

Chapitre 1 : Éléments bibliographiques

SOMMAIRE

CHAPITRE 1 : ELEMENS BIBLIOGRAPHIQUES	17
INTRODUCTION	21
1. ADHESION DES REVETEMENTS SUR SUBSTRAT RUGUEUX	21
1.1. INTRODUCTION A LA THEORIE DE L'ADHESION.....	21
1.1.1. <i>Ancrage mécanique</i>	21
1.1.2. <i>Théorie de la diffusion</i>	22
1.1.3. <i>Liaisons atomiques ou moléculaires</i>	22
1.2. PREPARATION DE SURFACE, RUGOSITE ET ADHESION	22
1.2.1. <i>Modification morphologique de la surface par abrasion</i>	23
1.2.2. <i>Structuration de surface par laser</i>	23
1.3. QUANTIFICATION DE L'ADHERENCE DES REVETEMENTS.....	23
1.3.1. <i>Essai par choc laser LASAT® (« LAser Shock Adhesion Testing »)</i>	24
1.3.2. <i>Essai par plots collés</i>	24
2. PROCEDE COLD SPRAY	25
2.1. CONTEXTE SCIENTIFIQUE	25
2.2. PRINCIPE DU COLD SPRAY	26
2.2.1. <i>Principe</i>	26
2.2.2. <i>Caractéristiques du procédé</i>	27
2.2.3. <i>Paramètres de projection</i>	28
2.2.4. <i>Avantages du procédé cold spray</i>	29
2.3. TYPES DE LIAISONS GENEREES PAR COLD SPRAY	30
2.3.1. <i>Phénoménologie de l'impact</i>	30
2.3.2. <i>Ancrage mécanique</i>	31
3. REALISATION DE REVETEMENT D'ALUMINIUM SUR MATERIAUX METALLIQUES	33
3.1. CARACTERISTIQUES D'UN SUBSTRAT D'ALUMINIUM 2024-T3	33
3.1.1. <i>Familles d'alliages d'aluminium</i>	33
3.1.2. <i>Alliage d'aluminium 2024</i>	33
3.1.3. <i>Traitement thermique de l'aluminium</i>	34
3.1.4. <i>Ecrouissage de l'aluminium</i>	34
3.2. ELABORATION DE REVETEMENTS SUR MATERIAUX METALLIQUES PAR COLD SPRAY	34
4. INFLUENCE DES PARAMETRES ET DES CONDITIONS DE PROJECTION SUR LA MICROSTRUCTURE ET L'ADHERENCE D'UN REVETEMENT	36
4.1. PREPARATION DE SURFACE DU SUBSTRAT	36
4.1.1. <i>Influence sur le substrat</i>	36
4.1.2. <i>Effet sur l'adhérence des revêtements</i>	36
4.2. EFFET DE LA DURETE DU SUBSTRAT	37
4.3. ANGLE DE PROJECTION DES PARTICULES	37
5. SIMULATION NUMERIQUE DU REVETEMENT ELABORE PAR COLD SPRAY	39
5.1. SIMULATION D'IMPACT D'UNE PARTICULE ELEMENTAIRE	39
5.1.1. <i>Etapas de l'impact d'une particule</i>	39
5.1.2. <i>Effet de l'angle de projection sur substrat plan</i>	39
5.1.3. <i>Influence de la rugosité du substrat</i>	41

5.2. MODELISATION DE LA CONSTRUCTION D'UN REVETEMENT	42
5.2.1. Modèles morphologiques	42
5.2.2. Modèles numériques	42
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	44

Introduction

Ce chapitre apporte les éléments bibliographiques nécessaires pour aborder cette étude sur l'adhérence de revêtements métalliques élaborés par « cold spray ».

La première partie se concentre sur les mécanismes d'adhésion rencontrés en projection dynamique par gaz froid et les théories associées. Puis, le procédé cold spray est présenté de manière succincte avec l'éventail des matériaux pouvant être utilisés et les types de liaisons générées. Ensuite, les revêtements d'aluminium déposés sur substrats métalliques sont décrits. La quatrième partie s'attarde à mettre en évidence les influences de certains paramètres de projection sur la microstructure et les propriétés mécaniques des revêtements. Enfin, la dernière partie se focalise sur les études des particules projetées par cold spray, en vol et à l'impact, via la simulation numérique.

1. Adhésion des revêtements sur substrat rugueux

1.1. Introduction à la théorie de l'adhésion

L'adhésion est une notion difficile à définir mais Wu [WU82] en propose tout de même une définition : « *L'adhésion se réfère à l'état dans lequel deux organismes distincts sont maintenus ensemble par un contact interfacial intime comme des forces mécaniques ou un travail transféré jusqu'à l'interface* ». Les forces interfaciales peuvent résulter des liaisons de Van Der Waals, des liaisons chimiques ou électrostatiques. Historiquement, l'ancrage mécanique, la diffusion et les théories de réaction d'adsorption à la surface ont fait l'objet de postulats durant de nombreuses années. Ces théories ont récemment été établies pour les mécanismes de liaisons adhésives. Toujours selon Wu [WU82], il est faux d'attribuer l'adhésion d'un système à un seul mécanisme. En réalité, une combinaison de plusieurs mécanismes a lieu à des échelles parfois différentes. Par exemple, si l'ancrage mécanique agit au niveau microscopique, la diffusion se produit à l'échelle atomique. Le paramètre microscopique déterminant dans l'ancrage mécanique est la surface de contact à l'interface entre les deux parties du système. On parle alors de surface spécifique, c'est-à-dire de surface apparente. La rugosité de la surface est le moyen par lequel l'ancrage mécanique est favorisé [EBN11].

Les mécanismes d'adhésion particule-particule ou particule-substrat font l'objet d'un certain engouement [JEA15] et suscitent encore de multiples interrogations. Les principales hypothèses avancées pour expliquer l'adhésion relèvent des mécanismes mécaniques [HU11] ou de diffusion à l'état solide ou liquide [GUE10].

1.1.1. Ancrage mécanique

Développée par Mac Bain en 1926, la théorie de l'ancrage mécanique s'explique par la pénétration de la matière dans les cavités ou les porosités de la surface d'un substrat. La matière en contact pénètre dans les rugosités de la surface et forme des liaisons dites mécaniques. Cette contribution, issue de l'ancrage mécanique, est bénéfique pour l'adhérence. En fonction de la morphologie et des dimensions des rugosités, l'ancrage mécanique est différent [WEI95]. Une région de transition plus ou moins épaisse, aussi appelée interface, peut alors se créer. Les liaisons sont généralement plus fortes sur des surfaces rugueuses que sur des surfaces lisses sans aucune rugosité. L'augmentation de l'adhérence de la surface est due à plusieurs facteurs : (1) l'ancrage mécanique, (2) la formation d'une surface propre, (3) la formation d'une surface activée et (4) l'augmentation de la surface de contact. Les changements physiques et les propriétés chimiques de la surface sont responsables de l'augmentation de la force d'adhésion [PET02]. Cependant, il reste

complexe d'attribuer à l'ancrage mécanique la seule responsabilité des liaisons plus élevées qui pourraient s'expliquer par d'autres mécanismes lors de l'augmentation de la surface de contact (Figure 1-1). D'ailleurs, une étude liant intensité et durabilité des liaisons par l'augmentation de la rugosité de surface, menée par Allen [ALL83], a montré que la rugosité pouvait abaisser l'adhérence mécanique.

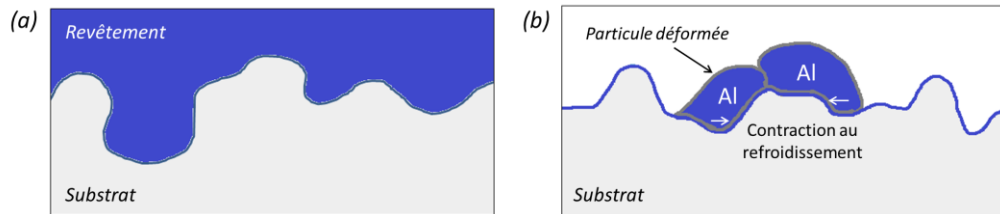


Figure 1-1 : Illustration de l'accrochage mécanique du fait (a) de la morphologie du substrat et (b) des déformations plastiques de la particule et du substrat.

1.1.2. Théorie de la diffusion

La théorie de la diffusion relie linéairement le flux de diffusion au gradient de concentration. Elle fait intervenir un coefficient de diffusion qui évolue suivant la température, la pression isostatique et la mise en contrainte à l'interface. La diffusion sous contrainte par déformation plastique, pour le cas du cold spray, conduit à l'élévation de la vitesse de diffusion [SOM94].

Les travaux de Serge Guetta [GUE10], notamment, ont mis en évidence les phénomènes de diffusion dans le procédé cold spray. En effet, lorsque la particule est en contact avec le substrat, outre l'accrochage mécanique annoncé, une diffusion atomique a lieu. Dans le processus de projection dynamique par gaz froid, les particules arrivent à la surface de la cible à l'état solide. Néanmoins, l'énergie libérée due aux vitesses élevées atteintes par les particules, permet éventuellement une fusion locale à l'impact. Une élévation de la température est alors mesurée [LI07-1] et conduit à considérer une diffusion en phase liquide. La présence d'une zone de transition ou d'interface plus ou moins épaisse entre les deux matériaux à assembler est synonyme de diffusion dans le matériau. Fondée sur la loi de Fick, la diffusion peut s'effectuer à l'état solide comme à l'état liquide. Dans les deux cas, le facteur temps joue un rôle et la diffusion est thermodynamiquement activée.

1.1.3. Liaisons atomiques ou moléculaires

Ce type de liaison se produit lorsque le contact entre deux surfaces est suffisamment intime ($< 0,5$ nm) [GRU04-1]. On parle alors de liaisons physiques ou chimiques. La nature physique des liaisons implique des liaisons intermoléculaires caractérisées par une faible énergie ($< 50 \text{ kJ.mol}^{-1}$) [WEI95]. Quant à la nature chimique des liaisons, il s'agit d'une liaison interatomique – à l'échelle de l'atome. Considérées comme des liaisons fortes, elles se présentent sous trois types : ionique, covalente ou métallurgique. Les deux premières ont des énergies bien plus élevées (de l'ordre de 1000 kJ.mol^{-1}) alors que la dernière présente une énergie plus faible (entre 110 et 260 kJ.mol^{-1}).

1.2. Préparation de surface, rugosité et adhésion

La préparation ou le traitement de surface consiste à modifier cette dernière par un simple nettoyage ou par voie chimique et/ou physique. Dans le cas de surfaces métalliques, on retrouve typiquement des couches d'oxydes rendant la surface polaire, c'est-à-dire chargée électriquement. La préparation de surface

des métaux est destinée à améliorer leurs liaisons mécaniques, par exemple lorsqu'elles sont exposées à l'humidité [EBN11]. Les raisons principales amenant à préparer la surface sont : (1) prévenir la formation d'une couche fragile superficielle, (2) créer une topographie particulière à la surface du substrat et (3) optimiser les forces d'adhésion à l'interface.

1.2.1. *Modification morphologique de la surface par abrasion*

Si des traitements par voie chimique permettent d'accroître l'énergie de surface du substrat, un traitement mécanique par abrasion est meilleur car il fournit une surface dépourvue de sa couche d'oxyde et confère une certaine rugosité qui augmente la surface de contact du substrat. Généralement, les surfaces rugueuses abrasées forment des liaisons plus fortes que les surfaces polies en raison de leur plus grande surface de contact [EBN11]. La modification morphologique de la surface du substrat par sablage illustre parfaitement ce phénomène. Cette préparation du substrat permet de créer des rugosités qui favorisent l'adhésion des particules projetées à sa surface [KUM09] [PAU15].

1.2.2. *Structuration de surface par laser*

Contrairement à la préparation de surface par sablage, la surface texturée par laser permet la formation de rugosités dont les dimensions et l'espacement peuvent être maîtrisées. De plus, cette technique limite la génération de contraintes résiduelles dans le matériau en restreignant ce phénomène à la périphérie des rugosités. L'ancrage mécanique, régissant pour partie l'adhésion, a été particulièrement mis en évidence et a permis de justifier son intérêt pour l'élaboration de revêtements par projection plasma [KRO15] et cold spray [GOJ15-1].

1.3. Quantification de l'adhérence des revêtements

Une centaine d'essais existent et permettent de déterminer l'adhérence d'un revêtement sur son substrat. On peut classer les différents dispositifs suivant quatre catégories [BER93] [WEI95] [SIL03] :

- Les essais de rupture interfaciale : ils mesurent l'énergie nécessaire à la propagation d'une fissure interfaciale. Par exemple le pelage [SEX94] et l'indentation interfaciale [HAN15] ;
- Les méthodes directes : la contrainte d'adhérence appliquée permet la décohésion du revêtement. On y retrouve les essais de traction [JOH07] ou de cisaillement [AMA92] ;
- Les méthodes indirectes : ils induisent un champ de contraintes complexes dans les matériaux et nécessitent la simulation numérique des phénomènes de l'essai pour l'obtention d'une valeur d'adhérence (contrainte ou énergie). Les essais de rayure [RIC88] et de choc laser [FAB13] font partie de ces méthodes ;
- Les méthodes non mécaniques : elles utilisent les ultrasons ou encore les émissions thermo-acoustiques [COS01] [ROS01].

Choisir le bon essai pour déterminer l'adhérence du revêtement s'avère donc complexe et relève surtout du comportement du matériau à révéler. En effet, certains essais sont quasi-statiques quand d'autres sont dynamiques. Il est évident que la réponse du matériau sera différente. Quelques uns de ces essais sont détaillés par la suite.

1.3.1. Essai par choc laser LASAT® (« LAser Shock Adhesion Testing »)

Son principe de sollicitation mécanique sur un temps extrêmement court est l'objet de nombreuses d'études entreprises depuis plusieurs années [BOL02] [ARR04] [BAR04] [GUE10] [FAB13]. Un laser de puissance est focalisé à la surface de l'échantillon et fournit une énergie durant un temps très court. Un plasma est généré sur une faible épaisseur du matériau. La détente de ce plasma engendre une pression qui provoque des ondes de compression dans le matériau pouvant atteindre la dizaine de GPa pour des flux de plusieurs $\text{GW}\cdot\text{cm}^{-2}$. L'impact laser s'effectue sur la face non revêtue du substrat et engendre des effets mécaniques dans le matériau. En se réfléchissant sur la face arrière de l'échantillon (surface libre), l'onde de choc se détend et donne naissance à une traction dans le matériau. En fonction des conditions de choc et de la géométrie de l'échantillon, cette traction se localise à l'interface revêtement-substrat et y provoque une éventuelle fissuration. En mesurant la fissure générée et en lui associant la puissance laser, on caractérise le comportement sous sollicitation dynamique du système. Remonter à une valeur d'adhérence s'effectue grâce à une simulation numérique de propagation d'onde où la contrainte à l'interface est déterminée. De plus amples détails sur cette technique de caractérisation et de mesure d'adhérence de revêtements sont donnés dans le Chapitre 6.

1.3.2. Essai par plots collés

Deux plots sont utilisés pour cet essai, un plot fixé sur le revêtement, l'autre (contre-plot) sur le substrat par un adhésif, généralement à l'aide d'une colle polymère. Une force de traction croissante de même module est appliquée sur chacun des plots jusqu'à obtenir une décohésion du revêtement (Figure 1-2).

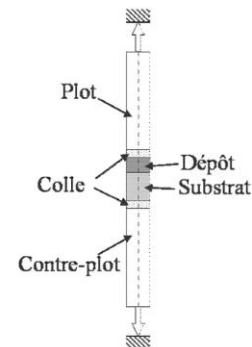


Figure 1-2 : Principe de l'essai d'adhérence par plot-collé [BAR04].

Selon le niveau d'adhérence du revêtement, une décohésion peut se produire dans le revêtement ou à l'interface revêtement-substrat. La contrainte appliquée conduit à évaluer l'adhérence du revêtement. Cet essai est normalisé (NF EN 582 – ASTM C633) et est industriellement très utilisé mais présente des inconvénients non négligeables [RIC88] [GAS01] :

- L'alignement entre les deux plots doit être parfait afin d'obtenir un chargement uniforme le long de l'interface ;
- La pénétration de la colle dans les porosités du revêtement peut affecter les caractéristiques de l'interface ;
- La colle limite l'essai car, lorsque le seuil d'adhérence de celle-ci est atteint, la rupture se produit et la valeur d'adhérence du revêtement n'est alors pas mesurable ;
- La dispersion de l'essai est élevée et nécessite un grand nombre d'éprouvettes ;
- La mise en œuvre de l'essai est lourde et non automatisable.

2. Procédé cold spray

2.1. Contexte scientifique

Développé à la fin des années 80 par Papyrin [ALK90], le procédé de projection dynamique par gaz froid (CGDS : Cold-Gas Dynamic Spraying) est né suite à des études sur les écoulements supersoniques diphasiques (composé gazeux associé à des particules solides) sur des maquettes. Avec l'utilisation de particules comme traceur dans ces flux gazeux, il a été montré que ces dernières pouvaient adhérer sur les maquettes au-delà d'une certaine vitesse. La large gamme de matériaux pouvant ainsi être projetés (métaux, alliages ou encore composites) sur une grande variété de substrat a mis en évidence le potentiel de la projection à froid pour de multiples applications. Après avoir été breveté aux Etats-Unis et en Europe, le procédé cold spray a vu le jour en 1994 grâce au professeur Papyrin qui le définit de la manière suivante : « *La projection dynamique par gaz froid plus communément appelée cold spray est un procédé permettant de réaliser des dépôts en exposant un substrat métallique ou diélectrique à un jet à haute vitesse (de 300 à 1200 m.s⁻¹) de petites particules (1 à 50 µm) accélérées au moyen d'un écoulement supersonique d'un gaz comprimé* ». Aujourd'hui, plusieurs entreprises dans le monde commercialisent l'installation cold spray :

Cold Spray basse pression (inférieure à 1,5 MPa)

- CenterLine (Canada)
- Dymet-Dycomet (Pays-Bas)

Cold Spray haute pression (de 2 à 5 MPa)

- Impact Innovations (Allemagne)
- Oerlikon (Suisse)
- Plasma Giken (Japon)

La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés utilisant un flux gazeux pour projeter à vitesse élevée, sur une surface à revêtir, un matériau d'apport fondu ou porté à l'état plastique. Les procédés les plus utilisés sont les projections par plasma d'arc, flamme, HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) et cold spray.

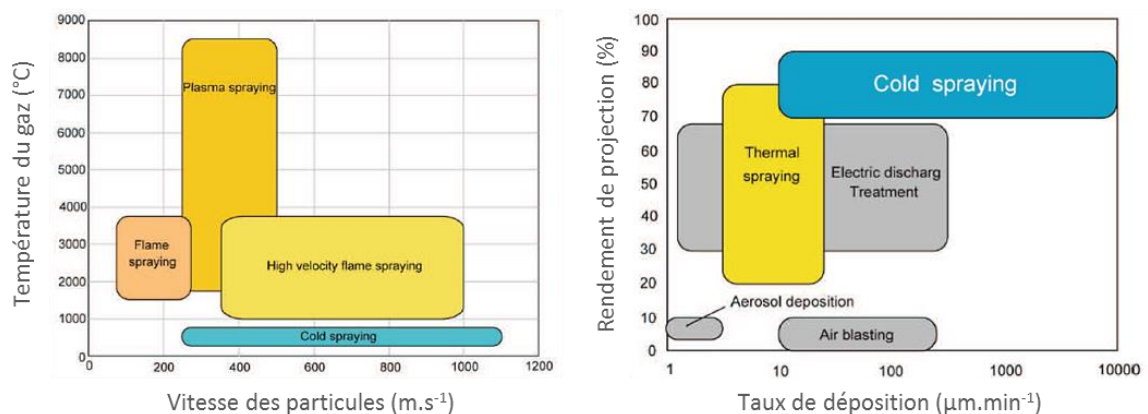
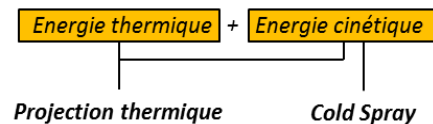


Figure 1-3 : Situation du procédé cold spray dans la famille des procédés de projection thermique [ICH07].

Ces procédés se distinguent entre eux notamment par leur rendement et la température de gaz en fonctionnement, respectivement en fonction de la vitesse des particules (Figure 1-3a) et du taux de dépôt du revêtement (Figure 1-3b). Sur de nombreux aspects, l'utilisation d'un pistolet cold spray semble très similaire aux appareils de projection thermique classiques énoncés précédemment. Le gaz pressurisé est chauffé par énergie électrique jusqu'à des températures comprises entre 100 et 800°C. Cependant, contrairement aux procédés de projection thermique, chauffer le gaz permet uniquement de conférer au flux de particules

injectées une vitesse supérieure (vitesse supersonique) par l'énergie cinétique et non d'utiliser cette chaleur pour fondre les particules (Figure 1-4). C'est la différence majeure du procédé cold spray par rapport à la projection thermique classique où l'énergie thermique joue un rôle sur l'état physique d'impact des particules. L'utilisation d'un gaz chauffé par induction réduit considérablement sa consommation énergétique. La circulation du gaz dans la partie divergente de la buse entraîne un refroidissement rapide de ce dernier, ce qui lui permet d'atteindre une température de sortie parfois inférieure à celle de la chambre de projection. L'appellation "cold" spray prend alors toute sa signification.

Figure 1-4 : Comparaison énergétique entre la projection thermique classique et le procédé cold spray.



2.2. Principe du cold spray

2.2.1. Principe

Représenté de manière schématisée sur la Figure 1-5, le procédé cold spray utilise l'azote (N_2), l'hélium (He) ou l'air comme gaz servant à la propulsion de particules. En fonction de l'installation cold spray, ce gaz peut être comprimé jusqu'à 5 MPa et chauffé jusqu'à 800°C par un système de chauffage par bobine. Le gaz est ainsi envoyé à travers une buse pour atteindre des vitesses d'éjection allant de 600 à $1200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ environ [FAU14].

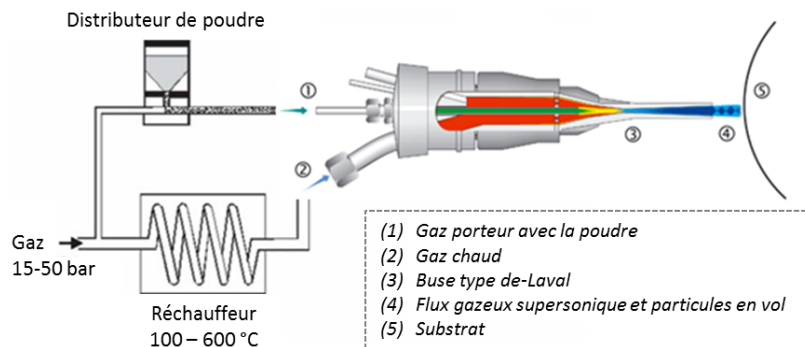


Figure 1-5 : Schéma de principe du procédé de projection dynamique par gaz froid, cold spray [CHA05].

La poudre à projeter est alors introduite dans la chambre de compression grâce à un gaz porteur, pouvant être identique à celui chauffé, avant d'être propulsée à des vitesses très élevées tout en subissant une montée en température. Les particules sont chauffées mais demeurent en deçà de leur point de fusion. C'est une des autres différences majeures entre le cold spray et les procédés de projection thermique classiques telle que la projection plasma. Les particules, propulsées à très fortes vitesses, entrent en collision avec le substrat pour former un revêtement, par empilements de particules se déformant plastiquement, communément nommées après impact, splats (Figure 1-6).

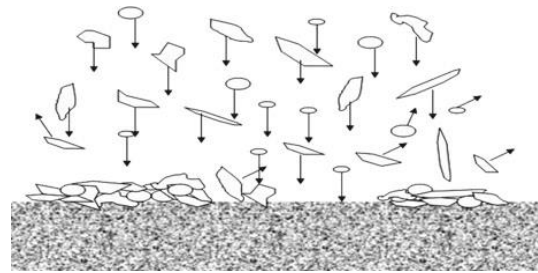


Figure 1-6 : Schéma de la construction d'un revêtement élaboré par cold spray : rebonds et adhésion des particules après impact (splats) avec le substrat [BOR06].

2.2.2. Caractéristiques du procédé

2.2.2.1. Gaz principal de projection

La composition chimique du gaz cold spray est classiquement l'air, l'hélium, l'azote et leurs mélanges. L'utilisation de l'azote réduit l'oxydation du matériau projeté par rapport à l'air. Mais c'est la vitesse du gaz V_g qui distingue l'azote de l'hélium. Déterminée à partir du nombre de Mach et du coefficient isentropique du gaz, la vitesse de l'hélium est bien plus élevée [SUO15]. Il est un meilleur propulseur (par rapport à l'azote) du fait de sa plus petite masse moléculaire et de son plus grand coefficient isentropique (1,66 contre 1,4). Même s'il est très onéreux par rapport aux autres gaz, il peut être retenu, dans certains cas, pour une utilisation industrielle. Une vitesse des particules projetées plus élevée est favorable à la densification de la microstructure des revêtements. Le débit de gaz est généralement de l'ordre de 20 g.s^{-1} . Une installation de type CGT K4000 (Figure 1-7) permet le chauffage de 90 m^3 de gaz en moins d'une minute. La pression d'entrée des gaz peut aller de 0,5 à 4,0 MPa et les températures peuvent atteindre les 1073 K en sortie (cas des matériaux à plus haut point de fusion). La vitesse du gaz V_g est toujours supérieure à celle de la particule.

2.2.2.2. Buse de projection

Les buses utilisées dans le procédé de projection dynamique à froid sont de type de-Laval, c'est-à-dire convergente-divergente, avec des vitesses soniques atteintes dans le convergent et supersoniques dans le divergent. Généralement, les buses sont cylindriques, mais il en existe aussi avec des sections rectangulaires dont l'intérêt est de limiter le colmatage par l'agglomération de particules.

2.2.2.3. Poudre projetée

Le choix des poudres utilisées en cold spray s'effectue par leur capacité à se déformer plastiquement à l'impact. C'est pourquoi des matériaux comme les céramiques sont proscrits même si d'autres tentatives ont été réalisées mais, mettant en jeu d'autres mécanismes de construction de revêtement [YAM10]. Les matériaux utilisables en projection dynamique par gaz froid sont les métaux et les alliages ductiles. Il est possible de les classer suivant leur structure cristalline respective [PAW08] :

- métaux de type structure cubique face centrée (c.f.c.) : Al, Cu, Ag, Pt, Ni, Au et γ -Fe;
- métaux de type structure cubique centrée (c.c.) : W, Ta, Mo, Nb, V, Cr et α -Fe;
- métaux de type structure hexagonale compact (h.c.) : Cd, Zn, Co, Mg et Ti.

La structure cubique face centrée (c.f.c.) possède un grand nombre de plans de glissement, ce qui permet une forte déformabilité du matériau. Un autre paramètre concernant la projection de la poudre est déterminant : sa température de fusion. Plus elle est basse, meilleure sera sa capacité à être projetée. A l'inverse, des matériaux comme l'acier inoxydable (317L) ou les alliages de titane qui ont pour propriétés de durcir après une contrainte mécanique, ne sont pas aisés à projeter. Le matériau le plus couramment projeté

par cold spray est le cuivre mais d'autres comme le NiCrAlY ou encore le tantale sont aussi utilisés. La granulométrie des poudres, au début du cold spray, était similaire à celle utilisée dans le procédé VPS (Vacuum Plasma Spraying), c'est-à-dire comprise entre 5 et 20 μm .

La température T_p des particules, sensiblement plus faible, et la vitesse V_p des particules, significativement plus élevée qu'en projection thermique classique, peuvent être mesurées. Une étude menée par Stoltenhoff [STO02] révèle une température de particules de 500 K et une vitesse de particules de l'ordre de 600 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans le cas d'une projection de cuivre sous pression d'azote et de températures optimisées. L'injection de poudres s'effectue axialement dans la plupart des installations, c'est-à-dire dans l'axe de projection.

Figure 1-7 : Eléments constituant une installation cold spray : (1) système de chauffage des gaz, (2) console informatique (3) compresseur (4) distributeur de poudre, (5) pistolet cold spray [PAW08].



2.2.2.4. Substrat

Les matériaux servant de substrats pour la projection dynamique par gaz froid sont des métaux, des céramiques ou plus récemment des polymères. Les deux premières familles de matériaux ont fait leur preuve en ce qui concerne la tenue mécanique des revêtements élaborés. A travers le procédé cold spray, la rugosité de surface du substrat n'est, a priori, pas nécessaire comme cela peut être le cas en projection plasma. Le substrat peut donc se trouver dans un état poli [GRI15]. Néanmoins, plusieurs études ont démontré l'intérêt de la préparation de surface [RICO6] [ZIE14]. Les revêtements ainsi élaborés sont connus pour leur très bonne adhérence. Les principaux paramètres ajustables qui modifient les propriétés des revêtements dans ce procédé sont : la température de gaz [MEN11], la pression de gaz [YIN14], la nature du gaz [SUO15], la distance de projection [RAL11], la répartition granulométrique de la poudre [HEL08], la morphologie de la poudre [CIN13] et le type de buse [ALK01].

2.2.3. Paramètres de projection

2.2.3.1. Vitesse de la particule

En cold spray, la vitesse de la particule juste avant l'impact influe sur sa capacité à adhérer au substrat. En fonction du substrat, une vitesse critique V_{cr} est déterminée. Seules les particules atteignant ou dépassant cette vitesse sont susceptibles d'adhérer à la surface du substrat. La forte concentration de dislocations générées par les impacts violents de particules solides, agissent comme des centres d'amorçage d'interactions chimiques entre la particule et le substrat. Dans le cas contraire, en-dessous de cette vitesse critique, les particules érodent la surface par rebonds [PAPO5]. L'adhésion ne se produit pas et la particule rebondit. Le passage entre le domaine de rebond et la formation d'un revêtement est donc délimité par cette vitesse critique de la particule dont la détermination a été étudiée par Schmidt [SCH06] à travers l'équation Eq. 1.1.

$$V_{cr} = 667 - 0,014\rho + 0,08 \cdot (T_f - T_r) + 10^{-7} \cdot R_e - 0,4 \cdot (T_i - T_r) \quad (\text{Eq. 1.1})$$

Où ρ est la densité de la particule projetée, T_f sa température de fusion, T_r la température de référence (20°C), T_i la température d'impact et R_e la limite d'élasticité du matériau de la particule.

2.2.3.2. Distance de projection

La particule acquiert sa plus grande vitesse dans le flux gazeux et, plus particulièrement, en sortie de la partie divergente de la buse [CHA11]. La géométrie de la buse et les paramètres du procédé (pression et température) déterminent l'énergie cinétique atteinte. Le chemin qu'elle parcourt avant de parvenir au substrat influe sur sa vitesse en vol. Si elle n'a pas l'énergie suffisante pour adhérer, la particule rebondit et la formation du revêtement est sensiblement ralentie. Le rendement de projection est alors directement fonction de la vitesse de la particule et, a fortiori, de la distance entre la sortie de la buse et la surface du substrat. Cette distance de projection est un paramètre dont la variation influe sur la vitesse d'impact V_i de la particule (Figure 1-8) [PAT08].

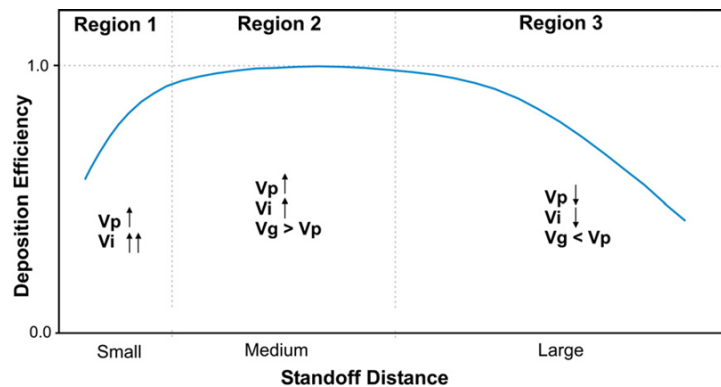


Figure 1-8 : Influence de la distance de projection d_p sur le rendement de projection, où V_i est la vitesse d'impact, V_p la vitesse de la particule et V_g la vitesse du gaz [PAT08].

2.2.4. Avantages du procédé cold spray

Comme les autres procédés de projection, le cold spray a de nombreux avantages, tant techniques que scientifiques. Tout d'abord, il se caractérise par un rendement très élevé avec des valeurs supérieures à 95% pour des matériaux tels que l'aluminium, le cuivre et leurs alliages. Ce fort rendement est dû notamment à l'optimisation des paramètres de projection et au faible pourcentage d'oxygène contenu dans les poudres. En effet, une faible quantité d'oxygène se retrouve dans les revêtements puisqu'un gaz neutre (N_2) est utilisé pour propulser les particules vers le substrat. L'oxydation du revêtement est ainsi évitée.

Une autre caractéristique majeure du procédé cold spray est sa capacité à réaliser des revêtements très épais (jusqu'à plusieurs centimètres). Cette particularité s'avère potentiellement déterminante pour de multiples applications telles que la fabrication additive (Annexe B). Les revêtements sont épais mais également très denses (taux de porosité généralement inférieur à 1%). L'impact violent des particules à la surface du substrat permet un empilement des particules optimal conférant une forte densité. La valeur des vitesses atteintes par les particules engendre des liaisons fortes entre le revêtement et le substrat. Les propriétés mécaniques et l'adhésion sont des critères déterminants lorsqu'il s'agit d'obtenir des revêtements résistants à des sollicitations mécaniques extérieures ou internes.

2.3. Types de liaisons générées par cold spray

Entre le substrat et le revêtement, des liaisons sont créées lors de l'impact. Une déformation est alors engendrée. Les matériaux se déforment et les différents phénomènes physiques et chimiques se produisant sont décrits dans cette partie.

2.3.1. Phénoménologie de l'impact

Au cours du procédé cold spray, des déformations extrêmes se produisent dans des temps très courts, de l'ordre de 10^7 à 10^9 s⁻¹. Deux phénomènes majeurs sont identifiables pendant l'impact : le cisaillement adiabatique et la recristallisation dynamique. Deux mécanismes rentrent alors en compétition :

- *L'écroissage du matériau* : le nombre de dislocations croît et augmente ainsi la résistance mécanique du matériau ;
- *L'adoucissement thermique* : les déformations intenses provoquent une élévation de température, ce qui favorise le déplacement et l'annihilation des dislocations du matériau.

2.3.1.1. Cisaillement adiabatique

Pour que le cisaillement adiabatique localisé ait lieu, une certaine taille de particule minimale est nécessaire. Une étude menée par Schmidt [SCH06] a mis en évidence l'influence de la granulométrie de la poudre sur l'élévation localisée de la température. La taille minimale de la particule dépend de plusieurs facteurs propres aux matériaux considérés, notamment la conductivité thermique de ce dernier. Une instabilité adiabatique n'est possible que si la diffusion de chaleur (diffusivité thermique) au sein du matériau ne se produit pas trop rapidement. La même étude a mis en avant une formulation semi-empirique donnant la taille minimale de la particule à projeter (d_{crit}) en fonction du matériau (capacité thermique massique C_p et masse volumique ρ) et de la vitesse d'impact (v_i) afin d'obtenir un cisaillement adiabatique (Eq. 1.2).

$$d_{crit} = 36 \cdot \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho \cdot v_i} \quad (\text{Eq. 1.2})$$

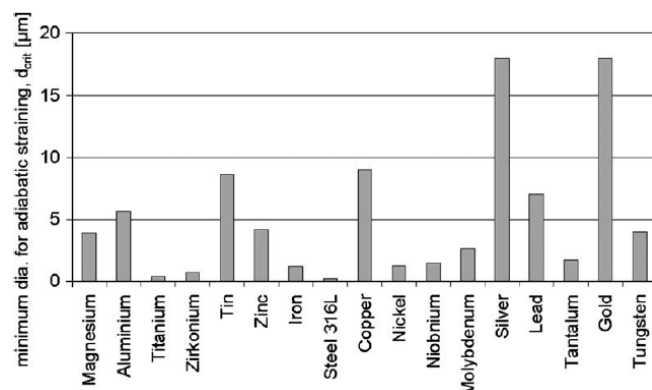


Figure 1-9 : Diamètre minimal de particules pour un cisaillement adiabatique en fonction du matériau projeté [SCH06].

Des essais ont été réalisés sur des particules de cuivre pour établir l'évolution de la température localisée au niveau de la zone d'impact en fonction de la taille de particule [SCH06]. Pour un matériau donné, plus la conductivité thermique est élevée, plus la taille minimale de la particule est élevée. C'est le cas, notamment, de l'argent et de l'or où la taille minimale des particules, pour satisfaire au phénomène de cisaillement adiabatique, est de l'ordre de 18 µm (Figure 1-9).

2.3.1.2. Recristallisation dynamique

Du fait du choc très violent entre la particule et le substrat à des vitesses d'impact élevées dans le flux gazeux, la déformation plastique (vitesse de déformation de l'ordre de 10^9 s^{-1}) et l'élévation en température aux interfaces (10^9 K.s^{-1}) de la particule à l'impact sont élevées [ASS03]. Cela engendre des transformations microstructurales majeures. L'étude des interfaces par microscopie électronique en transmission (MET) a mis en exergue des interfaces perturbées par la déformation plastique. Les travaux de Borchers [BOR03] concernant des interfaces Cu/Cu ont permis d'identifier différentes zones sur un cliché MET (Figure 1-10) :

- Zone A : Forte densité de dislocations s'arrangeant sous forme d'empilement (taille de grains $> 500 \text{ nm}$).
- Zone B : Grains allongés très fortement déformés avec une très haute densité de dislocations au voisinage du joint de grain.
- Zone C : Grains fins équiaxes (100 nm), zones très déformées au voisinage des joints de grains mais le centre des grains ne présente pas de dislocations.
- Zone D : Grains recristallisés ($1 \mu\text{m}$) exempts de dislocation mais maclés.

Ces quatre zones résument l'ensemble du processus de recristallisation dynamique se produisant au cours de l'impact d'une particule par cold spray. Une caractérisation par EBSD d'un revêtement élaboré par cold spray de nickel conclut aussi à une recristallisation dynamique interfaciale et propose un mécanisme fondé sur une recristallisation dynamique selon le mécanisme proposé par Mishra [MIS07] mais localisé à l'interface entre particules [ZOU09].

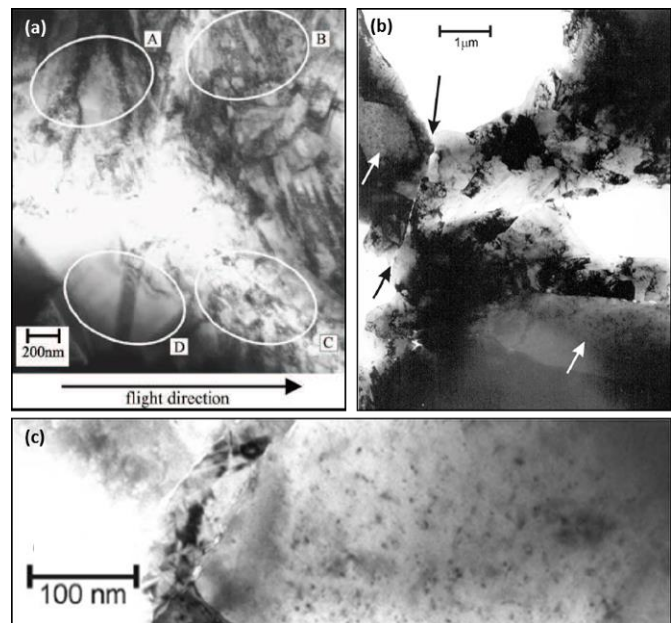


Figure 1-10 : Images MET (a) d'une interface Cu/Cu [BOR03], (b) d'un revêtement Cu (la flèche noire indiquant l'interface particule/particule et les flèches blanches indiquant des grains mouchetés) et (c) grossissement des grains mouchetés [BOR05].

2.3.2. Ancrage mécanique

2.3.2.1. Echelle globale

Pendant la projection dynamique par gaz froid, la particule projetée à la surface du substrat pénètre plus ou moins profondément. Cette pénétration est directement liée à plusieurs paramètres d'impact : la dureté respective des matériaux et la topographie du substrat (Figure 1-11a). On parle alors d'ancrage mécanique de la particule dans le substrat, donnant lieu à une liaison de type mécanique. En fonction de la dureté de la particule et de celle du substrat, les déformations plastiques évoluent et l'ancrage de la particule est modifié. Une particule dure, en comparaison du substrat, entraîne une profondeur de pénétration élevée où la

particule est partiellement voire entièrement enrobée par le substrat (Figure 1-11b, Figure 1-11c et Figure 1-11d) [ASS03] [CHR11] [BLO14]. La topographie du substrat engendre une déformation de la particule où la surface entre cette dernière et le substrat est augmentée [FUK04].

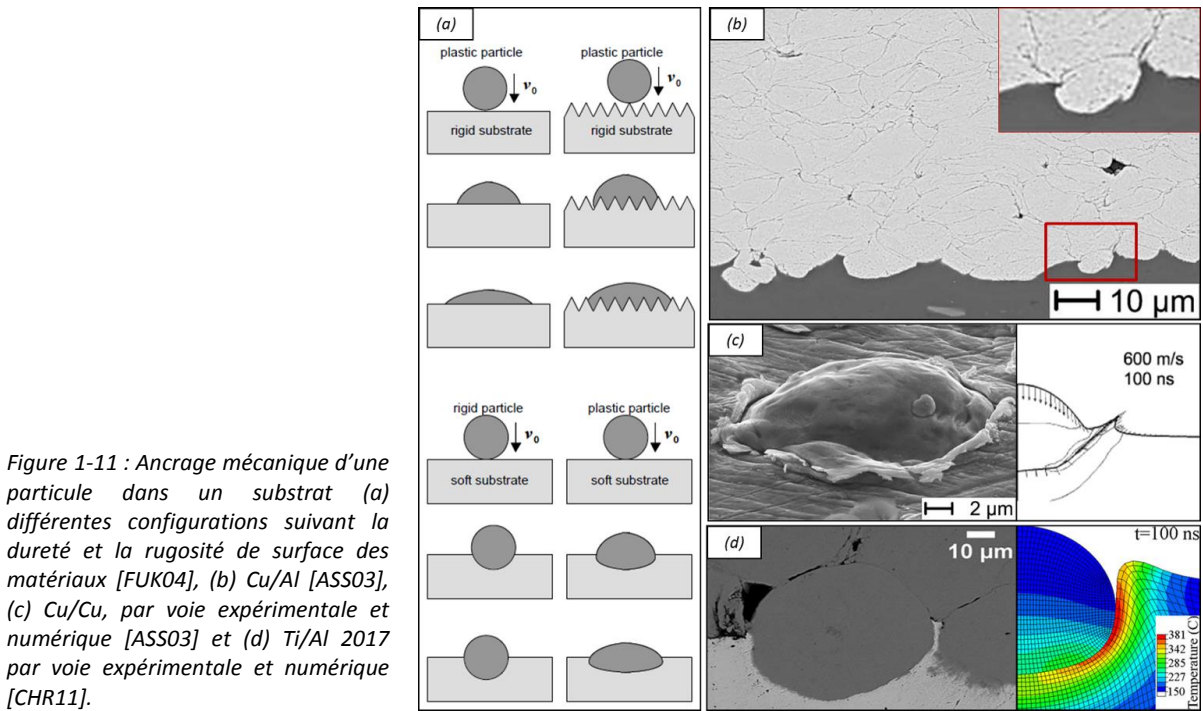


Figure 1-11 : Ancrage mécanique d'une particule dans un substrat (a) différentes configurations suivant la dureté et la rugosité de surface des matériaux [FUK04], (b) Cu/Al [ASS03], (c) Cu/Cu, par voie expérimentale et numérique [ASS03] et (d) Ti/Al 2017 par voie expérimentale et numérique [CHR11].

2.3.2.2. Echelle locale

Une adhésion par alliage mécanique peut être observée à l'interface particule-substrat. Ce mécanisme s'explique par le passage de la matière dans le domaine visqueux. La création de l'instabilité de cisaillement adiabatique entraîne cette transition [ASS03] [GRU04-1]. La formation d'un jet de matière lors de l'impact et leur évolution sous forme de vortex [GRU03] est une hypothèse à même d'étayer certaines interfaces observées expérimentalement pour des projections du cuivre sur de l'aluminium (Figure 1-12a) [CHA05] ou de nickel sur de l'aluminium (Figure 1-12b) [ADJ05].

La tenue mécanique du revêtement avec le substrat est favorisée par les fortes vitesses d'impact des particules. La déformation de la particule permet une modification de la géométrie de surface du substrat et contribue ainsi à lier fortement les deux matériaux. Il y a pénétration du matériau constituant le revêtement au sein du substrat. D'autres approches de l'adhésion des particules projetées sont envisageables, comme la diffusion qui a été étudiée dans le cas du couple Cu/Al. Ce phénomène n'est pas plus amplement développé, ici, car seules les liaisons de type mécanique à l'échelle globale sont étudiées.

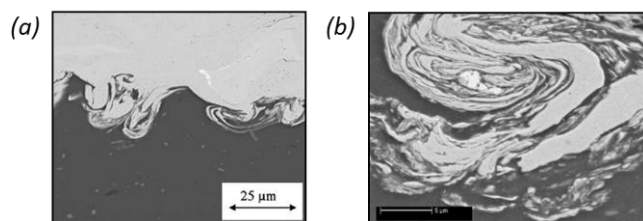


Figure 1-12 : Images EDS en coupe représentant les accrochages mécaniques sous forme de vortex (a) interface Cu/Al [CHA05] et (b) interface Ni/Al [ADJ05], le revêtement respectivement Cu et Ni sur Al apparaissent en clair.

3. Réalisation de revêtement d'aluminium sur matériaux métalliques

3.1. Caractéristiques d'un substrat d'aluminium 2024-T3

Majoritairement utilisé sous forme d'alliages, l'aluminium est capable de se marier avec un grand nombre d'autres éléments et permet de satisfaire de nombreuses applications. L'aluminium génère naturellement une couche d'oxyde qui le protège de la corrosion. Différents types de traitement de surface peuvent encore améliorer cette résistance (anodisation, laquage, etc.). C'est aussi un excellent conducteur thermique et électrique. Il peut ainsi être facilement travaillé à basse température et déformé sans se rompre. Cela permet de lui donner des formes très variées comme des pièces à géométrie complexe pour le domaine aéronautique ou automobile.

3.1.1. Familles d'alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium sont classés en sept familles selon l'élément principal d'addition. Les alliages sont communément désignés par un numéro à quatre chiffres dont le premier désigne la famille d'appartenance. Le Tableau 1-1 résume ces familles d'alliages d'aluminium. Celle constituant le cœur de l'étude est la série 2000.

Tableau 1-1 : Familles d'alliages d'aluminium, éléments d'addition et résistance mécanique [CAL09].

Famille	Éléments d'alliage	Etendue de la teneur (en % masse)	Résistance mécanique R_m (en MPa)
<i>Durcissement par écrouissage</i>			
1000	Aucun	-	50 - 150
3000	Manganèse (Mn)	0,5 - 1,5	100 - 260
5000	Magnésium (Mg)	0,5 - 5	100 - 340
<i>Durcissement structural</i>			
2000	Cuivre (Cu)	2 - 6	300 - 450
4000	Silicium (Si)	0,8 - 1,7	150 - 400
6000	Magnésium et silicium (Mg-Si)	Mg : 0,5 - 1,5 Si : 0,5 - 1,5	150 - 310
7000	Zinc et magnésium (Zn-Mg)	Zn : 5 - 7 Mg : 1 - 2	Sans cuivre : 320 - 350 Avec cuivre : 430 - 600

3.1.2. Alliage d'aluminium 2024

L'alliage 2024 fait partie de la plus ancienne famille d'alliages d'aluminium à durcissement structural (famille 2000) dont le « Duralumin » à 4 % de cuivre, est une marque déposée par l'allemand Wilm en 1909. Étant le premier alliage d'aluminium présentant des propriétés mécaniques comparables à celles de l'acier ordinaire, le « Duralumin » est un alliage léger qui contribua largement au développement de la construction aéronautique dès le début des années 1920. Cela explique l'intérêt particulier des métallurgistes de l'aluminium pour cet alliage avec de très nombreuses recherches depuis plus de 90 ans. Le diagramme de phase binaire des alliages aluminium-cuivre renseigne sur l'état physique et chimique de l'alliage en fonction de sa température. En se plaçant entre 0 et 6% de cuivre, la phase α -Al + θ (Al₂Cu) est présente jusqu'à 300°C. A partir de 500°C, cette phase passe par la phase α de l'aluminium avant de changer d'état physique vers les 550°C et devenir une phase Al + Liquide. Les alliages de cette famille sont caractérisés par : (1) des

performances mécaniques élevées à l'état trempé revenu T6, (2) une bonne tenue à chaud jusqu'à 85°C et (3) une bonne usinabilité.

En revanche, ces alliages, en dessous de 6 % de cuivre, ne sont pas soudables à l'arc. Leur résistance à la corrosion est médiocre du fait de la présence du cuivre. Ils ne peuvent donc être utilisés sans protection s'ils doivent être exposés à un milieu corrosif ou, tout simplement, aux intempéries. L'alliage d'aluminium 2024 présente des caractéristiques mécaniques plus élevées du fait de sa teneur en magnésium. Cet alliage est disponible sous forme de tôles minces et épaisses, de barres ou de profilés. Les applications sont, surtout, associées à la construction aéronautique et à la mécanique.

3.1.3. *Traitement thermique de l'aluminium*

Une amélioration des propriétés mécaniques ou thermiques des matériaux est également possible par un traitement thermique. Il s'agit le plus souvent d'une montée en température du matériau et d'une mise en forme réalisée à une certaine température. Une multitude de traitements thermiques existent et se distinguent par la température et la durée des paliers de maintien, les températures de mise en forme et enfin le procédé de mise en forme lui-même. Sous forme de tôle fine pour son application industrielle, l'alliage 2024 subit un traitement thermique de type T3 une fois sa mise en forme effectuée. Ce traitement correspond à une mise en solution suivi d'un écrouissage à froid puis d'une maturation de l'alliage. L'objectif étant d'améliorer la résistance mécanique de ce dernier par un durcissement structural.

3.1.4. *Écrouissage de l'aluminium*

Le procédé de mise en forme consiste à donner au matériau ses dimensions et son aspect. Les cas classiques sont les plaques, les profilés ou les barres. Le procédé de laminage engendre un écrouissage du matériau. Il peut être exécuté à froid ou à chaud. Le principe consiste à déformer plastiquement le matériau par compression continue lors de son passage entre deux cylindres contrarotatifs en laminoir. Il s'agit de réduire l'épaisseur du matériau par écrouissage de la matière. Des stries rectilignes, qui résultent de l'étape de laminage, sont observées sur la surface finale. Dans un matériau métallique non soumis à une quelconque déformation, la densité de ces défauts métallurgiques est déjà élevée ($\rho \gg 10^{10}$ à 10^{11} dislocations.m⁻² à température ambiante). Néanmoins, leur nombre va rapidement croître avec la déformation plastique conduisant au durcissement de la matière ; c'est le phénomène d'écrouissage. À la création de nouvelles dislocations, différents mécanismes, conduisant à leur élimination donc à l'adoucissement du matériau, se produisent : la restauration et la recristallisation. De ces deux phénomènes, seule la recristallisation va générer une modification marquée de la structure métallurgique.

3.2. **Elaboration de revêtements sur matériaux métalliques par cold spray**

La caractéristique des revêtements élaborés par cold spray est la déformation dynamique du matériau à l'impact. Les particules épousent la forme de la particule précédemment déposée. Cette superposition de déformation plastique confère une microstructure dense où les contraintes et le taux de déformation sont très élevés [WAN11]. L'utilisation d'une solution chimique permettant de révéler les joints inter-particulaires et intra-particulaires, est souvent préconisée même si l'accentuation de certains d'entre eux laisserait penser que le revêtement est poreux. Des porosités sont présentes dans le revêtement mais en très faible quantité (généralement < 1%) pour les revêtements élaborés dans des conditions de projection optimisées. La déformation plastique modifie la géométrie des particules qui s'allongent avec une orientation

perpendiculaire à l'axe de projection (Figure 1-13a) [MOR04] [KAN12]. A l'interface particule-particule, les frottements, provoqués par le choc dynamique, favorisent les liaisons métallurgiques entre les particules. Une subdivision en sous-grains se produit (Figure 1-13b et Figure 1-13c). La zone A (Figure 1-13b) révèle une faible déformation de la particule à cœur. A l'inverse, en se rapprochant de la périphérie, la présence de grains de très petites dimensions démontre l'intensité des déformations localisées à l'interface particule-particule du fait de la recristallisation dynamique.

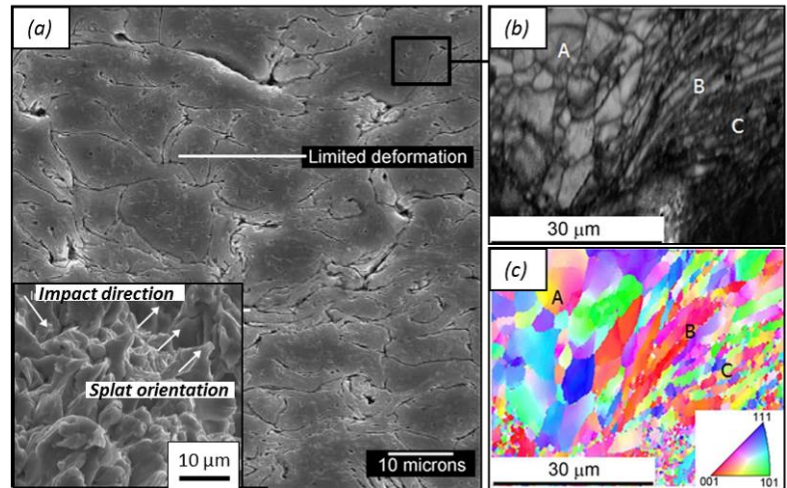


Figure 1-13: (a) Microstructure d'un revêtement d'aluminium pur [MOR04], (b) microstructure localisée à l'interface particule-particule en microscopie en transmission (MET) et (c) son cliché EBSD [KAN12].

4. Influence des paramètres et des conditions de projection sur la microstructure et l'adhérence d'un revêtement

Cette partie présente les facteurs pouvant affecter la microstructure et l'adhérence des revêtements élaborés par cold spray. Tous les résultats, notamment quantitatifs, présentés dans cette partie ne sont valables que dans les cas d'études citées, c'est-à-dire pour certains couples de matériaux, et pourront être généralisés le cas échéant.

4.1. Préparation de surface du substrat

Le choix d'un traitement de surface est à attribuer au fait qu'en cold spray les premières particules projetées sur le substrat peuvent ne pas adhérer et donc rebondir. Le délai consacré au nettoyage et à la déformation plastique de la surface est de l'ordre de quelques secondes à quelques dizaines de secondes et dépend du couple de matériau particule-substrat [KLI06].

4.1.1. Influence sur le substrat

Les préparations mécaniques de surface, comme le sablage ou le grenailage, consistent à multiplier les impacts de particules dures en modifiant la topographie de surface du substrat. Cependant, un affinement de la microstructure en surface du substrat et à son voisinage se produit (subdivisions des grains) et peut endommager le matériau en créant des dislocations et des microfissures. Des contraintes résiduelles en compression peuvent alors être induites. Les résultats, par ailleurs très contrastés, sont liés à l'intensité des procédés de sablage et de grenailage influencés par les paramètres du procédé [EVA05]. L'endommagement trop sévère de la surface et l'amorçage de fissures sont préjudiciables à la tenue mécanique du revêtement. Les paramètres de préparation de surface par sablage et par grenailage doivent donc être définis en prenant en considération le champ de contraintes résiduelles et les caractéristiques de rugosité de surface [TUR10].

4.1.2. Effet sur l'adhérence des revêtements

Les études menées se contredisent sur l'effet de la rugosité de surface du substrat puisque des travaux concluent tantôt sur une influence positive de la préparation de surface [ZIE14], tantôt sur un effet négatif [EVA05]. Bien que sensible aux effets d'entailles, l'alliage de titane s'est révélé être un mauvais candidat une fois sablé. En effet, l'étude conduite par Price [PRI06] a montré ce matériau sablé et revêtu de titane pur par cold spray affectait négativement la durée de vie en fatigue du matériau. Néanmoins, le procédé de sablage a su se révéler bénéfique lorsque l'élaboration de revêtements d'aluminium 2024-T3 par projection thermique était réalisée [SHA02]. La préparation de surface d'un substrat est souvent préconisée dans le cas de revêtements élaborés par projection plasma où une augmentation de l'adhérence du revêtement est généralement mesurée [COS10]. L'influence de la modification mécanique de la surface sur la cohésion et l'adhésion de revêtements élaborés par cold spray n'a, à ce jour, que très peu d'échos et s'avère complexe à expliquer. Les déformations engendrées par les particules à l'état solide et percutant à haute vitesse le substrat, modifient sa morphologie en effaçant une fraction plus ou moins grande de cette rugosité de surface.

Pour modifier l'état de surface du substrat, des techniques plus récentes permettent la création de motifs réguliers : le procédé de structuration par laser par exemple. Il permet une augmentation de la surface de contact entre le substrat et le revêtement, ce qui est un facteur d'amélioration significatif de l'adhésion du revêtement réalisé par cold spray [GIR14] [GOJ15-2].

4.2. Effet de la dureté du substrat

La déformation des premières couches de particules heurtant le substrat est déterminante dans la liaison revêtement-substrat [ASS03] [SCH06] [BAE08] [BAE09] [YIN09]. Les contraintes occasionnées par l'impact sont fonction de l'énergie cinétique des particules ainsi que des propriétés mécaniques des matériaux, notamment celle du substrat. Des travaux sur l'influence de la dureté du substrat et la déformation du système particule-substrat par voie numérique ont été menés [YIN11-1]. L'effet du nombre de couches déposées a également été étudié. L'utilisation de matériaux mécaniquement différents a permis d'évaluer la déformation plastique du substrat et de la particule après l'impact. Une influence directe du comportement plastique des particules de cuivre sur des substrats mécaniquement très différents a été révélée. Les mesures ont été réalisées au sein du substrat et dans l'épaisseur de cuivre déposé. Les résultats, illustrés en Figure 1-14a, montrent que la profondeur des cratères induits par l'impact des particules (600 m.s^{-1}) est directement proportionnelle à la dureté du substrat. Au contact d'un matériau dur, la particule se déforme fortement, d'autant plus que son module d'élasticité est faible. Ainsi, le taux de compression des particules de cuivre sur un substrat en acier inoxydable est plus élevé que sur un substrat plus malléable comme l'aluminium (Figure 1-14b). A partir d'une certaine épaisseur déposée, l'influence du substrat ne s'exerce plus. Les particules s'écrasent sur les premières particules déposées, plus molles que le substrat. La déformation est alors influencée par l'état mécanique des premières couches de particules déjà déposées.

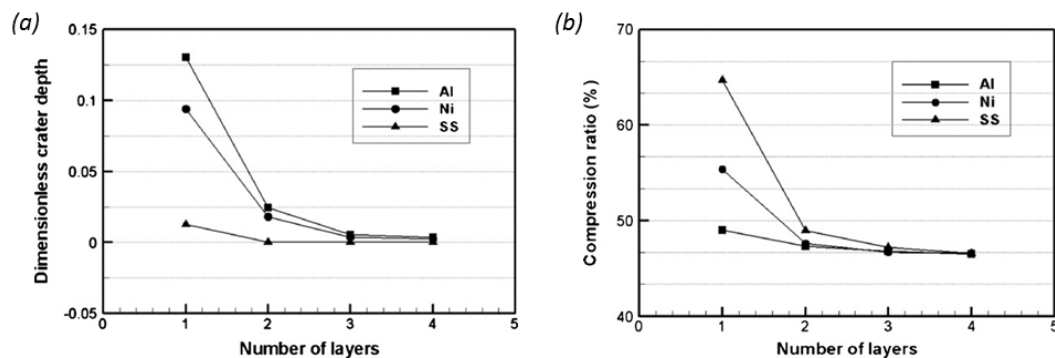


Figure 1-14 : Evolution (a) de la profondeur du cratère du substrat en fonction du nombre de couches déposées et de la nature du substrat et (b) du taux de compression de la particule [YIN11-1].

4.3. Angle de projection des particules

Lors du processus de projection, les particules percutent généralement le substrat perpendiculairement. Dans le cas où la surface du substrat possède une certaine rugosité, les particules rencontrent un substrat avec un angle par rapport à l'axe du pistolet cold spray. L'impact perpendiculaire de la particule n'est plus vérifié. Plusieurs études se sont penchées sur l'influence de l'angle d'incidence entre la particule et son substrat [LI03] [LI07-2] [LI10] [YIN10-1]. L'étude a consisté à revêtir plusieurs substrats inclinés d'un certain angle θ pour analyser les éventuelles évolutions microstructurales et morphologiques du revêtement (Figure 1-15).

Plusieurs essais ont été réalisés avec une projection de cuivre [LI03], de titane [LI10] [YIN10-1] [YIN13] et d'aluminium [BLO14] pour évaluer l'influence sur le rendement de projection. Des travaux ont mis en exergue des courbes similaires (Figure 1-16a) concernant les trois matériaux avec une évolution positive du rendement vers les angles d'incidence perpendiculaires au substrat (90°) [LI03] [FUK06]. Si l'influence est significative sur le rendement, l'étude a aussi révélé l'effet de l'angle de projection sur la microstructure du

revêtement élaboré (Figure 1-16b). La vitesse tangentielle V_t que subit la particule, engendre un étalement de cette dernière d'autant plus prononcé que l'angle d'incidence est éloigné de la normale.

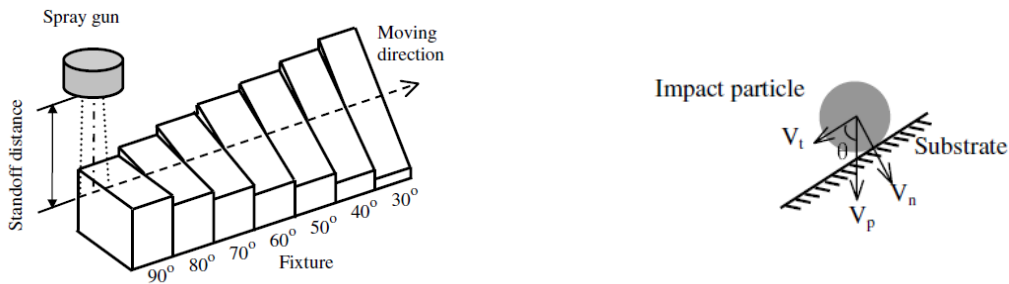


Figure 1-15 : Schéma de l'installation de projection pour différents angles d'incidence de la particule avec le substrat [LI03].

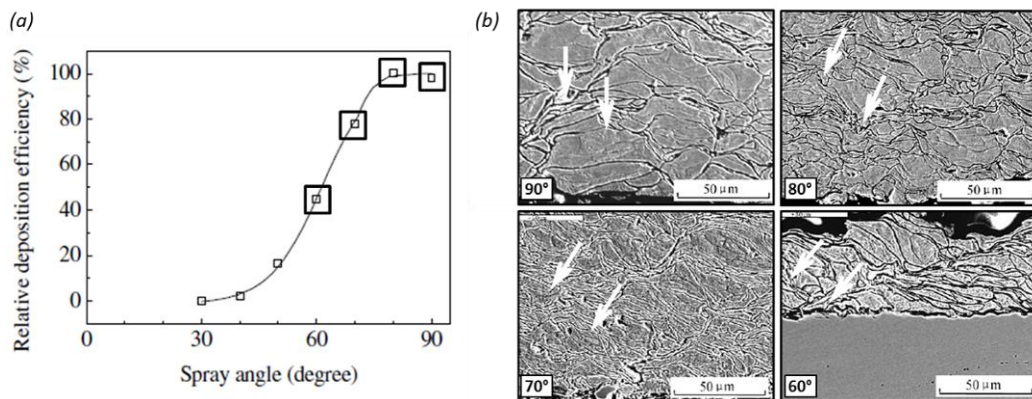


Figure 1-16 : Evolution (a) du rendement de projection et (b) de la microstructure des revêtements de cuivre en fonction de l'angle de projection, les flèches blanches représentent la direction de projection des particules [LI03].

En conclusion, l'angle d'incidence des particules fait évoluer le domaine dans lequel les particules adhèrent. En faisant varier cet angle, une chute du rendement de projection est observée, passant de 100% à 0% en deçà de 30°. En dessous de cette valeur, les rebonds y sont donc majoritaires car les particules projetées n'atteignent pas une vitesse suffisante. La pénétration et la déformation plastique ne sont pas assez élevées. La fenêtre de dépôt se situe donc entre 45° et 90°. Un domaine dit de transition est observé dans lequel le rendement varie fortement. L'angle critique et minimum pour qu'il y ait adhésion de la particule est estimé à 45°. Le schéma représenté en Figure 1-17 résume les différents domaines observés lors d'une projection sous un angle d'incidence θ .

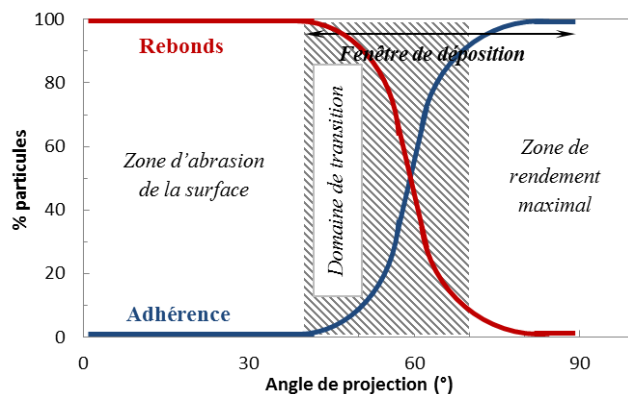


Figure 1-17 : Présentation des différents domaines pour une variation de l'angle de projection des particules.

5. Simulation numérique du revêtement élaboré par cold spray

5.1. Simulation d'impact d'une particule élémentaire

Pour appréhender les phénomènes physiques ayant lieu entre la particule et le substrat lors de l'impact, l'utilisation d'une méthode numérique visant à modéliser cette collision est envisagée [ASS03] [GRU04-1]. Lorsque la vitesse critique est atteinte, la modélisation de la déformation plastique de la particule est possible tout comme les phénomènes thermomécaniques suivant le modèle de Johnson-Cook.

5.1.1. Etapes de l'impact d'une particule

Une instabilité par cisaillement adiabatique, se matérialisant par des jets de matière en périphérie de la zone d'impact (Figure 1-18), est observée [GRU04-1]. Ce phénomène concomitant est le résultat des transformations à l'interface particule-substrat. Les déformations de cette dernière et la morphologie du système particule-substrat sont les facteurs principaux expliquant l'adhésion des particules. Une élévation de la température à l'interface particule-substrat est également mesurée au moment de l'impact.

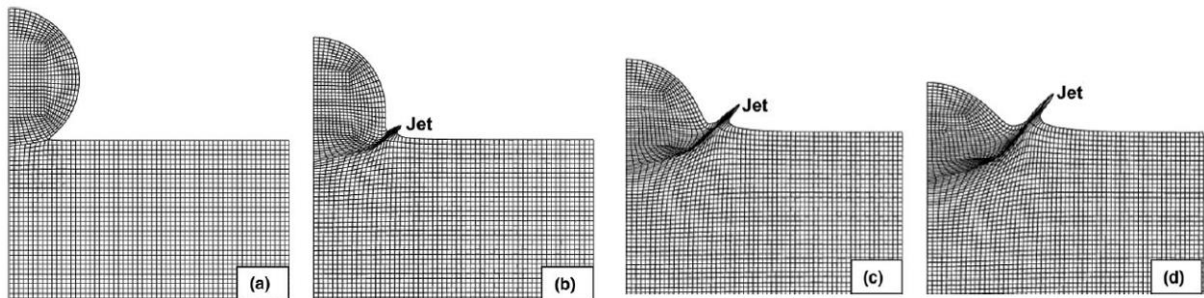


Figure 1-18 : Evolution temporelle d'une particule percutant un substrat à (a) 4,4 ns (b) 13,2 ns (c) 22 ns et (d) 30,8 ns, mise en évidence des jets de matière et des déformations plastiques du système particule-substrat [GRU04-1].

5.1.2. Effet de l'angle de projection sur substrat plan

Comparer les résultats obtenus par l'expérience en utilisant des modèles numériques peut aider à comprendre les phénomènes physiques se produisant lors de l'impact. Plusieurs études ont mené leurs travaux dans ce sens (Figure 1-19) et ont permis de remonter à des pressions d'impact ou encore à des vitesses de particules. La méthode lagrangienne utilisée dans la simulation a mis en évidence l'asymétrie des particules après déformation plastique [LI10] [YIN10-1] [XIE14]. Un phénomène de rejet de matière en dehors du cratère a lieu. Cette singularité grandit avec la baisse de l'angle d'incidence, de même que la pression à l'interface qui atteint son maximum pour 80° d'incidence. La composante normale de la vitesse d'impact est modifiée suivant l'angle de projection et décroît avec la diminution de l'inclinaison particule-substrat [YIN10-1].

Le fait de propulser un flux de particules à la surface d'un corps immobile modifie de manière significative sa propriété de surface. Ainsi, la rugosité du substrat est modifiée puisque des cratères se forment à l'impact avec une profondeur fonction de la vitesse des particules et de l'angle d'incidence des particules [LI07-2] [LI10] (Figure 1-19).

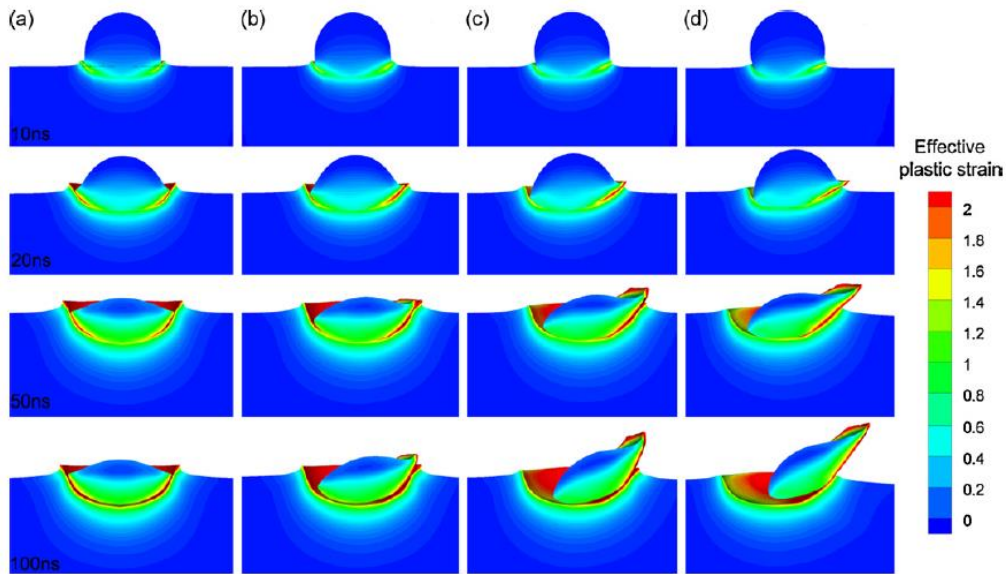


Figure 1-19 : Simulation par la méthode lagrangienne de la déformation plastique d'une particule de cuivre heurtant un substrat de cuivre à 500 m.s^{-1} avec un angle d'incidence de (a) 90° , (b) 80° , (c) 70° , et (d) 60° [LI10].

La vitesse normale V_n permet à la particule de pénétrer davantage dans le substrat et de créer un cratère plus profond. Des observations sur l'influence de l'angle d'impact de la particule sur les déformations du substrat amènent à conclure sur le comportement de la particule à l'impact [LI03] [LI07-2] [LI09-1] [LI09-2] [LI10] [YIN10-1] :

- Le glissement de la particule (vitesse tangentielle) laisse un vide de matière derrière elle qui détériore la liaison avec le substrat : une décohésion est observée ;
- La pression à l'interface apparaît meilleure dans le cas d'un système particule-substrat en cuivre pour une incidence à 80° (Figure 1-20) ;
- Le rendement n'est pas nécessairement maximum pour une incidence normale et dépend de la pression à l'interface particule-substrat ;
- L'ancrage mécanique de la particule est moindre pour des angles de projection éloignés de la normale ;
- La profondeur du cratère en surface du substrat après projection croît avec la vitesse normale de l'impact.

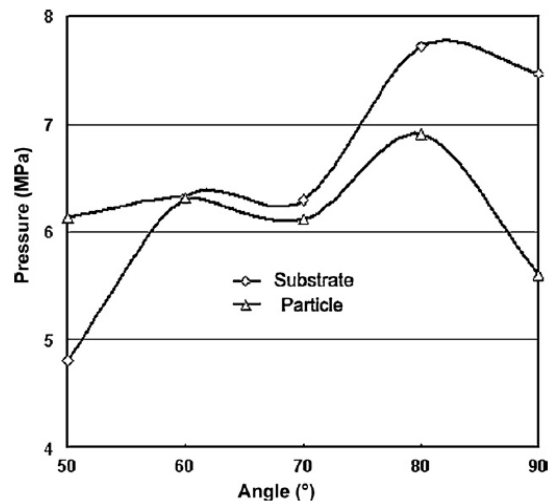


Figure 1-20 : Evolution de la pression à l'interface revêtement-substrat pour une particule de cuivre sur un substrat de cuivre et pour une vitesse d'impact de 500 m.s^{-1} [LI10].

5.1.3. Influence de la rugosité du substrat

L'interface revêtement-substrat générée par cold spray est conditionnée par la morphologie de la particule et du substrat mais également par les conditions d'impact. L'étude de la rugosité du substrat permet d'étudier la déformation des particules sur des rugosités de surface dont les dimensions sont figées.

Des travaux ont été menés dans le domaine du placage par explosifs en mettant en évidence le rôle de la rugosité de surface des substrats recouverts [GER00] [RAG03], mais se limitent à l'impact de tôles planes. A ce jour, aucune étude ne s'est penchée sur la simulation d'impact d'une particule à haute vitesse (c'est-à-dire comparable à celle obtenue par cold spray) sur des surfaces rugueuses, exceptée celle de Delloro [DEL15] mais restreint à des rugosités simplifiées. Toutefois, l'impact d'une particule sur un substrat rugueux a été entrepris par Yildirim [YIL12] afin d'analyser les phénomènes se produisant pour des vitesses relativement faibles. Ces dernières sont bien plus faibles qu'en cold spray puisqu'elles sont comprises entre 50 et 150 m.s⁻¹ et associées à des procédés de traitement de surface tels que le grenailage ou l'usinage par abrasion. Malgré une gamme de vitesse d'impact très éloignée de celle par cold spray, l'approche et les résultats obtenus renseignent sur l'influence de la rugosité de surface d'un substrat et sur son comportement plastique en déformation après impact. Le modèle numérique repose sur des comportements visco-plastiques de type Johnson-Cook et utilise la méthode des éléments finis. En faisant varier le diamètre de la particule proportionnellement aux dimensions des rugosités de surface, la morphologie du substrat résultant du choc solide-solide est étudiée. La Figure 1-21 donne les contraintes de plasticité de Von Mises pour des tailles et des vitesses de particules différentes.

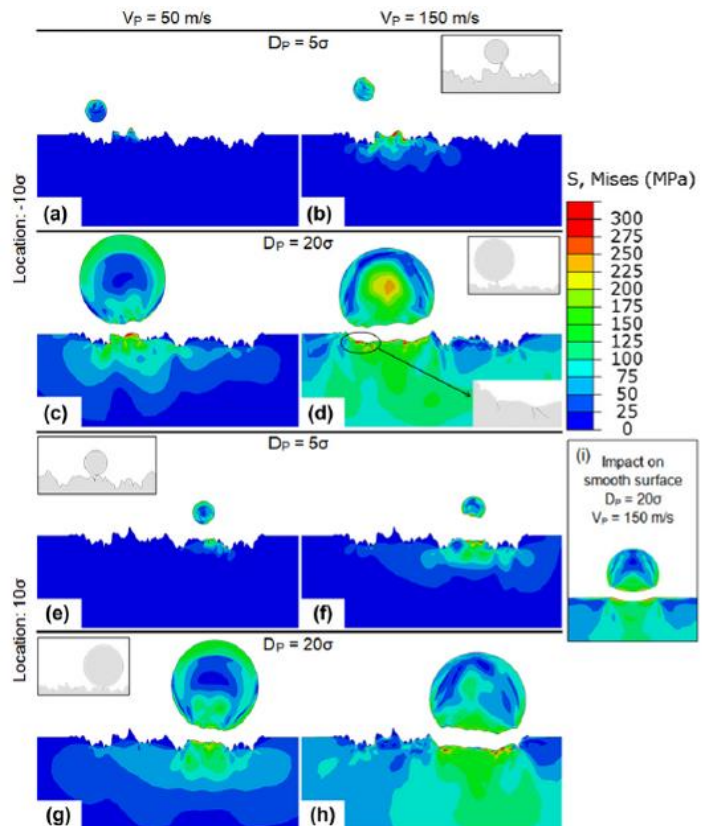


Figure 1-21 : Champ des contraintes de plasticité Von Mises d'une particule de cuivre sur un substrat rugueux de cuivre en fonction du diamètre de la particule et de la vitesse d'impact [YIL12].

Une plus grande déformation du substrat et de la particule est mesurée pour des vitesses plus élevées. Le rapport entre le diamètre de la particule et la dimension des rugosités de surface (représenté par

l'écart-type σ) est déterminant puisqu'un rapport de 5 permet de conserver en partie les variations géométriques de la surface. A l'inverse, un rapport D_p/σ de 20 écrase les pics et les vallées du profil. La morphologie du substrat qui résulte de l'impact est donc très différente et dépend des dimensions de la particule et des rugosités de surface.

5.2. Modélisation de la construction d'un revêtement

La construction d'un revêtement élaboré cold spray peut s'assimiler à un empilement de splats répartis aléatoirement à la surface d'un substrat. Quelques travaux ont été menés sur la simulation d'impact de particules : tout d'abord, en projetant une particule déjà déformée et en ne considérant aucune déformation de la particule et du substrat au moment de l'impact [BEA03]. Ce cas faisait référence à une projection de particules par plasma et non par cold spray.

5.2.1. Modèles morphologiques

Des modèles d'empilement se fondant sur la morphologie mathématique ont été mis en place et permettent, désormais, la construction d'un revêtement multicouche. Les particules s'empilent à l'état déjà déformé sur le substrat avec un déplacement des volumes en contact avec les splats voisins et/ou le substrat sur les surfaces libres (Figure 1-22a) [ROL10]. Les travaux de Descurnings [DES13] sont venus poursuivre les précédentes études par l'établissement d'un modèle morphologique qui inclut les phénomènes de rebonds des particules (Figure 1-22b).

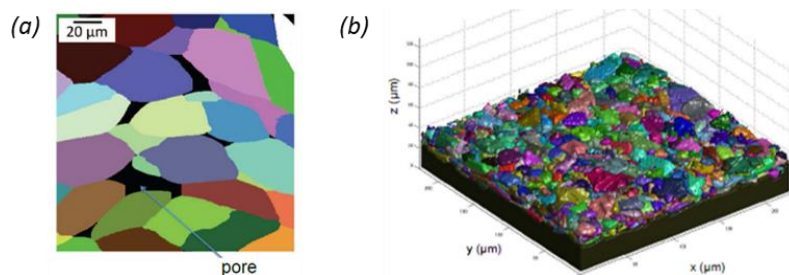


Figure 1-22 : Empilement de splats utilisant les modèles morphologiques avec un report des volumes déformés (a) 2D [ROL10] et (b) 3D avec un taux de rebond de 33% [DES13].

5.2.2. Modèles numériques

La méthode des éléments finis permet de simuler l'impact de particules sur une surface quelconque en utilisant des lois de comportement plastique, visqueux et élastique. Seul le cas d'impact multiples sur un substrat plan est étudié à l'exception des travaux de Delloro [DEL15] qui abordent l'influence des rugosités de la surface percutée sur la morphologie du système. Deux voies ont été envisagées pour la construction d'un système multicouche par cold spray : la méthode lagrangienne [YIN10-2] [YIN13-2] et la méthode eulérienne [YIN10-2] [XIE14]. La morphologie de la particule et du substrat présente des différences d'une méthode à l'autre par l'accentuation de certaines déformations. Par exemple, les jets de matière en périphérie de la zone de contact sont sous-estimés dans le cas d'une simulation d'impact réalisée par la méthode lagrangienne. Les résultats présentés par la suite sont obtenus par la méthode eulérienne dont les déformations du système particule-substrat sont plus proches des observations expérimentales [YIN10-2].

Comme pour l'impact d'une seule particule, la simulation multi-impacts permet de déterminer les champs de contraintes de plasticité illustrés en Figure 1-23. L'accumulation des particules permet d'analyser le comportement plastique et thermique du matériau. Les contraintes les plus élevées se concentrent en périphérie des particules déformées. Les particules des couches supérieures modifient la morphologie des

particules inférieures avec des déformations extrêmes (jet de matière). Quant à la diffusion thermique, elle n'est que très peu présente puisqu'on mesure une faible élévation de température dans le substrat. L'empilement des particules de cuivre chauffe localement les interfaces particule-particule, sans toutefois se propager dans le substrat pourtant conducteur. Ce phénomène est peut-être dû à l'absence de transmission de chaleur entre la particule et le substrat, critère qui n'est pas précisé dans l'étude de Yin [YIN10-2].

Figure 1-23 : Champs de contraintes de plasticité suite à la simulation numérique par la méthode eulérienne d'empilement de particules de cuivre sur substrat plan de cuivre [YIN10-2].

