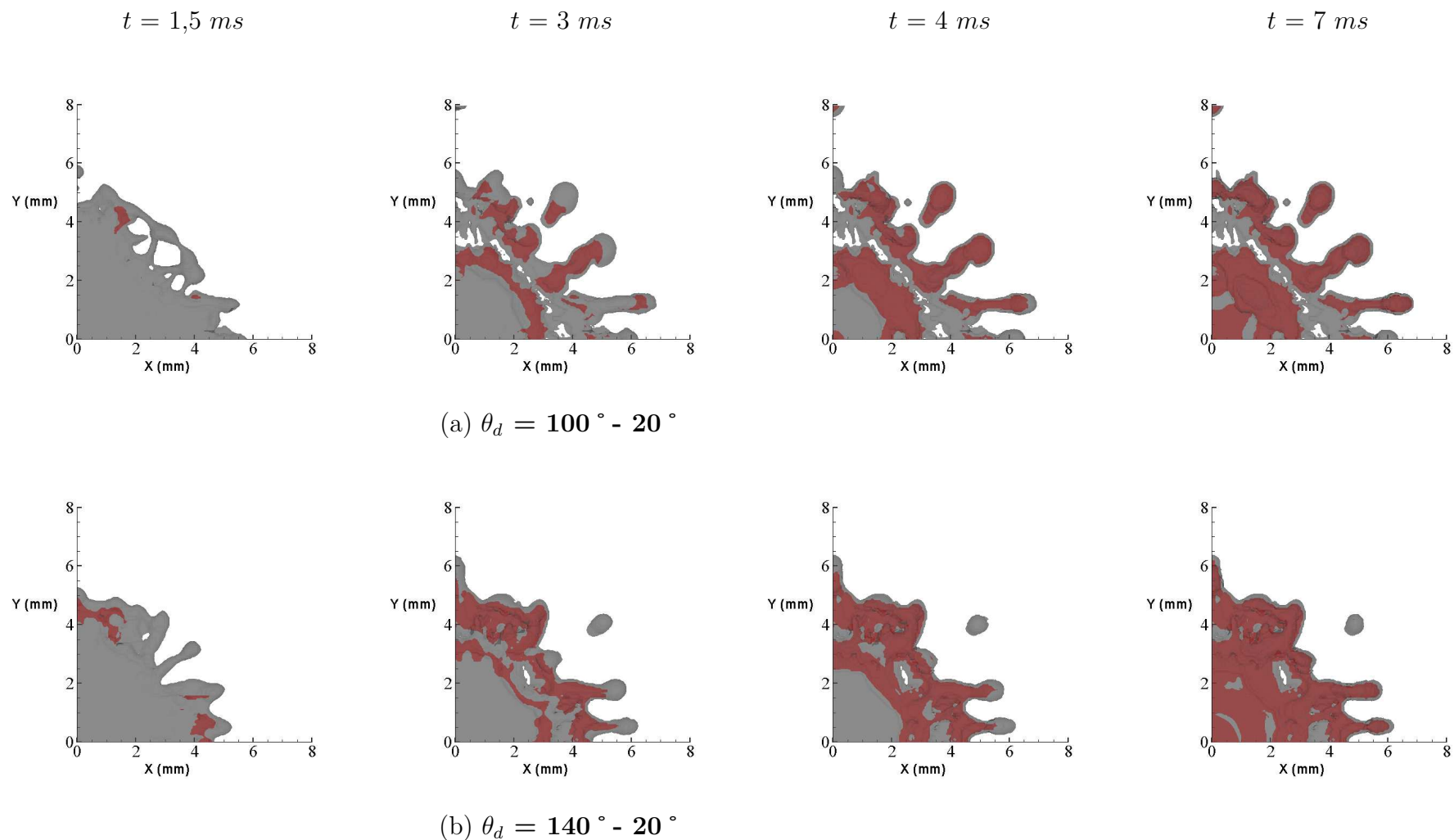


FIGURE 3.43 – Vues de dessus du développement de la solidification (en couleur rouge) durant l'étalement de la goutte liquide (en couleur grise), vues obtenues avec une R_{th} variable (voir Tab. 3.10). $d_0 = 3 \text{ mm}$, $T_{0,g} = 1215 \text{ }^\circ\text{C}$ et $T_{sub} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

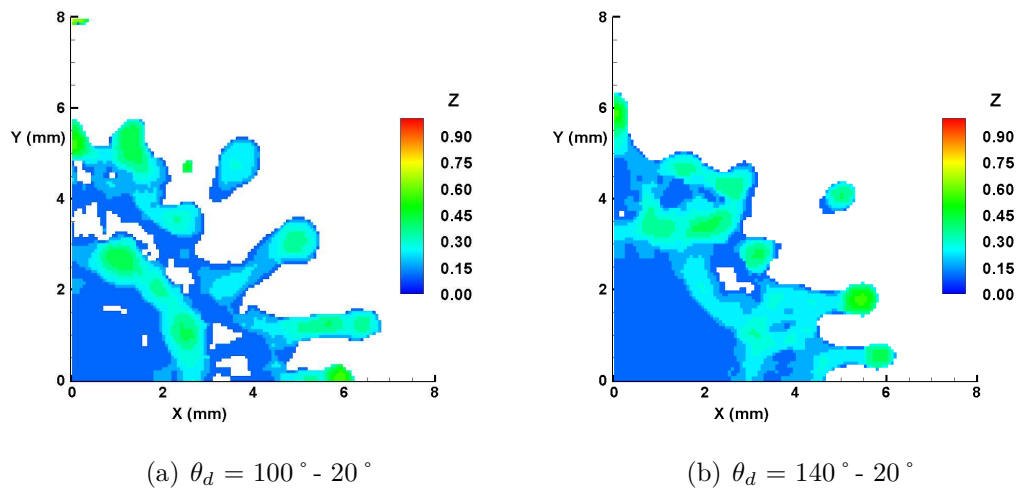


FIGURE 3.44 – Profil de l'épaisseur des lamelles de cuivre obtenues, à l'instant $t = 3 \text{ ms}$, avec une R_{th} variable pour deux cas de l'angle de contact. $T_{0,g} = 1215 \text{ }^\circ\text{C}$ et $T_{sub} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.6 Influence de la température du substrat

Lors de la projection de différents matériaux sur des substrats lisses ($R_a < 0,5 \text{ } \mu\text{m}$) de différentes natures, les phénomènes suivants sont observés [2] : au-dessous d'une température du substrat (qui dépend du substrat et de la goutte) les gouttes éclatent, alors qu'au-dessus de cette température, elles ont une forme de disque. La température à laquelle s'opère cette transition de morphologie est appelée "température de transition" (voir § 1.3.3.3).

Les travaux réalisés par Cedelle, J. [13] sur l'impact de gouttes de cuivre sur un acier inox., ont montré une transition de morphologie des lamelles pour une température de substrat de 400 ° . Expérimentalement, le préchauffage vise à avoir une surface bien propre et exempte de toute contamination, afin d'augmenter la qualité du contact lamelle/substrat et d'améliorer ainsi l'adhérence des lamelles. Dans ce cas, la valeur de la résistante thermique de contact a été estimée égale à $2,7 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

Il faut souligner aussi, que le fait de modifier les propriétés de contact à l'interface lamelle/substrat par le chauffage du substrat, modifie également l'angle de contact dynamique (θ_d). En effet, comme on peut le remarquer sur la Fig. 3.4 l'angle de contact entre une goutte d'étain et un substrat en acier inox dépend de la température de ce dernier. Le chauffage du substrat s'accompagne par une augmentation des valeurs de θ_d en particulier pour l'angle de recul (θ_r), et réduit l'écart avec les valeurs de l'angle d'avancée (θ_a).

Dans les conditions citées ci-dessus, nous avons réalisé des simulations de l'impact et de la solidification de gouttes de cuivre, en augmentant les valeurs de l'angle de recul (θ_r) afin de prédire leur morphologie et leur comportement thermique.

La Fig. 3.45 montre l'évolution de la température du substrat, au centre d'impact, obtenue pour différents angles de contact dynamique. On remarque que le l'évolution de la température du substrat est quasiment identique quel que soit l'angle θ_d . La température à l'interface s'élève jusqu'à plus de 1000 ° et se maintient à cette température jusqu'à 3,5 ms après l'impact, puis baisse lentement.

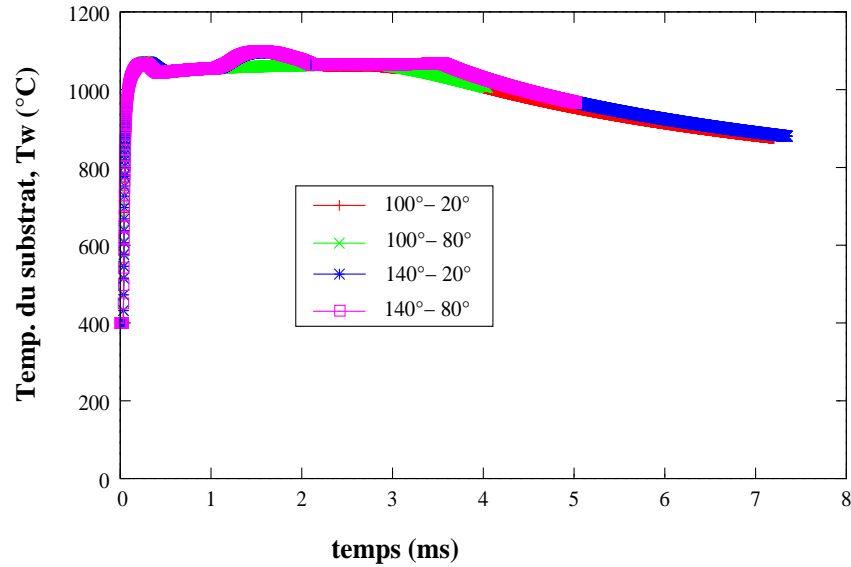


FIGURE 3.45 – Évolution de la température du substrat, au centre d'impact, pour différents angles de contact dynamique (θ_d). $d_0 = 3 \text{ mm}$, $T_{0,g} = 1215 \text{ °C}$ et $T_{sub} = 400 \text{ °C}$ et $R_{th} = 2,7 \times 10^{-7} \text{ m}^2.K/W$.

Les morphologies des lamelles de cuivre résultantes sont montrées sur les Figs. 3.46 et 3.47. Ces morphologies ont été obtenues pour différents angles de contact d'avancée θ_a et de recul θ_r . On remarque que pour $\theta_a = 100^\circ$, pour différentes valeurs de l'angle de recul $\theta_r = 20^\circ$, 40° et 80° , les lamelles présentent une forte digitation et éclatent à la fin de la phase d'étalement. En revanche, celles obtenues avec un angle $\theta = 140^\circ$ montrent une morphologie beaucoup plus cohérente et une forme circulaire avec formation d'un bourrelet sur le pourtour. La forme est quasiment identique pour différentes valeurs de l'angle de recul $\theta_r = 20^\circ$, 40° et 80° . La Fig. 3.48 montre le profil d'épaisseur à l'instant $t = 4 \text{ ms}$ après l'impact, pour deux valeurs de l'angle d'avancée de θ_a : 100° et 140° et une valeur constante de l'angle $\theta_r = 80^\circ$, l'épaisseur de la lamelle est inférieure à $150 \mu\text{m}$ alors que sur sa périphérie et avec un angle d'avancée plus grand, elle peut atteindre jusqu'à $750 \mu\text{m}$.

D'après la Fig. 3.4 qui présente la morphologie finale de lamelles obtenues pour différentes valeurs de l'angle de contact et différentes températures du substrat, l'obtention de lamelles en forme de disque est favorisée par l'augmentation de la valeur de l'angle de contact θ_a , et également celle de θ_r . Or une diminution de ces derniers, favorise l'étalement de la lamelle grâce à une vitesse radiale plus élevée (voir § 3.4). L'apparition des parties solidifiées au sein du liquide perturbe alors fortement son écoulement et cause la rupture des doigts liquides, conduisant ainsi à l'éclatement de la lamelle (flattening splashing), voir Fig. 3.46, lorsque $\theta_r = 80^\circ$. Par contre, lorsque l'angle d'avancée est plus élevé ($\theta_a = 140^\circ$), le diamètre est plus réduit, car la vitesse d'écoulement radiale est plus faible, ce qui ne favorise pas la formation de doigts liquides, et les parties solidifiées qui se développent dans le liquide ne perturbent pas son écoulement, voir Fig. 3.47. La lamelle résultante a alors une forme de disque.

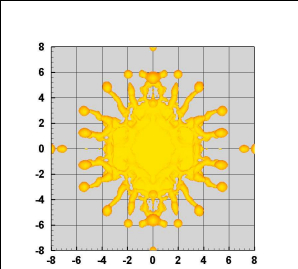
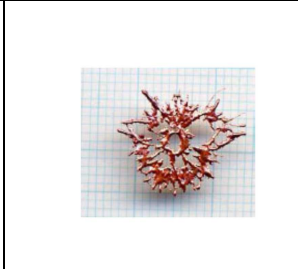
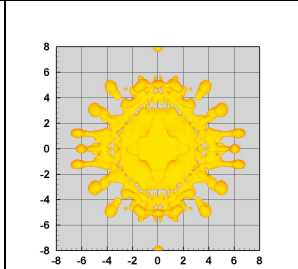
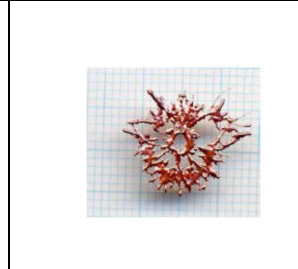
Les Tableaux 3.11 et 3.12 résument et comparent ces résultats de simulations sur la formation des lamelles de cuivre obtenues sur un substrat froid et sur un substrat chaud avec ceux de lamelles obtenues expérimentalement.

Sur un substrat froid, $T_{sub} = 25^\circ\text{C}$, les formes des lamelles prédites par les simulations numériques obtenues pour un angle de contact dynamique $\theta_d = 100^\circ - 20^\circ$ concordent relativement bien avec la forme observée expérimentalement. Cependant deux cas ont été considérés pour la résistance thermique de contact :

- i) Pour une valeur constante de R_{th} assez élevée ($10^{-6} \text{ m}^2.K/W$) qui traduit un mauvais contact interfacial, on n'observe pas d'éclatement de la lamelle. Néanmoins la formation de digitations est fortement favorisée en fin de la phase d'étalement ainsi que la tendance au "splashing" de la lamelle.
- ii) Pour une valeur de R_{th} variable dans le temps, les formes simulées sont plus proches de la forme expérimentale et on remarque qu'une partie de la lamelle se détache de la partie centrale, qui reste assez homogène.

Sur un substrat chaud ($T_{sub} = 400^\circ\text{C}$), on a utilisé une résistance thermique de contact constante dans le temps assez faible ($2 \times 10^{-7} \text{ m}^2.K/W$) qui traduit un bon contact interfacial. Le résultat de la simulation est assez proche du résultat expérimental. La lamelle observée expérimentalement présente une forme circulaire non déchiquetée, avec l'apparition de quelques doigts liquides périphériques. Ce résultat est obtenu dans les simulations avec un angle de contact dynamique $\theta_d = 140^\circ - 80^\circ$.

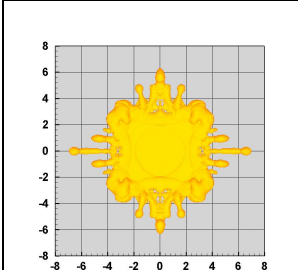
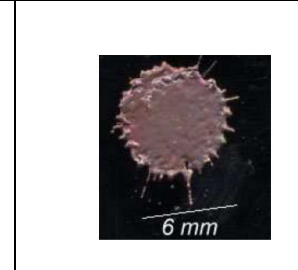
TABLE 3.11 – Comparaison entre lamelles prédites par les simulations numériques et observées expérimentalement sur un substrat froid ($\theta_d = 100^\circ - 20^\circ$)

$T_{sub} = 25^\circ\text{C}$		$T_{sub} = 25^\circ\text{C}$	
Simulation ^a	Expérimental	Simulation ^b	Expérimental
			

a. R_{th} constante = $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

b. R_{th} variable : voir Tableau 3.10

TABLE 3.12 – Comparaison entre lamelles prédites par les simulations numériques et observées expérimentalement sur un substrat chaud ($\theta_d = 140^\circ - 80^\circ$)

$T_{sub} = 400^\circ\text{C}$	
Simulation ^a	Expérimental
	

a. $R_{th} = 2 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

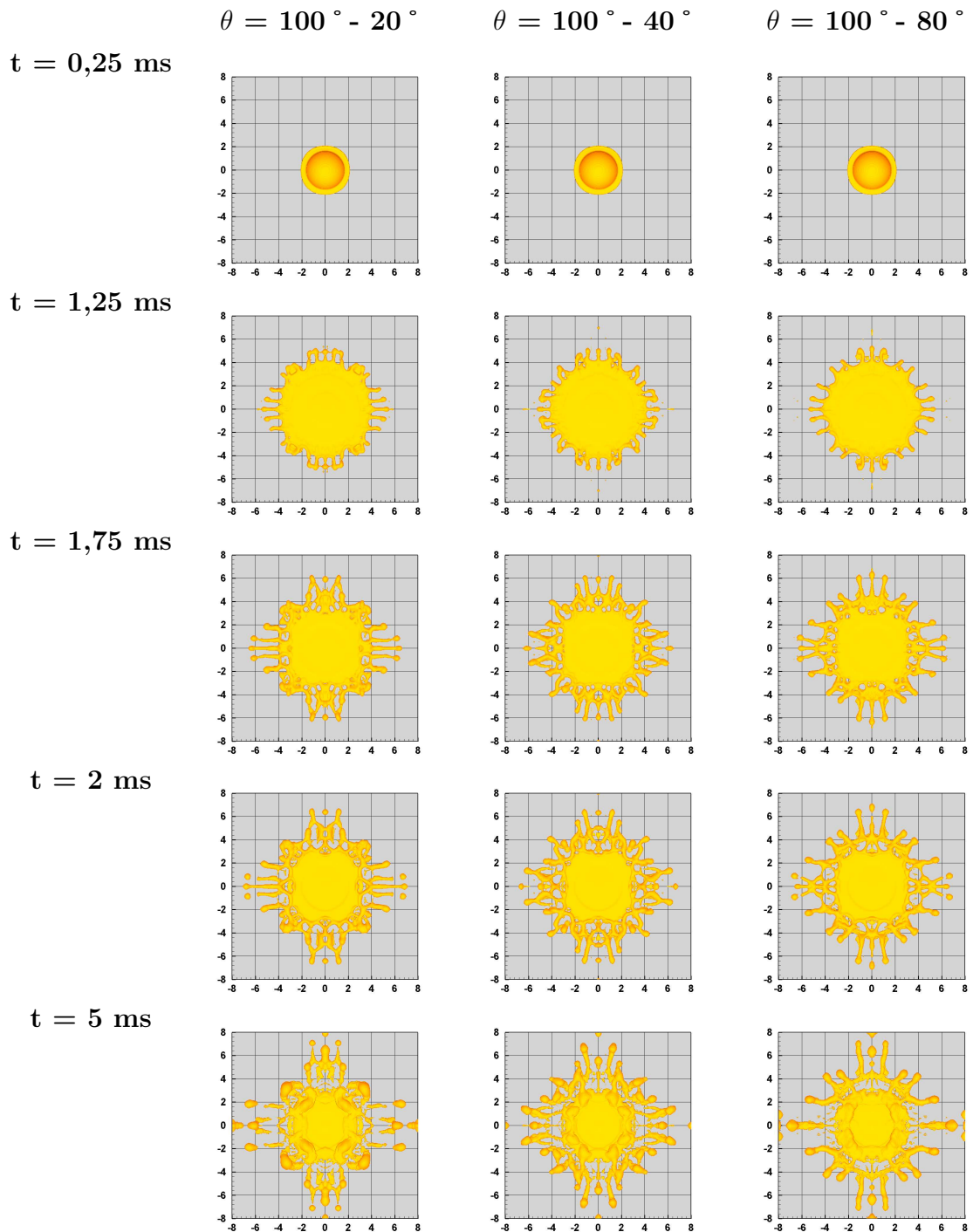


FIGURE 3.46 – Vues de dessus de lamelles de cuivre durant les phases d'étalement et de solidification, vues obtenues pour un angle d'avancée $\theta_a = 100^\circ$ et des angles de recul différents : $\theta_r = 20^\circ$, 40° et 80° . $d_0 = 3 \text{ mm}$, $T_{0,g} = 1215^\circ \text{ C}$ et $T_{\text{sub}} = 400^\circ \text{ C}$ et $R_{th} = 2,7 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

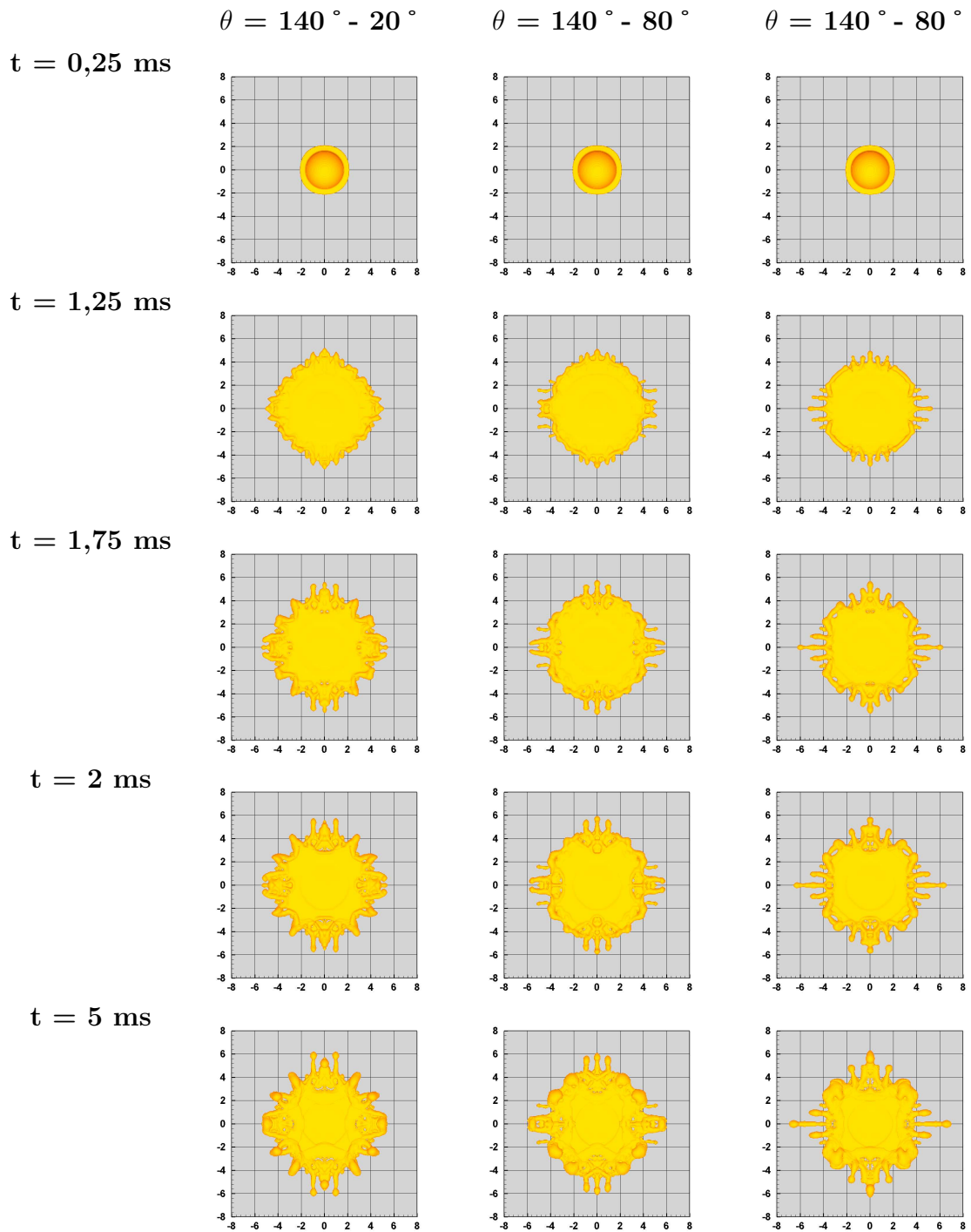


FIGURE 3.47 – Vues de dessus de lamelles de cuivre durant les phases d'étalement et de solidification, vues obtenues pour un angle d'avancée $\theta_a = 140^\circ$ et des angles de recul différents : $\theta_r = 20^\circ, 40^\circ$ et 80° . $d_0 = 3 \text{ mm}$, $T_{0,g} = 1215^\circ \text{ C}$ et $T_{\text{sub}} = 400^\circ \text{ C}$ et $R_{th} = 2,7 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

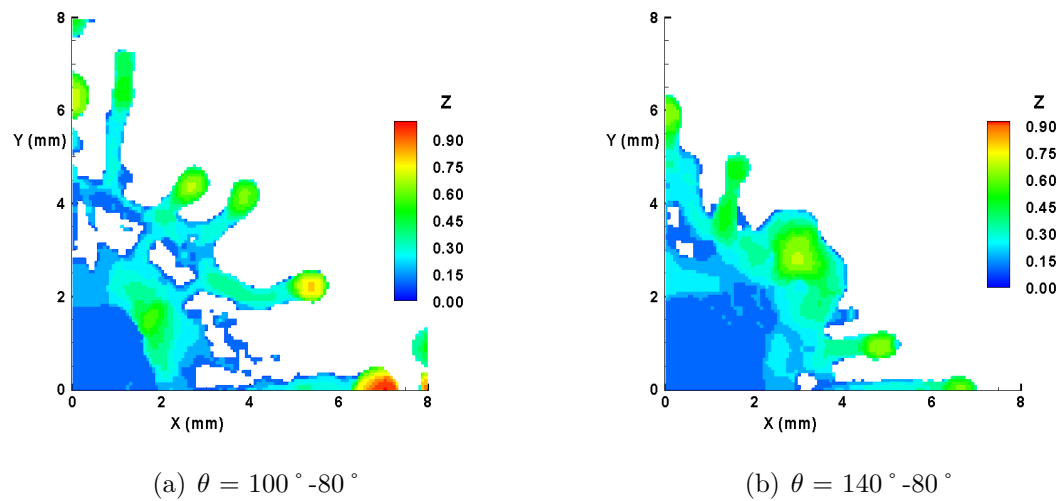


FIGURE 3.48 – Profil d'épaisseur des lamelles de cuivre, à l'instant $t = 4$ ms après l'impact, avec comme paramètre la variation de l'angle de contact dynamique. $T_{sub} = 400$ °C.

3.7 Température initiale de la goutte à l'impact

La température de la particule à l'impact est, a priori, un des facteurs clé de la formation des lamelles. En effet, elle conditionne la viscosité de la goutte en fusion et son enthalpie qui jouent un rôle important lors de la déformation de la goutte et du processus de solidification de la lamelle. Dans cette partie de l'étude, nous considérons l'impact de gouttes ayant des températures différentes. La Fig. 3.49 montre les morphologies de lamelles de cuivre obtenues sur un substrat froid pour deux températures initiales de la goutte ($T_{0,g}$) : 1084 °C et 1575 °C.

La Fig. 3.49 montre les vues en 3D des formes finales de lamelles obtenues après impact sur un substrat froid. On remarque que la goutte qui impacte avec une température initiale de 1575 °C, subit des fortes déformations durant son étalement avec projection de gouttelettes loin du centre d'impact (Fig. 3.49 (b)), contrairement à la goutte qui impacte avec une température initiale de 1084 °C, elle conserve une morphologie relativement circulaire et elle est plus épaisse sur sa partie périphérique (Fig. 3.49 (a)).

L'évolution de la température du substrat en acier, au centre de la zone d'impact, pour différentes températures initiales de la goutte est montrée par la Fig. 3.50. On remarque que le centre du substrat est très sensible à la température de la goutte qui impacte : pour la goutte impactant avec une température de 1575 °C, la température du substrat s'élève jusqu'à 1300 °C pendant 2 ms puis elle diminue rapidement. Par contre, pour la goutte qui impacte avec une température initiale de 1084 °C, la température du substrat s'élève jusqu'à 900 °C, mais le substrat se refroidit plus lentement et la température du substrat se maintient pendant au moins 6 ms après l'impact. En effet, le refroidissement du substrat au centre d'impact est plus lent lorsque la goutte impacte à 1084 °C, et son écoulement est plus faible. Le rayon de la goutte, à $t = 0,5$ ms, est de 3 mm, comme le montre la Fig. 3.51 (a), alors que pour la goutte qui impacte avec une température initiale de 1575 °C, le rayon de la goutte est de 4 mm au même instant, voir Fig. 3.51 (b) et au final la lamelle est plus mince, ce qui explique la différence de refroidissement du substrat.

L'évolution de la phase solide dans la goutte au cours de son étalement, pour les deux températures initiales à l'impact, 1084 °C et 1575 °C, est représentée respectivement par les Figs. 3.52 (a) et (b). La phase solide se développe plus rapidement dans la goutte dont la température à l'impact est de 1084 °C, et commence à $t = 0,3$ ms après l'impact (voir Fig. 3.52 (a)), mais la solidification de la goutte bloque son étalement avant même que celui-ci ne soit complété et la lamelle devient alors plus épaisse. Par contre, la solidification dans la goutte, impactant avec une température de 1575 °C, commence à $t = 1,4$ ms, en fin d'étalement et dans la partie périphérique (voir Fig. 3.52 (b)).

Ces résultats sur l'influence de la température initiale de la goutte à l'impact, montrent bien que, dans le cas de l'impact d'une goutte de cuivre, l'état de fusion de la particule contrôle, en grande partie, la phase de refroidissement et le développement de la phase solide ainsi que la formation de la lamelle. La viscosité devrait également jouer sur la phase d'étalement, mais elle reste un facteur mineur, car sa variation est faible dans le domaine de température considéré (voir le Tableau 4.5).

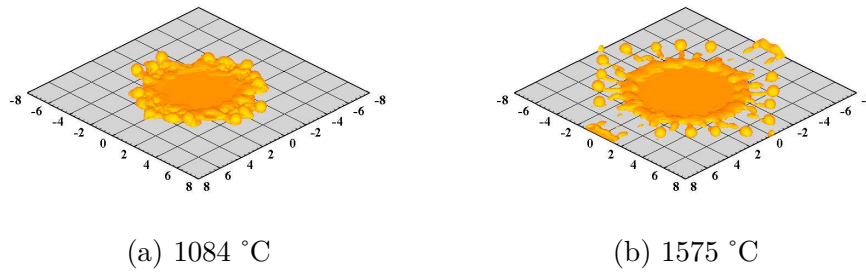


FIGURE 3.49 – Vues en perspective des morphologies des lamelles de cuivre à l'instant $t = 5$ ms, en fonction de la température initiale de la goutte à l'impact ($T_{0,g}$). Avec $d_0 = 3$ mm, $v_i = 4$ m.s⁻¹ et $\theta_d = 100^\circ - 20^\circ$.

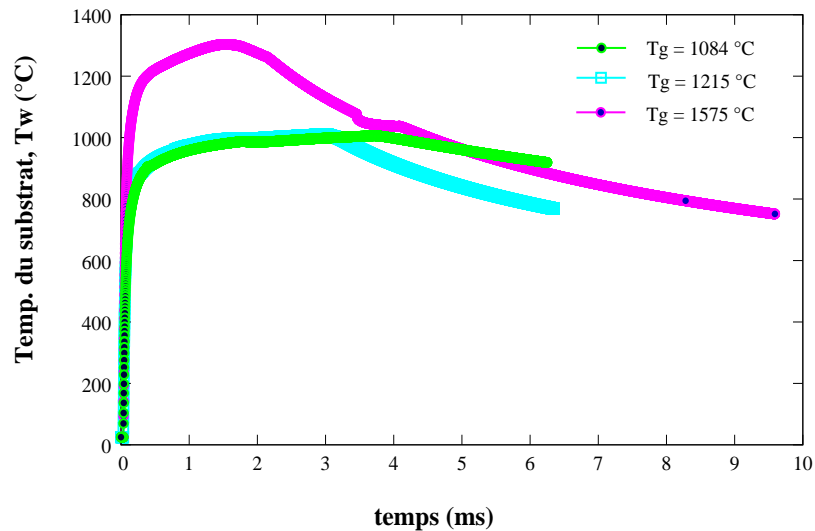


FIGURE 3.50 – Évolution de la température du substrat en acier, au centre d'impact, en fonction de la température initiale de la goutte à l'impact. $d_0 = 3$ mm et $T_{sub} = 25^\circ\text{C}$ et $R_{th} = 10^{-6}$ m².K/W.

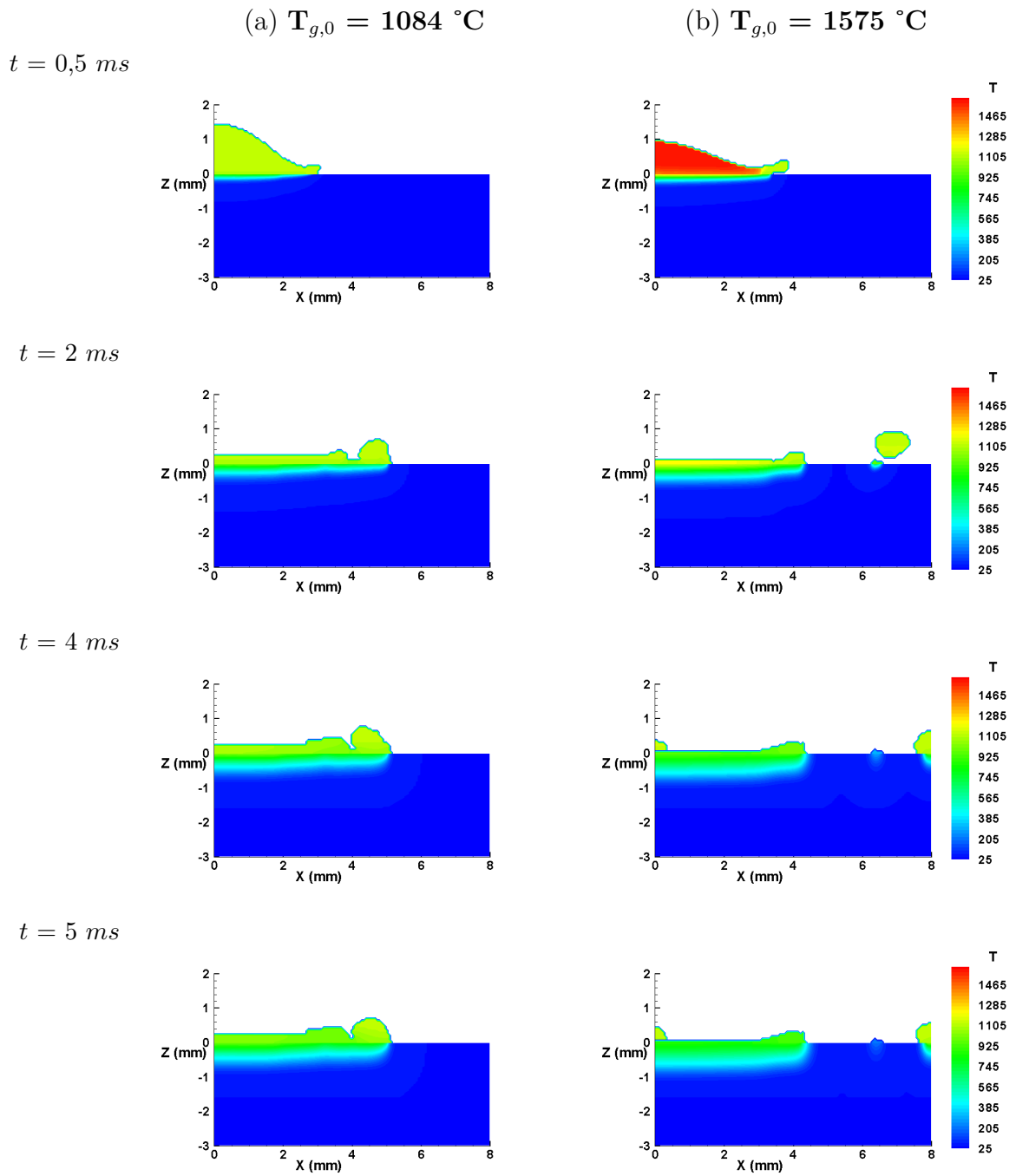


FIGURE 3.51 – Vues de profil du champ de température dans la goutte et dans le substrat, vues obtenues avec une température de la goutte à l'impact : $T_g = 1215 \text{ }^\circ\text{C}$ et $T_g = 1823 \text{ }^\circ\text{C}$. Avec $\theta_d = 100^\circ - 20^\circ$, $d_0 = 3 \text{ mm}$ et $T_{sub} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

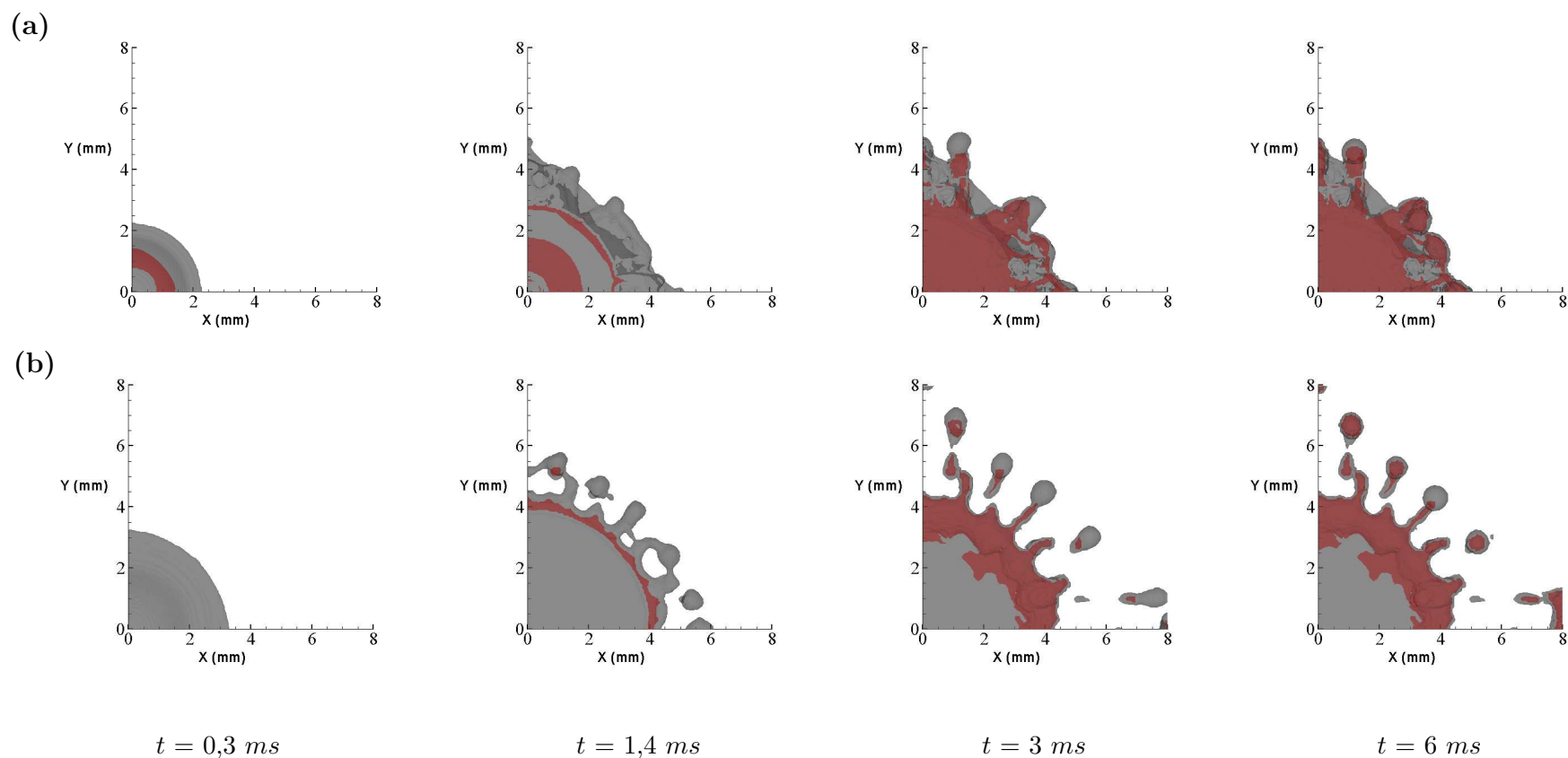


FIGURE 3.52 – Vues de dessus du développement de la solidification (en couleur rouge) dans la goutte liquide (en couleur gris) durant son étalement, en fonction de la température initiale à l'impact : (a) $T_{g,0} = 1084 \text{ °C}$ et (b) $T_{g,0} = 1575 \text{ °C}$. $\theta_d = 100^\circ - 20^\circ$, $d_0 = 3 \text{ mm}$, $T_{sub} = 25 \text{ °C}$ et $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

3.8 Impact d'une goutte millimétrique en céramique

L'impact d'une particule céramique, fondue et de taille millimétrique, sur un substrat lisse est un cas d'étude intéressant compte tenu *i)* des nombreuses applications des revêtements céramiques dans le domaine de la projection thermique et *ii)* de leurs propriétés thermophysiques dont leur conductivité thermique qui est faible par rapport à celle des métaux (voir le Tableau 4.6). Jusqu'à présent, très peu d'études expérimentales ont porté sur des gouttes céramiques millimétriques à cause de la difficulté de réaliser un système permettant de fondre des céramiques pour générer des gouttes céramiques.

Dans ce contexte, les études numériques se révèlent très utiles pour comprendre la formation des lamelles par l'impact de gouttes céramiques. Nous avons donc étudié le cas d'une goutte d'alumine impactant sur un substrat en acier inoxydable à la température ambiante. Les conditions d'impact sont résumées, avec celle du cuivre, dans le Tableau 3.13.

TABLE 3.13 – Les conditions de simulations de l'impact d'une goutte d'alumine.

Goutte	d_0 (mm)	v_i (m/s)	$T_{0,g}$ (° C)	T_{sub} (° C)	R_{th} (m ² K/W)	Angle de contact (°)	Re^a	We^a
Al_2O_3	3	4	2 200	25	10^{-6}	100-20	1 291	184
Cu	3	4	1 215	25	10^{-6}	100-20	35 294	294

a. calculer à la température de la goutte au moment de l'impact

La Fig. 3.53 montre l'évolution de la température du substrat, au centre de la zone d'impact, d'une goutte céramique (alumine, $T_{0,g} = 2200$ °C) comparée au cas de l'impact d'une goutte métallique (cuivre, $T_{0,g} = 1215$ °C) de même taille. Ces résultats ont été obtenus avec un angle de contact dynamique $\theta_d = 100^\circ - 20^\circ$. On remarque que la température augmente très rapidement pour atteindre presque $1\ 200$ °C, pour le matériau céramique et que cette température ne commence à diminuer qu'à partir de $5\ ms$.

Les phases d'étalement et de solidification de la goutte d'alumine pendant $5\ ms$ après l'impact sont représentées sur la Fig. 3.55. Durant la phase d'étalement on n'observe aucun phénomène de splashing, voir 3.55 (a), la goutte s'étale sur le substrat jusqu'à atteindre un diamètre maximal ensuite elle se rétracte à l'instant $t = 2\ ms$ et entraîne une accumulation de matière liquide sur le pourtour de la lamelle. Le degré d'étalement de la particule d'alumine est de 3 (voir Fig. 3.54) alors que celui du cuivre n'est que légèrement au-dessus de 2,5.

Cette différence s'explique par le fait que la goutte d'alumine ne subit aucune éclaboussure, et l'absence du phénomène de digitation en fin d'étalement comme cela a été observé pour l'impact d'une goutte de cuivre.

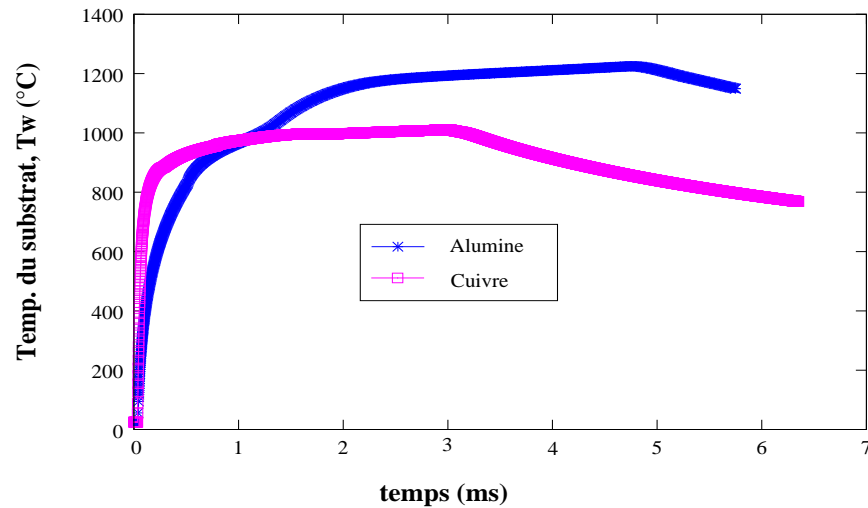


FIGURE 3.53 – Évolution de la température du substrat au centre de la zone d'impact durant l'étalement et la solidification d'une lamelle d'alumine. $d_0 = 3 \text{ mm}$, $T_{g,0} = 2200 \text{ }^\circ\text{C}$ et $T_{sub} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ et $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

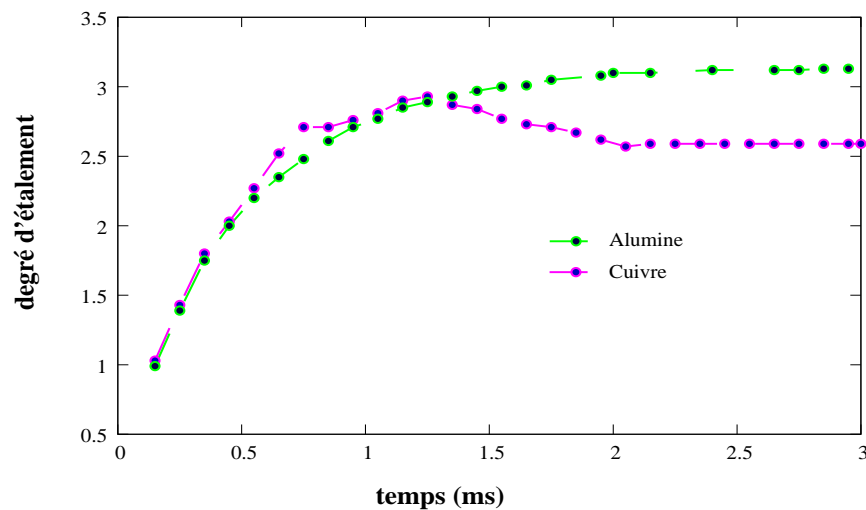
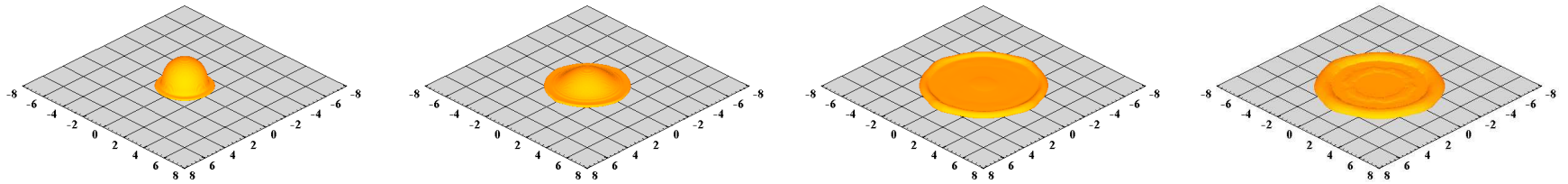


FIGURE 3.54 – Degré d'étalement d'une goutte d'alumine et d'une goutte de cuivre impactant sur un substrat en acier inox. $d_0 = 3 \text{ mm}$, $T_{sub} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ et $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

L'apparition de zones solidifiées près du centre mais aussi en périphérie (voir Fig. 3.55 (b)) bloque l'étalement de la goutte d'alumine sans pour autant produire des éclaboussures contrairement au cas d'une goutte de cuivre. On remarque également, que le développement de la solidification dans la lamelle d'alumine est plus lent ceci peut être expliquée par sa faible diffusivité thermique.

(a)



(b)

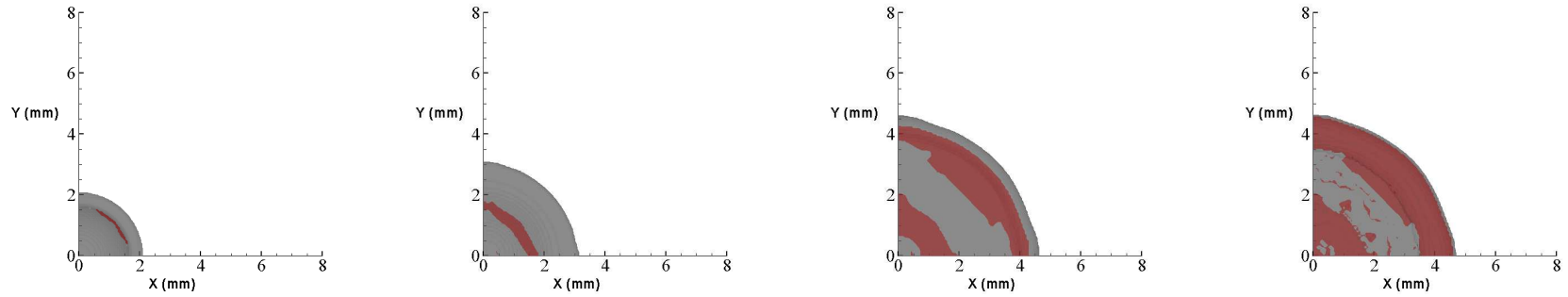
 $t = 0,25 \text{ ms}$ $t = 0,5 \text{ ms}$ $t = 2 \text{ ms}$ $t = 5 \text{ ms}$

FIGURE 3.55 – Étalement et solidification d'une goutte d'alumine impactant à une vitesse de 4 m.s^{-1} sur un substrat en acier inox. (a) vues en 3D de la phase d'étalement (b) vues de dessus du développement de la phase solide (couleur rouge) durant l'étalement de la goutte liquide (couleur grise). $d_0 = 3 \text{ mm}$, $T_{\text{sub}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{g,0} = 2200 \text{ }^\circ\text{C}$ et $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$.

La Fig. 3.56 montre le champ de vitesse radiale (composante u ($m.s^{-1}$)) dans la phase liquide de la particule d'alumine pendant la phase d'étalement. On remarque, que la vitesse d'écoulement est relativement faible durant les premiers instants de la phase d'étalement ce qui explique que la phase d'étalement soit plus longue. La vitesse d'écoulement plus faible que dans la goutte de cuivre (voir Fig. 3.32) peut s'expliquer par une énergie cinétique de la goutte d'alumine plus faible à l'impact à cause d'une masse volumique assez faible par rapport au cuivre ($2\,800$ contre $7\,800\text{ kg.m}^{-3}$)⁵.

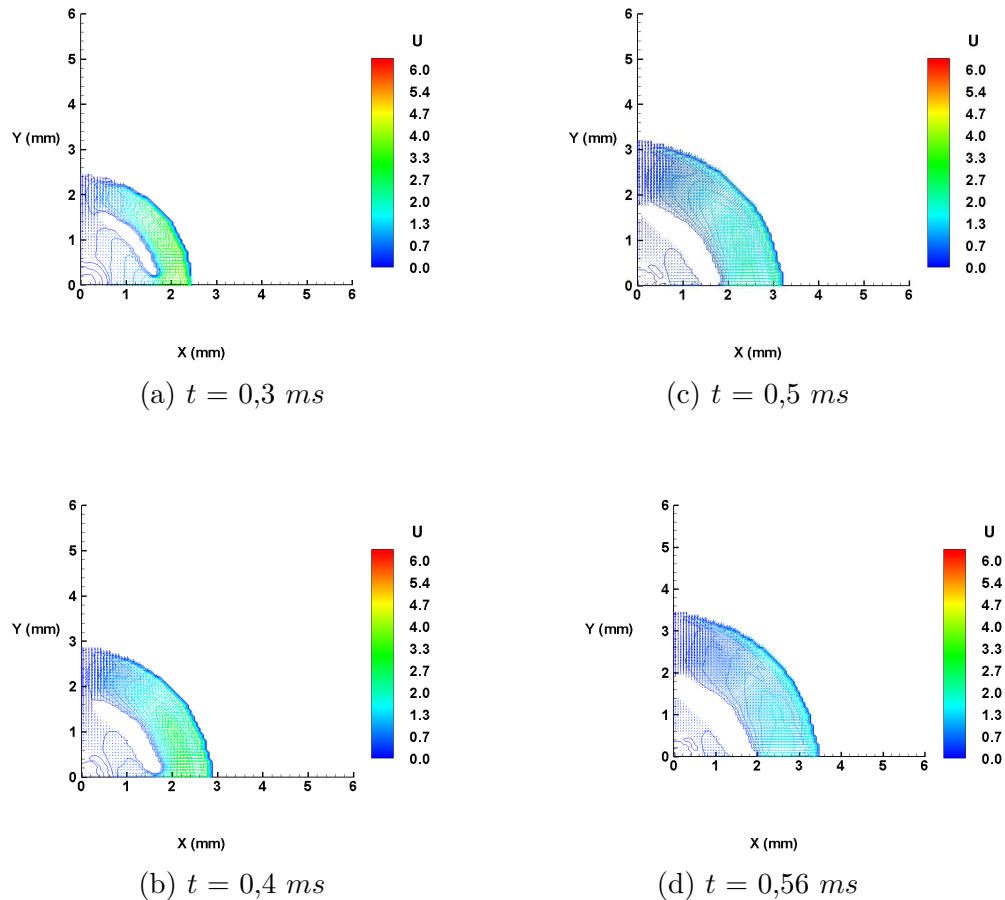


FIGURE 3.56 – Vues de dessus du champ de vitesse, composante u ($m.s^{-1}$), dans la goutte dans une épaisseur $z = 30\ \mu\text{m}$ de l'interface. Vues obtenues durant les premiers instants d'étalement. $d_0 = 3\text{ mm}$ et $v_i = 4\text{ m.s}^{-1}$.

5. Masse volumique calculée à la température initiale de la goutte à l'impact

3.9 Conclusion du chapitre

Ce chapitre traite de la simulation numérique de l'impact de gouttes de cuivre et d'alumine de taille millimétrique sur un substrat en acier inoxydable. Dans un premier temps de l'étude, les paramètres de maillage pour la goutte et pour le substrat ont été optimisés à partir des résultats expérimentaux, en comparant les courbes numériques et expérimentales de l'évolution de la température du substrat, ce qui nous a permis de fixer la valeur du CPR à 23 pour la goutte, et l'épaisseur du substrat 3 mm, et ainsi de les adapter à notre problème physique.

L'étude des paramètres d'impact de gouttes millimétriques sur un substrat montre que :

- Pour la vitesse de la goutte à l'impact : si elle n'est pas suffisamment élevée, la déformation de la goutte est contrôlée par les forces de tension de surface.
- L'angle de contact dynamique, entre la goutte et le substrat, affecte considérablement le processus d'étalement de la lamelle étalée. Pour le cuivre, la lamelle subit de fortes digitations avec un angle de contact d'avancée faible ($\theta_a = 100^\circ$), alors que si cet angle est élevé ($\theta_a = 140^\circ$) ce phénomène est réduit et la goutte s'étale moins.
- Pour la variation de la résistance thermique de contact le long du rayon de la lamelle et avec un angle de contact $\theta_a = 100^\circ$, la lamelle éclabousse et sa partie périphérique se détache complètement de la partie centrale, ce qui n'est pas le cas avec la forme de la lamelle obtenue avec une résistance thermique de contact constante.
- Le préchauffage du substrat a mis en évidence la qualité du contact thermique entre la goutte et le substrat, par une résistance thermique de contact faible ($2.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2.K/W$), la lamelle a une forme de disque pour des angles de contact θ_a plus élevés ($\theta_a = 140^\circ$).
- L'impact d'une goutte d'alumine sur un substrat froid ($R_{th} = 2.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2.K/W$) fait croître considérablement la température superficielle du substrat dans la zone d'impact. Elle peut atteindre 1 200 °C (contre 900 ° pour le cuivre). On a constaté une forme circulaire de la lamelle d'alumine. Du fait de la faible masse volumique de l'alumine liquide, son écoulement est plus lent ($2\,800 \text{ kg.m}^{-3}$ contre $7\,800 \text{ kg.m}^{-3}$ pour le cuivre) ce qui réduit son étalement qui est contrôlé par les forces de tension de surface.

Chapitre 4

Étude sur des gouttes micrométriques

Cette partie de l'étude traite de la simulation de l'impact et de l'étalement de particules de zircone stabilisée à l'yttrine (YSZ¹) dans des conditions typiques de la projection plasma. L'impact de particules projetées a été étudié sur des substrats lisses et sur des substrats rugueux. La zircone a été choisie car elle est largement utilisée en projection plasma (sujet de notre étude), pour la réalisation de revêtements destinés à diverses applications telles que les piles à combustibles ou les barrières thermiques.

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord l'influence du maillage de la goutte sur les résultats. Nous nous intéressons ensuite à l'impact d'une goutte métallique micrométrique que nous comparons avec celui d'une goutte céramique également micrométrique.

Il a été montré que le préchauffage d'un substrat lisse au-dessus de la température de transition, T_t , joue un rôle important dans la forme des lamelles. Ceci s'explique par l'évaporation des condensats et des adsorbats qui polluent la surface et dans certains cas, par la modification de son état de surface à l'échelle nanométrique, altération qui peut être caractérisée par le coefficient de dissymétrie (skewness) [52]. Ces modifications de la propreté superficielle du substrat et éventuellement de sa rugosité améliorent la mouillabilité goutte-substrat (§ 1.3.5.1).

Bianchi et al. [147] ont montré que le préchauffage du substrat au-dessus de T_t conduit à l'amélioration de la qualité de contact lamelle/substrat et donc du transfert de chaleur (diminution de la résistance thermique de contact, R_{th}). Tanaka et al. [148] ont également mis en évidence que l'augmentation de la conductivité thermique du substrat accroît la température de transition. D'une manière générale, la température de transition conditionne le choix de la valeur de R_{th} . Pour les substrats préchauffés au dessus de T_t , les valeurs de R_{th} déterminées à partir des études expérimentales sont comprises entre 10^{-7} et $10^{-8} \text{ m}^2.K.W^{-1}$, alors qu'au-dessous de T_t , elles sont autour de $10^{-6} \text{ m}^2.K.W^{-1}$.

Dans notre étude, nous avons donc fixé R_{th} soit à 10^{-6} dans le cas d'un mauvais contact soit à $10^{-7} \text{ m}^2.K.W^{-1}$ dans le cas d'un bon contact.

Nous allons donc présenter successivement dans ce chapitre :

1. Yttria Stabilized Zirconia

- le problème lié au maillage d'une goutte micrométrique,
- la comparaison entre des gouttes millimétriques et des gouttes micrométriques ayant le même nombre de Weber à l'impact (ce nombre correspond au rapport des forces d'inertie et de tension superficielle),
- la comparaison entre des gouttes micrométriques de cuivre et de zircon impactant sur des substrats froids,
- l'influence de la nature du substrat, c'est à dire de ses propriétés thermiques sur l'étalement et la solidification des gouttes (sur des substrats chauds et des substrats froids),
- enfin l'impact sur un substrat rugueux "idéalisé" dont la rugosité est modélisée par des colonnes carrées avec en particulier l'effet de la distance entre ces colonnes.

Les paramètres d'impact des particules de zircon et des particules de cuivre utilisées dans notre étude sont résumés dans le Tableau 4.1.

TABLE 4.1 – Paramètre d'impact des particules micrométriques de zircon et de cuivre sur un substrat en acier inoxydable.

Particule	d_0 (μm)	$T_{0,g}$ ($^{\circ}C$)	v_i ($m.s^{-1}$)	σ ($J.m^{-2}$)	θ^a ($^{\circ}$)	Re^b	We^b	Pe^b
Zircon	40	2 800	150	0,432	90	1 022	1 166	8 872
Cuivre	40	1215	150	1,27	90	17 647	5 527	48
Cuivre	40	1215	34,6	1,27	90	4 070	294	11

a. angle statique, car la vitesse d'impact est beaucoup plus élevée tel que $We \gg \sqrt{Re}$ [86]

b. Calculé à la température de la goutte au moment de l'impact

4.1 Le maillage de la goutte : influence du CPR

L'influence des valeurs du paramètre CPR (Cell Per Radius) utilisé pour définir le maillage de la goutte a été étudiée sur une goutte céramique. Pour ce faire, nous avons simulé numériquement l'impact de gouttes de zircon sur un substrat froid en acier inoxydable avec un maillage uniforme dans la goutte et dans le substrat.

Les paramètres des 2 maillages sont présentés dans le Tableau 4.2. La résistance thermique de contact goutte-substrat a été fixée à $10^{-6} m^2.K.W^{-1}$.

La Fig. 4.1 montre l'influence du paramètre CPR (21 et 25) sur la forme finale de la lamelle. Comme on peut le voir sur cette figure, le choix du paramètre CPR n'influe pas de façon notable sur la forme finale des lamelles de zircon (5 μs après l'impact) : les lamelles présentent une partie centrale en forme de disque et une couronne périphérique.

TABLE 4.2 – Paramètres de maillage dans la goutte et dans le substrat.

Goutte			Substrat		
CPR	Rayon (μm)	t_m (μm)	Epaisseur (μm)	N_w ^a	t_m ^b (μm)
21	40	1,9	40	20	2
25	40	1,6	40	20	2

a. Nombre de mailles

b. Taille de la maille

L'évolution de la température superficielle du substrat au centre de la zone d'impact est identique pour les deux valeurs du CPR choisies (21 et 25) jusqu'à $2 \mu\text{s}$ après l'impact où la température est de $350 \text{ }^\circ\text{C}$ (Fig. 4.2). Ensuite, les deux courbes divergent légèrement avec un écart maximal de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Les simulations numériques de l'impact de gouttes micrométriques sur un substrat rugueux ont montré que les calculs avaient du mal à converger avec un CPR de 25 alors qu'ils convergent normalement avec un CPR de 21. Aussi, avons nous choisi de travailler avec un CPR de 21 pour comparer les résultats (voir Tableau 4.2).

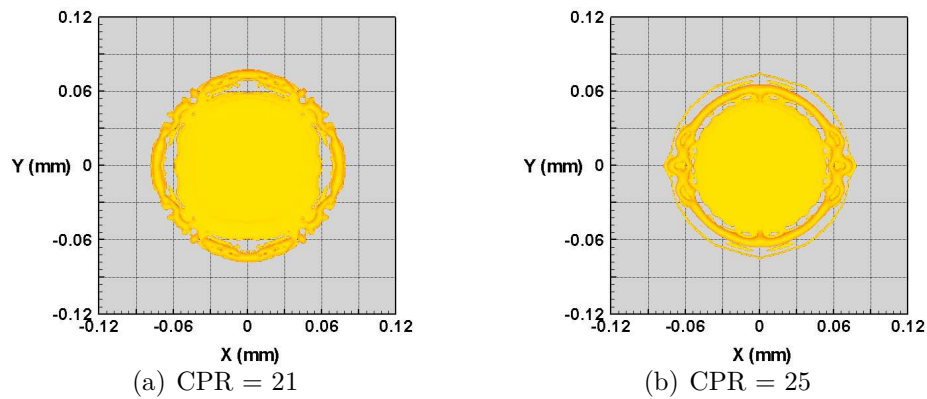


FIGURE 4.1 – Formes finales des lamelles de YSZ à $t = 5 \mu\text{s}$, après l'impact sur un substrat froid en acier inox. pour 2 valeurs du CPR. $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ et $\theta = 90^\circ$.

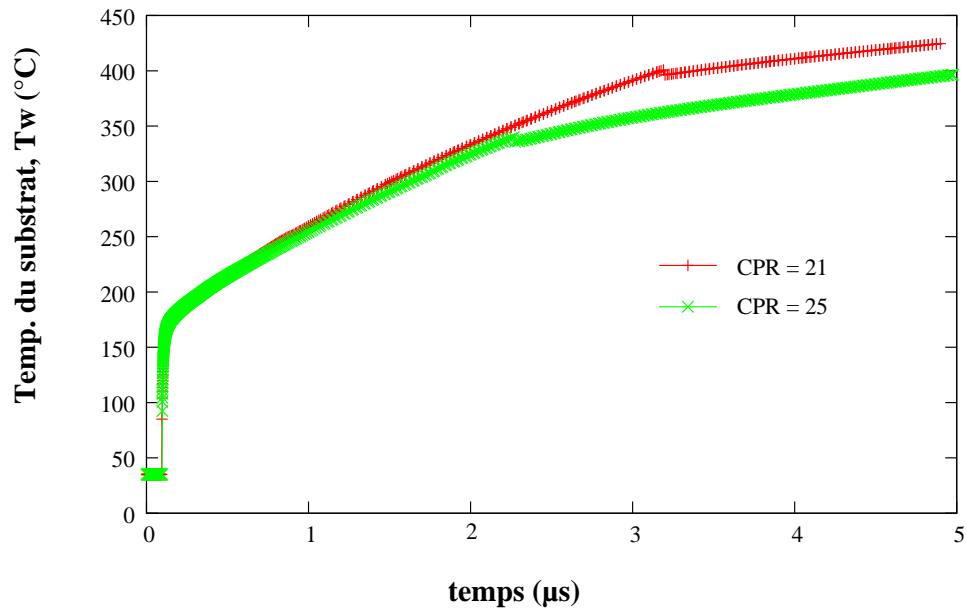


FIGURE 4.2 – Évolution de la température du substrat, au centre de la zone d'impact, d'une goutte de zircone pour 2 valeurs du CPR. $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2.K.W^{-1}$ et $\theta_d = 100^\circ - 20^\circ$.

4.2 Comparaison entre des gouttes millimétriques et micrométriques

La comparaison entre des gouttes millimétriques et micrométriques a été réalisée pour des gouttes de cuivre impactant sur un substrat froid en acier inoxydable avec un nombre de Weber identique. Les paramètres d'impact ainsi que les nombres de Re , We et Pe calculés avec les paramètres des gouttes à l'impact sont résumés dans les Tableaux 4.1 et 3.4, pour des gouttes ayant respectivement une taille millimétrique ($d_0 = 3 \text{ mm}$ et $v_i = 4 \text{ m.s}^{-1}$) et une taille micrométrique ($d_0 = 40 \mu\text{m}$ et $v_i = 34,6 \text{ m.s}^{-1}$) impactant avec un nombre de Weber identique sur un même substrat froid en acier inoxydable.

La goutte de cuivre millimétrique qui impacte sur un substrat froid présente le phénomène de splashing en fin d'étalement, phénomène observé expérimentalement sur un substrat froid (voir Fig. 4.3 a)). Par contre, la goutte micrométrique qui impacte dans des conditions typiques de la projection plasma, mais avec un nombre de Weber identique ($We = 294$) à celui de la goutte micrométrique, présente une forme de disque. Cette différence peut s'expliquer par le fait que l'écoulement sur la surface de la goutte micrométrique est dominé par la tension de surface.

Il convient en effet, de noter qu'en projection plasma, les vitesses de gouttes sont d'environ 100 à 200 m.s^{-1} , ce qui correspond par exemple pour la vitesse de 150 m.s^{-1} à un nombre de Weber égal à 5 527, valeur très élevée par rapport à celle que nous avons imposée à la goutte de cuivre ($We = 294$).

Le nombre de Reynolds de la goutte micrométrique qui impacte à une vitesse de $v_i = 34,6 \text{ m.s}^{-1}$ est d'environ 10 fois plus faible que celui de la goutte millimétrique qui impacte à une vitesse de $v_i = 4 \text{ m.s}^{-1}$.

Les Figs. 4.4 et 4.5 montrent l'évolution de la température superficielle du substrat, au centre de la zone d'impact, pour la goutte millimétrique et la goutte micrométrique. Pour la première, cette température s'élève très rapidement pour atteindre $1\,000 \text{ }^\circ\text{C}$. Ensuite à 3 ms , la chaleur ayant diffusée à l'intérieur du substrat, elle commence à décroître. Pour la goutte micrométrique, la température du substrat s'élève progressivement pour atteindre $220 \text{ }^\circ\text{C}$ en $4,5 \text{ } \mu\text{s}$. Cette différence s'explique par la différence dans les quantités de chaleur contenues dans la goutte millimétrique et dans la goutte micrométrique, quantités de chaleur qui sont essentiellement cédées au substrat.

La Fig. 4.6 montre le développement de la phase solide dans la goutte micrométrique au cours de la phase d'étalement. La solidification commence $1 \text{ } \mu\text{s}$ après l'impact, dans une partie où l'épaisseur est faible à proximité du front d'étalement. La lamelle, dont l'écoulement est dominé par la tension de surface, dans les conditions choisies pour ce cas d'étude ($v_i = 34,6 \text{ m.s}^{-1}$ - $We = 294$) est complètement solidifiée $5 \text{ } \mu\text{s}$ après l'impact.

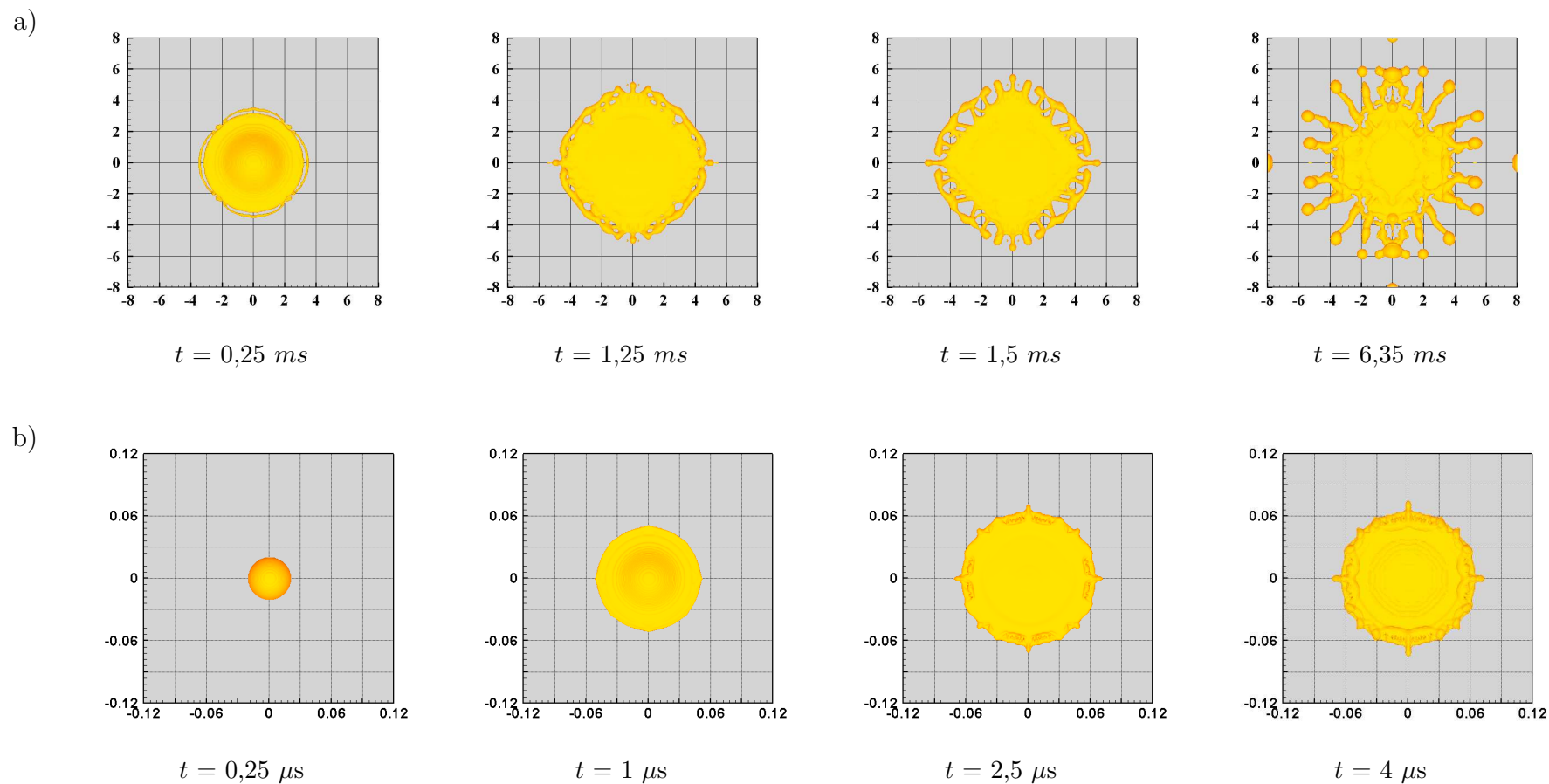


FIGURE 4.3 – Comparaison de l'impact de deux gouttes de cuivre, pour un nombre de We identique (294), sur un substrat froid : a) millimétrique ($d_0 = 3 \text{ mm}$ et $v_i = 4 \text{ m.s}^{-1}$) avec b) micrométrique ($d_0 = 40 \text{ } \mu\text{m}$ et $v_i = 34,6 \text{ m.s}^{-1}$). Les angles de contact sont pour : a) 100° - 20° et b) 90° . $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2.K.W^{-1}$. L'échelle des dimensions est en mm.

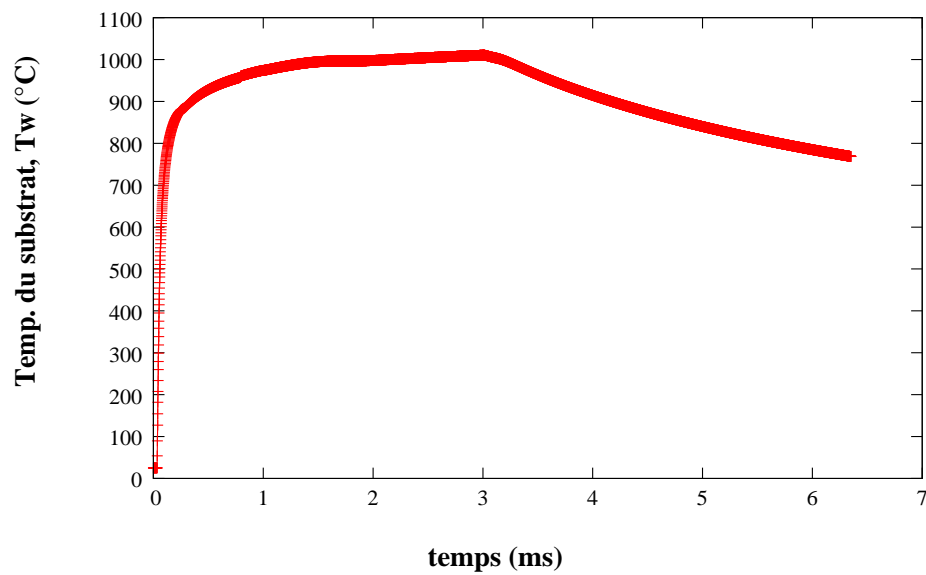


FIGURE 4.4 – Évolution de la température du substrat, au centre de la zone d'impact, d'une goutte de cuivre millimétrique avec une vitesse de 4 m.s^{-1} ($We = 294$).
 $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2.K.W^{-1}$ et $\theta_d = 100^\circ - 20^\circ$.

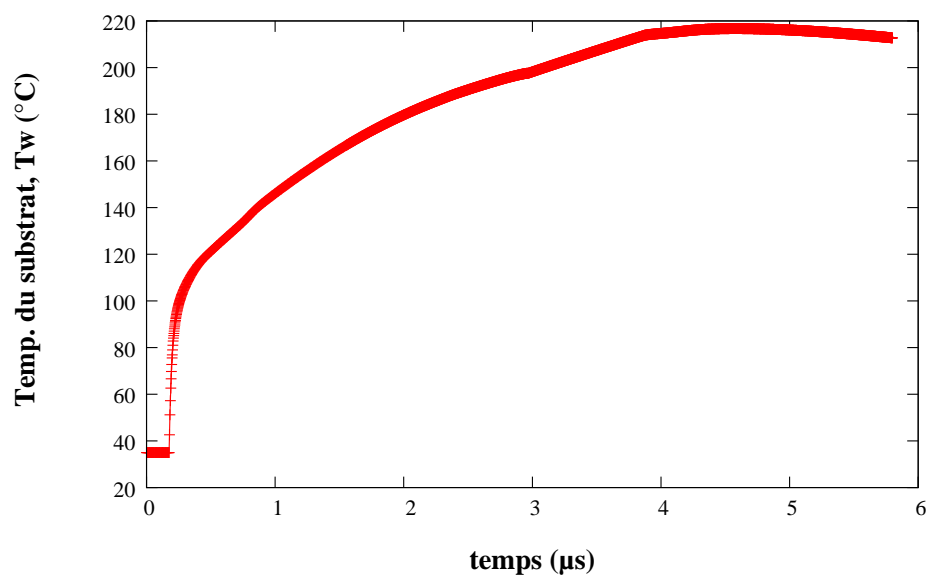


FIGURE 4.5 – Évolution de la température du substrat, au centre de la zone d'impact, d'une goutte de cuivre micrométrique avec une vitesse de $34,6 \text{ m.s}^{-1}$ ($We = 294$).
 $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2.K.W^{-1}$ et $\theta = 90^\circ$.

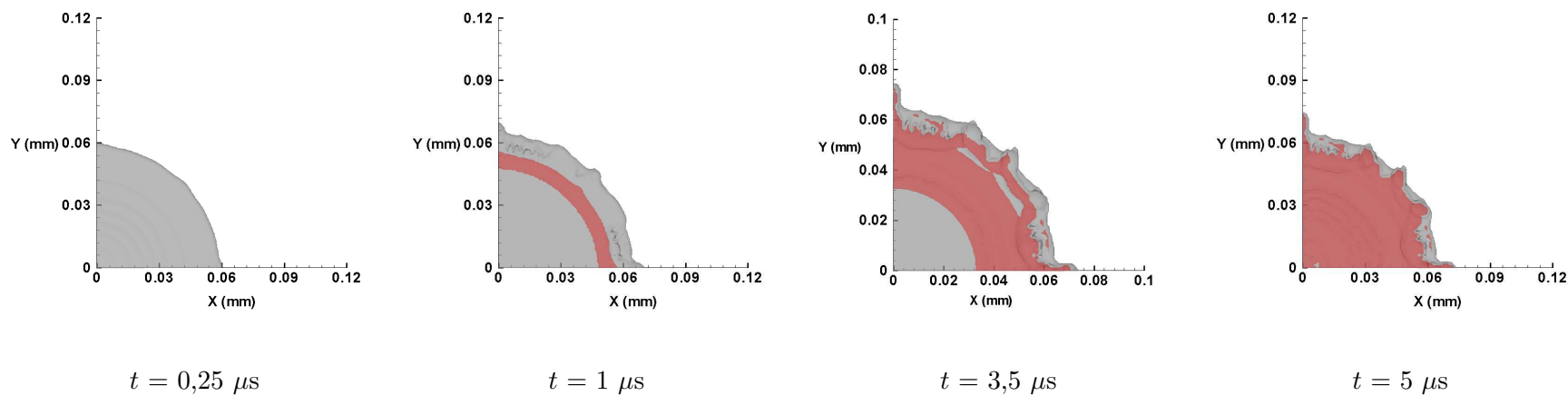


FIGURE 4.6 – Vues de dessus de l'étalement (couleur grise) et la solidification (couleur rouge) d'une goutte de cuivre impactant à une vitesse de $34,6 \text{ m.s}^{-1}$ sur un substrat en acier inox. $d_0 = 40 \mu\text{m}$, $T_{\text{sub}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{g,0} = 1215 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta = 90 \text{ }^\circ$ et $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$.

4.3 Impact sur un substrat lisse

4.3.1 Comparaison entre une goutte céramique et une goutte métallique

La Fig. 4.7 montre l'évolution de la température superficielle du substrat en acier inoxydable, au centre de la zone d'impact pour une particule de zircone et une particule de cuivre impactant à une vitesse de $v_i = 150 \text{ m.s}^{-1}$ (soit respectivement $We = 1\,166$ pour la particule de zircone et $5\,527$ pour la particule de cuivre); la température initiale du substrat est de $35 \text{ }^\circ\text{C}$ et la résistance thermique de contact est constante et égale à $10^{-6} \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$.

La température du substrat en contact avec la goutte de zircone (YSZ) s'élève progressivement pour atteindre un maximum de $425 \text{ }^\circ\text{C}$ en $5 \mu\text{s}$ alors que cette température est relativement faible au contact de la goutte de cuivre et atteint $150 \text{ }^\circ\text{C}$ au même instant. Ceci s'explique d'une part, par la différence de la quantité de chaleur contenue dans les gouttes et, d'autre part, parce que la goutte de cuivre impactant avec un nombre de $We = 5\,527$ plus élevé ($1\,166$ pour la zircone), son étalement est plus rapide et la surface de contact avec le substrat est plus importante (voir Fig. 4.8). Son diamètre final D_{max} est égal à $216 \mu\text{m}$ contre $160 \mu\text{m}$ pour la goutte de zircone.

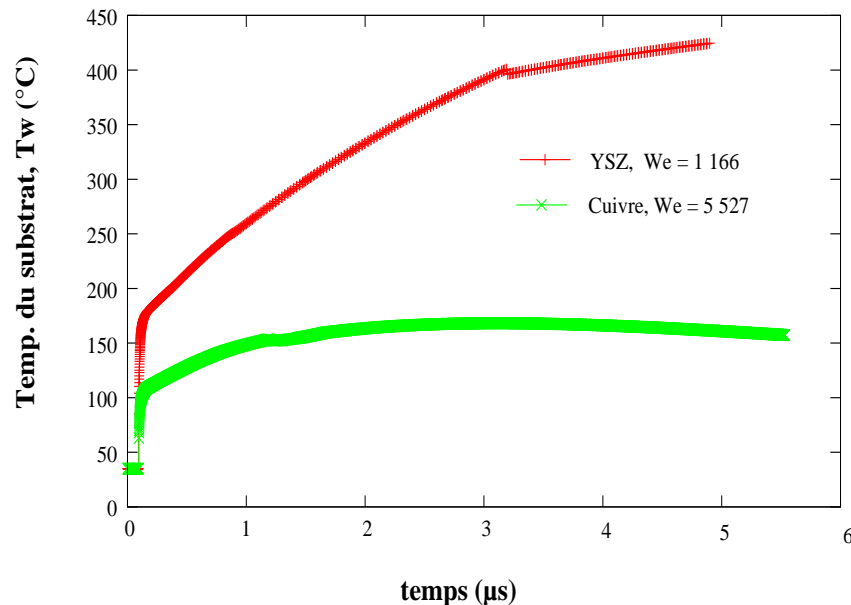


FIGURE 4.7 – Comparaison de l'évolution de la température du substrat, au centre de la zone d'impact, pour une particule de zircone et une particule de cuivre impactant avec des nombres de Weber différents, $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$.

On remarque également (Fig. 4.8), que les lamelles présentent la même forme finale : un disque entouré d'une couronne périphérique, cette dernière étant plus marquée pour la goutte de zircon. La goutte métallique à un degré d'étalement $\xi_{max} = 5,42$ alors que celui de la goutte céramique est de $\xi_{max} = 4$.

Les Fig. 4.9 et 4.10 montrent, respectivement, l'évolution du degré d'étalement et du degré d'aplatissement des particules de zircon et de cuivre après impact sur un substrat froid. Le Tableau 4.3 compare le degré d'étalement finale des 2 gouttes obtenu par les simulations numériques, aux corrélations proposées par Madejski [4] et par Bertagnolli et al. [149].

TABLE 4.3 – Comparaison du degré d'étalement des particules prédit par simulation numérique et par les modèles .

Particule	ξ_{max}^a	ξ_{max}^b	ξ_{max}^c
		$1,29 \times Re^{0,2}$	$0,925 \times Re^{0,2}$
YSZ	4	5,29	3,79
Cuivre	5,42	7,28	5,22

a. Simulation

b. corrélation de Madejski

c. Corrélation de Bertagnolli et al.

La corrélation de Madejski a été établie à l'aide d'un modèle analytique alors que celle de Bertagnolli a été établie à partir de résultats de simulations numériques de l'impact de gouttes. Ces 2 corrélations déterminées pour des conditions d'impact de gouttes rencontrées en projection plasma, relie le degré d'étalement ($\xi_{max} = \frac{D_{max}}{d_0}$) final de la goutte à son nombre de Reynolds à l'impact avec une formule très similaire. En appliquant cette formule aux valeurs du degré d'étalement des gouttes de zircon et de cuivre calculées dans nos simulations, nous obtenons l'expression suivante donnée par l'éq. 4.1.

$$\frac{D_{max}}{d_0} = 0,966 \times Re^{0,2} \quad (4.1)$$

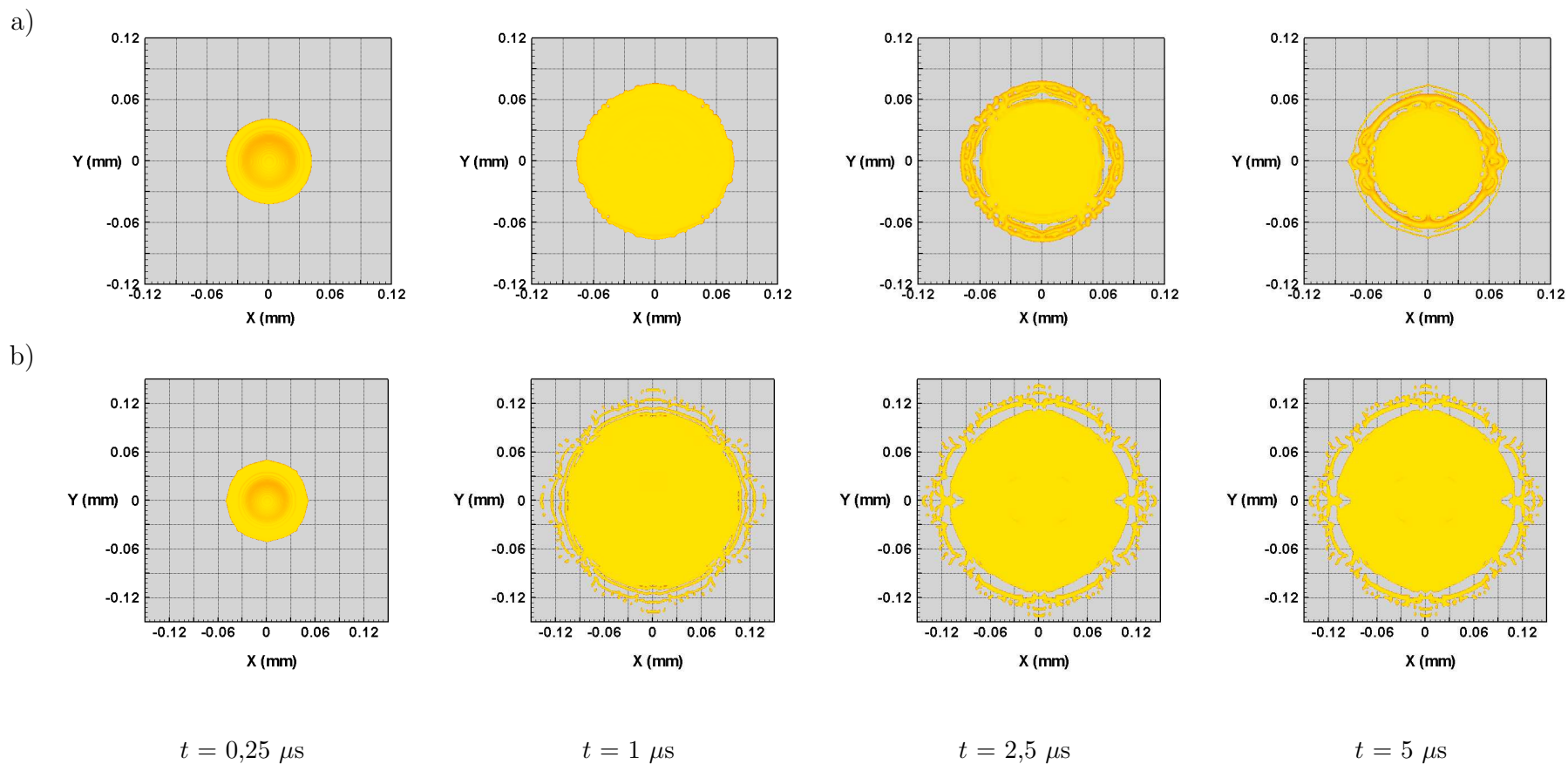


FIGURE 4.8 – Vues de dessus de l'étalement et de la solidification des particules micrométriques de : a) YSZ et b) cuivre projetées à une vitesse de 150 m.s^{-1} sur un substrat en acier inox. . $d_0 = 40 \mu\text{m}$, $T_{\text{sub}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$, $R_{\text{th}} = 10^{-6} \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ et $T_{g,0} = 2800 \text{ }^\circ\text{C}$ et $1215 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivement pour le YSZ et le cuivre et $\theta = 90 \text{ }^\circ$

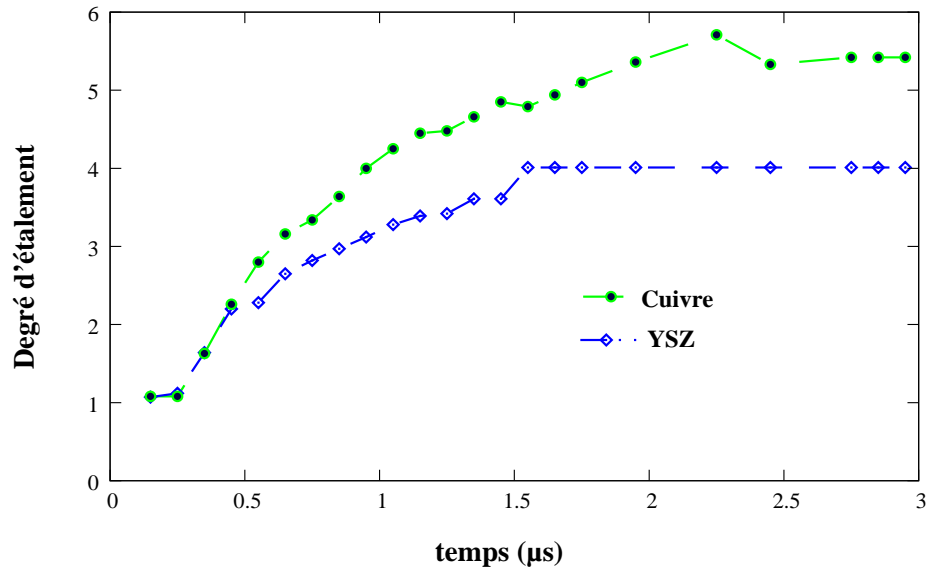


FIGURE 4.9 – Évolution du degré d'étalement d'une goutte de cuivre et d'une goutte de zircone (YSZ) ($v_i = 150 \text{ m.s}^{-1}$) sur un substrat en acier inoxydable. $\theta = 90^\circ$ et $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2.K/W$

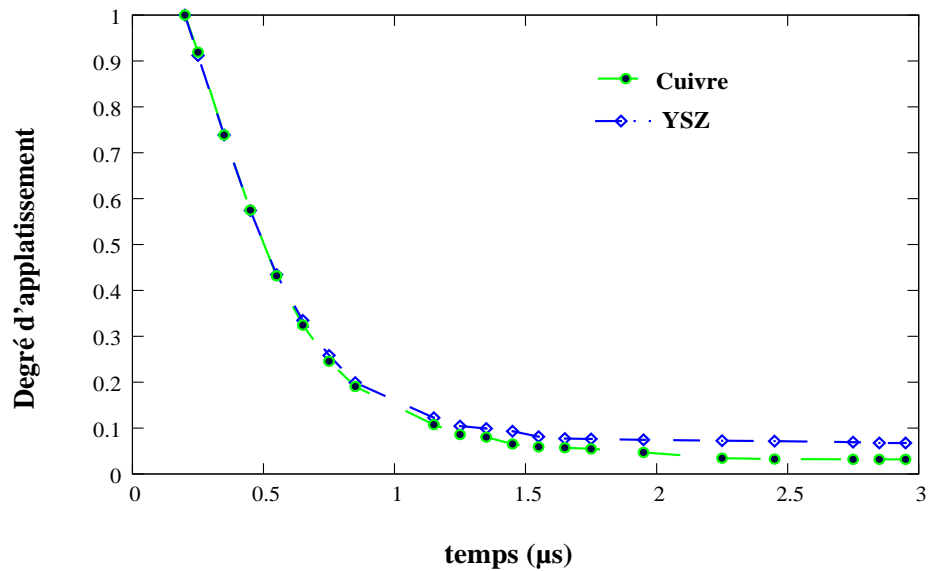


FIGURE 4.10 – Évolution du degré d'aplatissement d'une goutte de cuivre et d'une goutte de zircone (YSZ) ($v_i = 150 \text{ m.s}^{-1}$), au centre de la lamelle, sur un substrat en acier inoxydable. $\theta = 90^\circ$ et $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2.K/W$

La lamelle obtenue par simulation numérique a une forme pratiquement circulaire avec un cœur compact entouré par une couronne périphérique qui se détache alors qu'expérimentalement sur un substrat froid, la lamelle est caractérisée par des projections en périphérie lors de la phase d'étalement comme le montre la Fig. 4.11.

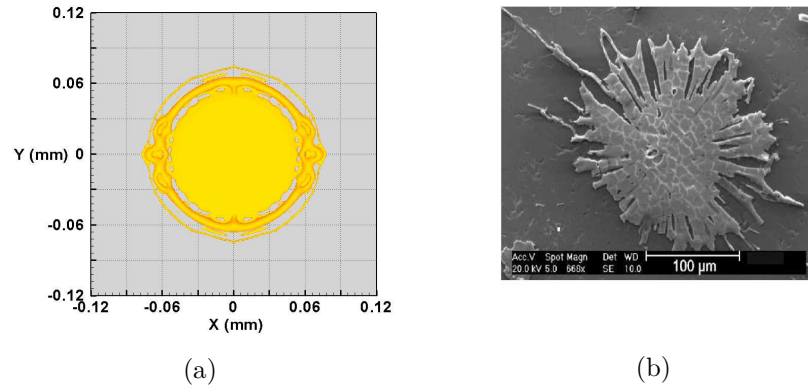


FIGURE 4.11 – Vue de dessus d'une lamelle de zircone obtenue sur un substrat froid en acier inox. (a) par simulation à $t = 5 \mu\text{s}$ pour un angle de contact $\theta = 90^\circ$ et (b) résultat expérimental (d'après [13]).

Les Fig. 4.12 et 4.13 montrent l'influence de la variation de l'angle de contact statique (120° et 70°) lors de l'impact d'une particule de zircone, respectivement sur un substrat froid (35°C) et sur un substrat chaud (200°C). Sur un substrat froid, lorsque l'angle de contact est égal 120° le phénomène de splashing commence à se manifester. Le pourtour de la lamelle se détache du centre et des projections de matières liquides loin du centre d'impact sont observées. Cependant, ces projections sont nettement moins importantes que dans la réalité (Fig. 4.13 b). De plus, les diamètres finaux des lamelles sur substrat chaud ou froid sont peu différents. Pour s'approcher des conditions réelles, il conviendrait certainement d'utiliser une R_{th} évoluant au cours de l'étalement le long du rayon de la particule avec par exemple pour le substrat froid une forte augmentation de R_{th} avec l'étalement, mais malheureusement nous ne disposons pas de ces données.

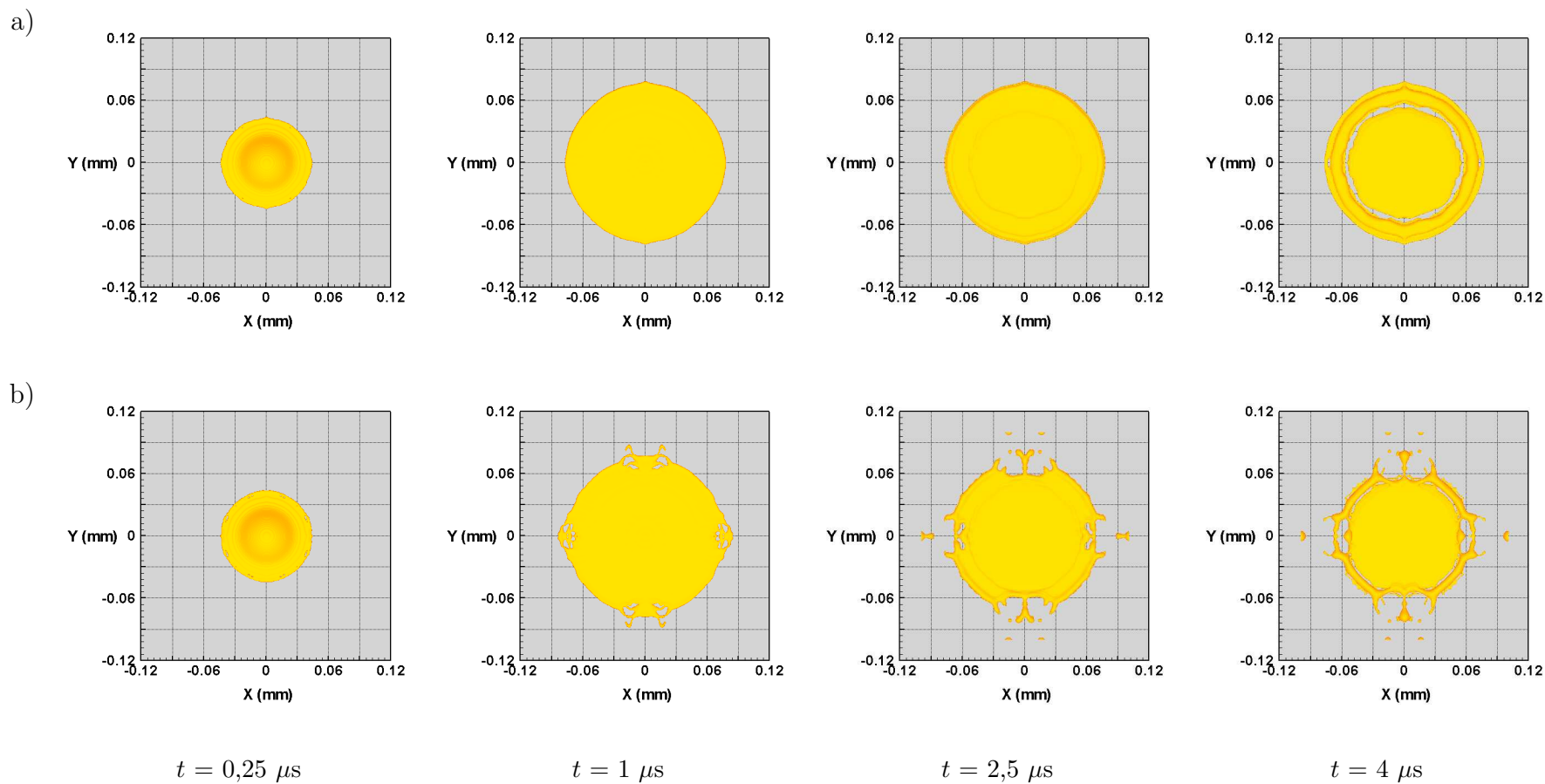


FIGURE 4.12 – Vues de dessus de l'étalement des particules de YSZ sur un substrat froid ($35 \text{ }^\circ\text{C}$) en acier inox. Vues obtenues pour deux cas de l'angle de contact a) 70° et b) 120° .

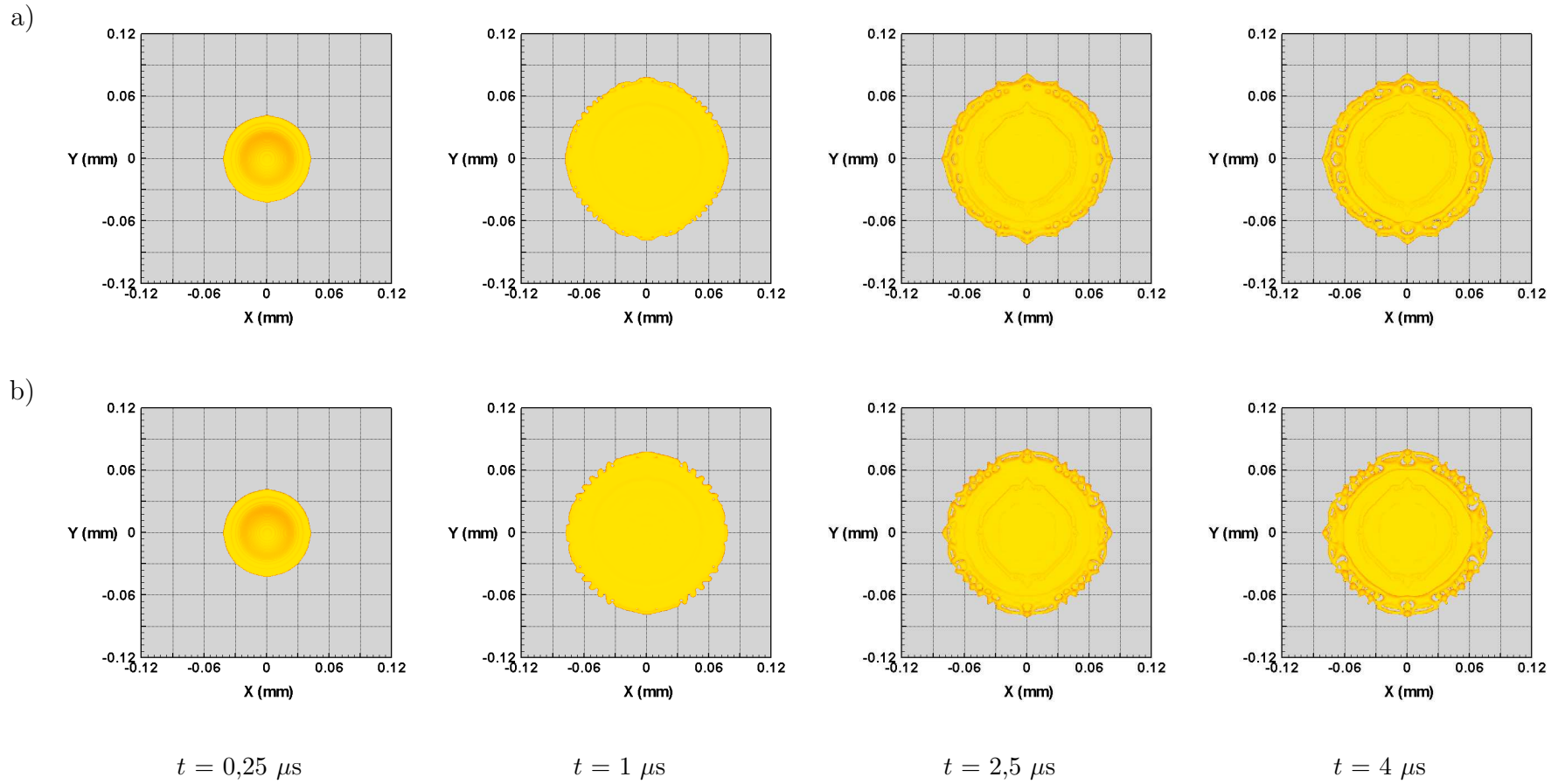


FIGURE 4.13 – Vues de dessus de l'étalement des particules de YSZ sur un substrat chaud ($200 \text{ }^\circ\text{C}$) en acier inox. . Vues obtenues pour deux cas de l'angle de contact a) 70° et b) 120° .

4.3.2 Influence des propriétés thermiques du substrat

La nature du substrat est un des paramètres qui peut influencer sur le refroidissement de la lamelle pendant la phase d'étalement et sur le développement de la solidification. Pour étudier cette influence, nous avons sélectionné trois substrats de nature différente : le cuivre, l'acier inoxydable et la zircone. Leurs propriétés thermophysiques sont résumées dans le Tableau 4.4. et en particulier la diffusivité thermique qui joue un rôle prépondérant en régime transitoire.

Les simulations numériques ont été réalisées d'une part sur un substrat froid avec une R_{th} constante de $10^{-6} \text{ m}^2.K/W$ et d'autre part sur un substrat chaud à $200 \text{ }^\circ\text{C}$ avec une R_{th} constante de $10^{-7} \text{ m}^2.K/W$, la température initiale des particules de zircone à l'impact étant de $2800 \text{ }^\circ\text{C}$ ($85 \text{ }^\circ\text{C}$ au-dessus de la température de fusion). Les paramètres des particules sont ceux du Tableau 4.1.

Les formes finales des lamelles sont présentées sur les Figs. 4.14 et 4.15 respectivement.

Sur un substrat froid, quelle que soit la nature du substrat, la lamelle garde un cœur circulaire avec une couronne périphérique plus ou moins détachée du cœur (voir fig 4.14).

Sur le substrat chaud, les lamelles étalées sur le substrat en cuivre et le substrat en acier inoxydable ont une forme de disque (voir 4.15 (a) et (b)) avec un diamètre moyen de $160 \text{ }\mu\text{m}$ (et un degré d'étalement ξ_{max} de 4). La forme de la lamelle sur le substrat en acier inoxydable est en assez bon accord avec les observations expérimentales de Bianchi et al. [147] et Cedelle et al. [150]. Les lamelles formées sur un substrat en zircone ont la même forme sur substrat chaud et substrat froid (Fig. 4.15 c)

TABLE 4.4 – Propriétés thermophysiques des substrats sélectionnés

Substrat	Propriétés thermiques ^a			
	ρ (kg.m^{-3})	C_p ($\text{J.kg}^{-1}.K^{-1}$)	κ ($\text{W.m}^{-1}.K^{-1}$)	α ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) $\times 10^{-6}$
Cuivre	8 933	385	401	117
Acier inox.	7 055	480	15,1	2.5
Zircone	6 570	683	2	0,44

a. Calculées à la température ambiante

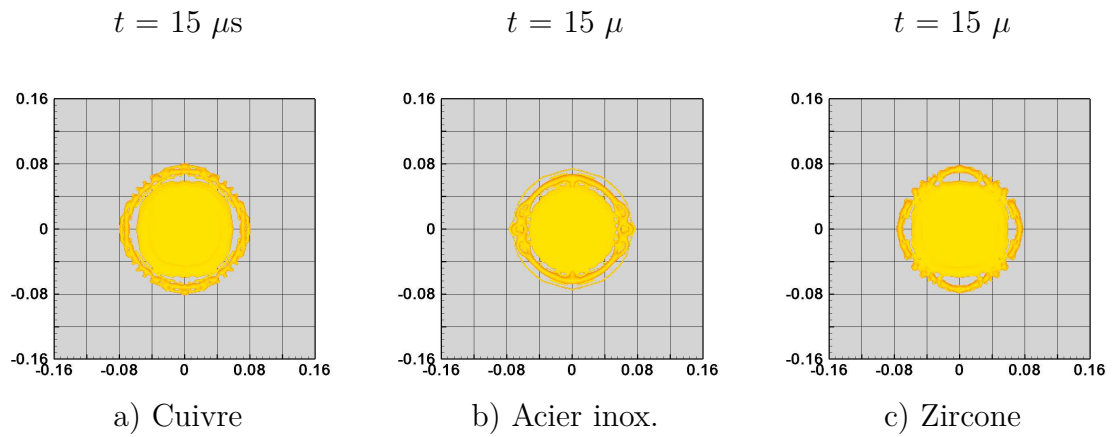


FIGURE 4.14 – Vues de dessus des lamelles de Zircone obtenues sur différents substrats froids ($35 \text{ }^\circ\text{C}$) avec $\theta = 90^\circ$. Échelle de graduation en mm.

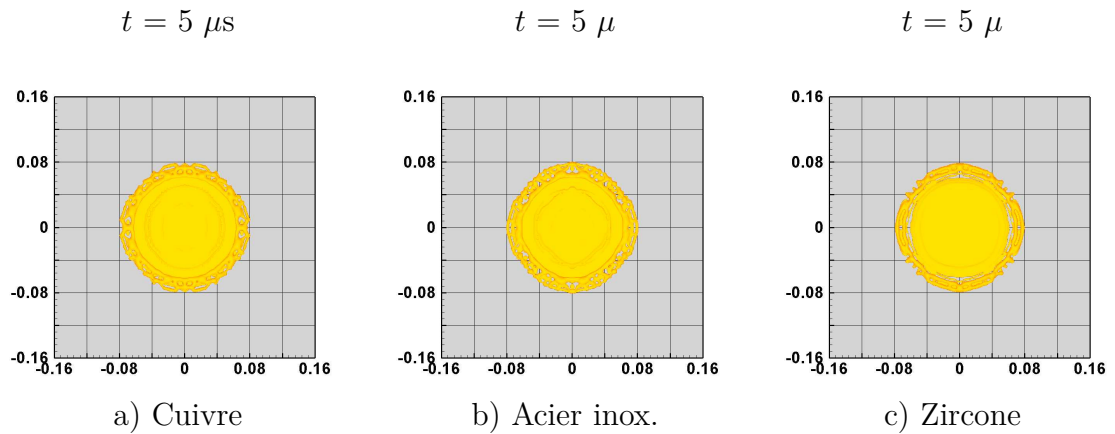


FIGURE 4.15 – Vues de dessus des lamelles de zircone obtenues sur différents substrats chauds ($200 \text{ }^\circ\text{C}$) avec $\theta = 90^\circ$. Échelle de graduation en mm.

L'évolution de la température superficielle du substrat au centre de la zone d'impact montre des différences notables de température pour les trois substrats sélectionnés (Fig. 4.16). Dans tous les cas, la température augmente rapidement depuis la température initiale pour atteindre un maximum puis elle décroît pendant la fin de l'étalement de la goutte

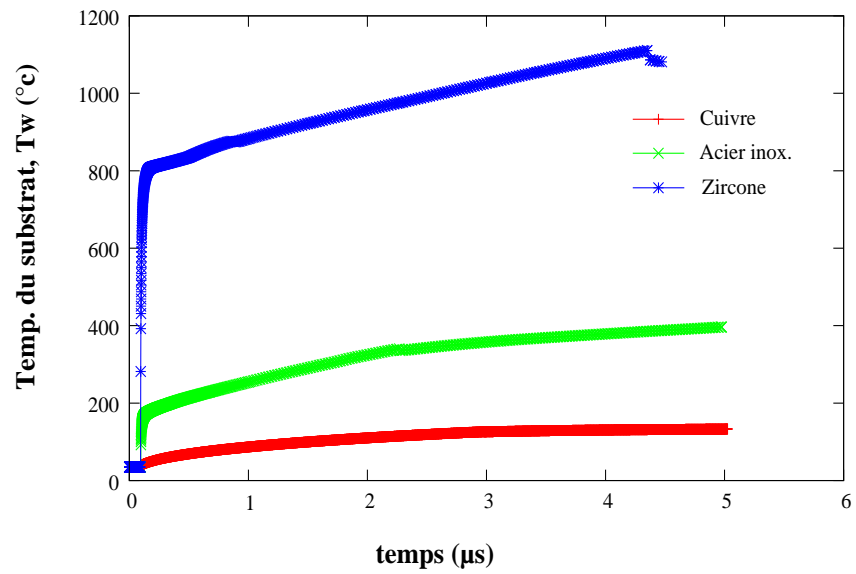
Pour un substrat froid, la température du substrat en zirconium est assez élevée, au centre de la zone d'impact. Elle peut atteindre 1 100 °C en 4 μ s, alors que pour les substrats en cuivre et en acier inoxydable, les températures sont beaucoup plus faibles, soit respectivement 125 °C et 400 °C au même instant (Fig. 4.16 (a)).

Pour un substrat chaud, la température du substrat de zirconium atteint presque 2 000 °C, alors que pour le substrat en cuivre avec une diffusivité thermique 265 fois plus élevée, elle atteint 400 °C. Comme attendu, la température atteinte par le substrat d'acier est intermédiaire entre ces 2 valeurs, mais plus proche du cuivre dont la diffusivité est 6 fois plus élevée.

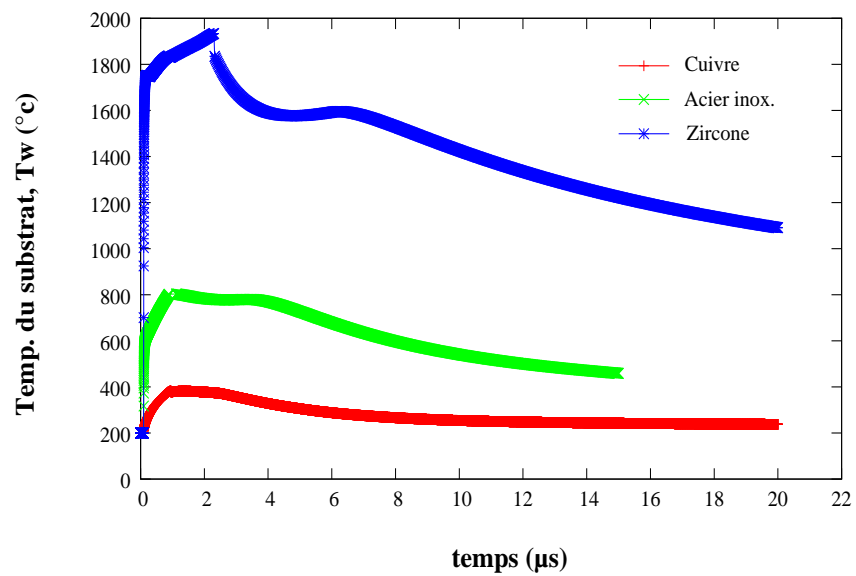
Les Figs. 4.17 et 4.18 présentent l'évolution du champ de température dans une lamelle de zirconium s'étalant sur un substrat de cuivre, d'acier ou de zirconium, respectivement froid (25 °C) ou chaud (200 °C). L'extraction plus rapide de l'enthalpie de la goutte par le substrat chaud en cuivre limite considérablement le développement d'un gradient thermique dans la lamelle (Fig. 4.18 (a)). En revanche, le gradient thermique dans la lamelle est plus marqué pour le substrat chaud en zirconium (c).

Par contre, sur un substrat froid, avec une R_{th} plus élevée ($10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) contrôle le transfert de chaleur à l'interface lamelle/substrat et retarde le refroidissement de la lamelle (Fig. 4.17 (a) (b) (c)). La phase solide commence à apparaître sur le substrat en cuivre, initialement à 25 °C, 2 μ s après l'impact (Fig. 4.19), alors que sur le substrat en cuivre à 200 °C, elle apparaît pratiquement dès le début de l'étalement à $t = 0,8 \mu$ s (Fig. 4.18 (a) et (c)). En revanche, sur le substrat chaud en zirconium, la solidification ne commence que vers la fin de l'étalement de la lamelle (Fig. 4.18 (c)), ce qui s'explique par une température plus élevée de la couche de zirconium sous-jacente à la lamelle et qui n'évacue que lentement la chaleur.

L'apparition de zones solidifiées dans la lamelle, à partir de l'interface lamelle/substrat, entraîne une élévation de la matière liquide dans la zone périphérique pendant l'étalement. Le contact lamelle avec le substrat est alors moins bon, comme le montrent les Figs. 4.21 et 4.22. Ce mauvais contact à l'interface crée des zones dépourvues de matière en périphérie de la lamelle et peut générer de la porosité au son sein. L'épaisseur (au centre) de la lamelle de zirconium étalée sur un substrat à 200 °C est de l'ordre de 2,5 μ m (Fig. 4.22 (a)).



(a)



(b)

FIGURE 4.16 – Évolution de la température superficielle du substrat, au centre de la zone d'impact, pour différents substrats (a) froid (25° C) et (b) chaud (200° C).

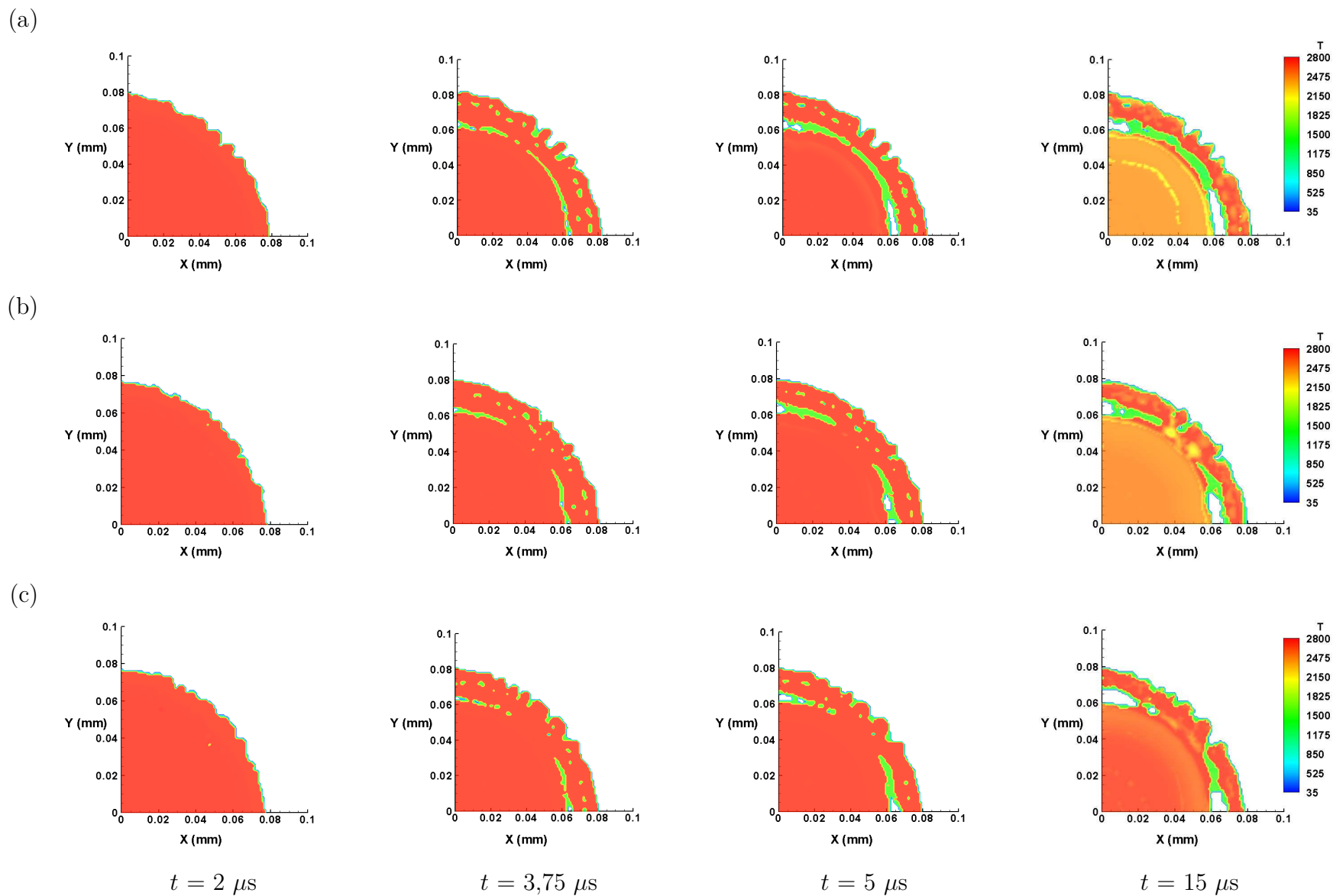


FIGURE 4.17 – Vues de dessus de l'évolution du champ de température dans une lamelle de zircon sur différents substrats initialement à 35 °C : (a) cuivre, (b) acier inox. et (c) zircon. Les conditions d'impact sont résumées dans le Tableau 4.1

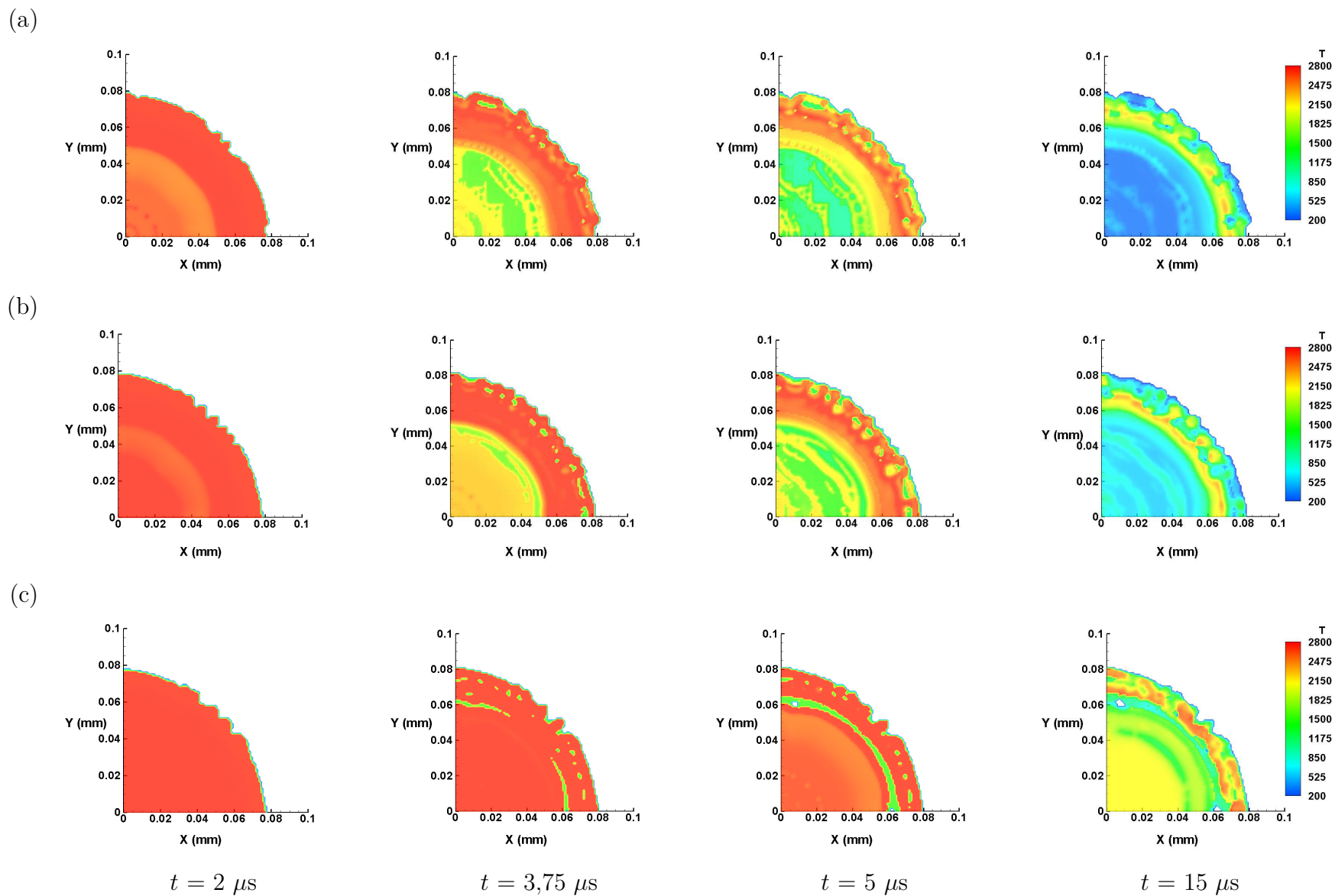


FIGURE 4.18 – Vues de dessus de l'évolution du champ de température dans une lamelle de zircon sur différents substrats initialement à 200°C et $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$: (a) cuivre, (b) acier inox. et (c) zircon. Les conditions d'impact sont résumées dans le Tableau 4.1

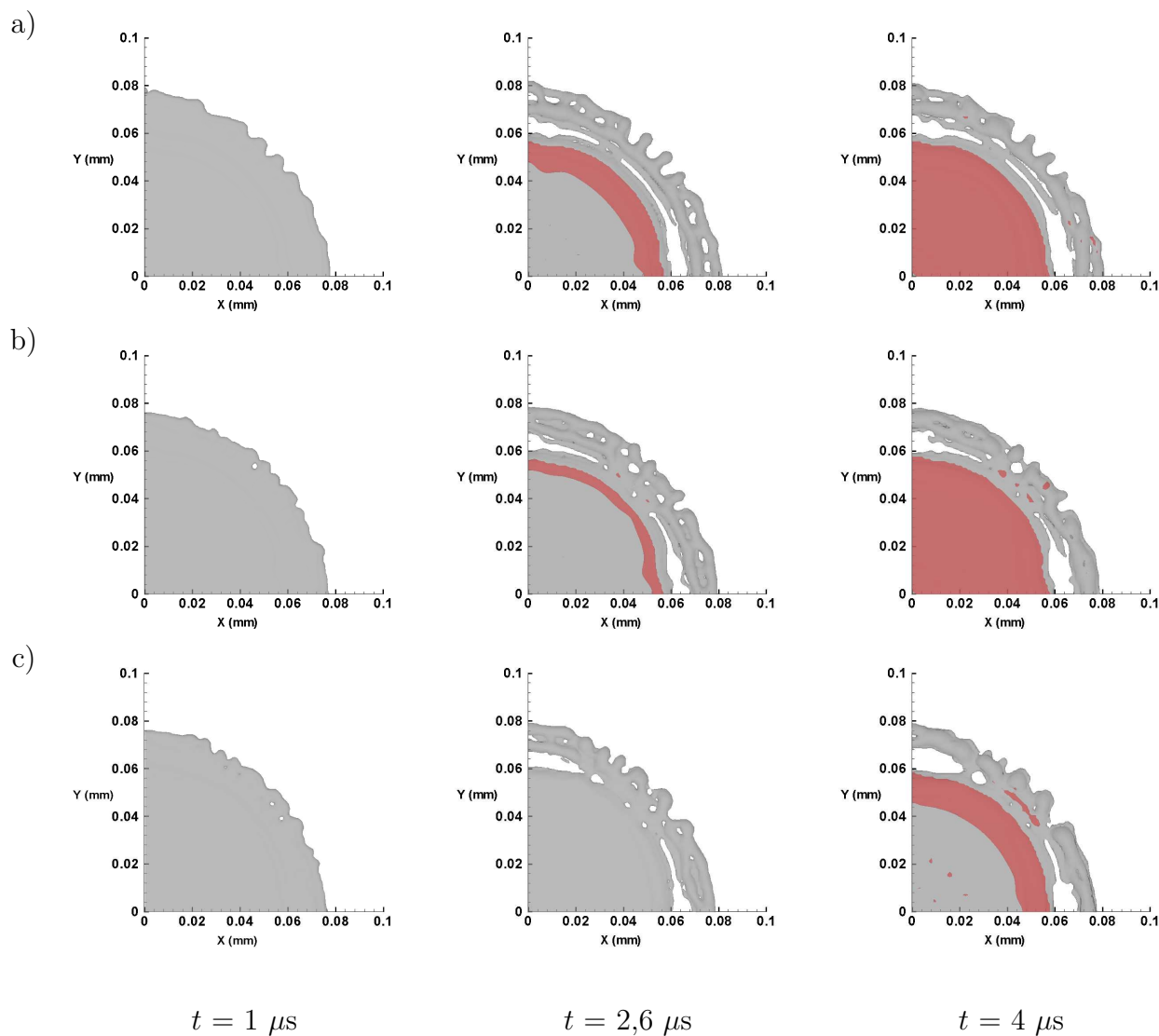


FIGURE 4.19 – Vues de dessus du début de la solidification (couleur rouge) dans une particule de YSZ liquide (couleur grise) durant son étalement sur différents substrats initialement à $35 \text{ }^\circ\text{C}$ et $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$: (a) cuivre, (b) acier inox. et (c) zircone. Les conditions d'impact sont résumées dans le Tableau 4.1

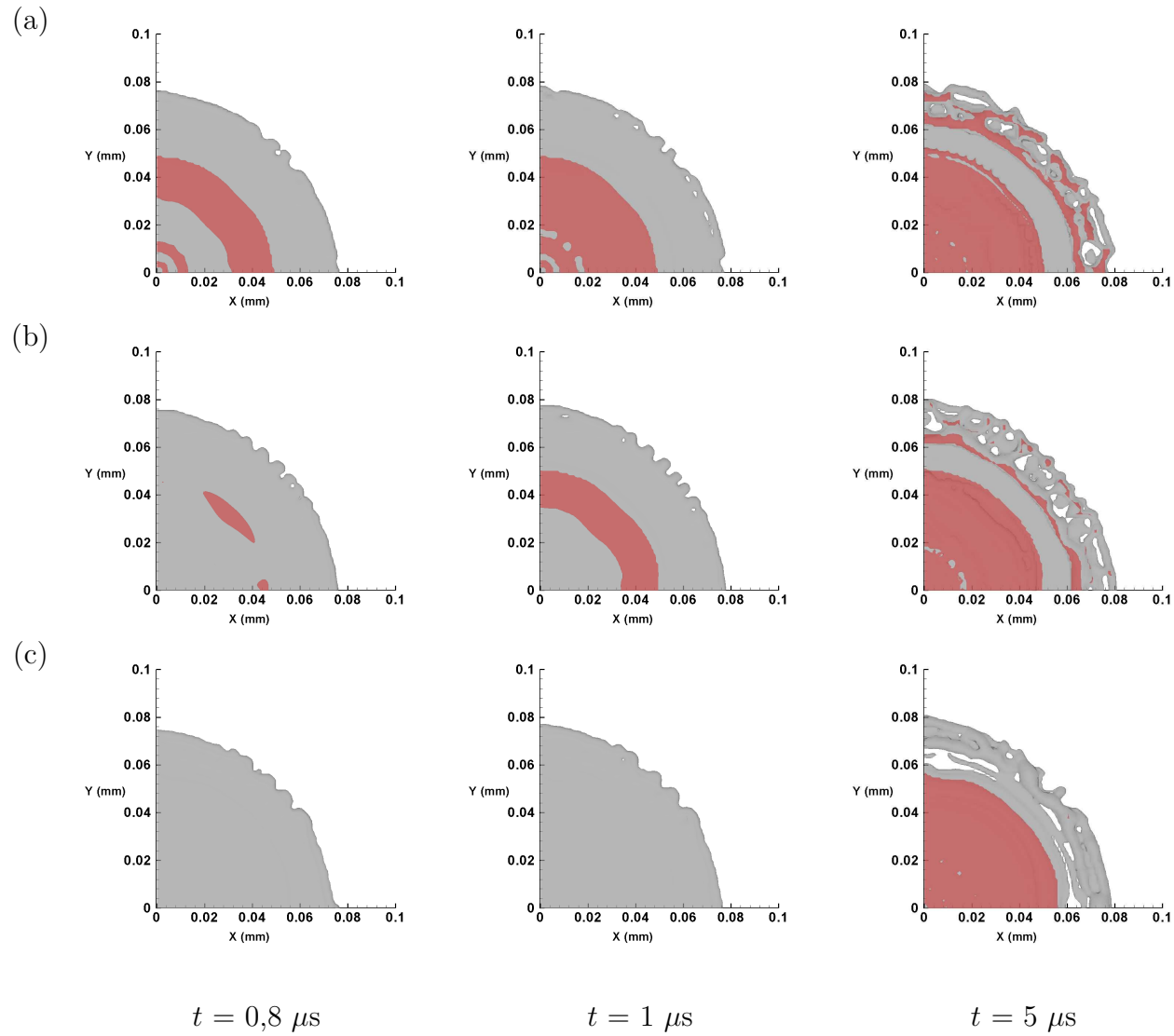


FIGURE 4.20 – Vues de dessus du début de la solidification (couleur rouge) dans une particule de YSZ liquide (couleur grise) durant son étalement sur différents substrats initialement à $200 \text{ }^\circ\text{C}$ et $R_{th} = 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$: (a) cuivre, (b) acier inox. et (c) zircone. Les conditions d'impact sont résumées dans le Tableau 4.1

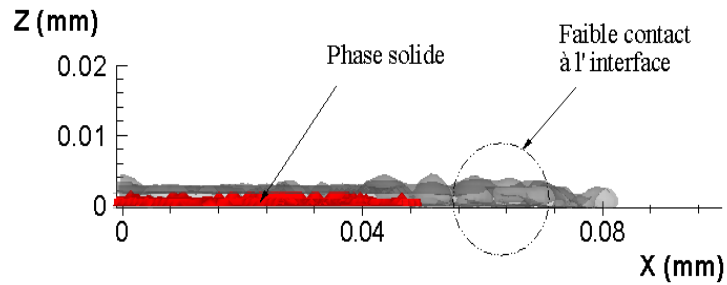


FIGURE 4.21 – Solidification de la lamelle (la couleur rouge caractérise la partie solide et la couleur grise correspond à la lamelle liquide), à l'instant $t = 2,35 \mu$, sur un substrat chaud ($200 \text{ }^\circ\text{C}$) en acier inox.

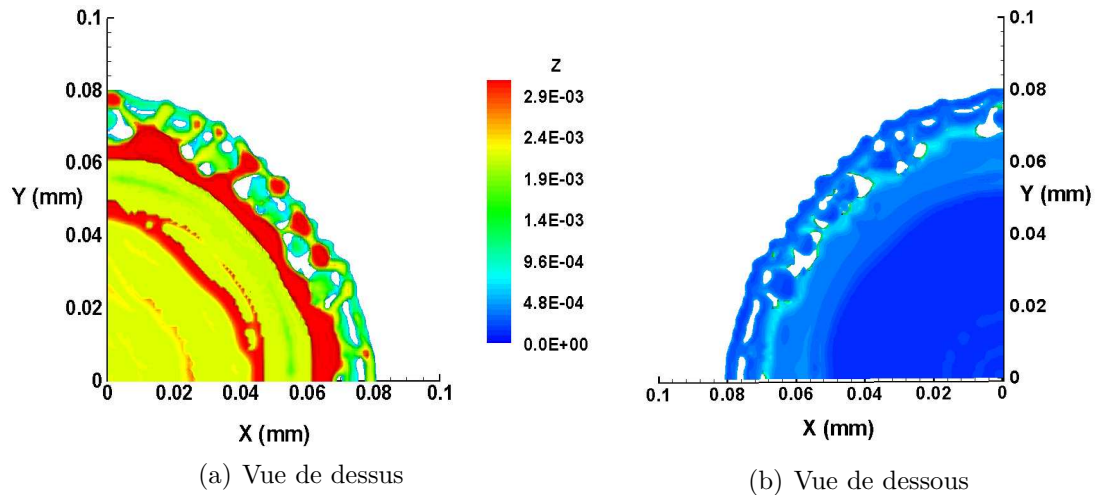


FIGURE 4.22 – Profil de l'épaisseur d'une lamelle de zirconie étalée sur un substrat chaud ($200 \text{ }^\circ\text{C}$) en acier. inox. (a) vues de dessus et (b) vue de dessous.

4.4 Impact sur un substrat rugueux

L'adhérence d'un dépôt projeté par plasma sur une surface métallique se fait essentiellement par l'accrochage mécanique des particules qui se solidifient sur le substrat, et cet accrochage dépend dans une large mesure de la rugosité de substrat [14]. Conventionnellement, la surface du substrat subit une opération de sablage pour créer une rugosité de surface et améliorer ainsi l'accrochage mécanique des lamelles.

La rugosité de surface peut être caractérisée par une valeur moyenne R_a qui représente la moyenne arithmétique de toutes les ordonnées du profil dans une longueur de base. La Fig. 4.23 montre un exemple du profil d'une surface rugueuse obtenue par un procédé de sablage.

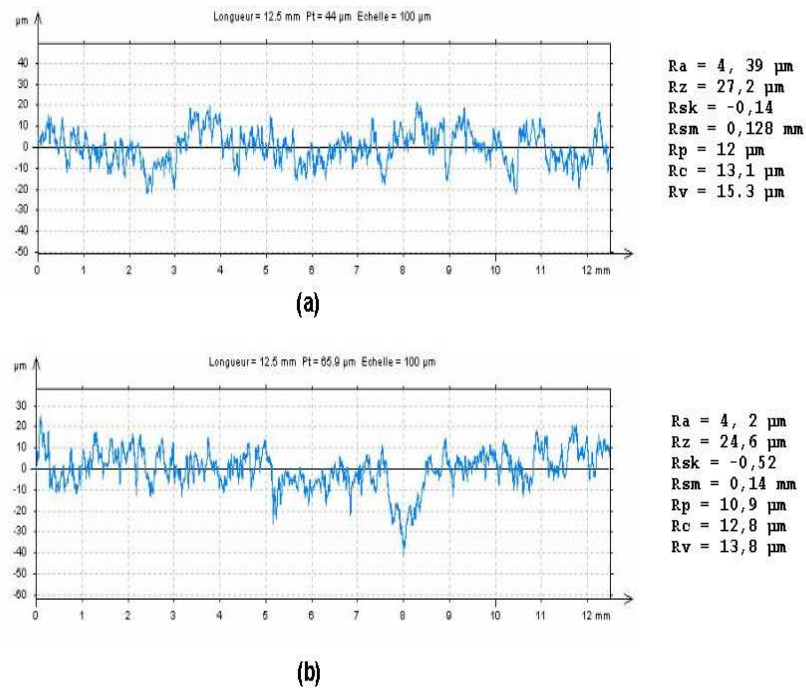


FIGURE 4.23 – Profil d'une surface rugueuse obtenue par sablage. Valeurs des principaux paramètres qui qualifient la rugosité et les paramètres de rugosité.

Cependant, ce paramètre R_a ne tient compte que de la valeur moyenne de la hauteur des pics. Or ce paramètre ne suffit pas à lui seul à expliquer la dynamique d'écoulement de la goutte et l'apparition du phénomène de splashing, observées dans beaucoup de travaux [83], [12] [42], [22] et [13]. Bahbou et al. [15] ont montré que l'adhérence des particules sur substrat rugueux ne dépend pas du R_a ou du R_t (distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux) mais d'un autre paramètre de rugosité noté $R_{\Delta q}$ qui prend en compte les dimensions des pics et la distance entre eux.

En effet, au moment de l'impact de la goutte, la pression d'impact ($\propto (v_i)$) favorise la pénétration de la goutte dans les interstices. Par contre, durant la phase d'étalement la pression de la goutte diminue fortement et le liquide doit cependant remplir les creux et s'écouler à travers les pics. Il est donc important pour étudier la formation des lamelles en projection plasma de prendre en compte les paramètres de rugosité en tenant compte des dimensions caractéristiques de la surface.

Pour étudier ces paramètres de rugosité, le code Simulent nous permet de considérer une surface rugueuse "idéale" en imposant des dimensions caractéristiques pour simuler la rugosité du substrat. Cette surface idéale comporte un champ de colonnes carrées caractérisées par leur distance (D), leur hauteur (H) et leur largeur (L) comme le montre la Fig. 4.24. Les trois dimensions caractéristiques sont introduites dans le code en micromètres.

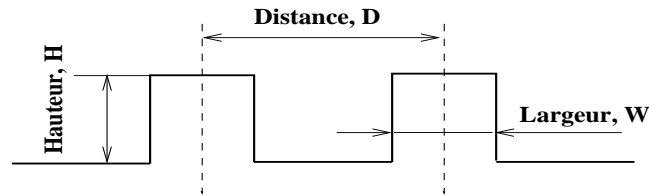


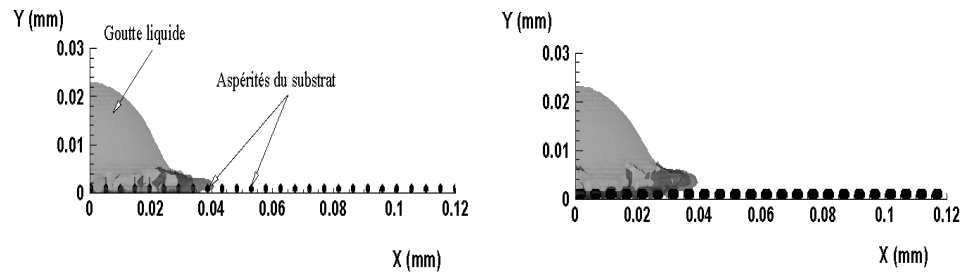
FIGURE 4.24 – Caractéristiques d'une surface rugueuse utilisée dans la simulation de l'impact de particules micrométriques.

La projection des particules à été réalisée sur un substrat d'acier inoxydable maintenu à 200 °C et avec une résistance thermique de contact R_{th} constante de $10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$. Les conditions de projection sont résumées dans le Tableau 4.1.

La Fig. 4.25 montre l'étalement de la goutte, à $t = 0,225 \mu\text{s}$ après impact, sur deux types de surfaces rugueuses caractérisées par une largeur de pic différente (1 et $3 \mu\text{m}$). L'étalement de la particule dépend fortement, pour une même distance D , de la largeur des pics (W). Avec un pic plus large (W), et donc un espacement plus faible entre deux colonnes successives, le liquide pénètre plus difficilement dans les interstices du substrat dès que la pression diminue. Ceci est illustré par la Fig. 4.25 (b). On remarque que pour $W = 3 \mu\text{m}$, avec une hauteur $H = 3 \mu\text{m}$, lorsque le diamètre de la lamelle devient supérieur à $0,03 \text{ mm}$, le liquide n'est plus en contact avec le substrat. Le film liquide en avant de la goutte s'étalant au-dessus des pics. Par contre pour $W = 1 \mu\text{m}$ (Fig. 4.25 a)), à cette même distance, le liquide est encore en contact avec le substrat.

Le Fig. 4.26 montre l'étalement de lamelles de zircone sur les mêmes substrats que ceux de la Fig. 4.25. On remarque que la solidification se produit au centre de la zone d'impact, pour la surface dont les pics ont une largeur $W = 1 \mu\text{m}$. La solidification est favorisée par une pression à l'impact assez importante de l'ordre de $1\,400 \text{ MPa}$, comme le montrent les Figs. 4.26 a) et 4.27 a) et b). Lorsque la largeur des pics $W = 3 \mu\text{m}$, bien que la pression à l'impact soit la même, la goutte liquide ne remplit pas facilement les interstices du substrat ce qui retarde son refroidissement, et le liquide éclabousse favorisant ainsi le phénomène de digitation.

Quand on fait varier la valeur de la hauteur des pics (H), comme indiqué sur la fig. 4.27, l'étalement est bloqué selon la diagonale du substrat du fait de la hauteur des aspérités ce qui favorise sa solidification à $t = 0,2 \mu\text{s}$. Par contre, l'étalement est largement privilégié suivant les directions principales du substrat, à travers les aspérités.



(a) $H = 3 \mu\text{m}$, $D = 5 \mu\text{m}$ et $W = 1 \mu\text{m}$ (b) $H = 3 \mu\text{m}$, $D = 5 \mu\text{m}$ et $W = 3 \mu\text{m}$

FIGURE 4.25 – Vues de profil de l'étalement d'une goutte de zircone, à l'instant $t = 0,225 \mu\text{s}$, après impact sur une surface rugueuse pour 2 valeurs de la largeur des aspérités :

(a) $W = 1 \mu\text{m}$ et (b) $W = 3 \mu\text{m}$.

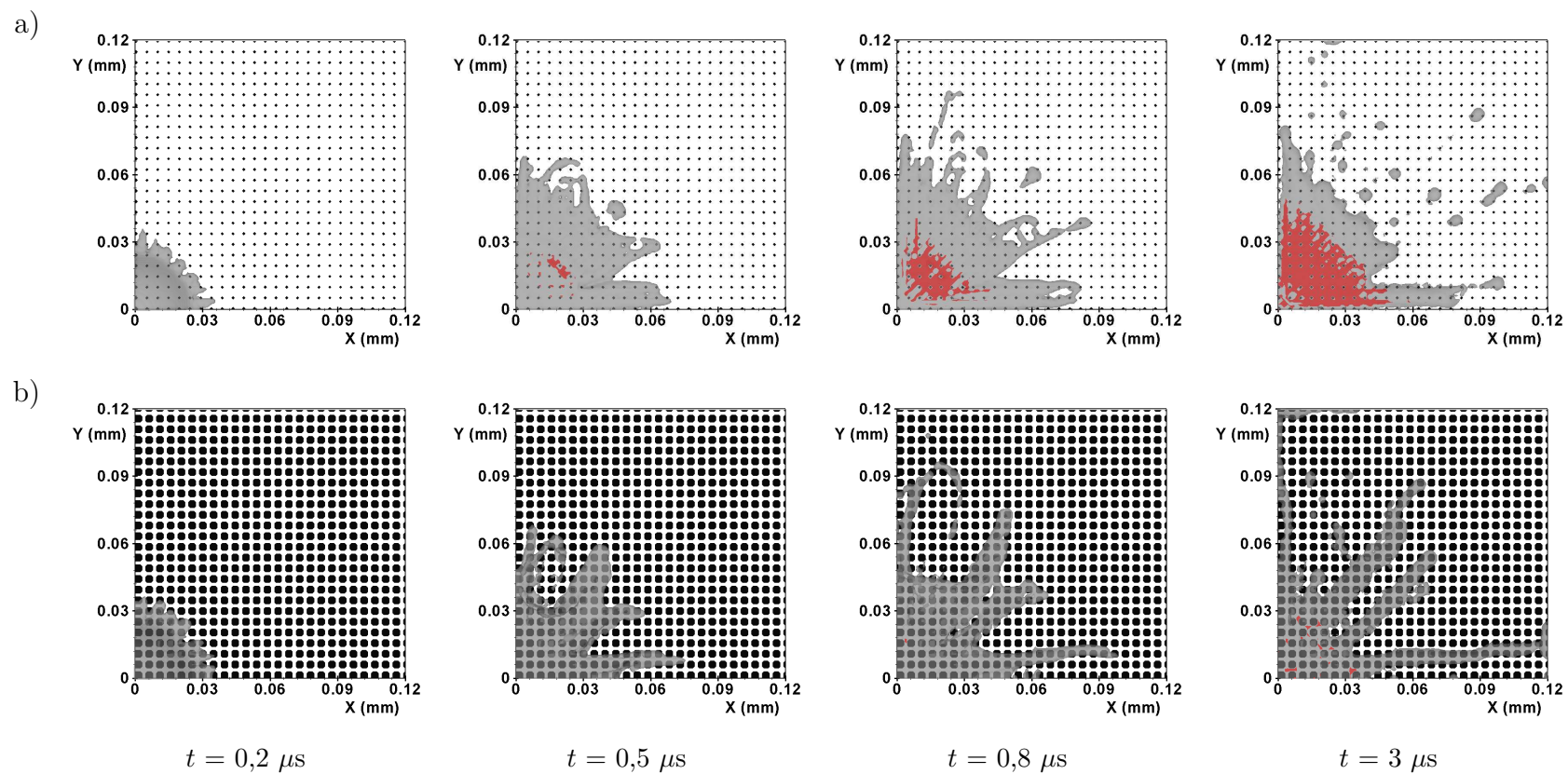


FIGURE 4.26 – Étalement (couleur grise) et solidification (couleur rouge) des particules de YSZ pendant les $3 \mu\text{s}$ après impact sur différentes surfaces rugueuses avec $H = 3 \mu\text{m}$ et $D = 5 \mu\text{m}$ et pour 2 valeurs de la largeur des aspérités : a) $W = 1 \mu\text{m}$ et b) $W = 3 \mu\text{m}$.

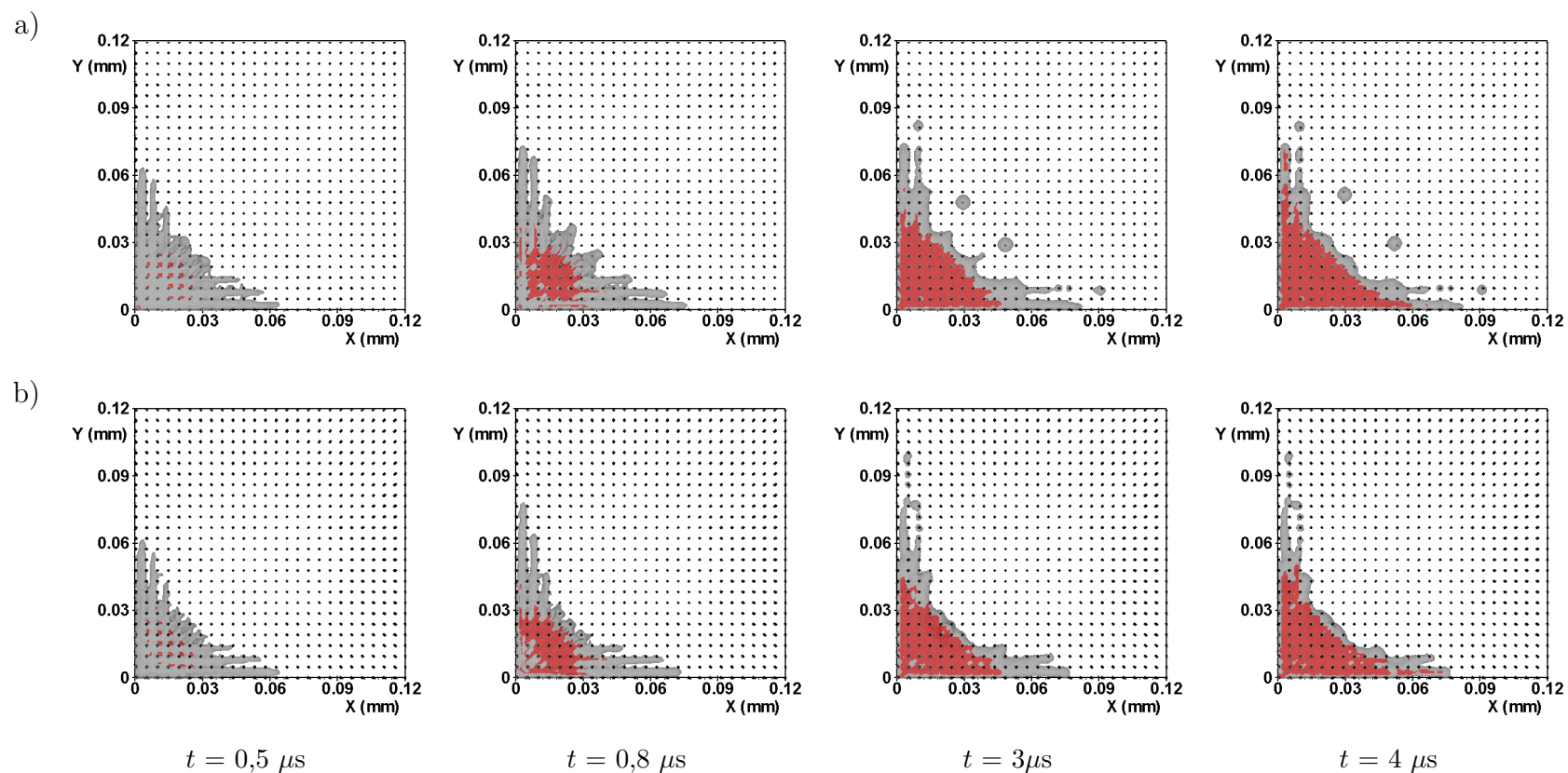


FIGURE 4.27 – Étalement (couleur grise) et la solidification (couleur rouge) des particules de YSZ pendant les 4 μs après impact sur différentes surfaces rugueuses avec μm et $D = 5 \mu m$ et $W = 1 \mu m$ et pour 2 valeurs de la hauteur des aspérités : a) $H = 8 \mu m$ et b) $H = 20 \mu m$.

Il est clair que les dimensions caractéristiques de la rugosité influent considérablement sur l'écoulement et la thermique de la goutte à l'impact. Nous avons donc choisi de réaliser des impacts de gouttes sur des surfaces rugueuses avec différentes valeurs de D et de W en gardant constant la hauteur des pics ($H = 3 \mu m$). Les Figs. 4.28 a) à f) montrent les vues de dessus de l'étalement partiel des gouttes durant la phase finale d'étalement ($t = 2 \mu s$) pour ces différentes rugosités :

Pour $W = 3 \mu m$ (Fig. 4.28 a) à c) le phénomène de digitation est beaucoup plus marqué avec $D = 5 \mu m$, car le liquide ne pénètre pas dans les interstices du substrat (voir Fig. 4.25 b) et se propage plus loin du centre d'impact. Cependant, quand on augmente la distance entre les pics D de 5 à 7 μm , la goutte liquide remplit facilement les interstices ce qui réduit corrélativement la longueur des doigts liquides. La solidification commence 2 μs après l'impact au centre de la lamelle pour des pics plus espacés ($D = 7 \mu m$).

Pour $W = 1 \mu m$, la lamelle liquide pénètre plus facilement dans les interstices, et au contact avec le substrat, le liquide se refroidit plus rapidement : l'apparition de la phase solide est alors accélérée. Des doigts liquides sont également générés durant l'étalement mais ils sont moins importants que dans le cas précédent, et c'est dans ce cas que se produisent les éclaboussures.

La Fig. 4.29 montre, pour deux types de surfaces rugueuses, la pression dans le liquide (Pa) et la vitesse d'écoulement u ($m.s^{-1}$) dans une section de la lamelle, distante de $z = 0,5 \mu m$ de la surface du substrat, au début de l'étalement ($t = 0,225 \mu s$).

On remarque sur la Fig. 4.29 a), correspondant à $W = 3 \mu m$, qu'il y a très peu de zones dans le substrat où la pression est entre 140 MPa et 1 800 MPa ; ces zones sont quasiment dépourvues de matière liquide. En revanche, pour $W = 1$ (voir Fig. 4.29 b) toute la surface d'étalement est remplie de liquide avec une pression moyenne de 420 MPa. La vitesse d'écoulement pour $z = 0,5 \mu m$ (Fig. 4.29 c), confirme bien qu'il n'y a pas de liquide présent entre les pics quand la largeur de ces derniers est $W = 3 \mu m$ et dans les zones où il y a du liquide, la vitesse d'écoulement est très faible. Par contre, si les pics sont plus espacés (Fig. 4.29 b et d) le liquide remplit parfaitement les interstices et s'écoule sans contrainte avec des vitesses supérieures à 200 $m.s^{-1}$.

Ce résultat montre que le processus de solidification de la goutte en étalement sur un substrat rugueux est considérablement affecté par la distance entre les pics car elle contrôle la capacité de la goutte liquide à remplir ou non les interstices entre les aspérités. On remarque également que, la forme des lamelles étalées, bien que le substrat soit chauffé et la résistance thermique de contact soit de l'ordre de $10^{-7} m^2.K.W^{-1}$, n'est plus évidente comme cela a été observé sur surfaces lisses. Cependant les observations expérimentales de lamelles étalées sur surfaces rugueuses confortent les résultats des simulations numériques (voir Fig. 4.30).

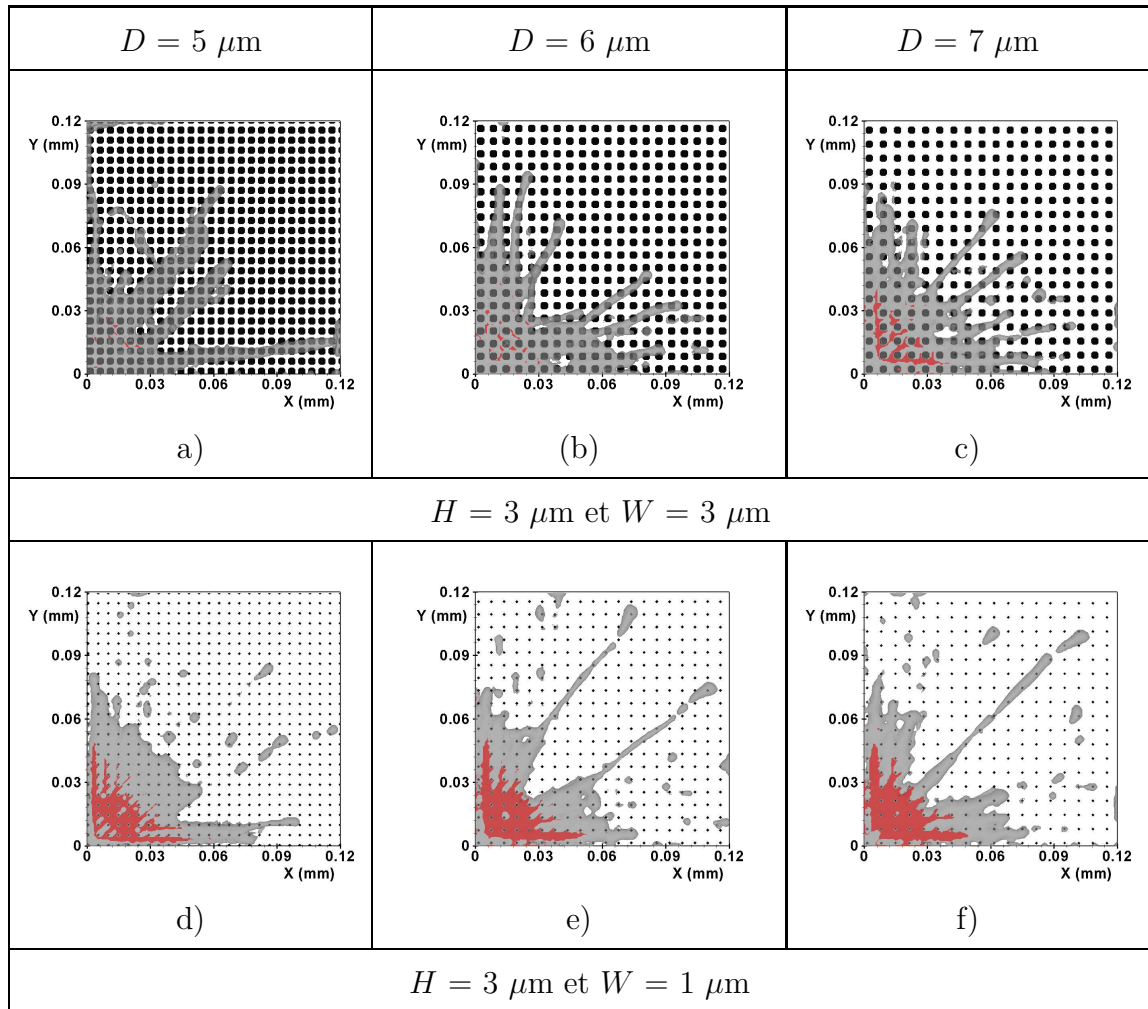


FIGURE 4.28 – Comparaison de l'étalement (couleur grise) et de la solidification (couleur rouge) d'une goutte de zirconie sur des substrats avec différentes valeurs de W et D et H constant $= 3 \mu\text{m}$. Les images de a) à c) $W = 3 \mu\text{m}$ et de d) à f) $W = 1 \mu\text{m}$ avec différentes valeurs de D : a) et d) : $D = 5 \mu\text{m}$, b) et e) : $D = 6 \mu\text{m}$ et c) et f) : $D = 7 \mu\text{m}$. $t = 2 \mu\text{s}$ après impact.

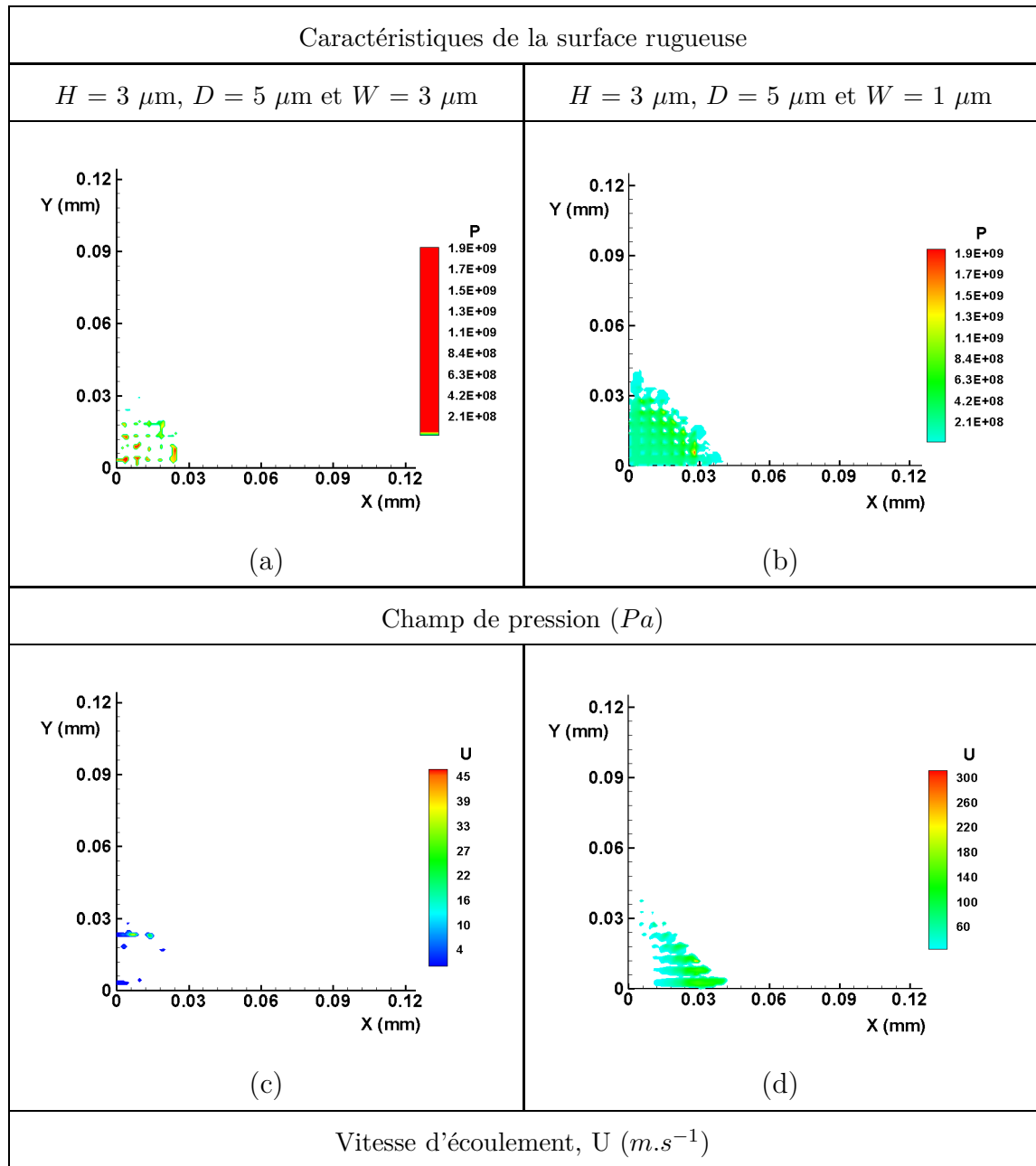


FIGURE 4.29 – Champ de pression et champ de vitesse dans une section de la lamelle, distante de $z = 0,5 \mu\text{m}$, à $t = 0,225 \mu\text{s}$ après impact sur des surfaces rugueuses (a) $W = 3 \mu\text{m}$ et (b) $W = 1 \mu\text{m}$ ($H = 3 \mu\text{m}$, $D = 5 \mu\text{m}$).

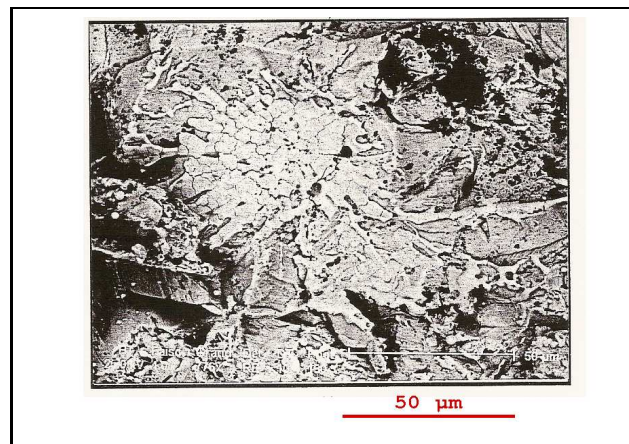


FIGURE 4.30 – Photographie d'une particule de zircone projetée sur un substrat en acier inox. de rugosité $R_a = 6 \mu\text{m}$ et chauffé à $300 \text{ }^\circ\text{C}$ (d'après [12]).

4.5 conclusion du chapitre

Ce chapitre traite de la simulation numérique de l'étalement et de la solidification de particules de cuivre et de zircone sur différents substrats (cuivre, acier inoxydable et zircone) lisses ou rugueux et initialement froid (25 °C) ou chaud (200 °C). Les substrats froids ont été caractérisés par une résistance thermique de contact $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2.K/W$, qui modélise un mauvais contact alors que pour les substrats chauds, elle est imposée à $R_{th} = 10^{-7} \text{ m}^2.K/W$ (bon contact lamelle-substrat).

Pour des substrats lisses, les simulations numériques nous ont permis de mettre en évidence l'importance :

- de la nature des gouttes et de leurs paramètres d'impact (vitesse et température) caractérisés par les nombres de Weber et de Reynolds,
- de l'angle de contact liquide-substrat,
- de la nature du substrat qui affecte le refroidissement de la lamelle via la diffusivité thermique.

Pour des substrats rugueux, "modélisés" par une surface comportant des plots de base carrée avec différentes distances entre eux, les calculs ont mis en évidence l'importance de la distance entre ces plots, distance qui contrôle l'écoulement du liquide et sa solidification.

Conclusion générale et perspectives

L'étude expérimentale de l'écrasement et de la solidification des particules en projection plasma présente deux difficultés majeurs : les temps caractéristiques des phénomènes sont de l'ordre de la microseconde et la taille des particules n'est que de quelques dizaines de micromètres. Pour pallier ces difficultés des études ont été menées sur l'impact de gouttes millimétriques avec une vitesse d'impact de quelques m/s , et où les échelles de temps sont alors de l'ordre de la milliseconde, ce qui permet de suivre l'impact et l'étalement de la goutte. Cependant, dans ces conditions, il est difficile d'avoir des similitudes dynamiques et thermiques parfaites avec les conditions de projection plasma. En dépit de toutes ces études, beaucoup de questions subsistent sur les facteurs dominants la formation de la lamelle solidifiée.

En effet, en projection plasma l'étalement et la solidification des particules fondues lors de leur impact sur un substrat dépend de nombreux paramètres liés d'une part à la particule à l'impact : vitesse, température, angle d'impact, état d'oxydation,... et d'autre part au substrat : présence ou non d'adsorbats et condensats, état de surface aux échelles nanométriques et micrométriques (rugosité), température, composition et épaisseur de la couche d'oxyde éventuelle, mouillabilité de la particule fondue par rapport au substrat et donc angle dynamique de mouillage, contact réel particule-substrat durant l'étalement avec diminution de la pression le long du rayon de la goutte ce qui entraîne un contact de moins en moins bon au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre de la particule qui s'étale, diffusivité du substrat et effusivité relative substrat-particule,...

Aussi, le but de ce travail est de chercher à comprendre quels sont les mécanismes qui agissent sur la formation des lamelles en projection plasma en utilisant le logiciel de simulation Simulent Drop dont les résultats sont comparés aux expériences lorsqu'elles existent.

Les principaux résultats que nous avons obtenus sont les suivants :

Sur l'impact de goutte millimétriques

Afin de valider notre approche d'utilisation de gouttes millimétriques pour comprendre la formation de la lamelle en projection plasma, via le modèle numérique, nous avons réalisé, dans un premier temps, une étude de sensibilité du maillage. Pour cela, nous avons étudié l'impact d'une goutte de cuivre sur un substrat froid en acier. Le maillage de la goutte dépend du paramètre CPR (en anglais Cells Per Radius) dont on doit fixer la valeur, alors que celui du substrat, est indépendant de ce paramètre suivant son épaisseur.

Dans l'étude de l'influence du maillage, nous avons fixé deux paramètres physiques essentiels pour nos simulations : l'angle de contact dynamique et la résistance thermique de contact (R_{th}), afin de ne faire varier que le paramètre de maille. La résistance thermique de contact a été estimée en comparant l'évolution de la température du substrat avec une mesure expérimentale, ce qui nous a donné la valeur de $R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2.K/W$ sur un substrat froid. Par contre, nous n'avons pas pu trouver les valeurs de l'angle de contact dynamique pour le couple cuivre-acier, alors nous avons décidé de travailler dans un premier temps avec un angle dynamique de $140^\circ - 40^\circ$, angle mesuré pour l'étain.

Pour le domaine du maillage de la goutte, les simulations ont montré que la forme des lamelles de cuivre, obtenues après impact sur un substrat froid sont sensibles au choix de la valeur du CPR. Nous avons alors, sélectionné des valeurs du CPR allant de 16 jusqu'à 27, et nous avons comparé les formes des lamelles prédites par la simulation avec les lamelles obtenues expérimentalement, ce qui nous a permis de sélectionner un CPR de 23 comme meilleur compromis pour le maillage du domaine de la goutte.

Pour le domaine du substrat, on s'est intéressé à l'effet du maillage dans une zone, au voisinage de l'interface goutte/substrat, où les transferts thermiques sont plus importants. Après avoir fixé l'épaisseur du substrat à 3 mm, pour cette étude, nous avons utilisé un maillage uniforme et un maillage non uniforme (densifié) suivant la profondeur.

L'évolution de la température du substrat pour ces maillages, comparée à l'évolution mesurée expérimentalement, nous a permis de choisir un maillage densifié au voisinage de l'interface goutte/substrat. Ceci a pour effet de diminuer la taille de la maille qui à pour valeur $15 \mu m$ pour 100 mailles dans le substrat. Ce maillage semble bien adapté à la taille de la maille de la goutte, qui pour un CPR de 23 est de $65,2 \mu m$. Il faut noter que l'augmentation de la valeur du CPR au-delà de 27 rend la convergence des calculs très longue.

Après avoir fixé les paramètres de maillages des domaines de calcul, nous avons analysé l'influence des paramètres d'impact de la goutte (vitesse, température), des paramètres du substrat (température), et des paramètres d'interface lamelle/substrat (R_{th} , angle de contact) sur le processus de déformation et de solidification de la goutte, et nous avons obtenu les résultats suivants :

L'énergie cinétique à l'impact :

Une augmentation de l'énergie cinétique à l'impact de la goutte sur un substrat froid, favorise son étalement, mais la lamelle présente une forte digitation et peut même éclabousser. Par contre si son énergie cinétique à l'impact est faible, la déformation de la goutte est plus lente et son étalement est dominé par les forces de tension de surface. En effet, les simulations sur la déformation de gouttes de cuivre impactant à faible vitesse, mais avec une tension de surface réduite, montrent que la goutte forme des éclaboussures. Ceci montre que durant le phase d'étalement il y a une compétition entre l'écoulement du liquide qui augmente la surface de contact goutte-substrat et la rétraction du liquide qui tend à la diminuer.

L'effet de l'angle de contact :

L'angle de contact qui s'établit entre le liquide et une surface n'est pas statique mais dynamique, du fait de la mobilité de la ligne de contact. Il varie alors entre deux valeurs limites : angle d'avancée et angle de recul. Pour nos conditions d'impact d'une goutte de cuivre sur un substrat en acier inoxydable, nous n'avons pas pu trouver ces valeurs car, en général, elles sont mesurées expérimentalement. Nous avons donc fait varier l'angle de contact dynamique afin de comprendre l'effet de chacune de ses composantes : l'angle d'avance et l'angle de recul.

Le phénomène de digitation est favorisé par la diminution de l'angle d'avance : on a observé que l'étalement est plus rapide avec la formation de doigts liquides beaucoup plus importants pour une goutte impactant avec un angle d'avance de 100° , et avec angle de recul de 20° .

Lorsque la valeur de l'angle de recul croît, avec un angle d'avancée constant, la formation des doigts liquide diminue. L'analyse de la vitesse d'écoulement dans une section de la goutte près de l'interface, durant la phase d'étalement de la goutte, montre qu'elle est plus élevée pour de faibles angles d'avance. D'après les morphologies obtenues en fonction de la variation des angles de contact dynamique, entre la goutte et le substrat, les valeurs de cet angle qui peuvent correspondre au cuivre seraient de $100^\circ - 20^\circ$.

Variation de la résistance thermique de contact :

La résistance thermique de contact (R_{th}) contrôle le transfert de chaleur à l'interface goutte/substrat qui, en général, varie dans le temps le long de l'interface. La mesure expérimentale des valeurs de R_{th} , qui varient dans une gamme de 10^{-5} à $10^{-6} m^2.K/W$, ont été obtenues 2 ms après l'impact d'une goutte de cuivre sur un substrat froid en acier inoxydable. Ces valeurs ont permis de simuler l'impact de la goutte, pour les mêmes conditions expérimentales, avec une R_{th} variable dans le temps (angle de contact : 100° - 20°). Durant les processus d'étalement et de solidification de la goutte, les simulations prédisent des doigts liquides plus épais qui se forment en fin de l'étalement entraînant la rupture de la lamelle dans les régions où des phases solides se développent et où la lamelle est moins épaisse. Là aussi, l'angle de contact joue un rôle important. Par contre, quand l'angle de contact d'avance croît (140° - 20°) les doigts liquides diminuent et la lamelle devient plus épaisse et même si la phase solide se développe, elle n'est pas suffisante pour déstabiliser l'écoulement du liquide et provoquer une rupture dans la lamelle.

Influence de la température du substrat :

Expérimentalement, Le préchauffage du substrat a montré l'existence d'une température de transition pour laquelle il y a modification de morphologie des lamelles de cuivre : d'une forme déchiquetée sur un substrat froid vers une forme de disque sur un substrat chaud (400°C) dont la valeur de la résistance thermique de contact a été estimée à $2,7 \times 10^{-7} m^2.K/W$. Le fait de chauffer le substrat modifie les propriétés de l'interface goutte/substrat. En effet, des mesures expérimentales de l'angle de contact d'une goutte d'étain s'étalant sur un substrat chaud (240°C) montrent que l'angle de recul augmente et avoisine l'angle d'avance (140° - 130°). Il faut souligner également l'impossibilité de trouver ces valeurs pour le cuivre. Mais cela nous a permis de voir l'influence de l'angle de contact dynamique en l'augmentant.

Pour un angle de contact d'avance constant de 100° et en faisant varier l'angle de contact de recul entre 20° et 80° , les lamelles présentent une forte digitation et éclatent lors de l'étalement, bien que le substrat soit chauffé à 400°C .

Par contre, quand l'angle de contact d'avance croît jusqu'à 140° et pour les mêmes angles de reculs, les lamelles observées présentent une forme de disque. L'angle de contact dynamique qui pourrait correspondre à l'impact d'une goutte de cuivre sur un substrat chaud est celui dont les valeurs sont 140° - 80° .

Impact d'une goutte d'alumine :

Bien qu'expérimentalement il soit difficile de réaliser l'impact d'une goutte céramique de taille millimétrique sur un substrat, c'est à travers la simulation que nous avons essayé de réaliser ces conditions d'impact afin de comprendre le comportement à l'impact de la goutte d'alumine sur un substrat froid ($R_{th} = 10^{-6} m^2.K/W$) avec un angle de contact dynamique de 100° - 20° . Les conditions de l'impact (vitesse, diamètre, angle de contact) sont identiques à l'impact

de la goutte de cuivre étudiée. Les résultats numériques prédisent qu'après l'impact, avec un nombre de Reynolds très faible (1 292 contre 35 294 pour le cuivre), résultant en un écoulement plus lent durant la phase d'étalement, par rapport à celui d'une goutte de cuivre, la force de tension de surface domine l'étalement. La goutte entre alors dans une phase de rétraction et on observe un bourrelet liquide périphérique entourant la lamelle. L'analyse du champ de vitesse radial, dans une section de la goutte, près de l'interface, montre que la vitesse est très faible (par rapport à une goutte de cuivre), en particulier, vitesse localisée au front de la goutte au cours d'étalement, ce qui explique que la phase d'étalement soit plus longue.

À la zone d'impact sur le substrat, la température superficielle peut s'élever jusqu'à 1 200 °C, et son refroidissement est plus lent ce qui est dû à la faible diffusivité de la goutte d'alumine.

Sur l'impact de gouttes micrométriques :

L'étude du maillage sur des gouttes micrométriques de zircone impactant sur un substrat froid et lisse, montre que la forme finale des lamelles est peu sensible au paramètre du CRP pour des valeurs supérieures à 20. Sur un substrat rugueux, lorsque nous avons tenté de travailler avec des valeurs de CPR au-delà de 25, le calcul a présenté des difficultés de convergence. Nous avons alors, choisi de fixer la valeur du CPR à 21, pour les deux types de substrats : lisse et rugueux.

Impact de gouttes millimétriques et micrométriques :

Nous avons réalisé des simulations de l'impact de deux gouttes de cuivre ayant le même nombre de Weber ($We = 294$) mais des tailles différentes : une goutte millimétrique ($d_0 = 3 \text{ mm}$ et $v_i = 4 \text{ m/s}$) et l'autre micrométrique ($d_0 = 40 \text{ } \mu\text{m}$ et $v_i = 34,6 \text{ m/s}$). Les résultats numériques montrent que, contrairement aux observations de la goutte millimétrique qui se déchiquette, la goutte de cuivre micrométrique présente une forme de disque, car durant l'écoulement de cette dernière la tension de surface domine la phase d'étalement. Il convient aussi de noter que l'impact de la goutte à une vitesse de $34,6 \text{ m/s}$ présente un nombre de Reynolds qui est environ 10 fois plus faible que celui de la goutte millimétrique ($Re = 5\,527$) ce qui peut expliquer le résultat.

Diffusivité thermique du substrat

La nature du substrat peut affecter le refroidissement de la lamelle pendant la phase d'étalement et le développement de la solidification. Pour étudier l'influence de la diffusivité thermique du substrat, on a sélectionné trois substrats de natures différentes : le cuivre, l'acier inoxydable et la zircone. L'impact des gouttes de zircone est réalisé sur des substrats froids ($R_{th} = 10^{-6} \text{ m}^2.K/W$) et des substrats chauds ($R_{th} = 10^{-7} \text{ m}^2.K/W$). Sur des substrats froids, les lamelles présentent une forme de disque au centre et une partie périphérique qui se rompt. Sur des substrats chauds, les lamelles ont une forme de disque excepté pour le substrat en zircone. Sur

le substrat en cuivre, le refroidissement de la lamelle est plus rapide que sur un substrat en zircone, ce qui favorise l'apparition de la phase solide tout au début de la phase d'étalement de la goutte, tant sur un substrat chaud, que sur un substrat froid, mais que vers la fin de la phase d'étalement. Ce résultat montre bien l'effet des propriétés thermiques du substrat qui affectent le refroidissement et la solidification de la lamelle.

Impact sur un substrat chaud et rugueux :

Le code numérique nous a permis de prendre en compte une surface rugueuse "idéale" composée de colonnes carrées, caractérisées par la hauteur, la largeur et la distance entre elles. Nous avons alors simulé l'impact de gouttes de zircone sur un substrat chaud et rugueux. Les résultats nous ont montré que l'étalement de la goutte dépend fortement de la largeur des pics, plus ces derniers sont larges, plus la distance entre eux diminue et corrélativement la goutte pénètre plus difficilement dans les interstices. Bien que, la pression d'impact peut être un facteur favorisant la pénétration du liquide au centre d'impact, les résultats numériques montrent que dans cette zone, le refroidissement de la lamelle est plus lent, car elle est plus épaisse.

Quand on fait varier la hauteur des pics, mais qu'ils sont plus espacés, on observe que l'écoulement est bloqué suivant la diagonale de la goutte, par contre son refroidissement est plus rapide dans ce cas et donc la lamelle se solidifie plus rapidement dans les zones du substrat où son écoulement est bloqué.

Ces travaux ont permis de mettre en évidence l'importance de phénomènes que l'expérience n'avait pas permis jusqu'alors de souligner en particulier celle des angles d'avance et de recul, et des nombres de Weber et de Reynolds à l'impact. Pour ce dernier point, ces résultats ont amené le SPCTS à mettre au point des expériences sur des gouttes millimétriques de céramiques dont la vitesse d'impact est nettement plus importante que celle obtenue par chute libre. Certes l'utilisation du code Simulent a permis d'éclaircir des points importants notamment sur le couplage étalement-solidification, et aussi de confirmer l'importance de la distance entre les pics sur une surface rugueuse idéale. Cependant, le code dans sa version actuelle devrait être amélioré pour prendre en compte :

- l'évolution radiale et temporelle de la résistance thermique de contact entre la goutte qui s'étale et le substrat, éventuellement en la liant avec l'évolution radiale de la pression.
- l'effet thermique de la couche d'oxyde plus ou moins épaisse (de quelques dizaines à plusieurs centaines de nanomètres) à la surface des substrats métalliques.
- la mise au point d'une surface rugueuse constituée de pics et de creux avec des formes simples (conique par exemple) pour se rapprocher des conditions réelles des surfaces sablées.

Annexe

Cette annexe regroupe les propriétés dynamiques et thermiques des matériaux utilisés pour la simulation de l'impact et la solidification de gouttes.

TABLE 4.5 – Propriétés thermophysiques du cuivre^a

Matériaux	État physique	Domaine de température (°C)	Propriétés					
			T_f (°C)	ρ (kg.m ⁻³)	L (J.kg ⁻¹)			
Cuivre	liquide	(1084)		7800	205×10 ⁶			
			1084	1084	1084			
	Liquide	(1084 à 1400)		ν (m ² .s ⁻¹)				
			0,38×10 ⁻⁶	0,37×10 ⁻⁶	0,34×10 ⁻⁶	0,31 ×10 ⁻⁶	0,28×10 ⁻⁶	
	Liquide	(1084 à 1400)	1084	1100	1200	1300	1400	
				k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)				
	Liquide	(1084 à 1427)	166	167	171	176		
			1084	1127	1227	1427		
	Liquide	(1084)		c_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)				
			492	1084				
Liquide	(1084 à 1883)		σ (J.m ⁻²)					
		1,3	1,23	1,18	1,06	0,97		
Liquide	(1084 à 1883)	1084	1283	1383	1583	1883		
			k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)					
Solide	(127 à 927)	393	379	366	352	339		
		127	327	527	727	927		
Solide	(127 à 927)		c_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)					
		395	416	436	455	475		
Solide	(127 à 927)	127	327	527	727	927		

a. Adapté de Techniques de l'Ingénieur

TABLE 4.6 – Propriétés thermophysiques de l'alumine^a

Matériaux	État physique	Domaine de température (°C)	Propriétés					
			T_f (°C)	ρ (kg.m ⁻³)	L (J.kg ⁻¹)			
Alumine	liquide	(2050)		2800	108×10 ⁷			
			2050	2050	2050			
	Liquide	(2050 à 3027)	ν (m ² .s ⁻¹)					
			17,4×10 ⁻⁶	9,3×10 ⁻⁶	5,44×10 ⁻⁶	3,45 ×10 ⁻⁶	1,67×10 ⁻⁶	
	Liquide	(2050 à 3027)	2050	2227	2427	2627	3027	
			k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)					
	Liquide	(2050)	4					
			2050					
	Liquide	(2050)	c_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)					
			1312					
Liquide	(2050)	2050						
		σ (J.m ⁻²)						
Liquide	(527 à 1947)	1,77	1,61	1,22	0,91	0,73		
		525	927	1427	1727	1947		
Solide	(727 à 1947)	k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)						
		6,3	5,61	4,66	4,43	4,36		
Solide	(727 à 1947)	727	927	1430	1730	1947		
		c_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)						
Solide	(227 à 1227)	1182	1220	1243	1267	1302		
		227	527	727	927	1227		

a. Adapté de [151], [152] et [153]

TABLE 4.7 – Propriétés thermophysiques de la zircone yttrée^a

Matériaux	État physique	Domaine de température (°C)	Propriétés				
			T_f (°C)	ρ (kg.m ⁻³)	L (J.kg ⁻¹)		
YSZ	liquide	(2700)	5600	706×10 ⁶			
			2700	2700	2700		
	Liquide	(2050 à 3027)	ν (m ² .s ⁻¹)				
			6,44×10 ⁻⁶	5,87×10 ⁻⁶	5,38×10 ⁻⁶	4,97×10 ⁻⁶	4,29×10 ⁻⁶
	Liquide	(2727)	2050	2227	2427	2627	3027
			k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)				
	Liquide	(2727)	2,7				
			2727				
	Liquide	(2827)	c_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)				
			723				
Liquide	(2700)	2827					
		σ (J.m ⁻²)					
Liquide	(2700)	0,43					
		2700					
Solide	(2000)	k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)					
		2					
Solide	(300 à 1000)	2000					
		c_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)					
Solide	(300 à 1000)	575	591	604	643	655	
		300	400	600	773	1000	

a. Adapté de [75] et <http://www.nist.gov>

Bibliographie

- [1] P. Fauchais. Understanding plasma spraying. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 37 :86 – 108, 2004.
- [2] P. Fauchais, M. Fukumoto, A. Vardelle, and M. Vardelle. Knowledge concerning splat formation. *J. Thermal Spray Technology*, 13(3) :337 – 360, 2003.
- [3] P. Fauchais and S. Chandra. Lastest development concerning splat formation, an invited review. *J. of Thermal Spray Technology*, acceptec (2009).
- [4] J. Madejski. Solidiifcation of droplets on a cold surface. *Int. J. of Heat and Mass transfer*, 19 :1009 – 1013, 1976.
- [5] H. Jones. Splat cooling and metastable phases. *Rep. Prog. Phys.*, 36 :1425 – 1497, 1973.
- [6] R. Dhiman, A. McDonald, and S. Chandra. Predicting splat morphology in a thermal spray process. *Surface and Coatings Technology*, 201 :7789 – 8801, 2007.
- [7] M. Pasandideh-Fard, Y. M. Qiao, S. Chandra, and J. Mostaghimi. Capillary effect during droplet impact on a solid surface. *Phys. Fluids*, 8(3) :650 – 659, 1996a.
- [8] M. Pasandideh-Fard, V. Pershin, S. Chandra, and J. Mostaghimi. plat shapes in a thermal spray coating process : Simulations and experiments. *J. Thermal Spray Technology*, 11 :206 – 217, 2002.
- [9] J. Mostaghimi, M Pasandideh-Fard, and S Chandra. Dynamics of splat formation in plasma spray coating process. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*,, 22(1) :54 – 89, 2002.
- [10] M. Bussmann, S. Chandra, and J. Mostaghim. Modeling the splashing of a droplet impacting a solid surface. *Phys. Fluids, Vol.*, 12 :3121 – 3132, 2000.

- [11] M. Bussmann, J. Mostaghimi, and S. Chandra. On a three-dimensional volume tracking model of droplet impact. *Physics of Fluids* 11, pages 1406 – 1417, 1999.
- [12] L. Bianchi. *Projection par plasma d'arc et plasma inductif de dépôts céramiques : Mécanismes de formation de la première couche et relation avec les propriétés mécaniques des dépôts*. PhD thesis, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, 1995.
- [13] J. Cedelle. *Etude de la formation de lamelles résultant de l'impact de gouttes millimétriques et micrométriques*. PhD thesis, Université de Limoges (France), 2005.
- [14] M. Mellali. *Influence de la rugosité et de la température de surface du substrat sur l'adhérence et les contraintes résiduelles au sein de dépôts d'alumine projetés par plasma*. PhD thesis, Université de Limoges (France), 1994.
- [15] F. Bahbou and P. Nylén. Relationship between surface topography parameters and adhesion strength for plasma spraying. In *ITSC 2005, E. Lugscheider, Ed., DVS, Dusseldorf, Germany, e-proceedings*, 2005.
- [16] P. Fauchais, A. Vardelle, and . Vol Dussoubs, B. Quo vadis thermal spray. *J. Thermal Spray. Technology*, 10 (1) :44 – 66, 2001.
- [17] M. Vardelle, A. Vardelle, Fauchais P., K.I. Li, Dussoubs B., and N.J. Themlis. Controlling particle injection in plasma spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 10 :267 – 286, 2001.
- [18] E. Pfender. Particle behavior in thermal plasmas. *Plasma Chem. Plasma Proc.*, 9 (1) :167S–194S, 1989.
- [19] E. Bourdin, P. Fauchais, and M.I. Boulos. Transient heat conduction under plasma conditions. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 26 (4) :567– 582, 1983.
- [20] S. Q. Armster, J.P. Delplanque, M. Rein, and E.J. Lavernia. Thermo-fluid mechanisms controlling droplet based materials processes. *International Materials Review*, 7 (6) :265 – 301, 2002.
- [21] P. Fauchais and A. Vardelle. Heat, mass and momentum transfer in coating formation by plasma spraying. *Int. J. Therm. Sci.*, pages 852 – 870, 2000.
- [22] A.C. Leger. *Contribution à l'étude expérimentale de la formation d'une lamelle de zircone, de leur empilment, et des contraintes résiduelles de dépôts projetés par plasma*. PhD thesis, Université de Limoges (France), Mars 1997.
- [23] V.V. Kudinov, P. Yu. Pekshev, and V.A. Safiullin. Forming of the structure of plasma-sprayed materials. *High-Temp. Dust Laden Jest*, pages 38 1 – 418, 1989.
- [24] J. Dubsy and J. Matejicek. Residual and applied stresses in thermally sprayed metallic and ceramic coatings. In *International Thermal Spray Conference (ITSC 2002), Essen, 4-6 March 2002. Lugscheider, E. (Ed.). (2002) 606-609*, 2002.
- [25] D. A. J. Ramm, T. W. Clyne, A. J. Sturgeon, and S. P. Dunkerton. Correlations between spraying conditions and microstructure for alumina coatings produced by hvof and vps.

- In *Proceedings of the 7th National Thermal Spray Conference, 20-24 June, 1994, Boston, Massachusetts, USA (1994)*, 239-244, 1994.
- [26] H. Fukanuma and A. Ohmori. Behavior of molten droplets impinging on flat surface. *J. of Thermal Spray Conference*, pages 563–567, 1994.
- [27] L. Pawlowski. *The science and engineering of thermal spray coatings*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1995.
- [28] A. Vardelle, M. Vardelle, J.M. Baronnet, and P. Fauchais. *Rev. Int. Hautes Temp. Re-fract.*, 17 :p. 221, 1980.
- [29] R. McPherson. Formation of metastable phases in flame- and plasma-prepared alumina. *J. of MAterials Sciences*, 8 :851 – 858, 1973.
- [30] M. Qu, Y. Wu, and A. Gouldstone. Simulations of curvature evolution splat-substrate systems under thermal cycling. In *Proc. of ITSC 2006*, 2006.
- [31] P. Fauchais, M. Vardelle, A. Vardelle, and L. Bianchi. Plasma spray : Study of the coating generation. *Ceramics International*, 22 :295 – 303, 1996.
- [32] D.T. Gawne, B.J. Griffiths, and G. Dong. Thermal spraying current status and future trends. *High Temperature Society of Japan*, pages 779– 784, 1995.
- [33] V.V. Sobolev, J.M. Guilemany, J. Nutting, and J.R. Miquel. *Int. Mater. Rev.*, 42 (3) :117–136, 1997.
- [34] C. S. Martin. Pressure wave propagation in two-component flow. Technical Report pp. 1- 33, NATO Advanced Study Institute on Computer Modelling of Free Surface and Pressurized Flows, Washington State University, Pullman, Washington, 1993.
- [35] O.G. Engel. *J. Appl. Phys.*, 37, 1966.
- [36] K. K. Haller, Y. Ventikos, and D. Poulikakosa. Wave structure in the contact line region during high speed droplet impact on a surface : Solution of the riemann problem for the stiffened gas equation of state. *Journal of Applied Physics*, 93(5) :3090 – 3097, 2003.
- [37] M. Rein. Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces. *Fluid Dyna. Res.*, 12 :61 – 93, 1993.
- [38] F.J. Heymann. High-impact between a liquid drop and a solid surface. *J. of Applied Physics*, 40(13) :5113 – 5122, 1969.
- [39] L. Chang-Jiu and L. Jing-Long. Transient contact pressure during flattening of thermal spray droplet and its effect on splat formation. *J. of Thermal spray Thecnology*, 13(2) :229 – 238, 2004.
- [40] S. Chandra and C.T. Avedisian. On the collision of a droplet with a solid surface. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 432 :13 – 41, 1991.
- [41] Y. C. Huang, F. G. Hammit, and W-J. Yang. Hydrodynamic phenomena during high-speed collision between liquid droplet and rigid plane. *J. of Fluids Engineering*, pages 276 – 294, 1973.

- [42] C. Mundo, M. Sommerfeld, and C. Tropea. Droplet-wall collisions : experimental studies of the deformation and break-up process. *International Journal of Multiphase Flow*, 21(2) :151 – 173, 1995.
- [43] H. Fukanuma. A porosity formation and flattening model of an impinging molten particle in thermal spray coatings. *J. of Thermal Spray Technology*, 3(1) :33–44, 1994.
- [44] C. Escure, M. Vardelle, A. Vardelle, and P. Fauchais. Visualization of the impact of drops on substrate in plasma spraying : Deposition and splashing mode. *Thermal Spray*, pages 805 – 812, 2001.
- [45] S. Schiaffino and A. A. Sonin. On the theory for the arrest of an advancing molten contact line on a cold solid of the same materials. *Phys. Fluids*, 9 :2227 – 2233, 1997.
- [46] T. Bennett and D. Poulikakous. Splat-quench solidification : estimating the maximum spreading of a droplet impacting a solid surface. *J. mater. sci.*, 28 (4) :963 – 970, 1993.
- [47] J.-P. Delplanque and R. H. Rangel. An improved model for droplet solidification on a flat surface. *Journal of Materials Science*, 32 :1519 – 1530, 1997.
- [48] L. Bianchi, F. Blein, P. Lucchese, A. Grimaud, and P. Fauchais. Comparison of plasma sprayed alumina and zirconia coatings by rf and dc plasma spraying. *J. Thermal Spray Technol.*, 4(1) :59 – 66, 1995.
- [49] C. Moreau, P. Gougeon, and M. Lamontagne. Influence of substrate preparation on the flattening and cooling of plasma-sprayed particles. *Journal of Thermal Spray Technology*, 4 (1) :25 – 33, 1995.
- [50] M. Fukumoto, Y. Huang, and M. Ohwatari. Flattening mechanism in thermal sprayed nickel particle impinging on flat substrate surface. *J. of Thermal Tpray Technology*, 8(3) :427 – 432, 1999.
- [51] J.X. Jiang, Y. Wan, H. Herman, and S. Sampath. Role of condensates substrate surface of fragmentation of impinging droplet during thermal spray. *Thin Solid Film*, 385 :132 – 141, 2001.
- [52] J. Cedelle, M. Vardelle, P. Fauchais, and M. Fukumoto. Thermal behavior at impact of micrometre and millimetre sized particles, influence of substrate roughness and skewness. *Plasma Spraying, E. Lugscheider, Ed., May 2-4, 2005 (Basel, Switzerland), ASM International*, pages 118 – 1186, 2005.
- [53] J. A. Greenwood and B. P. Williamson. Contact of nominally flat surfaces. *Proc., Roy. Soc. London, A295*, pages 300 – 319, 1966.
- [54] H. S. Carslaw and J. C. Jaeger. *Conduction of Heat in Solids*. University Press, Oxford, London, UK, 2nd. edition edition, 1959.
- [55] T. Loulou, E.A. Artyukhin, and J.P. Bardon. Estimation of thermal contact resistance during the first stages of metal solidification process : Experiment principle. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 42 :2119 – 2127, 1999.

- [56] M Fukumoto, I Ohgitani, and T. Yasui. Effect of substrate surface change on flattening behaviour of thermal sprayed particles. *Materials Transactions*, 45(6) :1869 – 1873, 2004.
- [57] M. Fukumoto, I. Ohgitani, M. Shiiba, and T. Yasui. Effect of substrate surface change by heating on transition in flattening behavior of thermal sprayed particles. In *Proceedings of the 2004 International Thermal Spray Conference, May 10 - 12, 2004, Osaka, Japan, 2004*.
- [58] J.H. Zaat. A quarter of a century of plasma spraying. *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 13 (9) :9 – 42, 1983.
- [59] K. Shinoda, A. Yamada, M. Kambara, Y. Kojima, and T. Yoshida. Deformation of alumina droplets on micro-patterned substrates under plasma spraying conditions. *J. of Thermal Spray Technology*, 16(2) :300 – 305, 2007.
- [60] M. Fukumoto and N. Nishiyama. New criterion for splashing in flattening of new criterion for splashing in flattening of thermal sprayed particles onto flat substrate surface. *Surface and Coatings Technology*, 161 :103 – 110, 2002.
- [61] J. Cedelle, M. Vardelle, and P. Fauchais. Influence of stainless steel substrate preheating on surface topography and on millimeter- and micrometer-sized splat formation. *Surface and Coatings Technol.*, 201 :1373 – 1382, 2006.
- [62] J. Cedelle, M. Vardelle, B. Pateyron, P. Fauchais, Fukumoto. M., and I. Ohgitani. Plasma sprayed particles : impact imaging and flattening particle thermal history, in itsc 2005. In (ed.) *E. Lugscheider (pub.) DVS Düsseldorf, Germany (2005) e-proceeding.*, 2005.
- [63] M. Fukumoto, H. Hayashi, and T. Yokoyama. Relationship between particles splat pattern and coating adhesive strength of hvof sprayed cu-alloy. *J. Jpn Therm. Spray Soc*, 32 (3) :49 – 156, 1995.
- [64] M.F. Morks, Y. Tsunekawa, M. Okumiya, and M.A. Shoeib. Splat morphology and microstructure of plasma sprayed cast iron with different preheat substrate temperatures. *Journal of Thermal Spray Technology*, 11(2) :226 – 232, 2002.
- [65] T. Chraska and A. H. King. Effect of different substrate conditions upon interface with plasma sprayed zirconia. *Surface & Coatings Technology*, 157 :238 – 246, 2002.
- [66] S. T Deshpande, S. Sampath, and H. Zhang. Mechanisms of oxidation and its role in microstructural evolution of metallic thermal spray coatings : Case study for ni al. *Surface and Coatings Technology*, 200 :5395 – 5406, 2006.
- [67] M. Fukumoto, T. Yamaguchi, M. Yamada, and T. Yasui. Splash splat to disk splat transition behavior in plasma-sprayed metallic materials. *J. of Thermal Spray Technology*, 16 (5-6) :905 – 912, 2007.
- [68] H. Li, S. Costil, H.-L. Liao, C.-J. Li, M.P. Planche, and C. Coddet. Effect of surface conditions on the flattening behavior of plasma sprayed cu splats. *Surface and Coatings Technol.*, 200 :5435 – 5446, 2006.

- [69] A. McDonald, C. Moreau, and S. Chandra. Effect of substrate oxidation on spreading of plasma-sprayed nickel on stainless steel. *Surface & Coatings Technology*, 202 :23 – 33, 2007.
- [70] T. Haure. *Multifunctional layers obtained by a multi-technique process*. PhD thesis, Univ. of Limoges, France, Nov. 2003.
- [71] K. Shinoda, H Murakami, S. Kuroda, S. Oki, K. Takehara, and T.G. Etoch. High speed thermal imaging of yttria-stabilized zirconia droplets impinging on a substrate in plasma spraying. In *in ISPC 18th (ed.) K. Tachibana, Japan*, 2007.
- [72] N.Z. Mehdizadeh, M. Lamontagne, C. Moreau, S. Chandra, and J. Mostaghimi. Photographing impact of molten molybdenum particles in a plasma spray. *J. of Thermal Spray Technology*, 14(3) :354 – 361, 2005.
- [73] M. McDonald, A. and Raessi, S. Chandra, J. Mostaghimi, and C. Moreau. Fragmentation of plasma-sprayed molybdenum particles on glass surfaces. In *Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2006*, Seattle, Washington, USA, May 15 - 18 2006.
- [74] A.A. Syed, A. Denoirjean, B. Hannover, P. Fauchais, P. Denoirjean, A.A. Khan, and J.C. Labbe. Influence of substrate surface conditions on the plasma sprayed ceramic and metallic particles flattening. *Surface and Coatings Technol.*, 200 :2317 – 2331, 2005.
- [75] K. Shinoda, Y. Kojima, and T. Yoshida. In-situ measurement system for deformation and solidification phenomena of yttria stabilized zirconia droplets impinging on quartz glass substrate under plasma spraying conditions. *J. of Thermal Spray Technology*, 14 (4) :511 – 517, 2005.
- [76] H. Li, S. Costil, H.-L. Liao, and C. Coddet. Role of the laser surface preparation on the adhesion of ni - 5 wtal coatings deposited using the protal process. *J. of Thermal Spray Technology*, 15 (2) :191 – 197, 2006.
- [77] M. Fukumoto, H. Nagai, and T. Yasui. Influence of surface character change of substrate due to heating on flattening behavior of thermal sprayed particle. In *Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference*, Seattle, Washington, USA, May 15 - 18 2006.
- [78] Y. Heichal and S. Chandra. Predicting thermal contact resistance between molten metal droplets and a solid surface. *Journal of Heat Transfer*, 127 :269 – 1275, 2005.
- [79] C. Moreau, P. Cielo, M. Lamontagne, S. Dallaire, and M. Vardelle. *Meas. sci. technol.* 1 :807 – 815, 1990.
- [80] J.M. Houben. Future development in thermal spraying. In *Proc. 2nd National Conference on Thermal Spray, 1984, 1-19.*, 1984.
- [81] C. J. Li, C.-X. Li, G.-J. Yang, and Y.Y. Wang. Examination of substrate surface melting-induced splashing during splat formation in plasma spraying. In Copyright I 2006 ASM

- International, editor, *Proceedings of the International Thermal Spray Conference*, Seattle, Washington, USA, May 15-18 2006.
- [82] K. S. Schmaltz and C. H. Amon. Thermal issues in microcasting shape deposition manufacturing in e. f. matthys and w. g. truckners(eds.), melt spinning, strip casting and stab casting. *Mineral, Metals and Materials society, Warrendale, PA*, pages 125 – 143, 1996.
- [83] O.G. Engel. Waterdrop collisions with solid surfaces. *J. Rev. Nat. Bur. Stand.*, Vol. 54 (5) :281 – 298, 1955.
- [84] H. Fukanuma. Mathematical modeling of flattening process on rough surface in thermal spray : practical solutions for engineering problems. *Ed. C.C. Berndt, Pub. ASM International, Materials Park, Ohio, USA*, pages 647 – 656, 1996.
- [85] K. K. Haller, Y. Ventikos, D. Poulikakos, and P. Monkewitz. Computational study of high-speed liquid droplet impact. *J. of Applied Physics*, 92(5) :2821 – 2828, 2002.
- [86] M. Pasandideh-Fard, R. Bhola, S. Chandra, and J. Mostaghimi. Deposition of tin droplets on a steel experiments plate : simulations and experiments. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41 :2929 – 2945, 1998.
- [87] S. T. Thoroddsen and J. Sakakibara. Evolution of the fingering pattern of an impacting drop. *Phys. Fluids*, 10 :1359 – 1374, 1998.
- [88] H.-Y. Kim, Z. C Feng, and J.-H. Chun. Instability of a liquid jet emerging from a droplet upon collision with a solid surface. *Physics of Fluids*, 12(3) :531 – 541, 2000.
- [89] A. Vardelle, M. Vardelle, P. Fauchais, and D. Gobin. Monitoring particle impact on a substrate during plasma spray process. *NATO Series E : Applied Sciences*, 282 :95 – 121, 1995.
- [90] C. Escure, M. Vardelle, and P. Fauchais. Experimental and theoretical study of the impact of alumina droplet on cold and hot substrates. *Plasma Chem. Plasma Proc.*, 23(2) :185 – 221, 2003.
- [91] H. Jones. Cooling freezing and substrate impact of droplet formed by rotatory atomization. *D : Applied Physics*, (4) :1654 – 1660, 1971.
- [92] R. McPherson. On the formation of thermally sprayed alumina coatings. *J. of Materials Science*, 15 :3141 – 3149, 1980.
- [93] J. Madejski. Droplet on impact with a solid surface. *Int. J. of Heat and Mass transfer*, 26 :1095 – 1098, 1983.
- [94] Bennet and D Poulikakos. Heat transfer aspects of splat-quench solidification : modeling and experimen. *J. Mater. Sci.*, 29 :2025 – 2039, 1994.
- [95] J.M. Waldvogel and D Poulikakos. Solidification phenomena in picoliter size solder droplet deposition on a composite substrate. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 40 :295 – 309, 1997.
- [96] H. Zhang. Theoretical analysis of spreading and solidification of molten droplet during thermal spray deposition. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 42(14) :2499 – 2508, 1999.

- [97] T. Young. An essay on the cohesion of fluids. *Philos. Trans. R. Soc. London*, 95 :65 – 87, 1805.
- [98] R. E. Johnson and R. H. Dettre. Contact angle hysteresis : Study of an idealized heterogeneous surface. *J. Phys. Chem.*, 68 :1744 – 50, 1964.
- [99] G. E. P. Elliott and A. .C. Riddiford. Dynamic contact angles. i. the effect of impressed motion. *J. Colloid Interface Sci.*, 23 :389 – 398, 1967.
- [100] E. B. Dussan V. On the spreading of liquids on solid surface : static and dynamic contact lines. *Ann. Rev. Fluid. Mech.*, pages 371 – 400, 1979.
- [101] D. Attinger, S. Haferl, Z. Zhao, and D. Poulikakous. *Transport Phenomena in the Impact of a Molten Droplet on a Surface : Part II : Heat Transfer and Solidification*. 2000.
- [102] A. F. Mills. *Heat Transfer*. Prentice Hall, 1992.
- [103] R.C. Ruhl. Cooling rates in splat cooling. *Mater. Sci. Eng.*, 1 :313 – 320, 1967.
- [104] J. Crank. *Free and Moving Boundary Problems*. Oxford University Press, New York, 1984.
- [105] J. Fukai, Z. Zhao, D. Poulikakos, C. M. Megaridis, and O. Miyatake. Modeling of the deformation of a liquid droplet impinging upon a flat surface. *Phys. Fluids A* 5, pages 2588 – 2599, 1993.
- [106] J. Fukai, Y. Shiiba, T. Yamamoto, O. Miyatake, D. Poulikakos, C. M. Megaridis, and Z. Zhao. Wetting effects on the spreading of a liquid droplet colliding with a flat surface : Experiment and modeling. *Phys. Fluids*, 7 (2) :236 – 247, 1995.
- [107] Z. Zhao, D. Poulikakos, and J. Fukai. Heat transfer and fluid dynamics during the collision of a liquid droplet on a substrate : Part ii-experiments. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 39 :2791 – 2802, 1996a.
- [108] C.W. Hirt and B.D. Nichols. Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39 :201 – 225, 1981.
- [109] F.H. Harlow and J.P. Shannon. The splash of a liquid drop. *Journal of Applied Physics*, 38 :3855 – 3866, 1967.
- [110] N. Hatta, H. Fujimoto, and H. Takuda. Deformation process of a water droplet impinging on a solid surface. *J. Fluids. Eng*, 117 :394 – 401, 1995.
- [111] L.L. Zheng and H. Zhang. An adaptive level set method for moving-boundary problems : application to droplet spreading and solidification. *Numerical Heat Transfer, Part B*, 37 :437 – 454., 2000.
- [112] J.E. Welch, J.P. Harlow, F.H.and Shannon, and B.J. Daly. *The MAC Method*. Los Alamos Scientific Laboratory, LA-3425, 1966.
- [113] Daly B. J. Numerical study of two fluid rayleigh-taylor instability. *Phys. Fluids*, 10 :297 – 307, 1967.

- [114] K. Tsurutani, M. Yao, and H. Senda, J. and Fujimoto. Numerical analysis of the deformation process of a droplet impinging upon a wall. *JSME Int. J. Series II*, 33 :555 – 561, 1990.
- [115] Z. Zhao, D. Poulikakos, and J. Fukai. J. heat transfer and fluid dynamics during the collision of a liquid droplet on a substrate : Part i - modeling. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 39 (13) :2771 – 2789., 1996b.
- [116] H. Liu, E. J. Lavernia, and R. H. Rangel. Numerical investigation of micro-pore formation during substrate impact of molten droplets in plasma spray processes. *Atomization and Sprays*, 4 :369 – 384, 1994.
- [117] H. Liu, E. J R. Lavernia, and H. Rangel. Numerical simulation of impingement of molten titanium and tungsten droplets on a flat substrate. *J. of Thermal spray Technology*, 2(4) :369 – 377, 1993.
- [118] G. Trapaga, J.J. Matthys, E. F and. Valencia, and J. Szekely. Fluid flow, heat transfer, and solidification of molten metal droplets impinging on substrates : Comparison of numerical and experimental results. *Metallurgical Transactions B*, 23B, :701 – 718, December 1992.
- [119] M. Bertagnolli, M. Marchese, and G. Jacucci. Modeling of particles impacting on a rigid substrate under plasma spraying conditions. *Journal of Thermal Spray Technology*, 4(1) :41 – 49, 1995.
- [120] M. Pasandideh-Fard and J. Mostaghimi. On the spreading and solidification of molten particles in a plasma spray process effect of thermal contact resistance. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 16 :83 – 98, 1996.
- [121] B. Xiong, C. M. Megaridis, D. Poulikakos, and H. Hoang. An investigation of key factors affecting solder microdroplet deposition. *Journal of Heat Transfer*, 20 :259 – 270, 1998.
- [122] M. Chung and R.H. Rangel. Simulation of metal droplet deposition with solidification including undercooling and contact resistance effects. *Numerical Heat Transfer, Part A*, 37(3) :201– 226, 2000.
- [123] J. Trapaga, G. and Szekely. Mathematical modeling of the isothermal impingement of liquid droplet in spraying processes. *Met. Trans. B*, 22B :901 – 914, 1991.
- [124] H. Liu, E. J. Lavernia, and R. H. Rangel. Numerical simulation of substrate impact and freezing of droplets in plasma spray processes. *J. Phys. D*, 26 :1900 – 1908, 1993.
- [125] H. Liu, E. R. Lavernia, and H. Rangel. Modeling of molten droplet impingement on a flat surface. *Acta Metallurgical and Materials*, 43(5) :2053 – 2072, 1995.
- [126] J.-P Delplanque, E. R. Lavernia, and H. Rangel. Multi-directional solidification model for the description of micro-pore formation in spray deposition processes. *Numer. Heat Transfer A*, 30 :1 – 18, 1996.
- [127] D. B. Kothe, R. C. Mjolsness, and M. D. Torrey. Ripple : A computer program for incompressible flows with free surfaces. Technical Report LA -12007-MS, Los Alamos National Laboratory, 1991.

- [128] A. Y. Tong and B. R. Holt. A numerical correlation for the solidification of liquid metal droplets impact onto a substrat. In *In Transport Phenomena in Materials Processing and Manufacturing, ASME HTD 336 /FED 240*, pp, pages 257–264, 1996.
- [129] M. Zhang, H. Zhang, and L. Zheng. Application of smoothed particle hydrodynamics method on free surface and solidification problems. *Numerical Heat Transfer, Part A*, 52 (4) :299 – 314, 2007.
- [130] R.A. Gingold and J.J. Monaghan. Smoothed particle hydrodynamics - theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181(2) :375 – 389, 1977.
- [131] G.R. Liu and M.B. Liu. *Smoothed particle hydrodynamics : A Meshfree Particle Method*. World Scientific Publishing Company , NY, 2003.
- [132] S. Shakeri and S. Chandra. Splashing of molten tin droplets on a rough steel surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45 :4561 – 4575, 2002.
- [133] D. Geyffier. *Etude de l'impact de gouttes sur un film liquide mince, développement de la corolle et formation de projections*. PhD thesis, Université Pierre et Marie curie (Paris VI), 2000.
- [134] J. Glimm, O. McBryan, R. Menikoff, and () Sharp, D. Front tracking applied to rayleigh-taylor instability. *SIAM J. Comput.*, 7 :230 – 251, 1986.
- [135] Onno Ubbink. *Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces*. PhD thesis, University of London, 1997.
- [136] W. F. Noh and P. Woodward. Slic (simple line interface calculation). In *Proceedings of the Fifth International Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics June 28 - July 2, 1976 Twente University, Enschede*, volume 59/1976 of *Lecture Notes in Physics*, 1976.
- [137] S. Osher and J. A. Sethian. Fronts propagating with curvature dependent speed : algorithms based on hamilton-jacobi formulations. *Journal of Computational Physics*, 79 :12 – 49, 1988.
- [138] D.L. Youngs. *Time-Dependent Multi-Material Flow With Large Fluid Distortion*. Numerical Methods for Fluid Dynamics, k. w. morton and m. j. baines edition, 1986.
- [139] L. D. Landau and E. M. Lifshitz. *Fluid Mechanics*. Pergamon Press, Oxford, 2nd edition, 1987.
- [140] J.U. Brackbill, D.B. Kothe, and Zemach. C. A continuum method for modeling surface tension. *Journal of Computational Physics*, 100 :335 – 354, 1992.
- [141] C.E. Weatherburn. On differential invariants in geometry of surfaces, with some applications to mathematical physics. *Quarterly J. Math.*, 50 :230 – 269, 1927.
- [142] V. Voller and M. Cross. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 26 :147 – 150, 1983.
- [143] A. J. Chorin. Numerical simulation of the navier-stokes equation. *Math. Comp.*, 22 :745 – 762, 1968.

- [144] R. Temam. *Navier-Stokes numerical equations study in mathematics and its applications*, volume 2,. 1968.
- [145] S. Haferl, D. Attinger, Z. Zhao, and D. Poulikakous. Transport phenomena in the impact of a molten droplet on a surface : Macroscopic phenomenology and microscopic consideration part i fluid dynamic. *Review in Heat Transfer*, XI :65 – 143, 2000.
- [146] American Welding Society, editor. *Thermal spraying : practice, theory and applications*. 1985.
- [147] L. Bianchi, A. C. Leger, M. Vardelle, A. Vardelle, and P. Fauchais. Splat formation and cooling of plasmasprayed zirconia. *Thin Solid Films*, 35-47 :p. 305, 1997.
- [148] Y. Tanaka and A. Fukumoto. Investigation of dominating factors on flattening behavior of plasma sprayed ceramic particles. *Surface and Coatings Technology*, 120 - 121 :124 – 130, 1999.
- [149] M. Bertagnoli, M. Marchese, and G. Jaccuci. Modelling of particles impacting on rigid substrate under plasma spraying conditions. *J. of Thermal Spray Technology*, 4(1) :41 – 49, 1995.
- [150] J. Cedelle, M. Vardelle, B. Pateyron, and P. Fauchais. Experimental investigation of the splashing processes at impact in plasma sprayed coating formation. *Proceedings of the 2004 International Thermal Spray Conference, 10-12 Mai, Osaka (Japon), ASM International,(Pub.)*, 2004.
- [151] Y.S. Touloukian. *Thermophysical Properties of Matter*. NY, 1979.
- [152] Y. Kawai and Y. Shiraish. *Handbook of Physico-Chemical Properties at High emperatures*. Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, 1988.
- [153] G. H. Geiger and D. R Poirier. *Transport Phenomena in Metallurgy*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA, 1973.