TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE 5
1.1 Introduction à la projection thermique.....5
1.1.1 Procédé de projection thermique HVOF (High-Velocity-Oxygen-Fuel) ... 6
1.1.2 Systèmes de projection HVOF..... 7
1.1.2.1 Système de projection thermique HVOF-JET KOTE® III 7
1.2 Influence des principaux paramètres en projection thermique HVOF 11
1.2.1 Paramètres de la torche 11
1.2.2 Débit de matières premières (Feedstock Spray Rate) 12
1.2.3 Propriétés inhérentes aux particules pendant la projection thermique HVOF 12
1.2.3.1 Vitesse de particules 12
1.2.3.2 Température de particules..... 14
1.2.4 Distance de projection..... 16
1.2.5 Angle de projection..... 17
1.2.6 Température du Substrat 18
1.3 Méthodes de fabrication et caractérisation de poudres en projection thermique.....18
1.3.1 Séchage par atomisation (Spray Drying) 19
1.3.2 Fusion suivie par écrasement (Sintered & Crushed)..... 21
1.3.3 Méthodes de caractérisation des poudres..... 22
1.3.3.1 Distribution granulométrique..... 23
1.3.3.2 Densité apparente..... 23
1.3.3.3 Coulabilité..... 23
1.3.3.4 Morphologie..... 24
1.3.3.5 Composition des phases..... 25
1.4 Revêtements de type WC-10Co-4Cr 25
1.4.1 Principales propriétés de caractérisation des revêtements de WC-10Co-4Cr 26
1.4.1.1 Adhésion 26
1.4.1.2 Microscopie optique..... 26
1.4.1.3 Microscopie électronique..... 27
1.4.1.4 Dureté..... 28
1.4.1.5 Contraintes résiduelles 28
1.4.1.6 Rugosité 29

CHAPITRE 2 DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE 31
2.1 Système de projection thermique HVOF utilisé 31
2.1.1 Caractérisation du procédé HVOF-JET KOTE ® III 32

2.1.1.1 Caractérisation de la vitesse et température des particules en utilisant la poudre de référence (poudre A) 32
2.2 Élaboration des revêtements 33
2.2.1 Substrats employés..... 33
2.2.2 Description des éléments du montage pour la réalisation des revêtements de type WC-10Co-4Cr 34
2.2.2.1 Porte échantillon cylindrique 35
2.2.2.2 Pyromètre infrarouge modèle Raytek 35
2.2.2.3 Plaque d'aire comprimé 36
2.2.2.4 Dispositif : AccuraSpray-G3C par TECNAR® 37
2.3 Présentation des poudres alternatives de type WC-10%Co-4%Cr utilisées dans ce projet 38
2.3.1 Analyses de caractérisation des poudres..... 41
2.3.1.1 Analyse granulométrique 41
2.3.1.2 Analyse de densité apparente et coulabilité 41
2.3.1.3 Analyse morphologique et calcul du pourcentage de porosité interne des particules 42
2.3.1.4 Analyse de composition de phases de poudres 43
2.4 Première projection - projection des poudres avec les paramètres de référence 44
2.4.1 Critères d'acceptation des revêtements de type WC-10Co-4Cr en aéronautique 45
2.4.1.1 Épaisseur 45
2.4.1.2 Adhésion -Test de pliage 46
2.4.1.3 Microstructure..... 47
2.4.1.4 Microdureté..... 47
2.4.1.5 Déflection Almen..... 48
2.4.1.6 Rugosité 49
2.5 Deuxième projection –projection en variant la distance de projection.....49
2.5.1 Caractérisation des revêtements..... 50
2.5.1.1 Caractérisation des revêtements sélectionnées par microscopie électronique 50
2.5.1.2 Caractérisation des revêtements sélectionnées par diffraction de rayons X 50

CHAPITRE 3 CARACTÉRISATION DES REVÊTEMENTS DE TYPE WC-10Co-4Cr OBTENUS À PARTIR DES POUDRES ÉTUDIÉES 53
3.1 Résultats de la caractérisation du procédé HVOF- JET KOTE® III.....53
3.1.1 Vitesse et température des particules..... 53
3.1.2 Influence de la vitesse et la température des particules sur les propretés des revêtements..... 55
3.2 Résultats de la caractérisation des poudres étudiées.....57
3.2.1 Granulométrie de poudres..... 57
3.2.2 Densité apparente..... 58
3.3 Résultats de la projection thermique avec les paramètres de référence.....59

3.3.1 Vitesse et température des particules des cinq poudres étudiées 59
3.3.2 Résultats des propriétés des revêtements obtenus à partir des poudres étudiées 63
3.3.2.1 Épaisseurs obtenues et taux de déposition 63
3.3.2.2 Microstructures 66
3.3.2.3 Adhésion 71
3.3.2.4 Dureté 74
3.3.2.5 Contraintes résiduelles obtenues par la méthode de déflection Almen 75
3.3.2.6 Rugosité 76
3.4 Discussion 77

CHAPITRE 4 CARACTÉRISATION DES REVÊTEMENTS À PARTIR DES POUDRES SELECTIONNÉES ET VARIATION DE LA DISTANCE DE PROJECTION 81
4.1 Caractérisation des poudres sélectionnées 81
4.1.1 Morphologie des poudres sélectionnées 81
4.1.2 Microstructure 84
4.1.2.1 Calcul du pourcentage de porosité interne des particules par la méthode d'analyse d'images 85
4.1.3 Aptitude à l'écoulement 87
4.1.4 Diffraction des rayons X des poudres sélectionnées 88
4.2 Propriétés des revêtements obtenus à partir des poudres sélectionnées en fonction de la distance de projection 90
4.2.1 Effet sur la vitesse et température des particules 90
4.2.2 Effet sur la température du substrat 92
4.2.3 Effet sur les épaisseurs et taux de déposition 93
4.2.4 Effet sur la microstructure 95
4.2.5 Effet sur l'adhésion 97
4.2.6 Effet sur la dureté 100
4.2.7 Effet sur les contraintes résiduelles mesurées par la méthode de déflection Almen 101
4.2.8 Effet sur la rugosité 105
4.3 Caractérisation des revêtements 106
4.3.1 Microscopie électronique 106
4.3.2 Composition de phases des revêtements 109

CONCLUSION 113

RECOMMANDATIONS 115

ANNEXE I COMPARATION DU FINI DE SURFACE D'UNE PIÈCE REJET 117

BIBLIOGRAPHIE 119

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 Requis métallographiques des revêtements de WC-10Co-4Cr produits par projection thermique HVOF. Adapté de (TLP-020, 2012) 27

Tableau 2.1 Description des poudres de type WC-10Co-4Cr utilisées dans ce travail 39

Tableau 2.2 Composition chimique des poudres, % massique. Adapté de (AMS-7882A, 2007) 40

Tableau 2.3 Pourcentages d'économie des poudres étudiées dans ce projet 40

Tableau 2.4 Paramètres de projection fixes du système HVOF – JET KOTE® III 44

Tableau 2.5 Critères d'acceptation des revêtements par projection thermique HVOF sollicités par les manufacturiers des trains d'atterrissage. Adapté de (TPS-1700, 2014) 45

Tableau 2.6 Paramètres de mesure pour la diffraction de rayons X des revêtements sélectionnées. 51

Tableau 3.1 Propriétés des revêtements obtenus à partir des valeurs (min-max) de vitesse et température des particules – Poudre A 56

Tableau 3.2 Tableau de distribution de granulométrie de poudres étudiées déterminée par la méthode de diffraction laser (light Scattering) 58

Tableau 3.3 Tableau de densité apparente des poudres étudiées 59

Tableau 4.1 Pourcentage de porosité interne des particules des poudres sélectionnées 87

Tableau 4.2 Degré de décarburation des revêtements après la projection thermique en fonction de la distance de projection 110

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Principe de la projection thermique. Tirée de (Chang-Jiu, Guan-Jun et Özge, 2012).....6

Figure 1.2 Schéma typique d'un système de projection thermique à haute vitesse (HVOF). Tirée de (Chang-Jiu, Guan-Jun et Özge, 2012).....7

Figure 1.3 Principaux composants présents dans les systèmes de projection thermique HVOF-JET KOTE® III. Adaptée de (Stellite, 2006).....8

Figure 1.4 Schéma typique d'un système de projection thermique HVOF-JET KOTE® III. Tirée de (Davis, 2004).....9

Figure 1.5 Diagramme de Pareto des interactions entre variables en fonction des contraintes résiduelles des revêtements mesurées par la méthode de déflection Almen. Tirée de (Gui et al., 2012).....10

Figure 1.6 Effet de la taille de particule (18 µm et 46 µm) sur l'évaluation de la vitesse d'une particule en fonction de la distance de projection d'une poudre d'alumine obtenue avec la projection au plasma. Tirée de (Chang-Jiu, Guan-Jun et Özge, 2012).....13

Figure 1.7 Effet de la taille des particules (18 µm et 46 µm) sur l'évaluation de la température d'une particule en fonction de la distance de projection d'une poudre d'alumine obtenue avec la projection au plasma. Tirée de (Chang-Jiu, Guan-Jun et Özge, 2012).....15

Figure 1.8 Schéma de distance de projection dans les procédés de projection thermique. Tirée de (Fang, 2010).....17

Figure 1.9 Méthodes de fabrication de poudres. Tirée de (Oerlikon, 2015).....19

Figure 1.10 Schéma d'un sécheur par atomisation. Tirée de (Charreau et Cavaillé, 1991).....20

Figure 1.11 Morphologie d'une poudre de Cr_2O_3+SiO_2 : a) Fabriquée par séchage par atomisation et b) Après le processus de densification au plasma. Tirée de (Pawlowski, 2008).....20

Figure 1.12 Morphologie d'une poudre de WC-Co-Cr fabriquée par frittage suivi par un écrasement. Tirée de (Pawlowski, 2008).....22

Figure 1.13 Morphologies des particules de poudre. Tirée de (Randall, 1994) 24

Figure 1.14 Représentation graphique du calcul de Ra (µm). Adaptée de (MacKenzie, 2008) 29

Figure 1.15 Paramètres de hauteur des aspérités et de la profondeur des vallées. Tirée de (Guilbault, 2007).....30

Figure 2.1 Système de projection thermique HVOF-JET KOTE® III, torche JK® 3000 et Robot Fanuc M-710iB en action 32

Figure 2.2 Dimensions des substrats de type Almen N 1-S 33

Figure 2.3 Montage utilisé pour la production des revêtements de type WC-10Co-4Cr par le procédé HVOF 34

Figure 2.4 Porte échantillon cylindrique pour le montage des substrats d'Almen N 1-S.....35

Figure 2.5 Schéma de positionnement du pyromètre IR, pour contrôler la température des substrats durant la projection thermique. Adaptée de (TPS-1700, 2014).....36

Figure 2.6 Plaque d'aire comprimé pour le refroidissement des échantillons pendant la projection thermique 37

Figure 2.7 a) Dispositif AccuraSpray-G3C TECNAR® pour la prise des valeurs de vitesse et de température des particules. b) Schéma de l'ensemble de détection optique du dispositif AccuraSpray-G3C permettant de mesurer la vitesse et la température des particules dans le jet supersonique. Tirée de (Moreau et al., 2005) 38

Figure 2.8 Exemple d'une opération de segmentation d'images : à gauche, a) correspond à une image initiale obtenue avec un microscope électronique à balayage (MEB). À droite, b) correspond à l'image segmentée où les niveaux gris de l'image initiale apparaît maintenant en blanc. Tirée de (Vanderesse, 2007) 43

Figure 2.9 Conditions d'acceptation pour le test de pliage. Tirée de (LGPS-1301-D, 2009) 46

Figure 2.10 Schéma montrant le profil des indentations lors des essais de microdureté 48

Figure 2.11 Appareil Almen Gage 48

Figure 3.1 Comportement de la vitesse de particules en vol mesurée avec l'AccuraSpray-G3C vs la date de qualification du procédé HVOF, pour la poudre de référence....54

Figure 3.2 Comportement de la température de particules en vol mesurée avec l'AccuraSpray-G3C vs la date de qualification du procédé HVOF, pour la poudre de référence....55

Figure 3.3 Distribution volumétrique des particules des poudres étudiées....57

Figure 3.4 Morphologies des poudres étudiées prises au MEB : poudre A (réf), Poudre B, Poudre C et D tirée de (LGMS-9011-B, 2008) et Poudre E....60

Figure 3.5 Comportement moyen de la vitesse des particules des poudres étudiées n=30....61

Figure 3.6 Comportement moyenne de la température des particules des poudres étudiées n=30....63

Figure 3.7 Épaisseurs obtenues à partir des poudres étudiées et après 30 ± 5 passes....64

Figure 3.8 Taux de déposition (µm / passe) des revêtements obtenus à partir des poudres étudiées....65

Figure 3.9 Microstructure optique du revêtement produit à partir de la poudre A (réf) montrant l'épaisseur obtenue ainsi que la carte de porosité....67

Figure 3.10 Microstructure optique du revêtement produit à partir de la poudre B montrant l'épaisseur obtenue ainsi que la carte de porosité....68

Figure 3.11 Microstructure optique du revêtement produit à partir de la poudre C montrant l'épaisseur obtenue ainsi que la carte de porosité....69

Figure 3.12 Microstructure optique du revêtement produit à partir de la poudre D montrant l'épaisseur obtenue ainsi que la carte de porosité....70

Figure 3.13 Microstructure optique du revêtement produit à partir de la poudre E montrant l'épaisseur obtenue ainsi que la carte de porosité....71

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure 3.14 Micrographies prises au stéréomicroscope des surfaces au point de rupture après le test d'adhésion, correspondant aux revêtements produits à partir des poudres étudiées.....73

Figure 3.15 Microdureté moyenne (300 gf) des revêtements produits à partir des poudres étudiées n=10 74

Figure 3.16 Valeurs de contraintes résiduelles en compression obtenues par la méthode de Déflection Almen des revêtements produits à partir des poudres étudiées n=5.....76

Figure 3.17 Rugosité de surface des revêtements produits à partir des poudres étudiées n=10 77

Figure 4.1 (a) Micrographie prise au MEB montrant la morphologie de la poudre A. (b) vue agrandie d'une particule typique de poudre A détaillant la rugosité de surface.....82

Figure 4.2 (a) Micrographie prise au MEB montrant la morphologie de la poudre E. (b) vue agrandie d'une particule typique de poudre E détaillant la rugosité de surface. 83

Figure 4.3 Micrographie prise au MEB montrant la microstructure des particules de la poudre A 84

Figure 4.4 Micrographie prise au MEB montrant la microstructure des particules de la poudre E.....85

Figure 4.5 Transformation des images initiales de la microstructure en images segmentées en blanc et noir, pour les poudres sélectionnées.....86

Figure 4.6 Images masquées des particules des poudres A et E 87

Figure 4.7 Aptitude à l'écoulement de deux poudres sélectionnées, 50 gr de chaque poudre, diamètre du cône d'écoulement : 2.54mm.....88

Figure 4.8 Spectres de diffraction des rayons X montrant les phases présentes dans les poudres sélectionnées.....89

Figure 4.9 Variation de la vitesse des particules en fonction de la distance de projection des poudres sélectionnées n=30.....90

Figure 4.10 Variation de la température des particules en fonction de la distance de projection des poudres sélectionnées n=30.....91

Figure 4.11 Température maximale du substrat atteinte entre passes durant les projections à cinq distances de projections, pour les poudres sélectionnées. 93

Figure 4.12 Épaisseurs obtenues à partir des poudres sélectionnées en fonction de la distance de projection et après 30 ± 5 passes 94

Figure 4.13 Taux de déposition (µm / passe) des revêtements obtenus à partir des poudres sélectionnées en fonction de la distance de projection 95

Figure 4.14 Microstructures optiques des revêtements obtenus à partir des poudres sélectionnées en fonction de la distance de projection....96

Figure 4.15 Micrographies prises au stéréomicroscope des surfaces des revêtements au point de rupture après le test d'adhésion, correspondant aux revêtements produits à partir de la poudre A en fonction des cinq distances de projection....98

Figure 4.16 Micrographies prises au stéréomicroscope des surfaces des revêtements au point de rupture après le test d'adhésion, correspondant aux revêtements produits à partir de la poudre E en fonction des cinq distances de projection 99

Figure 4.17 Microdureté moyenne des revêtements obtenus à partir des poudres sélectionnées en fonction de la distance de projection n=10 100

Figure 4.18 Valeurs de contraintes résiduelles prises par la méthode de Déflection Almen des revêtements obtenus à partir des poudres sélectionnées en fonction de la distance de projection....102

Figure 4.19 Relation entre les contraintes résiduelles de poudres vs vitesse de particules 103

Figure 4.20 Relation entre les contraintes résiduelles de poudres vs température de particules 104

Figure 4.21 Rugosité de surface des revêtements obtenus à partir des poudres sélectionnées en fonction de la distance de projection 105

Figure 4.22 Microstructures électroniques des revêtements obtenus à partir de la poudre A en fonction de la distance de projection....107

Figure 4.23 Microstructures électroniques des revêtements obtenus à partir de la poudre E en fonction de la distance de projection 108

Figure 4.24 Spectres de diffraction montrant les phases présentes dans les revêtements obtenus à partir de la poudre A en fonction de la distance de projection.....109

Figure 4.25 Spectres de diffraction montrant les phases présentes dans les revêtements obtenus à partir de la poudre E en fonction de la distance de projection.....110

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AMS	Aerospace Material Specification
ANOVA	Analyse de la Variance
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCD	Charge Coupled Device
CNRC	Conseil National de Recherches Canada
CRSNG	Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada
DRX	Diffraction par Rayons X
ÉTS	École de Technologie Supérieure
HP	High Pressure
HVOF	High Velocity Oxy-Fuel
IR	Infrarouge
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standards
MEB	Microscopie Électronique à Balayage
OSHA	Occupational Safety & Health Administration
REACH	Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals
RoHS	Restriction of Hazardous Substances
SAE	Society of Automotive Enginners
SLPM	Standard Litre Per Minute

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE DISTANCES

m	mètre
mm	millimètre
µm	micromètre
nm	nanomètre
po	pouce

ÉLÉMENTS ATOMIQUES

W	Tungstène
C	Carbone
Cr	Chrome
Co	Cobalt
Fe	Fer
Al	Aluminium
Ar	Argon
H	Hydrogène
O	Oxygène
Cu	Cuivre

UNITÉS DE TEMPÉRATURE

°C	degré Celsius
K	degré Kelvin
°F	degré Fahrenheit

UNITÉS ÉLÉCTRIQUES

A	ampère
mA	milliampère
V	volt
kV	kilovolt
eV	électronvolt

UNITÉS MÉCANIQUES

HRA	Dureté Rockwell
Hv	Dureté Vickers
g	gramme
kg	kilogramme
N	Newton
pa	pascal
Mpa	mégapascal
min	minute
s	seconde
°	degré
Ra	écart moyen de rugosité

Vitesse

m/s	mètre par seconde

Masse volumique

g/cm^3	grammes par centimètre cube

Débit volumique

cm^3/s	centimètre cube par seconde

Symboles

$d_{(h,k,l)}$	Distance interréticulaire
λ	Longueur d'onde des rayons X
θ	Angle de diffraction
n	Ordre de diffraction
(h, k, l)	Plans de même famille
k	Paramètre constant
I_d	Indice de décarburation
T	Température
V	Vitesse

INTRODUCTION

Dans la dernière décennie, les nouveaux règlements aux États-Unis (OSHA) et en Europe (RoHS et REACH) ont imposé le remplacement de l'électrodéposition du chrome dur (aussi appelé chromage) par la projection thermique à haute vitesse (HVOF) de certaines poudres métalliques (Parker et al., 2004). Le chromage est une technique de placage qui a été en production commerciale depuis plus de 50 ans. C'est un procédé critique qui est utilisé tant pour l'application de revêtements durs pour une variété des composantes d'avions que pour les composantes en réparation et entretien. En particulier, le chromage est grandement utilisé sur les composants de trains d'atterrissage.

Malgré les bons résultats obtenus avec le chrome dur pour leur bonne résistance à la corrosion, leur dureté élevée des dépôts couplée à leur résistance à l'usure ainsi que leur excellente rentabilité pour de nombreuses applications, cet alliage comporte des problèmes environnementaux. Les bains de placage de chrome dur contiennent de l'acide chromique, dans lequel le chrome est à l'état hexavalent (Cr^{6+}) qui est connu comme un agent cancérogène ayant un niveau de toxicité supérieur à l'arsenic ou le cadmium. Pendant le fonctionnement, les réservoirs de chromage émettent une brume de chrome hexavalent dans l'air qui doit être enlevée par des épurateurs et rejetée dans l'atmosphère. Les déchets produits par électrodéposition doivent être éliminés comme des déchets toxiques et les opérations de placage doivent se conformer à des normes environnementales de plus en plus sévères afin de réduire au minimum les risques sanitaires. C'est pour cette raison que plusieurs entreprises, notamment dans l'industrie aéronautique, ont mis en place des programmes de remplacement du chrome dur et ont établi que les revêtements par projection thermique à haute vitesse (HVOF) sont les principaux candidats pour ce remplacement.

La projection thermique à haute vitesse est une technique qui permet de déposer différents alliages métalliques et alliages céramiques/métalliques (par exemple de type WC-10Co-4Cr) qui sont denses et très adhérents au matériau de base. Ces dépôts peuvent également être

Rapport-Gratuit.com

appliqués à des épaisseurs du même ordre que ceux qui sont actuellement utilisés pour le chromage, la rendant une candidate idéale pour remplacer le procédé de placage au chrome.

Avec l'évolution de la technologie HVOF, de nombreux systèmes de projection HVOF commerciaux sont disponibles avec chacun leur propres spécifications : les systèmes Diamond Jet (DJ), JP-TAFA HP/HVOF®, Top Gun K, OSU, etc. Dans la présente recherche, c'est le système HVOF-JET KOTE® III appartenant au partenaire industriel, Tecnickrome Aéronautique Inc, qui sera utilisé pour déposer des revêtements de carbure de tungstène cobalt-chrome. Ce système de projection utilise actuellement une seule poudre de type WC-10Co-4Cr approuvée par les spécifications aéronautiques et provenant d'un seul fournisseur. Le partenaire industriel a besoin de traiter d'autres poudres du même type (WC-10Co-4Cr) provenant de différents fournisseurs afin de diversifier son marché et rentabiliser le procédé. C'est dans ce contexte que s'assoit le présent travail de maîtrise.

Même si l'idée paraît simple, l'utilisation de différentes poudres avec un même système HVOF entraîne plusieurs défis dont celui de s'assurer que les revêtements nouvellement obtenus sont de même qualité ou supérieure à ceux obtenus à partir de la poudre de référence (et qu'on appellera dans ce projet la poudre A). En effet, chaque système de projection HVOF est conçu pour un type de poudre en particulier et changer la poudre peut entraîner des modifications importantes dans les pièces produites. C'est pour cela que l'objectif principal de la présente étude consiste à trouver une poudre alternative à celle qui est en production actuellement (poudre A) et capable de produire des revêtements de WC-10Co-4Cr avec une qualité comparable ou supérieure en utilisant le système de projection HVOF-JET KOTE® III.

Le mémoire est divisé en quatre sections. Le premier chapitre est constitué d'une revue de la littérature donnant une présentation générale sur la projection thermique, spécialement sur la technique de projection thermique à haute vitesse HVOF (High Velocity Oxy-Fuel). Le deuxième chapitre présente la démarche expérimentale et les moyens d'évaluation de la performance des revêtements demandés dans les spécifications aéronautiques. Le troisième

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

chapitre expose les résultats expérimentaux recueillis à travers des différents tests de qualification des revêtements. Le quatrième chapitre est une étude comparative entre les poudres qui ont été sélectionnées à l'étape précédente et une caractérisation des revêtements obtenus à partir des poudres sélectionnées en fonction de la distance de projection.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Introduction à la projection thermique

La projection thermique est un procédé permettant de déposer des revêtements métalliques et non métalliques sur des matériaux, principalement des aciers, afin d'améliorer les propriétés anti-usure et anticorrosives des pièces produites pour différentes applications. Cette technologie a plusieurs avantages. Un des principaux est la grande variété de matériaux qui peuvent être utilisés pour produire les revêtements. Ainsi, des matériaux ayant des points de fusion très élevés, tels que le tungstène, peuvent être appliqués à des pièces déjà usinées et ayant subi des traitements thermiques sans changer leurs propriétés mécaniques et sans entraîner des modifications structurales excessives (Davis, 2004).

Le principe fondamental de la projection thermique consiste à envoyer un matériau sous forme de poudre ou fil pour recouvrir la surface d'un substrat. Pour cela, une source de chaleur est nécessaire pour fondre les particules du matériau et un moyen pour accélérer ces particules à une vitesse très élevée (vitesse sonique ou supersonique). Ces particules frappent le substrat et ainsi le revêtement est formé lorsque des millions de particules sont déposées les unes par-dessus les autres (Fang, 2010). La Figure 1.1 présente le principe général de la projection thermique.

Il existe différents procédés utilisés pour permettre cette projection thermique : la projection à la flamme, la projection à l'arc électrique, la projection au plasma, la projection thermique à haute vitesse (HVOF) et la projection à froid. Chaque type de procédé utilise le même principe avec des variantes et la structure finale des dépôts dépend fortement des multiples facteurs particuliers associés à chacun de ces procédés. Dans le cadre de ce projet, nous allons nous focaliser sur le procédé HVOF est ses applications en aéronautique.

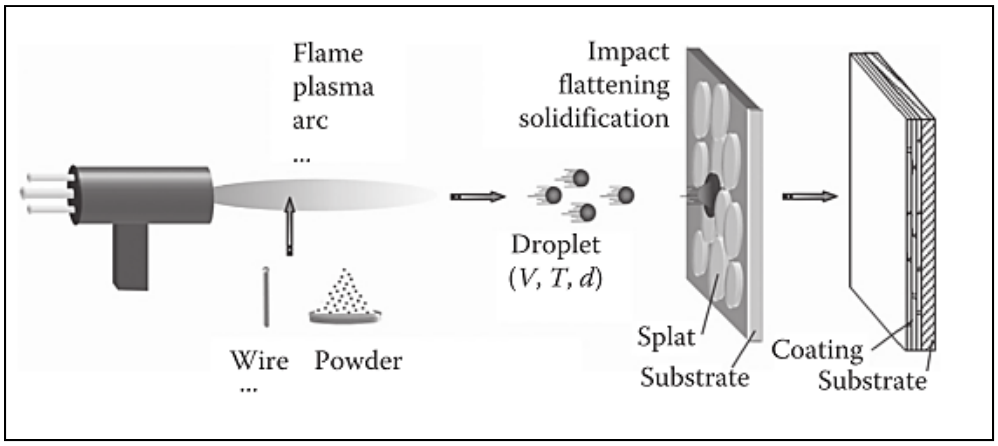


Figure 1.1 Principe de la projection thermique.
Tirée de (Chang-Jiu, Guan-Jun et Özge, 2012)

1.1.1 Procédé de projection thermique HVOF (High-Velocity-Oxygen-Fuel)

Le procédé HVOF est une technologie ayant moins de 35 ans sur le marché de la projection thermique. Initialement introduite par James Browning en 1982, cette technologie de pointe fait partie des techniques utilisant la flamme comme source de chaleur dans les procédés de déposition.

Dans un système typique de projection HVOF (figure 1.2), un carburant (hydrogène, propylène, propane, kérosène) est brûlé en présence d'oxygène à haute pression dans une chambre de combustion afin de générer une flamme qui atteint une vitesse supersonique. Cette flamme passe par un canon et se dégage dans l'atmosphère ouverte en utilisant une buse de différentes longueurs. La poudre est introduite dans le jet supersonique de façon radiale ou axiale. Les particules de poudre sont fondues, accélérées et dirigées vers la surface à recouvrir. Lorsque les particules impactent, elles se déforment, s'imbriquent et se solidifient à la surface du substrat, générant un recouvrement dense avec un faible pourcentage de porosité dans les dépôts (Pawlowski, 2008).

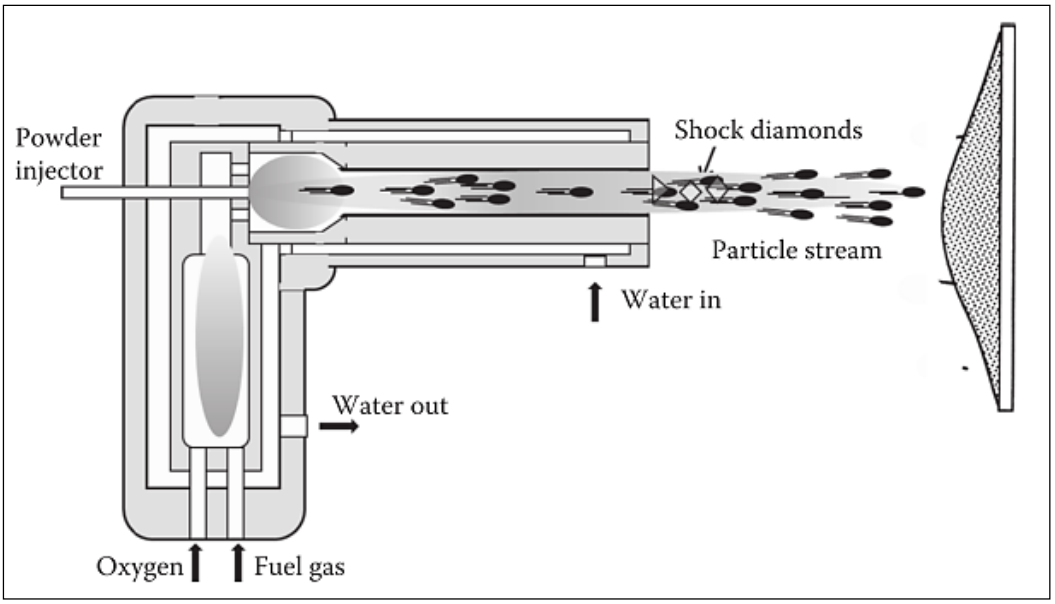


Figure 1.2 Schéma typique d'un système de projection thermique à haute vitesse (HVOF). Tirée de (Chang-Jiu, Guan-Jun et Özge, 2012)

Dans les procédés de projection thermique HVOF, des vitesses hypersoniques supérieures à 600 m/s et des températures inférieures à 2100 °C sont atteintes par les particules de poudre dans la flamme, ce qui représente un avantage en comparaison avec les autres techniques de projection thermique. Les grandes vitesses donnent une énergie cinétique plus élevée aux particules de poudre projetées, résultant d'un revêtement très dense. Les faibles températures garantissent une faible porosité inférieure à 1 % dans les revêtements. Les recouvrements de carbures de tungstène (WC) produits par projection thermique à haute vitesse (HVOF) sont une application récente de cette technologie. Ils ont été utilisés dans l'industrie aéronautique comme de remplaçants du placage électrochimique du chrome dur.

1.1.2 Systèmes de projection HVOF

1.1.2.1 Système de projection thermique HVOF-JET KOTE® III

Le système de projection thermique HVOF-JET KOTE® III a été développé par Deloro Stellite (récemment acheté par Kennametal Stellite™) entre 1979 et 1986. Il est composé d'une torche (source de chaleur), d'un chalumeau (dans lequel sont réalisées les opérations

de fusion du matériau projeté et d'acquisition d'énergie cinétique par les particules), d'un dispositif d'alimentation de poudre, d'une console de contrôle des gaz et d'une console de contrôle du robot automatisé (voir figure 1.3).

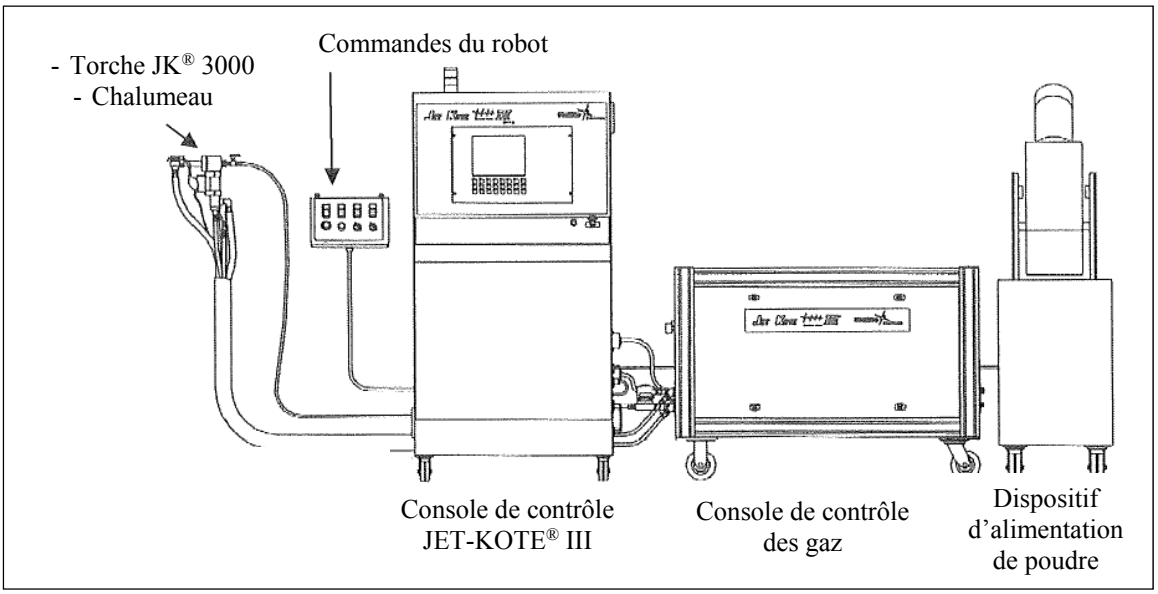


Figure 1.3 Principaux composants présents dans les systèmes de projection thermique HVOF-JET KOTE® III. Adaptée de (Stellite, 2006)

Ce système a été conçu principalement pour produire des revêtements de carbure de tungstène (WC). Il a l'avantage de générer des vitesses de particules très élevées à travers la combustion des gaz combustibles (propylène, propane ou hydrogène) et l'oxygène sous pression. Dans ce système, la poudre est injectée de façon axiale au centre du jet supersonique (flamme) où les particules fondent et sont rapidement dirigées vers la surface du substrat à recouvrir par le jet de gaz. En utilisant les paramètres optimaux, les particules déposées forment un recouvrement dense, lisse et avec une très forte résistance au décollement (Kennametal, 2006). La figure 1.4 montre un schéma typique d'un système de projection thermique HVOF-JET KOTE® III

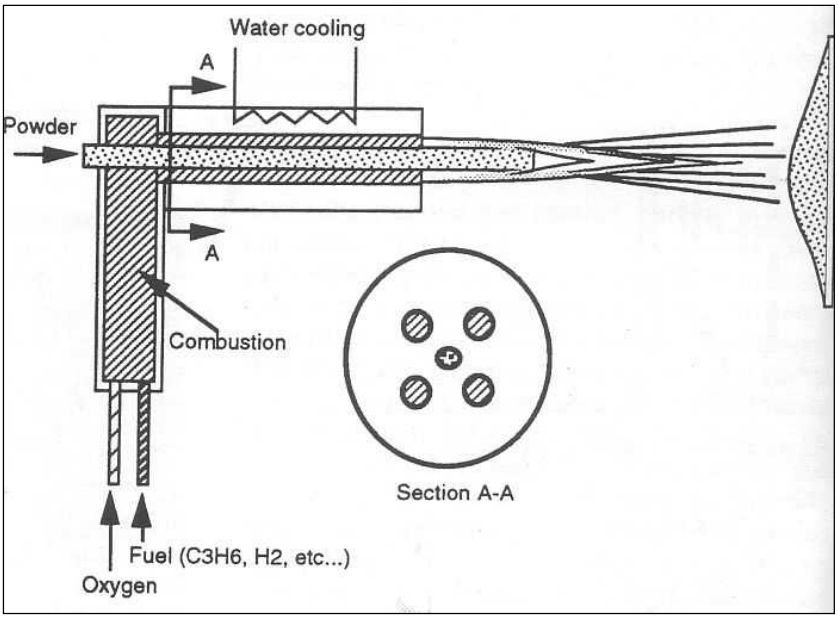


Figure 1.4 Schéma typique d'un système de projection thermique HVOF-JET KOTE® III. Tirée de (Davis, 2004)

Quelques travaux ont été publiés avec ce système de projection thermique HVOF. (Gui et al., 2012) ont utilisé le même système que celui étudié dans cette étude (JET KOTE® III) pour étudier les contraintes résiduelles générées sur des revêtements produits avec une poudre de type WC-10Co-4Cr. Un plan d'expériences a été employé pour corréler les différents paramètres de projection influençant les contraintes résiduelles trouvées dans les recouvrements. Les résultats de toutes les interactions ont révélé que le facteur ayant le plus d'impact sur les contraintes résiduelles des revêtements est la distance de projection, suivi d'une interaction de deux facteurs (débits de O_2, H_2) (voir figure 1.5).

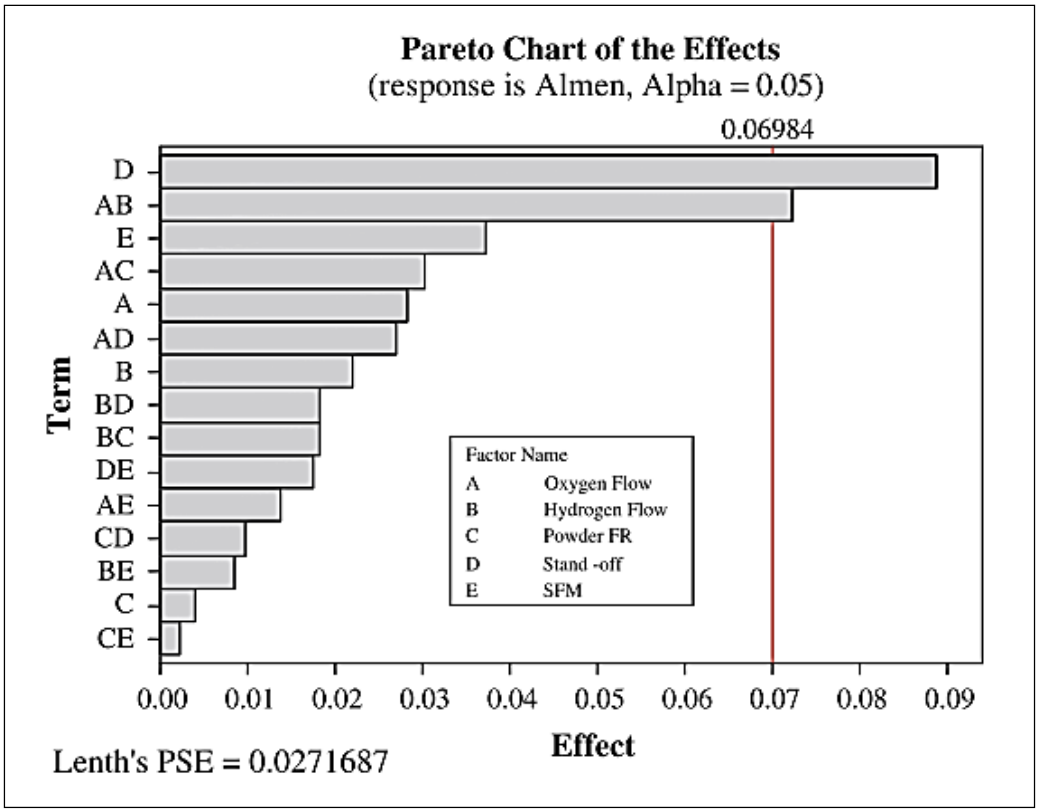


Figure 1.5 Diagramme de Pareto des interactions entre variables en fonction des contraintes résiduelles des revêtements mesurées par la méthode de déflection Almen. Tirée de (Gui et al., 2012).

Cependant, ils n'ont pas considéré la vitesse et la température des particules dans le plan d'expériences comme des variables affectant les contraintes résiduelles dans les revêtements. La distance de projection est un paramètre indirect caractérisant l'interaction particules/substrat et la vitesse et la température varient en fonction. Ce sont ces dernières qui influencent en plus grand niveau les contraintes résiduelles des revêtements.

D'autres auteurs comme (Schwetzke et Kreye, 1999), ont publié des travaux de recherche qui comparent les caractéristiques microstructurales et les principales propriétés mécaniques de plusieurs revêtements obtenus avec différents systèmes de projection thermique à haute vitesse HVOF (JET KOTE, Top Gun, le Diamond Jet (DJ) Standard, DJ-2600 et DJ-2700, JP-5000, Top Gun-K). Ils utilisent différentes poudres de type WC-Co et WC-Co-Cr. Les résultats ont démontré que les poudres présentent divers degrés de transformation de phases

pendant le processus de projection en fonction du type de système de projection utilisé et les paramètres de projection employés. Le système entraînant le plus faible pourcentage de décarburation a été le système JET KOTE. Ceci représente un excellent avantage du point de vue de la dureté, la liaison, l'usure par abrasion et la résistance à la corrosion des revêtements de WC-Co-Cr.

1.2 Influence des principaux paramètres en projection thermique HVOF

Dans la projection thermique HVOF, il y a de nombreux paramètres affectant la microstructure et les propriétés des revêtements. Cela concerne les propriétés du substrat, la préparation de surface, les propriétés des matériaux de projection, les caractéristiques de la source de chaleur, les conditions d'opération de la torche de projection, et ainsi de suite. Les principaux paramètres du procédé HVOF, contrôlables par l'opérateur, ainsi que les caractéristiques inhérentes à l'état des particules de poudre dans la flamme supersonique (vitesse et température) sont présentés aux paragraphes suivants. Ils consistent en les paramètres de la torche, le débit de matières premières, les propriétés des particules pendant le vol, la distance de projection, l'angle de projection et la température du substrat.

1.2.1 Paramètres de la torche

La torche est l'endroit où se mélangent les gaz avec la poudre alimentée et la combustion se produit. Le principal composant de la torche est la buse. Cette dernière se détériore après chaque utilisation et un arrangement est nécessaire après 16 heures de projection. Un surdimensionnement de la buse peut produire de chutes de pression des gaz ce qui causerait une réduction dans la vitesse des particules affectant la qualité des revêtements. La buse ainsi que les autres composants de la torche (la chambre de combustion et la tête de combustion) doivent être remplacés par des composants nouveaux après 60 heures d'utilisation.

Rapport-Gratuit.com

1.2.2 Débit de matières premières (Feedstock Spray Rate)

Le débit de matières premières (poudre), dans les différents procédés de projection thermique HVOF, établit le taux de déposition d'un revêtement lors du balayage avec le fusil sur les parois du substrat. Si quelques changements du débit de matières premières se présentent pendant la projection, l'épaisseur du revêtement sera inégale et les propriétés du revêtement peuvent varier considérablement. Le débit de matières premières doit être équilibré en concordance avec la source d'énergie d'entrée (flamme) afin de stabiliser la vitesse et température des particules sortantes du fusil. Un débit trop faible entraînera des vitesses des particules trop bases ce qui réduirait la densité des revêtements de type WC-10Co-4Cr ainsi que les contraintes résiduelles résultantes. À l'inverse, un débit trop important entraînera des températures des particules trop élevées ce qui induira de défauts microstructurales dans les revêtements. (Davis, 2004).

1.2.3 Propriétés inhérentes aux particules pendant la projection thermique HVOF

Les principales propriétés associées aux particules pendant la projection HVOF sont leur température (fusion) et leur vitesse (accélération) avant l'impact sur le substrat. La vitesse et la température des particules déterminent les propriétés résultantes des revêtements et dans de nombreux cas, permettent une meilleure compréhension du procédé (Picas et al., 2011). Ces deux propriétés sont expliquées dans les paragraphes suivants.

1.2.3.1 Vitesse de particules

La vitesse d'une particule, projetée à l'aide d'un procédé de projection thermique, dépend principalement de la taille de la particule, de sa densité et la distance de projection, comme le montre la figure 1.6 pour des poudres d'alumine.

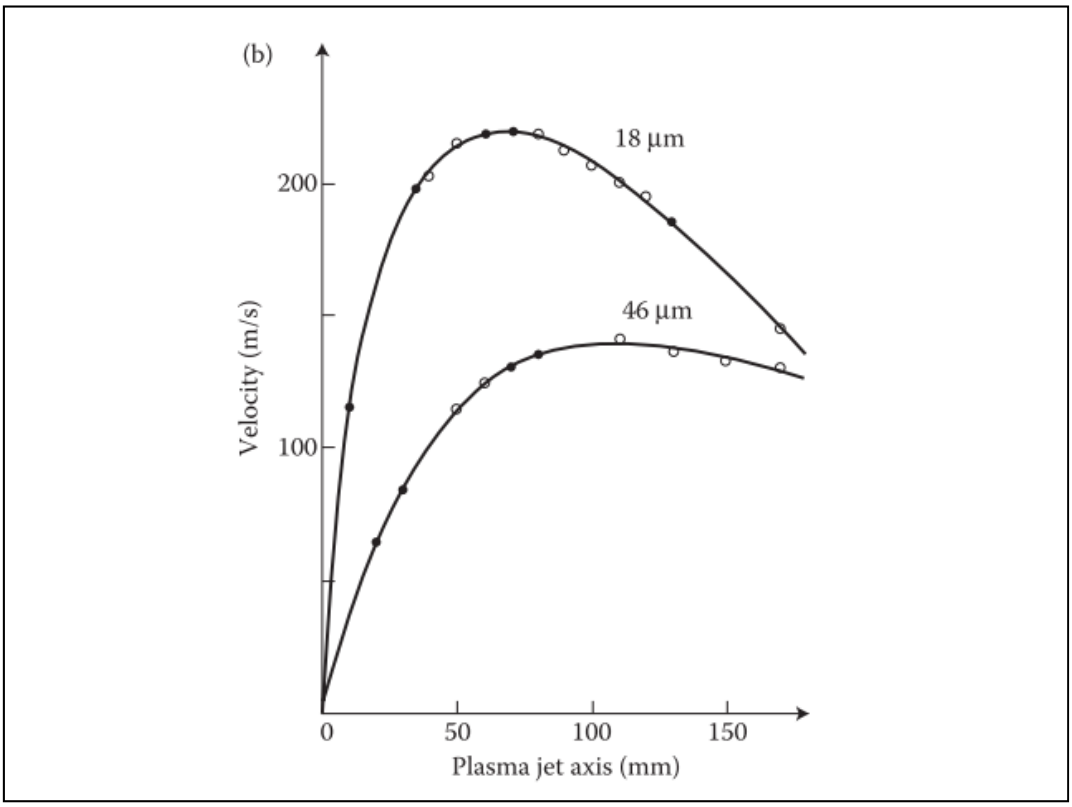


Figure 1.6 Effet de la taille de particule (18 µm et 46 µm) sur l'évaluation de la vitesse d'une particule en fonction de la distance de projection d'une poudre d'alumine obtenue avec la projection au plasma.
Tirée de (Chang-Jiu, Guan-Jun et Özge, 2012)

Les particules plus petites (18 µm) vont plus vite que les plus grosses particules (46 µm). La vitesse maximale est attente entre 40 et 70 mm pour les petites particules. Au-delà, elles tendent à diminuer à cause de la friction avec l'air. Il n'y a quasiment de max/min pour les particules de 46µm et la vitesse se stabilise autour de 100 mm**.**

La vitesse des particules dans le procédé HVOF est aussi reliée aux propriétés mécaniques des revêtements déposés. Par exemple (Lima et Marple, 2005) ont signalé l'importance de la vitesse des particules en relation avec la dureté des revêtements et l'efficacité de déposition. Ils ont observé qu'autant la dureté que l'efficacité de déposition augmentent lorsque la vitesse des particules dans le jet de flamme est maximale. Ils ont travaillé avec des systèmes HVOF DJ-2600 et DJ-2700, pour trois poudres commerciales de type WC-12Co.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

D'autres travaux comme ceux de (Picas et al., 2013) ont tiré les mêmes conclusions pour la résistance à la corrosion de revêtements HVOF de type WC-Co-Cr. Ils ont déterminé que l'obtention des vitesses de projection élevées contribue à donner un revêtement plus compact et homogène, fournissant ainsi un revêtement ayant une bonne protection contre la corrosion.

Les travaux de (Gaona, Lima et Marple, 2008) nous indiquent une forte dépendance linéaire entre la vitesse des particules avec les contraintes résiduelles (mesurés par la méthode de déflection almen) des revêtements HVOF de type nanostructurée de titane (TiO_2). Aux valeurs basses de vitesse des particules, il est possible de produire des revêtements sans des niveaux significatifs de contraintes résiduelles. Cependant, pour les revêtements produits dans des valeurs plus élevées de vitesse des particules, il a été clairement observé que les niveaux de contraintes résiduelles de compression étaient supérieurs dans les revêtements.

1.2.3.2 Température de particules

Comme dans le cas de la vitesse, la taille des particules et la distance de projection ont un impact sur la température des particules pendant la projection thermique pour des poudres d'alumine (voir figure 1.7). Selon cette figure, les particules qui sont plus petites (18 µm) deviennent plus chaudes que les plus grosses particules (46 µm) pour les courtes distances de projection entre (50 et 80 mm). Par contre, lorsque les particules parcourent des distances plus grandes, la température des petites particules tend à diminuer plus rapidement que celles de plus grosses particules à cause de la plus grande friction de l'air (les petites particules ont plus de surface pour une masse thermique donnée).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

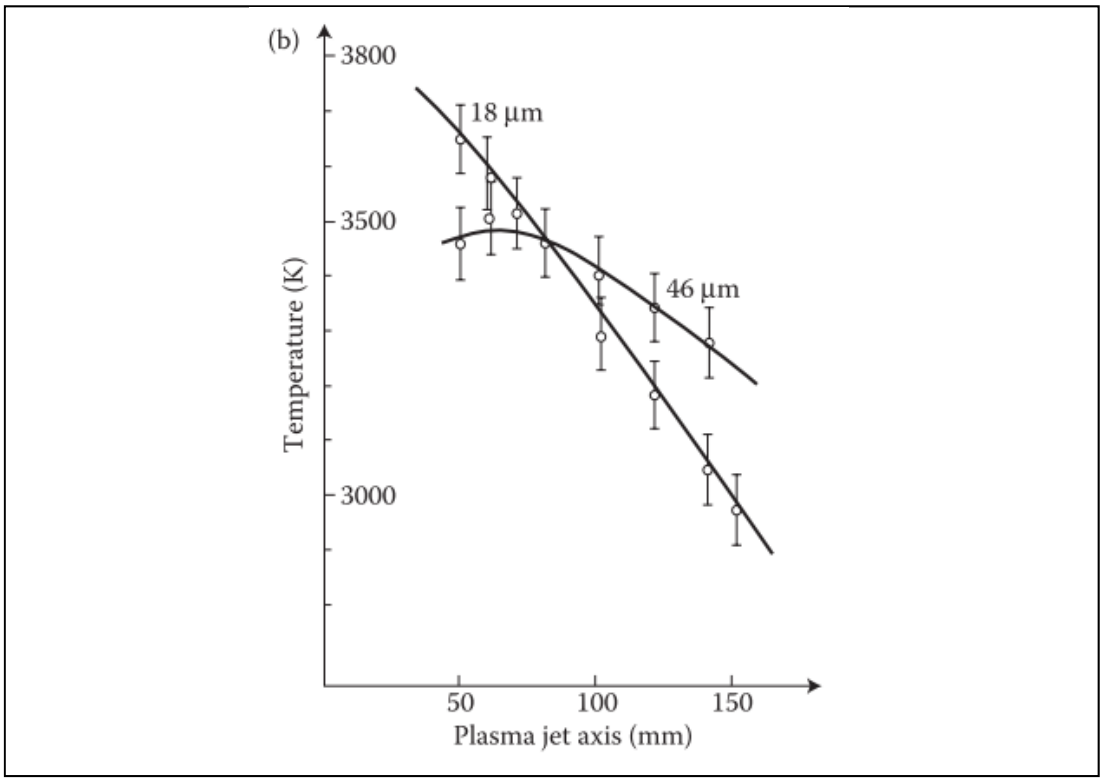


Figure 1.7 Effet de la taille des particules (18 µm et 46 µm) sur l'évaluation de la température d'une particule en fonction de la distance de projection d'une poudre d'alumine obtenue avec la projection au plasma.
Tirée de (Chang-Jiu, Guan-Jun et Özge, 2012)

La température des particules influe la porosité ainsi que la dureté des revêtements de WC-Co-Cr produits par (Zhao et al., 2004). Dans ces travaux, le système de projection qui a été utilisé pour leurs résultats est le HVOF DJ-2600 et la poudre employée a été de type WC-Co-Cr avec une taille de particules de 11 + 45 µm. Il a été constaté que le pourcentage de porosité diminue lorsque la température des particules augmente. De plus, la dureté des revêtements devient plus élevée lorsque la température des particules passe de 1950 °C à 2150 °C.

Les travaux de (Gaona, Lima et Marple, 2008) ont aussi déterminé qu'il existe une dépendance linéaire entre la température des particules et les contraintes résiduelles (mesurés par la méthode de déflection almen) des revêtements HVOF de type nanostructurée de titane (TiO_2). Les températures de particules plus élevées induisent des niveaux plus élevés de

contraintes de compression sur les revêtements et vice-versa. Ces niveaux de contraintes résiduelles sont dus à la trempe et contraction de particules fondues ou semi-fondues pulvérisées à la surface du substrat.

1.2.4 Distance de projection

La distance de projection est définie comme la distance existant entre la sortie de la buse et la surface du substrat à traiter. Généralement, pour les procédés HVOF elle se trouve dans une plage de 150 à 300 mm (Pawlowski, 2008). La distance de projection affecte les conditions de vitesse et température des particules dans le trajet vers la surface du substrat. Une distance de projection trop importante génère un effet de cône dans les particules (voir figure 1.8) ce qui conduit à la décélération et refroidissement des particules lors de l'impact. De plus, un effet de rebond des particules sur les substrats est généré provocant une possible inclusion des particules non fondues dans les revêtements. En même temps, cela résulte d'un faible taux de déposition pour les revêtements. Par contre, une distance trop courte peut conduire à un surchauffage des substrats réduisant le temps de vol de particules altérant les propriétés mécaniques du substrat.

Une distance optimale de projection est donc nécessaire pour s'assurer d'un bon dépôt avec une qualité homogène et couvrir le maximum de la pièce sans entraîner dans des pertes du matériau. Une fois que la distance de projection est établie, elle doit être maintenue constante pendant toute l'opération de projection, indépendamment du mouvement de la torche nécessaire entre les passes pour s'assurer d'une épaisseur uniforme sur la pièce.

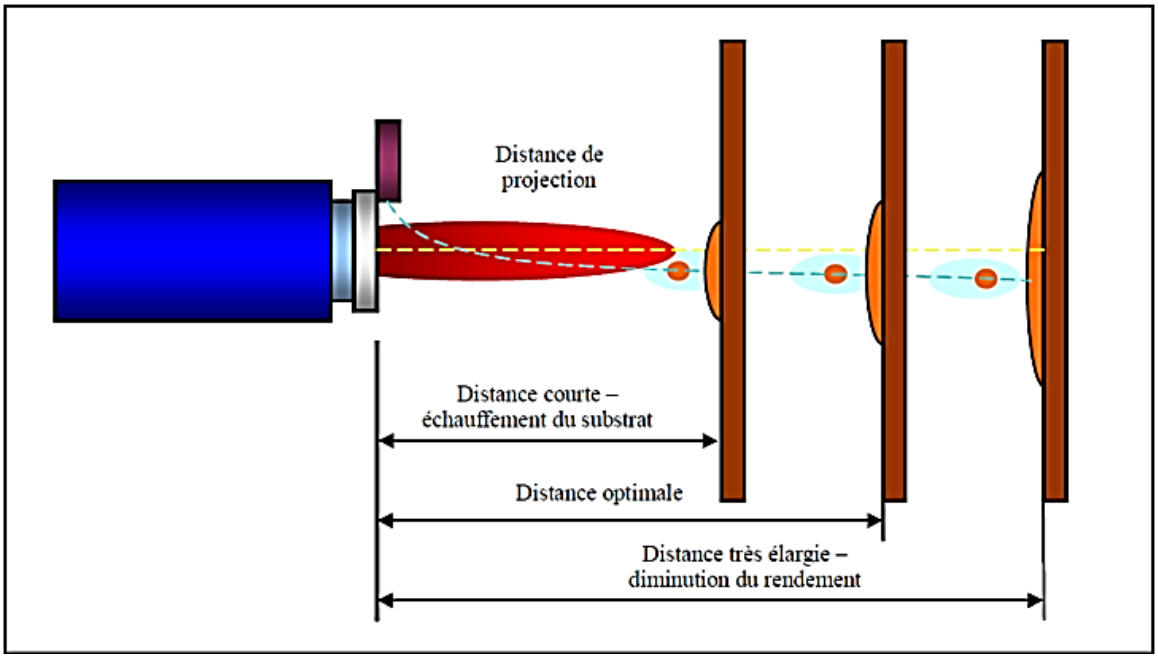


Figure 1.8 Schéma de distance de projection dans les procédés de projection thermique. Tirée de (Fang, 2010)

Les travaux de (Hong et al., 2014) ont étudié l'influence de la distance de projection ainsi que des débits d'oxygène et de kérosène) sur la résistance à la corrosion des revêtements par projection HVOF de type WC-10Co-4Cr. La méthode Taguchi y compris le rapport signal sur bruit (S/B) et l'analyse de variance (ANOVA) ont été utilisés pour optimiser la porosité et, par conséquent, la résistance à la corrosion des revêtements. Les résultats ont indiqué que la distance de projection est le facteur le plus important affectant la résistance à la corrosion de ces revêtements. Dans ce sens, ils ont déterminé que la distance de projection optimale se trouve à 300 mm, la condition la plus favorable du point de vue de la résistance à la corrosion.

1.2.5 Angle de projection

L'angle de projection est défini comme l'angle existant entre la direction du jet supersonique et la surface du substrat couverte par les particules. Quel que soit l'angle choisi, il doit être maintenu constant pendant toute l'opération de projection. Typiquement, les angles de

projection utilisés dans les procédés thermiques HVOF sont de 90° ± 20° afin d'obtenir le meilleur rendement de la projection (Houdkovà, Kasparova et Zahalka, 2010). L'angle de projection est d'autre paramètre qui influe sur la qualité des revêtements obtenus par projection thermique. Lorsque l'angle de projection diminue, un bas rendement de la déposition se génère, alors que la porosité des revêtements augmente, ce qui résulte d'une microstructure peu uniforme ayant de pauvres propriétés mécaniques.

1.2.6 Température du Substrat

La température du substrat est d'autre paramètre influant les propriétés des revêtements par projection thermique HVOF. L'interaction particules/substrat est différente lorsque le substrat est chaud et lorsqu'il est à température ambiante. (Moreau et al., 2005) ont signalé l'influence de la température du substrat sur l'aplatissement et la solidification des particules une fois de l'impact. Il a été montré que, sur des substrats à haute température (environ 300-400 °C), les particules projetées ont tendance à former des disques bien formés et distribués. Tandis que, sur des substrats à température ambiante, les particules ont tendance à casser dans de nombreuses gouttelettes conduisant à la formation de flocs déformés. Pour la présente étude, la température du substrat a été à température ambiante pour les premières passes et celle-ci n'a jamais excédé 177 °C (350 °F) parmi toutes les passes afin de ne pas altérer les propriétés mécaniques des pièces manufacturées.

1.3 Méthodes de fabrication et caractérisation de poudres en projection thermique

Les poudres peuvent être fabriquées par différentes méthodes comme l'illustre la figure 1.9. Dans le cadre de ce projet, les poudres (WC-10Co-4Cr) ont été fabriquées par deux méthodes: le séchage par atomisation (Spray Drying) appelé aussi Agglomération et la fusion (ou frittage) puis écrasement par broyage. Les principales caractéristiques de ces deux méthodes de fabrication sont expliquées dans les paragraphes suivants.

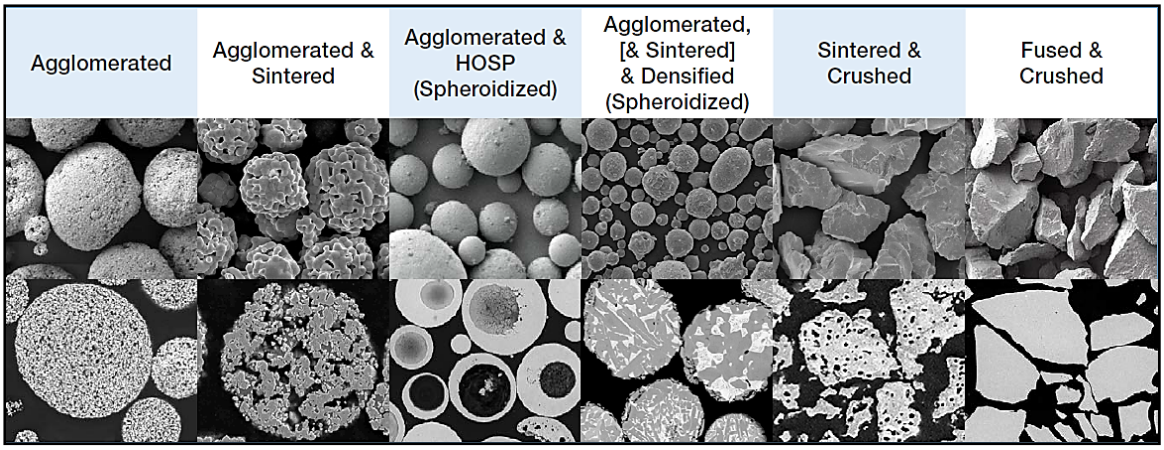


Figure 1.9 Méthodes de fabrication de poudres. Tirée de (Oerlikon, 2015)

1.3.1 Séchage par atomisation (Spray Drying)

Le procédé « Spray Drying » est une de méthodes le plus utilisé pour la fabrication de poudres de type WC-10Co-4Cr, car il permet d'obtenir des poudres de morphologie généralement sphérique. Le procédé consiste à atomiser (réduire en très fines gouttelettes) une suspension (liquide de départ) contenant des particules du matériau, d'un liant organique et d'un solvant (par exemple de l'eau) pour former des fines gouttelettes. Ces gouttelettes sont séchées dans une chambre de séchage. L'eau est évaporée à l'aide d'un courant de gaz chaud et sec (par exemple l'air). Des particules solides sont récupérées à la sortie de la chambre de séchage et séparées de l'air humide en utilisant une unité de séparation gaz-solide (centrifugeuse). Par la suite, les particules solides sont recueillies dans un collecteur de poudre. Le schéma d'un sécheur par atomisation typique est représenté à la figure 1.10.

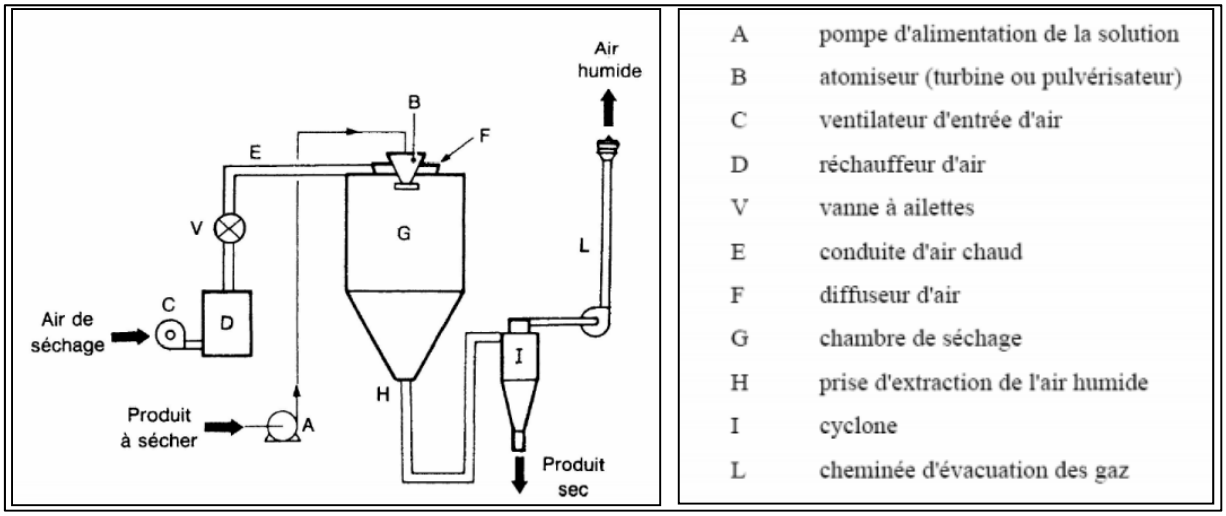


Figure 1.10 Schéma d'un sécheur par atomisation. Tirée de (Charreau et Cavaillé, 1991)

Les poudres obtenues ne sont pas denses après séchage par atomisation. Un processus de densification de la poudre est possible et est couramment réalisé. Ce type de densification est fait à haute température (à l'aide d'un plasma) et c'est considéré la technique la plus avancée pour la fabrication de ce type de poudres, car il permet d'améliorer certaines propriétés comme la capacité à l'écoulement de poudres (voir section 4.1.3). La différence entre la morphologie d'une poudre obtenue seulement par séchage par atomisation et avec le processus de densification au plasma est présentée à la figure 1.11 :

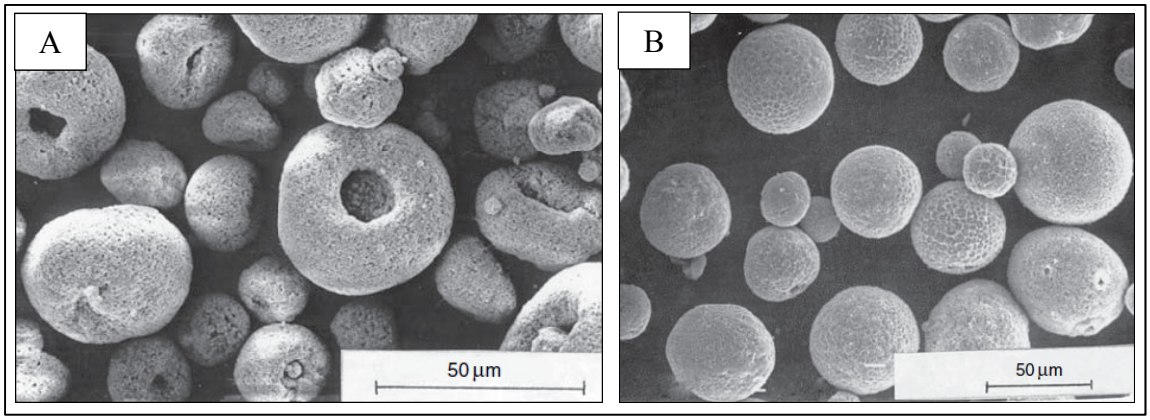


Figure 1.11 Morphologie d'une poudre de Cr_2O_3+SiO_2 : a) Fabriquée par séchage par atomisation et b) Après le processus de densification au plasma. Tirée de (Pawlowski, 2008)

De cette figure on observe clairement une porosité à l'intérieur des particules ainsi qu'une forme irrégulière des mêmes (photo A) résultantes de la méthode de fabrication par séchage par atomisation. À droite (photo B), il est illustré l'effet du processus de densification au plasma sur la diminution de la porosité des particules, car les particules sont plus compactes et de forme plus sphérique.

1.3.2 Fusion suivie par écrasement (Sintered & Crushed)

Le procédé de fusion ou frittage suivi d'un écrasement est aussi utilisé pour la production des poudres de type WC-10Co-4Cr. Il consiste à placer le matériau (mélangé et fritté préalablement) dans un récipient en rotation contenant des billes dures qui permettent la fracturation du matériau en petites particules (poudre). Un tamisage permet d'obtenir la granulométrie souhaitée. La forme des particules de poudre obtenues à partir de ce procédé est irrégulière mais sous forme de blocs, ce qui diminue la capacité à l'écoulement de la poudre. Pour augmenter cette dernière, les poudres peuvent être soumises à un processus de sphéroïdisation. Généralement, les poudres produites par fusion suivie d'un écrasement contiennent un niveau important de porosité interne dans les particules. La figure 1.12 montre un exemple d'une poudre de type cermet de WC-Co-Cr fritté et écrasé.

Rapport-Gratuit.com

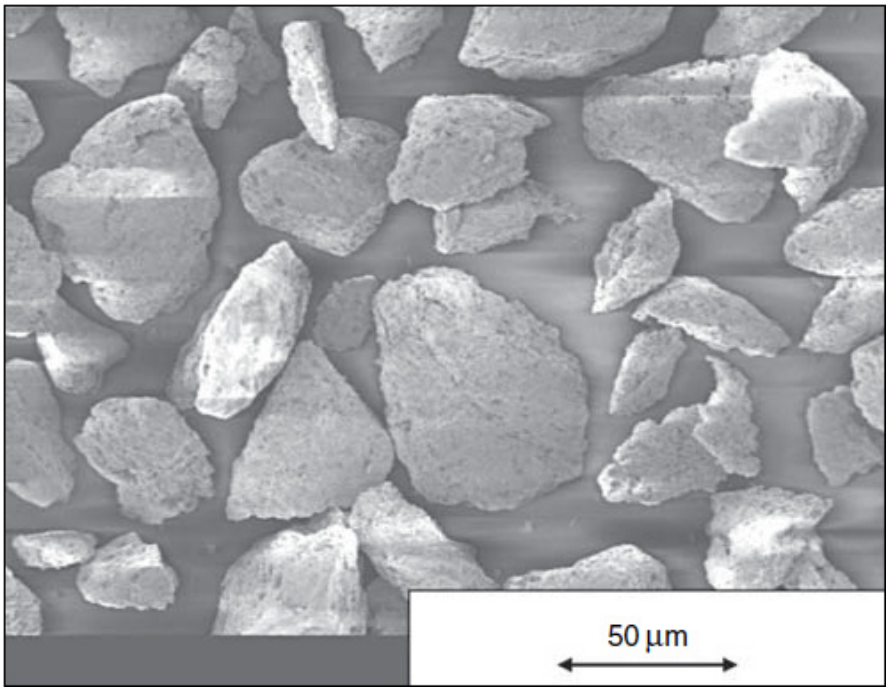


Figure 1.12 Morphologie d'une poudre de WC-Co-Cr fabriquée par frittage suivi par un écrasement. Tirée de (Pawlowski, 2008)

1.3.3 Méthodes de caractérisation des poudres

Les poudres utilisées en projection thermique HVOF sont caractérisées principalement par :

- Distribution granulométrique
- Densité apparente
- Coulabilité
- Morphologie
- Composition de phases.

Ces caractéristiques sont nécessaires pour évaluer les propriétés physiques et chimiques des poudres afin d'obtenir un bon contrôle de la qualité et assurer le bon rendement du procédé. Dans les paragraphes suivants seront expliquées les méthodes de caractérisation des poudres.

1.3.3.1 Distribution granulométrique

La granulométrie est une méthode de caractérisation qui sert à connaître la distribution volumétrique des particules dans un lot de poudre. Elle détermine les intervalles de diamètres des particules d'un échantillonnage représentatif du matériau. Une des techniques le plus utilisées pour l'étude de la distribution granulométrique des poudres est la granulométrie laser. « Cette technique consiste à mesurer l'intensité de la lumière diffusée lors du passage d'un faisceau laser à travers un échantillon de particules dispersées. Cette donnée est ensuite analysée pour calculer la taille des particules qui ont créé l'image de diffraction » (Malvern, 2012). La procédure employée pour la mesure de la distribution granulométrique de poudres est détaillée à la section 2.3.1.1.

1.3.3.2 Densité apparente

La densité apparente est définie comme le rapport entre la masse et le volume occupé par les particules de poudre. Dans ce ratio, on comptabilise aussi les interstices créés entre ces mêmes particules. La procédure consiste à déposer environ 100 gr (m) de poudre dans un cylindre gradué de 250 ml et lire le volume apparent (V_0) occupé par les particules de poudre. Le rapport selon la formule (m/V_0) correspond à la densité apparente. Avec cette propriété, on peut avoir une idée sur la porosité interne des particules de poudre.

1.3.3.3 Coulabilité

La coulabilité est la capacité que possède un medium à s'écouler par un orifice calibré, tel un entonnoir. L'écoulement est un facteur important qui peut influencer le comportement physique des poudres lorsqu'elles rentrent dans la flamme (vitesse et température des particules). La procédure employée pour la mesure de la coulabilité des poudres est détaillée à la section 2.3.1.2.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1.3.3.4 Morphologie

La forme (morphologie) des particules d'une poudre dépend principalement du procédé de fabrication employé. Les différentes morphologies schématiques des particules de poudre sont présentées à la figure 1.13.

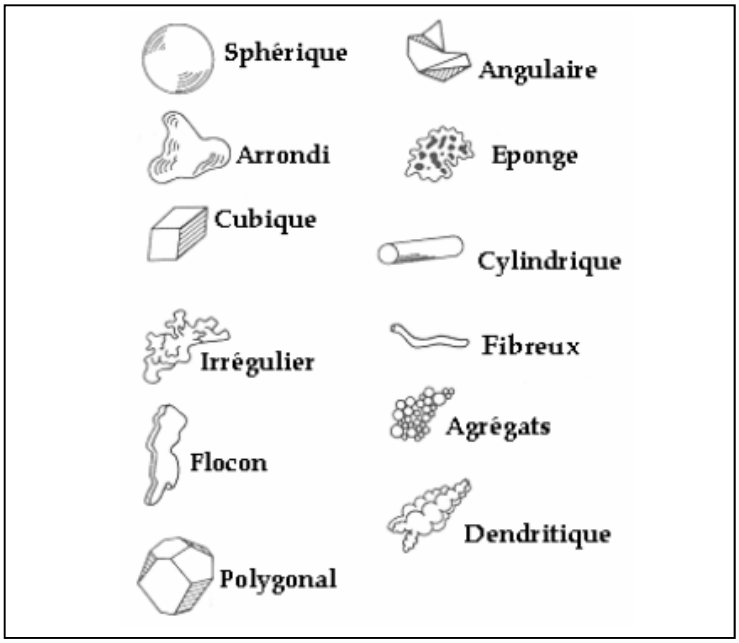


Figure 1.13 Morphologies des particules de poudre.
Tirée de (Randall, 1994)

La morphologie des particules est généralement observée par microscopie électronique; soit le microscope électronique à balayage (MEB) ou le microscope électronique à transmission (MET) respectivement. La forme des particules influence considérablement la capacité à l'écoulement des poudres (Condotta, 2005). Plus elles sont de forme sphérique, plus elles ont la capacité à s'écouler ce qui est très bénéfique pour leur comportement à l'intérieur de la flamme.

1.3.3.5 Composition des phases

La détermination de la composition des phases des poudres est obtenue par la technique de diffraction des rayons X (DRX). Le principe de la diffraction consiste d'un balayage par rayons X d'une surface d'un échantillonnage représentatif de la poudre. Ce balayage produit des interactions avec la matière et permettre la diffraction d'un rayonnement de longueur d'onde (**λ**) et de phase cohérente (Cullity et Stock, 2001). La direction du faisceau diffracté est donnée selon la loi de Bragg-Brentano :

$$n\lambda = 2d \sin \theta \tag{1.1}$$

Où (d) est la distance interréticulaire séparant deux plans de même famille (h, k, l), (λ) est la longueur d'onde du rayonnement diffracté, (θ) est la position angulaire des pics et (n) correspond à l'ordre de diffraction.

L'appareil le plus utilisé pour la détection des phases de poudres est le diffractomètre de poudres à focalisation Bragg-Brentano. Il permet d'obtenir des raies de diffraction très fines et de récupérer une intensité diffractée importante. Un diffractomètre conventionnel est composé d'un tube à rayons X, d'un goniomètre, d'un système de fentes et d'un détecteur. La procédure employée pour la détermination des phases de poudres est détaillée à la section 2.3.1.4.

1.4 Revêtements de type WC-10Co-4Cr

Les revêtements de WC-10Co-4Cr sont utilisés dans de nombreuses applications qui nécessitent une forte résistance à l'usure et à la corrosion des pièces métalliques manufacturées. Particulièrement, pour le partenaire industriel de la présente étude (Tecnickrome Aéronautique Inc), ces types de revêtements sont appliqués sur des surfaces de composants de trains d'atterrissage. Ces types de revêtements doivent avoir une faible porosité, habituellement inférieure à 1 %. L'oxydation de ces revêtements est également limitée à 1 %. L'adhésion au substrat est excellente et des forces de liaison de plus de 70

Mpa sont atteintes. Il est possible d'obtenir des épaisseurs de revêtements de plus de 1.5 mm avec un contrôle minutieux de refroidissement pour réduire les contraintes résiduelles. L'efficacité des dépôts est généralement de plus de 60 % pour de nombreuses poudres utilisées (Sobolev et Guilemany, 2004).

1.4.1 Principales propriétés de caractérisation des revêtements de WC-10Co-4Cr

Les principales propriétés qui permettent de qualifier les revêtements sont : l'adhésion, les caractéristiques microstructurales, la dureté, les contraintes résiduelles et la rugosité.

1.4.1.1 Adhésion

Pour caractériser l'adhésion, plusieurs méthodes sont disponibles afin de permettre de simuler la performance réelle des revêtements en service. L'adhésion peut être analysée par des tests d'indentation, par des essais de cisaillement et par des tests de résistance à la traction (Hadad et al., 2008). Cependant, la méthode utilisée dans le présent projet est le test de pliage (voir section 2.4.1.2 pour explication de la méthode).

1.4.1.2 Microscopie optique

La caractérisation microstructurale utilisant un microscope optique est devenue un test standard et routinier pour évaluer la qualité des dépôts par projection thermique. Pour la présente étude, le microscope optique est utilisé pour révéler les défauts éventuels dans les revêtements. Les requis métallographiques des revêtements conformes les exigences des spécifications en aéronautique sont présentés au tableau suivant :

Tableau 1.1 Requis métallographiques des revêtements de WC-10Co-4Cr produits par projection thermique HVOF. Adapté de (TLP-020, 2012)

Microfissures	Aucune détectable.
Inclusions/Oxydes	Dois être moins de 1 %.
Porosités	Dois être moins de 1 %.
Interface	Très peu de contamination à l'interface revêtement/substrat
Distribution des carbures	Les carbures doivent être uniformément distribués
Particules non fondues	Aucune permise.

Un champ de vision de la surface des revêtements doit être sélectionné pour faire l'évaluation selon les requis métallographiques mentionnés. Le but de la sélection est d'obtenir une surface la plus représentative possible afin d'évaluer la qualité microstructurale des revêtements. Avant l'observation microscopique, les échantillons testés doivent être préparés pour une évaluation métallographique. La section 2.4.1.3 détaille la procédure pour la préparation métallographique des revêtements.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1.4.1.3 Microscopie électronique

La caractérisation microstructurale à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) permet d'avoir des images agrandies de la structure interne des revêtements. Cette dernière peut être explorée à des grossissements d'environs 10X à 300000X (Brundle, Evans et Wilson, 1992). Le MEB est utilisé pour observer des caractéristiques de surface plus spécifiques, telles des couches individuelles après l'impact, des zones fracturées des revêtements, de différentes phases dégradées pendant la projection thermique, des défauts de surface, etc.

Le principe de base consiste à envoyer des électrons sur toute la surface de l'échantillon où se produisent des interactions. Ces interactions se traduisent dans une émission d'électrons secondaires à partir de la surface de l'échantillon qui par la suite sont recueillis par des détecteurs mesurant la luminosité. Chaque coordonnée du point que le faisceau d'électrons

impacte sur la surface est enregistrée et associée avec l'intensité du signal mesurée. Les points collectés fournissent une image de l'échantillon qui est affichée sur un écran d'ordinateur. Le temps du balayage doit être suffisant pour obtenir une image de qualité, c'est-à-dire assez lumineuse, propre et contrastée (Brisset, 2008). La procédure pour la caractérisation microstructurale par microscopie électronique des revêtements, produits dans cette étude, est expliquée à la section 2.5.1.1.

1.4.1.4 Dureté

La pointe Vickers est l'échelle standard pour l'étude de la dureté des revêtements par projection thermique HVOF. La méthode est basée sur la mesure de la taille de l'indentation qui est effectuée sur la section longitudinale de l'échantillon, ayant subi préalablement un polissage mécanique. La dureté dépend de la charge appliquée, étant la plus commune de 300 gf.

Certaines études ont relié la dureté avec le niveau de porosité et les microfissures dans le revêtement. (Murugan et al., 2014) ont trouvé une relation directe entre le niveau de porosité et les valeurs de dureté des revêtements de 86WC-10Co-4Cr conçus par projection thermique HVOF. Ils ont trouvé que la dureté peut passer de 1200 $HV_{(0,3)}$ à des valeurs en dessous de 800 $HV_{(0,3)}$ lorsque la porosité augmente de 1 % au 3 % dans les revêtements.

1.4.1.5 Contraintes résiduelles

La contrainte résiduelle dans un revêtement métallique est une propriété critique qui affecte autant les revêtements que les substrats. Pour les revêtements de type WC-10Co-4Cr, les contraintes résultantes lors de la projection thermique sont compressives servant à améliorer la résistance à la fatigue des composantes traitées (Parker, 2003). Il existe plusieurs méthodes pour mesurer les contraintes résiduelles dans un revêtement. La plus connue est la diffraction par rayons X, mais vu sa complexité de mise en œuvre, dans l'industrie aéronautique, les contraintes résiduelles sont mesurées par la méthode de déflection Almen (Sauer et Sahoo, 2001). La procédure de la méthode est décrite à la section 2.4.1.5.

1.4.1.6 Rugosité

Les revêtements obtenus avec la projection thermique HVOF détiennent relativement des surfaces plus lisses en comparaison à d'autres procédés de projection thermique. Cela en raison de la haute énergie d'impact donnée aux particules (Oerlikon, 2014).

Parmi les paramètres d'état de surface, Ra est le paramètre le plus fréquemment spécifié en projection thermique HVOF et se définit comme la moyenne arithmétique des valeurs absolues de la verticale du profil de rugosité (MacKenzie, 2008). Il est calculé à partir des écarts entre les aspérités (au-dessus de la ligne du centre) et les vallées (sous la ligne du centre), présentes le long (L) du profil de rugosité de la surface analysée (voir figure 1.14).

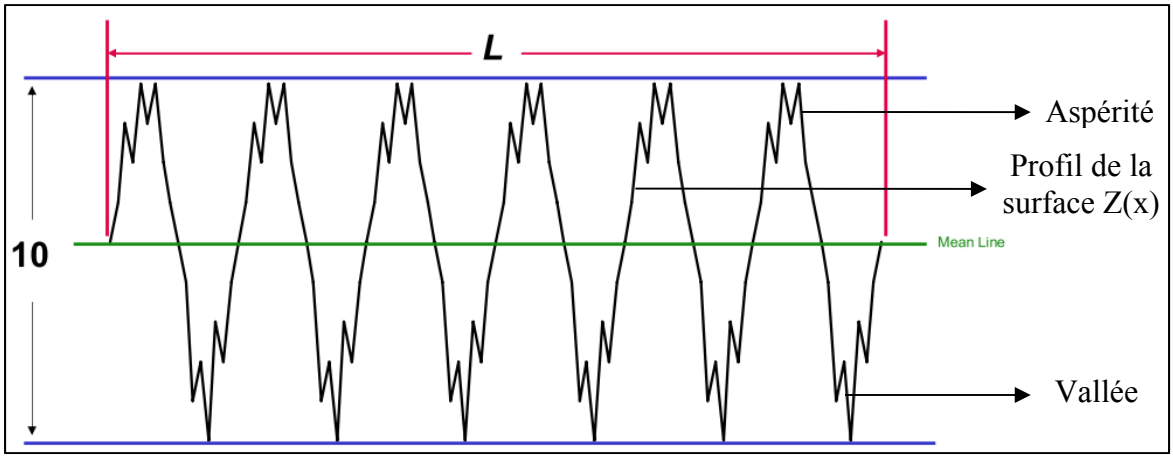


Figure 1.14 Représentation graphique du calcul de Ra (µm)
Adaptée de (MacKenzie, 2008)

D'autres paramètres peuvent aussi être utilisés pour l'indication de l'état de surface d'un solide, comme l'illustre la figure 1.15 :

1. R_t : distance entre l'aspérité la plus haute et la vallée la plus creuse;
2. R_p : distance entre l'aspérité la plus haute et la ligne de centre;
3. R_v : distance entre la ligne de centre et la vallée la plus creuse;
4. R_z : distance entre la hauteur moyenne des 5 plus hautes aspérités et le creux moyen des 5 vallées les plus creuses;
5. R_{pm} : distance entre la hauteur moyenne des 5 plus hautes aspérités et la ligne de centre;

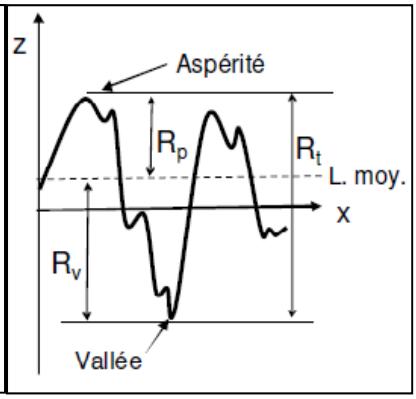


Figure 1.15 Paramètres de hauteur des aspérités et de la profondeur des vallées.
Tirée de (Guilbault, 2007)

CHAPITRE 2

DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE

On verra dans ce chapitre une description de la méthodologie employée pour la conception et caractérisation des revêtements par projection thermique HVOF, obtenus à partir des différentes poudres de type WC-10Co-4Cr. L'objectif est de décrire de manière détaillée le processus de production des revêtements, la nature des poudres choisies ainsi que les principales techniques de caractérisation des revêtements par projection thermique HVOF, sollicitées par l'industrie aéronautique.

2.1 Système de projection thermique HVOF utilisé

Le système de projection à haute vitesse HVOF qui a été utilisé dans ce projet est le JET KOTE ® III appartenant à la compagnie Tecnickrome Aéronautique Inc, Montréal, Québec, Canada. Il est composé d'un ensemble complètement robotisé : Un système de torche JK® 3000 contrôlée par une console JET KOTE® III (control console), monté sur un robot Fanuc à six axes modèle : M-710iB qui est contrôlé par une console modèle : R-J3iB. Le carburant utilisé est l'hydrogène et l'oxygène est utilisé pour générer la combustion. La poudre actuellement utilisée pour produire des revêtements de WC-10Co-4Cr avec le système JET KOTE® III est la poudre qu'on va nommer, pour des raisons de confidentialité, la « poudre A » ou la poudre de référence. Cette poudre est transportée vers la chambre de combustion, située à l'intérieur de la torche, en utilisant un gaz porteur inerte (Argon). La figure 2.1 montre le système de projection thermique HVOF-JET KOTE® III.

Rapport-Gratuit.com

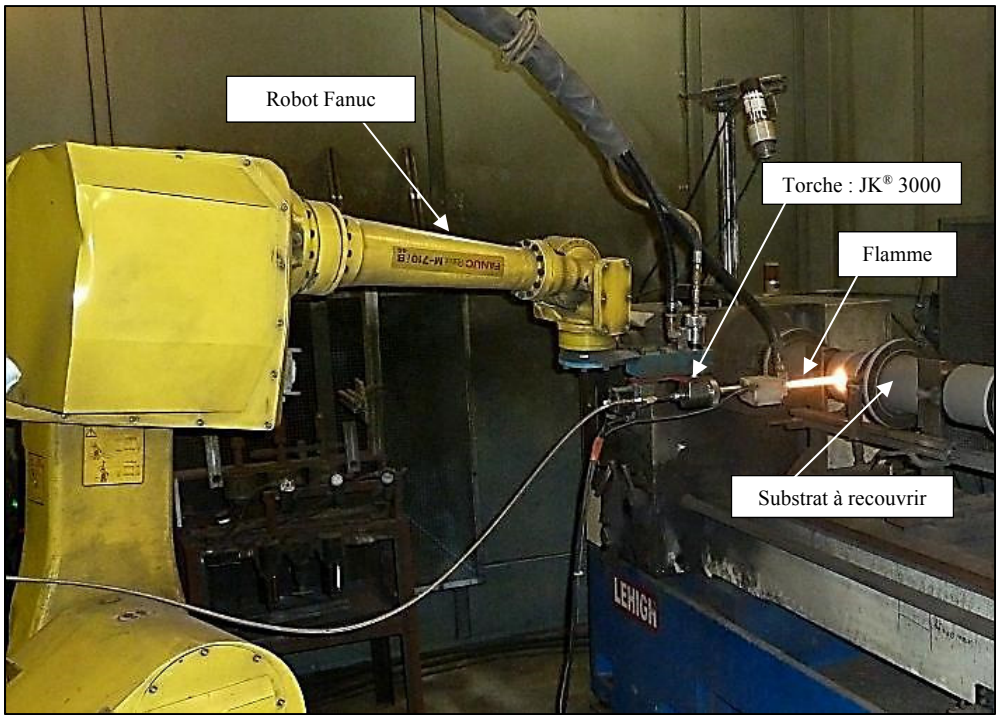


Figure 2.1 Système de projection thermique HVOF-JET KOTE® III, torche JK® 3000 et Robot Fanuc M-710iB en action

2.1.1 Caractérisation du procédé HVOF-JET KOTE ® III

2.1.1.1 Caractérisation de la vitesse et température des particules en utilisant la poudre de référence (poudre A)

Avant de procéder aux premiers essais de projection avec les poudres, il a été important de caractériser le procédé actuellement utilisé afin de mieux comprendre le comportement des particules de poudre du point de vue de la vitesse et la température durant leur trajectoire vers la surface du substrat à recouvrir.

En utilisant la poudre de référence (poudre A), des valeurs de vitesse et de température qui correspondent aux tests de qualification hebdomadaires du procédé HVOF ont été collectées durant une période d'un an. Ceci, dans le but d'observer la variabilité de ces deux paramètres inhérents aux particules et de déterminer de possibles effets sur les propriétés des revêtements produits pour des pièces de production. Des exemples de quelques propriétés de

revêtements obtenus avec différentes valeurs de vitesse et température ont été évalués pour vérifier la qualité et la conformité des revêtements. Les données de vitesse et température de particules en vol ont été mesurées à l'aide d'un dispositif (le AccuraSpray-G3C) qui a été fixé perpendiculairement au jet des particules.

2.2 Élaboration des revêtements

2.2.1 Substrats employés

Dans ce mémoire, des revêtements de type WC-10Co-4Cr ont été déposés sur la surface des substrats rectangulaires de type Almen N 1-S en acier à haut carbone (SAE 1070), acier pour ressort laminé à froid (cold rolled spring steel), de dureté 73.0-74.5 HRA et de dimensions 19 mm x 76 mm x 0,81 mm. La planéité est de 0.32 mm ± 0.012 mm. La figure 2.2 montre les dimensions des substrats de type Almen N 1-S.

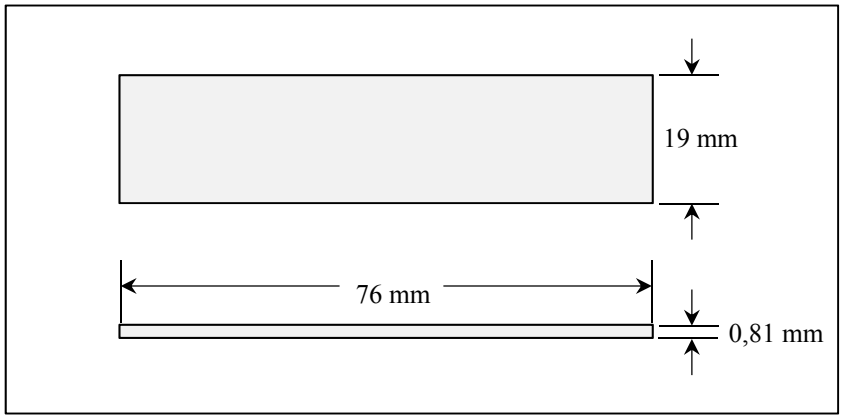


Figure 2.2 Dimensions des substrats de type Almen N 1-S

Avant de réaliser la projection, il a été nécessaire de dégraisser les substrats avec de l'acétone et d'activer leurs surfaces par un nettoyage au jet abrasif (alumine) de grenaille 54-60, dans le but de donner un ancrage mécanique aux revêtements ainsi qu'une plus grande rugosité et donc augmenter leur adhérence avec les substrats.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2.2.2 Description des éléments du montage pour la réalisation des revêtements de type WC-10Co-4Cr

Pour la réalisation des revêtements, différents éléments ont été utilisés. Ils consistent en un porte-échantillon cylindrique, un pyromètre infrarouge, une plaque d'aire comprimé et un dispositif pour mesurer la vitesse et la température des particules dans la flamme (AccuraSpray-G3C). La figure 2.3 montre le montage utilisé pour la réalisation de revêtements.

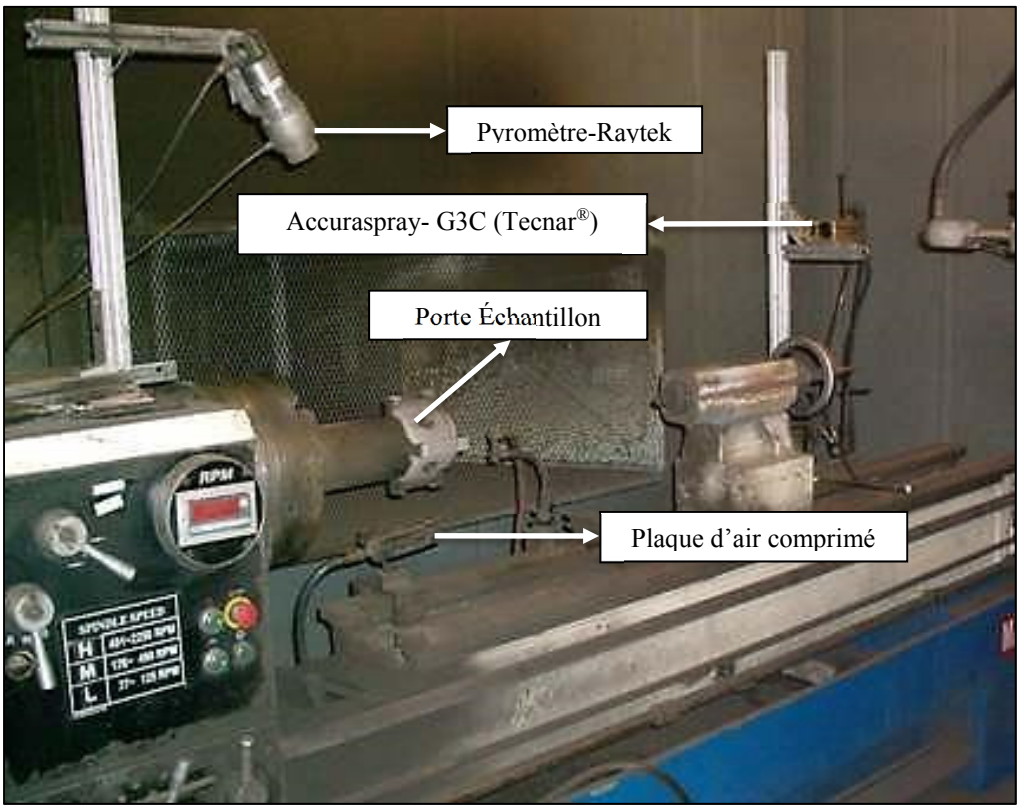


Figure 2.3 Montage utilisé pour la production des revêtements de type WC-10Co-4Cr par le procédé HVOF

2.2.2.1 Porte échantillon cylindrique

Un porte-échantillon cylindrique (figure 2.4) animé d'une rotation constante a été utilisé pour installer les échantillons d'almen N 1-S et de cette manière être balayés avec la torche JK® 3000.

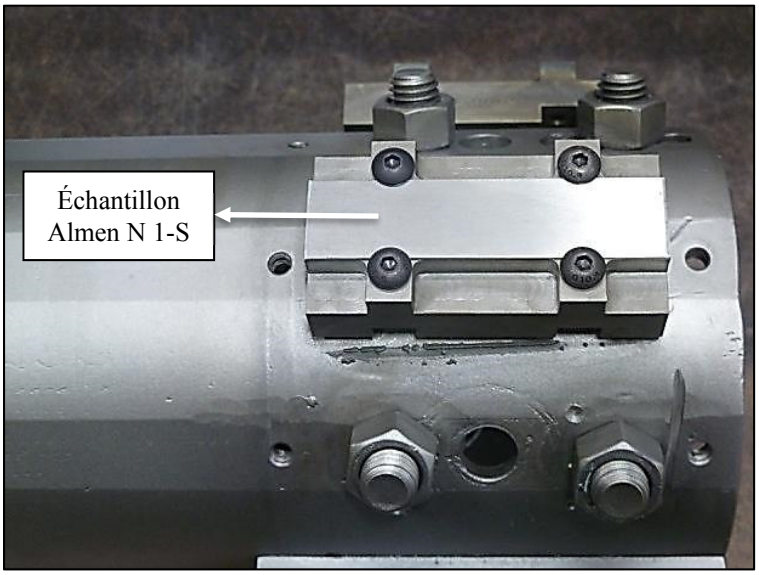


Figure 2.4 Porte échantillon cylindrique pour le montage des substrats d'Almen N 1-S

2.2.2.2 Pyromètre infrarouge modèle Raytek

L'appareil utilisé pour mesurer la température des substrats pendant le passage sous la torche a été un pyromètre infrarouge modèle Raytek, placé à un angle de 45-90 degrés et une distance de 584.2 ± 25 mm de l'axe du substrat à recouvrir (voir figure 2.5).

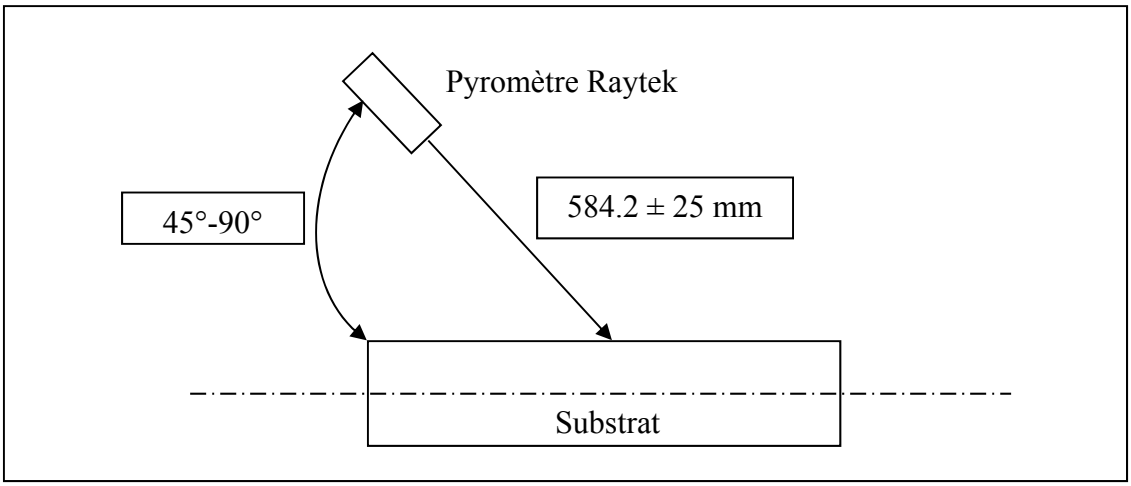


Figure 2.5 Schéma de positionnement du pyromètre IR, pour contrôler la température des substrats durant la projection thermique.
Adaptée de (TPS-1700, 2014)

Le principe de fonctionnement du pyromètre consiste à mesurer l'intensité du rayonnement infrarouge émis par la pièce et grâce aux capteurs disposés dans le dispositif, convertir ces signaux en valeurs de températures qui sont affichées et enregistrées dans le logiciel associé au pyromètre. Ces valeurs sont par la suite comparées à d'autres valeurs de température prises directement sur les surfaces des échantillons par un thermocouple. L'écart de deux mesures ne doit pas être supérieur à 1 % pour garantir un bon contrôle de la température des substrats.

2.2.2.3 Plaque d'aire comprimé

Durant les projections, la température des substrats ne peut jamais surpasser 177 °C (350 °F) afin de ne pas altérer les propriétés mécaniques des substrats ni les conditions de revenu des alliages conformément à la norme (AMS-2448, 2004). Dans ce sens, le refroidissement des échantillons a été réalisé à l'aide des jets d'air comprimé émis par une plaque d'air située parallèlement au porte-échantillon (figure 2.6). La fonction principale de ces jets d'air est d'accélérer le refroidissement des échantillons.

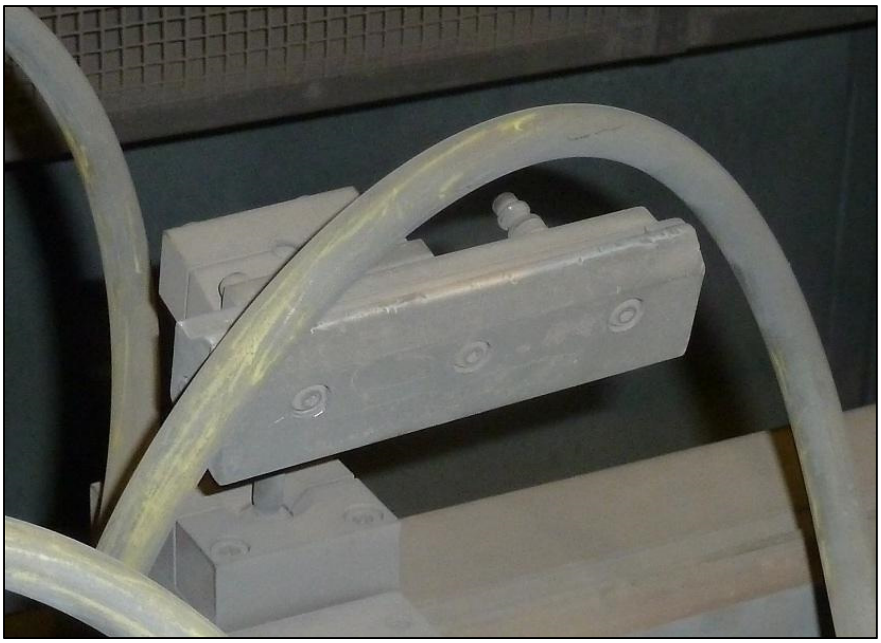


Figure 2.6 Plaque d'aire comprimé pour le refroidissement des échantillons pendant la projection thermique

2.2.2.4 Dispositif : AccuraSpray-G3C par TECNAR®

Il a été important de mesurer la vitesse et la température des particules afin de mieux comprendre leur impact sur le substrat et les propriétés finales du revêtement. Ces paramètres inhérents aux particules ont été reliés aux caractéristiques microstructurales et mécaniques des revêtements. Pour cet effet, un dispositif, le AccuraSpray-G3C de la compagnie TECNAR® (figure 2.7-a), Saint-Bruno, Québec, Canada, a été utilisé pour évaluer les propriétés des particules en vol durant la projection thermique.

Le AccuraSpray-G3C est composé d'un ordinateur couplé d'une caméra CCD (récepteurs à transferts de charge), d'une unité de signal analogique et d'un ensemble de détection optique. Ce dernier est composé de lentilles collectrices, de deux fibres optiques, de deux filtres et de deux photo-détecteurs (voir figure 2.7-b). Le dispositif a été situé au milieu de la flamme afin de collecter les rayonnements infrarouges émis par les particules lorsque la projection est en marche. Grâce à la caméra et aux composantes optiques du dispositif, les signaux ont été collectés et traités par un logiciel permettant d'obtenir les paramètres désirés, telles les

valeurs moyennes de vitesse et de température des particules. Il est important de noter que la détection de la température par le dispositif AccuraSpray a été faite à la surface des particules et non à l'intérieur du cône des particules de poudres.

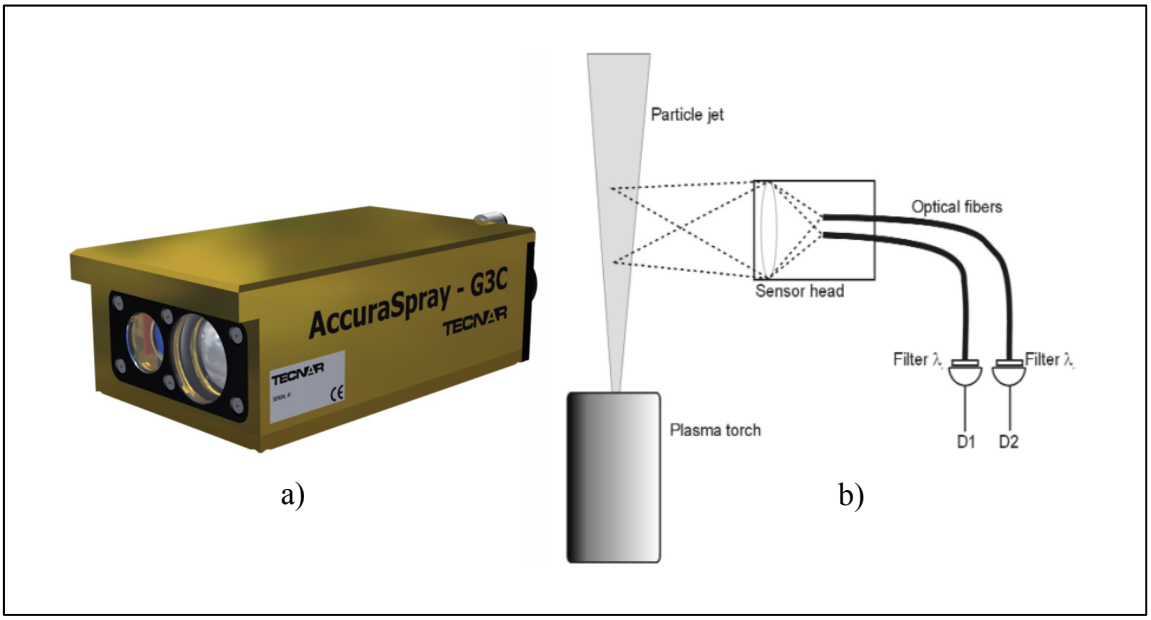


Figure 2.7 a) Dispositif AccuraSpray-G3C TECNAR® pour la prise des valeurs de vitesse et de température des particules. b) Schéma de l'ensemble de détection optique du dispositif AccuraSpray-G3C permettant de mesurer la vitesse et la température des particules dans le jet supersonique.
Tirée de (Moreau et al., 2005)

Dans le cadre de ce projet, les mesures de vitesse et de température ont été prises toutes les secondes pendant les 30 premières secondes de projection pour évaluer les caractéristiques des particules dans le jet. La moyenne de ces valeurs a été calculée et rapportée comme la valeur estimée de vitesse et de température de chaque projection.

2.3 Présentation des poudres alternatives de type WC-10%Co-4%Cr utilisées dans ce projet

Les poudres alternatives utilisées dans ce projet ont été de type WC-10Co-4Cr. Ces poudres sont constituées de carbures de tungstène insérés dans une matrice métallique, communément

dénommés de type « Cermet ». Elles sont conformes pour la projection thermique HVOF puisqu'elles peuvent être projetées à de hautes vitesses et basses températures, ce qui empêche la dégradation thermique des carbures et permet un jet supersonique qui donne de bonnes propriétés aux revêtements.

Pour des raisons de confidentialité, les noms des poudres alternatives ne peuvent pas être donnés. Cependant, on va les nommer comme les poudres « B, C, D et E ». Les critères de sélection des poudres alternatives ont reposé sur leur disponibilité, leur composition chimique ainsi que sur leur prix. Chaque poudre a été accompagnée par un certificat de conformité qui spécifie la méthode de fabrication, les propriétés du matériel, le numéro de lot, la désignation donnée par le fournisseur ainsi que les approbations pour son utilisation.

Les poudres ont été sélectionnées parmi une liste de fournisseurs disponibles sur le marché aéronautique selon LGMS-9011-B (2008). Elles ont été approuvées, conformes aux spécifications en aéronautique, pour la production des revêtements à partir du procédé de projection thermique HVOF selon la spécification (AMS-2448, 2004). La description des poudres est indiquée au tableau 2.1.

Tableau 2.1 Description des poudres de type WC-10Co-4Cr utilisées dans ce travail

Désignation des poudres	**Dimension des particules, µm**	**Méthode de fabrication**
Poudre A ou référence (a)	5 - 45	Aggloméré, Fritté & Densifié
Poudre B (b)	10-38	Aggloméré + Fritté
Poudre C (c)	11-53	Aggloméré + Fritté
Poudre D (d)	5-45	Fritté & Écrasé
Poudre E (e)	11-45	Aggloméré + Fritté

Quant à leur composition chimique, les poudres présentent des similitudes dans leurs pourcentages massiques. Cependant, il y a de légères différences qui pourraient avoir un impact sur leurs propriétés physiques et sur la performance des poudres lors de la projection

avec le système JET KOTE® III. Les valeurs de la composition chimique minimale et maximale à respecter pour les poudres sont présentées au tableau 2.2 :

Tableau 2.2 Composition chimique des poudres,
% massique. Adapté de (AMS-7882A, 2007)

Élément	Minimum %	Maximum %
Cobalt	8.5	11.5
Chrome	3.0	5.0
Tungstène	Balance	
Carbone	3.2	5.5
Fer	---	1.0
Autres (si déterminé)	---	2.5

Dans le cadre de ce travail, un autre critère fondamental dans le choix des poudres a porté sur leur prix. Malheureusement, ce procédé de revêtement est onéreux et il est nécessaire de trouver des solutions pour permettre que cette technologie soit rentable pour la compagnie Tecnickrome Aéronautique Inc. Ainsi, dans le but de rentabiliser la production de ces types de revêtements, les poudres choisies dans cette étude ont des prix inférieurs à celle qui est en production actuellement (poudre A). Pour des raisons de confidentialité, les prix des poudres ne peuvent pas être divulgués. Cependant, nous avons assigné un prix de base de 100 $/lb à la poudre de référence et des pourcentages d'économie correspondants pour les autres poudres. Les valeurs des pourcentages d'économie correspondants aux poudres présentes dans ce travail sont montrées au tableau 2.3 :

Tableau 2.3 Pourcentages d'économie des poudres
étudiées dans ce projet

Poudre	Pourcentages (%) d'économie
Poudre A (réf)	100 $/lb
Poudre B	27 % moins chère
Poudre C	7 % moins chère
Poudre D	12 % moins chère
Poudre E	21 % moins chère

2.3.1 Analyses de caractérisation des poudres

Étant donné que la qualité des revêtements est fonction des matériaux de départ (poudres), une caractérisation initiale des poudres a été faite à l'aide d'une série d'analyses de caractérisation communément employées en projection thermique. Les analyses ont porté sur la distribution granulométrique, la densité apparente, la coulabilité, la morphologie et la composition de phases.

2.3.1.1 Analyse granulométrique

Toutes les poudres (A, B, C, D et E) ont été testées par leur distribution de granulométrie à l'aide d'un analyseur des tailles de particules; modèle : Mastersizer 3000, Malvern, par la méthode de diffraction laser (light Scattering) selon (ASTMB822-10, 2010). La répartition granulométrique a été caractérisée à trois tailles (d_{10}, d_{50} et d_{90}) qui correspondent aux pourcentages de 10 %, 50 % et 90 % en dessous des diamètres des particules.

2.3.1.2 Analyse de densité apparente et coulabilité

Dans ce projet, la densité apparente n'a pas été mesurée parce qu'elle est incluse dans les certificats de conformité émis pour toutes les poudres par les fournisseurs.

La détermination de la coulabilité a été mesurée en accord avec le standard (ASTMB213-13, 2013) et seulement pour les poudres A et E. La procédure consiste à faire passer 50 grammes des poudres tout au long de l'orifice calibré à 2,54 mm de diamètre pendant que le temps d'écoulement a été chronométré. Le rapport entre le débit massique et la densité apparente de poudres a été calculé pour déterminer le débit volumique des poudres.

Rapport-Gratuit.com

2.3.1.3 Analyse morphologique et calcul du pourcentage de porosité interne des particules

La caractérisation morphologique par l'observation de la forme des poudres et le lien fait avec les différentes méthodes de fabrication ont été réalisés à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) modèle Hitachi S4700, Hitachi ltée, Tokyo, Japan et seulement pour les poudres A et E. Pour cet effet, les particules des poudres ont été dispersées dans un fluide mis sur une lame de verre, pulvérisées avec du charbon et placées sur le porte-échantillon de manière à ce que les faisceaux d'électrons impactent la surface et détectent l'image représentative des particules des poudres.

Lorsque la porosité interne des particules devait être étudiée, les poudres (A et E) ont été enrobées (sous vide) dans une résine époxy, suivi d'un polissage mécanique afin de prendre des vues en coupe transversale des poudres. Immédiatement après, les échantillons ont été recouverts de carbone afin de devenir conducteurs de courant pour permettre l'observation au microscope électronique à balayage (MEB). Postérieurement, les images obtenues de la microstructure des poudres ont été traitées avec le logiciel Fiji-ImageJ dans le but de déterminer, au moyen de la technique d'analyse d'images, le pourcentage de porosité interne des poudres selon la norme ASTM E2109-01-méthode B.

Pour le calcul du pourcentage de porosité interne des poudres, deux opérations ont été faites aux images obtenues de la microstructure des poudres. La première, est une opération de segmentation d'images qui consiste à séparer les niveaux gris de l'ensemble des pixels de l'image initiale permettant de créer une image comportant simplement de deux intensités, noir et blanc. Cette opération est appelée aussi « seuillage d'image » et est très utilisée pour extraire des caractéristiques spécifiques d'une image. Un exemple de cette opération est donné à la figure 2.8.

La seconde, est une opération de masquage de l'image segmentée pour obtenir le contour des points noirs qui ont été révélés à l'étape de segmentation et ainsi calculer l'aire occupée par ces points sur l'image.

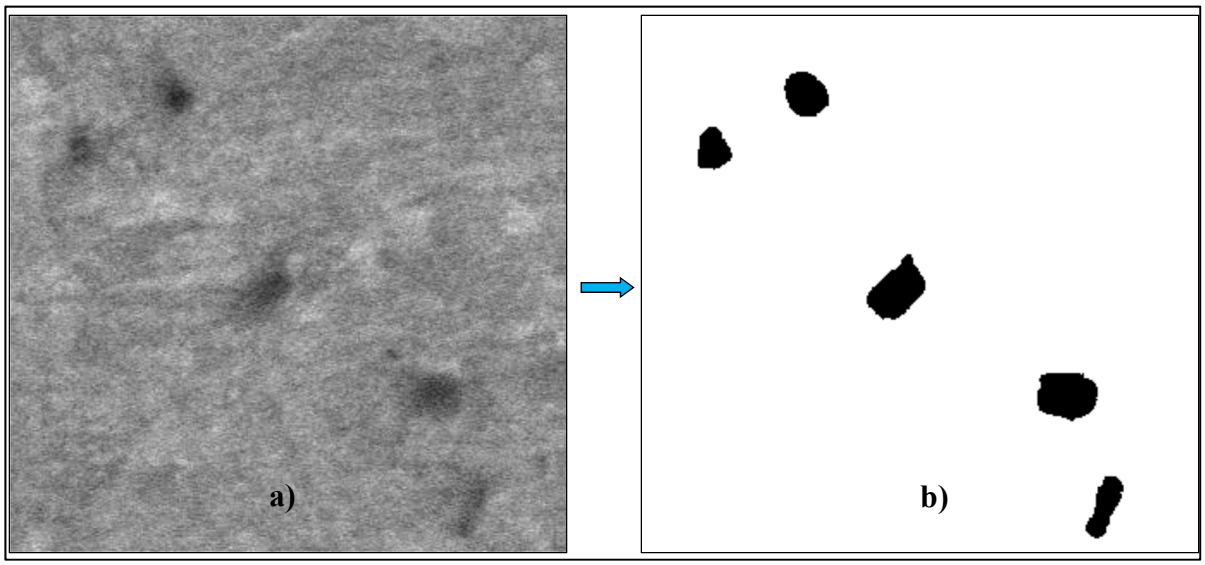


Figure 2.8 Exemple d'une opération de segmentation d'images : à gauche, a) correspond à une image initiale obtenue avec un microscope électronique à balayage (MEB). À droite, b) correspond à l'image segmentée où les niveaux gris de l'image initiale apparaît maintenant en blanc. Tirée de (Vanderesse, 2007)

Par la suite et à l'aide des opérations arithmétiques du logiciel Fiji-ImageJ, les images segmentées et masquées ont été superposées afin de calculer le rapport entre l'aire de l'image segmentée et l'aire calculée des points noirs masqués. Ce rapport est considéré comme le pourcentage de porosité interne présente dans les particules de poudres.

2.3.1.4 Analyse de composition de phases de poudres

L'étude de phases, permettant de distinguer les phases présentes dans les poudres, a été conduite par diffraction des rayons X (DRX) à l'aide d'un diffractomètre modèle : D8 Discover, Bruker AXS GmbH, Karlsruhe, Germany et seulement pour les poudres A et E. Le balayage a été continu et compris pour des angles allant de 20° à 80°. Les rayonnements utilisés proviennent d'une anticathode de cuivre qui génère des rayons K_α de longueur d'onde λ = 1,542 nm. Les signaux des pics de diffraction ont été comparés à ceux des standards du JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards, USA) montrant les phases pouvant être présentes dans les poudres de type WC-10%Co-4%Cr. Le rapport quantitatif

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

entre la hauteur des pics de diffraction a été calculé dans le but de mesurer l'indice de décarburation de la phase principale (WC).

2.4 Première projection - projection des poudres avec les paramètres de référence

Dans un premier temps, les paramètres de référence utilisés en production ont été testés avec la poudre A. Ceux-ci ont été établis par la compagnie Tecnickrome Aéronautique Inc et ont servi de paramètres de référence pour projeter les autres poudres choisies. Les poudres ont été projetées en gardant les mêmes paramètres que pour la poudre de référence dans le but d'identifier quelles poudres pourraient être adaptées au système de projection JET KOTE® III. Pour des raisons de confidentialité, la divulgation des valeurs des paramètres utilisés ne peut pas être donnée. Cependant, les paramètres de projection qui ont été gardés fixes sont nommés au tableau 2.4 :

Tableau 2.4 Paramètres de projection fixes du système HVOF – JET KOTE® III

Paramètre	Unités
Débit d'Hydrogène	SLPM*
Débit d'Oxygène	SLPM*
Débit du gaz porteur (Ar)	SLPM*
Débit de matière première	g/min
Distance de projection	mm
Angle de projection	°
	* *Litres normalisés par minute*

En marge des paramètres de projection, il y a eu d'autres éléments qui ont joué un rôle important durant la projection thermique. Par exemple, l'entretien régulier du fusil et de la buse qui a été fait avant chaque essai pour ôter la contamination et ne pas influencer les résultats des essais. De plus, les échantillons ont dû atteindre une température de 105 °C (220 °F) avant de pouvoir projeter la passe suivante de déposition dans un intervalle de 10 secondes par passe. Noter qu'une passe se définit comme l'addition d'une couche du matériau le long du substrat à recouvrir pour obtenir une couverture complète (épaisseur).

Finalement, le fusil utilisé pour l'obtention des échantillons a été le même qui est utilisé pour la production des pièces sur la ligne de production ce qui a limité la prise de données du projet.

2.4.1 Critères d'acceptation des revêtements de type WC-10Co-4Cr en aéronautique

Les revêtements obtenus à partir des poudres étudiées (A, B, C, D et E) devaient comporter une série de critères d'acceptation sollicités par les principaux manufacturiers des trains d'atterrissage. Le tableau 2.5 présente les critères d'acceptation des revêtements par projection thermique HVOF.

Tableau 2.5 Critères d'acceptation des revêtements par projection thermique HVOF sollicités par les manufacturiers des trains d'atterrissage. Adapté de (TPS-1700, 2014)

Propriétés demandées	Critères d'acceptabilité
Épaisseur	125 ± 25 µm
Adhésion (Test de pliage)	Non-séparation ou enlèvement du dépôt avec le substrat
Microstructure	Le revêtement ne doit pas avoir des fissures ou délaminations. Niveau de porosité exigé < 1 %.
Microdureté	950 $HV_{(0,3)}$ +
Déflection Almen (contrainte compressive)	Hauteur d'arc entre 0,015-0,30 mm (0,003 à 0,012) po
Rugosité	< 3,8 Ra µm (150 µpo)

2.4.1.1 Épaisseur

Les spécifications demandent une épaisseur de 125 ± 25 µm (5 ± 1 millième de pouce) pour les revêtements. Pourtant, cela s'est avéré difficile parce que les poudres n'ont pas été projetées pour le même nombre de passes (30 ± 5 passes) ainsi que le taux de déposition, atteint pour chaque poudre, n'a pas été le même. Les épaisseurs ont été mesurées à l'aide d'un micromètre « Mitutoyo IP 65 ». Le rapport entre l'épaisseur obtenue pour les

revêtements (à la fin de la projection) et le nombre de passes projetés a été calculé pour déterminer le taux de déposition atteint pour chaque poudre.

2.4.1.2 Adhésion -Test de pliage

Le test de pliage permet d'étudier l'adhérence existant entre le matériau de base et le revêtement appliqué d'une façon qualitative. Les tests ont été effectués selon la norme (ASTMB571-97, 2013) qui consiste à placer l'échantillon autour d'un mandrin de 12.7 mm (0.5'') de diamètre, de façon à ce que le mandrin soit en contact avec la partie non revêtue du panneau et de le plier d'un angle de 180° à une vitesse de pliage de 180°/ 15 secs. Lorsque l'échantillon est complètement plié, il suffit de vérifier la partie convexe du panneau courbé pour y déceler quelconque écaillement ou séparation du revêtement du matériau de base (voir figure 2.9). Une séparation du matériau de base serait une cause de rejection. La présence de craquelures est acceptable tant que le revêtement craquelé ne puisse pas être séparé par l'action d'un objet pointu tel un couteau. Des photos montrant la zone d'inspection lors du test de pliage ont été prises avec un stéréomicroscope Nikon modèle « SMZ800N ».

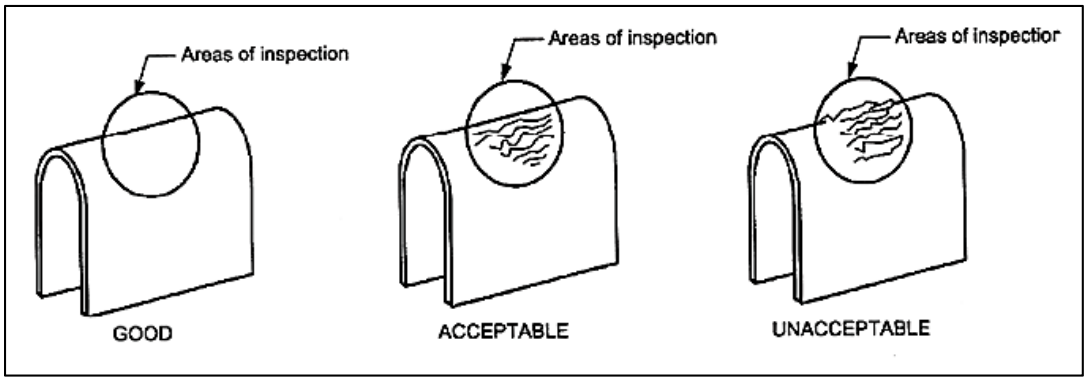


Figure 2.9 Conditions d'acceptation pour le test de pliage.
Tirée de (LGPS-1301-D, 2009)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2.4.1.3 Microstructure

L'étude de la microstructure a été faite avec un microscope optique Nikon modèle « Epiphot -200 » et les images ont été traités à l'aide du Logiciel « Image pro 6.0 ». Des coupes transversales des échantillons ont été nécessaires lorsqu'il s'agissait d'étudier les caractéristiques microstructurales des revêtements ainsi que les interfaces avec le substrat. Les coupes transversales ont été obtenues en sciant les échantillons à l'aide d'une scie métallurgique Buehler modèle « Isomet 4000 ». Par la suite, les échantillons ont été enrobés à l'aide d'une enrobeuse Buehler modèle « SimpliMet 1000 » et en utilisant un mélange de résine époxy et bakélite afin de subir un polissage mécanique avec une polisseuse « Buehler Vector Power Head ». La séquence de polissage comprend des étapes de dégrossissements avec des papiers sablés et des étapes de finition sur des tapis avec des suspensions de diamant monocristallines de 9 µm et 1 µm respectivement.

2.4.1.4 Microdureté

Les mesures de dureté prises par micro-indentation ont été faites avec un microduromètre « Buehler IndentaMet 1100 series MicroIndentation Hardness testers » en conformité avec le standard (ASTME384-11, 2011). Ces tests servent de contrôle rapide de la qualité des matériaux et sont fréquemment effectués dans l'industrie. La préparation des échantillons pour cette opération a suivi les étapes décrites à la section 2.4.1.3 en ce qui concerne la préparation métallographique. La pointe employée pour faire des indentations a été de type Vickers à une charge de 300 gf pendant 12 secondes et guidée par un microscope optique intégré à des augmentations de 100X et 400X. Dix mesures aléatoires ont été prises par dépôt. Les empreintes ont suivi un patron d'analyse des traverses en diagonal « V » inversées (voir figure 2.10) le long de l'échantillon. Elles ont été placées à au moins trois diagonales l'une de l'autre ainsi qu'à trois diagonales des bords du revêtement. De plus, il était important de choisir un endroit sur l'échantillon exempt de défauts mécaniques pouvant influencer les lectures.

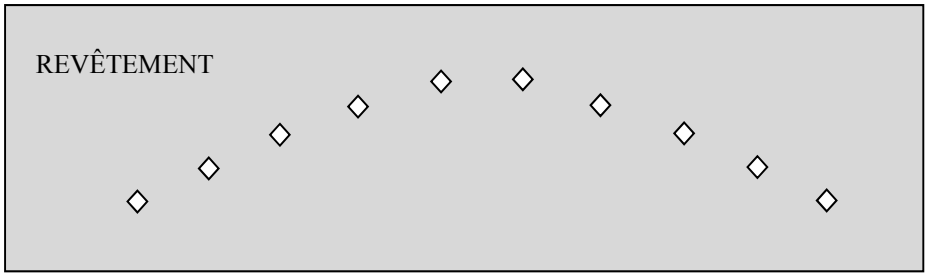


Figure 2.10 Schéma montrant le profil des indentations lors des essais de microdureté

2.4.1.5 Déflection Almen

Dans le cadre de ce projet, la méthode de déflection Almen a été utilisée pour déterminer les contraintes résiduelles des revetements employant un appareil « Almen Gage » (figure 2.11) et selon la spécification (SAE-J442, 2008). La procédure consiste à mesurer la hauteur d'arc des plaquettes Almen N 1-S avant et après la projection thermique. La différence de hauteur mesurée représente la déflection nette qui est considérée comme la résultante des contraintes résiduelles en compression des revêtements.

Figure 2.11 Appareil Almen Gage

2.4.1.6 Rugosité

Les mesures de rugosité de surface de tous les échantillons revêtus ont été réalisées à l'aide d'un rugosimètre modèle « Mitutoyo SJ-400 ». Ces mesures ont été appliquées pour l'inspection du fini de surface des échantillons après la projection thermique. L'appareil de mesure est connecté à un logiciel qui indique l'état de la surface (SURFPAK-SJ), pouvant disposer jusqu'à 35 paramètres statistiques qui sont utilisés dans la définition de surfaces (rugosité) conformément aux normes internationales. Les paramètres utilisés pour signaler les mesures de rugosité ont été Ra (µm) et Rt (µm) respectivement. Ces paramètres sont deux de plus utilisés en procédés de projection thermique pour le contrôle de l'état de surface des revêtements. Dix mesures ont été faites par échantillon et leurs moyennes ont été rapportées comme les valeurs de rugosité des revêtements.

2.5 Deuxième projection –projection en variant la distance de projection

À l'aide des résultats obtenus au moyen de tests de qualification des revêtements, seulement deux poudres (A et E) ont rencontré toutes les propriétés demandées par les spécifications aéronautiques. Elles ont été sélectionnées pour subir d'autre série de tests afin de pouvoir étudier l'influence de la variation d'un seul paramètre à la fois (la distance de projection) sur la qualité des revêtements.

Cinq distances de projection (100 mm, 125 mm, 150 mm, 175 mm et 200 mm) ont été choisies pour faire la projection des deux poudres sélectionnées (A et E). La qualité des revêtements en fonction de la modification de ce paramètre cinétique du système JET-KOTE® III a été documentée. Pour cette deuxième projection, les paramètres de projection ont été les mêmes préalablement décrits au tableau 2.4. Cependant, la seule variable qui a été modifiée est la distance de projection. Pour chaque distance de projection étudiée, la vitesse et la température moyenne des particules ont été enregistrées à l'aide du dispositif AccuraySpray.

2.5.1 Caractérisation des revêtements

Pour caractériser les propriétés des revêtements obtenus en variant la distance de projection pour les poudres sélectionnées, les revêtements ont aussi été évalués en rapport aux critères d'acceptation (voir tableau 2.5), sollicités par les principaux manufacturiers des trains d'atterrissage. Par la suite, d'autres méthodes de caractérisation plus spécifiques ont été employées telles la microscopie électronique et la diffraction de rayons X dans le but de les comparer et identifier leurs différences microstructurales.

2.5.1.1 Caractérisation des revêtements sélectionnées par microscopie électronique

La microscopie optique a été considérée pour un grossissement allant de 200X à 500X. Au-delà de ce grossissement, c'est la microscopie électronique qui a été utilisée. Dans le cas de ce projet, seulement les dépôts résultants de la variation de la distance de projection (100 mm, 125 mm, 150 mm, 175 mm et 200 mm) des deux poudres sélectionnées (A et E) ont subi une analyse de microscopie électronique. Les échantillons pour le MEB ont été préparés de manière identique à ceux préparés pour la microscopie optique. Cependant, les échantillons devant être des conducteurs électriques, une mince couche de graphite a été appliquée afin d'éviter l'accumulation de charges lors du balayage d'électrons. Un microscope électronique à balayage (MEB) modèle Hitachi S4700, Hitachi ltée, Tokyo, Japan, a été utilisé pour bombarder les surfaces des échantillons avec un faisceau d'électrons d'énergie de 20 keV a une distance de travail de 10mm, ce qui a provoqué une émission d'électrons secondaires. Le MEB est équipé de plusieurs détecteurs qui vont capter les électrons secondaires émis par la surface observée. Les images sont d'abord stockées dans une mémoire d'écran et après des images agrandies des microstructures étudiées sont affichées (Perrin, 2007).

2.5.1.2 Caractérisation des revêtements sélectionnées par diffraction de rayons X

La composition de phases présentes dans les revêtements, fabriqués en variant la distance de projection, a été étudiée par une analyse de diffraction des rayons X. Les analyses de

diffraction de rayons X ont été faites avec un balayage continu et en utilisant le même appareil (Diffractomètre) décrit préalablement dans la section 2.3.1.4 Les paramètres de mesure sont résumés dans le tableau 2.6 :

Tableau 2.6 Paramètres de mesure pour la diffraction de rayons X des revêtements sélectionnées.

Mode d'analyse	θ/2θ
Anticathode	Cuivre
Longueur d'onde, Kα (nm)	0,1542
Générateur	40 kV, 30 mA
Angle de départ (°)	20
Angle d'arrivée (°)	80
Pas de mesure (°)	0,03
Temps de mesure entre chaque pas (s)	10

Dans ce travail, les diffractogrammes servent à identifier toutes les phases présentes dans les revêtements après la projection thermique. De plus, ils permettent d'identifier et de quantifier l'indice de décarburation de la phase principale (WC) due à l'oxydation du carbone à de hautes températures de projection.

Rapport-Gratuit.com

CHAPITRE 3

CARACTÉRISATION DES REVÊTEMENTS DE TYPE WC-10Co-4Cr OBTENUS À PARTIR DES POUDRES ÉTUDIÉES

Ce chapitre est consacré à la présentation et discussion de l'ensemble des résultats obtenus lors des premiers essais proposés pour les poudres étudiées. L'objectif est de montrer les résultats de la caractérisation des revêtements de type WC-10Co-4Cr qui ont été obtenus à partir de ces poudres. Ultérieurement, ce chapitre explique pourquoi trois poudres ont été retirées, car elles n'ont pas répondu favorablement aux propriétés demandées par les spécifications en aéronautique.

3.1 Résultats de la caractérisation du procédé HVOF- JET KOTE® III

3.1.1 Vitesse et température des particules

La figure 3.1 montre le comportement de la vitesse des particules en fonction de la date de fabrication des échantillons de qualification du procédé HVOF pour la poudre de référence. La vitesse moyenne globale des particules est de 706 ± 18 m/s et le coefficient de variation est 3%, ce qui représente une dispersion relativement faible des valeurs de vitesse des particules. On observe que pour le système HVOF utilisé dans cette étude, la vitesse des particules, en utilisant autant la poudre que les conditions de projection de référence, peut varier entre 673 m/s (min) et 748 m/s (max).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

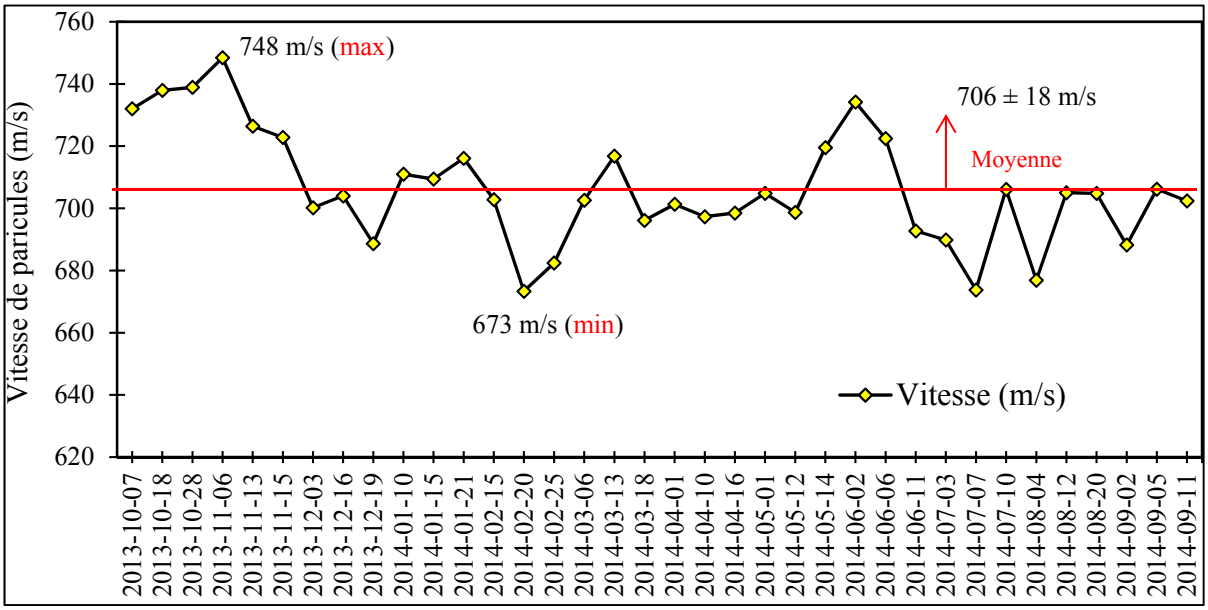


Figure 3.1 Comportement de la vitesse de particules en vol mesurée avec l'AccuraSpray-G3C vs la date de qualification du procédé HVOF, pour la poudre de référence

La figure 3.2 montre l'évolution de la température des particules en fonction de la date de fabrication des échantillons de qualification du procédé. En ce qui concerne la température des particules, la valeur moyenne globale est de 1826 ± 32 °C et le coefficient de variation est 2%, ce qui veut dire que la dispersion relative des valeurs de température des particules est également faible pour le système JET KOTE® III. Pour ce système, la température des particules, en utilisant la poudre actuelle et les conditions de projection de référence, peut prendre des valeurs entre 1773 °C (min) et 1903 °C (max).

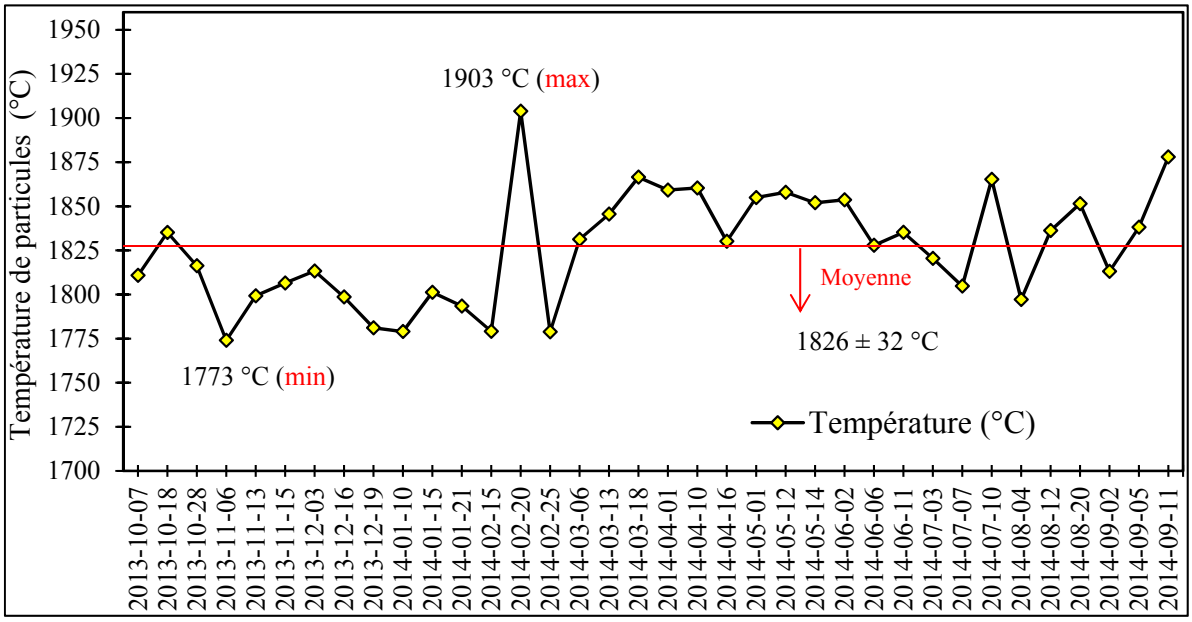


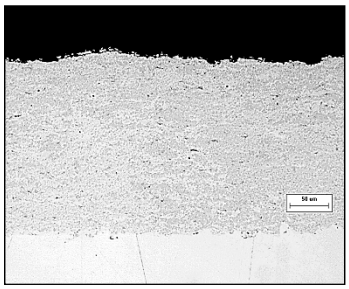
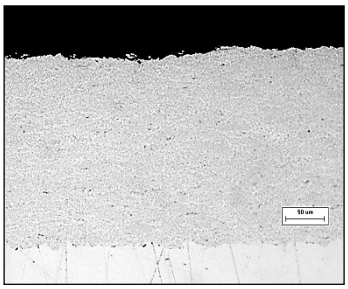
Figure 3.2 Comportement de la température de particules en vol mesurée avec l'AccuraSpray-G3C vs la date de qualification du procédé HVOF, pour la poudre de référence

3.1.2 Influence de la vitesse et la température des particules sur les propretés des revêtements

Le tableau 3.1 présente les propriétés des revêtements obtenus avec les valeurs (min et max) de vitesse et température des particules respectivement, en utilisant la poudre de référence. Ces résultats mettent en évidence la conformité des revêtements de type WC-10Co-4Cr pour les valeurs minimales et maximales de vitesse et de température des particules. Les revêtements produits sous ces conditions de vitesse et de température des particules présentent une bonne adhésion avec le substrat, puisqu'il n'y a pas d'enlèvement du revêtement ou de rupture drastique de l'échantillon. La qualité de la microstructure est conforme aux requis métallographiques des revêtements, car il n'y a pas de défauts à la surface, comme des microfissures ou des inclusions ainsi que la porosité est inférieure à 1%. La dureté obtenue est supérieure aux requis prescrits minimalement à 950 $HV_{(0,3)}$ et les valeurs moyennes pour les deux échantillons sont semblables. Les valeurs nettes de déflection Almen obtenues dans les deux échantillons indiquent que la contrainte résiduelle

finale, générée dans les revêtements, est en compression. Ces valeurs de déflection se trouvent à l'intérieure des requis entre (0,015 - 0,30 mm) et leur écart est faible. L'inspection du fini de surface des échantillons montre une rugosité moyenne (Ra) inférieure à 3,8 µm pour les deux revêtements. Cela indique que sous ces conditions de vitesse et de température, la rugosité est conforme aux requis.

Tableau 3.1 Propriétés des revêtements obtenus à partir des valeurs (min-max) de vitesse et température des particules – Poudre A

Condition	**min V, max T**	**max V, min T**
Adhésion (bend test)	Non-séparation ✔	Non-séparation ✔
Microstructure	 Niveau de porosité < 1% ✔	 Niveau de porosité < 1% ✔
Microdureté	1227,3 ± 39,1 $HV_{(0.3)}$ ✔	1327,4 ± 56,6 $HV_{(0.3)}$ ✔
Déflection Almen (contrainte compressive)	0,2218 ± 0,0140 mm ✔	0,2395 ± 0,0064 mm ✔
Rugosité	3,10 ± 0,10 Ra µm ✔	2,92 ± 0,14 Ra µm ✔

3.2 Résultats de la caractérisation des poudres étudiées

3.2.1 Granulométrie de poudres

La figure 3.3 montre la distribution volumétrique des particules des poudres étudiées (A, B, C, D et E) tel que mesurée par la méthode de diffraction laser (light Scattering). En observant les courbes de distribution volumétrique des particules, on constate la présence de pics prononcés pour toutes les cinq poudres étudiées, ce qui indique que les particules ont des tailles homogènes entre elles. Bien que les poudres doivent respecter une taille de particule respective, déterminée par LGMS-9011-B (2008), il y a de petites différences dans leur diamètres de particules allant de 27 µm à 33 µm.

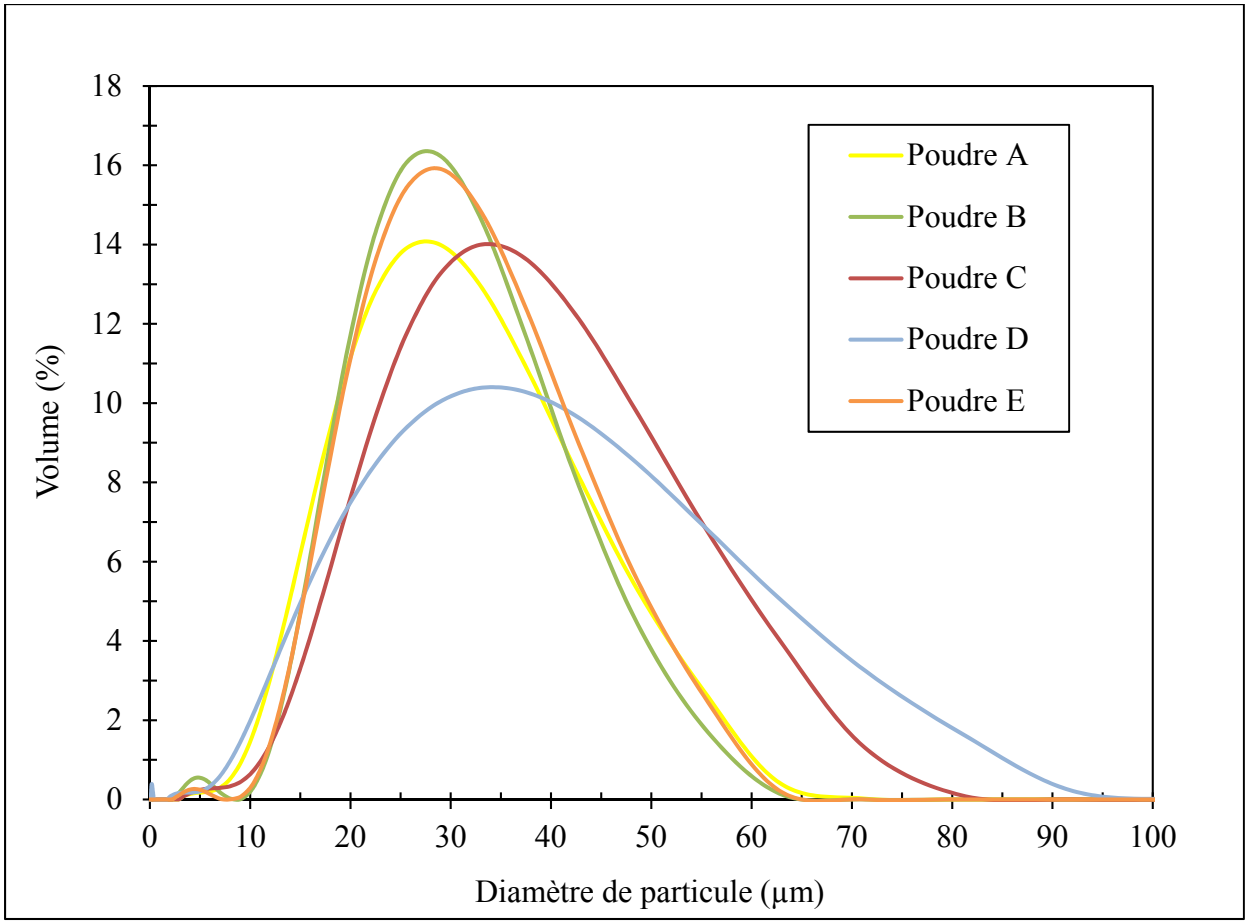


Figure 3.3 Distribution volumétrique des particules des poudres étudiées

Plus précisément, les grosseurs moyennes des particules de poudres sont présentées au tableau 3.2. Les poudres A et E ont des distributions granulométriques semblables, car 90% (d_{90}) en volume de leurs particules sont inférieures à une taille de 43,1 µm. On remarque que la poudre ayant les particules les plus grossières est la poudre D parce que seulement 10% (d_{10}) en volume de ses particules correspondent aux fractions plus petites à 12 µm. Au contraire, la poudre qui a les particules les plus fines est la poudre B parce que 90% (d_{90}) en volume de ses particules ont une taille inférieure à 40,8 µm. Les poudres C et D ont une taille de particules plus grande que les autres, car les particules sont réparties sur une plage plus large de diamètres de particule.

Tableau 3.2 Tableau de distribution de granulométrie de poudres étudiées déterminée par la méthode de diffraction laser (light Scattering)

Valeurs de la distribution de granulométrie des poudres étudiées				
Poudre	Paramètres granulométrie (µm)			Grosseur moyenne des particules (µm)
	d_{10}	d_{50}	d_{90}	
Poudre A (réf)	14,4	26,0	43,1	27,8 ± 0,0858
Poudre B	16,2	26,5	40,8	27,8 ± 0,3123
Poudre C	17,1	31,7	52,0	33,6 ± 0,0366
Poudre D	12,0	29,3	56,6	32,6 ±0,3127
Poudre E	16,6	27,4	43,1	29,0 ± 0,0361

3.2.2 Densité apparente

Dans le cadre de ce projet, les valeurs de la densité apparente (connue aussi comme la masse volumique apparente en (g/cm^3)) ont été incluses par les fournisseurs dans les certificats de conformité émis pour chaque poudre. Le tableau 3.3 reflète les masses volumiques pour les cinq poudres en accord avec les données des fournisseurs. La comparaison des densités de poudres montre une différence prononcée pour la poudre A par rapport aux autres. Cette

différence provient du processus de densification via plasma suivi pour cette poudre au moment de la mise en forme.

Tableau 3.3 Tableau de densité apparente des poudres étudiées

Densité apparente des poudres étudiées					
Poudre	A (réf)	B	C	D	E
Densité apparente	6 g/cm^3	5,4 g/cm^3	3,26 g/cm^3	4,4 g/cm^3	3,72 g/cm^3

La figure 3.4 montre les morphologies prises au MEB montrant les particules des poudres étudiées. Les poudres B, C et E ont un pourcentage de porosité à l'intérieur de leur particules tandis que la poudre A, ses particules sont denses grâce au processus de densification lors de la fabrication. Les particules de la poudre D n'ont pas une morphologie sphérique et cela est en accord avec sa méthode de fabrication (voir figure 1.12).

3.3 Résultats de la projection thermique avec les paramètres de référence

3.3.1 Vitesse et température des particules des cinq poudres étudiées

Les valeurs moyennes de vitesse et température des particules ont été collectées pour les cinq poudres pendant cette première série de projection. La figure 3.5 montre le comportement des particules des poudres par rapport à la vitesse, mesurée au milieu de la flamme et pendant la trajectoire vers le substrat.

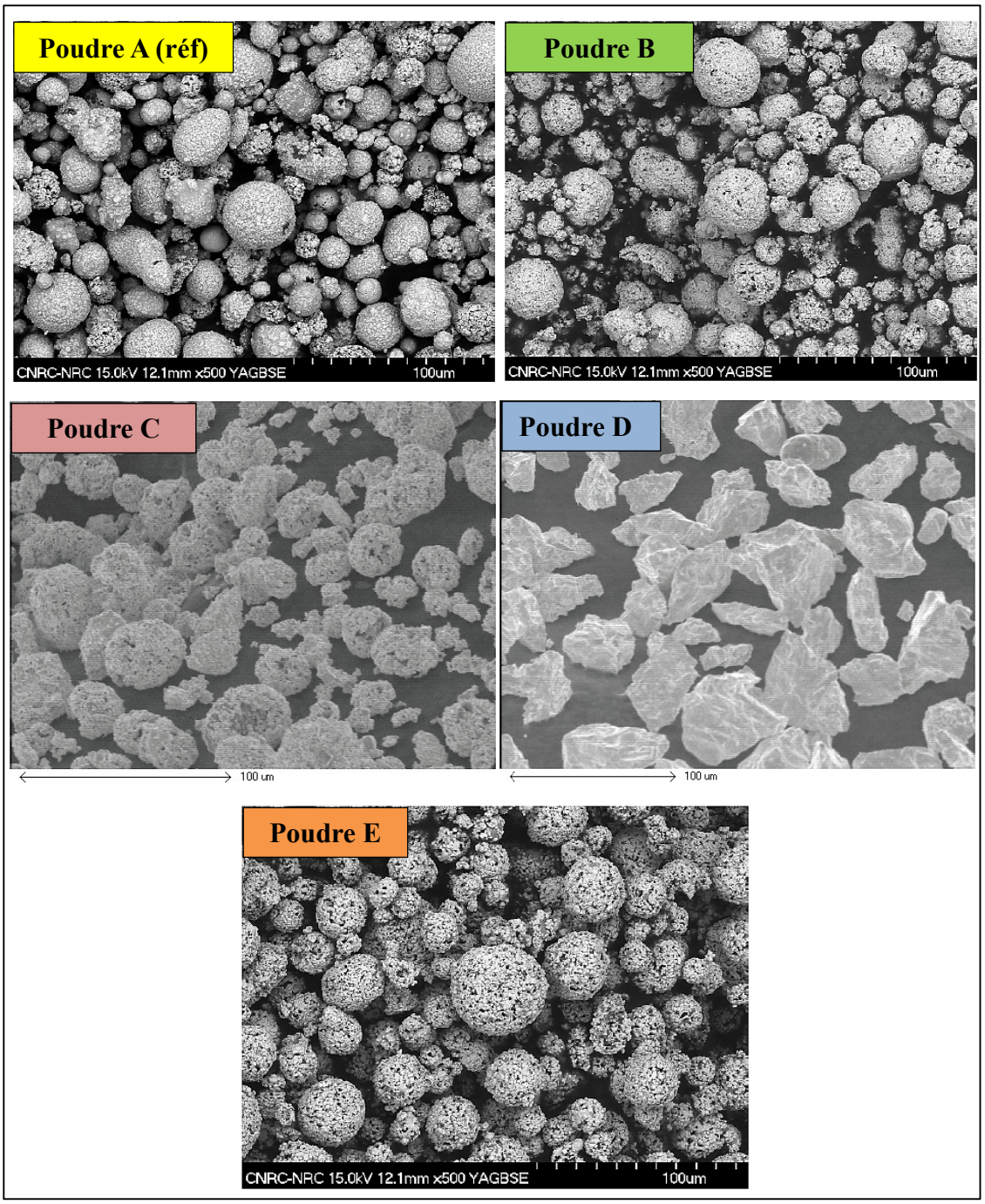


Figure 3.4 Morphologies des poudres étudiées prises au MEB : poudre A (réf), Poudre B, Poudre C et D tirée de (LGMS-9011-B, 2008) et Poudre E.

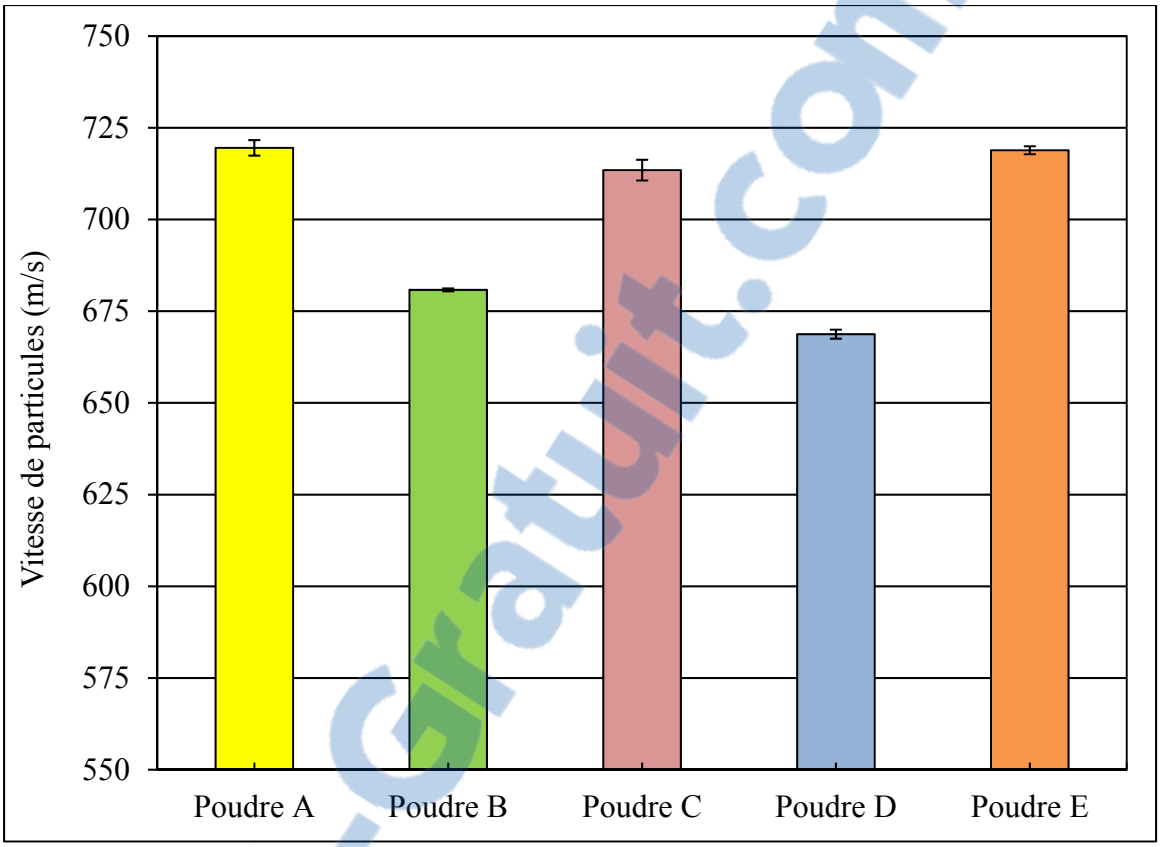


Figure 3.5 Comportement moyen de la vitesse des particules des poudres étudiées n=30

Les valeurs de vitesse des particules des poudres B, C et E ne sont pas très différentes de la poudre de référence (Poudre A). En effet, les valeurs moyennes de vitesse des particules sont : 719 ± 2 m/s, 680 ± 0,4 m/s, 713 ± 3 m/s et 718 ± 1 m/s pour les poudres A, B, C et E respectivement. Ces valeurs restent dans la plage de vitesse typhique du procédé de projection (voir figure 3.1) pour lesquelles les vitesses des particules varient entre 673 et 748 m/s. On peut donc présumer, que les différences dans la taille moyenne des particules des poudres A, B, C et E n'interviennent pas de manière considérable aux valeurs de vitesse des particules atteintes lors de la projection sans aucune modification des paramètres de projection.

Dans le cas de la poudre D dont les particules sont légèrement plus grosses, la vitesse moyenne reportée est de 668 ± 1 m/s. Elle se trouve hors des limites de vitesse typhiques du

Rapport-Gratuit.com

procédé de projection (673 m/s et 748 m/s). Ce comportement est attendu, car lorsqu'on le diamètre d'une particule est plus grande sa vitesse devient moins élevée pour les mêmes conditions de projection. Il serait donc nécessaire d'augmenter le débit du carburant ou de l'oxygène afin de donner plus de momentum aux particules pour éventuellement accroître la vitesse des particules de cette poudre.

Pour les mêmes conditions de projection, le comportement moyen de la température des particules des poudres, pendant cette première projection, est présenté à la figure 3.6. Les résultats moyens de température des particules obtenues pour les poudres A, B, C et E sont 1852 ± 2 °C, 1882 ± 2 °C, 1830 ± 3 °C et 1868 ± 2 °C respectivement. La variation de cette propriété des particules inhérente dans la flamme est faible pour ces poudres, ce qui veut dire que le diamètre de particule n'a pas beaucoup d'influence sur la température des particules pour le système de projection HVOF étudié (JET KOTE ® III).

On observe un comportement particulier pour la poudre D dont sa valeur de température moyenne de particules est de 1764 ± 3 °C. Cela se trouve près de la valeur inférieure des limites de température typiques du procédé (1773 °C). On pourrait donc spéculer que les particules de cette poudre ont une faible inertie thermique ce qui atténue ou retarde les effets de la variation de la température extérieure dans une particule. Cela réduirait le signal capté par le dispositif mesurant la température des particules (le AccuraSpray) pendant la projection thermique.

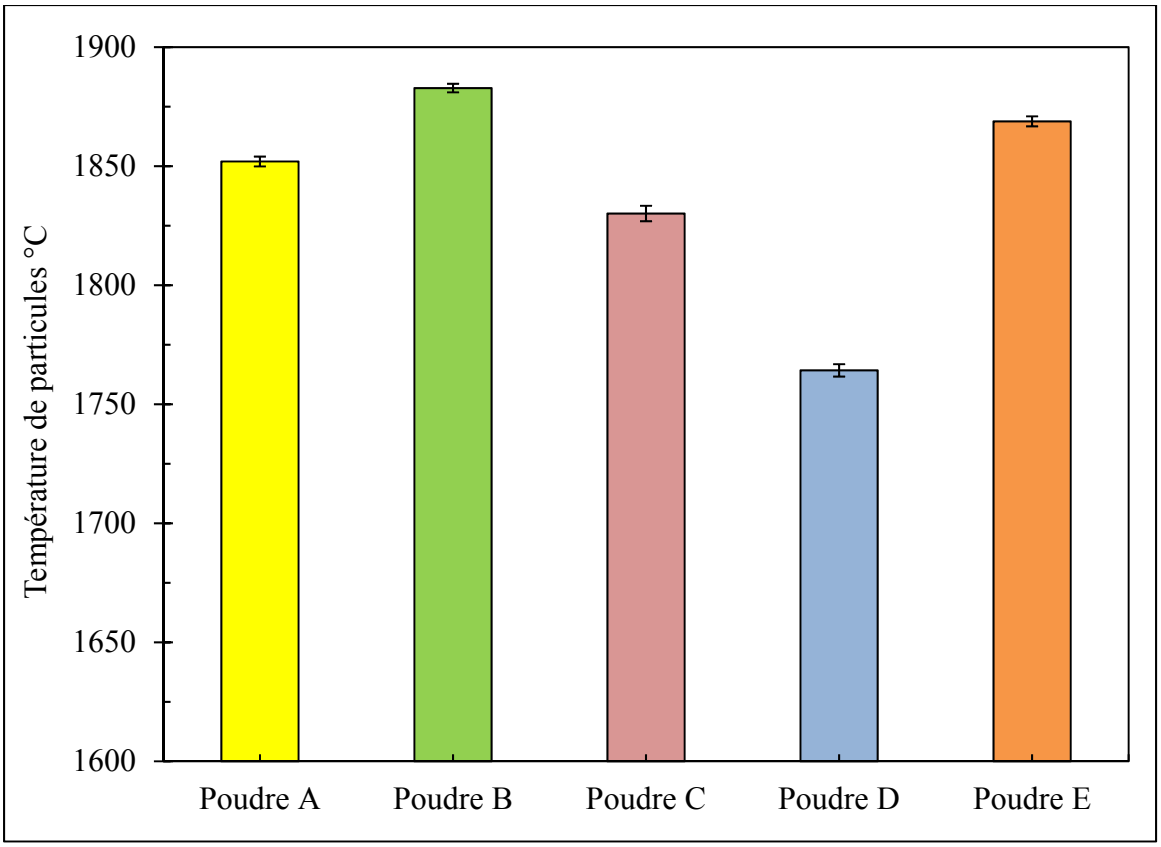


Figure 3.6 Comportement moyenne de la température des particules des poudres étudiées n=30

3.3.2 Résultats des propriétés des revêtements obtenus à partir des poudres étudiées

Toutes les poudres ont été projetées en gardant les mêmes paramètres de projection que pour la poudre de référencé (Poudre A) et les différentes propriétés demandées par les spécifications en aéronautique ont été évaluées pour vérifier la qualité des revêtements obtenus.

3.3.2.1 Épaisseurs obtenues et taux de déposition

Les épaisseurs obtenues pour chaque revêtement, lors de la première série de projection, sont schématisées à la figure 3.7. Le procédé de projection thermique à haute vitesse (HVOF)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

permet d'obtenir des revêtements dont l'épaisseur est homogène le long de la surface recouverte. Cependant, lorsque les cinq poudres ont été projetées avec système JET KOTE® III, on remarque des différences dans les épaisseurs qui sont mesurées sur les revêtements, pour un nombre de cycles semblables (30 ± 5 passes), le même temps de projection et les mêmes paramètres de projection. Les valeurs des épaisseurs sont 125 ± 1 µm, 134 ± 1 µm, 114 ± 2 µm, 106 ± 3 et 123 ± 1 µm pour les revêtements obtenus avec les poudres A, B, C, D et E respectivement.

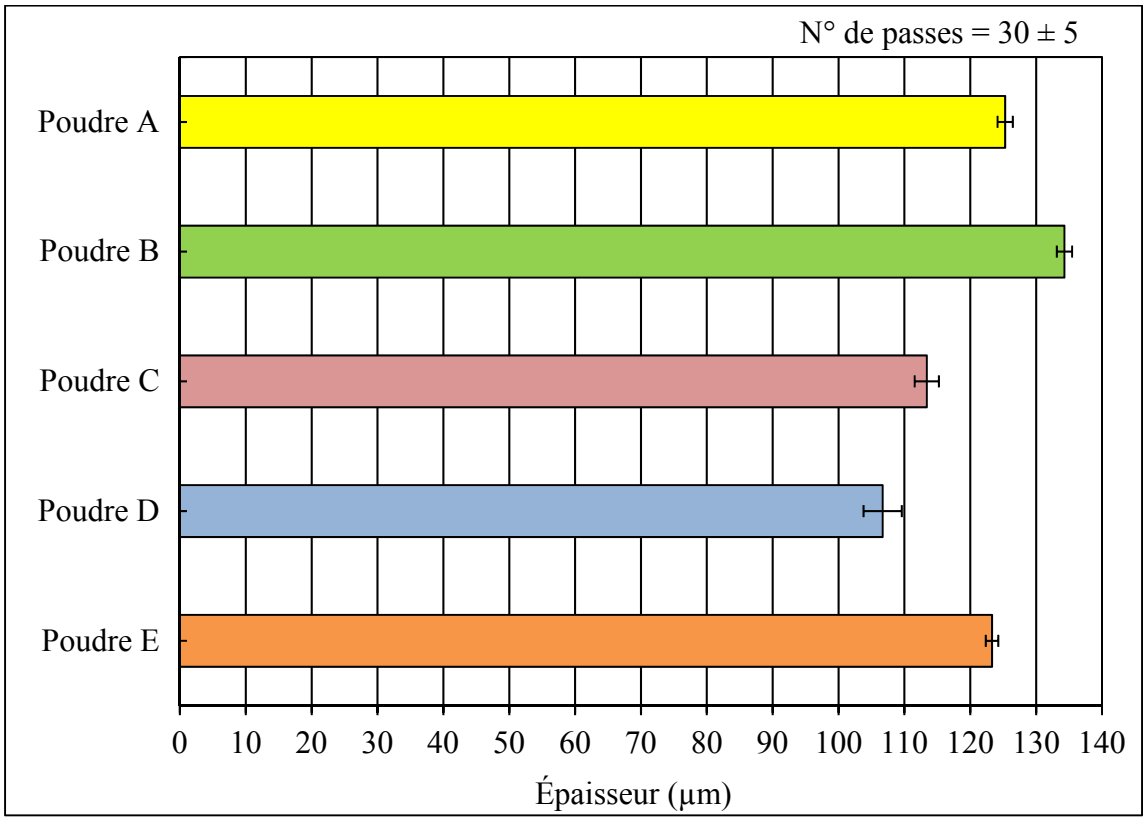


Figure 3.7 Épaisseurs obtenues à partir des poudres étudiées et après 30 ± 5 passes

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Les revêtements produits avec les poudres A et E ont eu des épaisseurs semblables. Par contre, les poudres C et D ont atteint de plus faibles épaisseurs parce que la taille des particules était plus grande et les particules n'étaient que partiellement fondues lors de l'impact, ce qui a généré un effet de rebond réduisant l'adhésion avec le substrat. La poudre ayant la plus grande épaisseur a été la poudre B, car les particules étaient un peu plus fines.

Les différences dans les épaisseurs atteintes pour les revêtements peuvent s'expliquer à partir du concept de l'efficacité de la déposition. Dans ce projet elle n'a pas été calculée, car les poids des échantillons (Almen Strip) n'ont pas été enregistrés avant et après la projection thermique. Cependant, l'efficacité de la déposition est proportionnel au taux de déposition (microns / passe) lorsqu'on utilise les mêmes temps de projection et nature similaire de passes de projection pour produire les revêtements. La figure 3.8 montre le taux de déposition des revêtements déterminé à partir des épaisseurs obtenues :

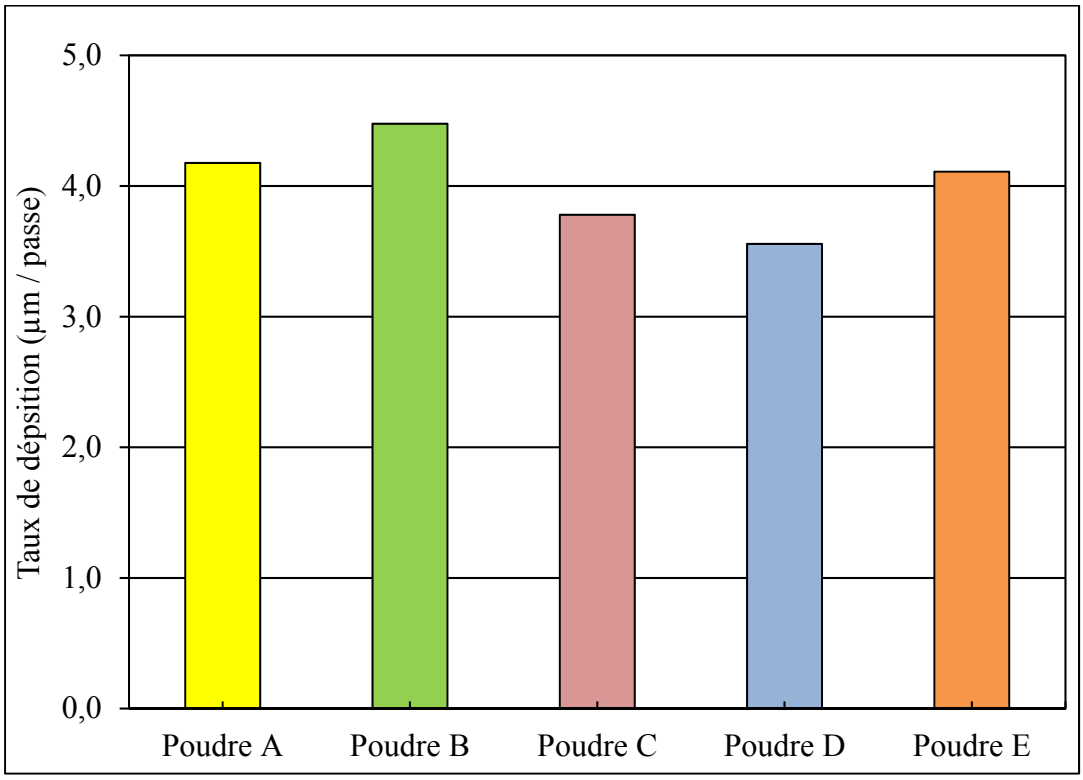


Figure 3.8 Taux de déposition (µm / passe) des revêtements obtenus à partir des poudres étudiées

Pour les mêmes conditions de projection, les taux de déposition des poudres A, B et E ont été au-dessus de 4 µm / passe. Les taux de déposition des poudres C et D ont été inférieures à cette valeur puisque leurs épaisseurs n'ont pas été élevées, ce qui veut dire qu'il y a eu moins de matériel qui s'est adhéré à la surface des échantillons.

3.3.2.2 Microstructures

Les revêtements obtenus ont été observés à l'aide du microscope optique afin d'étudier la qualité et conformité des microstructures. Les figures 3.9 jusqu'à 3.13 présentent les différentes microstructures et cartes de porosité des revêtements produits à partir des poudres étudiées. La qualité des microstructures est conforme aux requis métallographiques demandés par les spécifications, car aucun revêtement ne montre de défauts importants, tels que des fissures ou des délaminations dans les surfaces déposées. De plus, les microstructures sont compactes et denses ainsi que les interfaces entre les revêtements et les substrats sont libres d'inclusions ou de particules non fondues.

Tous les revêtements ont un pourcentage de porosité faible < 1%. Dans les microstructures, les points noirs correspondent à la porosité, le gris foncé en forme de blocs est le carbure de tungstène tandis que les points les plus brillants correspondent à la matrice métallique cobalt chrome (Co-Cr). Particulièrement pour la poudre B, la porosité peut diminuer jusqu'aux valeurs de < 0,13% ce qui donne une qualité supérieure du fini de surface en comparaison avec les autres revêtements. Dans les cas des autres poudres, les pourcentages de porosité ont été similaires.

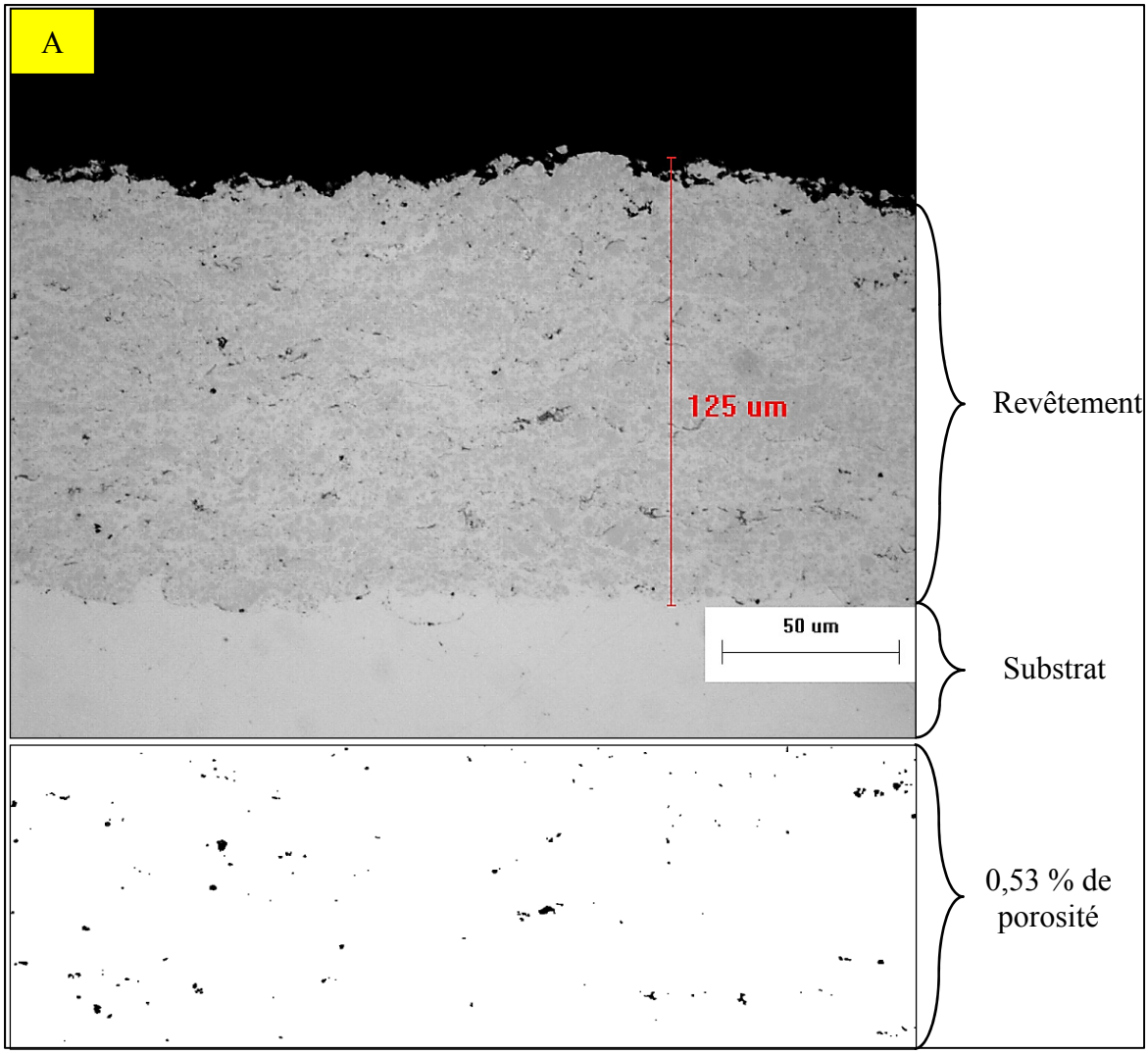


Figure 3.9 Microstructure optique du revêtement produit à partir de la poudre A (réf) montrant l'épaisseur obtenue ainsi que la carte de porosité

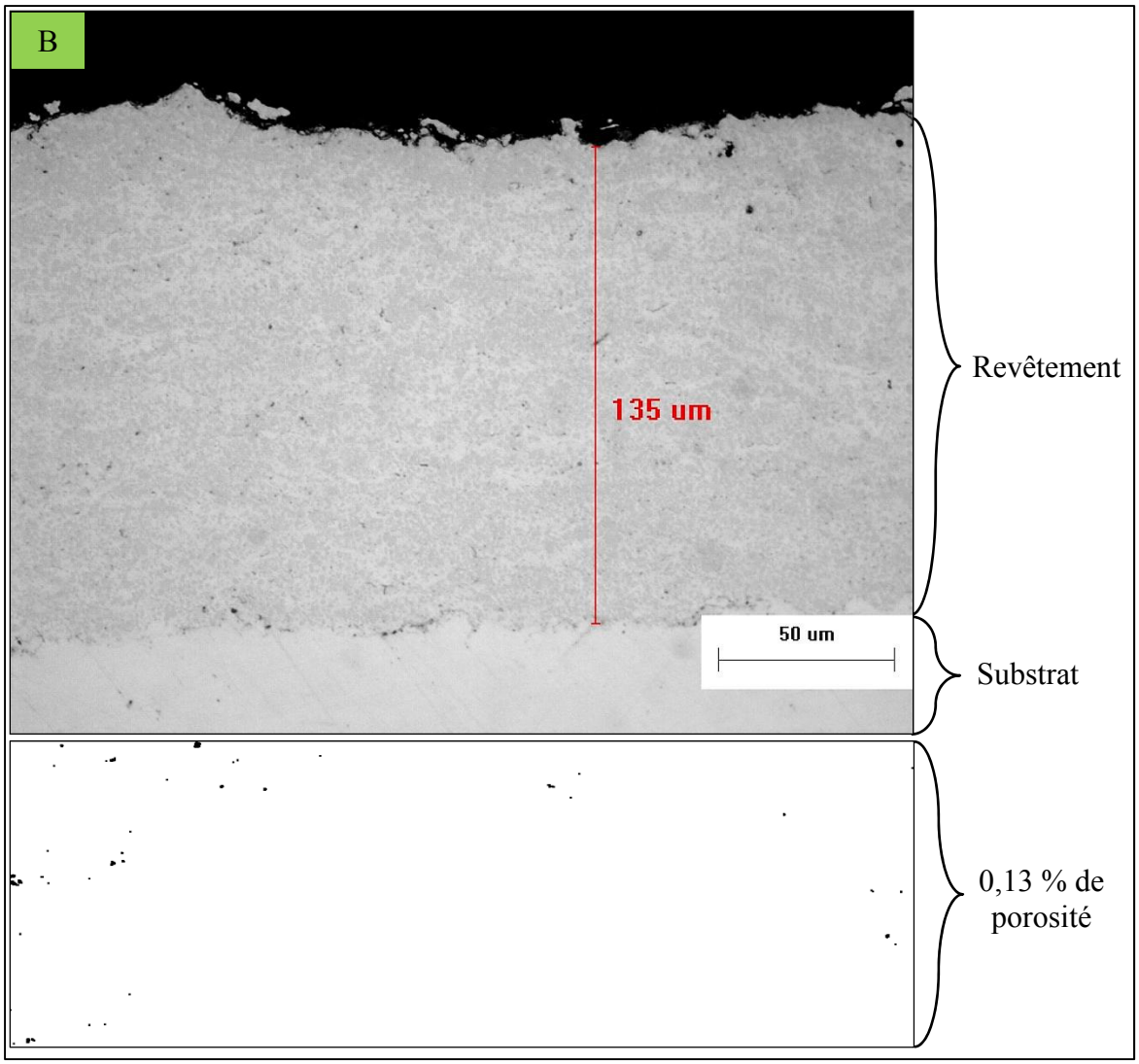


Figure 3.10 Microstructure optique du revêtement produit à partir
de la poudre B montrant l'épaisseur obtenue
ainsi que la carte de porosité

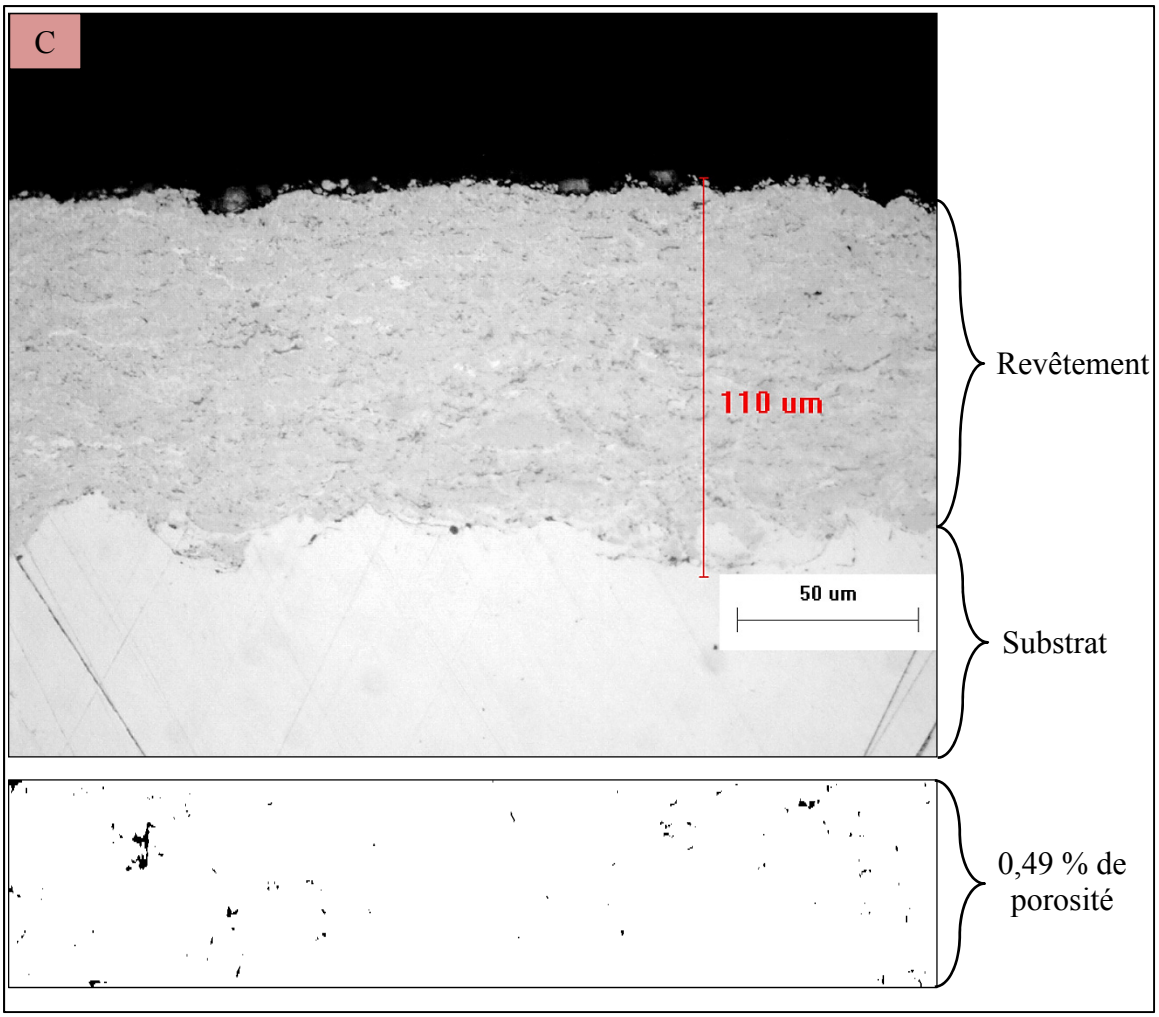


Figure 3.11 Microstructure optique du revêtement produit à partir de la poudre C montrant l'épaisseur obtenue ainsi que la carte de porosité

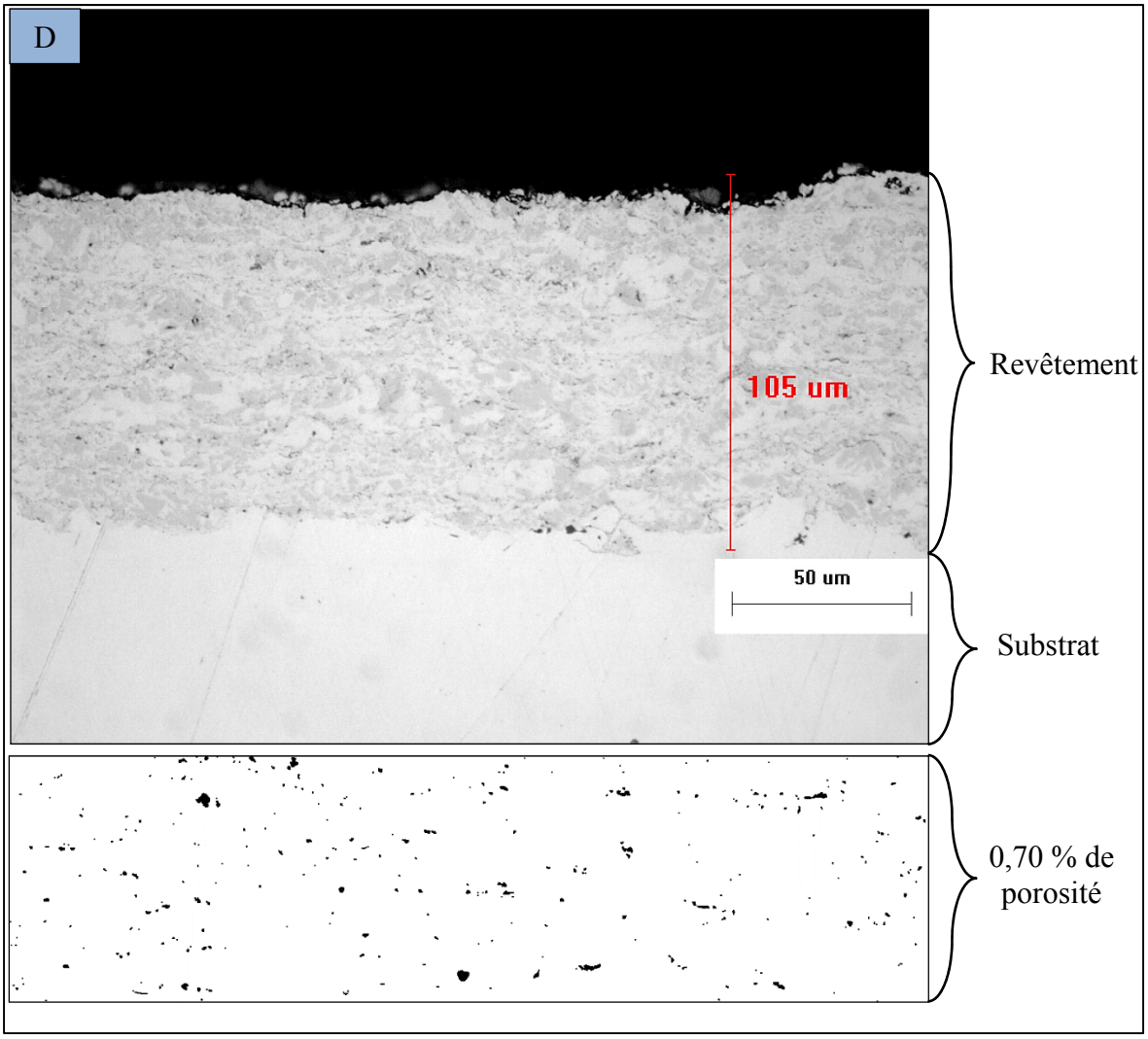


Figure 3.12 Microstructure optique du revêtement produit à partir
de la poudre D montrant l'épaisseur obtenue
ainsi que la carte de porosité

Figure 3.13 Microstructure optique du revêtement produit à partir de la poudre E montrant l'épaisseur obtenue ainsi que la carte de porosité

3.3.2.3 Adhésion

Une des plus importantes propriétés des revêtements par projection est l'adhésion. Une bonne adhésion garantit une bonne protection devant les différentes sollicitations mécaniques auxquelles les substrats sont exposés. La figure 3.14 présente les photos des surfaces des revêtements obtenus avec les poudres étudiées. Les résultats du test de pliage montrent une bonne adhésion des revêtements produits avec les poudres A, B, C et E puisque la surface de

Rapport-Gratuit.com

rupture des échantillons ne présente ni séparation du revêtement (par rapport au matériel de base), ni d'écaillage sur les revêtements. Par contre, les résultats du test de pliage pour la poudre D signalent que l'adhésion n'est pas conforme aux requis des spécifications, car autant le dépôt que le substrat ont brisés lors du pliage autour du mandrin (figure 3.14-d). Cela pourrait être attribué aux plus grandes taille de particules de la poudre entrainant une fragilisation et une faible ductilité pour cet échantillon.

Généralement, les revêtements de WC-10Co-4Cr montrent une très bonne adhésion avec le substrat même s'il est possible d'observer des fissures sur la surface de rupture lors du test de pliage. Ces fissures ne sont pas un signe de mauvaise adhésion, car les revêtements ne se détachent pas lorsque soulevés avec un couteau. On ne remarque pas de nombreuses différences par rapport au nombre de fissures à la surface des revêtements produits avec les poudres étudiées.

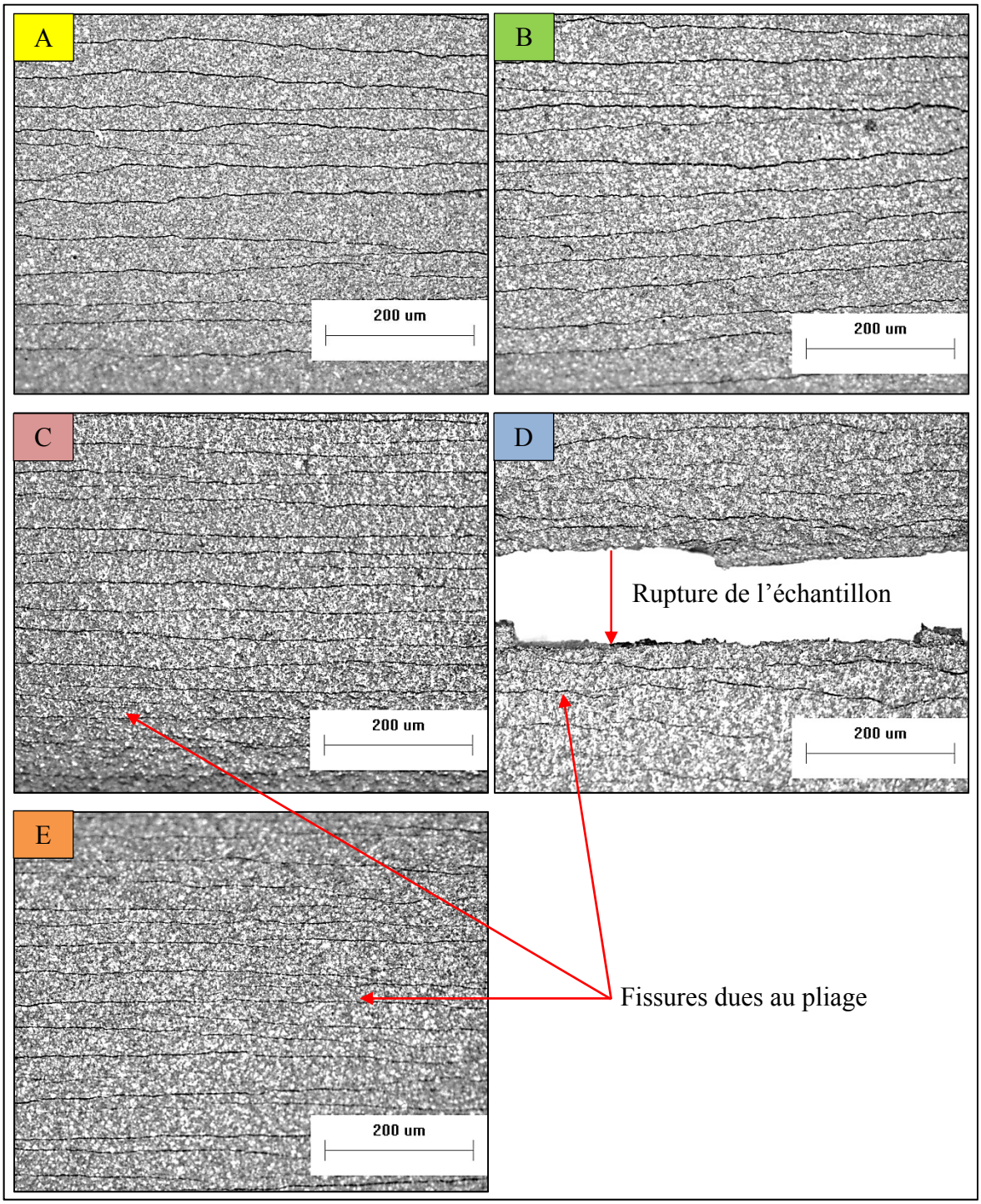


Figure 3.14 Micrographies prises au stéréomicroscope des surfaces au point de rupture après le test d'adhésion, correspondant aux revêtements produits à partir des poudres étudiées.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

3.3.2.4 Dureté

Les résultats de dureté, obtenus à partir de la micro-indentation pour les différents revêtements, sont présentés à la figure 3.15. On observe des valeurs moyennes de dureté semblables pour les revêtements des poudres A, B, C et E toutes au-dessus de 1200 $HV_{0,3}$. En contrepartie, pour la poudre D la valeur de dureté du revêtement est très proche du 950 $HV_{(0,3)}$ minimalement requis pour les revêtements de WC-10Co-4Cr. La présence de défauts de surface sur ce revêtement tels les oxydes, la porosité et d'autres défauts de surface, pourraient expliquer cette faible valeur de dureté.

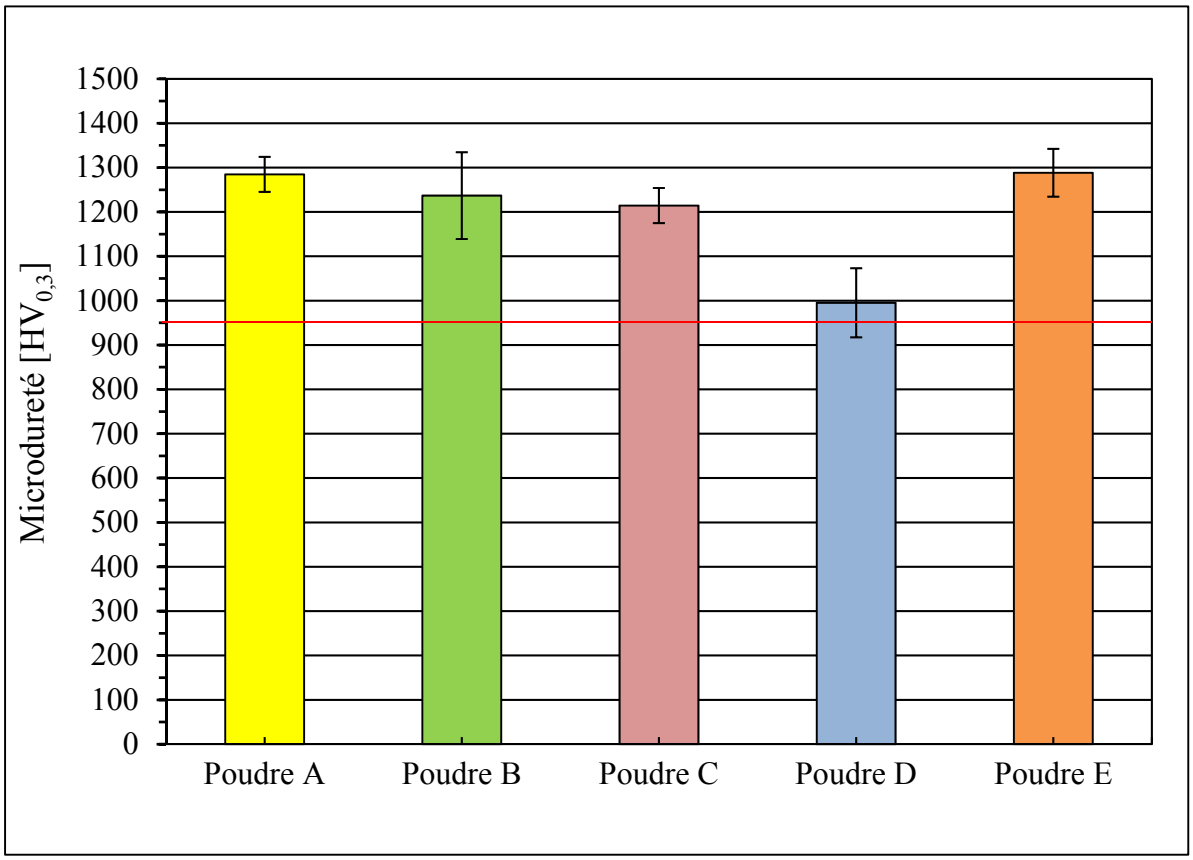


Figure 3.15 Microdureté moyenne (300 gf) des revêtements produits à partir des poudres étudiées n=10

Dans le cas de revêtements par projection thermique, on peut affirmer que la grande variabilité (voir écarts à la figure 3.15) dans les valeurs de dureté est liée à l'hétérogénéité de la microstructure. Ce sont les défauts de surface qui expliqueraient la fluctuation des valeurs de dureté. En autre, la dureté est très sensible au niveau de porosité dans les revêtements. (Karthikeyan, Balasubramanian et Rajendran, 2014)

3.3.2.5 Contraintes résiduelles obtenues par la méthode de déflection Almen

La figure 3.16 montre le graphique de déflection Almen par rapport au type de poudre étudiée. Les déflection nettes (différences de hauteur) des plaquettes d'Almen N montrent des contraintes résiduelles de compression au sein des échantillons. En comparaison avec les limites d'acceptation de 0,15 à 0,30 mm requis selon AMS 2448, on observe que les valeurs de déflection Almen obtenues avec la poudre B sont plus basses que la limite inférieure demandée, ce qui indique qu'il n'y a pas eu assez de contraintes internes (de compression) dans le revêtement. Cela est dû probablement aux plus fines particules présentes dans la distribution granulométrique de cette poudre ce qui réduit la déformation plastique du substrat (effet de grenaillage) lors de la projection thermique.

Pour les autres revêtements obtenus avec les autres poudres, les différences de hauteur dans les plaquettes rentrent dans les intervalles requis par les spécifications. Dans les cas des revêtements des poudres A, C et E, les valeurs nettes de déflection ont été similaires. Pour les revêtements à partir de la poudre D, on observe que les valeurs ont été plus élevées et se trouvent proches de la limite supérieure. Ceci pourrait venir du fait que même si les particules de cette poudre n'ont pas atteint de grandes valeurs de vitesse pendant la projection (voir figure 3.5), les particules les plus grossières de cette poudre ont impacté le substrat et ont induit plus de déformation plastique au matériel, ce qui résulte dans une contrainte résiduelle plus élevée.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

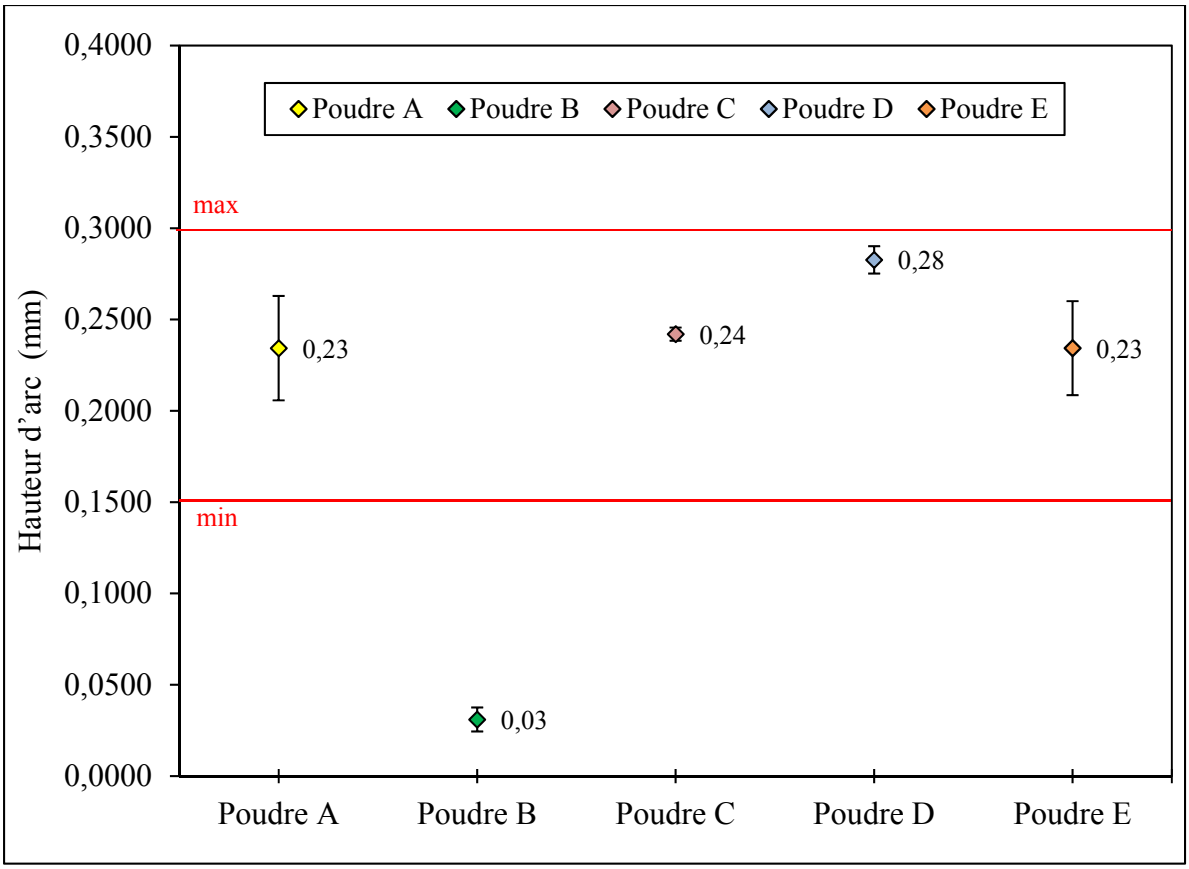


Figure 3.16 Valeurs de contraintes résiduelles en compression obtenues par la méthode de Déflection Almen des revêtements produits à partir des poudres étudiées n=5

3.3.2.6 Rugosité

La rugosité de surface des revêtements déposés à partir des poudres étudiées est montrée à la figure 3.17. Les revêtements obtenus avec la poudre A donnent un fini de surface supérieur parmi les autres dépôts. On observe des valeurs de rugosité semblables pour les revêtements des poudres B et D respectivement. Les valeurs de rugosité pour les revêtements des poudres C et E sont les plus basses. Ces bas finis de surface sont absolument importants pour des applications en aéronautique pour éviter trop d'étapes de finition après le procédé de projection thermique. Dans ce sens, la finition des pièces pourrait se faire beaucoup plus rapidement, ce qui réduirait les coûts d'usinage des pièces.

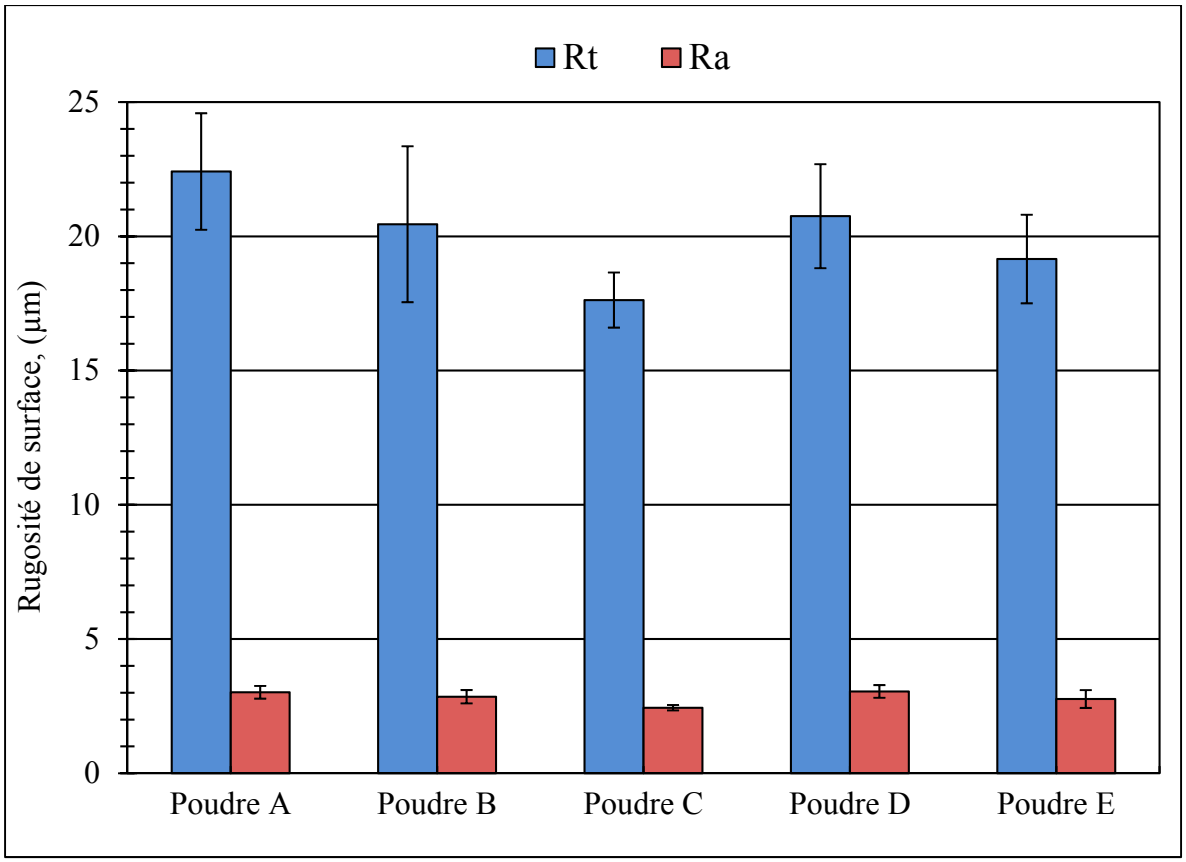


Figure 3.17 Rugosité de surface des revêtements produits
à partir des poudres étudiées n=10

3.4 Discussion

Le but de ces premiers essais était de vérifier si les revêtements générés à partir des poudres étudiées pouvaient être adaptés au système de projection thermique HVOF (JET KOTE® III) sans aucune modification dans les paramètres de projection. Pour ce faire, les revêtements ont été évalués en fonction des critères d'acceptation des manufacturiers en aéronautique précédemment décrits au chapitre deux. Seulement deux des cinq poudres ont été retenues: la poudre A (référence) et la poudre E. Pour bien saisir ces choix, les éléments qui ont conduit à l'élimination des autres trois poudres sont discutés ci-dessous.

Examinons la première poudre rejetée, la « poudre D ». Les revêtements de cette poudre ne répondent pas correctement aux critères d'adhésion, car une rupture de l'échantillon s'est présentée lors des essais de pliage. De plus, deux résultats sur dix sont plus bas que 950 $HV_{(0,3)}$, valeur de dureté minimalement demandé par les spécifications. Par ces deux critères, on peut donc déterminer la non-conformité de ces revêtements étant donné qu'ils ne démontrent pas un comportement favorable devant deux des propriétés recherchées.

Le deuxième cas correspond aux revêtements obtenus à partir de la « poudre B ». Ils ont répondu favorablement à tous les tests sauf aux requis des contraintes résiduelles mesurées par la méthode de déflection Almen. La granulométrie de cette poudre dénote la présence de particules un peu plus fines dans sa distribution. Ces particules n'ont pas été capables d'induire des contraintes résiduelles au substrat lors de l'impact sur la surface à recouvrir. Une option pour rendre cette poudre utilisable avec notre système de vaporisation serait de tamiser les particules fines et de ne projeter que les particules les plus grosses, ce qui génèrerait une plus grande déformation plastique du matériel de base et ainsi augmenter les contraintes résiduelles, mais cela entrainerait des couts supplémentaires.

La « poudre C » répond positivement aux critères de qualification des revêtements selon les spécifications. Cependant, si on prend en considération le coût des poudres (tableau 2.3), on notera un accroissement de 14% dans le prix de cette poudre par rapport à la poudre E. De plus, si on compare le taux de déposition atteint pour la poudre C par rapport aux poudres A et E (pour 30 passes), on notera une diminution de l'ordre de 10% du taux de déposition pour la poudre C pour le même débit de poudre et temps d'exposition, indiquant qu'il y eu moins de matériel qui est reste collé sur le substrat (moins épaisseur). Ceci n'est pas favorable pour la rentabilité du procédé. Pour cette raison on exclura la poudre C comme alternative possible afin d'obtenir une poudre alternative à la poudre de référence.

La poudre E est celle qui a donné les résultats les plus semblables à la poudre de référence (Poudre A), ce qui pourrait la rendre comme candidate potentielle. Par exemple, les résultats de vitesse et température des particules ainsi que les épaisseurs obtenues sur les revêtements

ont été équivalents. Les propriétés mécaniques (adhésion, dureté, déflection Almen) sont aussi grandement similaires rendant les recouvrements très consistants. De surcroît, les caractéristiques microstructurales des revêtements pour la poudre E semblent être plus lisses, ce qui augmenterait la possibilité de réduire les coûts d'usinage des pièces de production lors des étapes de rectification.

Il serait maintenant intéressant de comparer plus en détail les caractéristiques microstructurales des deux poudres sélectionnées (A et E) ainsi que d'observer comment se comporteront ces deux poudres en fonction de la distance de projection. Cet aspect sera discuté au chapitre suivant.

CHAPITRE 4

CARACTÉRISATION DES REVÊTEMENTS À PARTIR DES POUDRES SELECTIONNÉES ET VARIATION DE LA DISTANCE DE PROJECTION

Ce chapitre propose une caractérisation plus approfondie des deux poudres qui ont été sélectionnées à l'étape précédente (poudres A et E). La caractérisation consiste en des analyses des poudres : morphologie, microstructure, coulabilité et composition de phases. Postérieurement, une étude comparative entre les revêtements obtenus avec ces deux poudres en fonction de la distance de projection est présentée. Des analyses de caractérisation très particulières, telles la microscopie électronique et la diffraction des rayons X, ont été réalisées pour évaluer et comparer la qualité des revêtements provenant de ces deux poudres.

4.1 Caractérisation des poudres sélectionnées

4.1.1 Morphologie des poudres sélectionnées

Les figures 4.1 et 4.2 montrent les morphologies de deux poudres sélectionnées. Les morphologies révèlent des particules de type sphérique et des tailles des particules similaires, entre 5µm et 45µm de diamètre, pour les deux poudres sélectionnées. La figure 4.1 montre une morphologie de poudre qui a été fabriquée par séchage par atomisation et frittage suivi d'une densification au plasma (poudre A). La caractéristique principale de cette morphologie est l'aspect lisse et compact des particules n'ayant qu'un faible pourcentage de porosité à l'intérieur des particules.

La figure 4.2 montre une morphologie de poudre qui a été fabriquée par séchage par atomisation et frittage sans le processus de densification au plasma (poudre E). On observe une surface plus rugueuse ainsi qu'une certaine porosité peut être vue à l'intérieur de ces particules.

Rapport-Gratuit.com

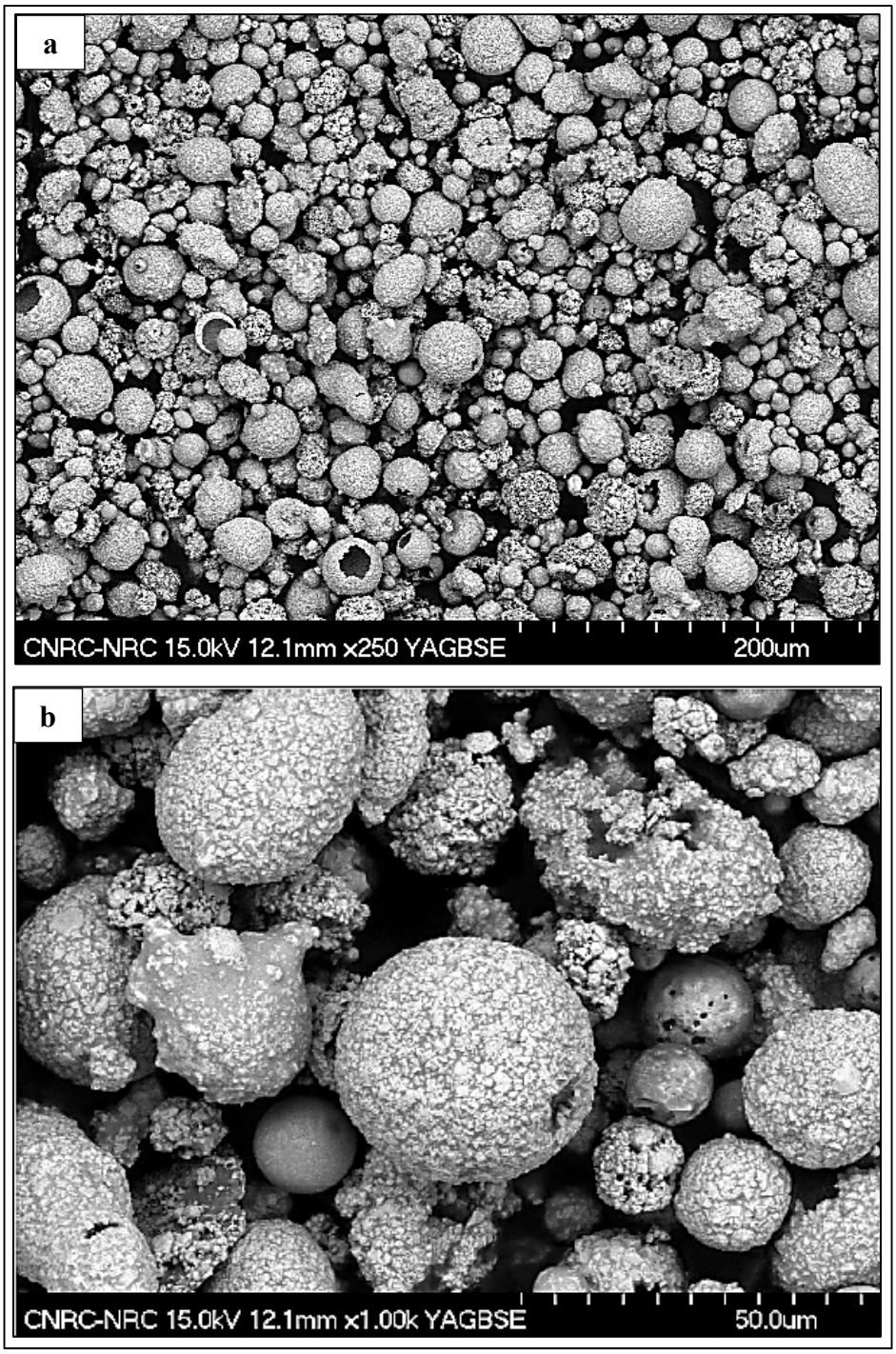


Figure 4.1 (a) Micrographie prise au MEB montrant la morphologie de la poudre A. (b) vue agrandie d'une particule typique de poudre A détaillant la rugosité de surface.

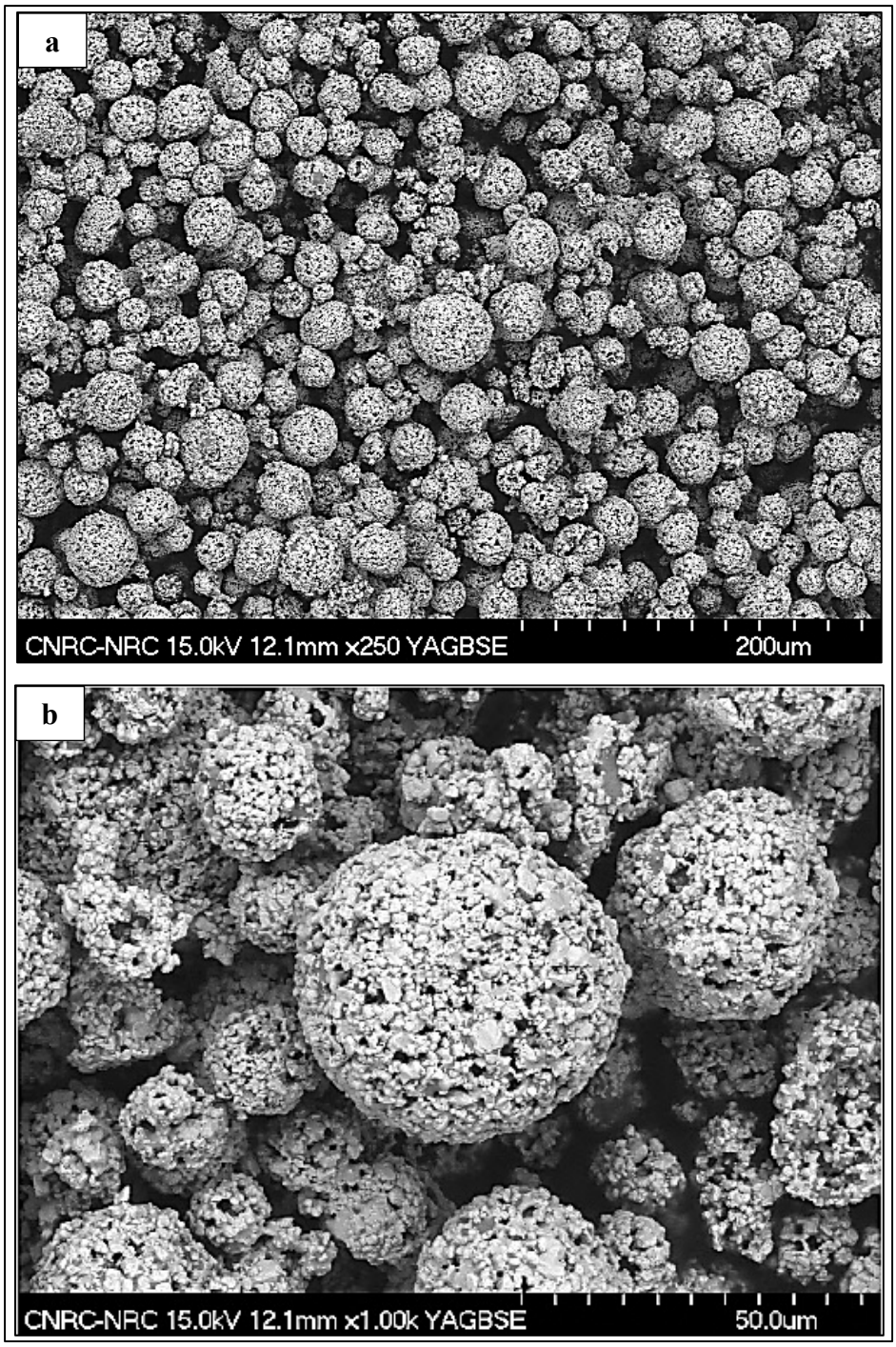


Figure 4.2 (a) Micrographie prise au MEB montrant la morphologie de la poudre E. (b) vue agrandie d'une particule typique de poudre E détaillant la rugosité de surface.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

4.1.2 Microstructure

Pour la caractérisation microstructurale, des photos prises au MEB ont été obtenues à partir des vues en coupe transversale de montages métallographiques faits à partir des poudres. La figure 4.3 montre la microstructure des particules de la poudre A. Dans cette microstructure, on peut remarquer la présence des quelques cavités noires à l'intérieure de certaines particules, ce qui veut dire que toutes les particules n'ont pas été totalement denses au moment de la mise en forme et après le processus de densification au plasma. Il y aurait un faible pourcentage de particules ayant une structure poreuse.

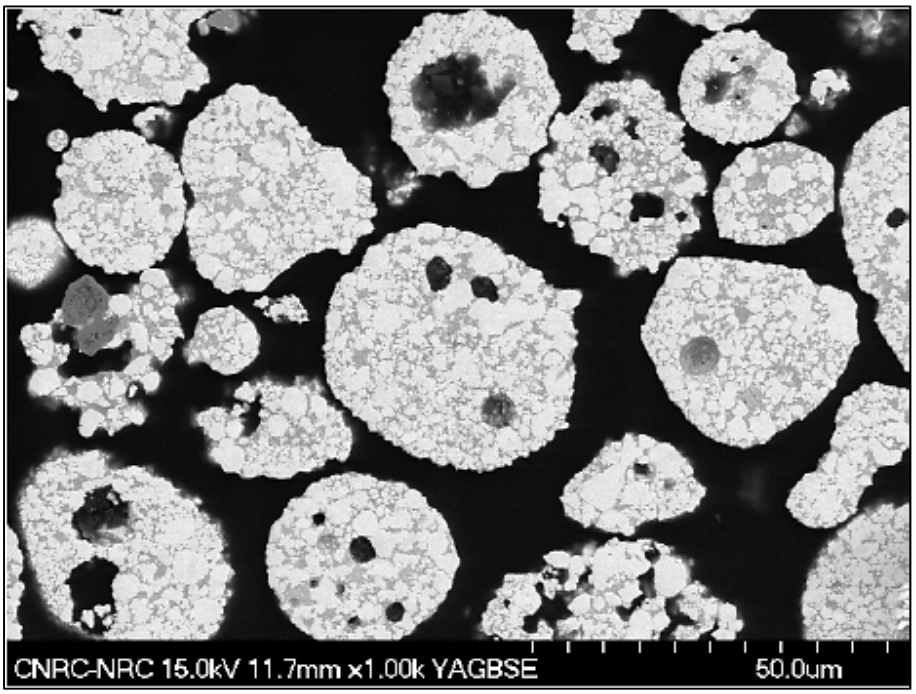


Figure 4.3 Micrographie prise au MEB montrant la microstructure des particules de la poudre A

La figure 4.4 présente la microstructure de la poudre E. Les particules de cette poudre ont un niveau de porosité supérieure. Cela pourrait diminuer le poids relatif des particules et faciliter la distribution de la chaleur, ce qui favoriserait une meilleure fusion des particules pendant la projection thermique.

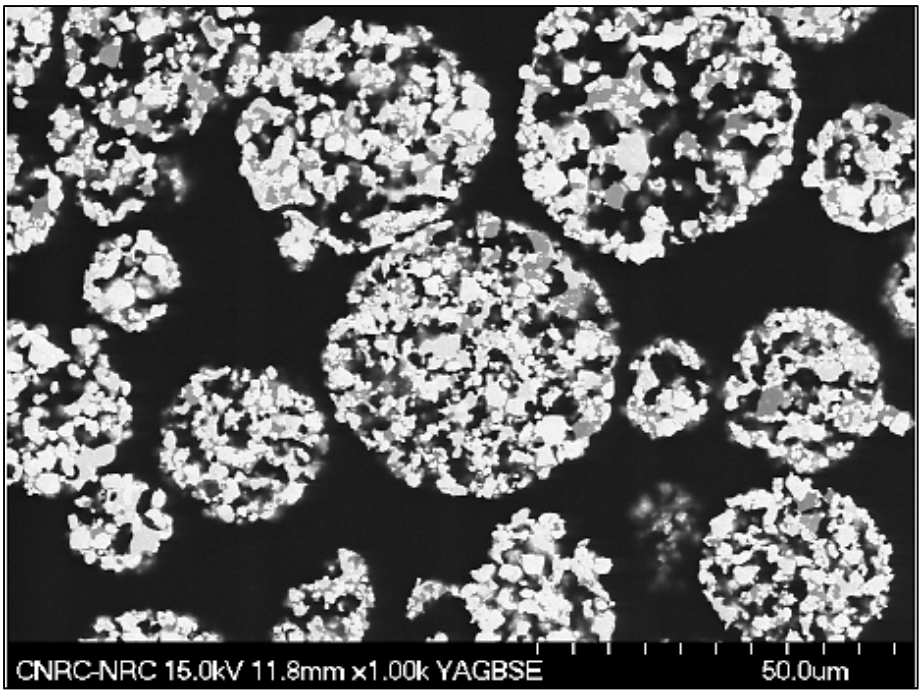


Figure 4.4 Micrographie prise au MEB montrant la microstructure des particules de la poudre E

4.1.2.1 Calcul du pourcentage de porosité interne des particules par la méthode d'analyse d'images

Le pourcentage de porosité interne présente dans les particules de deux poudres sélectionnées a été obtenu par l'analyse d'images permettant d'avoir une idée de la densité des particules. Dans ce sens, plusieurs opérations ont été faites sur les images de la microstructure. La figure 4.5 montre l'opération de segmentation des images initiales de microstructure des poudres A et E respectivement. On observe commet la matière grise à l'intérieur des particules des images initiales de poudres apparaît maintenant en blanc sur les images segmentées. De cette façon, on calcule l'aire occupée par les pores (cavités noires) dans chacune des images.

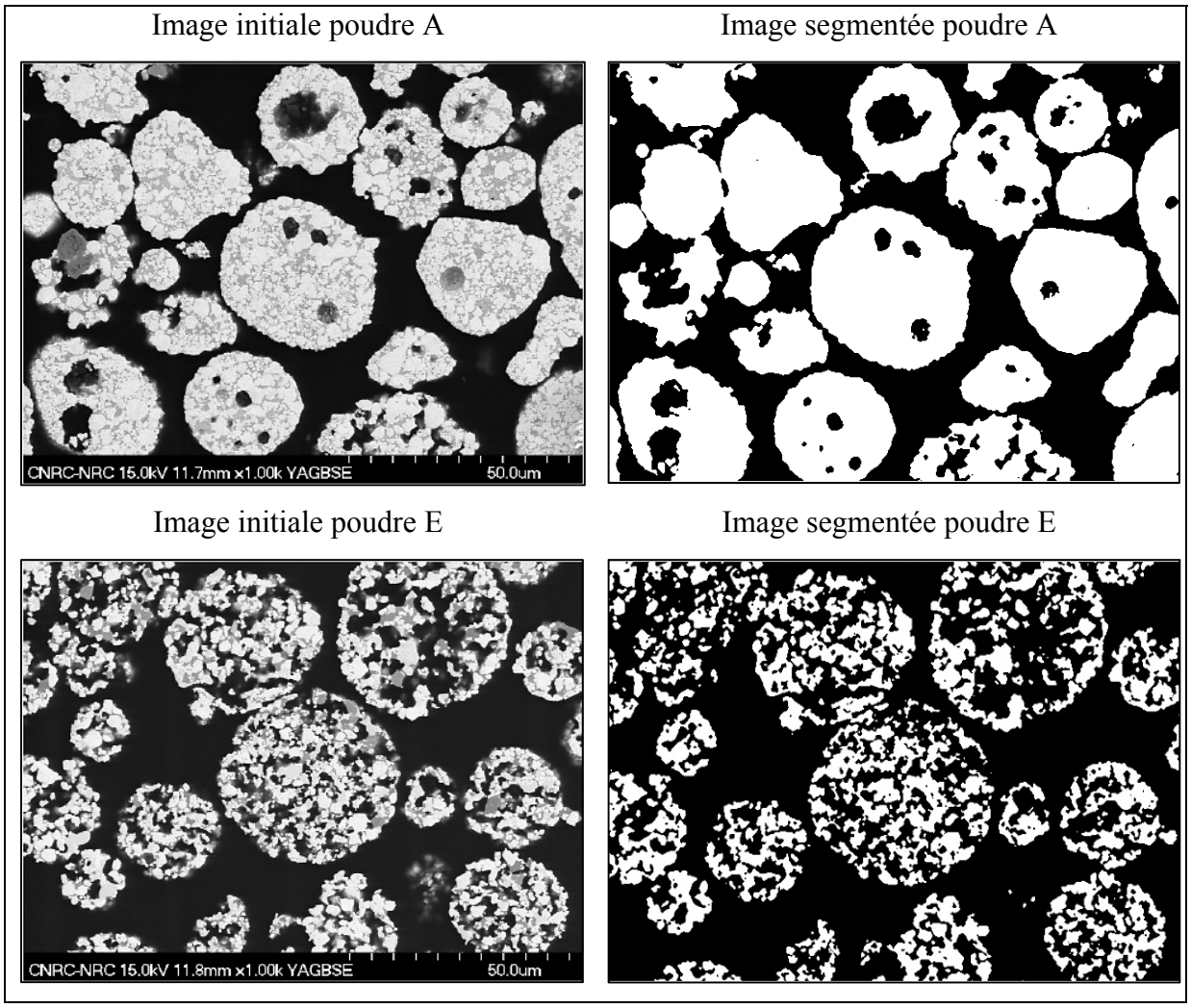


Figure 4.5 Transformation des images initiales de la microstructure en images segmentées en blanc et noir, pour les poudres sélectionnées

Après la segmentation (connu aussi comme seuillage d'images), une opération du masquage a été effectuée dans le but de repérer le contour des particules des poudres et calculer l'aire totale des particules. Les images masquées des poudres sélectionnées en figure 4.5 sont montrées à la figure 4.6. Ainsi, l'aire calculée pour les points noirs sur les images segmentées par rapport à l'aire totale calculée des images masquées est considérée comme le pourcentage de porosité interne des particules des poudres sélectionnées (voir tableau 4.1). On observe que les particules de poudre E sont-elles 44 % moins denses que les particules de poudre A.

Cela est logique puisque la « poudre A » a suivi une densification au plasma au moment de la mise en forme.

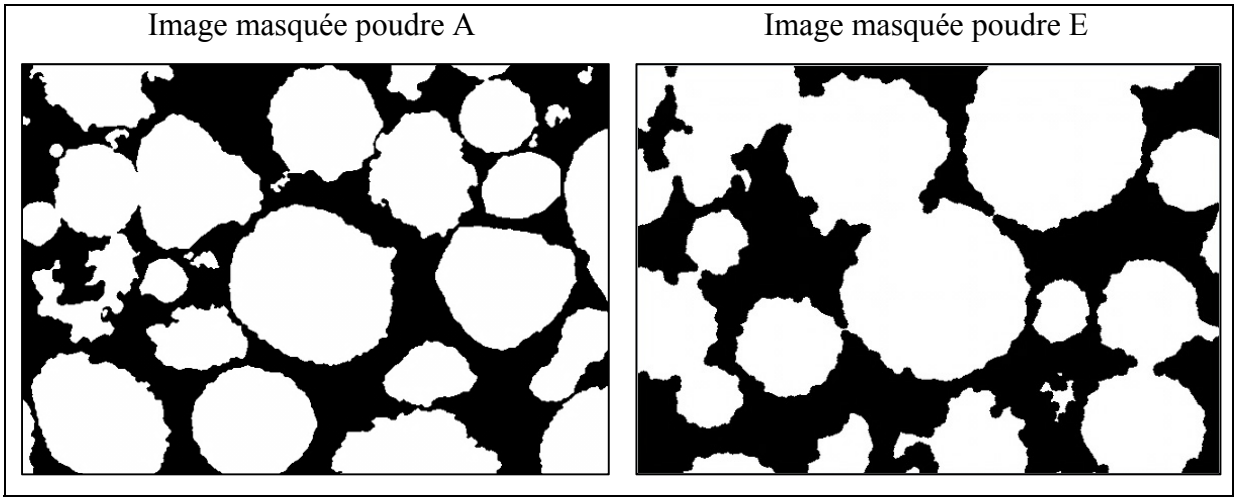


Figure 4.6 Images masquées des particules des poudres A et E

Tableau 4.1 Pourcentage de porosité interne des particules des poudres sélectionnées

Poudre	Surface image segmentée	Surface image masquée	% porosité occupée par les cavités
A	58,9 pixels	62,7 pixels	**6,2 %**
E	30,0 pixels	60,8 pixels	**50,6 %**

4.1.3 Aptitude à l'écoulement

La figure 4.7 montre les résultats de l'aptitude à l'écoulement des poudres A et E respectivement. La poudre E est celle qui présente un écoulement de ses particules plus bas par rapport à la poudre A. Bien que ces deux poudres aient une taille de particules similaire, le débit volumique est différent pour les deux et cela est attribué au processus de densification au plasma suivi par la poudre A. L'effet d'avoir une densification au plasma

améliore l'aptitude à l'écoulement d'une poudre de 30 % ce qui pourrait augmenter la fluidité et la stabilité pendant la projection thermique.

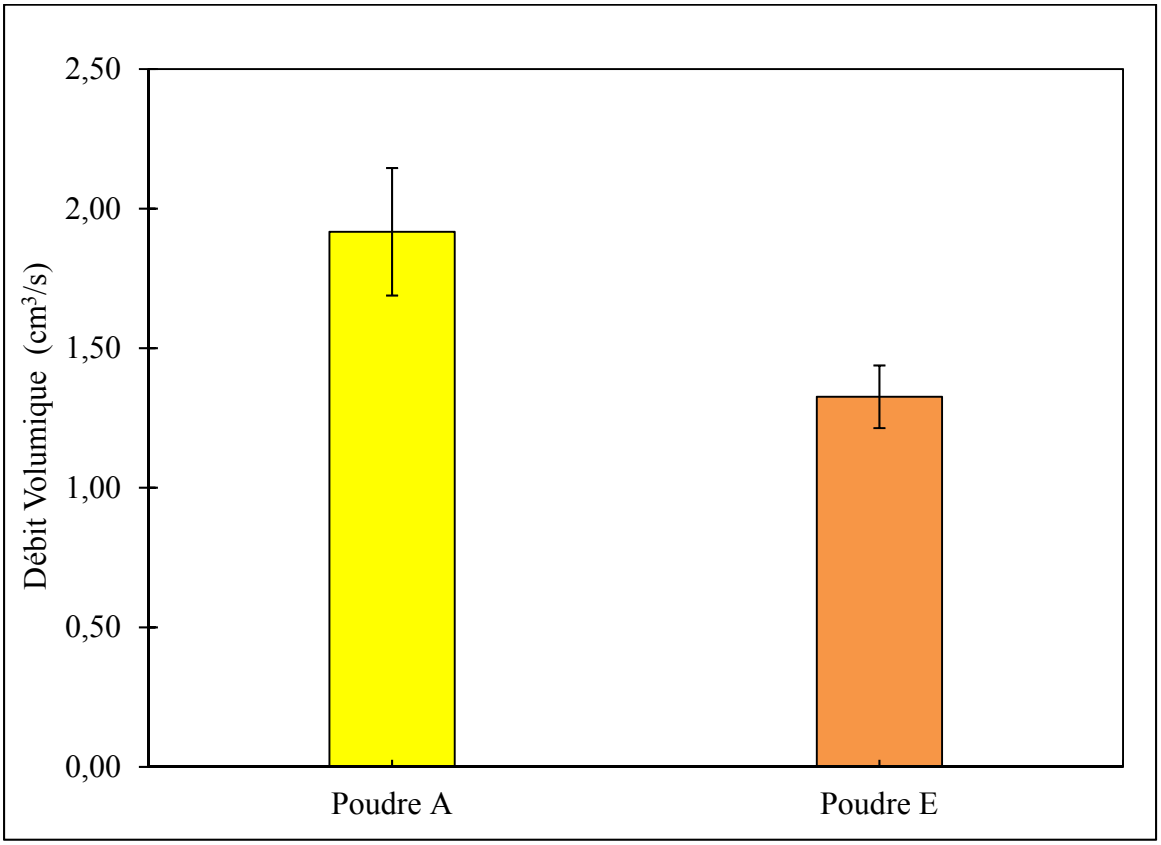


Figure 4.7 Aptitude à l'écoulement de deux poudres sélectionnées, 50 gr de chaque poudre, diamètre du cône d'écoulement : 2.54mm

4.1.4 Diffraction des rayons X des poudres sélectionnées

Les spectres de diffraction de deux poudres sélectionnées sont montrés à la figure 4.8. En général, les pics de diffraction ont été semblables pour les deux poudres (A et E). WC a été la phase principale identifiée à de hautes intensités. Les phases de cobalt (Co) et de Co_3W_3C ont aussi été observées en petites quantités pour les deux poudres.

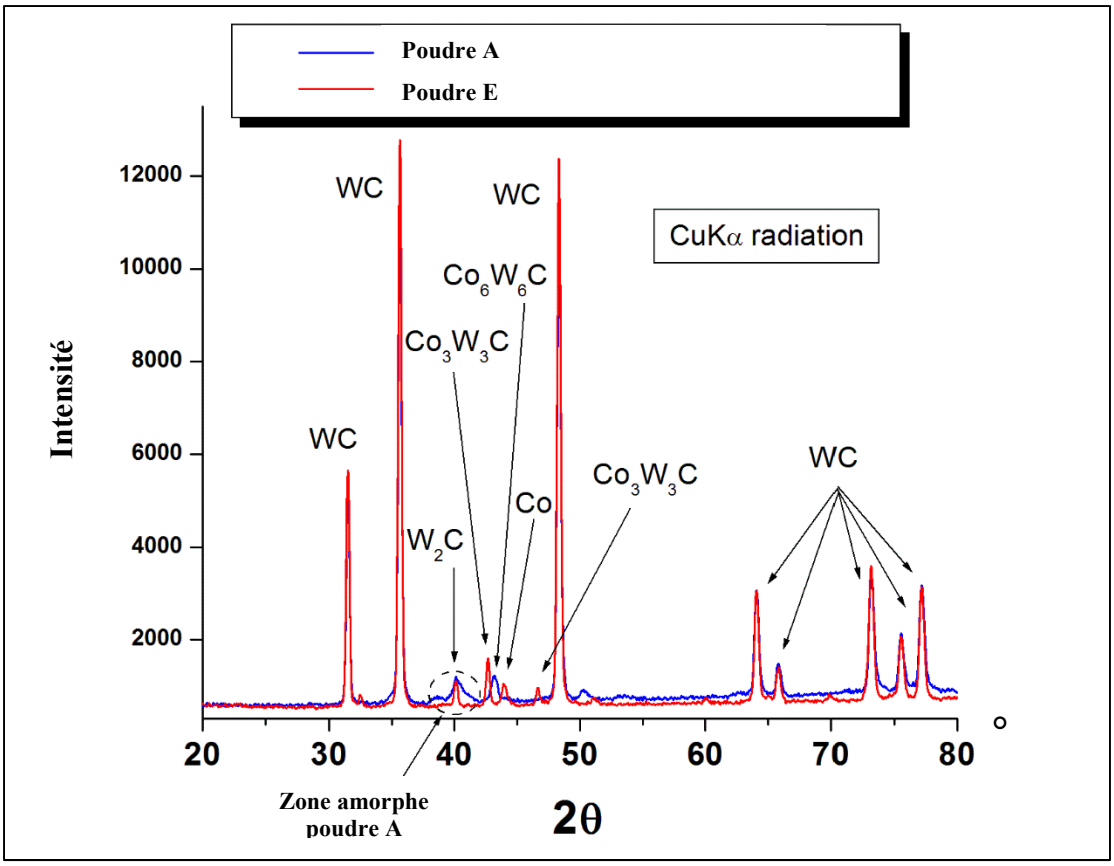


Figure 4.8 Spectres de diffraction des rayons X montrant les phases présentes dans les poudres sélectionnées

La poudre A reflète un large pic de diffraction autour de 2θ = 40°. Ce fait est interprété comme une zone amorphe (W_2C) conséquence de la diminution de la teneur en carbone pendant le processus de densification au plasma à haute température fait sur cette poudre. Ce phénomène est connu comme la décarburation de la phase WC à des températures suffisamment élevées (Sheng et al., 2013).

4.2 Propriétés des revêtements obtenus à partir des poudres sélectionnées en fonction de la distance de projection

4.2.1 Effet sur la vitesse et température des particules

La variation de la vitesse des particules en fonction de la distance de projection est illustrée à la figure 4.9. Cette figure quantifie la diminution de la vitesse des particules en fonction de la distance de projection pour les deux poudres sélectionnées. La vitesse des particules de la poudre E est systématiquement supérieure à celle de la poudre A de l'ordre de 8 % pour chaque distance de projection. Ce comportement provienne du fait que les deux poudres ont des tailles de particule similaires, mais elles n'ont pas les mêmes densités ce qui résulte dans des vitesses différentes.

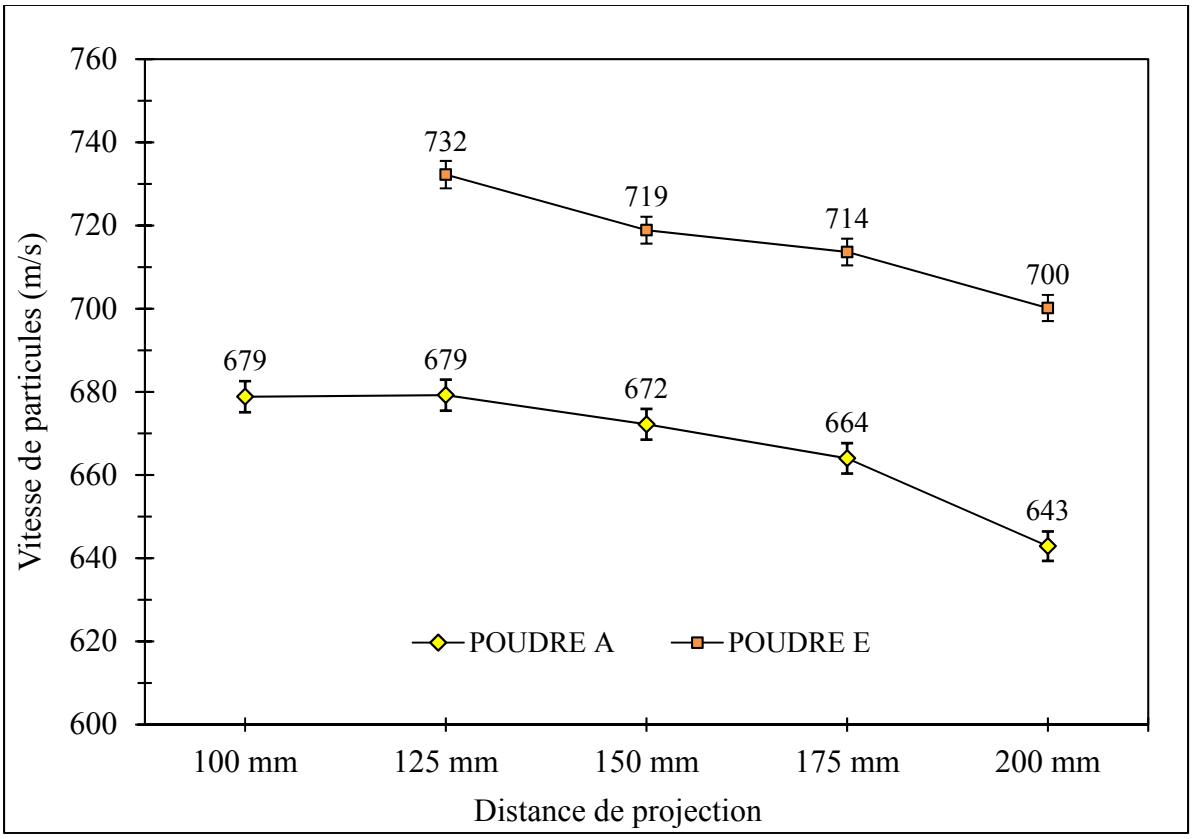


Figure 4.9 Variation de la vitesse des particules en fonction de la distance de projection des poudres sélectionnées n=30

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Le comportement moyen de la température des particules en fonction de la distance de projection est présenté à la figure 4.10. On observe la même tendance pour la température des particules que pour la vitesse : la température des particules diminue lorsque la distance de projection augmente avec un décalage systématique de l'ordre de 100 °C entre les deux poudres pour chaque distance de projection. Ainsi, les particules de la poudre E ont été plus chaudes que les particules de la poudre A.

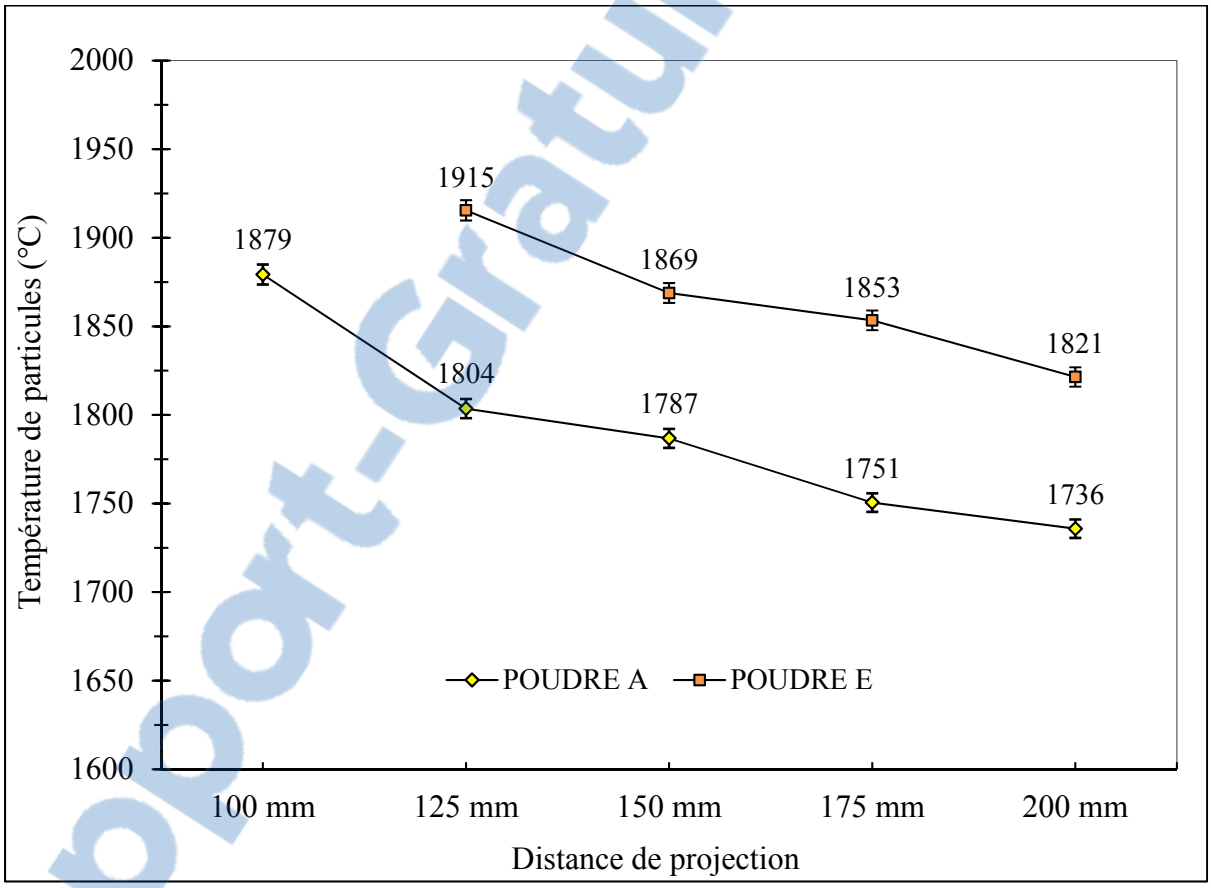


Figure 4.10 Variation de la température des particules en fonction de la distance de projection des poudres sélectionnées n=30

Deux choses peuvent expliquer les températures mesurées plus élevées pour les particules de la poudre E :

Rapport-Gratuit.com

1. La surface plus rugueuse des particules de la poudre E pouvait empêcher la chaleur de pénétrer au cœur des particules. La conductivité thermique serait limitée et une température de surface resterait plus élevée.

2. La masse des particules poreuses est moindre que celle de particules denses. Leur température augmente donc plus rapidement dans les mêmes conditions de flux thermique. Par conséquent, on obtient un accroissement de la température de l'ordre de 6 % pour les particules de la poudre E par rapport aux particules de la poudre A pour chaque distance de projection.

4.2.2 Effet sur la température du substrat

Il est essentiel de contrôler la température maximale liée au substrat pendant la projection afin d'empêcher la dégradation des propriétés mécaniques finales du substrat. La figure 4.11 montre les valeurs de température maximale atteintes pour le substrat par rapport à la distance de projection pour les poudres A et E respectivement. Pour la poudre A, la température maximale du substrat n'a pas dépassé la limite de 176 °C (350°F) exigée par la norme (AMS-2448, 2004) dans toutes les distances de projection étudiées. La température maximale du substrat diminue proportionnellement en augmentant la distance de projection du fait que la température des particules projetées diminue. L'écart entre la température du substrat à la distance de projection la plus courte (100 mm) et à la distance de projection la plus large (200 mm) est de 17 %.

Dans le cas de la poudre E, la température du substrat se trouve juste au-dessus de la limite maximale (176 °C) pour les distances de projection à 100 mm, 125 mm et 150 mm ce qui nécessiterait de diminuer la température des particules pour la projection de cette poudre à de courtes distances de projection. On observe que pour des distances de projection à 175 mm et 200 mm, la température maximale du substrat atteint des valeurs similaires à celles obtenues pour le substrat avec la poudre A. L'écart entre la température du substrat à la distance de

projection la plus courte (100 mm) et à la distance de projection la plus large (200 mm) est de 25 %.

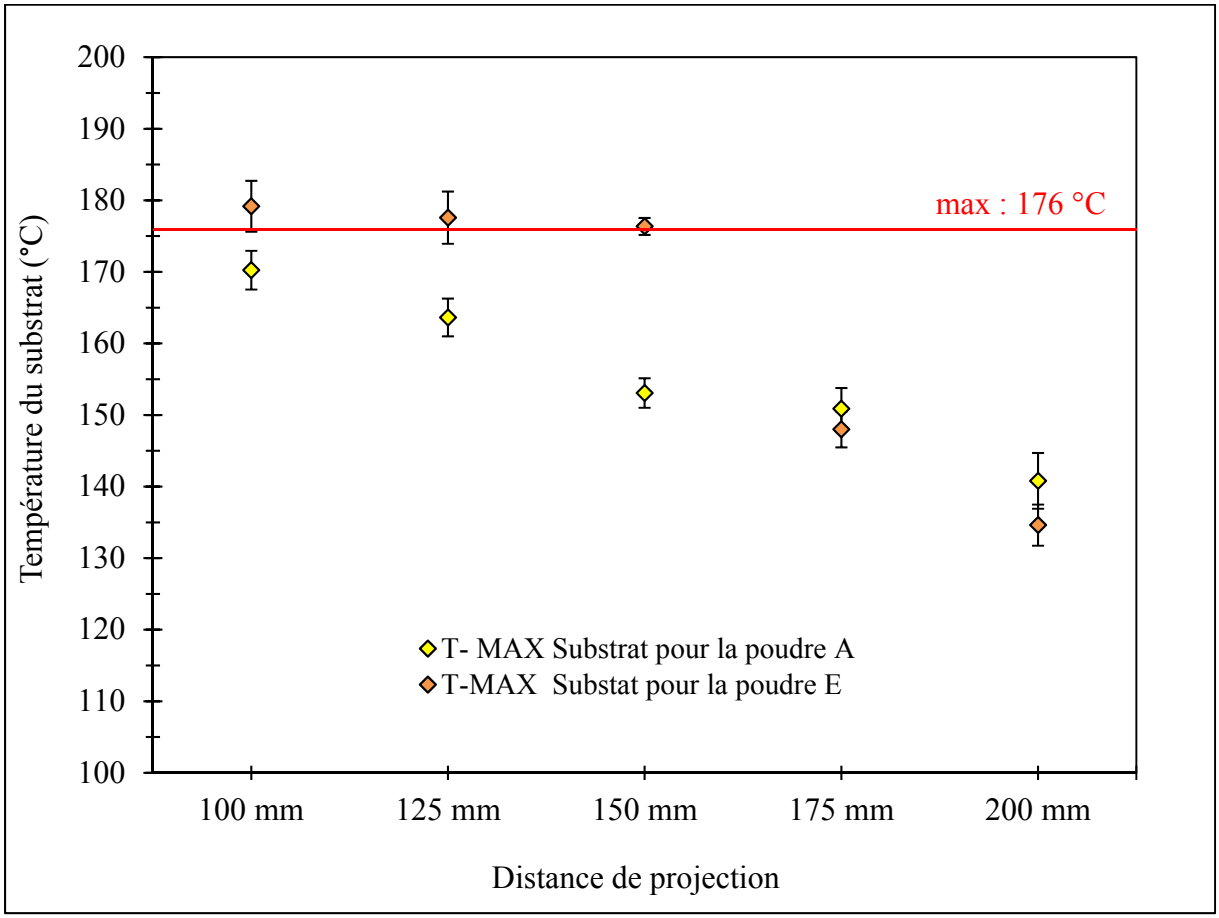


Figure 4.11 Température maximale du substrat atteinte entre passes durant les projections à cinq distances de projections, pour les poudres sélectionnées.

4.2.3 Effet sur les épaisseurs et taux de déposition

L'effet de la distance de projection sur l'épaisseur des revêtements obtenus avec les poudres sélectionnées est montré à la figure 4.12. Il n'y a pas de différences significatives dans les épaisseurs des revêtements produits à partir des deux poudres sélectionnées lorsque la distance de projection augmente et en gardant le même nombre de passes de projection (30 ± 5 passes).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

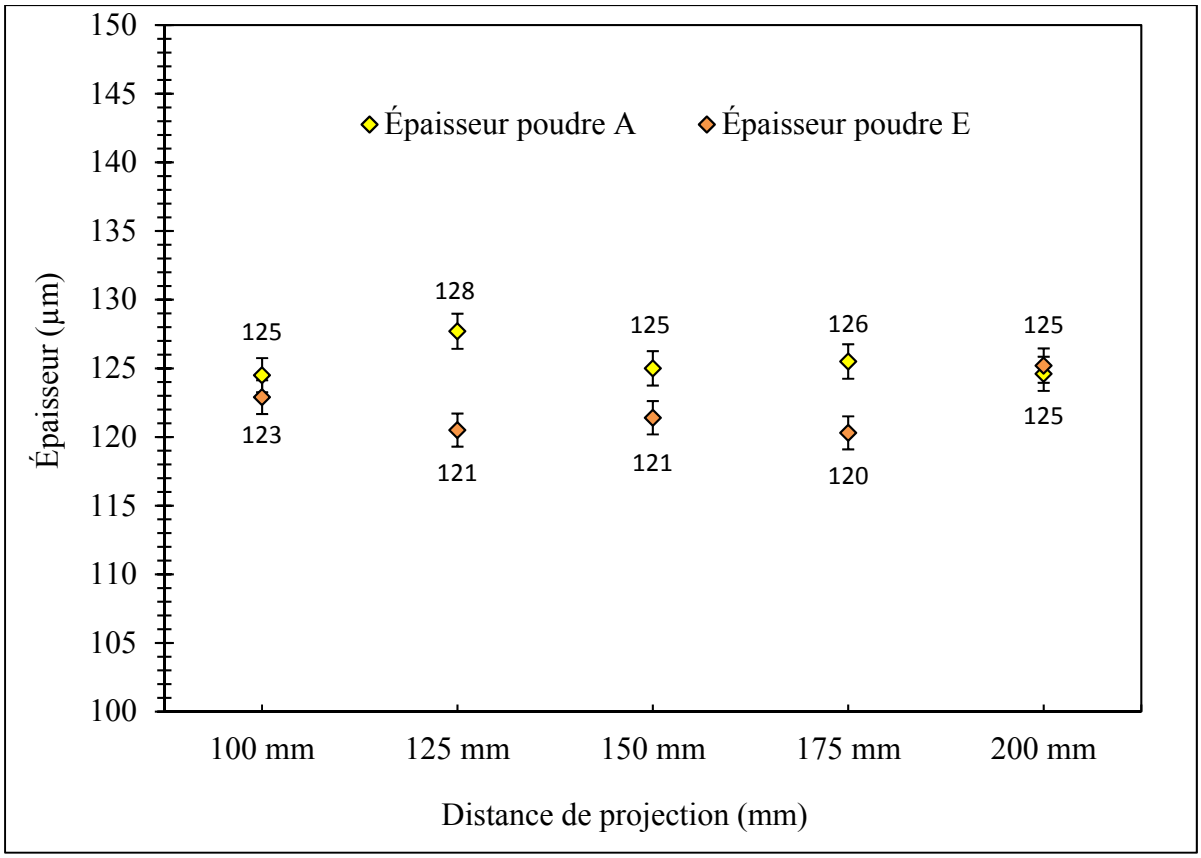


Figure 4.12 Épaisseurs obtenues à partir des poudres sélectionnées fonction de la distance de projection et après 30 ± 5 passes

De l'autre côté, l'efficacité de la déposition est proportionnelle au taux de déposition (microns / passe) lorsqu'on utilise les mêmes temps et nature de passes de projection pour produire les revêtements. Dans cet effet, la figure 4.13 montre les taux de dépositions atteintes pour les revêtements en fonction de la distance de projection pour les poudres sélectionnées. Le taux de déposition est semblable pour les deux poudres et pour toutes les distances de projection. Autour de 4 µm/passe de poudre sont restés collés sur la surface des échantillons. On pourrait donc dire que la distance de projection n'a pas d'impact sur l'efficacité des dépôts de deux poudres lorsqu'on utilise le système de projection thermique HVOF-JET KOTE® III et le même nombre de passes.

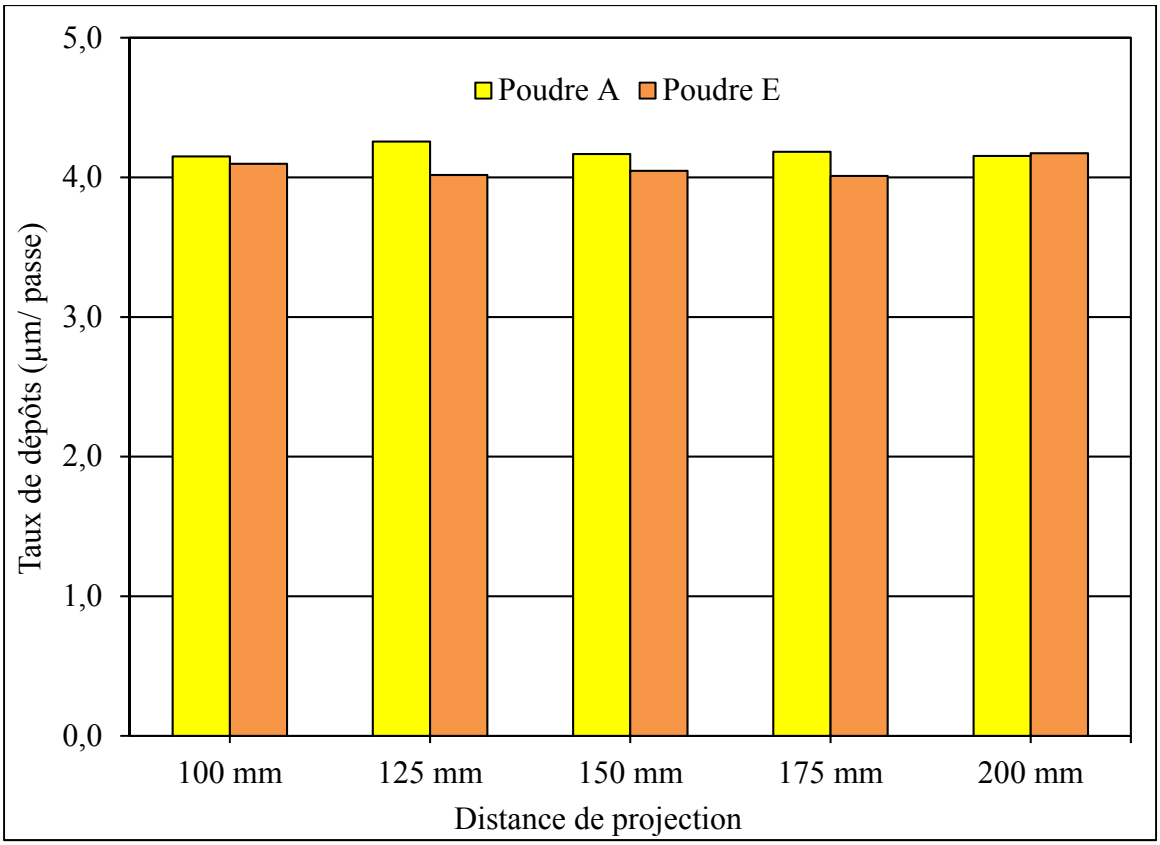


Figure 4.13 Taux de déposition (µm / passe) des revêtements obtenus à partir des poudres sélectionnées en fonction de la distance de projection

4.2.4 Effet sur la microstructure

Les photos de la microstructure des revêtements obtenus avec les deux poudres sélectionnées en fonction de la distance de projection sont montrées à la figure 4.14. Les résultats ne montrent pas de différences significatives dans les microstructures internes des revêtements entre les poudres et pour les cinq distances de projection. Ces revêtements semblent être très denses et des défauts de surface, telles des particules non fondues et d'inclusions, n'ont pas été identifiés sur aucune microstructure. De plus, on observe une distribution de carbures très homogène le long de la surface des revêtements projetés.

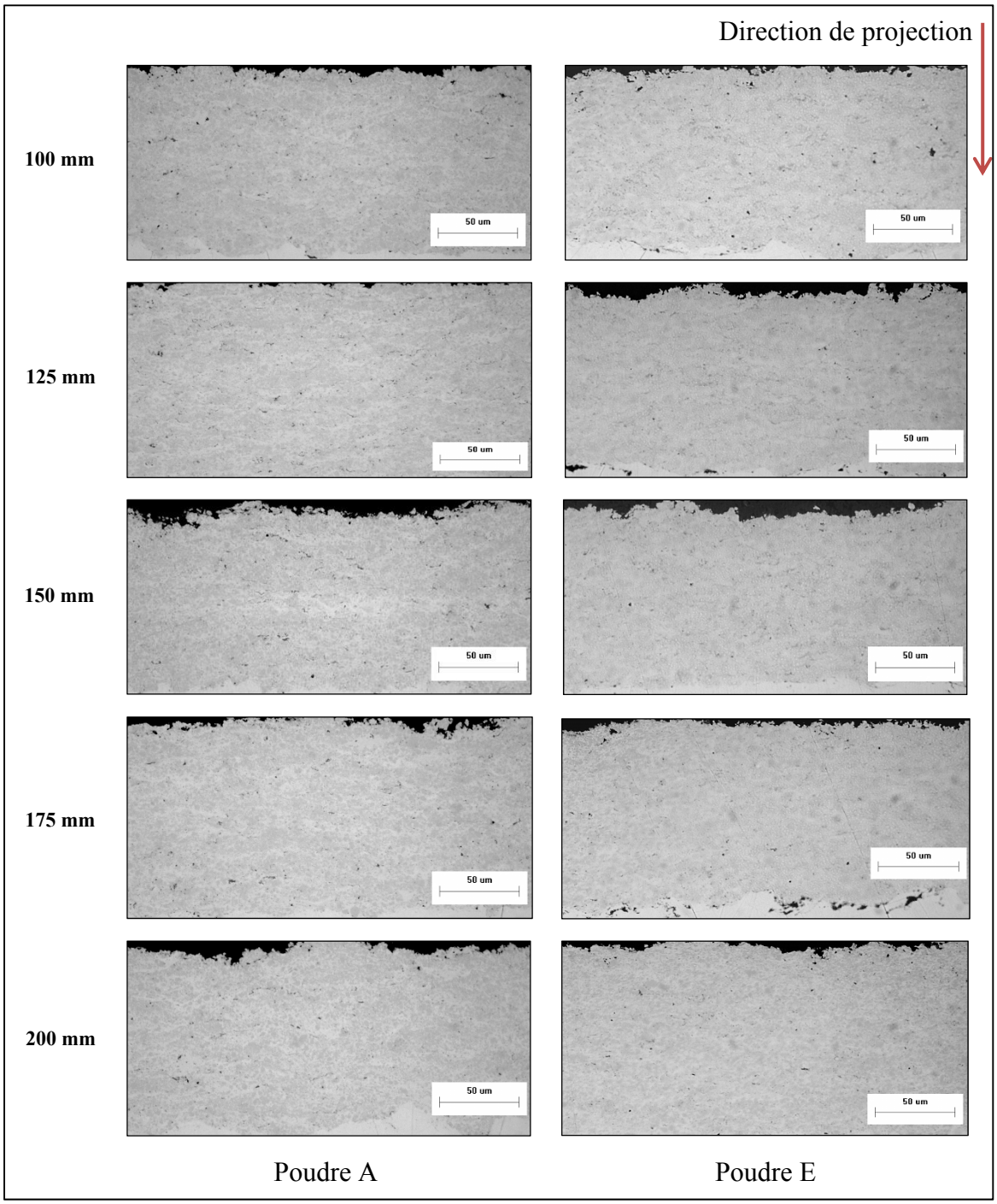


Figure 4.14 Microstructures optiques des revêtements obtenus à partir des poudres sélectionnées en fonction de la distance de projection

On peut donc indiquer que les revêtements obtenus avec ces deux poudres sélectionnées sont très robustes devant la variation de la distance de projection pour le système JET-KOTE® III, ce qui leur permettrait d'accomplir les requis microstructuraux demandés par les spécifications en aéronautique même dans de conditions d'opération diversifiées.

4.2.5 Effet sur l'adhésion

Les résultats du test de pliage des revêtements produits à partir des poudres sélectionnées et en fonction des cinq distances de projection sont présentés aux figures 4.15 et 4.16 respectivement. Pour les deux poudres, la surface de rupture de toutes les échantillons ne présentent ni séparation des revêtements (par rapport au matériau de base), ni d'écaillage sur les revêtements. Cela montre qu'il y a une très bonne adhésion à l'interface entre le revêtement et le substrat ce qui confirme la stabilité du procédé lors de modifications de la distance de projection.

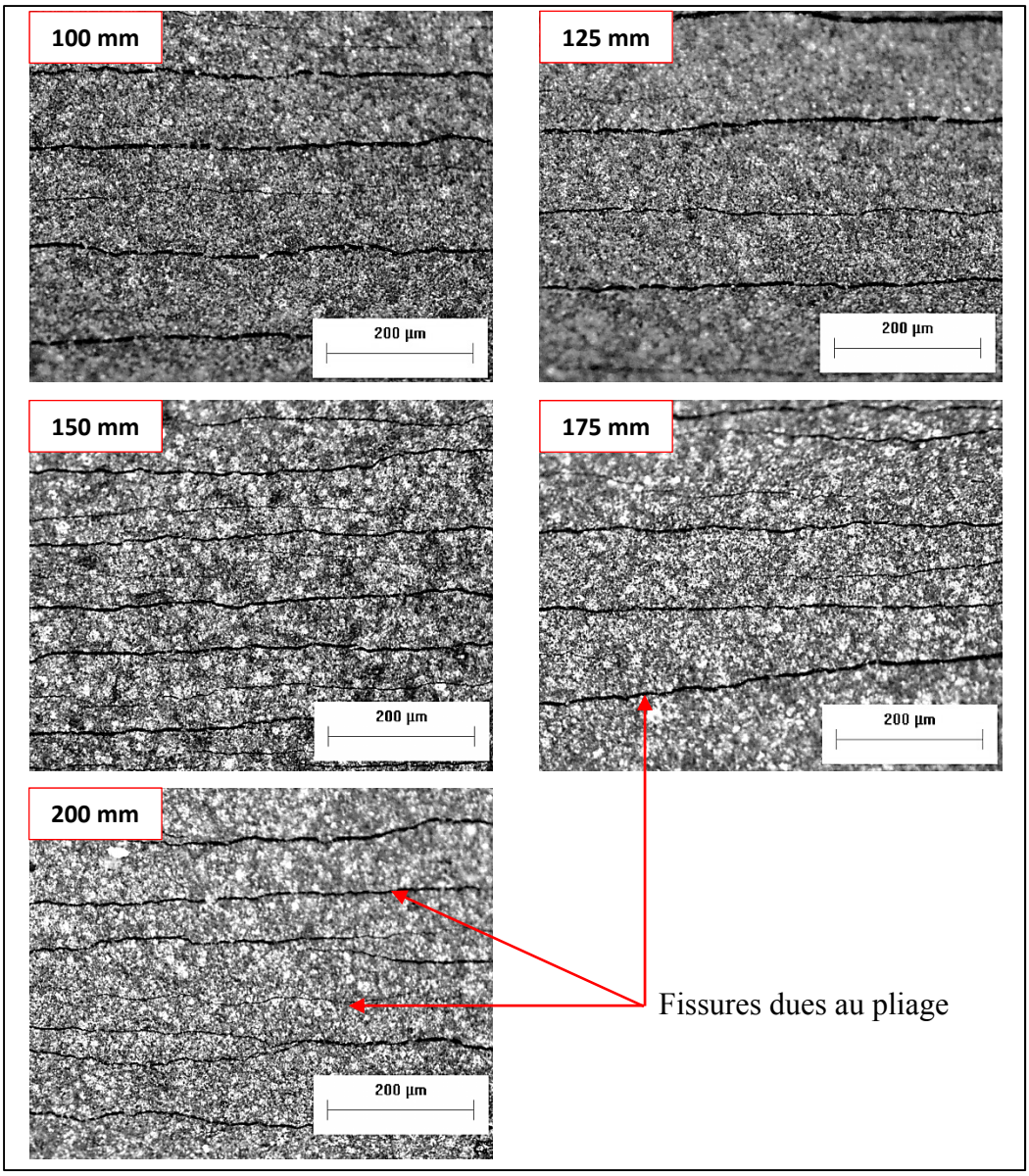


Figure 4.15 Micrographies prises au stéréomicroscope des surfaces des revêtements au point de rupture après le test d'adhésion, correspondant aux revêtements produits à partir de la poudre A en fonction des cinq distances de projection

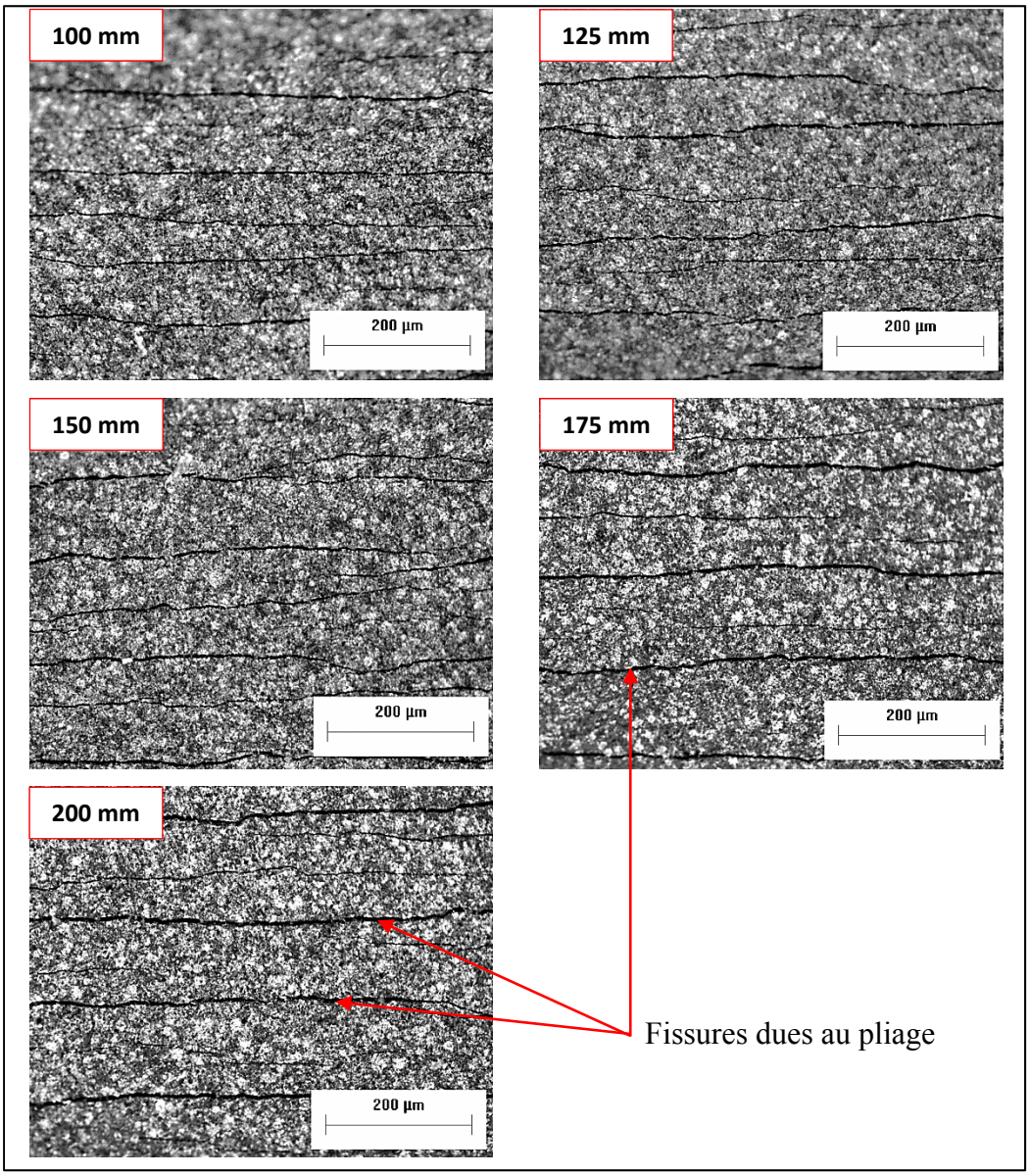


Figure 4.16 Micrographies prises au stéréomicroscope des surfaces des revêtements au point de rupture après le test d'adhésion, correspondant aux revêtements produits à partir de la poudre E en fonction des cinq distances de projection

4.2.6 Effet sur la dureté

La dureté est une propriété importante du revêtement pour les applications liées à l'usure et à la corrosion. De plus, elle joue un rôle significatif dans la durée de vie des composants de trains d'atterrissage. L'effet de la variation de la distance de projection sur la dureté des revêtements produits avec les poudres sélectionnées est schématisé à la figure 4.17 :

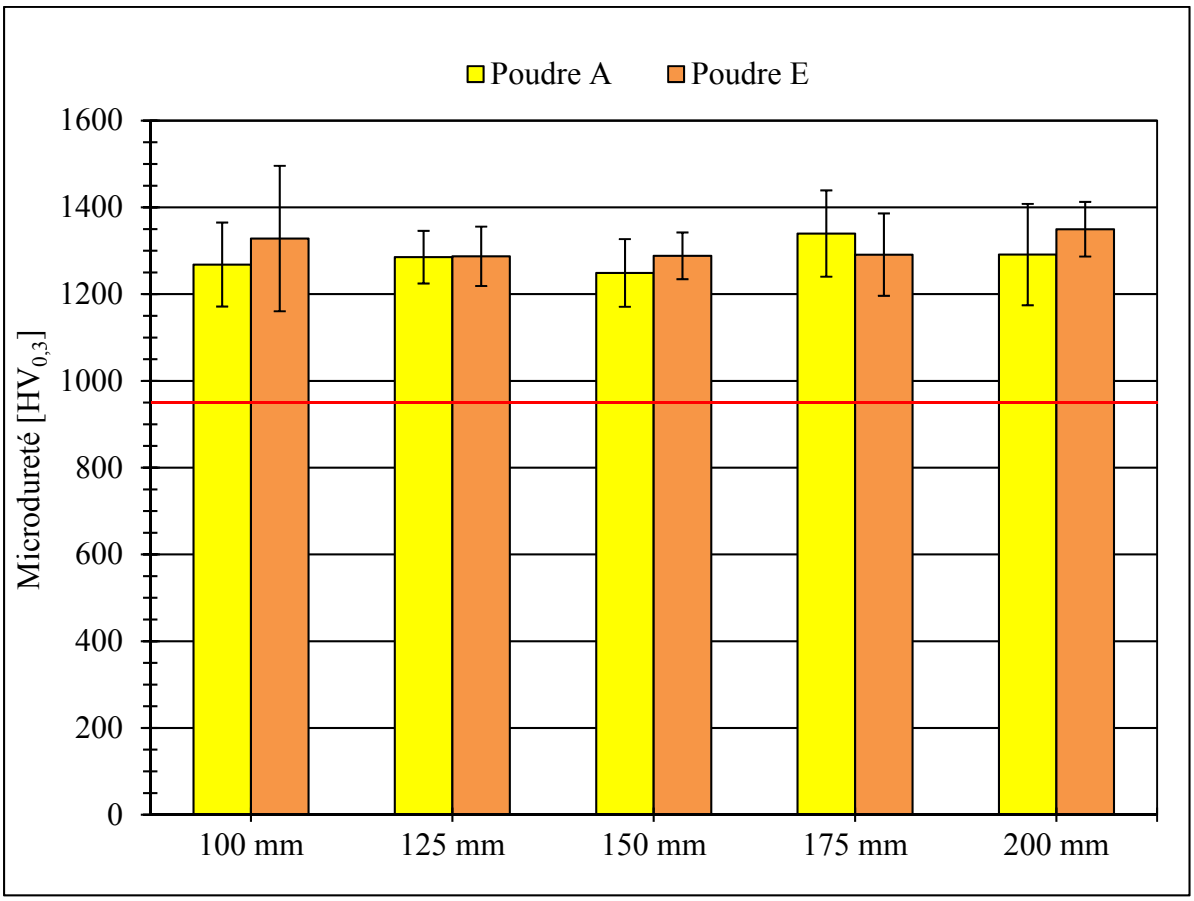


Figure 4.17 Microdureté moyenne des revêtements obtenus à partir des poudres sélectionnées en fonction de la distance de projection n=10

Selon les résultats obtenus, tous les revêtements ont atteint de valeurs de dureté au-dessus de 950 $HV_{(0,3)}$ ce qui veut dire que la distance de projection n'influence pas de manière significative la dureté des revêtements. Ainsi, on peut déduire que pour notre système de

projection (JET-KOTE® III), la dureté est constante pour les revêtements obtenus avec les poudres sélectionnées.

4.2.7 Effet sur les contraintes résiduelles mesurées par la méthode de déflection Almen

La figure 4.18 montre les déflections nettes des plaquettes en fonction de la distance de projection pour les poudres sélectionnées. Lorsque les revêtements sont projetés à de faibles distances de projection, les valeurs des contraintes résiduelles sont plus élevées. Elles peuvent devenir trop élevées par rapport à la norme si cette distance est trop courte (par exemple 100 mm). Au contraire, lorsque la distance de projection augmente, les valeurs des contraintes résiduelles diminuent et peuvent devenir trop faibles par rapport à la norme si la distance de projection est trop importante (autour de 200 mm).

Les valeurs de contraintes résiduelles ont été supérieures pour la poudre E par rapport à la poudre A pour toutes les distances de projection. Cela peut être lié au fait que la vitesse et la température sont plus élevées pour les particules de la poudre E. Dans le cas de vitesses plus élevées, les particules ont provoqué plus de déformation plastique sur la surface par l'effet de grenaillage lors de l'impact. Pour la température, des particules plus chaudes génèrent plus de contraintes thermiques entre le revêtement et le substrat dû aux forts gradients thermiques lors du refroidissement jusqu'à la température ambiante. Les résultants des différents coefficients de dilatation thermique du revêtement et du substrat génèrent également des contraintes résiduelles de type compressif dans les revêtements.

Rapport-Gratuit.com

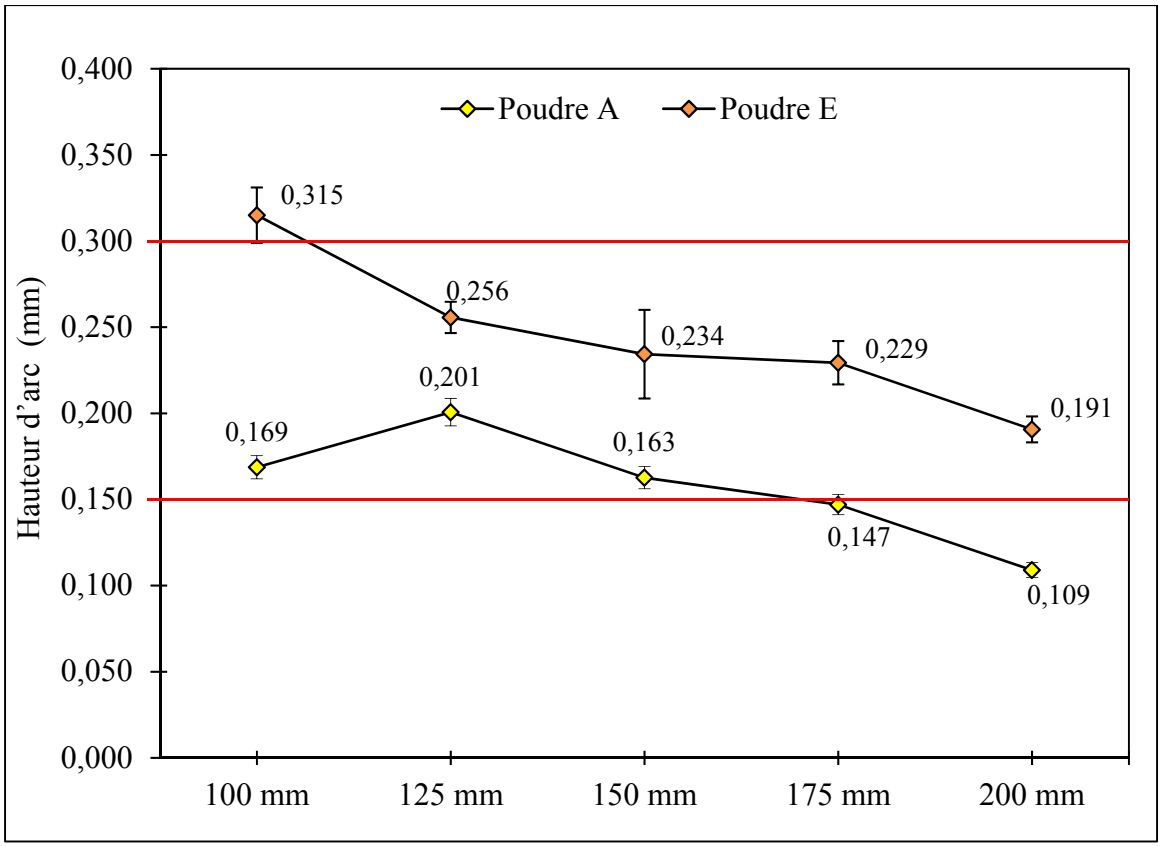


Figure 4.18 Valeurs de contraintes résiduelles prises par la méthode de Déflection Almen des revêtements obtenus à partir des poudres sélectionnées en fonction de la distance de projection

Une corrélation pourrait être observée à la figure 4.19 entre les contraintes résiduelles et la vitesse des particules de poudres (en négligeait les différences microstructurales et de taille de particule des deux poudres sélectionnées). On observe un accroissement des valeurs de contraintes résiduelles dans les revêtements lorsque la vitesse de particules augmente.

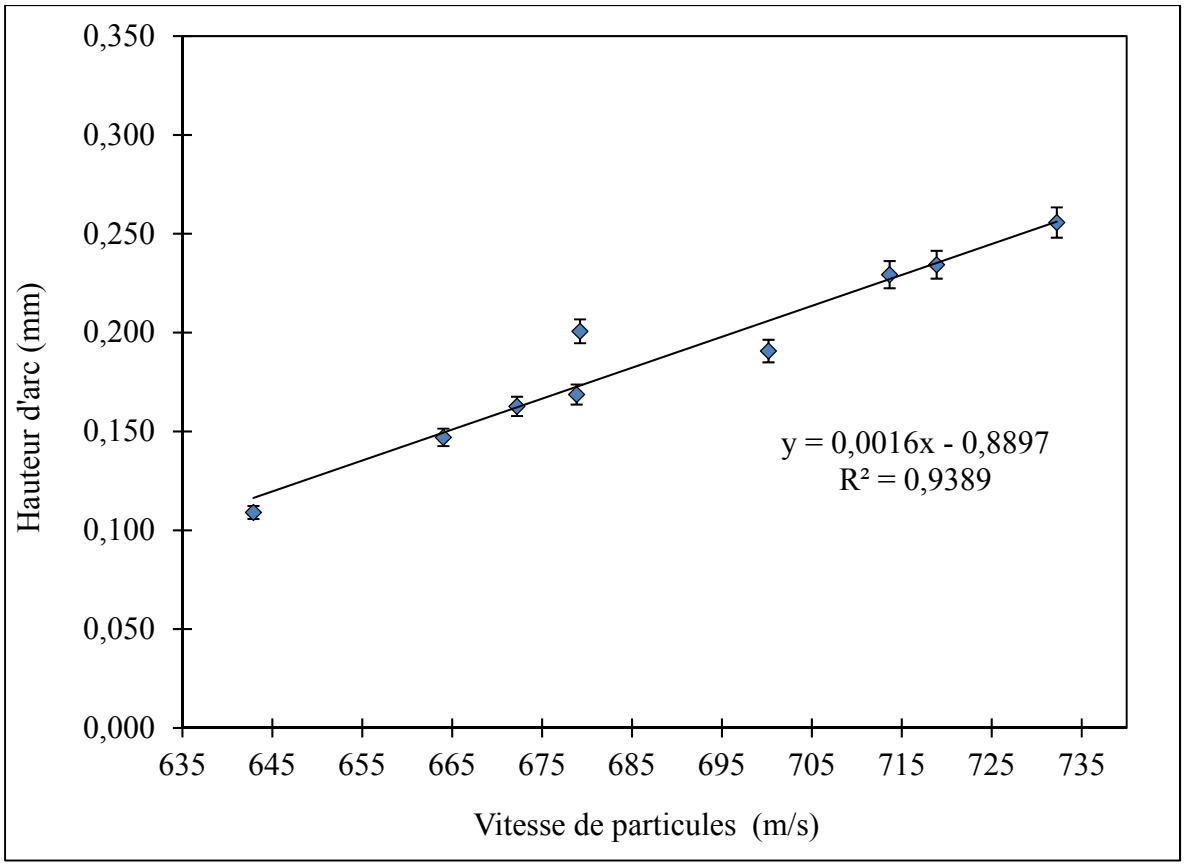


Figure 4.19 Relation entre les contraintes résiduelles de poudres vs vitesse de particules

De la même manière, une relation entre les contraintes résiduelles et la température de particules est montrée à la figure 4.20 (toujours en négligeant les différences microstructurales et de taille de particule des deux poudres sélectionnées). L'effet est moins prononcé que pour la vitesse des particules. Plus la température des particules augmente plus grandes seront les valeurs de contraintes résiduelles dans les revêtements.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

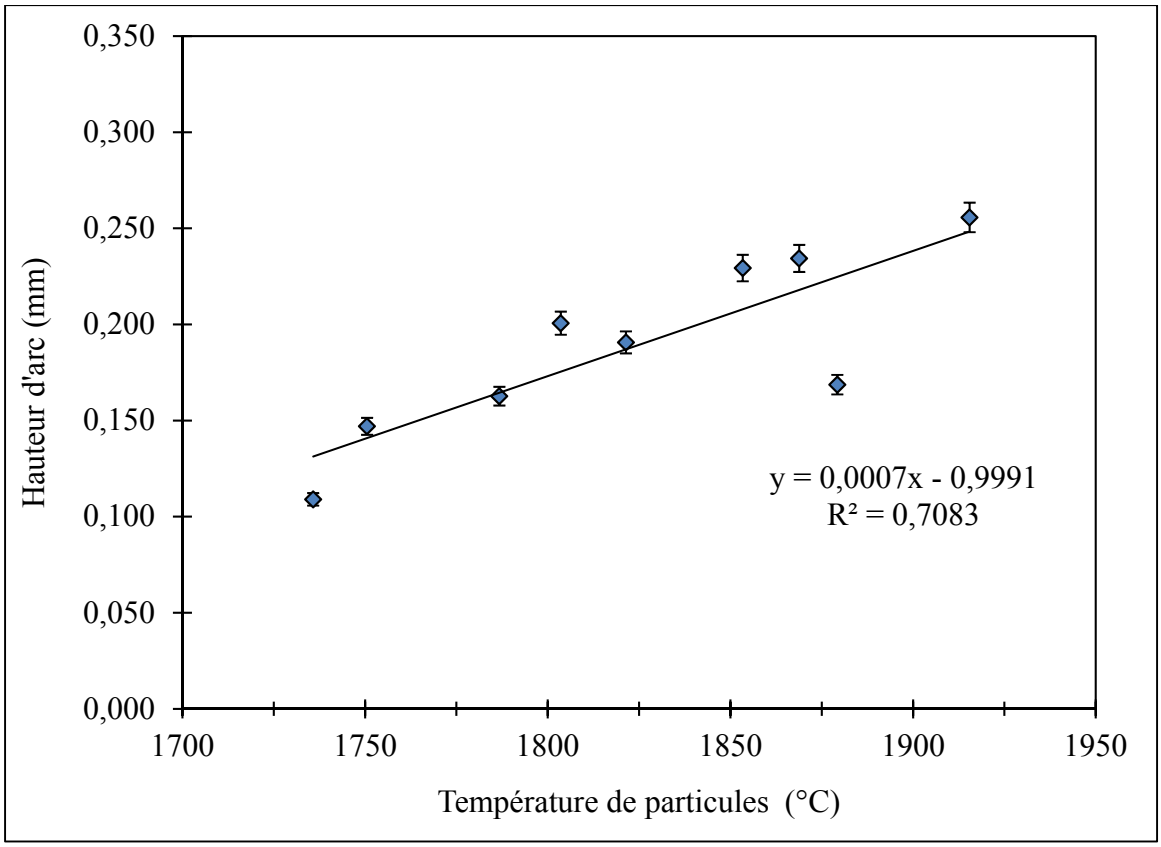


Figure 4.20 Relation entre les contraintes résiduelles de poudres vs température de particules

Les valeurs de vitesse et température des particules pour la poudre A à une distance de projection de 125 mm sont similaires aux valeurs de vitesse et température des particules pour la poudre E à une distance de projection de 200 mm (conformément aux tendances mises en évidence aux figures 4.19 et 4.20). Les valeurs de contraintes résiduelles sont semblables même à des distances de projection différentes (voir figure 4.18). Ceci confirme que la distance de projection est un paramètre indirect du procédé qui indirectement influence la vitesse et la température de particules. C'est la relation vitesse/température des particules qui contrôlerait les contraintes résiduelles finales dans un revêtement par projection thermique HVOF.

4.2.8 Effet sur la rugosité

Les valeurs de rugosité de surface des revêtements obtenus à partir des poudres sélectionnées par rapport à la distance de projection sont présentées à la figure 4.21. Même si cela n'est peut-être pas nécessairement significatif en termes de valeur, la rugosité de surface semble être inférieure pour les revêtements obtenus avec la poudre E pour toutes les distances de projection. Cela serait bénéfique pour le procédé de rectification des pièces puisqu'il y aurait une réduction du temps d'usinage afin d'obtenir une finition de surface acceptable par les spécifications aéronautiques (voir annexe I).

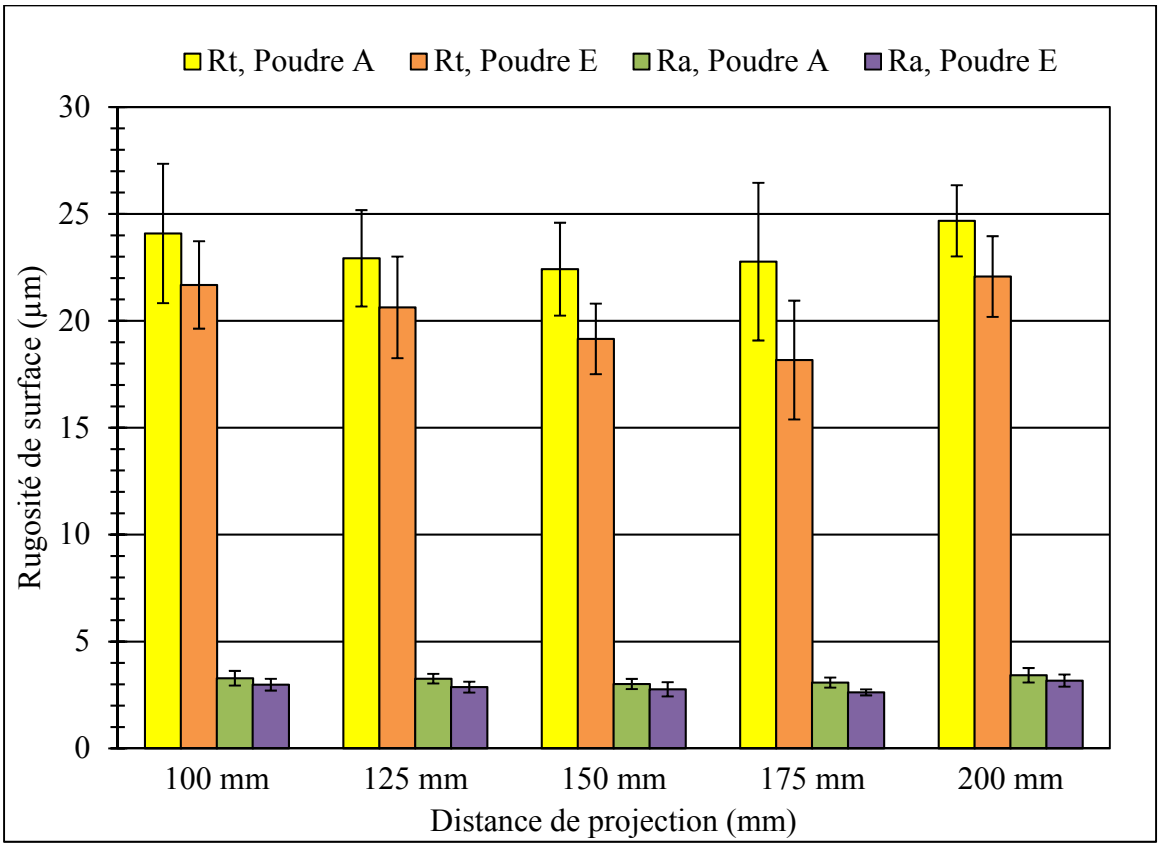


Figure 4.21 Rugosité de surface des revêtements obtenus à partir des poudres sélectionnées en fonction de la distance de projection

4.3 Caractérisation des revêtements

Des analyses par microscopie électronique et de composition de phases ont été réalisés pour caractériser les revêtements obtenus à partir des poudres sélectionnées en fonction de la distance de projection.

4.3.1 Microscopie électronique

Les figures 4.22 et 4.23 montrent les microstructures électroniques des revêtements produits à partir des poudres A et E en fonction de la distance de projection. Les particules grises en forme de blocs observés sur les images sont de particules de WC, les zones grises foncées correspondent à la matrice métallique de Co-Cr, les pores sont des points noirs et des oxydes sont représentés par des lignes noires.

Il ne semble pas y avoir de différences entre les microstructures des revêtements obtenus en variant la distance de projection. Cela indiquerait que l'effet de la variation de la distance de projection est négligeable sur la qualité de ce type de revêtements. Cependant, La présence des oxydes et d'autres défauts de surface sont plus notoires dans les revêtements obtenus avec la poudre A. La poudre E semble être celle qui donne une plus uniforme microstructure des revêtements pour toutes les distances de projection.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

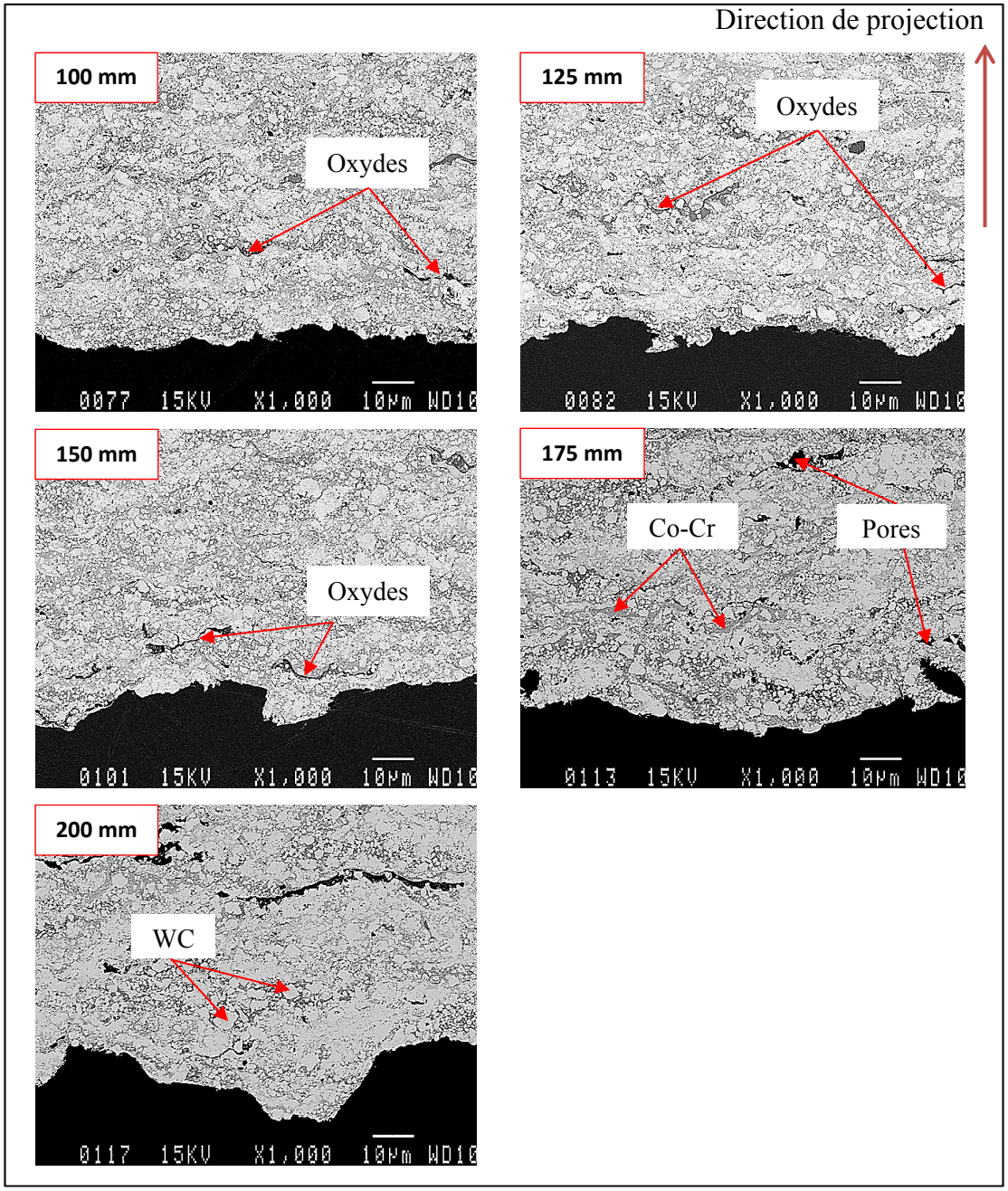


Figure 4.22 Microstructures électroniques des revêtements obtenus à partir de la poudre A en fonction de la distance de projection

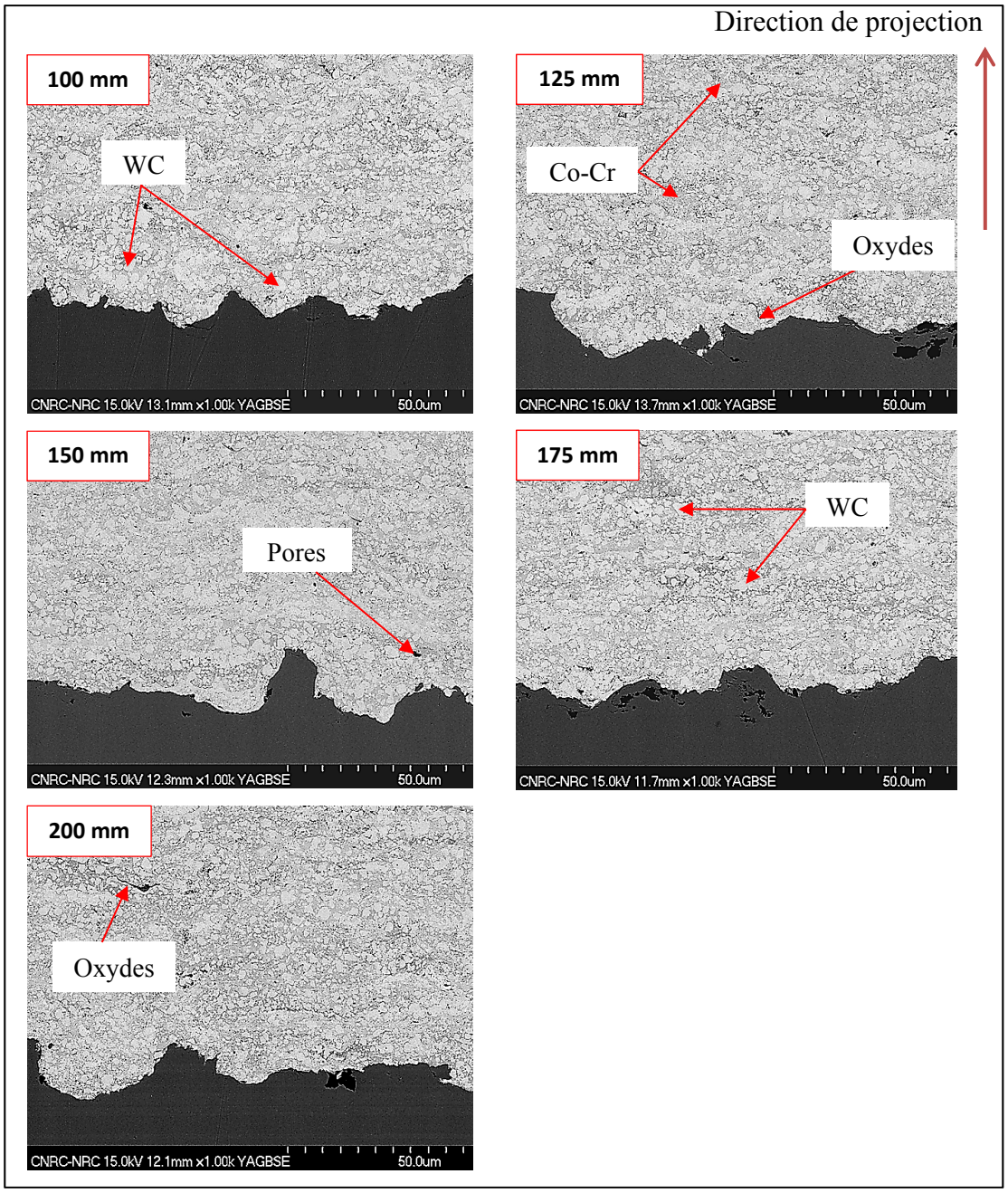


Figure 4.23 Microstructures électroniques des revêtements obtenus à partir de la poudre E en fonction de la distance de projection

4.3.2 Composition de phases des revêtements

Les phases présentes dans les revêtements obtenus avec les poudres sélectionnées en fonction de la distance de projection sont montrées aux figures 4.24 et 4.25 respectivement. Il n'y a pas beaucoup de différences entre les spectres de diffraction des revêtements obtenus à partir des poudres sélectionnées en variant la distance de projection. La phase principale identifiée dans les revêtements est le WC pour toutes les distances de projection. Des petites quantités de W_2C (autour de $2\theta = 40°$) ont été trouvés. Elles sont dues à la décomposition de la phase WC à haute température.

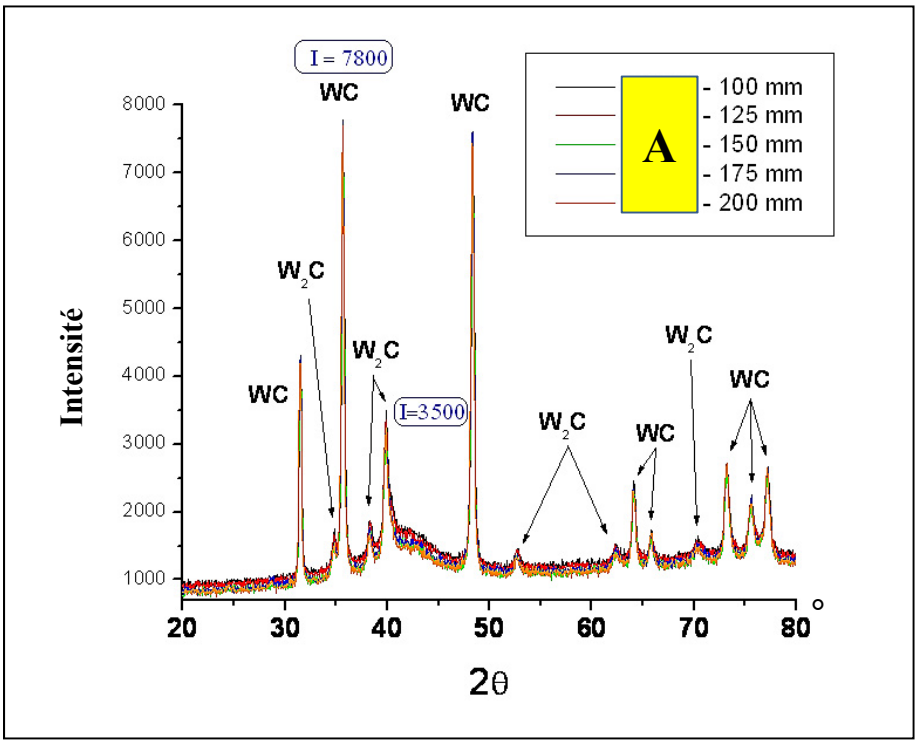


Figure 4.24 Spectres de diffraction montrant les phases présentes dans les revêtements obtenus à partir de la poudre A en fonction de la distance de projection

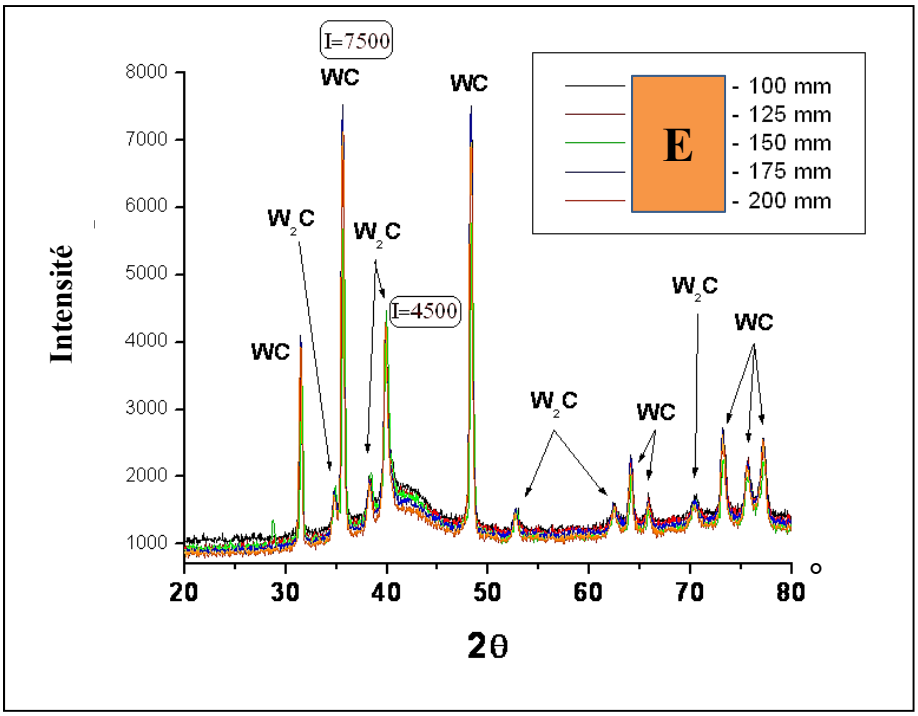


Figure 4.25 Spectres de diffraction montrant les phases présentes dans les revêtements obtenus à partir de la poudre E en fonction de la distance de projection

Le degré de décarburation des différents revêtements est calculé en faisant le rapport I_{W2C}/I_{WC} (voir tableau 4.2) :

Tableau 4.2 Degré de décarburation des revêtements après la projection thermique en fonction de la distance de projection

Revêtements	Intensité phase W_2C	Intensité phase WC	Degré de décarburation
Poudre A	3500	7800	**44 %**
Poudre E	4500	7500	**60 %**

Les revêtements de la poudre E ont eu 16 % plus de décarburation de la phase WC par rapport aux revêtements de la poudre A. Cette différence pourrait être expliquée parce que les particules de la poudre E sont systématiquement plus chaudes lors de la projection thermique ce qui génère une décomposition supérieure de la phase WC en W_2C. Il serait

donc envisageable de diminuer la température de flamme pour cette poudre pour minimiser la décarburation.

Rapport-Gratuit.com

CONCLUSION

Cette étude a eu pour objectif de trouver une poudre alternative à celle qui est utilisée actuellement pour la production des revêtements de WC-10Co-4Cr obtenus avec le système de projection thermique HVOF-JET KOTE® III.

Quatre poudres alternatives (poudres B, C, D et E) plus la poudre de référence (poudre A) ont été étudiées. Quelques conclusions ont pu être tirées :

- Trois poudres des alternatives (B, C et D) ont été éliminées car elles n'ont pas répondu de manière satisfaisante à au moins un des critères de revêtements par projection thermique HVOF exigés par les manufacturiers des trains d'atterrissage (épaisseur, adhésion, microstructure, microdureté, contraintes résiduelles et rugosité).

- Seules les poudres A et E permettent d'obtenir de propriétés des revêtements similaires (épaisseur, adhésion, microstructure, microdureté, contraintes résiduelles et rugosité). Ces deux poudres sont conformes aux exigences des spécifications en aéronautique lorsqu'elles sont projetées avec les conditions standards de projection développées et fixées pour la poudre de référence (poudre A).

À partir des résultats obtenus, une seconde série de projections pour les poudres sélectionnées ont été faites et plusieurs conclusions peuvent être tirées :

- La méthode d'analyse d'images utilisée pour déterminer le pourcentage de porosité à l'intérieur des particules nous a permis d'avoir une idée approximative de la densité des particules. Les particules de poudre E sont 44 % plus poreuses que les particules de poudre A ce qui concorde avec leurs méthodes de fabrication (séchage par atomisation pour la poudre E et séchage par atomisation suivi d'une densification au plasma pour la poudre A). L'effet de cette porosité est un accroissement de la température et vitesse des particules de poudre E pendant la projection thermique.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- Il est possible d'avancer que la poudre E peut être une alternative pour remplacer la poudre de référence (poudre A) pour la production des revêtements de WC-10Co-4Cr avec le système de projection thermique HVOF-JET KOTE® III car cette poudre est parfaitement compatible avec le système de projection et les revêtements obtenus comportent une qualité similaire à ceux obtenus avec la poudre A. De plus, la rugosité des revêtements est inférieure ce qui représenterait un avantage pour la rectification des pièces de production.

- La distance de projection est un paramètre indirect du système de projection HVOF-JET KOTE® III caractérisant l'interaction particules/substrat. La vitesse ainsi que la température des particules varient en fonction de cette distance. Cette vitesse et température déterminent les niveaux de contraintes résiduelles finales dans les revêtements. Lorsque les revêtements sont produits à de courtes distances de projection, plus grandes seront la vitesse et la température des particules, résultant dans de plus grandes contraintes résiduelles de compression dans les revêtements.

- À de courtes distances de projection (100 mm, 125 mm et 150 mm), la poudre E ne serait pas conforme au requis de température maximal du substrat (176 °C) et une dégradation des propriétés mécaniques finales du substrat pourrait y arriver. De plus, il y aurait un excès des contraintes résiduelles dans les revêtements ce qui pourrait les rendre non conformes.

RECOMMANDATIONS

- Il serait intéressant de développer les conditions optimales pour projeter les poudres qui ont été éliminées afin de les rendre candidates potentielles pour la production des revêtements de WC-10Co-4Cr avec le système HVOF-JET KOTE® III. Pour ceci, il serait nécessaire de modifier quelques paramètres comme les débits de H_2 et O_2 pour augmenter le taux de déposition dans le cas des poudres C et D. De plus, il serait nécessaire de travailler sur la granulométrie de la poudre B afin de privilégier l'utilisation d'une taille de particules plus grande permettant de donner plus déformation plastique au substrat et par conséquent augmenter les contraintes résiduelles.

- L'utilisation des outils statistiques tels que le plan d'expériences serait grandement recommandée afin de développer les conditions de projection optimales pour la poudre E avec le système de projection thermique HVOF- JET KOTE® III.

- Des analyses de qualification plus spécifiques comme le test de cohésion et de résistance à la fatigue des revêtements seraient nécessaires pour l'approbation de la poudre E, par les principales compagnies de fabrication de trains d'atterrissage, pour produire des revêtements de WC-10Co-4Cr avec le système de projection thermique HVOF- JET KOTE® III.

ANNEXE I

COMPARATION DU FINI DE SURFACE D'UNE PIÈCE REJET

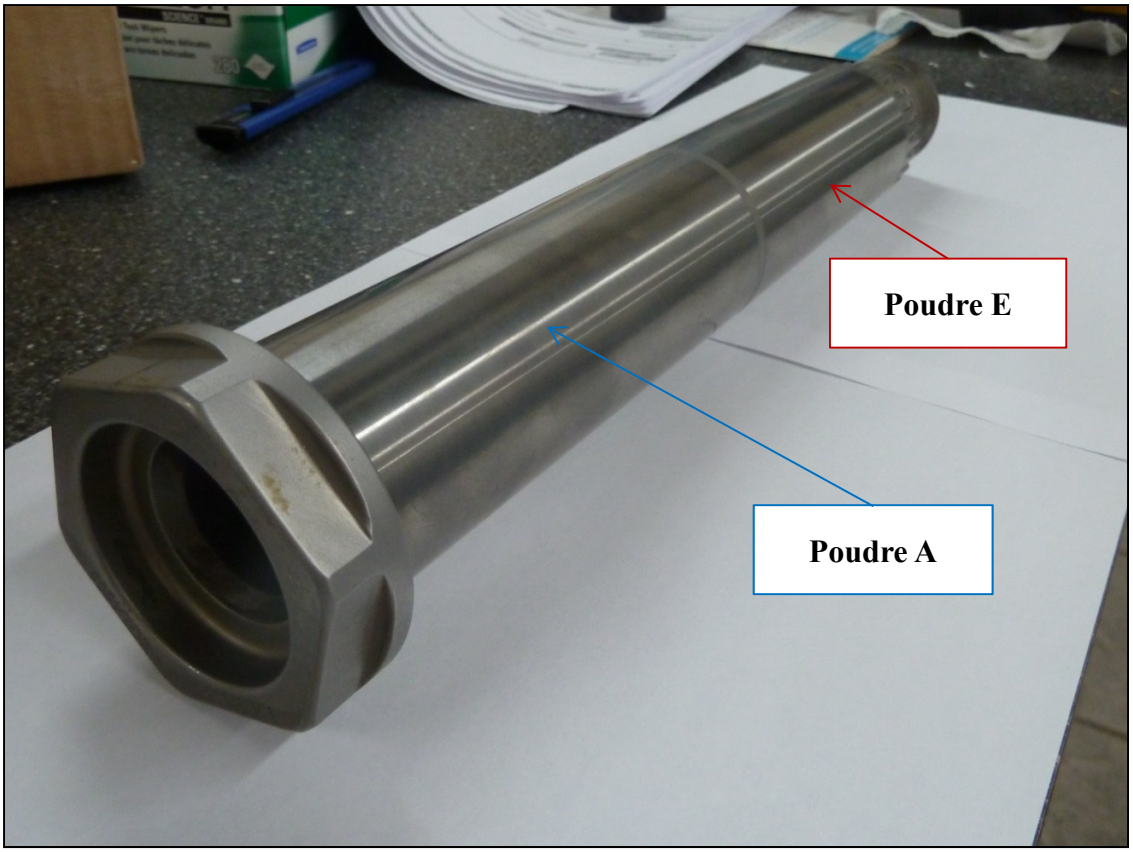


Figure-A I-1 Photo après rectification d'une pièce rejet projetée avec les deux poudres sélectionnées

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

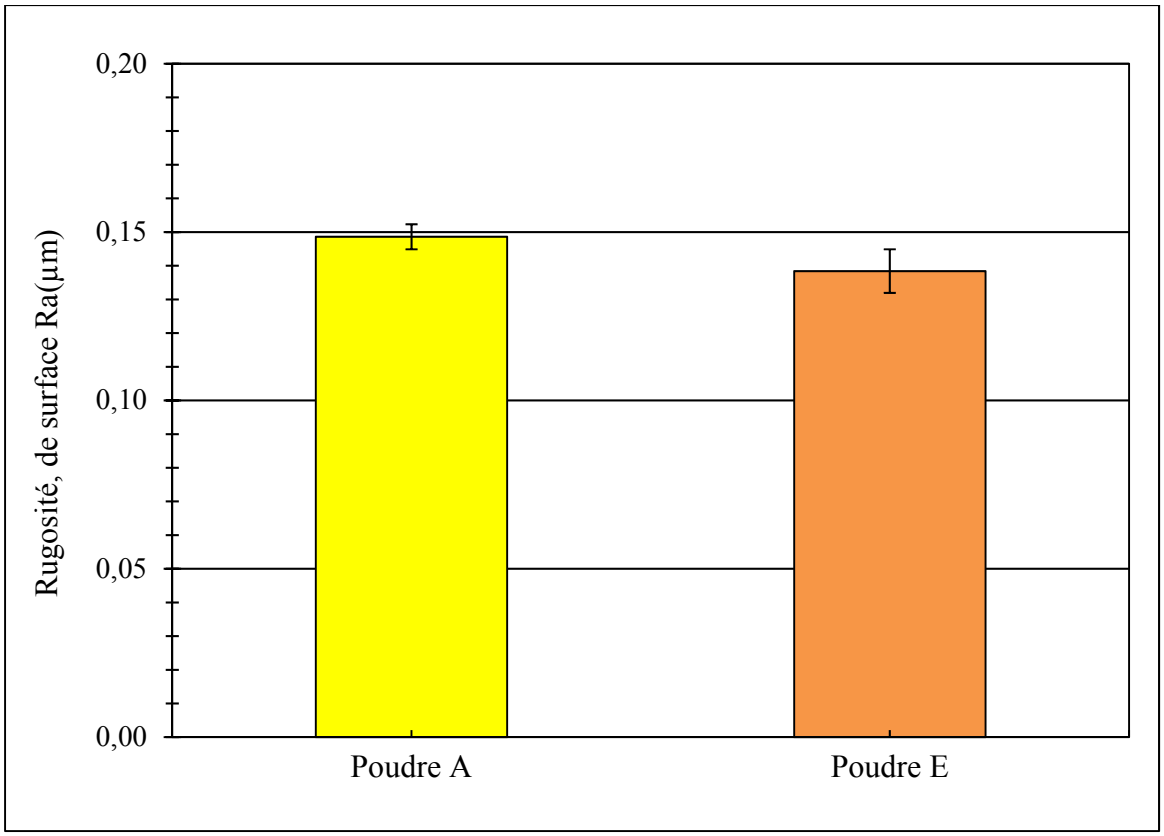


Figure-A I-2 Fini de surface après rectification d'une pièce rejet projetée avec les deux poudres sélectionnées

BIBLIOGRAPHIE

AMS-2448, Aerospace Material Specification. 2004. *Application of Tungsten Carbide Coatings on Ultra High Strength Steels High Velocity Oxygen / Fuel Process*. 13 p.

AMS-7882A, Aerospace Material Specification. 2007. *Tungsten Carbide -Cobalt Chrome powder Agglomerated and Sintered* 5 p.

ASTMB213-13. 2013. *Standard Test Methods for Flow Rate of Metal Powders Using the Hall Flowmeter Funnel* United States, 5 p.

ASTMB571-97. 2013. *Standard Practice for Qualitative Adhesion Testing of Metallic Coatings*. United States: ASTM International, 4 p.

ASTMB822-10. 2010. *Standard Test Method for Particle Size Distribution of Metal Powders and Related Compounds by Light Scattering*. United States, 4 p.

ASTME384-11. 2011. *Standard test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials*. United States, 43 p.

Brisset, François. 2008. *Microscopie électronique à balayage et microanalyses* (2008). Les Ulis, 892 p.

Brundle, C. R., Charles A. Evans et Shaun Wilson. 1992. *Encyclopedia of materials characterization surfaces, interfaces, thin films* (1992). Boston : Greenwich, CT: Butterworth-Heinemann , Manning, 751 p.

Chang-Jiu, Li, Yang Guan-Jun et Altun Özge. 2012. « Thermal Spray Coatings for Aeronautical and Aerospace Applications ». In *Aerospace Materials Handbook*. p. 281-358. Coll. « Advances in Materials Science and Engineering »: CRC Press. < http://dx.doi.org/10.1201/b13044-7 >. Consulté le septembre 06 2014.

Charreau, André , et Roland Cavaillé. 1991. « Séchage II: Appareillage et choix d'un procédé ». *Techniques de l'ingénieur. Génie des procédés Paris, France,* vol. 2J2482, p. J2482.1-J2482.18.

Condotta, R. 2005. « Coulabilité des poudres cohesives: mesures aux faibles contraintes, granulaires humides et application a une poudre industrielle ». Institut National polytechnique de Toulouse, 257 p.

Cullity, B. D., et S. R. Stock. 2001. *Elements of X-Ray Diffraction (3rd Edition)*. Prentice Hall, 664 p.

Davis, J. R. 2004. *Handbook of thermal spray technology*. Coll. « Thermal spray technology ». Materials Park, OH: ASM International, 338 p.

Fang, Dandan. 2010. « Diagnostic et adaptation des trajectoires robotiques en projection thermique ». Ph.D., Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 142 p.

Gaona, M., R. S. Lima et B. R. Marple. 2008. « Influence of particle temperature and velocity on the microstructure and mechanical behaviour of high velocity oxy-fuel (HVOF)-sprayed nanostructured titania coatings ». *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 198, nº 1-3, p. 426-435.

Gui, M., R. Eybel, B. Asselin, S. Radhakrishnan et J. Cerps. 2012. « Influence of processing parameters on residual stress of high velocity oxy-fuel thermally sprayed WC-Co-Cr coating ». *Journal of Materials Engineering and Performance,* vol. 21, nº 10, p. 2090-2098.

Guilbault, R. 2007. *Notes de cours - Chapitre 1 - MEC 727 Tribologie*. Université du Québec - École de Technologie Supérieure: Département de génie mécanique, 30 p. Consulté le 01 novembre 2015.

Hadad, M., M. Hockauf, L. W. Meyer, G. Marot, J. Lesage, R. Hitzek et S. Siegmann. 2008. « Adhesion evaluation of multilayered based WC-Co-Cr thermally sprayed coatings ». *Surface and Coatings Technology,* vol. 202, nº 18, p. 4399-4405.

Hong, Sheng, Yuping Wu, Yugui Zheng, Bo Wang, Wenwen Gao, Gaiye Li, Guobing Ying et Jinran Lin. 2014. « Effect of spray parameters on the corrosion behavior of HVOF sprayed WC-Co-Cr coatings ». *Journal of Materials Engineering and Performance,* vol. 23, nº 4, p. 1434-1439.

Houdkovà, Šárka, Michaela Kasparova et Frantisek Zahalka. 2010. « The influence of spraying angle on properties of HVOF sprayed hardmetal coatings ». *Journal of Thermal Spray Technology,* vol. 19, nº 5, p. 893-901.

Karthikeyan, S., V. Balasubramanian et R. Rajendran. 2014. « Developing empirical relationships to estimate porosity and microhardness of plasma-sprayed YSZ coatings ». *Ceramics International,* vol. 40, nº 2, p. 3171-3183.

Kennametal, STELLITE. 2006. *HVOF Equipment* 2p. < http://www.stellite.com >. Consulté le 20 september 2015.

LGMS-9011-B, Goodrich landing Gear Specification. 2008. *Thermal Spray Powder Tungsten Carbide* Canada, 10 p.

LGPS-1301-D, Goodrich landing Gear Specification. 2009. *Application of HVOF Thermal Spray Coatings*. Canada, 21 p.

Lima, Rogerio S., et Basil R. Marple. 2005. « Process temperature/velocity-hardness-wear relationships for high-velocity oxyfuel sprayed nanostructured and conventional cermet coatings ». *Journal of Thermal Spray Technology,* vol. 14, nº 1, p. 67-76.

MacKenzie, Dave. 2008. *Surface Texture Measurement Fundamentals*. Coll. « Technical Seminar Metrology Center Open House », 54 p. < http://www.metrologycenter.com/Open%20House/Surface%20Texture%20Measurement%20Fundamentals%20For%20Metrology%20Center%20Open%20House.pdf >. Consulté le 31 octobre 2015.

Malvern. 2012. *Mastersizer 3000: Une granulométrie plus intelligente*. 20 p. < http://www.malvern.com/fr/Assets/MRK1872F.pdf >. Consulté le 23 octobre 2015.

Moreau, C., J.-F Bisson, R. S. Lima et B. R. Marple. 2005. « Diagnostics for advanced materials processing by plasma spraying ». In *16th International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC-16)*. (Taormina, Italy) Vol. 77, p. 443–462. Pure Appl. Chem.

Murugan, K., A. Ragupathy, V. Balasubramanian et K. Sridhar. 2014. « Optimizing HVOF spray process parameters to attain minimum porosity and maximum hardness in WC-10Co-4Cr coatings ». *Surface and Coatings Technology,* vol. 247, p. 90-102.

Oerlikon, Metco. 2014. *High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Solutions* 16 p. < http://www.oerlikon.com >. Consulté le 27 septembre 2015.

Oerlikon, Metco. 2015. *Thermal Spray Materials Guide*. 52 p. < http://www.oerlikon.com >. Consulté le 22 Octobre 2015.

Parker, D. 2003. « Fracture and residual stress charcterisation of tungsten carbide 17%-cobalt thermal-spray coatings applied to high strenght steel fatigue specimens ». University of Florida 155 p.

Parker, Donald S., Bruce Sartwell, Keith Legg, Jerry Schell, John Sauer, Paul Natishan, Dennis Dull, John Falkowski, Philip Bretz, Jon Devereaux et Craig Edwards ·. 2004. *Validation of HVOF WC/Co Thermal Spray Coatings as a Replacement for Hard Chrome Plating on Aircraft Landing Gear*. Washington, DC: Naval Research Laboratory, 280 p. < http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a422266.pdf >. Consulté le 04 décembre 2015.

Pawlowski, Lech. 2008. *The science and engineering of thermal spray coatings*, 2nd ed.: Chichester John Wiley & Sons, 656 p.

Perrin, A. 2007. « Microscopie électronique à balayage et microanalyse ». < http://www.cmeba.univ-rennes1.fr/Principe_MEB.html >. Consulté le 12 janvier 2015.

Rapport-Gratuit.com

Picas, J. A., M. Punset, M. T. Baile, E. Martin et A. Forn. 2011. « Effect of oxygen/fuel ratio on the in-flight particle parameters and properties of HVOF WC-CoCr coatings ». *Surface and Coatings Technology,* vol. 205, nº SUPPL. 2, p. S364-S368.

Picas, Josep A., Elisa Ruperez, Miquel Punset et Antonio Forn. 2013. « Influence of HVOF spraying parameters on the corrosion resistance of WC-CoCr coatings in strong acidic environment ». *Surface and Coatings Technology,* vol. 225, p. 47-57.

Randall, G.M. 1994. *Powder metallurgy science* (1994), second edition. Princeton, New Jersey: Metal Powder Industries Federation, 472 p.

SAE-J442. 2008. *SAE Standard - Test Strip, Holder and Gage for Shot Peening*. USA, 8 p.

Sauer, J. P., et P. Sahoo. 2001. « HVOF Process Control Using Almen and Temperature Measurement ». In *Thermal Spray 2001 New Surfaces for a New Millennium: Proceedings of the International Thremal Spray Conferences, May 28, 2001 - May 30, 2001*. (Singapore, Singapore), p. 791-796. Coll. « Proceedings of the International Thermal Spray Conference »: ASM International.

Schwetzke, R., et H. Kreye. 1999. « Microstructure and properties of tungsten carbide coatings sprayed with various high-velocity oxygen fuel spray systems ». *Journal of Thermal Spray Technology,* vol. 8, nº 3, p. 433-439.

Sheng, Hong, Wu Yuping, Zheng Yugui, Wang Bo, Gao Wenwen et Lin Jinran. 2013. « Microstructure and electrochemical properties of nanostructured WC-10Co-4Cr coating prepared by HVOF spraying ». *Surface & amp; Coatings Technology,* vol. 235, p. 582-588.

Sobolev, V. V., et J. M. Guilemany. 2004. *High velocity oxy-fuel spraying theory, structure-property relationships and applications*. London: Maney, 397 p.

Stellite, Coatings. 2006. *Jet kote III system: Operation and Maintenance Manual for Deloro Stellite Surface Technologies* (May 2006). Goshen, Indiana USA, 155 p.

TLP-020, Tecnickrome Laboratory Procedure. 2012. *Metalographie (Évaluation)*. Montréal, Québec, Canada, 8 p.

TPS-1700, Tecnickrome process specification. 2014. *Application of HVOF Thermal Spray Coating*. Montréal, Québec, Canada, 20 p.

Vanderesse, N. 2007. *Presentation- Image Processing and Analysis for Everyone*. Université du Québec - École de Technologie Supérieur (ETS): Departement de Génie Mécanique, 98 p. Consulté le 20 Novembre 2015.

Zhao, Lidong, Matthias Maurer, Falko Fischer, Robert Dicks et Erich Lugscheider. 2004. « Influence of spray parameters on the particle in-flight properties and the properties of HVOF coating of WC-CoCr ». *Wear,* vol. 257, nº 1-2, p. 41-46.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES