

Chapitre 5 : Approche locale de la morphologie de l'interface particule-substrat par la simulation d'impact

SOMMAIRE

CHAPITRE 5 : APPROCHE LOCALE DE LA MORPHOLOGIE DE L'INTERFACE PARTICULE-SUBSTRAT PAR LA SIMULATION D'IMPACT	179
INTRODUCTION	183
1. PRESENTATION DU MODELE NUMERIQUE	183
1.1. METHODE DE CALCUL.....	183
1.1.1. Paramètres de maillage.....	183
1.1.2. Modèles numériques	184
1.1.3. Hypothèses de calcul	185
1.2. LOIS DE COMPORTEMENT ET PROPRIETES DES MATERIAUX	186
1.2.1. Modèles d'érouissage dynamique	186
1.2.2. Modèle de Johnson-Cook.....	186
2. VALIDATION DU MODELE D'IMPACT	189
2.1. VALIDATION QUALITATIVE DU MODELE	189
2.1.1. Corrélation morphologique entre les simulations 2D et l'expérimental	189
2.1.2. Corrélation morphologique entre les simulations 3D et l'expérimental	190
2.1.3. Conclusion sur la robustesse du modèle numérique d'impact.....	190
2.2. VALIDATION QUANTITATIVE DU MODELE	190
2.2.1. Déroulement et fin de l'impact	190
2.2.2. Comparaison du taux d'écrasement.....	192
2.3. CONCLUSION SUR LE MODELE NUMERIQUE	192
3. IMPACT D'UNE PARTICULE SUR SUBSTRAT PLAN	193
3.1. INFLUENCE DES PARAMETRES D'IMPACT DE LA PARTICULE	193
3.1.1. Effet de la température de la particule.....	193
3.1.2. Effet de la vitesse de la particule	194
3.1.3. Effet de l'angle de projection de la particule	195
3.2. TEMPERATURE MAXIMALE ATTEINTE A L'INTERFACE PARTICULE-SUBSTRAT	197
3.3. CONCLUSION SUR L'INFLUENCE DES PARAMETRES D'IMPACT	198
4. IMPACT D'UNE PARTICULE SUR SUBSTRAT RUGUEUX	199
4.1. REALISATION DU MAILLAGE DES SUBSTRATS RUGUEUX	199
4.1.1. Détermination des dimensions de la surface rugueuse à mailler	199
4.1.2. Optimisation du maillage des surfaces rugueuses	200
4.2. DEFORMATION PLASTIQUE DE LA PARTICULE ET DU SUBSTRAT.....	202
4.2.1. Etude morphologique du substrat après impact d'une particule	202
4.2.2. Approche locale de la longueur d'interface	203
4.2.3. Bilan sur les déformations de l'interface particule-substrat.....	204
4.3. ANCRAGE D'UNE PARTICULE DANS UN SUBSTRAT RUGUEUX.....	204
4.3.1. Approche numérique du profil équivalent vu par la particule	204
4.3.2. Etude des paramètres physiques et de la morphologie du système particule-substrat	206
4.4. DISCUSSION AUTOUR DU MODELE NUMERIQUE	207
CONCLUSION SUR LA SIMULATION D'IMPACT D'UNE PARTICULE	209
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	210

Introduction

En complément de la partie expérimentale, la simulation par Eléments Finis (EF) de la déformation plastique d'une particule, considérée comme sphérique, est entreprise. L'objectif est d'appuyer numériquement les observations morphologiques réalisées au Chapitre 3 et de valider les analyses morphologiques de l'interface revêtement-substrat effectuées dans seconde partie du Chapitre 4.

De nombreuses études ont été menées pour appréhender les mécanismes de déformation à l'impact des particules projetées par cold spray. Deux échelles ont été considérées : l'échelle locale avec la particule élémentaire (Chapitre 1, §5.1) [GHE11] et l'échelle globale avec l'empilement de plusieurs particules (Chapitre 1, §5.2) [YIN10-2] [YIN13-2]. L'influence de la vitesse et de la température de la particule sur la déformation à l'impact a été étudiée pour différents couples de matériaux [ASS11]. La simulation permet, notamment, de prévoir le comportement de la particule projetée au moment où elle rencontre le substrat. Cet outil contribue à mieux comprendre les phénomènes mis en jeu lors de l'impact solide à haute vitesse.

Une analyse des interfaces sur un substrat initialement rugueux, qui n'a jamais été étudiée pour des vitesses comparables à celles du cold spray, est entreprise dans cette partie. En travaillant à l'échelle locale, l'objectif est de simuler l'impact d'une particule sur un substrat dont la surface est rugueuse. Les différentes rugosités obtenues après sablage des substrats sont ainsi étudiées. Deux voies sont envisagées : le profil de rugosité issu de l'observation en coupe et le profil simplifié extrait de l'étude topographique des substrats d'aluminium 2024-T3 sablés (Chapitre 4, Partie 1).

Un modèle est établi à partir d'une analyse par Eléments Finis (EF). Une vitesse (Chapitre 3, §4.1), une direction et une température de la particule (Chapitre 3, §4.2) sont choisies pour la simulation de l'impact. La déformation plastique et la pénétration de la particule dans le substrat sont étudiées.

1. Présentation du modèle numérique

Dans cette partie, la démarche entreprise pour le choix du modèle numérique est présentée. Ce modèle est associé à des lois de comportement, pour l'impact de particule à haute vitesse.

1.1. Méthode de calcul

Pour décrire le comportement d'une particule au moment de l'impact, un modèle par éléments finis utilisant le logiciel Abaqus/Explicit[®], est employé. Cet outil, relativement puissant, permet de calculer, notamment, les contraintes et les températures induites par un choc solide-solide. Une méthode de type lagrangien est utilisée. La procédure « Dynamic-Temp-Disp-Explicit » est choisie afin d'intégrer dans le calcul dynamique, un couplage thermomécanique. Le contact particule-substrat est régi par une interaction de type « surface to surface contact ». Les simulations consistent en une succession de phases de calcul lagrangien, pendant lesquelles le maillage se déforme en suivant le mouvement des matériaux sollicités. Enfin les éléments du maillage sont de type « coupled temperature displacement ».

1.1.1. Paramètres de maillage

Le maillage utilise des éléments de forme tétraédrique (simulation 3D) et quadratique (simulation 2D), respectivement de type « C3D10 » et « CAX4RT ». Le rapport entre la taille de maille de la particule et son diamètre est fixé à 30 ($= D_p/30$). Ce rapport confère, par exemple, une taille de maille de 1 μm , dans le cas d'une particule de 30 μm de diamètre.

Ce paramètre de taille de maille est essentiel pour la simulation utilisant la méthode lagrangienne. En effet, suivant la taille des éléments utilisés, les diverses valeurs de sortie, telles que la température [ASS03] ou la vitesse [LI06], varient.

La finesse du maillage conduit à une meilleure appréciation des données quantitatives [LI06] [LI09]. Néanmoins, la simulation par éléments finis se confronte à des distorsions excessives de mailles. En effet, les vitesses supersoniques obtenues en cold spray conduisent à de très fortes déformations pendant des temps extrêmement courts. La simulation numérique éprouve des difficultés de convergence des calculs auxquelles une solution doit être apportée. La mise en place d'un système de remaillage est alors nécessaire. Cette opération utilise la fonction « Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) Adaptive Meshing » du logiciel Abaqus/Explicit[®]. Mais cette solution n'est pas infaillible et les problèmes persistent malgré tout, pour des gammes de taux de déformation intenses. Au cours des phases d'adaptation du maillage qui alternent avec celles d'incrémentation temporelle, le mouvement du solide est figé et les nœuds du maillage sont repositionnés afin de diminuer la distorsion des éléments. Ce n'est pas un vrai remaillage car la topologie du maillage n'est pas changée. Les variables aux nœuds et aux points d'intégration sont ensuite transférées de l'ancien vers le nouveau maillage. L'utilisation d'une méthode de remaillage adaptative n'affranchit pas d'utiliser un maillage initial suffisamment fin, en particulier près de la zone d'impact où les solides se déforment fortement.

Tout comme la taille du maillage influe sur la morphologie des particules, les méthodes utilisées pour la simulation d'impact fournissent des résultats variés. En effet, les morphologies finales de splats diffèrent d'une approche à l'autre. De fortes nuances morphologiques suivant la méthode employée, c'est-à-dire la méthode lagrangienne, eulérienne ou SPH « Smoothed Particle Hydrodynamics », ont été révélées [YIN10]. Cette dernière étant adaptée à la simulation de flux de fluides, l'éjection de matière à l'impact y est particulièrement prononcée.

1.1.2. Modèles numériques

La mise en place du modèle consiste à disposer une particule à la surface d'un substrat. A cette particule, est conférée une vitesse suivant les deux composantes x et y . Le substrat et la particule sont maillés judicieusement. La zone d'impact du substrat et la particule (parties fortement déformées) possèdent un maillage plus fin afin d'améliorer la précision des résultats. Deux modèles numériques sont développés en parallèle pour l'étude de la déformation d'une particule sphérique :

- Une simulation 2D permet de mesurer la déformation de la particule suivant x et y . Le calcul est rapide mais réducteur par rapport au cas réel expérimental. En effet, la particule est associée à un disque qui serait représenté par un cylindre pour une simulation 3D. Cette différence de morphologie avec la particule sphérique limite l'interprétation des déformations. Le modèle axisymétrique a, par ailleurs, été exclu car il est incompatible avec les impacts sous un angle d'incidence différent de la normale ;
- Une simulation 3D permet l'analyse complète de la déformation plastique de la particule suivant les trois directions (x , y , z). Le calcul est, certes, plus long mais davantage représentatif au regard du cas expérimental, notamment pour des particules sphériques.

Ces deux modèles numériques sont présentés en Figure 5-1. Ils servent de base à l'étude des paramètres de projection comme l'angle de projection, la vitesse de la particule ou encore la morphologie du substrat.

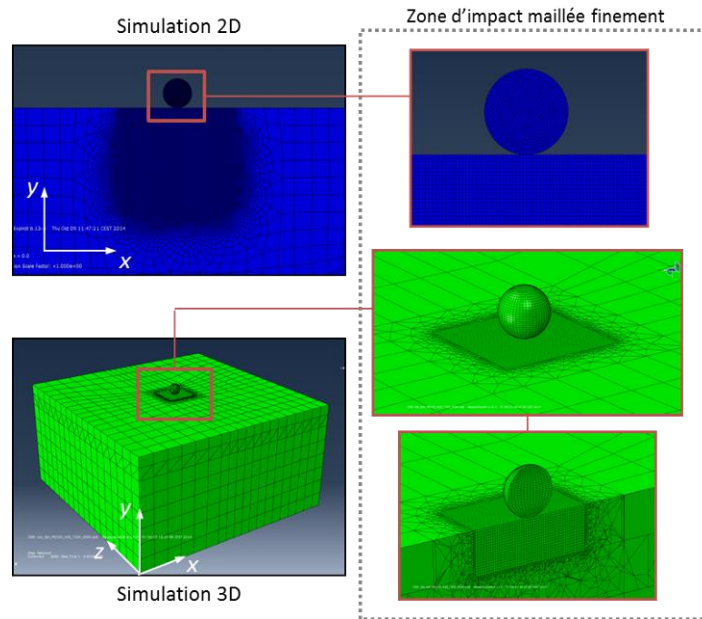


Figure 5-1 : Présentation du maillage utilisé pour les simulations 2D et 3D sur substrat plan.

1.1.3. Hypothèses de calcul

Pour l'ensemble des résultats de simulation présentés dans l'étude, les propriétés du matériau (substrat et particule) sont considérées isotropes et la particule sphérique de diamètre de 20 μm . Plusieurs paramètres de projection sont étudiés : la température de la particule T_p , la vitesse de la particule V_p , le diamètre de la particule D_p , l'angle d'incidence θ_p de la particule et la morphologie de surface du substrat. Pour évaluer l'influence d'un paramètre sur la déformation plastique de la particule et du substrat, les autres paramètres sont figés. Sauf mention contraire, l'impact de la particule s'effectue dans des conditions identiques quels que soient les paramètres étudiés (Tableau 5-1). L'impact de la particule sur un substrat rugueux se produit dans l'axe coïncident avec le fond de la vallée, ce qui a pour effet de ne traiter qu'une partie des impacts obtenus expérimentalement. Le cas où la particule entre en collision avec le sommet d'une vallée n'est donc pas simulé dans cette étude. De plus, les simulations réalisées ne tiennent pas compte de la transmission de la chaleur entre la particule et le substrat.

Tableau 5-1 : Paramètres et conditions d'impact de la particule et du substrat.

Vitesse d'impact de la particule ($m.s^{-1}$)	680
Température d'impact de la particule ($^{\circ}\text{C}$)	300
Température du substrat avant l'impact ($^{\circ}\text{C}$)	20
Angle d'incidence de la particule avec la surface du substrat ($^{\circ}$)	90

La déformation plastique de la particule après impact peut se caractériser par son taux d'écrasement ou de déformation ϵ , c'est-à-dire la capacité de la particule à se déformer plastiquement une fois déposée à la surface du substrat. La formulation de ϵ est précisée dans le Chapitre 4, partie 2, §1.3.1. Le taux d'écrasement de la particule est considéré comme nul lorsque sa sphéricité est conservée ; à l'inverse, il vaut 1 quand elle devient plate (c'est-à-dire quand h_d tend vers 0). La Figure 5-2 montre une particule à différents instants de l'impact. Sa morphologie permet d'en déterminer le taux d'écrasement. Comme décrit dans le Chapitre 4, §1.3.2, le substrat subit également une déformation plastique irréversible. Un enfoncement h_p , mesuré à

partir de sa surface initiale, est ainsi caractérisé. Ce dernier évolue en fonction des conditions et des paramètres de projection.

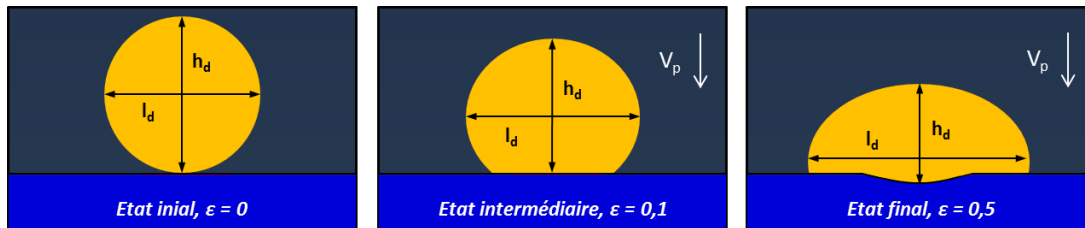


Figure 5-2 : Evolution du taux d'écrasement de la particule suite à la déformation plastique du système subie au cours de l'impact à haute vitesse.

1.2. Lois de comportement et propriétés des matériaux

1.2.1. Modèles d'écroutissage dynamique

Le modèle d'écroutissage dynamique choisit pour simuler les déformations des matériaux suite à un choc à haute vitesse régit l'intensité et les déplacements de matière. De nombreux modèles existent et ont fait l'objet d'études. Les simulations d'impact présentées dans le Chapitre 1 (§5) ne précisent pas le type de modèle utilisé pour l'écroutissage dynamique. Un bref aperçu des modèles existants est, ici, proposé.

Les modèles dits phénoménologiques reposent sur des lois établies et traduisent le résultat de l'expérience, sans s'appuyer sur une analyse fine des phénomènes sous-jacents. Leur utilisation est rendue facile grâce à leur forme simple. Leurs paramètres, peu nombreux, sont en principe facilement identifiables, étant donné les études expérimentales menées sur la déformation des matériaux. Néanmoins, leur justification physique est moins évidente, ce qui confère à ces modèles une validité restreinte. La loi identifiée ne peut pas être extrapolée au-delà du domaine couvert par les essais. Les modèles en loi puissance [JEU08] [THO10], le modèle Cowper-Symonds [COW57] et le modèle de Johnson-Cook [JOH83] font partie de cette catégorie.

Les modèles issus de l'analyse de l'activation thermique [SEE57] s'appuient sur les mécanismes mis en jeu et ont pour ambition d'avoir un domaine de validité plus étendu que ceux présentés précédemment. L'analyse de l'activation thermique (augmentation de la mobilité des dislocations par l'augmentation de leur capacité à franchir les obstacles) est la source de ces modèles. Ces derniers peuvent se partager en deux classes : les modèles à variables internes classiques [ZER87] [STE89] [PRE03] et les modèles qui introduisent une variable interne supplémentaire, de nature microstructurale [KLE85] [FOL88] [MOL05]. L'intérêt de ce dernier type de modèle est, en particulier, d'intégrer des effets cumulés de la vitesse de déformation dans la description du comportement.

Les modèles établis pour les mécanismes liés au choc et au traînage visqueux [STE80] [PRE03] ou encore les modèles hydrodynamiques existent et sont adaptés aux sollicitations à très grande vitesse de déformation et à haute pression.

1.2.2. Modèle de Johnson-Cook

Le modèle de Johnson-Cook [JOH83] est particulièrement adapté pour une gamme de vitesse de déformation de 10^2 à 10^4 s^{-1} . Cependant, il possède un nombre restreint de paramètres (A , B , n , C , m) et n'est pas le meilleur modèle pour les vitesses de déformation par cold spray de l'ordre de 10^7 à 10^9 s^{-1} suivant la

vitesse et la taille de la particule [RAH14]. Même si des variantes peuvent permettre de modéliser des comportements plus complexes [AHN12] comme, par exemple, une brusque augmentation de la sensibilité à la vitesse de déformation à partir d'un niveau de vitesse de déformation critique (de l'ordre de $10^3 - 10^5 \text{ s}^{-1}$) [FOL88], la loi de Johnson-Cook, dite « modifiée », est le modèle d'écroûissage dynamique qui est retenu pour l'étude (Eq. 5.1) et se présente sous la forme [AHN12] :

$$\bar{\sigma} = \underbrace{\left[A + B \cdot \bar{\varepsilon}^{-n} \right]}_{\text{Ecroûissage}} \cdot \underbrace{\left[1 + C \ln \left(\frac{\bar{\dot{\varepsilon}}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right]}_{\text{Ecroûissage-dynamique}} \cdot \underbrace{\left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_f - T_0} \right)^m \right]}_{\text{Adoucissement-thermique}} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Où :

- $\bar{\sigma}$ est la limite d'élasticité définie selon le critère de Von Mises ;
- $\bar{\varepsilon}$ est la déformation plastique équivalente ;
- $\bar{\dot{\varepsilon}}$ est la vitesse de déformation équivalente, et $\dot{\varepsilon}_0$ une vitesse de déformation de référence ;
- T est la température, T_0 la température de référence et T_f la température de fusion.

Le premier terme où l'on trouve les coefficients A , B et n , prend en compte l'écroûissage du matériau lors de l'impact. Des échauffements, provoqués par la déformation plastique ont lieu et l'adoucissement thermique qui en résulte est considéré dans le dernier terme. La température de référence est prise égale à la température ambiante, c'est-à-dire 293 K. Cette loi donne la contrainte suite aux déformations induites par le choc solide-solide en tenant compte de la vitesse de déformation, de la température ainsi que des propriétés mécaniques du matériau. Le Tableau 5-2 donne les coefficients de Johnson-Cook pour l'aluminium pur 1050 (poudre) et l'aluminium 2024-T3 (substrat).

Tableau 5-2 : Paramètres de Johnson-Cook utilisés pour la simulation par EF d'impact dynamique [JOH93] [AUR99] [ARR04].

	Aluminium pur 1050	Aluminium 2024-T3
A , limite d'élasticité (MPa)	130	265
B , coefficient d'écroûissage linéaire (MPa)	160	426
C , coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation	0,014	0,015
m , coefficient d'adoucissement thermique	1,00	1,00
n , coefficient d'écroûissage non linéaire	0,41	0,34
T_f , température de fusion (K)	931,15	913,15
T_0 , température de référence (K)	298	298
$\dot{\varepsilon}_0$, taux de déformation de référence (s^{-1})	1	1

Le modèle mis en place inclut également le comportement élastique des matériaux. La modélisation de ces phénomènes est transcrite par l'équation d'état de Mie-Grüneisen (Eq. 5.2) [ZOC00]. Cette équation met en relation la pression et le volume d'un solide à une température donnée. Elle est utilisée pour déterminer la pression lors d'un choc de compression d'un matériau solide. La relation de Mie-Grüneisen est une forme particulière du modèle de Grüneisen décrivant l'effet que le changement de volume d'un réseau cristallin a sur ses propriétés vibrationnelles.

$$\rho = \frac{\rho_0 C_0^2 \left[1 - \frac{\Gamma_0}{2} \chi \right]}{(1 - s\chi)^2} + \Gamma_0 E_i \quad \chi = 1 - \frac{\rho_0}{\rho} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Où :

- p est la pression définie selon le critère de Von Mises ;
- C_0 est la vitesse du son dans le matériau ;
- ρ_0 est la densité initiale du matériau et ρ la densité ;
- Γ_0 et s sont respectivement le coefficient de Grüneisen et le coefficient de Hugoniot ;
- $E_i \approx \rho_0 c_v (T - T_0)$ est l'énergie interne par unité de volume, où $c_v \approx c_p$ est la chaleur spécifique et T_0 est la température initiale.

Le modèle numérique choisi utilise donc deux équations d'état qui régissent la déformation plastique et élastique ainsi que l'état de contrainte du matériau. La première concerne la viscoplasticité du matériau : elle décrit son comportement inélastique suivant la vitesse de déformation du solide. Le modèle de Johnson-Cook est sélectionné pour simuler ce comportement viscoplastique. Les déformations sont directement proportionnelles à la vitesse d'impact. La seconde équation prend en compte le comportement élastique du matériau dans un choc solide-solide. Elle est représentée par l'équation d'état de Mie-Grüneisen. Les coefficients de Mie-Grüneisen et les autres propriétés physiques sont indiqués dans le Tableau 5-3.

Tableau 5-3 : Propriétés de l'aluminium pur 1050 et 2024-T3 et leurs coefficients de Mie-Grüneisen [JOH93] [AUR99] [ARR04].

	Aluminium pur 1050	Aluminium 2024-T3
ρ_0 , masse volumique ($kg.m^{-3}$)	2700	2790
λ , conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	229	121
c_p , chaleur spécifique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	899	874
E , module d'élasticité (GPa)	69	73
ν , coefficient de Poisson	0,33	0,33
G , module de cisaillement (GPa)	25,9	27,6
<u>Mie-Grüneisen :</u>		
C_0 , vitesse du son ($m.s^{-1}$)	5386	5386
s , coefficient de pente linéaire de Hugoniot	1,339	1,339
Γ_0 , coefficient de Grüneisen	2,16	2,16

Sont également intégrés au modèle numérique, les phénomènes de frottement entre la particule et le substrat. La force de frottement τ est liée à la pression de contact N par la loi de Coulomb. Cette loi est modifiée de manière à ce qu'une contrainte limite τ_{max} soit fixée à 1 GPa [DEL15] (Figure 5-3). Le coefficient de frottement dynamique μ (ou de glissement) caractérise la capacité des matériaux à glisser les uns par rapport aux autres. Dans les simulations de l'étude, le coefficient μ est pris égal à 0,5. La composante tangentielle est alors définie par :

$$\tau = \mu \cdot N \tag{Eq. 5.3}$$

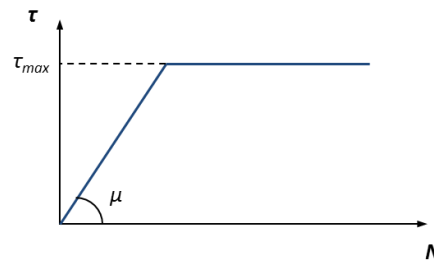


Figure 5-3 : Evolution de la force de frottement τ en fonction de la pression de contact N , loi de Coulomb modifiée avec une contrainte limite τ_{max} .

2. Validation du modèle d'impact

Pour valider le modèle numérique mis en place et présenté dans le §1.2, une comparaison entre les résultats de la simulation et ceux issus de la déformation d'une particule observée en microscopie optique, est réalisée. Le taux d'écrasement ϵ est choisi comme le critère de validation du modèle. Il permet d'évaluer la correspondance avec les déformations réelles des particules.

La validation des paramètres de projection, comme la pression et la température de gaz, la vitesse et la température de la particule, a permis d'identifier les conditions initiales de projection. Ces dernières sont déterminées par une mesure de vitesse des particules (Chapitre 3, §4.1.2), pour la poudre d'aluminium pur 1050 sphérique (30 μm de diamètre) et 1070 fine (10 μm de diamètre). De même, l'analyse thermique du substrat a mis en évidence sa température initiale avant projection (Chapitre 3, §4.3). Seule la température initiale de la particule est inconnue, mais est assimilée à celle du substrat dans son état initial. Le Tableau 5-4 résume ces conditions initiales de projection injectées dans le modèle numérique d'impact.

Tableau 5-4 : Conditions initiales de projection, intégrées au modèle d'impact en fonction du diamètre D_p de la particule.

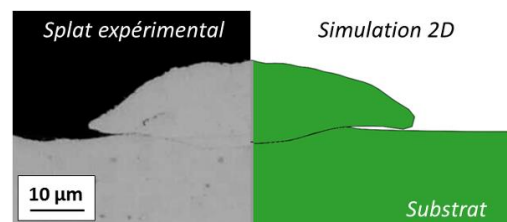
	$D_p = 10 \mu\text{m}$	$D_p = 30 \mu\text{m}$
Vitesse d'impact (m.s^{-1})	800	680
Température de surface du substrat (K)	440	440
Température de la particule (K)	440	440

2.1. Validation qualitative du modèle

2.1.1. Corrélation morphologique entre les simulations 2D et l'expérimental

Les résultats de la simulation numérique montrent la déformation plastique du substrat et de la particule. L'enfoncement de cette dernière, ainsi que sa morphologie finale avant rebond, sont corrélés avec les observations expérimentales des splats d'aluminium pur 1050 déposés sur un substrat d'aluminium 2024-T3. L'objectif est de valider les paramètres du modèle numérique utilisés et ainsi de poursuivre la caractérisation de la particule au moment de l'impact. La Figure 5-4 met en évidence la morphologie finale, c'est-à-dire une fois les déformations stabilisées (vitesse de déformation nulle), de la particule d'aluminium pur 1050 sphérique. L'observation optique en coupe est comparée avec le résultat de la simulation.

Figure 5-4 : Corrélation morphologique d'une particule d'aluminium pur 1050 sphérique après impact déposée sur un substrat d'aluminium 2024-T3, issue de l'observation expérimentale en coupe (image optique, à gauche) et de la simulation 2D (à droite).



Que ce soit pour l'étalement de la particule comme pour la pénétration de la particule dans le substrat, les déformations plastiques du système revêtement-substrat, expérimentales et numériques, sont similaires. Les morphologies de la particule et du substrat sont extrêmement proches. Toutefois, la particule semble quelque peu plus allongée dans le modèle numérique. Ce rapprochement des conclusions sur la déformation plastique de la particule à l'impact, a pour but de valider le modèle et les coefficients de Johnson-Cook et de Mie-Grüneisen, issus de la bibliographie et utilisés pour la simulation d'impact.

2.1.2. Corrélation morphologique entre les simulations 3D et l'expérimental

La Figure 5-5 met en évidence la déformation d'une particule d'aluminium pur 1050 projetée sur un substrat d'aluminium 2024-T3, numériquement (3D, à gauche de la Figure 5-5) et expérimentalement (à droite de la Figure 5-5), avec des conditions d'impact très proches. La pénétration de la particule dans le substrat est comparée en réalisant une coupe du splat, numérique et expérimentale. Les jets de matière situés en périphérie de la zone d'impact sont présents dans les deux cas. Néanmoins, comme dans la simulation 2D, les zones périphériques de la particule sont davantage étirées en comparaison du splat observé expérimentalement.

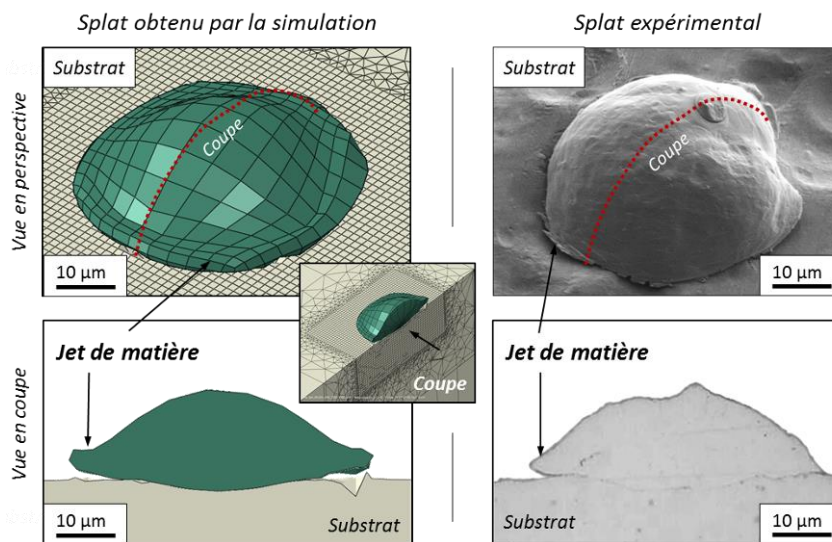


Figure 5-5 : Corrélation morphologique d'une particule d'aluminium pur 1050 après impact sur substrat d'aluminium 2024-T3, issue de la simulation 3D (à gauche) et de l'observation expérimentale, image MEB en vue inclinée (en haut à droite) et image optique en coupe (en bas à droite).

2.1.3. Conclusion sur la robustesse du modèle numérique d'impact

Les résultats de la simulation d'impact 2D et 3D permettent d'établir des liens directs entre les paramètres de projection, les conditions d'impact de la particule et l'adhésion de la particule avec le substrat. Plusieurs facteurs sont ainsi étudiés dans la suite (§3 et §4) :

- La pénétration de la particule dans le substrat (ancrage mécanique) ;
- La longueur de l'interface particule-substrat (surface en contact) ;
- Les échauffements localisés à l'interface particule-substrat (zone de diffusion).

2.2. Validation quantitative du modèle

2.2.1. Déroulement et fin de l'impact

La morphologie de la particule déformée numériquement est comparée à celle observée expérimentalement. Cette morphologie finale de la particule n'est considérée que lorsque l'énergie cinétique E_c de la particule est à son minimum. Le modèle numérique d'impact n'inclut pas de critère d'adhésion entre la particule et le substrat, ce qui a pour conséquence d'observer un rebond de la particule dans la simulation. Le retour élastique de la particule après l'impact continue de modifier la morphologie la particule (Figure 5-6).

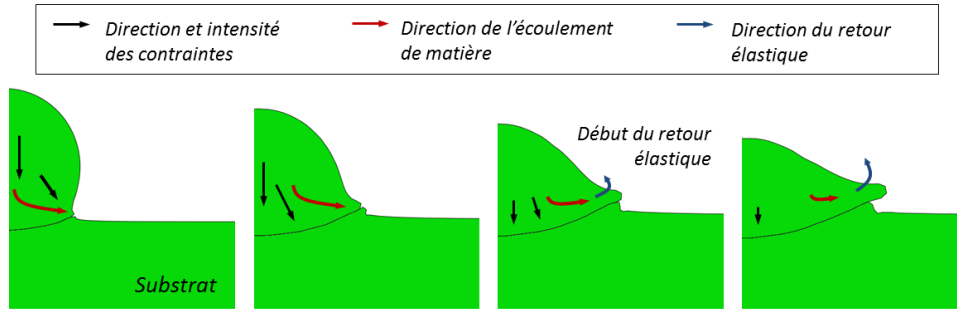


Figure 5-6 : Evolution temporelle de l'impact d'une particule avec déformation plastique du substrat et retour élastique.

Pour pallier ce phénomène de retour élastique de la particule, un instant t est défini au moment où l'énergie cinétique du modèle est minimale (fin de l'impact). Dans la réalité, les liaisons créées à l'interface particule-substrat empêchent la particule de rebondir. L'énergie subsistant au sein de la particule est alors conservée et traduit un durcissement du matériau. Une autre partie de l'énergie peut se convertir sous forme de contraintes résiduelles.

Un suivi de l'évolution de l'énergie cinétique de la particule au cours de l'impact, permet d'identifier cet instant t où le minimum de vitesse est atteint (Figure 5-7). L'énergie cinétique de la particule décroît progressivement avec sa déformation et sa pénétration dans le substrat. Cette évolution est déterminée en fonction de la vitesse d'impact de la particule et, a fortiori, de son diamètre. Le Tableau 5-5 donne la durée de l'impact pour différentes tailles de particules.

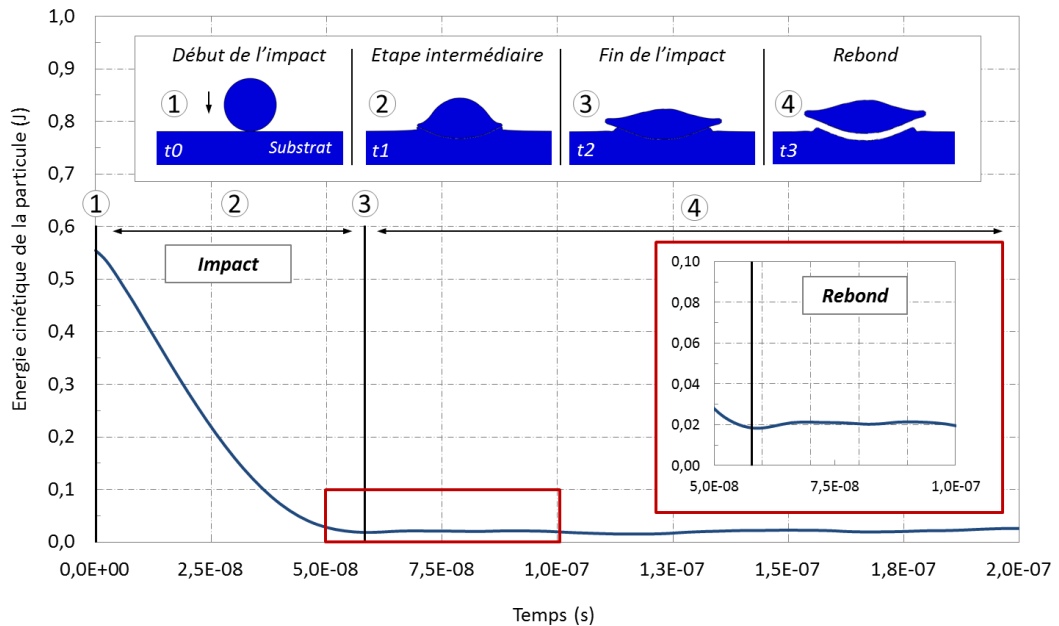


Figure 5-7 : Evolution temporelle de l'énergie cinétique de la particule au cours de l'impact.

Tableau 5-5 : Durée de l'impact en fonction du diamètre D_p de la particule.

	$D_p = 10 \mu\text{m}$	$D_p = 30 \mu\text{m}$
Durée de l'impact (10^{-9} s)	16	40

2.2.2. Comparaison du taux d'écrasement

A la fin de l'impact, la particule déformée peut être caractérisée par un taux d'écrasement ε (défini dans le §1.3.1, (Eq. 4.6), Figure 4-24b). En comparant la morphologie du splat obtenu expérimentalement et numériquement, la validation du modèle se trouve renforcée. Les mesures sont effectuées sur une série de dix splats observés en coupe (MO) et en perspective au MEB. La démarche consiste à déterminer la hauteur h_d et la largeur l_d du splat à partir des images réalisées. L'observation d'une particule déformée en coupe est limitée par l'impossibilité de savoir avec précision si la section observée est le milieu du splat. En vue MEB, la perspective rend délicate la mesure de la hauteur du splat. Une observation en vue rasante, c'est-à-dire avec un angle d'observation très faible par rapport à la surface du substrat, est préférée.

Le Tableau 5-6 donne les valeurs du taux d'écrasement pour différentes tailles de particules en fonction de la technique de mesure. Les résultats entre les mesures effectuées sur les splats numériques et expérimentaux sont très proches quel que soit le diamètre de la particule. Les techniques employées permettent d'obtenir une estimation du taux d'écrasement de la particule malgré les difficultés et les limitations de ces dernières.

Tableau 5-6 : Taux d'écrasement ε en fonction du diamètre D_p de la particule.

	$D_p = 10 \mu\text{m}$	$D_p = 30 \mu\text{m}$
Simulation numérique	0,76	0,74
Microscopie en coupe (MO)	$0,69 \pm 0,04$	$0,72 \pm 0,02$
Microscopie MEB	$0,72 \pm 0,07$	$0,68 \pm 0,05$

2.3. Conclusion sur le modèle numérique

La simulation d'impact d'une particule élémentaire est réalisée. Elle a permis de modéliser les déformations subies par une particule qui rencontre un substrat à haute vitesse. Plusieurs critères sont choisis pour valider le modèle numérique. Une corrélation morphologique entre les splats déposés expérimentalement et numériquement a été effectuée. Le taux d'écrasement de la particule à la fin de l'impact a été déterminé. La validation qualitative et quantitative du modèle d'impact permet d'appréhender les déformations dues au choc et d'en évaluer les variations suivant les conditions d'impact.

3. Impact d'une particule sur substrat plan

Cette partie a pour objectif de simuler l'impact d'une particule sphérique sur substrat plan. Le comportement de la particule (20 μm de diamètre) à l'impact est étudié en fonction des paramètres de projection : la vitesse de la particule, sa température et son angle d'incidence avec le substrat. Une caractérisation de la déformation plastique du substrat et de la particule est entreprise afin d'établir l'influence des paramètres et des conditions de projection sur la morphologie finale de l'ensemble particule-substrat. Sauf mention contraire, les conditions d'impact de la particule sur le substrat sont résumées dans le Tableau 5-1 (§1.1.3).

3.1. Influence des paramètres d'impact de la particule

3.1.1. Effet de la température de la particule

La Figure 5-8 met en évidence la morphologie finale de la particule sur un substrat pour différentes températures. Une déformation plastique de la particule très différente est observée. Plus la température de la particule est élevée, plus sa déformation est forte. La particule se déforme davantage que le substrat dont la dureté est plus élevée. Un étalement très prononcé de la particule est observé avec l'élévation de sa température avant l'impact. Un échauffement en périphérie de la zone d'impact est également mesuré. Les échauffements au sein du substrat sont très réduits, puisqu'ils n'évoluent que très peu avec l'augmentation de la température de la particule. En effet, aucune transmission de chaleur n'étant considérée (§1.1.3), seules les déformations intenses provoquées par l'impact sont responsables de l'élévation de la température à l'interface et dans sa région.

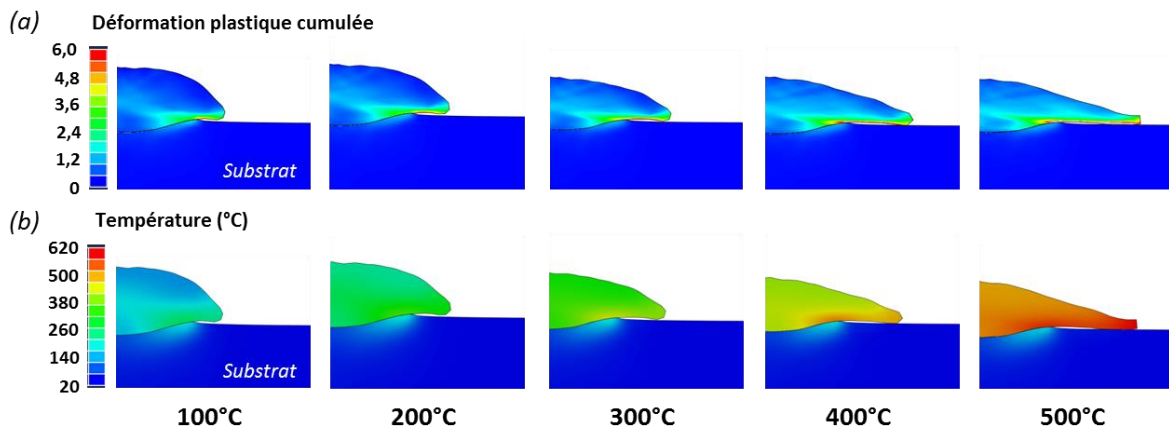


Figure 5-8 : Evolution (a) de la déformation plastique cumulée et (b) de la température d'une particule d'aluminium pur 1050 et du substrat d'aluminium 2024-T3 en fonction de la température d'impact de la particule.

Le taux d'écrasement de la particule, défini dans le §1.1.3, est plus élevé pour une température de particule de 500°C (Figure 5-9a). La particule se déforme considérablement mais son enfoncement dans le substrat est plus faible. La pénétration de la particule dans le substrat s'exprime par la différence entre la surface initiale de celui-ci et son point le plus bas (au centre de la particule) à la fin de l'impact. La simulation 2D donne des résultats de déformation des matériaux légèrement différents de ceux obtenus expérimentalement. Pour une température de particule de 300°C, température supposée juste avant l'impact avec le substrat, un écart est mesuré avec la simulation numérique. Dans la suite, l'explication de cet écart est

précisé avec, notamment, la comparaison des simulations 3D, non réalisées dans l'étude de l'influence de la température de la particule.

Plus la température de la particule à l'impact augmente, plus son taux d'écrasement augmente et son enfoncement dans le substrat se réduit. A haute température, la déformation se concentre dans la particule. Cette dernière s'explique par la chute de la résistance mécanique du matériau lorsque sa température est augmentée. Le dernier terme de l'équation de Johnson-Cook (Eq. 5.1), correspondant à l'adoucissement thermique, explique en partie ce phénomène.

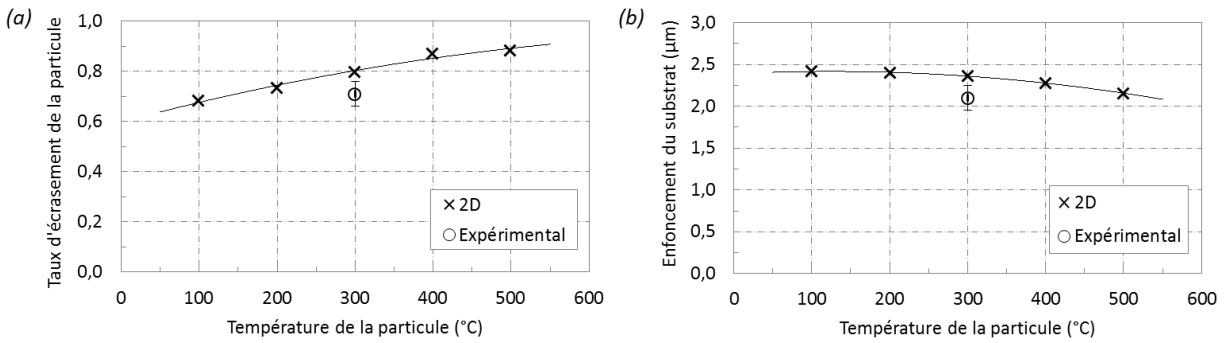


Figure 5-9 : Evolution (a) du taux d'écrasement de la particule d'aluminium pur 1050 et (b) de l'enfoncement du substrat d'aluminium 2024-T3 en fonction de la température d'impact de la particule pour des simulations 2D et comparée à l'expérimental.

3.1.2. Effet de la vitesse de la particule

A l'instar de la température d'impact de la particule (§3.1.1), la vitesse influe sur la déformation plastique des matériaux (Figure 5-10). Des mesures sont effectuées sur les déformations de la particule et du substrat. Une simulation 3D est réalisée, en complément de la simulation d'impact 2D, donnant naissance à des résultats similaires (Figure 5-11).

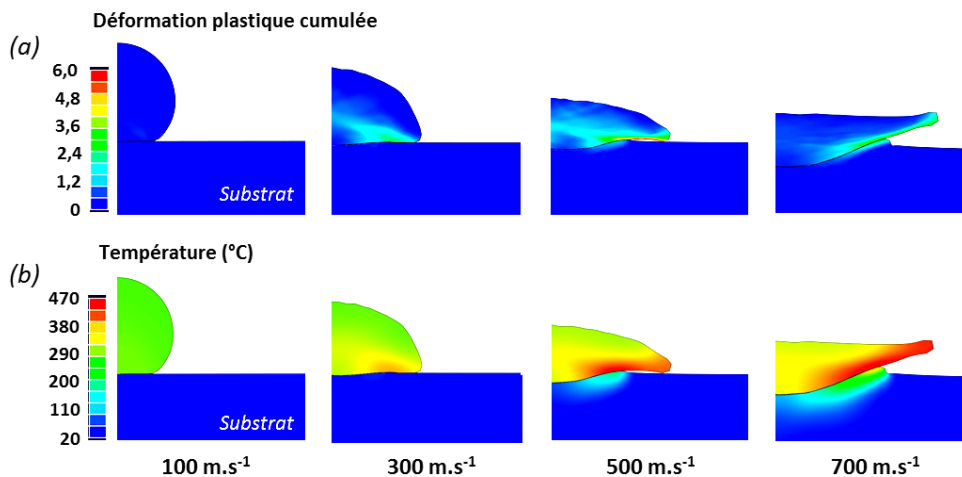


Figure 5-10 : Evolution (a) de la déformation plastique cumulée et (b) de la température de la particule d'aluminium pur 1050 et du substrat d'aluminium 2024-T3 en fonction de la vitesse d'impact de la particule.

La Figure 5-10a illustre la déformation plastique d'une particule pour différentes vitesses d'impact. Le substrat et la particule se déforment sous l'effet du choc. Pour une vitesse de projection relativement faible (100 m.s⁻¹), une très légère déformation de la particule est mesurée. Le substrat, plus dur, ne s'est que très

peu déformé. Il n'y a pas de pénétration de la particule dans le substrat, même si des déformations plastiques sont observées. En augmentant la vitesse de la particule, son étalement est plus fort et son taux d'écrasement croît (Figure 5-11a). Plus la vitesse de la particule augmente, plus sa déformation s'intensifie. A très haute vitesse d'impact (700 m.s^{-1}), les échauffements à l'interface substrat-particule sont très élevés et des jets de matière sont observables en périphérie de la zone d'impact. Le substrat est plus contraint qu'à faible vitesse (Figure 5-10b) et l'enfoncement de la particule est favorisé (Figure 5-11b). La vitesse de la particule crée des échauffements dans la particule en la ramollissant, ce qui influe sur sa morphologie finale.

Ainsi, en augmentant la vitesse d'impact de la particule, le substrat se déforme plus intensément, tout comme la particule qui s'étale plus intensément à la surface du substrat. Les hypothèses de calcul présentées dans le §1.1.3 montrent une différence de la déformation des matériaux entre une simulation 2D et 3D. Si pour de faibles vitesses d'impact une similarité des résultats est observée, l'écart est grandissant avec l'augmentation de cette vitesse de la particule. La proximité des résultats expérimentaux et numériques par la simulation 3D est remarquable et confirme l'intérêt de cette simulation. Toutefois, la tendance est préservée et l'effet de la vitesse d'impact sur les déformations plastiques des matériaux est mis en évidence.

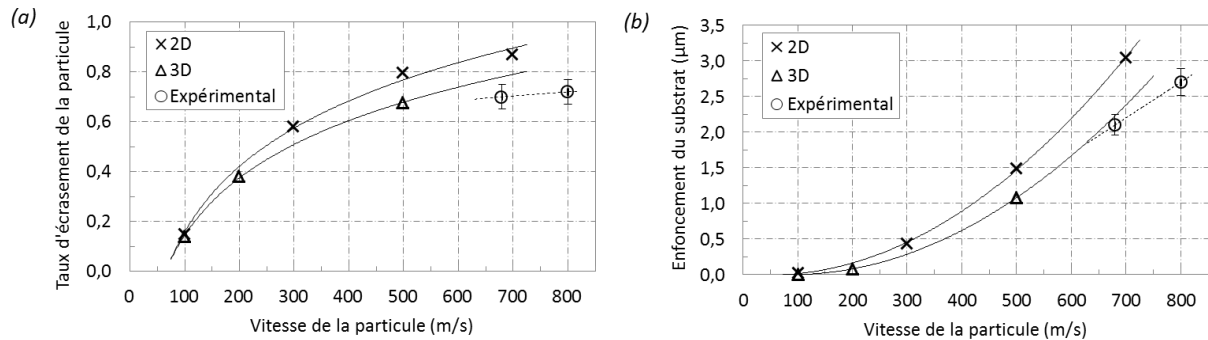


Figure 5-11 : Evolution (a) du taux d'écrasement de la particule d'aluminium pur 1050 et (b) de l'enfoncement du substrat d'aluminium 2024-T3 en fonction de la vitesse d'impact de la particule pour des simulations 2D et 3D et comparée à l'expérimental.

3.1.3. Effet de l'angle de projection de la particule

L'angle d'incidence de la particule avec la surface du substrat contribue fortement à sa déformation plastique et joue un rôle déterminant dans l'ancrage mécanique de la particule (Chapitre 3, §3.3.2). La Figure 5-12 montre les résultats des simulations 2D pour une particule heurtant un substrat plus dur. Différents angles de projection sont ainsi choisis afin d'analyser l'influence des composantes de la vitesse d'impact sur la déformation de la particule et l'enfoncement du substrat. La Figure 5-13 illustre l'évolution de cet enfoncement ainsi que le taux d'écrasement de la particule en fonction de l'angle de projection.

Pour un petit angle de projection (30°), l'enfoncement du substrat résulte de très faibles déformations. En comparaison avec les observations expérimentales (Chapitre 3, §3.3.2), le splat n'adhère pas au substrat et rebondit. La simulation d'impact, telle qu'elle a été entreprise, ne permet pas de reproduire cet effet. Un enfoncement très faible du substrat est, d'ailleurs, mesuré pour une faible incidence de la particule (Figure 5-13b). La particule se déforme davantage à l'impact et ses déformations cumulées, localisées à l'interface, sont élevées. Ces déformations intenses induisent des échauffements à l'interface qui sont accrus par des frottements et des glissements de la particule sur le substrat. La composante tangentielle est d'autant plus forte que l'angle de projection est faible. Le rebond de la particule y est donc favorisé. Lorsque les contacts de l'interface particule-substrat sont élevés, le rebond de la particule est limité. Cette dernière

pénètre plus profondément dans le substrat, ce qui accroît la fraction de la surface de la particule et celle du substrat en contact. L'autre fraction de la surface est libre et ne participe pas à l'adhésion du système (Figure 5-12). Cette configuration n'est pas propice à une adhésion forte de la particule et contribue d'autant plus à son rebond. Les résultats expérimentaux issus de l'observation vont, d'ailleurs, dans le même sens (Chapitre 3, §3.3.2).

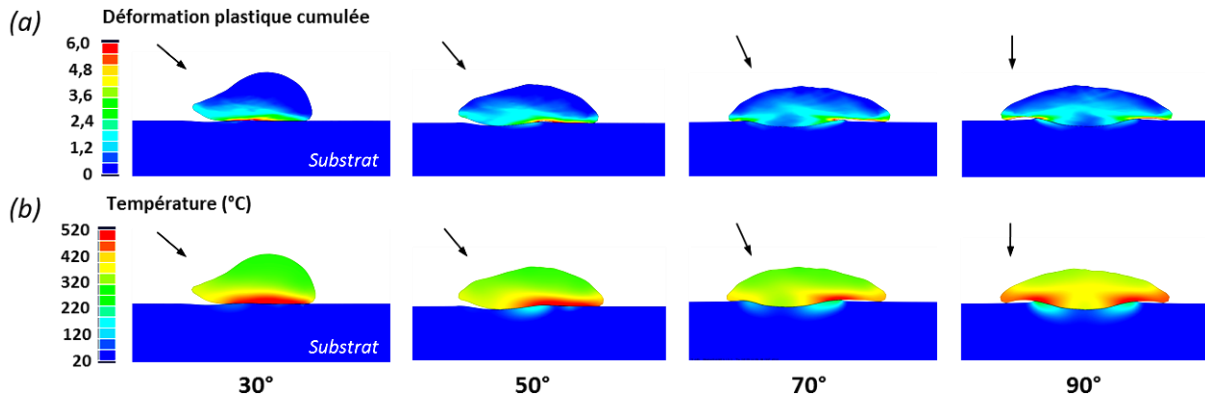


Figure 5-12 : Evolution (a) de la déformation plastique cumulée et (b) de la température de la particule d'aluminium pur 1050 et du substrat d'aluminium 2024-T3 en fonction de l'angle de projection de la particule.

L'enfoncement de la particule dans le substrat est favorable à l'ancrage mécanique alors que la température localisée à l'interface favorise la création de liaisons métallurgiques fortes. Pour une incidence normale à la surface du substrat (90°), les déformations plastiques de la particule sont particulièrement élevées (Figure 5-13a) et la pénétration de la particule dans le substrat maximale (Figure 5-13b). La composante normale V_n de la vitesse permet cet enfoncement plus élevé ainsi qu'un meilleur étalement de la particule. La surface de contact entre la particule et le substrat y est plus grande que pour une incidence faible. Des résultats très proches, mais légèrement supérieurs à ceux expérimentaux, sont mesurés entre la simulation 2D et 3D concernant la déformation de la particule. Néanmoins, un écart significatif est observé dans la déformation du substrat. En effet, son enfoncement est réduit dans le cas de la simulation 3D comme dans celui expérimental. Précisée dans le §3.1.2, la similitude de ces résultats amènent à considérer la simulation d'impact d'une sphère comme celle transcrivant le mieux les comportements expérimentaux.

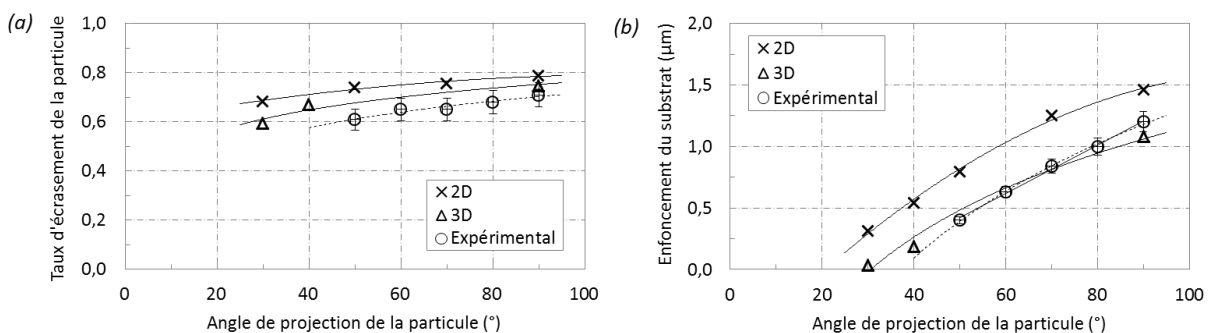


Figure 5-13 : Evolution (a) du taux d'écrasement de la particule d'aluminium pur 1050 et (b) de l'enfoncement du substrat d'aluminium 2024-T3 en fonction de l'angle d'incidence de la particule à l'impact pour des simulations 2D et 3D et comparée à l'expérimental.

La vitesse de la particule est un paramètre déterminant dans les déformations du système particule-substrat. En jouant sur les composantes V_n et V_t de la vitesse, les déformations mesurées sont sensiblement

modifiées. L'énergie cinétique est transformée en chaleur grâce aux déformations plastiques subies par les matériaux. Une énergie cinétique résiduelle, due à la non-adhérence de la particule sur le substrat, favorise le rebond. Lorsque la particule percute le substrat perpendiculairement, l'énergie transférée est maximale et le rebond fortement limité. A l'inverse, en abaissant l'angle de projection, un pourcentage élevé de l'énergie cinétique n'est pas transmis. Le rebond de la particule est alors favorisé. La Figure 5-14 illustre ce phénomène pour des projections réalisées sous de faibles angles. En somme, la part d'énergie cinétique de la particule transférée au substrat est d'autant plus élevée que l'angle d'incidence de la particule est proche de 90° et, a fortiori, que le taux de rebond est faible.

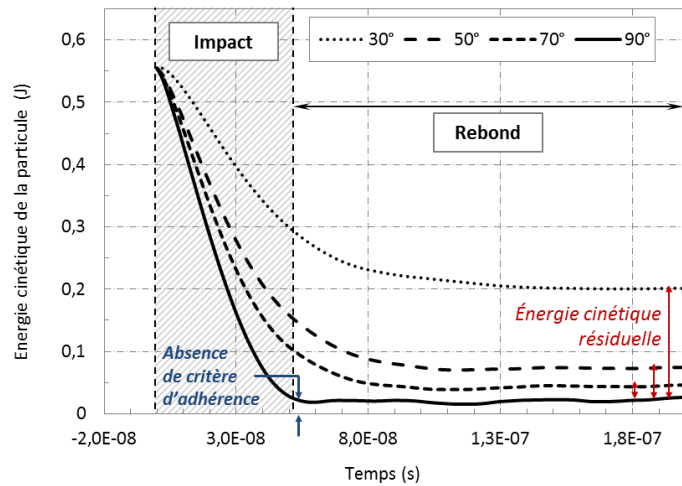


Figure 5-14 : Evolution temporelle de l'énergie cinétique de la particule d'aluminium pur 1050 percutant le substrat d'aluminium 2024-T3 en fonction du temps et de l'angle d'incidence de la particule : notion d'énergie cinétique résiduelle.

3.2. Température maximale atteinte à l'interface particule-substrat

Sur les zones périphériques de la zone d'impact, les plus fortes températures sont atteintes. Le cisaillement adiabatique y est favorisé. Les échauffements sont tels que la température au sein du substrat et dans la particule est la plus forte. Les liaisons, créées localement, régissent l'adhésion de la particule. La détermination de la température à l'interface particule-substrat permet de caractériser la nature de ces liaisons : chimique ou mécanique. Cette valeur, expérimentalement inaccessible, est apportée par la simulation numérique. Les résultats, exposés en Figure 5-15, montrent la température maximale atteinte dans le substrat et dans la particule, à l'endroit où les déformations plastiques cumulées sont les plus intenses (Figure 5-15, à gauche) et où le cisaillement est le plus fort (Figure 5-15, à droite). Une combinaison de la déformation plastique et du cisaillement sont responsables de la plus forte température atteinte localement.

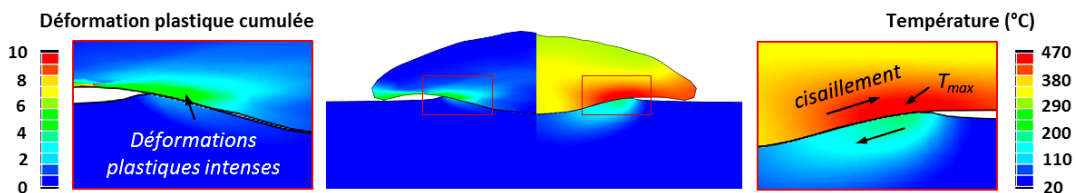


Figure 5-15 : Impact d'une particule d'aluminium pur 1050 avec la présence d'échauffements forts, localisés à l'interface particule-substrat : cisaillement adiabatique provoqué par les frottements particule sur substrat d'aluminium 2024-T3.

Les résultats de la Figure 5-16a résument l'influence de la température et de la vitesse de la particule sur la température maximale atteinte à l'interface particule-substrat. Une faible vitesse d'impact n'élève que

faiblement la température de la particule par rapport à sa température avant impact. A l'inverse, lorsque la particule se dépose sur le substrat à très haute vitesse (700 m.s^{-1}), l'élévation de température est plus forte dans le substrat, qu'elle ne l'est au sein de la particule (Figure 5-16). Dans tous les cas, la température du substrat demeure inférieure à celle de la particule. Ce phénomène est particulièrement marqué lorsque la température de la particule avant l'impact est élevée (Figure 5-16b).

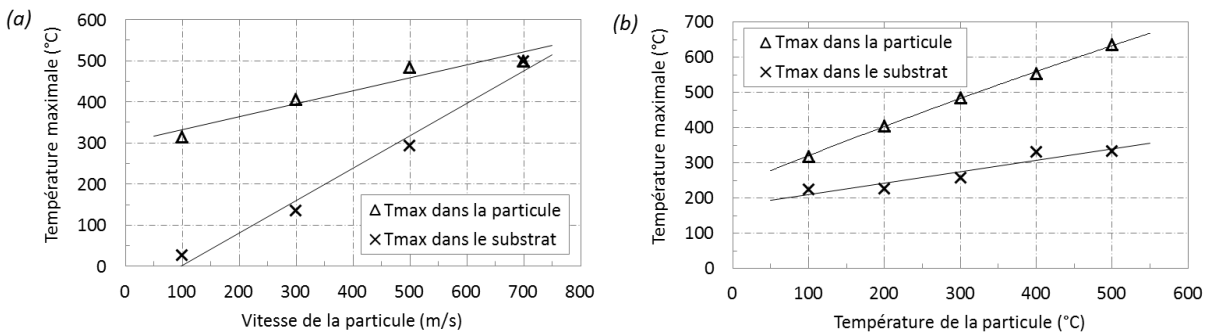


Figure 5-16 : Evolution de la température maximale T_{max} atteinte dans la particule d'aluminium pur 1050 et dans le substrat d'aluminium 2024-T3 en fonction (a) de la vitesse de la particule et (b) de la température de la particule juste avant l'impact obtenue par la simulation 2D.

3.3. Conclusion sur l'influence des paramètres d'impact

La température de la particule joue un rôle déterminant dans sa déformation plastique. Plus la température de la particule, juste avant l'impact, est élevée, plus son étalement à la surface du substrat est prononcé. Le substrat, plus dur, préserve d'autant plus sa géométrie. En effet, l'enfoncement de la particule y est plus faible pour une température élevée (§3.1.1). La particule se déforme davantage par rapport au substrat étant donné sa température interne plus élevée. Un maximum de température est atteint au cours de l'impact et traduit des échauffements très localisés à l'interface particule-substrat qui favorisent les liaisons métallurgiques. Ce phénomène est d'autant plus intense que la température et la vitesse de la particule avant l'impact sont élevées (§3.2).

Comme pour la température, la vitesse d'impact de la particule contribue à échauffer localement l'interface particule-substrat. Cela permet, notamment, d'accroître les liaisons mécaniques et métallurgiques (Chapitre 1, §2.3.2). L'élévation locale de température, tout comme la plus forte pénétration de la particule dans le substrat, sont favorables à l'adhésion de la particule. La composante normale de la vitesse permet d'augmenter l'ancrage de la particule dans le substrat (§3.1.2).

La variation de l'angle d'incidence de la particule génère une composante tangentielle qui, par une énergie cinétique résiduelle plus élevée, engendre une déformation réduite de la particule, augmentant ainsi sa probabilité de rebond. La surface de contact entre la particule et le substrat est d'autant plus élevée que l'angle de projection de la particule se rapproche d'une incidence perpendiculaire. Un impact normal à la surface du substrat accroît ainsi la cohésion du système particule-substrat (§3.1.3).

L'écart mesuré entre les résultats de la simulation 2D et 3D est expliqué par la moins bonne représentativité du modèle 2D, même si celui-ci donne des tendances similaires de l'évolution des déformations plastiques du système particule-substrat. Son assimilation à un cylindre en l'extrapolant au cas 3D (§1.1.3) est directement responsable des différences morphologiques observées. Le taux d'écrasement de la particule ainsi que l'enfoncement du substrat y sont surestimés. La simulation 3D donne des résultats très proches des courbes d'évolution de ces paramètres morphologiques (déformations plastiques) en fonction des conditions d'impact.

4. Impact d'une particule sur substrat rugueux

Dans cette partie, l'influence de la morphologie du substrat est étudiée, c'est-à-dire l'influence de la rugosité de surface. Le comportement plastique de la particule sphérique et du substrat rugueux est analysé. Pour se rapprocher au mieux du cas expérimental, le profil de rugosité, observé après sablage de la surface, est intégré au modèle numérique. De plus, l'impact d'une particule sur le profil simplifié, issu de l'analyse topographique des surfaces rugueuses (Chapitre 4, Partie 1, §4.3), est simulé. La Figure 5-17 illustre les objectifs de l'étude, à savoir l'analyse des déformations plastiques de la particule et du substrat rugueux.

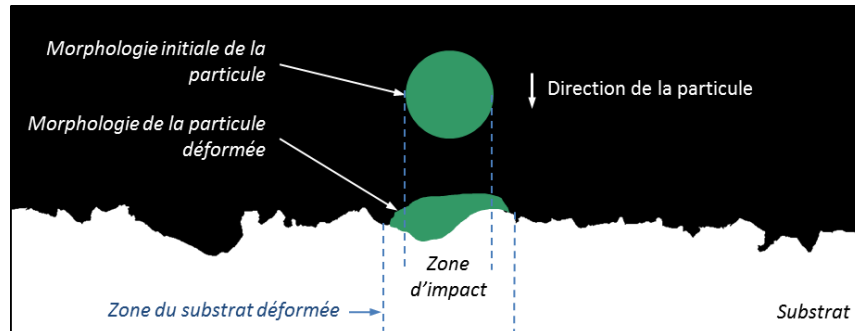


Figure 5-17 : Représentation schématique d'une particule sphérique percutant un substrat rugueux.

4.1. Réalisation du maillage des substrats rugueux

Pour étudier l'influence de la morphologie du substrat, les surfaces rugueuses sont injectées dans le logiciel de simulation d'impact. Deux voies sont étudiées : la morphologie de surface, issue de l'observation optique en coupe du substrat et la morphologie de surface équivalente, déduite de l'analyse topographique des surfaces rugueuses (Chapitre 4, Partie 1, §4). Le profil équivalent est construit à partir des valeurs médianes des hauteurs et des largeurs déterminées au Chapitre 4 (Partie 1, §4.3) dont une représentation est effectuée dans le §4.2.1.

4.1.1. Détermination des dimensions de la surface rugueuse à mailler

Quand la particule rencontre le substrat rugueux, les dimensions de la surface rencontrée par la particule sont proportionnelles au diamètre D_p de la particule. Si ce dernier est très grand devant la longueur caractéristique du substrat rugueux, précédemment déterminée (Chapitre 4, Partie 1, §3.2.2), l'impact par simulation numérique est représentatif. Dans le cas contraire, il ne l'est pas ou du moins que partiellement. Pour rappel, les longueurs caractéristiques des différents substrats sablés sont : 10, 18 et 33 μm , respectivement pour le substrat d'aluminium 2024-T3 sablé finement, moyennement et grossièrement.

Pour ce qui est de la morphologie de surface, issue de l'observation optique en coupe, l'extraction d'une zone du substrat rugueux est réalisée. Afin de considérer l'étalement de la particule et les rugosités en périphérie de la zone d'impact L_{zi} , cette dernière est élargie et prise suffisamment grande devant le diamètre D_p de la particule. Un coefficient multiplicateur est défini : $L_{zi} = 3 \times D_p$ (Figure 5-18a, à gauche). Par exemple, pour une particule de diamètre D_p égal à 30 μm se déposant sur une surface sablée, la taille de l'image vaut trois fois D_p , c'est-à-dire 90 μm . Ensuite, les zones périphériques de l'image sont prolongées suivant les directions x et y . Les déformations occasionnées par l'impact se propageant dans le substrat, les dimensions de la zone d'impact sont étendues. Proportionnelles à D_p , les dimensions de cette zone sont multipliées par un

trois suivant l'axe x et par cinq suivant l'axe y (Figure 5-18, à droite). Le Tableau 5-7 résume ces dimensions sur des profils rugueux, utilisés pour les simulations d'impact en fonction du diamètre D_p de la particule.

Quant à la morphologie de surface équivalente, obtenue par l'analyse topographique des surfaces rugueuses, le profil est associé à une fonction périodique de type sinusoïdale : $(a/2) (1 + \cos(\pi x/\lambda))$, d'amplitude a et de longueur d'onde λ . Ces coefficients sont définis à partir des résultats de la Partie 1 du Chapitre 4 (§4.3, Figure 4-21). La représentation du profil équivalent est illustrée sur la Figure 5-18b.

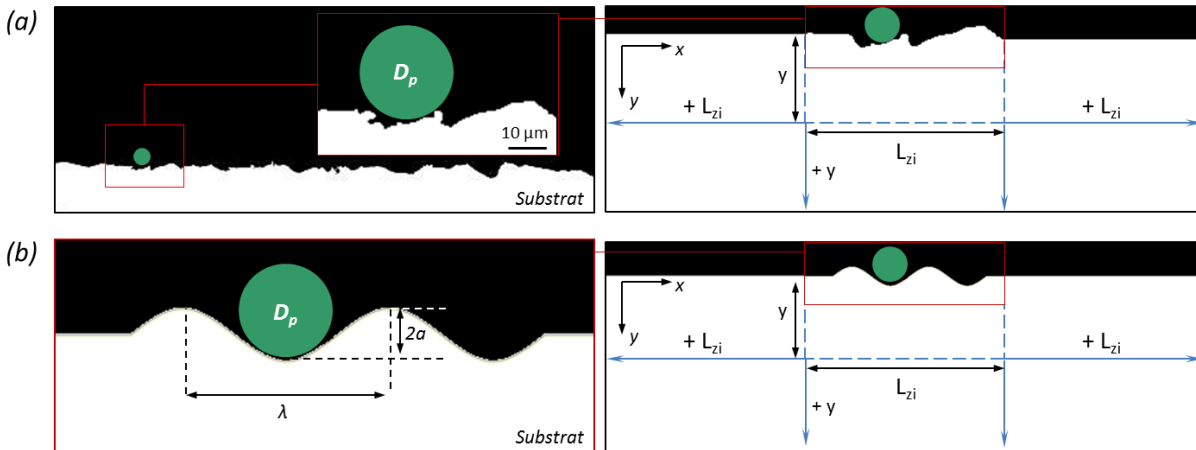


Figure 5-18 : Détermination des dimensions de la surface rugueuse à mailler pour un substrat dont la rugosité est (a) issue de l'observation en coupe et (b) issue de l'analyse topographique de surface, profil équivalent.

Tableau 5-7 : Longueur de la zone d'impact des profils rugueux issus de l'observation optique en coupe des substrats d'aluminium 2024-T3 sablés en fonction du diamètre D_p de la particule.

	Longueur L_{zi} (μm)	Dimensions finales du substrat	
		x (μm)	y (μm)
$D_p = 10 \mu\text{m}$	30	90	50
$D_p = 30 \mu\text{m}$	90	270	150

4.1.2. Optimisation du maillage des surfaces rugueuses

La simulation d'impact à haute vitesse par éléments finis est particulièrement sensible aux phénomènes de distorsion excessive des éléments (§1.1.1), représentés par les mailles. Pour limiter ces distorsions, une opération de lissage morphologique de la surface rugueuse est effectuée. L'opération morphologique réalisée est de type fermeture (Chapitre 4, §3.1). Cette opération élimine les protubérances de la surface qui pourraient perturber le déroulement des calculs au cours de l'impact. Elle ne modifie que très peu la morphologie de surface issue de l'observation optique. De plus, les infimes variations géométriques de la surface rugueuse sont totalement effacées lors de l'impact comme cela a été montré dans le Chapitre 4 (Partie 1, §4). La Figure 5-19 montre le profil rugueux avant et après cette opération morphologique.

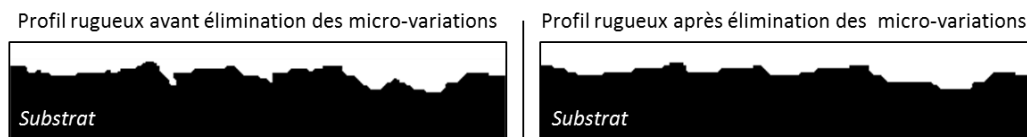


Figure 5-19 : Profil réel du substrat rugueux avant (à gauche) et après (à droite) l'opération morphologique destinée à supprimer les protubérances de la surface.

Pour l'importation de l'image sous Abaqus Explicit[®], un code de calcul, développé au Centre des Matériaux, permet de mailler l'image à l'aide d'outils morphologiques. Ces derniers reposent sur l'étude d'une morphologie hétérogène de la surface [GUY14].

Le maillage de l'image est la dernière étape avant la simulation d'impact. Des paramètres de maillage sont définis : leur taille et leur forme. Il est préférable d'effectuer un maillage grossier et de l'optimiser, par la suite, en fonction des résultats de l'opération. Si des discontinuités sur les éléments du substrat sont observées, le maillage est alors optimisé à nouveau. Un gradient de taille de maille résulte de cette optimisation de maillage avec des éléments de petites dimensions à l'endroit de l'impact et des plus grossiers loin de la zone d'impact (Figure 5-20a).

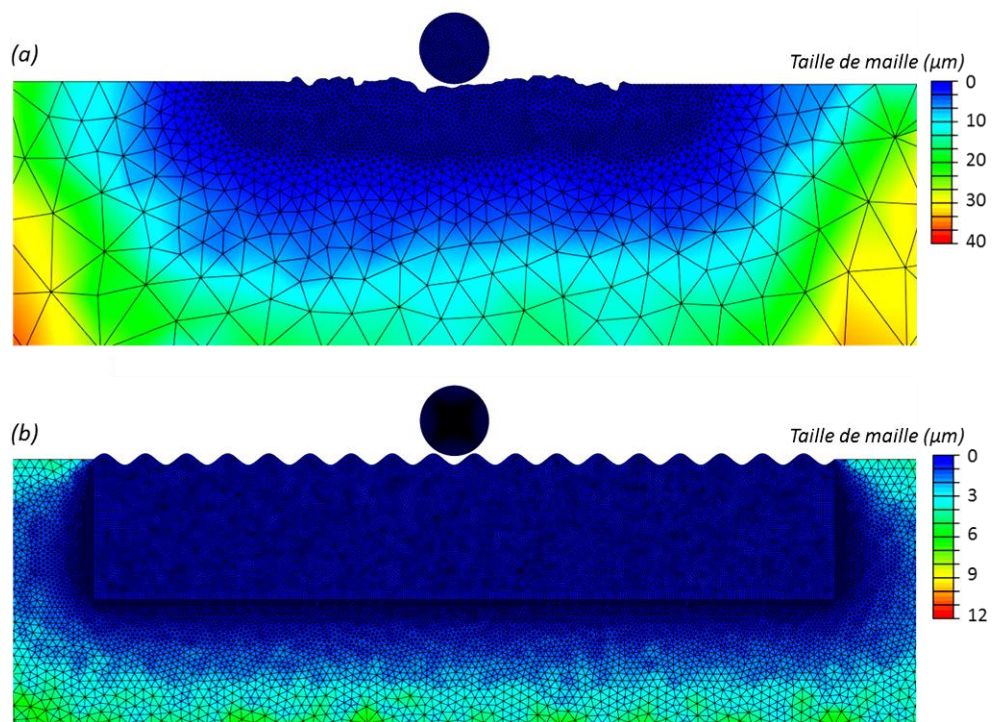


Figure 5-20 : Zone d'impact des simulations 2D d'impact d'une particule sur substrat rugueux après une opération de maillage optimisée (a) de la rugosité issue de l'observation en coupe et (b) de la rugosité équivalente issue de l'analyse topographique des surfaces rugueuses.

Ce type de maillage est réalisé pour les différents états de surface, c'est-à-dire pour des granulométries de corindon différentes. Au vu des résultats similaires des analyses dimensionnelles des surfaces sablées moyennement et grossièrement, effectuées au Chapitre 4 (§4.2), seuls deux états de surfaces sont étudiés ici : le substrat sablé finement et grossièrement. La variation de la rugosité du substrat sablé, et plus particulièrement de la topographie de surface, est un point majeur dans la déformation de la particule et du substrat. La particule pénètre d'autant plus profondément dans le substrat que les dimensions des vallées du substrat sont comparables à son diamètre (Chapitre 4, Partie 1 §4.3). Les profils équivalents des substrats sablés sont également étudiés afin d'être corrélés aux résultats d'impact sur la surface rugueuse issue de l'observation en coupe (§4.1.1). La Figure 5-20b illustre le maillage défini pour le modèle d'impact.

4.2. Déformation plastique de la particule et du substrat

Une modélisation des surfaces rugueuses est entreprise afin de comparer la morphologie des substrats et les déformations induites par le choc. Cette étude de la morphologie du système particule-substrat rugueux après l'impact est réalisée afin de conforter les analyses topographiques des profils effectuées dans le Chapitre 4 (Partie 1, §4.3, Figure 4-20).

4.2.1. Etude morphologique du substrat après impact d'une particule

Dans cette partie, la rugosité réelle des substrats est comparée à la rugosité simplifiée issue de l'analyse topographique des profils. Le but est de simuler l'impact d'une particule sphérique sur substrat rugueux et d'étudier les déformations engendrées. Le profil équivalent est obtenu en représentant les rugosités de surface par un profil qui respecte les hauteurs et les largeurs médianes déterminées. Elle est définie par une fonction de type sinusoïdale, où l'amplitude est donnée par la demi-hauteur médiane et la période par la largeur médiane. La topographie des substrats ainsi obtenue, est présentée en Figure 5-21.

La modélisation de la surface des substrats rugueux permet de réaliser une simulation d'impact. Cette dernière doit vérifier si des correspondances existent entre les profils réels et ceux simplifiés. Les simulations sont effectuées pour un diamètre de particule fixé à 30 μm et les conditions de l'impact sont celles résumées dans le Tableau 5-1 (§1.1.3).

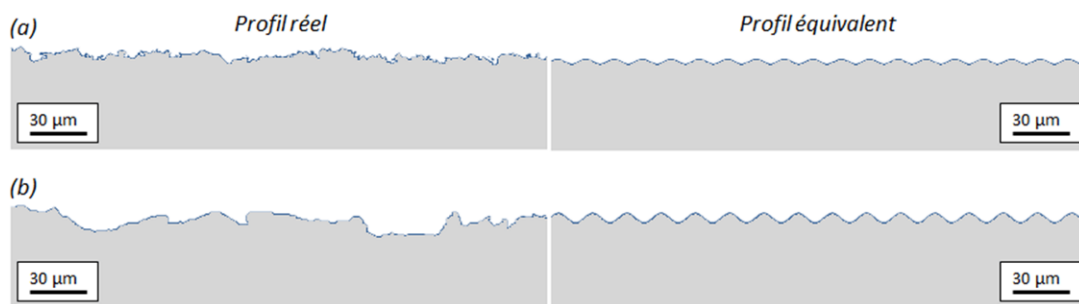


Figure 5-21 : Topographies des substrats rugueux avec les profils réels (à gauche) et équivalents (à droite) et sablés (a) finement et (b) grossièrement.

Les résultats, présentés sur la Figure 5-22, montrent les différentes étapes de l'impact d'une particule sphérique sur les profils réels et équivalents. Les déformations plastiques de la particule et du substrat sont très proches pour chacun des profils rugueux. Les zones périphériques de la particule, particulièrement déformées, sont visibles sur les simulations réalisées sur le profil réel et équivalent. L'étalement plastique de la particule à la surface du substrat est similaire dans les deux cas. L'enfoncement de la particule dans le substrat est favorable à son ancrage, d'autant plus que la rugosité du substrat est grossière. Les petites vallées, présentes en surface du substrat, sont fortement déformées après l'impact (Figure 5-22a). La particule pénètre dans le substrat mais de manière limitée en comparaison avec une surface dont les dimensions des vallées sont plus élevées (Figure 5-22b). En somme, la morphologie de la particule est sensiblement équivalente entre les profils du substrat réels et équivalents. Cette conclusion amène à considérer les paramètres représentatifs, déterminés par l'analyse topographique du profil, présentée dans le Chapitre 4 (Partie 1, §4.3), comme validés par la simulation d'impact. Par la suite, le profil équivalent est utilisé pour simuler la topographie du profil réel.

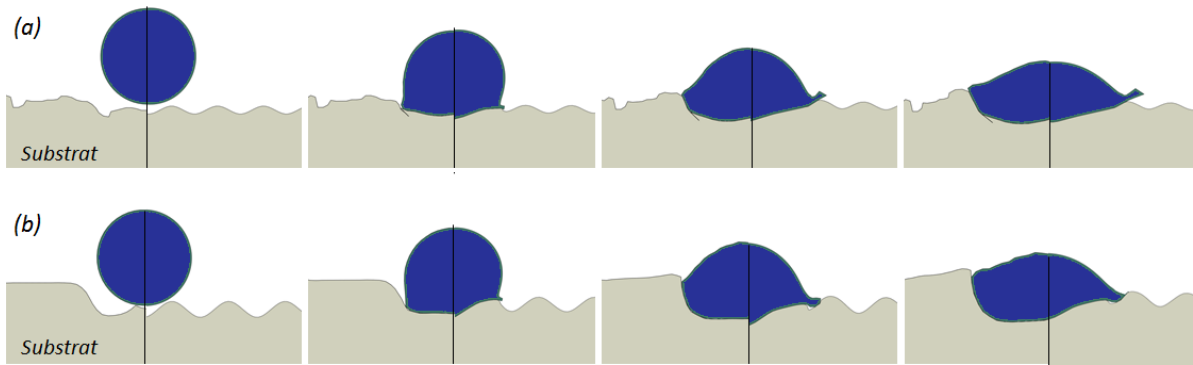


Figure 5-22 : Evolution temporelle de l'impact numérique d'une particule d'aluminium pur 1050 sphérique sur substrat d'aluminium 2024-T3 (a) sablé finement et (b) sablé grossièrement, avec un profil de rugosité réel (à gauche des sous-figures) et équivalent (à droite des sous-figures).

4.2.2. Approche locale de la longueur d'interface

Une fois la morphologie finale de la particule déterminée, la longueur de l'interface entre la particule et le substrat est identifiée. Comme précisée dans le Chapitre 4 (Partie 2, §1.2.2), la longueur de l'interface particule-substrat est mesurée (Figure 5-23). La pénétration h_p de la particule dans le substrat favorise l'augmentation du contact et, a fortiori, les liaisons mécaniques.

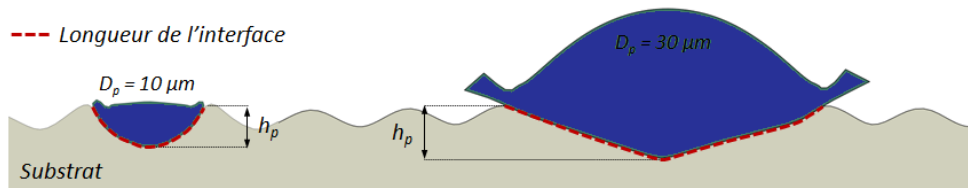


Figure 5-23 : Morphologie d'une particule d'aluminium pur 1050 à la fin de l'impact sur substrat d'aluminium 2024-T3 sablé finement équivalent, notion de longueur de l'interface particule-substrat et de profondeur de pénétration h_p de la particule dans le substrat en fonction de son diamètre D_p : 10 et 30 μm .

Le Tableau 5-8 résume ces longueurs de l'interface et les pénétrations mesurées à partir des morphologies à la fin de l'impact, et ce pour différents état de surface équivalents (sablage fin et grossier). Deux diamètres de particule sont testés : 10 et 30 μm .

L'augmentation de la longueur de l'interface particule-substrat est mesurée entre une particule de petit diamètre (10 μm) et une autre plus grosse (30 μm). Plus la particule possède un diamètre élevé, plus la longueur de l'interface particule-substrat est grande. Un rapport compris entre deux et trois est mesuré. Quant à la pénétration de la particule dans le substrat, elle est régie par son diamètre mais également par les dimensions de la vallée rencontrée par la particule. Plus la particule est grosse, plus la quantité de matière déplacée à l'impact est élevée. Sur une même morphologie de surface, la pénétration d'une particule de 10 μm de diamètre est sensiblement plus faible que pour une particule de plus grand diamètre. Lorsque la particule rencontre un substrat sablé finement, sa pénétration est plus faible que lorsqu'elle heurte un substrat sablé grossièrement.

Tableau 5-8 : Paramètres géométriques et morphologiques de l'interface particule-substrat.

Substrat	Sablé finement		Sablé grossièrement	
Diamètre de la particule	10 μm	30 μm	10 μm	30 μm
Longueur de l'interface (μm)	20,3	49,4	22,1	62,0
Profondeur de pénétration h_p (μm)	6,3	7,2	8,5	10,7

4.2.3. Bilan sur les déformations de l'interface particule-substrat

Une corrélation entre les profils rugueux réels et ceux équivalents, à partir de l'analyse topographique des surfaces sablées, est établie. La morphologie de l'interface particule-substrat après l'impact est très proche et permet d'utiliser des profils simples représentant les rugosités d'une surface aléatoire. Cette approche valide l'analyse topographique réalisée au Chapitre 4.

L'étude des déformations du système particule-substrat a mis en évidence la morphologie de l'interface qui est analysée. La caractérisation de cette dernière a révélé les différences majeures obtenues en fonction de la taille de la particule et des dimensions des rugosités du substrat. Si l'accroissement de la taille des rugosités de surface permet d'augmenter la longueur de l'interface, la projection d'une particule de diamètre plus élevé favorise la pénétration de celle-ci dans le substrat. Cette conclusion conforte les observations de splats effectuées dans le Chapitre 3 (§3.2).

4.3. Ancrage d'une particule dans un substrat rugueux

L'étude consiste à simuler l'impact d'une particule sur un profil rugueux dont la morphologie est issue des profils équivalents. La pénétration d'une particule, de diamètre figé, dans l'épaisseur du substrat est un phénomène d'autant plus prononcé que la dureté de la particule est élevée par rapport à celle du substrat. Ce dernier régit, en partie, l'adhésion du système particule-substrat.

4.3.1. Approche numérique du profil équivalent vu par la particule

Comme effectué dans le Chapitre 4 (§4.3), le but est, ici, de faire entrer en collision une grosse et une petite particule sur un substrat sablé finement et un autre sablé grossièrement, afin de déterminer la morphologie finale du système particule-substrat.

La Figure 5-24 met en évidence que la déformation de la particule dépend des dimensions des rugosités de surface du substrat. Pour une surface sablée finement, les vallées sont nombreuses et de faible amplitude. Pour une particule de diamètre $30\ \mu\text{m}$, les vallées s'apparentent à une surface quasiment plane. Une particule de diamètre $10\ \mu\text{m}$ parvient à se loger dans une vallée de la surface du substrat (Figure 5-24a). Dans le cas d'une surface sablée grossièrement, quelle que soit la taille de la particule, celle-ci a la possibilité de s'ancrer dans une vallée.

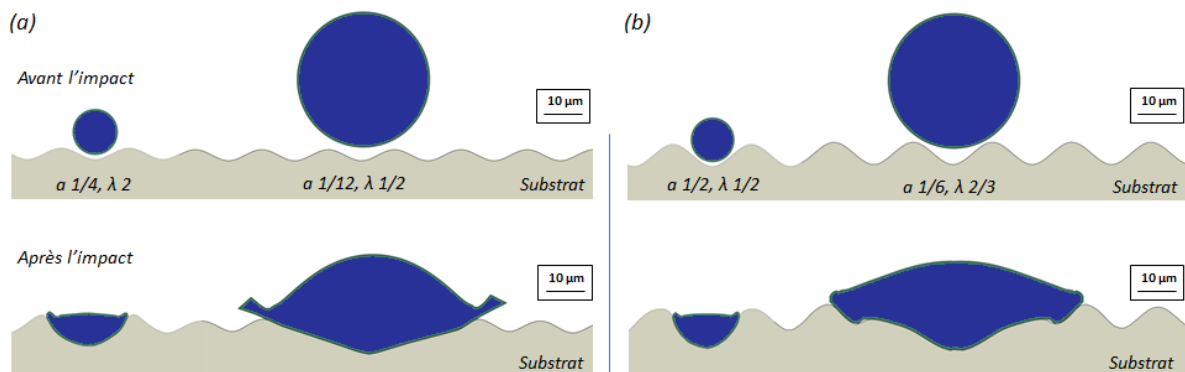


Figure 5-24 : Morphologie du système particule-substrat avant (en haut) et après (en bas) l'impact, pour une particule de $10\ \mu\text{m}$ (à gauche des sous-figures) et $30\ \mu\text{m}$ (à droite des sous-figures) percutant un substrat rugueux sablé (a) finement et (b) grossièrement.

La déformation de la particule est donc fortement liée à la topographie de surface qu'elle rencontre. Cela conforte les résultats obtenus dans le Chapitre 4 (Partie 1, §4.3, Figure 4-21). Grâce à l'analyse réalisée dans ce chapitre, un profil dit équivalent, correspondant au profil vu par la particule au moment de l'impact, a été défini. Il s'agit du profil résultant du filtrage de la surface rugueuse du substrat et établi en fonction du diamètre de la particule. Les petites rugosités y sont éliminées et donnent lieu à un profil plus simple. La suite de l'étude s'attache à vérifier la similitude entre le profil équivalent du substrat et le profil équivalent que voit la particule heurtant le substrat.

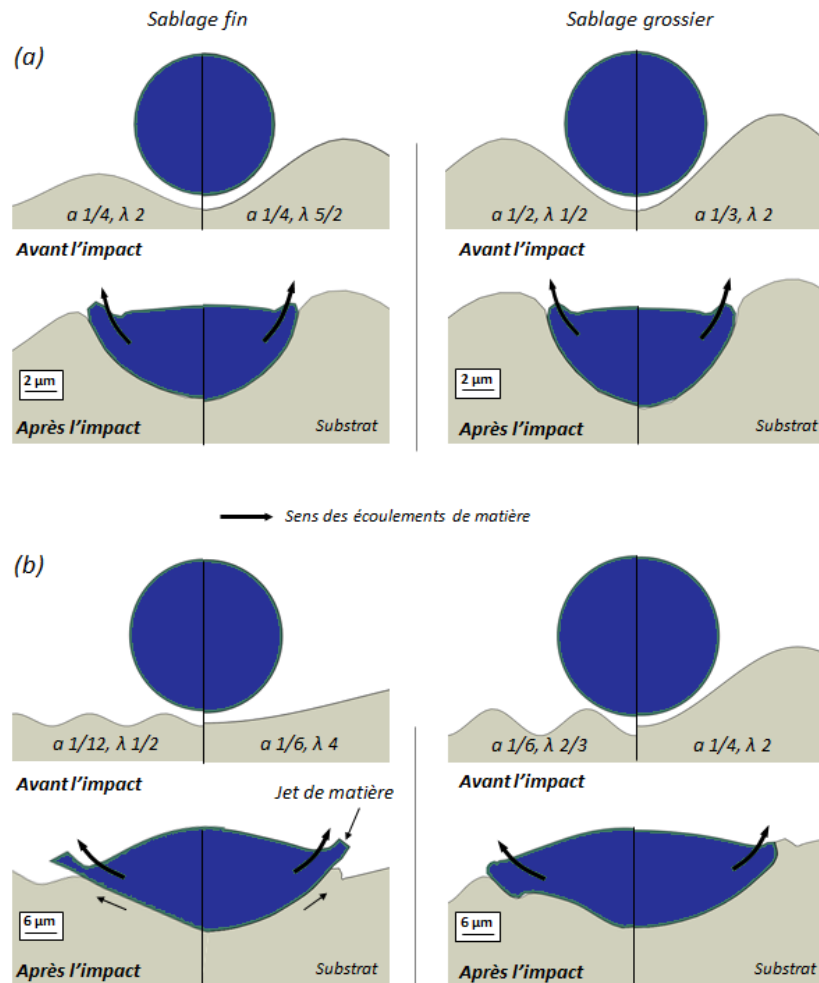


Figure 5-25 : Morphologie du système particule –substrat pour un profil rugueux, équivalent (à gauche des sous-figures) et équivalent vu par la particule (à droite des sous-figures), après impact d'une particule de diamètre (a) de 10 µm et (b) de 30 µm sur un substrat sablé finement et grossièrement.

Comme pour les simulations réalisées dans le §4.2.1, le profil équivalent est associé à un profil périodique de type sinusoïde utilisant les paramètres a et λ illustrés sur la Figure 4-21 du Chapitre 4 (Partie 1, §4.3). La Figure 5-25 présente les résultats de la simulation d'impact d'une particule, respectivement de faible et de fort diamètre, sur substrat sablé finement et grossièrement. Dans chaque sous-figures, sont mis en parallèle, les profils équivalents du substrat rugueux (à gauche) et ceux équivalents vus par la particule (à droite), en fonction de son diamètre. Les morphologies de la particule et du substrat, à la fin de l'impact, sont très proches dans les deux cas. L'étalement et la pénétration de la particule sont similaires. Lorsque la particule rencontre une vallée dont la dimension est comparable à son diamètre, elle s'enfonce dans le substrat de manière privilégiée favorisant ainsi son ancrage (Figure 5-25a). A l'inverse, dans le cas où la

rugosité du substrat est petite en comparaison de la taille de la particule, l'impact est proche d'un impact sur substrat plan (Figure 5-25b, à gauche). En effet, la déformation de la particule n'est que très peu gênée par la faible hauteur des rugosités. Un amortissement énergétique a lieu, ce qui a pour conséquence de limiter la pénétration de la particule dans le substrat. Des jets de matière, synonymes de déformations intenses, sont ainsi observés en périphérie de la particule. Ce comportement n'est plus vérifié lorsque la vallée est de plus grande dimension, cas du sablage grossier : l'ancrage de la particule est, à nouveau, observé (Figure 5-25b, à droite).

La simulation du profil équivalent des substrats et du profil équivalent vu par la particule permet de vérifier et de valider les conclusions du Chapitre 4, à savoir les dimensions des profils équivalents pour différentes rugosités et différentes tailles de particule. En résumé, lorsque la taille de la vallée est comparable au diamètre de la particule, la morphologie finale de la particule après impact est influencée. La pénétration et l'ancrage mécanique de la particule dans le substrat est alors favorisée. A l'inverse, si les rugosités sont très petites en comparaison du diamètre de la particule, le processus de déformation n'est que très peu perturbé. L'étalement de la particule à la surface du substrat prédomine et la profondeur de pénétration de celle-ci est sensiblement réduite.

4.3.2. Etude des paramètres physiques et de la morphologie du système particule-substrat

La simulation numérique permet d'accéder, aussi, aux comportements plastiques et thermiques de la particule et du substrat, à la fin de l'impact. Au vu des résultats précédents, le profil équivalent est utilisé pour appréhender ces phénomènes.

La Figure 5-26 montre les résultats de la simulation d'impact d'une particule sur le profil équivalent défini en fonction du diamètre D_p de la particule. Les dimensions respectives de la particule et des vallées régissent fortement la déformation du système particule-substrat. Pour une particule de faible diamètre (Figure 5-26a), sa pénétration dans le substrat est élevée quelle que soit la topographie rencontrée. Les températures et les déformations plastiques cumulées atteintes aux jets de matière sont équivalentes entre la surface sablée finement et celle sablée grossièrement. Cette configuration est favorable à un ancrage de la particule (Chapitre 3, §3.2.2). Néanmoins, la déformation plastique cumulée de la particule demeure relativement faible (de 2 à 2,5) car la particule est trop petite pour imposer une déformation plus forte au système. Lors de l'impact d'une particule de plus gros diamètre (Figure 5-26b), la morphologie de la particule est très différente et varie en fonction du sablage du substrat. Dans le cas d'un substrat sablé finement, la particule ne rencontre pas d'obstacle majeur et s'étale à la surface du substrat sans trop de difficulté. Cet étalement s'effectue au détriment de la pénétration de la particule dans le substrat qui est relativement faible. Il s'agit d'un effet amortissant provoqué par les micro-rugosités de surface. Les échauffements à l'interface sont intenses et atteignent 380°C par rapport à la température initiale du substrat. Cette élévation de température est produite par la déformation plastique cumulée, localement élevée, qui avoisine 4 : autrement dit, deux fois celle mesurée pour la particule fine. Des jets et des bourrelets de matière sont visibles à l'interface particule-substrat. En augmentant la rugosité de surface, la particule rencontre une topographie dont les dimensions sont comparables à son diamètre. Elle pénètre profondément dans le substrat en formant des bourrelets de matière à sa périphérie. Ces derniers sont disposés de telle sorte qu'ils piègent la particule créant ainsi un ancrage mécanique fort (Figure 5-26b, à droite). La température atteinte à cet endroit y est moins élevée car la déformation plastique à l'interface particule-substrat est limitée. Les frottements jouent, quant à eux, un rôle limité dans l'énergétique de l'impact. C'est plutôt la répartition des déformations

plastiques cumulées qui produit des échauffements locaux élevés. Ce phénomène n'est plus vérifié lorsque la particule n'est pas gênée dans sa déformation.

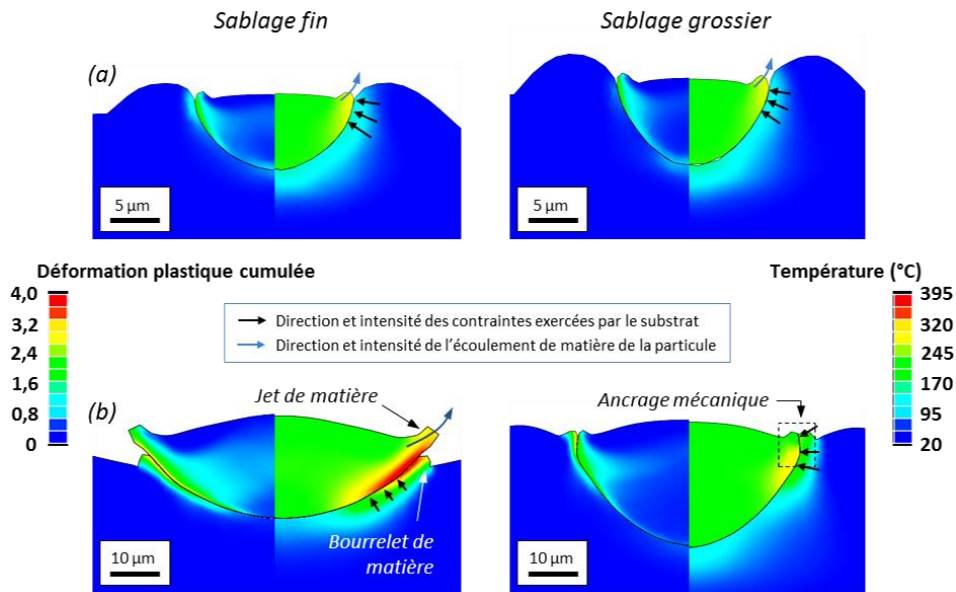


Figure 5-26 : Déformation plastique cumulée (à gauche des sous-figures) et température (à droite des sous-figures) d'une particule d'aluminium pur 1050 (a) de faible diamètre (10 µm) et (b) de fort diamètre (30 µm) projetée sur un substrat d'aluminium 2024-T3 rugueux vu par la particule, dont le profil est sablé finement et grossièrement.

A partir des simulations réalisées, on peut distinguer deux cas :

- Une grosse particule projetée sur un substrat sablé finement : la particule s'étale à la surface du substrat de manière privilégiée, au détriment de sa pénétration dans le substrat ;
- Une petite particule projetée sur un substrat sablé finement ou une particule de taille quelconque sur un substrat sablé grossièrement : la particule s'ancre intensément dans le substrat et se retrouve piégée.

4.4. Discussion autour du modèle numérique

Les simulations réalisées ont permis de modéliser l'impact d'une particule sur substrat rugueux en mettant en évidence l'ancrage mécanique de la particule et sa déformation plastique au regard des dimensions des rugosités rencontrées. Des améliorations au modèle numérique utilisé pourraient avoir un effet majeur sur les résultats obtenus. Plusieurs critères seraient alors intégrés, avec un effet direct sur la morphologie de l'interface particule-substrat.

L'adhérence entre la particule et le substrat est un élément déterminant qui représente les liaisons mécaniques et métallurgiques se produisant lors de l'impact. Pour cela, l'utilisation d'un critère modélisant les liaisons entre les matériaux en contact serait envisageable. L'adhésion permet de réduire le rebond de la particule, régissant ainsi sa déformation. Le cas particulier de l'impact d'une particule dans une vallée du substrat est réducteur et ne transcrit pas véritablement ce qui se produit dans le cas réel. L'atténuation des macro-rugosités n'est alors pas prise en compte. Des déformations plus intenses de l'interface particule-substrat, notamment dans le cas de particules sur un substrat avec un faible angle d'incidence, seraient observées. La pénétration de la particule dans le substrat y serait plus élevée grâce aux liaisons particule-substrat engendrant des déplacements de matière accrus. Enfin, si la simulation d'impact d'une particule élémentaire est une approche permettant d'appréhender les mécanismes de déformation des matériaux, la

prise en considération de la multiplicité des impacts représenterait l'étape suivante. L'influence des particules sur le substrat et des particules déjà déposées pourrait être déterminée. Des effets cumulés sur les déformations mesurées à l'échelle locale (une seule particule) amèneraient à établir la contribution de chaque particule sur la morphologie de l'interface particule-substrat et particule-particule. Cette approche est une voie d'amélioration considérable qui doit être l'objet d'études à venir.

Conclusion sur la simulation d'impact d'une particule

La déformation d'une particule au cours de l'impact a été étudiée par une approche numérique. Des simulations ont été réalisées en modélisant les phénomènes physiques se produisant lors d'un choc solide à haute vitesse. Les lois de comportement visco-plastiques, dites de Johnson-Cook et élastiques de Mie-Gruneisen, régissent le modèle d'impact.

Une validation qualitative et quantitative de ce modèle a été effectuée en réalisant des comparaisons avec les résultats morphologiques obtenus expérimentalement. L'objectif étant d'utiliser un modèle représentatif des déformations mesurées dans le cas réel.

L'étude des paramètres d'impact sur substrat plan a été menée, à travers des simulations 2D et 3D, afin de quantifier les niveaux de déformation et les températures atteintes localement. Cela a permis d'évaluer l'influence des conditions de l'impact (vitesse, température et angle d'incidence de la particule) avec les paramètres de projection développés dans le Chapitre 3 (§2.1). De plus, la comparaison des résultats obtenus par les simulations 2D et 3D et ceux expérimentaux, a mis en avant la représentativité du modèle. L'impact d'une sphère (cas de la simulation 3D) se rapproche fortement du cas réel tandis que l'approche 2D surestime les déformations plastiques des matériaux. Parce que l'approche 3D du modèle d'impact sur substrat rugueux nécessiterait des temps de calcul extrêmement longs, cette voie n'a pas été développée dans cette étude et s'est restreinte à la simulation d'impact 2D.

Enfin, les mécanismes mis en jeu lors d'un impact sur substrat rugueux ont été étudiés à l'échelle locale. Les analyses topographiques réalisées dans le Chapitre 4 (Partie 1), révélant des profils équivalents à partir des profils aléatoires réels, ont été confortées. La similarité des morphologies finales de la particule et du substrat, obtenues pour la simulation d'impact sur substrats au profil réel et équivalent, ont permis d'appréhender la topographie des substrats par l'analyse d'un profil équivalent plus simple. Les déformations plastiques de la particule et du substrat ont été analysées, grâce au profil équivalent, afin d'établir un lien entre le diamètre de la particule et les dimensions des rugosités de surface. La notion de profil équivalent vu par la particule a pu ainsi être explicitée. L'étude de la morphologie de l'interface particule-substrat a permis de mettre en évidence les mécanismes d'ancrage de la particule sur une surface rugueuse dont il convient de mesurer le rôle à travers la détermination de l'adhérence particule-substrat.