

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbas

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie Mécanique



THESE

Présentée en vue d'obtenir le grade de

DOCTEUR

En génie mécanique

Option : Matériaux

Par : DJEFFAL ALI

Titre de la thèse

**Utilisation de l'interférométrie à laser dans l'étude de
l'usure et texture d'un matériau protecteur rentré
en friction avec TiAlV-6-4**

Jury :

Mr. BOUKHOULDA Farouk Benallal	Pr. (UDL SBA)	Président
Mr. BOUNAZEF Mokhtar	Pr. (UDL SBA)	Directeur de thèse
Mr. MEGUENI Abdelkader	Pr. (UDL SBA)	Membre
Mr. HANNANE Farouk	Pr. (USD Blida)	Membre
Mr. ABERKANE Meziane	Pr. (UMM Tizi ousou)	Membre
Mr. BELOUHRANI Mohamed Amine	Pr. (EMP Bordj El Bahri)	Membre
Mr. TEMMAR Mustapha	MC. (USD Blida)	Invité

Année Universitaire: 2012 - 2013

Remerciements

Je tiens en premier lieu à témoigner ma profonde gratitude à celui qui est devenu un exemple à suivre, Je remercie ici le directeur de cette thèse Mr BOUNAZEF MOKHTAR pour ce qu'il représente: un homme aux compétences scientifiques fortes, aux qualités humaines rares et d'une grande ouverture d'esprit.

Je tiens à remercier chaleureusement les membres de jury Mr BOUKHOULDA Farouk ; Mr MEGUENI Abdelkader; Mr HANNANE Farouk ; Mr ABERKANE Meziane ; Mr BELOUCHRANI Mohamed Amine ; Mr TEMMAR Mustapha ; pour tout effort fourni afin de juger ce travail.

D'autre part, je remercie Mr OUADJED Hakim, (Université de Mascara) pour m'avoir donné une aide précieuse dans la partie mathématique de ma thèse.

J'ai laissé ceux que j'aime beaucoup plus dans cette vie en dernier, J'exprime mes plus sincères reconnaissances et remerciements particuliers à mes parents pour tout leurs encouragements et leurs conseils et tout effort fournis durant toutes ces années d'études.

DJEFFAL ALI

Dédicaces

*Je dédie ce travail à mes parents,
à mes frères : HOUCINE, SALIM, MOUMEN,
à ma petite nièce OUMAIMA WISSAME,
et à tout le reste de ma famille,*

Sommaire

	Pages
Résumé	01
Introduction	02
Chapitre I : Généralités sur les matériaux abrasables.....	05
Chapitre II : Aspects de l'usure et de la topographie des surfaces des matériaux abrasables.....	32
Chapitre III : Méthode des plans d'expériences.....	61
Chapitre IV : Approche expérimentale et modélisation du comportement.....	91
Conclusion générale	143
Annexe A	145
Annexe B	151
Annexe C	162
Annexe D	170
Références bibliographiques	171

Liste des Figures

	Pages
Chapitre I	
Figure I.01 : <i>Présentation des positions des joints abradables.....</i>	07
Figure I.02 : <i>Présentation du principe de base de la projection thermique....</i>	09
Figure I.03 : <i>Schéma de principe de la projection à la flamme.....</i>	11
Figure I.04 : <i>Schéma de principe de la projection HVOF.....</i>	12
Figure I.05 : <i>Schéma de principe du canon à détonation.....</i>	13
Figure I.06: <i>Schéma de principe de la projection à l'arc.....</i>	13
Figure I.07 : <i>Principe de la projection thermique plasma.....</i>	16
Figure I.08 : <i>Schéma de la dynamique de l'arc et de l'écoulement du jet dans une torche plasma.....</i>	17
Figure I.09 : <i>Schéma de principe de la construction de dépôt par projection thermique.....</i>	18
Figure I.10 : <i>Classification des joints abradables en fonction de la température d'utilisation.....</i>	21
Figure I.11 : <i>Micrographie au MEB de la poudre NiCrAl-BN.....</i>	26
Figure I.12 : <i>Spectre de la poudre NiCrAl- BN.....</i>	27
Figure I.13 : <i>Répartition des granulométries de la poudre NiCrAl-BN.....</i>	27
Figure I.14 : <i>Micrographie au MEB du dépôt NiCrAl- BN.....</i>	30
 Chapitre II	
Figure II.01 : <i>Microstructure au MEB d'un matériau abradable élaboré par projection thermique.....</i>	34
Figure II.02 : <i>Représentation schématique d'une coupe d'un dépôt.....</i>	35
Figure II.03 : <i>Présentation de l'étalement d'une lamelle de Nickel.....</i>	38
Figure II.04 : <i>Morphologie de particules d'alumine projetées par plasma en fonction de leurs vitesses et température avant impact.....</i>	39
Figure II.05 : <i>Représentations schématiques de mauvais étalements de lamelles qui génèrent des pores.....</i>	41

Liste des Figures

Figure II.06 :	<i>Traitement d'image d'une éprouvette NiCrAl-BN-Polyester (E13).....</i>	42
Figure II.07 :	<i>Traitement d'image d'une éprouvette NiCrAl-BN-Polyester (E7).....</i>	42
Figure II.08 :	<i>Traitement d'image de la troisième éprouvette (E4).....</i>	43
Figure II.09 :	<i>Schématisation du modèle d'abradabilité.....</i>	45
Figure II.10 :	<i>Schématisation d'un abradable usiné par la pale.....</i>	45
Figure II.11 :	<i>Usure par abrasion.....</i>	47
Figure II.12 :	<i>Présentation schématique d'usure adhésive.....</i>	47
Figure II.13 :	<i>Présentation schématique d'usure érosive.....</i>	48
Figure II.14 :	<i>Configuration du banc d'essais SULZER-METCO.....</i>	50
Figure II.15 :	<i>Présentation de la forme de la carte d'usure.....</i>	51
Figure II.16 :	<i>Représentation isométrique d'une surface.....</i>	52
Figure II.17 :	<i>Les quatre premiers ordres de défauts superficiels.....</i>	54
Figure II.18 :	<i>Lignes enveloppes supérieure et inférieure.....</i>	55
Figure II.19 :	<i>Présentation des paramètres R_a et R_q.....</i>	55
Figure II.20 :	<i>Rugosimètre tactile.....</i>	58
Figure II.21 :	<i>Rugosité de surface obtenue à l'aide d'un profilomètre laser.....</i>	59
 Chapitre III		
Figure III.01 :	<i>L'environnement du système.....</i>	62
Figure III.02 :	<i>Présentation du domaine d'étude d'un seul facteur.....</i>	63
Figure III.03 :	<i>Représentation du domaine d'étude de deux facteurs.....</i>	64
Figure III.04 :	<i>Représentation de l'effet d'un facteur dans le plan vertical passant par x_2.....</i>	71
Figure III.05 :	<i>Le résidu se décompose en deux écarts.....</i>	83
 Chapitre IV		
Figure IV.01 :	<i>Photo réelle du banc d'essai.....</i>	92
Figure IV.02 :	<i>Description des différents accessoires du banc d'essai.....</i>	93
Figure IV.03 :	<i>Trace d'usure sur l'échantillon.....</i>	94

Liste des Figures

Figure IV.04 :	<i>Schéma d'usure et de transfert de matériau.....</i>	96
Figure IV.05 :	<i>Variation de la réponse en fonction des valeurs codées de la vitesse d'incursion (x_1).....</i>	101
Figure IV.06 :	<i>Variation de la réponse en fonction de la vitesse d'incursion x_1.....</i>	102
Figure IV.07 :	<i>Variation de la réponse en fonction des valeurs codées de la vitesse linéaire.....</i>	103
Figure IV.08 :	<i>Variation de la réponse en fonction de la vitesse linéaire x_2...</i>	103
Figure IV.09 :	<i>Variation de la réponse en fonction des valeurs codées de la profondeur d'incursion x_3.....</i>	104
Figure IV.10 :	<i>Variation de la réponse en fonction de la profondeur d'incursion x_3.....</i>	105
Figure IV.11 :	<i>Effet combiné de la vitesse linéaire constante, et de la vitesse d'incursion.....</i>	106
Figure IV.12 :	<i>Effet combinée de la profondeur constante et de vitesse d'incursion.....</i>	108
Figure IV.13 :	<i>Effet combinée de la profondeur constante et de vitesse linéaire.....</i>	109
Figure IV.14 :	<i>Variation de la réponse en fonction simultanée de la profondeur et de la vitesse d'incursion.....</i>	112
Figure IV.15 :	<i>Variation de la réponse en fonction simultanée de la vitesse linéaire et de la vitesse d'incursion.....</i>	115
Figure IV.16 :	<i>Variation de la réponse en fonction de la vitesse linéaire et la profondeur d'incursion.....</i>	117
Figure IV.17 :	<i>Cartographie en trois dimensions de la rugosité d'une trace d'usure.....</i>	120
Figure IV.18 :	<i>Présentation de l'interférométrie à laser</i>	121
Figure IV.19 :	<i>Présentation des directions de mesure du paramètre de rugosité S_a.....</i>	121
Figure IV.20 :	<i>Variation de la rugosité S_a en fonction des valeurs codées de la vitesse d'incursion.....</i>	125
Figure IV.21 :	<i>Variation de la rugosité S_a en fonction de la vitesse d'incursion.....</i>	126

Liste des Figures

Figure IV.22 :	<i>Variation de la rugosité S_a en fonction des valeurs codées de la vitesse linéaire.....</i>	127
Figure IV.23 :	<i>Variation de la rugosité S_a en fonction de la vitesse linéaire réelle.....</i>	127
Figure IV.24 :	<i>Variation de la rugosité S_a en fonction des valeurs codées de la profondeur d'incursion.....</i>	128
Figure IV.25 :	<i>Variation de la rugosité S_a en fonction de la profondeur réelle d'incursion.....</i>	129
Figure IV.26 :	<i>Effet combiné de la vitesse linéaire constante, et de la vitesse d'incursion.....</i>	130
Figure IV.27 :	<i>Effet combiné de la profondeur d'incursion constante, et de la vitesse d'incursion.....</i>	131
Figure IV.28 :	<i>Effet combiné de la profondeur d'incursion constante et de la vitesse linéaire.....</i>	133
Figure IV.29 :	<i>Variation de la rugosité S_a en fonction de la profondeur d'incursion et la vitesse linéaire.....</i>	134
Figure IV.30 :	<i>Variation de la rugosité S_a en fonction de la vitesse d'incursion et la vitesse linéaire.....</i>	137
Figure IV.31 :	<i>Variation de la rugosité S_a en fonction de la profondeur d'incursion et la vitesse d'incursion.....</i>	139

Liste des Tableaux

	Pages
Chapitre I	
Tableau I.01 : <i>Composition de la Poudre NiCrAl- BN.....</i>	25
Tableau I.02 : <i>Paramètres de projection initial du NiCrAl-BN.....</i>	28
Tableau I.03 : <i>Nouveaux Paramètres de projection du NiCrAl-BN.....</i>	29
Tableau I.04 : <i>Paramètres de projection du NiCrAl-BN.....</i>	30
Chapitre II	
Tableau II.01 : <i>Valeur des porosités de l'éprouvette (E13).....</i>	42
Tableau II.02 : <i>Valeur des porosités de l'éprouvette (E7).....</i>	43
Tableau II.03 : <i>Valeur des porosités de l'éprouvette (E4).....</i>	43
Chapitre III	
Tableau III.01 : <i>Exemple de passage du plan d'expérimentation à la matrice d'expériences.....</i>	65
Tableau III.02 : <i>Matrice d'expériences pour 2 facteurs à 2 niveaux.....</i>	68
Tableau III.03 : <i>Matrice d'expérience avec interaction.....</i>	72
Tableau III.04 : <i>Matrice d'expériences pour 2 facteurs à 2 niveaux avec interaction.....</i>	73
Tableau III.05 : <i>Tableau de l'analyse de régression.....</i>	87
Chapitre IV	
Tableau IV.01 : <i>Composition massique de la poudre : NiCrAl-BN- Polyester.....</i>	92
Tableau IV.02 : <i>Conditions des tests d'abrasivité.....</i>	95
Tableau IV.03 : <i>Matrice d'expériences.....</i>	98

Liste des Tableaux

Tableau IV.04 :	<i>Valeurs des réponses en fonction de la variation simultanée de la vitesse linéaire et la profondeur d'incursion.....</i>	113
Tableau IV.05 :	<i>Valeurs des réponses en fonction de la variation simultanée de la vitesse linéaire et la vitesse d'incursion...</i>	113
Tableau IV.06 :	<i>Valeurs des réponses en fonction de la variation simultanée de la profondeur d'incursion et de la vitesse d'incursion.....</i>	116
Tableau IV.07 :	<i>Valeurs des réponses en fonction de la variation simultanée de la profondeur d'incursion et de la vitesse linéaire.....</i>	116
Tableau IV.08 :	<i>Réponses en fonction de la variation simultanée de la vitesse et la profondeur d'incursion.....</i>	118
Tableau IV.09 :	<i>Valeurs des réponses en fonction de la variation simultanée de la vitesse d'incursion et la vitesse linéaire...</i>	119
Tableau IV.10 :	<i>Valeurs de la rugosité S_a obtenue lors des tests expérimentaux.....</i>	122
Tableau IV.11 :	<i>: Réponses en fonction de la variation combinée de la vitesse d'incursion et la profondeur d'incursion.....</i>	135
Tableau IV.12 :	<i>Valeurs des réponses en fonction de la variation combinée de la vitesse d'incursion et la vitesse linéaire.....</i>	136
Tableau IV.13 :	<i>Valeurs des réponses en fonction de la variation simultanée de la profondeur et de la vitesse d'incursion....</i>	138
Tableau IV.14 :	<i>Valeurs des réponses en fonction de la variation simultanée de la profondeur d'incursion et de la vitesse linéaire.....</i>	138
Tableau IV.15 :	<i>Valeurs des réponses en fonction de la variation simultanée de la vitesse linéaire et la profondeur d'incursion.....</i>	140
Tableau IV.16 :	<i>Valeurs des réponses en fonction de la variation de la vitesse linéaire et de la vitesse d'incursion.....</i>	141

Liste des symboles et notations

Abréviations	Signification
HVOF	Projection à la flamme supersonique (High Velocity Oxyfuel Flame)
MPa	Méga pascal
APS	Pulvérisation du plasma sous atmosphère (Atmospheric Plasma Spraying)
IPS	Projection plasma sous atmosphère inerte (Inert Plasma Spraying)
CAPS	Projection du plasma sous atmosphère contrôlée (Controlled Atmosphere Plasma Spraying)
LPPS	Projection plasma sous basse pression (Low Pressure Plasma Spraying)
VPS	Projection plasma sous pressions de travail (Vacuum Plasma Spraying)
LERMPS	Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux, Procèdes et Surfaces
MEB	Microscope électronique balayage
LEI	Ligne enveloppe inférieure
LES	Ligne enveloppe supérieure
3D	Trois dimensions
2D	Deux dimensions
ddl	Degré de liberté
<i>SCEE</i>	Somme des carrés des écarts expérimentaux
<i>SCEL</i>	Somme des carrés des écarts
<i>SCER</i>	Somme des carrés des écarts des résidus
<i>STCE</i>	Somme totale des carrés des écarts
SCM	Somme des carrés des réponses mesurées (expérimentales) corrigée de la moyenne
PRESS	Prediction Error Sum of Squares
<i>Obs</i>	Observé
Max	Maximal
Min	Minimal
V_{inc}	Vitesse d'incursion
V_{lin}	Vitesse de rotation
Pro	Profondeur d'incursion

Liste des symboles et notations

Symbole et Notation	Lecture
m	Mètre
s	Second
A	Ampère
V (Chapitre I)	Volt
V	Vanadium
Ni	Nickel
Cr	Chrome
Al	Aluminium
BN	Nitru de bore
Ti	Titane
Mo	Molybdène
Co	Cobalt
Si	silicium
Fe	Fer
Mn	Manganèse
μm	Micron mètre
mm	Millimètre
K	Degré Kelvin
$^{\circ}\text{C}$	Degré Celsius
M	Métal
trs	Tour
min	Minute
g	Gramme
W	Watt
%	Pourcentage
L (Chapitre I)	Litre
L	Longueur
Tt	Température de transition
<i>R</i>	Rugosité
<i>Ra</i>	L'écart arithmétique moyen
<i>Rq</i>	L'écart quadratique moyen

Liste des symboles et notations

Sa	Moyenne arithmétique des écarts
Sq	Moyenne quadratique des écarts
$Z(x)$	L'écart entre sommet du point de coordonnées (x,) et celle du plan moyen
Ny	Nombre des points échantillonnés dans la direction y
Nx	Nombre de points échantillonnés dans la direction x
N	Nombre d'expériences
n	Nombre de coefficients
Y	Réponse
x_i	Valeur codée du facteur « i »
$x_{i,1}$	La valeur lue dans la matrice d'expériences pour le i^{eme} traitement, pour le facteur vitesse d'incursion
$x_{i,2}$	La valeur lue dans la matrice d'expériences pour le i^{eme} traitement, pour le facteur vitesse linéaire
$x_{i,3}$	La valeur lue dans la matrice d'expériences pour le i^{eme} traitement, pour le facteur profondeur d'incursion
K	Nombre de facteur
a_i	Coefficient du facteur « i »
E_i	L'effet du facteur « i »
I	Matrice unité
tX	Transposé de la matrice « X » de dimension (n, p)
X^{-1}	Inverse de la matrice « X »
u_{\min}	Borne inférieure des niveaux
u_{\max}	Borne supérieure des niveaux
u_i	La valeur sur laquelle on va effectuer le codage
e	Résidu
S_{yk}	L'écart type sur la réponse
C	<i>Cochran</i>
$\overline{y_k}$	Moyenne des réponses observées
$\hat{y}_k = Y_k^{est}$ $k=1 \dots N$	Réponse estimée à l'aide du modèle, pour une ligne du plan d'expériences,
Y_{ki}	Réponse observée lors de la réalisation des expériences, $k = 1 \dots N, i = 1 \dots r$

Liste des symboles et notations

Δ_k	L'écart entre deux réponses
S_y^2	Variance des mesures
S_i^2	Variance sur un effet
t_i	Test " <i>t</i> " de <i>Student</i> sur l'effet du facteur « <i>i</i> »
α	Risque choisit
F	Test de Fisher-Snedeco
R^2	Coefficient de détermination de la qualité descriptive du modèle
$R^2_{ajusté}$	Coefficient de détermination ajusté de la qualité descriptive du modèle
Q^2	Coefficient de détermination de la qualité prédictive du modèle
H	Matrice de Hat
h_i	l' $i^{ème}$ élément diagonal de la matrice H (<i>Hat Matrix</i>)

ملخص

طرق و وسائل الحساب المقدمة من طرف طريقة التصاميم التجريبية تساعد على مواكبة الدراسات التجريبية المتخصصة لحل مشكل فعالية الاحتكاك و حالة السطح للمواد سهلة التفنت المتحصل عليها من طريقة الرش الحراري. النمذجة المتحصل عليها توضح بصفة جيدة حالة سطح المادة المدروسة حيث أن النموذج الرياضي القائم على أسلوب إحصائي لم يؤكد فقط التجارب المتحصل عليها، بل أكد أيضا القدرة على التنبؤ بالنتائج التي لم يتم تنفيذها أثناء الاختبار. حالة سطح المادة المدروسة تأثر بصفة مباشرة على مردود التوربينات وهذا لسبب أن هذه المادة موضوعة بصفة مباشرة داخل هذه الآلة، مما يستوجب الاختيار الأمثل لعوامل الاحتكاك ما بين الشفرة و المادة.

كلمات مفتاحية

الاحتكاك, حالة سطح, قياس التداخل الضوئي, المواد سهلة التفنت, الرش الحراري, التصاميم التجريبية

Résumé

Les moyens de calcul et d'optimisation que la méthode des plans d'expériences nous offre pour joindre les études expérimentales effectuées sur l'usure, la rugosité et la texture de surface du matériau abradable obtenu par projection thermique afin de remplacer les labyrinthes d'étanchéité, et la théorie permettant la modélisation du phénomène physique ont été utilisés pour résoudre le problème d'efficacité de la couche déposée. La modélisation obtenue décrit convenablement le paramètre de rugosité étudié ; le modèle mathématique qui s'est basé sur une méthode statistique permet non seulement de confirmer les expériences effectuées mais aussi de prédire des résultats dont aucun essai n'a été exécuté. La rugosité de la surface du matériau agit directement sur la perte d'efficacité de la turbine sur laquelle le matériau a été installé ; le choix de certains facteurs de friction aubes/matériau est important pour obtenir justement l'inverse.

Mots Clés

Usure ; Texture ; Interférométrie laser ; Matériau abradable ; Projection thermique ; Plan d'expériences

Abstract

Means for calculating and optimising that the method of experimental designs we offer to join the experimental studies of wear, roughness and surface texture of the abradable material obtained by thermal spraying to replace the labyrinths of sealing, and the theory for the modeling of the physical phenomena have been used to solve the problem of efficiency of the sprayed layer. The obtained modeling aptly describes the roughness of studied parameter; the mathematical model which is based on a statistical method can not only confirm the experiments, but also to predict results that no test was performed. The surface roughness of the material acts directly on the loss of efficiency of the turbine on which the material has been installed; the choice of certain factors of friction blades / material is important to get just the opposite.

keywords

Wear; Texture ; laser interferometer ; Abradable material ; Thermal spraying ; Design of experiments

INTRODUCTION

Le frottement est très présent autour de nous : rails et roues des chemins de fer, pièces mobiles de machines électriques, freins, la plupart des mécanismes utilisés dans l'espace...etc. Dans tous les cas il est nécessaire d'essayer de bien comprendre les mécanismes du frottement car dans tous les types d'usure évoqués il provoque la détérioration des surfaces ou/et des modifications de cotes dans les assemblages notamment dans les compresseurs et turbines. En fonctionnement, et lorsqu'il s'agit d'un turbo réacteur, il est important de contrôler le jeu radial entre les extrémités externes des aubes et le carter afin de maintenir en permanence une distance minimale mais suffisante entre les extrémités libres des aubes et le carter pour éviter tout contact pouvant nuire à la solidité mécanique de la roue du compresseur radial ou de la turbine et par conséquent éviter des bords de fuite provoquant des pertes de rendement ; si cette règle n'est pas respectée, le système se dirige vers des incidents pratiques, vers la réduction de la durée de vie, et dans certains cas vers des situations accidentelles. Cette sensibilité du phénomène d'usure qui règne sur le comportement est liée aux matériaux constituant les aubages, principalement les pièces mobiles.

La réduction et la maîtrise du jeu rotor/stator constitue de ce point de vue un enjeu majeur, elle amène l'industrie à mettre en disposition une méthode de traitement de surface permettant l'obtention de revêtements protecteurs avec une forte efficacité, tout en prenant en compte à la fois la matière première au niveau de sa consommation par usure, mais également la qualité du revêtement obtenu. Il s'agit de revêtements projetés sur la paroi interne du carter qui s'usent au contact des bouts d'aube appelés : revêtement abradable.

Les revêtements abradables sont élaborés pour "s'abradés" préférentiellement lorsqu'ils sont mis en contact avec un composant de contact. Le revêtement est dimensionné pour ne pas créer de dommages à la surface non revêtues. Ces revêtements réduisent le risque d'endommagement d'une aube et en même temps permettent d'accroître le rendement et les performances de la turbomachine en ménageant le juste jeu nécessaire pour le rotor. Les revêtements abradables se mettent en forme principalement par la technique de la projection

INTRODUCTION

thermique puisqu'elle offre des capacités d'épaisseurs supérieures, la possibilité de traiter des pièces de très grandes dimensions, la possibilité de faire du traitement sur site. Ce procédé de projection à haute température permet de déposer des matériaux à haut point de fusion sur un substrat maintenu à une température faible ce qui permet aux revêtements abrasables de pouvoir travailler dans différentes températures de fonctionnement et différents environnements.

Ces revêtements abrasables sont maintenant appliqués dans le cas des turbines, des turbos de moteurs d'automobiles, de pompes et de compresseurs pour assurer un contrôle parfait des tolérances dimensionnelles des composants ; cela ramène les ingénieurs et les chercheurs à rechercher constamment pour améliorer les performances et apporter de la valeur ajoutée. L'un des obstacles majeurs pour mener à bien ces recherches afin de comprendre les mécanismes d'usure ou bien les mécanismes de consommation de ce matériau abrasable est la méconnaissance de l'interaction aube/abrasable et l'obtention de la valeur du jeu au contact qui dépendent à la fois du comportement mécanique du matériau abrasable et des paramètres de fonctionnement de la turbomachine.

Dans cette optique, ce travail a pour objectif d'enrichir les connaissances de ce "matériau exceptionnel" par l'identification des différents aspects participant à l'usure de ce dépôt en fonctionnement, et l'identification topographique par l'analyse de l'état des surfaces de la trace d'usure laissée par l'ailette après être rentrée en friction avec le matériau abrasable. Dans ce cadre, le raisonnement s'articule sur une organisation d'une campagne expérimentale dont le but consiste à apporter des éléments d'information qui permettent par la suite de construire des modèles mathématiques du domaine expérimental. Ces modèles étant l'élément clef de la stratégie, parce qu'ils permettent de réaliser une comparaison entre les différents paramètres de fonctionnement influant soit l'usure, soit la texture du matériau après avoir subi la friction avec le TiAlV-6-4.

Pour atteindre l'objectif recherché dans cette thèse, nous avons tenu compte des procédés d'élaboration et des différents aspects générant la constitution morphologique du matériau abrasable. Nous avons également pris en compte la relation entre la morphologie et la fonction de ce dépôt protecteur. La démarche proposée dans notre plan de travail pour l'étude de la texture et l'usure du matériau abrasable s'appuie sur la succession de quatre étapes :

INTRODUCTION

Le chapitre I est donc essentiellement rédigé pour mettre en évidence une étude bibliographique sur les matériaux abrasables; nous avons choisi de traiter la question en commençant de la fonction du matériau et de ses objectifs attendus vers son élaboration par la technique de la projection thermique.

Au chapitre II, on a donné une attention particulière à la microstructure et son impact sur le comportement mécanique du revêtement. La première activité a donc été d'acquérir une compréhension supplémentaire sur la morphologie et la texture du matériau abrasable ; une procédure d'analyse d'images a été utilisée pour quantifier les différents paramètres géométriques des éléments structuraux des revêtements abrasables. Cette description est ensuite utilisée pour établir la relation entre la morphologie et la fonction du matériau. Pour le mesurage des différents facteurs décrivant la rugosité qui apparaît au niveau de la surface abrasable sous l'action des différents paramètres de fonctionnements, on utilise une technique au laser permettant de définir les critères identifiant la rugosité des états de surfaces, puis les analyser dont le but d'augmenter le rendement du système.

Au chapitre III, nous présentons la technique particulière liée à l'optimisation d'un procédé ou d'un problème technique. Cette méthode permet de trouver la configuration optimale de l'outillage qui donne la meilleure compréhension du problème traité. Dans ce chapitre, la méthode des plans d'expériences adaptée à la résolution de notre problème est expliquée en détails tout en présentant les pré-requis nécessaires pour mener un plan d'expériences ; les étapes sont alors clairement exposées.

Après avoir fait le point sur la définition du matériau abrasable et présenté l'aspect comportemental entre la microstructure et l'usure de l'abrasable ; le chapitre IV fait le point par une analyse détaillée sur le problème traité. Une sélection des paramètres influant sur le procédé est faite. Des plages de variation pour chacun d'eux sont définies, l'expérience sur le banc d'essai est exécutée, un modèle mathématique est alors calculé puis une comparaison entre les paramètres agissant sur la rugosité est faite. Il est donc possible de connaître l'influence quantitative et qualitative de chacun des paramètres testés dans le plan d'expériences sur la variation du taux d'usure, et sur la rugosité de la surface abrasable.

CHAPITRE I

Généralités sur les matériaux abradables

CHAPITRE I

Généralités sur les matériaux abrasables

I-1 Introduction :

Les concepteurs des turbomachines ont été amenés à considérer l'utilisation d'un revêtement abrasable entre le sommet des aubes et le carter comme une des solutions favorable pour réduire les dégâts causés en cas de contacts directs entre les aubes et le carter. Cela se traduit par le fait que ce matériau porte des propriétés un peu spéciales et différentes que les autres matériaux connus à l'échelle de l'industrie.

Lorsqu'il s'agit d'un matériau abrasable, il est très important de connaître les différents aspects méthodiques générant la constitution morphologique de ce dernier, parce que les demandes des industries pour ces revêtements protecteurs sont de plus en plus contraignantes vu le rôle qu'ils jouent. Ce chapitre a pour but d'apporter des informations bibliographiques sur le fonctionnement et le rôle des matériaux abrasables, tout en mettant en évidence le procédé d'élaboration qui est appelé projection thermique. La projection thermique est une technique attrayante pour la réalisation de ce revêtement puisqu'elle offre la possibilité de déposer une grande variété de matériaux et à mettre en forme.

En première partie, on définit le matériau abrasable, tout en exposant les zones localisées sur les turbomachines pour lesquelles la fonction du joint d'étanchéité a été mise en service.

La seconde partie est consacrée à la présentation des procédés d'élaboration des matériaux abrasables. La partie de la technique de la projection thermique est exposée avec toutes ses différentes étapes en commençant par les poudres jusqu'à l'obtention de la couche.

La troisième partie traite les différentes catégories d'abrasables et les performances attendues ainsi que les principales installations et procédures ; il en est de même pour les nuances, les propriétés, les techniques et les processus d'élaboration de ce type de matériaux. En finalité de ce chapitre nous exposons les propriétés du matériau considéré dans cette étude.

I-2 Définition du revêtement abradable

Les matériaux mous, doux et tendres s'usent et s'arrachent sous la charge imposée par un matériau abrasif. Ce comportement satisfait certaines conditions de travail de quelques systèmes mécaniques lors d'un contact d'une pièce mobile en friction avec une pièce fixe.

Le joint abradable a été introduit dans les années 1960 comme solution technologique. Placé sur les parois intérieures d'une pièce fixe en couche de quelques millimètres d'épaisseur, le revêtement abradable est conçu pour être sacrifié en cas de contact des pièces mobiles qui doivent être au plus près de pièces fixes.

L'abradabilité parfaite telle qu'elle est souhaitée est définie comme étant la facilité et la capacité du revêtement à se disloquer au contact de l'aube grâce à une faible résistance au cisaillement avec laquelle une ailette peut arracher de la matière dans le joint [1]. Même usée, la surface du revêtement doit par ailleurs garder de bonnes propriétés aérodynamiques et améliorer le rendement suivant l'étage dans lequel il est installé [2].

Le terme abradabilité découle du terme abrasion, avec l'idée que l'extrémité de l'ailette peut facilement strier le revêtement qui subit alors l'abrasion provoquée par celle là. C'est donc un processus lié à l'abrasion qui ramène le matériau à être utilisé systématiquement sur la grande majorité des moteurs d'avions, et s'est généralisé aux turbines à gaz de centrales électriques, aux turbocompresseurs pour automobiles et autres compresseurs et pompes.

I-3 Fonction des joints abradables

Dans les turbomachines, il est nécessaire de disposer d'un joint d'étanchéité pour limiter les fuites de gaz dans les compresseurs et les turbines. Le revêtement abradable est déposé en creux de carter remplit la fonction de joint d'étanchéité au sein des premiers étages de compression dans le turboréacteur (Figure I.1). Les revêtements abradables sont pour la plupart appliqués sur le stator vu que l'usure de l'ailette est indésirable.

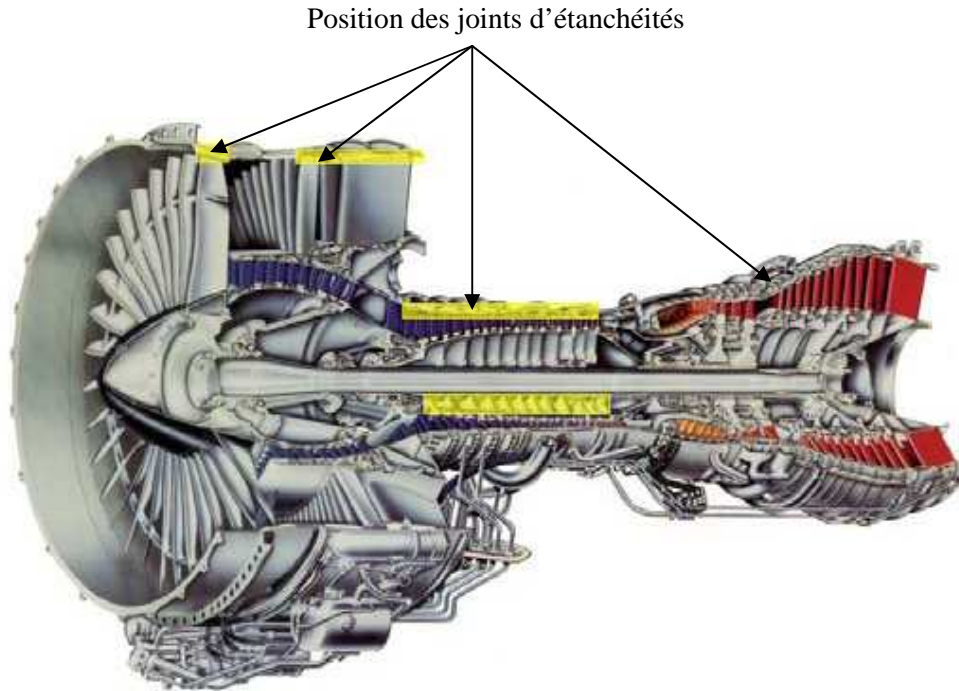


Figure I.01 : *Présentation des positions des joints abrasables*

(Source: S. Lampman, Introduction to Surface Hardening of Steels, *Heat Treating*, Vol 4, *ASM Handbook*, ASM International, 1991, p 259)

S'il n'y avait pas de revêtement sur la partie statique et qu'on devait restaurer le moteur à ses conditions d'origine, la réparation ou le changement des ailettes serait alors nécessaire, ce qui constitue une option assez coûteuse. La remise en forme de la partie statique est par contre plus facile d'un point de vue pratique lorsque celle-là est revêtue avec le matériau abrasable.

I-3-1 Sollicitations du joint en fonctionnement

Par sa localisation au droit des aubes, le revêtement abrasable est soumis à un nombre répété de contacts par l'aube. Dans toutes turbomachines, l'existence de forces de couplage entre le rotor et le stator peut conduire dans certains cas à des amplitudes de déformation considérables. Plus spécifiquement dans un moteur d'avion, plusieurs mécanismes mécaniques différents sont à l'origine de tels phénomènes [3].

Il est possible de classer quelques catégories de sollicitations selon la nature des forces d'interaction entre les deux structures :

- Lors des premiers tours du rotor, les forces d'interaction provenant des variations de pression aérodynamique se réduisent à un unique point de contact mécanique sur la circonférence entre rotor et stator, et usent le revêtement déposé en creux de carter de telle sorte qu'un jeu dynamique de l'ordre du dixième de millimètre est atteint au terme de cette phase [4] ;
- La rotation du moteur durant la phase de démarrage entraîne le déplacement radial des aubes qui viennent se plaquer contre le matériau abradable au niveau des interfaces de contact [5], cela engendre une usure périodique du revêtement de carter sous forme de l'aube.
- L'usure du joint abradable peut être due aux conditions dans lesquelles travaillent les turbomachines, l'aspiration de corps étrangers par la soufflante, notamment de la vapeur d'eau au dessus de la mer, des grains de sable...etc.
- Le jeu aube/carter de plusieurs dixièmes de millimètres se manifeste à la rupture due à la présence de charges aérodynamiques causées par la formation de flux de gaz tourbillonnaires autour des extrémités d'aubes.

I-4 Elaboration des matériaux abradables

En fonction de la technologie utilisée, les techniques de revêtement font partie d'une large gamme de procédés de traitement des surfaces. Les revêtements protecteurs avec une forte efficacité peuvent être obtenus par les techniques de la projection thermique [6].

I-4-1 Principe de la Projection thermique

La projection thermique est la technique de dépôt la plus courante du fait de sa simplicité et de son coût raisonnable [7], elle offre la facilité d'installation du dépôt et une maintenance in-situ des joints d'étanchéité dans le turboréacteur. Elle permet également l'obtention de structures composites poreuses aux propriétés remarquables. Quelle que soit la technique de la projection thermique utilisée, le principe est basé sur l'introduction de la matière à projeter dans une source d'enthalpie dotée d'énergie cinétique (Figure I.2). Le principe consiste donc à utiliser cette source de chaleur pour fondre et accélérer les matériaux introduits. Celui-ci prend alors la forme de particules pâteuses ou liquides qui heurtent,

s'étalent et se solidifient sur un substrat, formant un dépôt par empilements successifs [8, 9, 10]. La morphologie et les propriétés des dépôts dépendent de nombreux paramètres expérimentaux relatifs principalement à :

- La nature du matériau à projeter,
- La source de chaleur,
- L'atmosphère environnante,
- Le substrat

Les matériaux introduits sont utilisés sous différentes formes : poudres, baguettes ou fils continus. La source d'enthalpie peut être obtenue de deux façons distinctes :

- ✓ Par combustion/détonation des mélanges gazeux (projection à la flamme, projection par canon à détonation);
- ✓ Par ionisation de gaz de différentes natures (air, argon, hydrogène, hélium, etc.) à l'aide d'une décharge électrique ou d'une exposition à un rayonnement électromagnétique à haute fréquence (projection plasma à l'arc soufflé ou plasma radio fréquence).

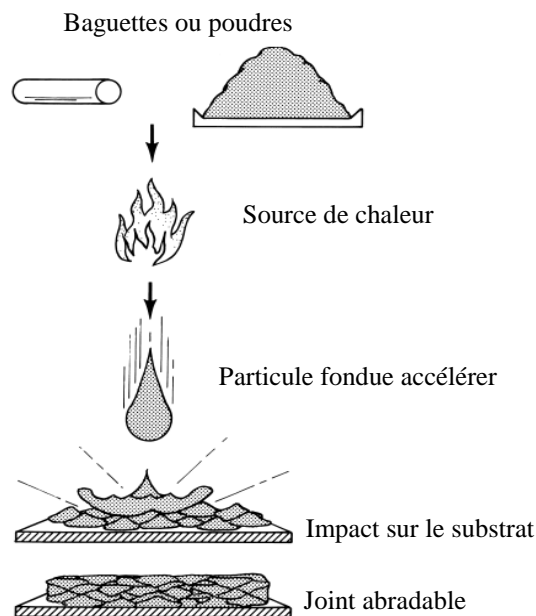


Figure I.02 : présentation du principe de base de la projection thermique

(Source: J.R. Davis & Associates, Handbook of Thermal Spray Technology; prepared under the direction of the Thermal Spray Society Training Committee; 2004 ASM International, page 31)

Le substrat est préalablement sablé et revêtu d'une couche d'accroche de quelques dixièmes de millimètres afin de garantir l'adhésion du revêtement, potentiellement sollicité par les dilatations thermiques différentielles joint/substrat en fonctionnement [11]. Le matériau qui pénètre dans la source subit un transfert thermique et cinétique, et il doit pouvoir fondre sans se décomposer (la différence entre la température de fusion et la température de décomposition ou même de sublimation doit être supérieure ou égale à 200°C), et accéléré en direction d'un substrat sur lequel il va former un revêtement par empilements successifs de particules écrasées et solidifiées [12].

Les principales techniques de la projection thermique sont :

- Projection à la flamme
- Projection à la flamme supersonique (HVOF)
- Projection à détonation
- Projection par arc électrique entre deux fils
- Projection par plasma

a) Projection à la flamme

Les pistolets à flamme sont principalement utilisés pour projeter les matériaux sous forme de poudre, de fils ou de baguettes. Le principe est fondé sur l'introduction du matériau à déposer dans la flamme (figure I.3). Ce procédé basé essentiellement sur la combustion d'un carburant sous forme gazeuse avec l'oxygène de l'air. La distance entre la buse et le substrat est comprise entre 100 mm et 200 mm afin que les particules de poudre aient un temps de séjour suffisamment long pour être fondues. [13].

La technique propose de multiples solutions pour des problèmes d'usure, de corrosion, de protection thermique, etc., via la projection mais aussi le traitement par refusion des revêtements obtenus pour améliorer leurs propriétés. Les premiers matériaux utilisés étaient le plomb et le zinc pour des applications de protection anticorrosion. Depuis, la gamme des matériaux ainsi que les applications ont été élargies. Des métaux purs comme Zn, Al, Cu, Sn, Pb, Ni, Mo, des aciers y compris des aciers inoxydables, des alliages à base de Zn, Cu, Ni ou Sn, mais aussi des polymères peuvent être utilisés comme matériaux d'apport sous forme de poudre ou en fils. [14, 15]

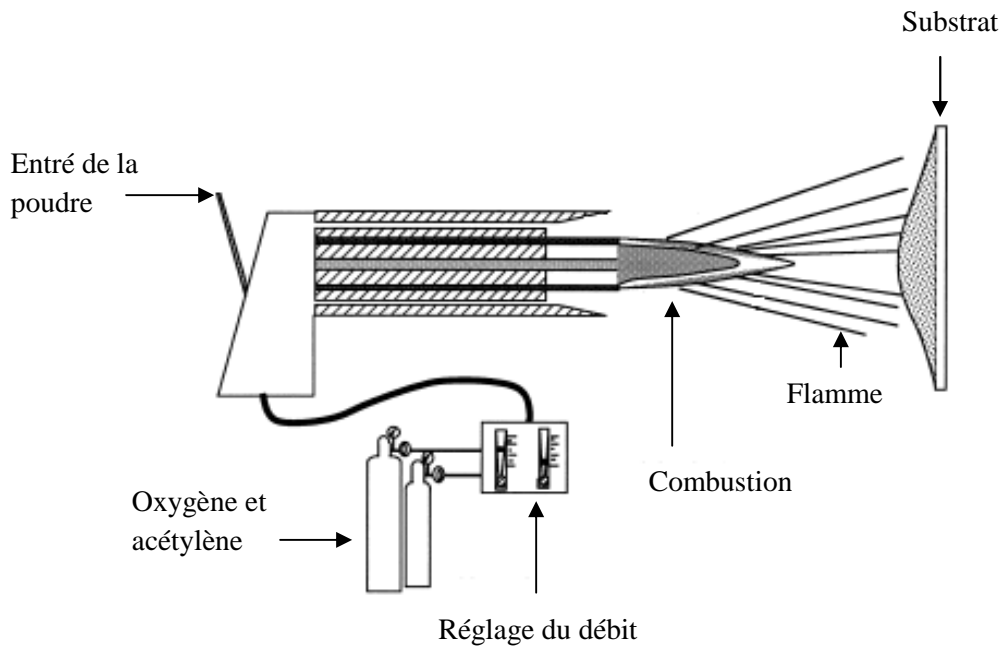


Figure I.03 : Schéma de principe de la projection à la flamme

(Source: J.R. Davis & Associates, Handbook of Thermal Spray Technology; prepared under the direction of the Thermal Spray Society Training Committee; 2004 ASM International, page 55)

b) Projection à la flamme supersonique (HVOF)

Le principe de la technique HVOF est le même que celui de la projection à la flamme. La particularité de cette technique réside dans la vitesse élevée (300 m/s à 600 m/s) des particules projetées par l'échappement des gaz de combustion issus d'une chambre à pression élevée (0,5 à 1 MPa). La réaction de réduction provoque une forte expansion du mélange gazeux qui se propage à vitesse sonique dans la tuyère et passe au-delà dans le divergent et le jet externe. Les mélanges carburant/comburant sont de type gazeux (oxygène – hydrogène/ propane/ propylène/ gaz naturel) ou liquide. Le matériau à projeter se présente généralement sous forme de poudre des métaux (Ni, Co, Mo, Cr), des alliages (MCrAlY, NiCr, NiCrAl...etc), [16; 17]. Le dépôt final génère des couches de faibles ou de fortes épaisseurs selon le nombre de passes du pistolet à faire pendant la projection.

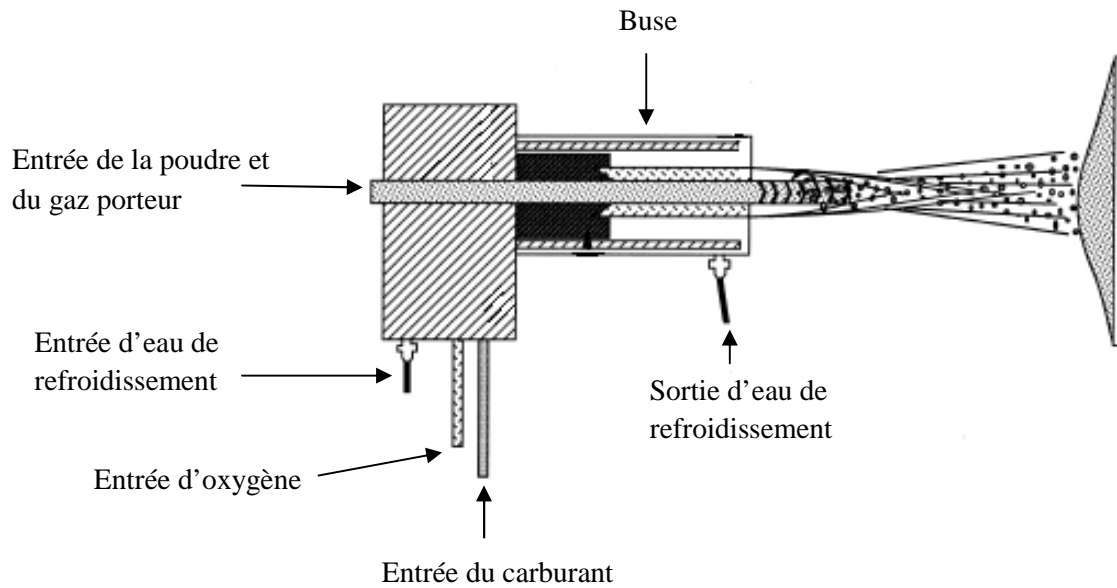


Figure I.04 : *Schéma de principe de la projection HVOF*

(Source: J.R. Davis & Associates, Handbook of Thermal Spray Technology; prepared under the direction of the Thermal Spray Society Training Committee; 2004 ASM International, page 57)

c) Projection à détonation

Le matériau d'apport sous forme de poudre, et le gaz de combustion (oxygène et acétylène) sont introduits pratiquement en même temps dans un tube de diamètre 21 mm à 25 mm et d'une longueur d'environ 1 m (tube de détonation) fermé à une extrémité (Figure I.5). Il est équipé d'un système de soupapes pour injecter les gaz et la poudre ainsi que d'un dispositif d'allumage entièrement automatisé. Grâce à une étincelle, l'onde de choc de l'explosion propulse la poudre tout au long du canon avec une vitesse proche de 1000 m/s.

Les allumages sont reproduits avec une fréquence de 4 tirs à 10 tirs par seconde et successivement suivis d'un balayage du canon avec un gaz neutre. Le revêtement obtenu possède un faible taux de porosité (moins de 1%) et une très bonne adhérence (80 MPa) mais il est limité à une épaisseur qui ne dépasse pas 300 μm .

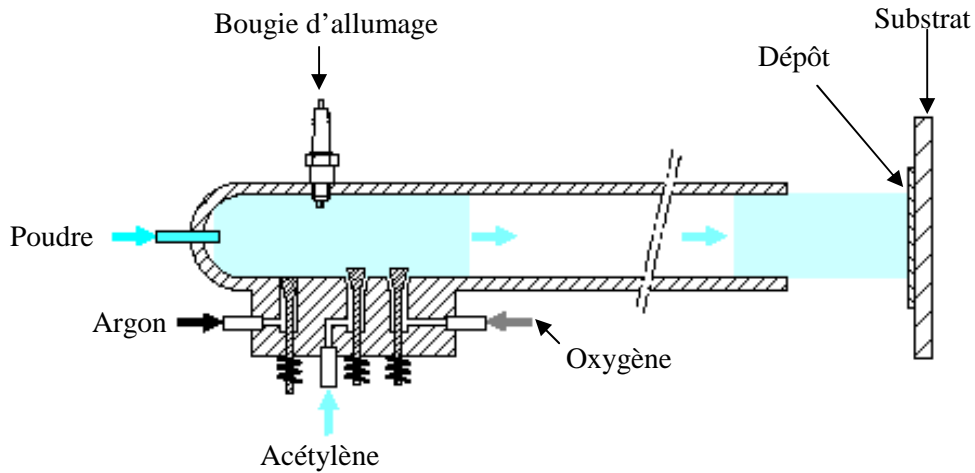


Figure I.05 : Schéma de principe du canon à détonation

(Source: Technique de l'ingénieur, Revêtements par projection thermique, par Alain PRONER ; M 1645 ; P 9)

d) Projection par arc électrique entre deux fils

Dans ce procédé, deux fils constitués du matériau à projeter servent d'électrodes aux bornes desquelles une tension continue de 25 à 40 V est appliquée mais avec une forte intensité électrique, c'est ce qui crée un arc à leurs extrémités. Un jet de gaz comprimé qui sert à pulvériser et à projeter le métal fondu en fines gouttelettes sur le substrat.

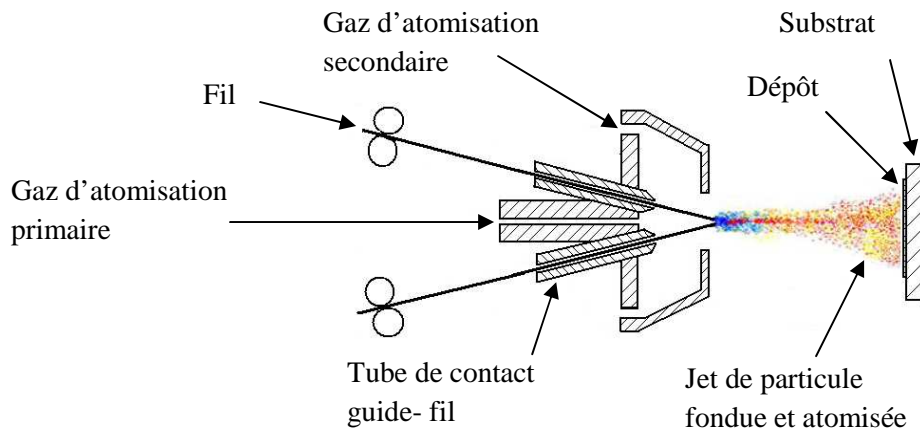


Figure I.06 : Schéma de principe de la projection à l'arc

(Source: J.R. Davis & Associates, Handbook of Thermal Spray Technology; prepared under the direction of the Thermal Spray Society Training Committee; 2004 ASM International, page 60)

L'équipement consiste en un pistolet de projection, un système d'avancement des fils, un générateur de courant asservi par une régulation automatique et une source de gaz comprimé (généralement de l'air mais l'utilisation d'un gaz neutre est possible). Les fils sont amenés dans la zone de fusion du pistolet à travers des électrodes guides qui assurent leur bon positionnement et le transfert du courant (Figure I.6). Le métal fondu est pulvérisé grâce au jet de gaz comprimé et projeté sur le substrat. Les épaisseurs des dépôts varient de 0,2 mm à 3 mm avec un taux de porosité de 5% à 10% et une adhérence de 20 MPa à 40 MPa. Les matériaux projetés doivent être conducteurs électriques (zinc, aluminium, cuivre, molybdène et acier), l'utilisation des fils fourrés constitués d'une gaine métallique ductile garnie de poudres de matériaux non-ductiles permet de réaliser des dépôts d'alliages (NiCrAl, NiMoAl, FeCrMn) ou des dépôts métalliques renforcés par des céramiques (carbures,...) [18].

e) Projection par plasma

Cette technique est relativement récente, on va la détailler un peu plus en raison que le matériau étudié dans ce travail est élaboré par ce genre de projection. Historiquement la première utilisation de cette technique a été réalisée par Reineck et elle est datée de 1938 [19]. Le principe est basé sur l'introduction de particules solides dans un plasma pour pouvoir les fondre, les accélérer et enfin les déposer sur le substrat.

Les premières torches plasma à courant continu sont apparues dans les années 60. La robotisation du procédé a commencé dans les années 80, la technique est basée sur l'utilisation d'un plasma de décharge inductive. A l'issue des travaux de l'université de Sherbrooke, des applications pour les dépôts métalliques de Ni et Ni-Cr ont été proposées [20]. Les efforts portent sur l'amélioration de la fiabilité et de la reproductibilité du procédé via le développement des outils de contrôle en ligne, ainsi que l'élaboration de nouveaux procédés visant la réalisation de dépôts finement structurés [21]. La technique de pulvérisation du plasma sous atmosphère (*Atmospheric Plasma Spraying (APS)*) est la technique la plus largement appliquée pour la projection d'une gamme de matériaux très variée et pour de nombreuses applications (anti-usure, barrière thermique et conducteur thermique, antioxydant, anticorrosion, abrasable, conducteur et isolateur électrique, mais aussi réparation par rechargement et biomédical) [22]. La projection est menée habituellement dans des cabines insonorisées en environnement atmosphérique, et équipées de systèmes de ventilation et de recyclage. L'inconvénient principal est dû à la présence d'air qui refroidit

rapidement le plasma par engouffrement dans le jet [23], et qui réagit avec la poudre injectée et/ou le substrat pour produire des oxydes.

La projection plasma sous atmosphère inerte (*Inert Plasma Spraying (IPS)*) représente une solution pour diminuer le taux d'oxydation dans les matériaux sensibles. La technologie de projection du plasma sous atmosphère contrôlée (*Controlled Atmosphere Plasma Spraying (CAPS)*) présente un avantage considérable qui réside dans l'augmentation de la densité d'énergie du plasma, qui favorise les échanges thermiques et permet donc de déposer des matériaux réfractaires. Ce procédé nécessite des installations plus complexes et coûteuses, mais souvent multifonctions, qui permettent de réaliser la projection sous atmosphère de gaz inerte ou réactive, à pression atmosphérique ou raréfiée et également en surpression jusqu'à 0,4 MPa. Le procédé de projection plasma sous basse pression (généralement d'argon) (*Low Pressure Plasma Spraying (LPPS)*) développé par Muehlberger dans les années 1975 [24], puis par la suite une autre dénomination de ce procédé qui est apparue lors de l'utilisation de pressions de travail de l'ordre 3 KPa à 30 KPa (*Vacuum Plasma Spraying (VPS)*).

En raison de ces évolutions et de la flexibilité de cette technique, de nombreuses industries ont recours à la projection plasma pour réaliser des dépôts généralement à haute valeur ajoutée, pour différentes applications comme les barrières thermiques, la résistance à l'usure, à la corrosion et/ou l'érosion

Le plasma est initialement amorcé par une source extérieure comme un arc de décharge électrique. Cet arc crée une zone localement conductrice entretenue par les courants induits [25]. La génération du plasma se passe dans un tube généralement en quartz qui est entouré par un inducteur appliquant un champ magnétique alternatif à haute fréquence (Figure I.7).

L'injection des particules est effectuée axialement à l'aide d'un injecteur refroidi par l'eau. La vitesse d'écoulement du gaz est directement liée au diamètre intérieur de la torche (de l'ordre de 50 mm) et entraîne un séjour plus long des particules dans le plasma, ce qui permet de fondre les particules de grande taille (~100 µm).

D'une façon générale, dans le procédé de projection plasma, il est possible de distinguer quatre systèmes fonctionnels :

- ✓ La génération du jet plasma par la conversion de l'énergie électrique en énergie thermique ;
- ✓ L'injection de la poudre dans le jet ;
- ✓ L'écoulement du jet plasma et l'interaction avec le gaz environnant et avec la poudre ;
- ✓ L'élaboration du dépôt par empilement des lamelles sur le substrat

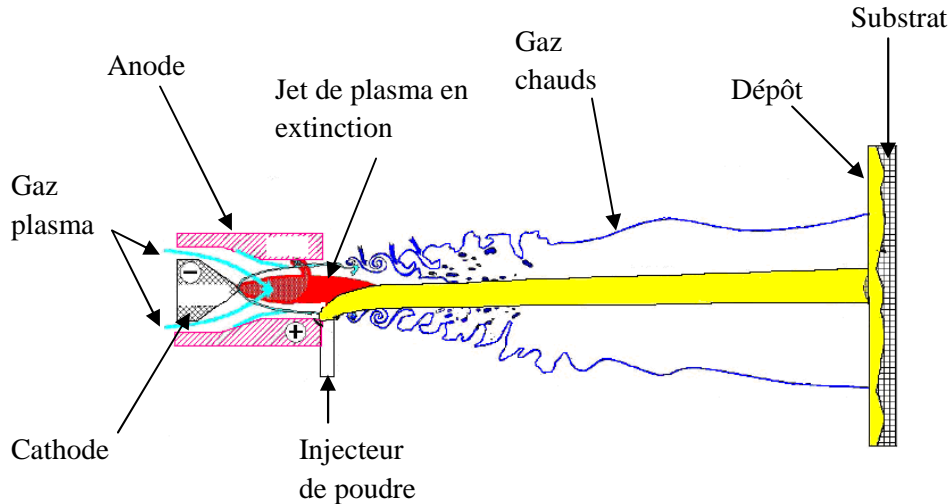


Figure I.07 : *Principe de la projection thermique plasma*

(Source : D. Rigot. « Contribution à l'étude de l'érosion des électrodes de torches à plasma d'arc », Thèse doctorat, Université de Limoge, 2003.)

✓ Formation du jet plasma

Dans une torche plasma à arc soufflé, l'arc électrique éclate entre la pointe de la cathode et la paroi de l'anode. L'énergie électrique est convertie en énergie thermique par effet Joule dans le gaz qui est ainsi chauffé et ionisé et forme alors un volume de plasma appelé colonne d'arc. Le courant électrique circule dans cette colonne, entre la pointe de la cathode et un point de l'anode appelé pied d'arc. Une couche limite chaude de température supérieure à 6000 K se développe autour de la colonne d'arc tandis qu'une partie du gaz plasmagène, s'écoule le long de l'anode. Un jet cathodique est donc généré ; il pompe une partie du gaz plasmagène dans le jet en développement. Un écoulement laminaire et une expansion de l'arc généré à la cathode créent la colonne d'arc qui s'attache à l'anode. La forme de la colonne d'arc dépend de la géométrie de cathode (donc de la tache cathodique)

ainsi que de la nature du mode d'injection et du débit massique des gaz plasmagènes ainsi que du diamètre de l'anode tuyère (Figure I.8).

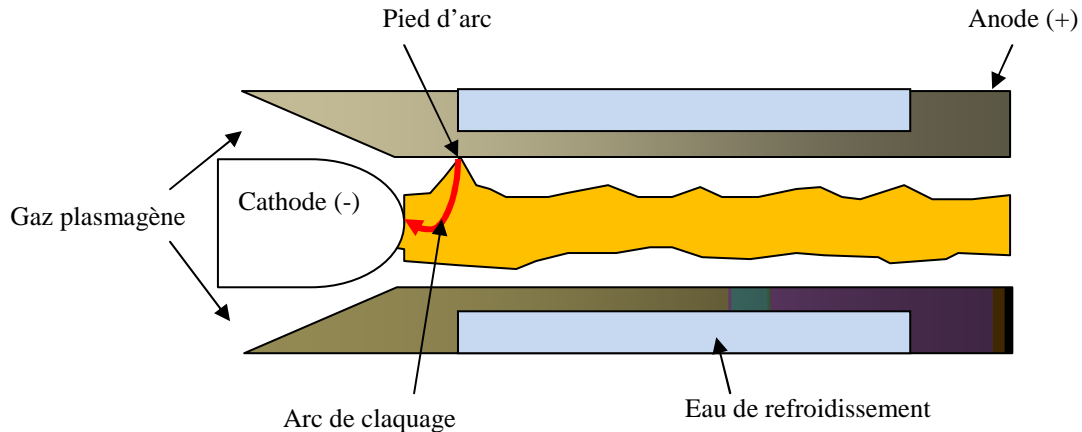


Figure I.08 : Schéma de la dynamique de l'arc et de l'écoulement du jet dans une torche plasma
(Source : Construit par nos soins)

I-5 Préparation de substrat

Vu que l'ensemble abradable/substrat se manifeste sur la notion " interface " ; la préparation du substrat est une phase essentielle dans le cas de la projection thermique. Elle a pour but d'améliorer l'état physico-chimique de la surface du substrat afin d'obtenir une très bonne structure des lamelles, par conséquent, son adhérence sur le substrat. Des traitements plus poussés peuvent permettre de nettoyer les substrats et de modifier l'état géométrique

I-5-1 Différentes méthodes de traitement

La réalisation d'un dépôt par projection thermique impose de réaliser une série d'opérations indispensables dans un ordre bien établi [26, 27] :

✓ Le dégraissage

Le dégraissage est la base de tous les traitements de surface. Son objectif est d'éliminer les matières grasses, et les impuretés généralement responsables de la mauvaise tenue des revêtements.

✓ **Le traitement mécanique**

Il se fait par projection d'une poudre abrasive à grande vitesse (généralement de l'alumine) sur la surface. Il est nécessaire de créer une rugosité sur la surface à revêtir afin de permettre aux particules en fusion ou à l'état pâteux de venir épouser les rugosités de la surface et réaliser ainsi un bon accrochage mécanique.

Outre un nettoyage ultérieur (par ultrasons et solvant par exemple) est indispensable pour éliminer les particules de sablage incrustées dans les creux et toute trace de graisse. En contrepartie la création d'une grande surface d'adhérence, permet également de diminuer les contraintes résiduelles générées au sein du dépôt, en empêchant leur addition par la séparation des grains écrasés,

I-6 Construction du dépôt

En projection plasma, les dépôts sont formés de couches successives de lamelles écrasées qui se chevauchent [28,29]. Les conditions opératoires déterminent la microstructure et les propriétés du dépôt formé dont la cohésion et la tenue sont assurées par les contacts inter-lamellaires et lamelle-substrat (Figure I.9).

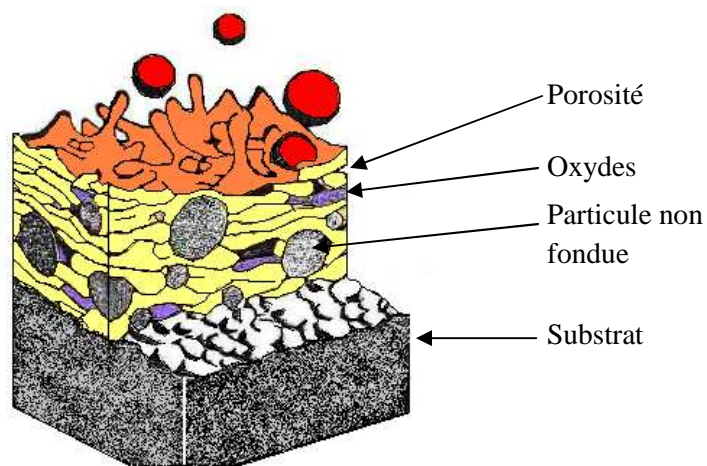


Figure I.09 : Schéma de principe de la construction de dépôt par projection thermique

(Source: Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux, Procèdes et Surfaces (LERMPS))

L'aspect typique d'un empilement de particules peut être observé dans la microstructure dans le cas d'une température d'élaboration insuffisante pour la cristallisation du dépôt en cours de la projection [30].

Une structure lamellaire obtenue par des écrasements et solidifications successives de particules totalement ou partiellement fondues projetées par le jet de plasma, peut contenir les éléments suivants :

- ✓ Des particules non fondues,
- ✓ Des pores, des oxydes, dans le cas de présence d'oxygène dans le matériau projeté ou dans l'environnement

Des études [31,37] montrent que le phénomène d'étalement est contrôlé par les paramètres de la particule (état de fusion, température, vitesse, oxydation, ...) et les paramètres substrat (température, rugosité, état d'oxydation ...). Lorsqu'une particule fondue entre en contact avec le substrat, son énergie cinétique est dissipée sous l'effet des forces de viscosité et de tension de surface, elle forme alors une lamelle. Ces processus régissent la qualité finale du dépôt et la formation plus ou moins importante de la porosité.

Le temps de traitement de la particule dans le jet de plasma est de l'ordre de la milliseconde. Le processus d'écrasement de la particule est très rapide, la durée entre l'impact et l'étalement d'une gouttelette est de l'ordre d'une microseconde [38]. Le mécanisme d'étalement et de solidification d'une gouttelette est fondamental pour la projection thermique car c'est une clef de la construction du dépôt. Ces différents éléments ont une forte influence sur les caractéristiques mécaniques du dépôt, ils seront traités d'une façon plus détaillée au chapitre II, vu que cette caractéristique manifeste le cœur de notre étude.

I-7 Qualité de dépôt

La notion qualité d'un dépôt est complexe : elle est en fonction de l'application finale du revêtement ; pour les revêtements abrasables, l'usinabilité est le facteur principal à considérer, ainsi sur certain cas, on cherche un revêtement riche de pore rendant le matériau friable, en favorisant la décohésion des particules au moment du contact [39]. Donc Les caractéristiques et la qualité du revêtement abrasable, telles que son épaisseur ou son taux de porosités d'une part, et d'autre part la résistance à la décohésion dépend du choix de la

poudre, c'est-à-dire les phases constituant l'abrasable [40], et l'effet combiné des paramètres de la projection thermique. La qualité d'un revêtement élaboré par projection plasma est influencée par les paramètres suivants [41] :

- les débits de gaz et de poudre ;
- la vitesse de projection ;
- la vitesse latérale de déplacement du substrat ;
- la température du substrat, la vitesse de refroidissement des particules fondues influant sur l'intensité des contraintes résiduelles (compression du substrat, traction du revêtement).
- La réaction chimique des particules avec les gaz environnants

La qualité du dépôt a une liaison directe avec la morphologie constituant le revêtement abrasable. Au chapitre qui suit, on va détailler plus les différents aspects influant la construction du dépôt ainsi que la nature de surface obtenue par projection thermique, vu que l'étude principale de notre étude se base sur ces deux points.

I-8 Famille d'abrasables

Les joints doivent être conçus en adéquation avec la forte possibilité de contacts entre les pièces fixes et mobiles entre lesquelles ils se trouvent [42]. Le large domaine d'application des abrasables a donné lieu au développement de plusieurs types de matériaux, chaque nuance étant fabriquée sur mesure pour supporter les sollicitations de l'étage de turboréacteur auquel elle est destinée.

Pour une classification efficace, le concept de familles d'abrasables a été introduit en fonction de la destination finale afin de réaliser l'étanchéité dynamique sous plusieurs échelles de température de fonctionnement (Figure I.10) [43]. Ce système de classification s'est avéré pratique et il a été rapidement généralisé dans l'industrie.

La conception de revêtements capables de résister à des températures de plus en plus élevées est une condition nécessaire au perfectionnement du turboréacteur. La température des gaz dans les moteurs aéronautiques varie de -70°C à l'entrée de la veine d'air jusqu'à un maximum d'environ 1550°C dans les turbines à hautes pressions, donc les surfaces

d'étanchéité sont sujet aux températures maximales à cause de l'écoulement des gaz, et elles se trouvent de ce fait sujetes à des maxima de l'ordre de 1150 à 1200°C.

Les groupes ou familles de matériaux abrasables peuvent être classés comme suit :

- Les polymères
- Les abrasables à base du mélange aluminium – polymère
- Les abrasables à base du mélange métaux- lubrifiants solides
- Les revêtements MCrAlY
- Les barrières thermiques

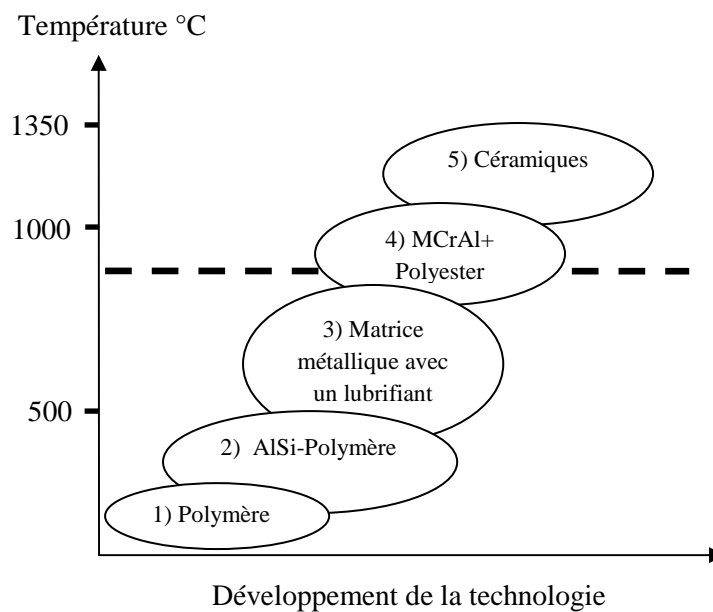


Figure I.10 : Classification des joints abrasables en fonction de la température d'utilisation

(Source : Ghasripoor et al. Abradable coatings increase gas turbine engine efficiency. *Materials World*, 5 (6): 328–330, 1997)

a) Abrasables à base du mélange aluminium – polymère

A cause des meilleures performances des abrasables à base du mélange aluminium-polymère, ils se retrouvent sur les compresseurs à pressions faibles et intermédiaires, couvrant un intervalle de température de l'ambiante à 350°C (Figure I.10-2) ; ils sont aujourd'hui largement utilisés [44]. L'élaboration de ces dépôts s'effectue souvent par projection

thermique à la flamme, voire à la flamme supersonique, ou par projection thermique à la torche plasma d'arc soufflé.

Le polymère introduit dans ce mélange, peut être un polyester ou un polyamide [45], c'est en fonction des températures et les conditions du travail que l'un ou l'autre est utilisé. Une de ces caractéristiques réside dans le fait d'avoir un dépôt d'épaisseur régulier. Le polyester entraîne l'aplatissement des particules durant la déposition du dépôt quand il s'agit d'une projection avec la technique HVOF, en outre le polyamide est rigide, il ne souffre pas de ce problème ce qui conduit à une excellente abrasabilité. En ce qui concerne les conditions thermiques, le polyamide est le plus souvent utilisé, vu qu'il supporte une température jusqu'à 350°C, légèrement supérieure au polyester qui peut supporter jusqu'à 320 °C.

Pour que la poudre destinée à la projection thermique, l'alliage AlSi se fixe mieux au polyester par rapport au polyamide. Ainsi, pour éviter la ségrégation dans l'injecteur de poudre ou dans le jet de projection, le polyamide est aggloméré avec l'alliage AlSi et non simplement fixé comme c'est le cas pour le polyester.

b) Les abrasables à base du mélange métaux- lubrifiants solides :

Plusieurs tentatives ont été introduites dans ce genre d'abrasables par des études très poussées afin d'éviter l'usure de l'ailette, ou même les déformations irréversibles à cause de l'inaptitude des revêtements; ainsi que d'améliorer la résistance à la corrosion sous atmosphère humide, et le faible rendement du dépôt. Toutes ces études ont fini par introduire un nouveau revêtement composé du Ni - graphite. Pour des raisons du bon fonctionnement, le revêtement Ni- graphite doit être déposé avec un niveau de porosité bien étudié, par ce que si le niveau de porosité est très élevé, le revêtement souffre d'un problème de faible résistance à l'érosion, par contre, si le niveau de porosité est faible, le revêtement peut causer l'usure excessive des ailettes en alliages de titane ou en acier.

L'alliage métallique AlSi peut être utilisé dans ce genre de matériau, mais puisqu'il y a création d'une cellule galvanique entre l'alliage métallique et le graphite, cela entraîne une forte tendance à la corrosion des abrasables AlSi – graphite ; donc le graphite a été par la suite remplacé par le nitrure de bore dans sa structure hexagonale par Rolls-Royce et Sulzer Metco en 1998. [46, 47]

c) Les revêtements MCrAlY

Ce sont des alliages métalliques du type Ni-Cr-Al-Fe ou Ni-Cr-Al-Co avec lubrifiant solide (bentonite, nitrure de bore, polyester, etc.), qui sont adaptés aux hautes températures, à l'atmosphère corrosive et au frottement contre les aubes de turbines;

Ce matériau connaît un succès remarquable, et il est admis qu'il présente des propriétés requises : résistance à l'oxydation et à la corrosion et abrasabilité [48]. Les MCrAlY sont des matériaux relativement peu durs à cause de la composition de la poudre, d'où le "M" désigne un métal souvent le nickel ou le cobalt ou un alliage pour la protection contre l'oxydation et la corrosion des composants métalliques exposés aux hautes températures. L'abrasabilité de ce genre de matériau a été obtenue par l'utilisation des MCrAlY avec l'argile (le plus souvent la bentonite) comme seconde phase,

Ces matériaux sont souvent déposés par projection à la torche à plasma d'arc soufflé sous basse pression ou par projection à la flamme supersonique. Pour cette raison il faut faire très attention à la température de projection, telle que la température maximale d'utilisation est autour de 1000°C. Au-delà, le taux d'oxydation est trop élevé

d) Les barrières thermiques :

Les barrières thermiques utilisées originellement pour la protection des parties statiques du moteur, ont été modifiées afin de remplir la double fonction de barrière thermique et de joint abrasable [49].

Dans ce système, le revêtement des parties statiques comporte plusieurs couches. La première couche à partir du substrat pour assurer la protection du substrat contre l'oxydation et l'adhérence du revêtement, et la dernière couche en zircone stabilisée à l'yttrium mélangée à un polyester pour assurer la fonction d'abrasabilité [50].

I-9 Performances d'un joint abrasable

Les matériaux abrasables fixés au niveau des turboréacteurs doivent répondre à un certain nombre d'exigences, principalement celles :

I-9-1 Bonnes usinabilités :

C'est-à-dire la capacité du revêtement à se disloquer au contact de l'aube en débris fins, ceci est dû grâce à une faible résistance au cisaillement. L'arrachement doit être fait en créant dans la mesure du possible une surface suffisamment lisse ;

I-9-2 Résistance à l'érosion

Les gaz brûlés sortant des chambres de combustion créant l'impact des particules à grande vitesse ; il ne faut pas que pendant leur écoulement qu'ils arrachent des particules du dépôt [51]. Il y a néanmoins un compromis à assurer entre cette propriété et celle d'abradabilité [52]

I-9-3 Résistance à l'oxydation

Étant donné le fort taux d'oxygène présent dans les gaz d'entrée et les fortes températures et pressions dans certaines sections du moteur, la corrosion peut être provoqué par une oxydation chimique ; le matériau abradable doit être très peu oxydable [53]

La durée de vie usuelle d'un joint abradable en service est de plusieurs milliers d'heures, et elle devient dix fois plus longue sans les phénomènes d'oxydation et de corrosion.

I-9-4 Dégagement minimal de chaleur

Lors de l'arrachement, ce type de matériau doit générer très peu de chaleur afin qu'il ne change pas de caractéristique mécanique ;

I-10 Essais d'abradabilité

Pour ces types des matériaux, et vu le rôle qu'ils doivent jouer pendant le fonctionnement dans une turbine comme la facilité de s'arracher facilement lors du contact avec l'ailette, il est primordial d'effectuer des essais d'abradabilité pour confirmer et pour prévoir l'abradabilité attendue. Il existe des bancs d'essais au niveau des laboratoires, mais il est à noter que les meilleurs tests dans toute expérimentation restent ceux qui sont effectués sur des machines réelles industrielles qui assurent les conditions réelles.

Les essais d'abrasabilité consistent à frotter à différentes vitesses et pénétrations un substitut d'aube rigide en rotation sur une portion de carter revêtue d'abrasable ; cependant, comme il n'existe pas de procédure standardisée pour caractériser l'abrasabilité, les résultats peuvent varier d'un banc industriel à un autre [54], cela est en fonction de la méthode employée.

I-11 Présentation du matériau considéré dans cette étude

La présente étude se concentre sur un joint abrasable obtenu par projection thermique de type plasma utilisé pour réaliser l'étanchéité dynamique rotor/stator dans les compresseurs à basses pressions. La nuance d'abrasable étudiée est de type MCrAlY, vu l'utilisation en large gamme de cet abrasable et vu les conditions de travail qu'il subit, à commencer par les hautes températures adaptées au fonctionnement, et la dureté causée par les alliages métalliques constituant la composition de la poudre.

Vu l'importance de ces caractéristiques, le choix a été établi sur le revêtement NiCrAl-BN pour l'étude de l'usure et texture d'un matériau protecteur rentré en friction avec TiAlV-6-4.

I-11-1 Composition de la Poudre NiCrAl- BN

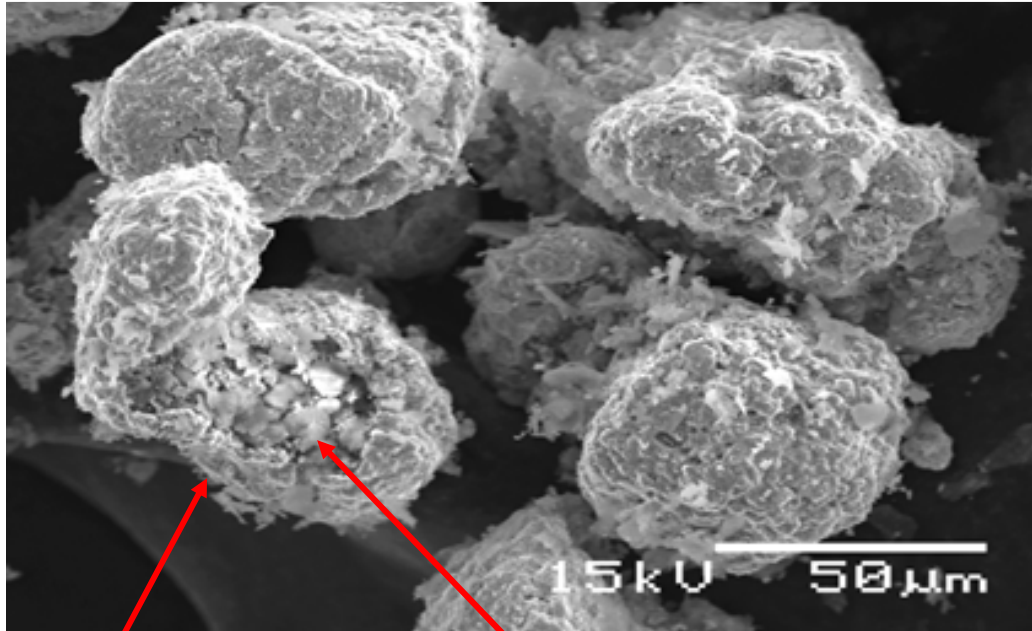
Les éléments chimiques constituant la poudre NiCrAl-BN sont présentés dans le tableau I.1. On constate donc la présence des éléments métalliques comme le nickel, le chrome, et l'aluminium dans la poudre. Les éléments de faible concentration comme le cobalt et le fer ne constituant pas des éléments qui peuvent jouer un rôle prépondérant dans la projection et sont considérés comme impuretés seulement.

Tableau I.01 : Composition de la Poudre NiCrAl- BN

Nickel	Chrome	Aluminium	Fer	Cobalt	BN
72.4 %	4.54 %	4.04 %	0.30 %	0.03 %	Balance

Les particules de la poudres NiCrAl-BN consistent en une couche métallique (NiCrAl) enrobant les noyaux (BN), afin qu'au moment de la projection tous les éléments forment une

gouttelette projectile, et sont projetés tous au même temps ; la couche supérieure préservant l'intérieur de la chaleur. La figure (I.11), montre la micrographie au MEB de la poudre NiCrAl- BN, d'où il est clair que le nitrure de bore réside à l'intérieur de la couche métallique.



Couche métallique

Nitrure de bore

Figure I.11 : *Micrographie au MEB de la poudre NiCrAl-BN*

(Source : Photo pris par Pr M. BOUNAZEF au Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux, Procèdes et Surfaces (LERMPS))

L'analyse spectral au microscope électronique (Figure I.12), confirme la présence des éléments analysés chimiquement de la poudre NiCrAl-BN mentionnés au tableau (I.01). On constate donc la présence des éléments métalliques comme le nickel, le chrome, et l'aluminium dans la poudre. Les éléments de faible concentration comme le cobalt et le fer ne constituant pas des éléments qui peuvent jouer un rôle prépondérant dans la projection. La présence du bore n'est pas détectée par l'analyse spectrale du MEB, c'est par ce que les premiers éléments du tableau périodique de Mendeleïev ne sont pas détectés dans cette analyse.

Vu l'importance sur le choix des diamètres des grains des particules projetées ; il était très important de faire une analyse de la granulométrie de la poudre NiCrAl-BN (Figure

I.13); cette analyse consiste à négliger certaines catégories de grains afin de ne pas les projeter sur le subjectile, tout simplement par ce qu'elles diminueront le rendement de l'opération et agiront sur la qualité et les caractéristiques du dépôt. Le plus gros grain existant dans cette poudre mesure 191,4 μm , cette dimension étant acceptable et correcte pour une projection.

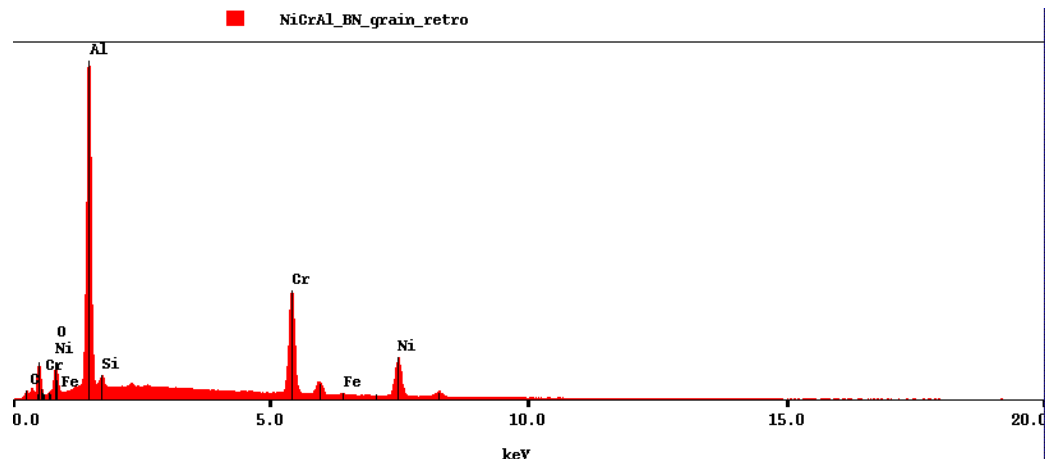


Figure I.12 : Spectre de la poudre NiCrAl- BN

(Source : Spectrométrie de la poudre NiCrAl-BN au MEB, LERMPS Belfort Montbéliard)

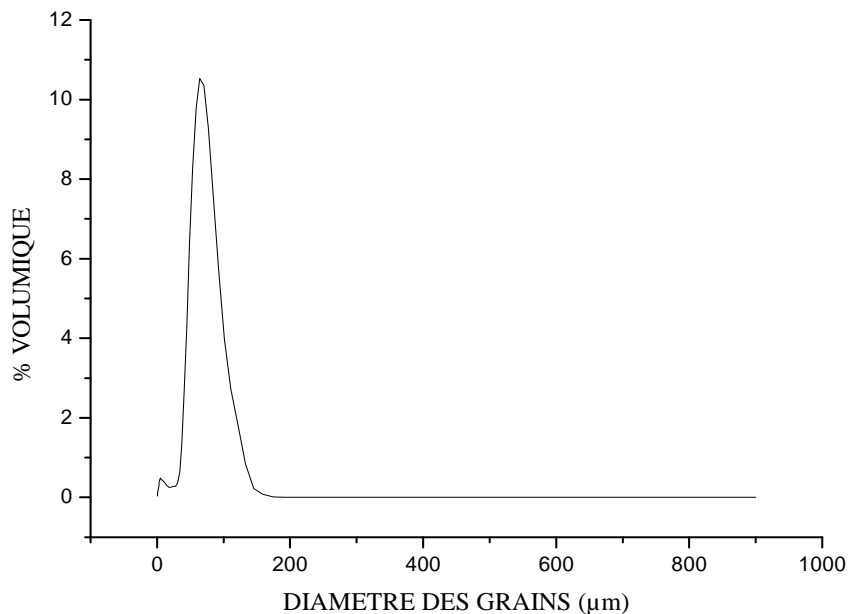


Figure I.13 : Répartition des granulométries de la poudre NiCrAl-BN

(Source : Granulométrie de la poudre NiCrAl-BN, LERMPS Belfort Montbéliard)

I-11-2 Projection de la poudre NiCrAl-BN

On doit noter que l'élaboration de ces revêtements a été effectuée sur la plateforme de dépôt par projection thermique plasma au Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux, Procédés et Surfaces (LERMPS), les paramètres de projection thermique sont choisis après avoir effectué plusieurs essais. Une des préoccupations majeure est d'augmenter le rendement, puisque les couches obtenues au début demeurent minces après un grand nombre de passes.

Le premier essai de projection du NiCrAl-BN (Tableau I.02) a été effectué en utilisant des paramètres pour estimer la faculté d'adhérence de cette poudre, voir la qualité du dépôt, puis opter pour des paramètres définitifs.

Tableau I.02 : Paramètres de projection initial du NiCrAl-BN

Paramètres	Valeurs
Distance torche substrat	130 mm
D.D.P	62V-66V (selon les cycles des passes)
Intensité	600 A
Débit du 1 ^{ère} gaz plasmagène « argon »	50 L. min ⁻¹
Débit du 2 ^{ème} gaz plasmagène « hydrogène »	10 L. min ⁻¹
Débit du gaz porteur	3,5 L. min ⁻¹
Vitesse de rotation plateau poudrier	10 %
Vitesse de rotation de l'agitateur	50 %
Débit d'eau de refroidissement	13,9 l/mn
T° d'eau à l'entrer de la torche	14° C
T° d'eau à la sortie de la torche	28° C
Aire de refroidissement	7 passes sans air et 30 passes avec air
Nombre de passe	(2+5+10+10) passes
Angle d'injection de la poudre	90°
Vitesse de rotation du mandrin	200 trs/mn
Epaisseur du dépôt	(0,05 puis 0,13 puis 0,15 puis 0,55) mm
Diamètre de buse	6 mm
Diamètre injecteur de poudre	1,6 mm
Distance de l'injecteur du centre torche	6 mm
Puissance plasma	(37 – 39) KW selon cycles
Vitesse de balayage	20 mm/s

Une mesure de dureté superficielle étant effectuée rapidement pour avoir une estimation de la qualité du dépôt. La moyenne de 84,1 HR15Y étant le résultat de 15 essais uniformément répartis. Cette valeur étant jugée trop élevée par rapport aux recommandations, la valeur préconisée été à une valeur maximale de 70 HR15Y. Ce premier essai étant jugé donc non concluant avec un rendement de dépôt assez faible. Il est évident donc de refaire

d'autres projections avec d'autres paramètres plus performants afin de faire descendre la valeur de cette dureté superficielle.

La deuxième série de projections, étant effectuée avec d'autres paramètres de projection. Nous reprenons ici une partie des données utilisées dans le tableau I.03. Les paramètres non mentionnés restent les mêmes que le tableau précédent

Tableau I.03 : Nouveaux Paramètres de projection du NiCrAl-BN

Pièces	NiCrAl BN-II	NiCrAl BN-III	NiCrAl BN-IV	NiCrAl BN-V	NiCrAl BN-VI	NiCrAl BN-VII
Intensité	600 A	600 A	500 A	500 A	500 A	400 A
Débit Argon	50 L. min ⁻¹	60 L. min ⁻¹	70 L. min ⁻¹	40 L. min ⁻¹	40 L. min ⁻¹	40 L. min ⁻¹
Débit Hydrogène	6 L. min ⁻¹	6 L. min ⁻¹	5 L. min ⁻¹	3 L. min ⁻¹	2 L. min ⁻¹	2 L. min ⁻¹
Gaz porteur	5 L. min ⁻¹	8 L. min ⁻¹	6 L. min ⁻¹	4 L. min ⁻¹	3 L. min ⁻¹	5 L. min ⁻¹
Angle poudre	90°	90°	90°	90°	95°	95°
Rotation plateau	40%	40%	40%	40%	40%	40%
Distance projection	150 mm	150 mm	150 mm	150 mm	150 mm	150 mm
Nombre de passe	40	40	20	80	40	40
Epaisseur déposée	0,5 mm	0,35 mm	0,15 mm	1,2 mm	0,38 mm	0,4 mm
Dureté HR15Y	Non mesurée	Non mesurée	Non mesurée	80	Non mesurée	80
Porosité dépôt	39-41 %	35 %	28-38 %	41-48 %	42-48 %	41 %

Ces paramètres choisis n'ont pas agi sur la dureté superficielle qui reste égale ou supérieure à 80 HR15Y. Même le traitement thermique de relaxation du dépôt à une température de 850 °C pendant 3 heures puis refroidissement à l'air libre n'a pas fait descendre la dureté. L'idée d'ajouter un polyester au mélange de poudre a été donc décidée avec un pourcentage de 15 % massique de la masse totale puis avec 10 % massique.

A travers toutes ces conditions, les essais ont fini par fixer ces paramètres de projection (Tableau I.4), et d'ajouter un polyester de pourcentage de 10 % massique de la masse totale au mélange de poudre, afin de diminuer la dureté superficielle.

Un traitement thermique d'élimination de polyester du dépôt est effectué sur les échantillons (Figure I.14). Ce traitement consiste à augmenter la température jusqu' à 500° C, et de la maintenir pendant 3 heures. Le refroidissement est effectué progressivement au four. L'élimination du polyester a entraîné une chute de la dureté superficielle (traitement de relaxation)

Tableau I.04 : Paramètres de projection du NiCrAl-BN

Paramètres	Valeurs
Distance torche substrat	100 mm
D.D.P	45 V
Intensité	500 A
Débit du 1 ^{ère} gaz plasmagène « argon »	35 L. min ⁻¹
Débit du 2 ^{ème} gaz plasmagène « hydrogène »	1,3 L. min ⁻¹
Débit du gaz porteur	2,5 et 3,5 L. min ⁻¹
Vitesse de rotation plateau poudrier	44 %
Vitesse de rotation de l'agitateur	50 %
Débit d'eau de refroidissement	14,6l/mn
T° d'eau à l'entré de la torche	38° C
T° d'eau à la sortie de la torche	48° C
Aire de refroidissement	Avec aire refroidissement
Nombre de passe	(5+ 10+ 5) passes
Angle d'injection de la poudre	90°
Vitesse de rotation du mandrin	70 trs/mn
Diamètre de buse	8 mm
Diamètre injecteur de poudre	1,8 mm
Distance de l'injecteur du centre torche	6 mm
Puissance plasma	(22,6 – 23,4) KW selon cycles
Puissance torche	45 KW
Rendement torche	(54,9 – 56,9) %
Vitesse de balayage	10 mm/s
Débit de poudre	37,73 g/min

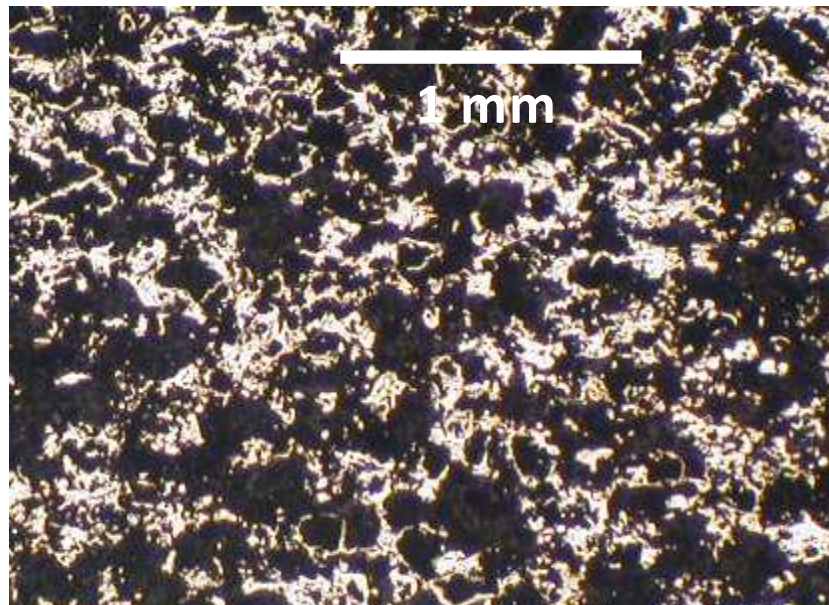


Figure I.14 : Micrographie au MEB du dépôt NiCrAl- BN
(Source : Micrographie au MEB, LERMPS Belfort Monbéliard)

I-12 Conclusion :

Ce chapitre s'est intéressé à présenter un aspect bibliographique sur les matériaux abrasables ; on note que malgré que ce procédé de protection demeure relativement ancien, il ne cesse d'être étudié car il prouve jour après jour sur l'échelle industriel qu'il est la bonne solution pour garder l'étanchéité au niveau des turbomachines, et d'une autre perspective il sert à la protection des ailettes contre l'usure.

La diversité sur le résultat géant les caractéristiques d'abrasabilité et la dureté de ce matériau est due essentiellement à la diversité des facteurs agissant sur le procédé d'élaboration qui dépassent la soixantaine, une simple variation sur les paramètres de projection peut donner naissance à un grand écart au niveau des résultats. Cela fait l'objet des recherches qui ne cessent pas d'évoluer dont le but est d'apporter des améliorations afin d'augmenter le rendement en fonctionnement. D'un autre point de vue, la manière de la construction de la morphologie elle-même de ce matériau peut créer l'écart, cela s'interprète par le fait que cette morphologie s'est construite par un empilement de particules étalées et solidifiées.

L'aspect scientifique et les applications des matériaux abrasables sont très larges, un seul chapitre ne suffit pas pour décrire et présenter tous les détails relatifs aux différents aspects de ce matériau. On n'a donc présenté que les généralités importantes de ce matériau abrasable afin de connaître son utilisation à travers ses propriétés ; le but final recherché relatif au thème de la thèse sera détaillé dans les prochains chapitres.

CHAPITRE II

**Aspects de l'usure et de la topographie
des surfaces des matériaux abradables**

CHAPITRE II

Aspects de l'usure et de la topographie des surfaces des matériaux abradables

II-1 Introduction

De tous les temps, les hommes ont essayé de contrôler le frottement, soit pour le réduire, soit pour l'utiliser. Le cœur du sujet de notre thèse s'articule essentiellement sur ce frottement du fait qu'il joue un rôle très important sur la naissance des matériaux abradables et du fait qu'il donne une autre naissance à l'analyse des différentes échelles de la rugosité de manière à localiser et établir les paramètres agissant directement sur l'état de surface après qu'il soit rentré en friction avec l'ailette. La compréhension du mécanisme d'usure ainsi que de la texture permet d'aboutir à l'optimisation des performances des turbomachines. L'optimisation signifie dans notre cas la réduction des jeux entre parties fixes et tournantes de la structure car d'un côté le taux de compression des fluides d'un étage à un autre demeure élevé et d'un autre côté, il a un effet significatif sur le rendement global de la turbomachine.

Si on cherche à modéliser les contacts mécaniques pour mettre en évidence l'amélioration, la fiabilité, le rendement et les performances des turboréacteurs, on doit tout d'abord comprendre ce qui se passe vraiment au moment des contacts revêtement/aube. Cela nécessite une compréhension fondamentale sur les constituants de la morphologie elle-même du matériau, ainsi de voir comment réagit cette morphologie envers l'usure pour prendre en fin de compte la rugosité de la trace d'usure due par l'impact de l'ailette sur ce matériau sacrificiel.

Pour atteindre l'objectif de cette thèse, on consacre ce chapitre pour examiner l'interaction entre les éléments se frottant entre eux et engendrant une texture, une rugosité et une forme de surface ; le frottement engendre alors des sollicitations du joint en fonctionnement.

Nous exposons donc tout d'abord un aspect bibliographique sur les différents paramètres agissant sur la constitution du matériau abrasif, et par la suite nous détaillons les modes d'usure qui participent à l'enlèvement des constituants de l'abrasif. En dernière étape nous allons étudier les différents paramètres qui caractérisent la rugosité engendrée par la friction de l'abrasif sur l'abrasif.

II-2 Topographie et texture des surfaces abrasives

Une surface est définie comme surface de frottement entre elle et un objet qui rentre en contact, elle doit posséder un bon état sans aspérités et sans défauts pour que le coefficient de frottement soit le plus petit possible. Cependant la surface d'un matériau abrasif ne possède pas ces caractéristiques, au contraire elle possède des aspérités dues à la présence du lubrifiant solide qui se loge dans les trous provoqués pendant la projection à l'échelle microscopique. La porosité engendre une surface de microstructure très hétérogène (Figure II.1-a). Les porosités sont de forme et de taille très variables : formes quelconques, ovales et des croissants, ainsi que des porosités plus allongées ou beaucoup plus fines [55].

Du fait que la formation du revêtement est obtenue par l'impact, la déformation et la solidification rapide des particules sur le substrat ainsi par la superposition des couches sous des températures et des vitesses très élevées, la morphologie finale se présente sous forme d'une structure lamellaire (figure II.1-b), avec présence de défauts éventuellement des oxydes et des espaces vides. L'observation au MEB de la surface de l'abrasif révèle également la présence de grains sphériques. Toutes ces conditions d'obtention du dépôt révèlent des aspérités qui peuvent être représentées comme une rugosité extérieure. Il y'a donc différence d'aspect sur l'échelle de la rugosité sur la surface d'une zone à une autre.

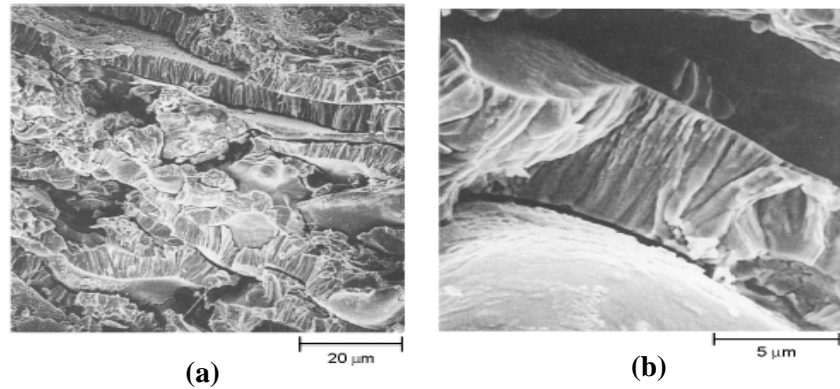


Figure II.1 : *Microstructure au MEB d'un matériau abrasable élaboré par projection thermique*

(a) Représentation des aspérités, (b) Représentation de la forme de structure lamellaire

(Source: J.R. Davis & Associates, *Handbook of Thermal Spray Technology*; prepared under the direction of the Thermal Spray Society Training Committee; 2004 ASM International, page 3)

II-3 Origine de la rugosité et de l'irrégularité des surfaces abrasables

En effet les revêtements abrasables peuvent présenter une structure poreuse, hétérogène, d'une faible densité vu que le principe de la formation du dépôt se réalise principalement par la projection au plasma ; cela fait un empilement de particules étalées et solidifiées. Le résultat final génère une morphologie composée de plusieurs défauts :

- Des particules pas ou mal fondues, appelées "infondues",
- Des pores,
- Des microfissures (inter et intra-lamellaires),
- Des macro-fissures,
- Des particules qui ont réagi avec l'atmosphère lorsque cela est possible (particules oxydées dans le cas des métaux).

Ces défauts font l'objet d'une classification donnée par L. Pawlowski *et al* [56, 57]. Ces auteurs identifient des classes de défauts (Figure II.2) afin de donner une meilleure compréhension des phénomènes d'impact et de solidification d'une particule fondue totalement ou partiellement sur une surface

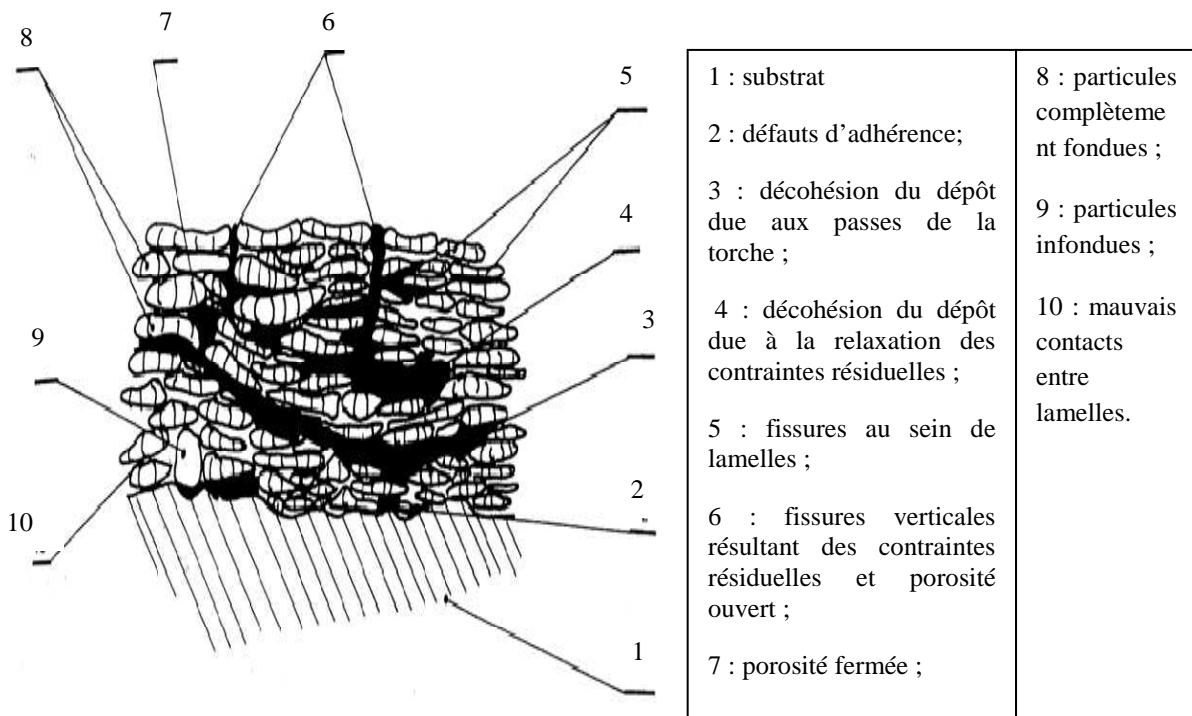


Figure II.2 : Représentation schématique d'une coupe d'un dépôt

(Source : L. PAWLOWSKI et P. FAUCHAIS, « Thermal Transport Properties of Thermally Sprayed Coatings », *Int. Mater. Reviews*, 37(6), p. 271-289, 1992).

L'adhésion et la cohésion des dépôts sont en général liées à des phénomènes mécaniques [58] ; les rugosités du substrat sont remplies lors de l'étalement de particules fondues grâce à la force d'impact ; la solidification des lamelles qui suit entraîne un accrochage mécanique. La porosité est la plupart du temps due à un mauvais contact des lamelles avec le substrat ou entre elles ; un mauvais chevauchement de celles-ci veut dire une mauvaise fusion des particules qui va engendrer par la suite un mauvais étalement des particules.

Il s'avère donc nécessaire et important de comprendre les mécanismes de génération de dépôt, afin de comprendre l'origine de l'irrégularité des surfaces ainsi de contrôler la qualité des dépôts abrasables.

II-3-1 Phénomènes d'oxydation

L'inclusion d'oxydes dans les dépôts tend généralement à dégrader leurs propriétés : ils présentent des lamelles moins fortement liées, une composition chimique hétérogène et des contraintes internes résultant de la différence de coefficient de dilatation thermique entre oxydes et métaux, d'où, dans la projection plasma sous atmosphère ambiante (APS), l'air froid ambiant est pompé par le jet de plasma quittant la tuyère, diffuse jusqu'au cœur du jet. L'oxygène de l'air pompé combiné aux hautes températures rencontrées du plasma, peut donner naissance à des réactions d'oxydation avec les particules réactives [59, 60].

Il est possible de différencier l'oxydation dans les différentes zones :

- Oxydation des particules en vol
- Oxydation du dépôt en croissance
- Oxydation des substrats

a) Oxydation des particules en vol

Lorsque les particules dépassent leur température de fusion, il est possible d'avoir plusieurs réactions chimiques en vol avec les gaz réactifs présents dans le plasma, d'où l'oxydation étant la réaction la plus importante. On distingue trois types de réactions chimiques durant le séjour des particules dans le plasma [61, 62].

Il est possible que dès la sortie des particules de l'injecteur et avant leur fusion dans le jet, il aura la ré-solidification d'une particule dans le panache du jet si l'enthalpie du plasma ou l'échange thermique plasma particules deviennent inférieurs aux valeurs nécessaires pour garder la particule à l'état fondu. Le taux d'oxydation reste négligeable dans cette zone du fait de l'absence d'oxygène (ou en quantité très faible),

Les réactions d'oxydation, peuvent être amplifiées par les températures élevées rencontrées dans le plasma et par la présence d'espèces chimiques très réactives, et puisque au cœur du jet, les particules sont normalement fondues, donc elles sont sujettes à une oxydation plus élevée. La quantité et la nature des oxydes formés, dépendent de la diffusion de l'oxygène depuis la surface vers le cœur des particules.

Puisque les flux thermiques importants du jet peuvent conduire à une vaporisation des particules, les espèces oxydantes dans le jet réagissent avec ces nuages de vapeur autour des particules d'où la cinétique de cette réaction est la plus élevée. Cependant, le faible taux de vapeur est le facteur limitant de cette réaction d'oxydation

b) Oxydation du dépôt en croissance

On peut distinguer 2 types d'oxydations lors de la formation du dépôt :

✓ **Oxydation des lamelles**

Au cours de la projection, il est possible que les lamelles soient soumises à l'air ambiant pendant quelques microsecondes, avant qu'elles ne soient recouvertes par d'autres lamelles ;

✓ **Oxydation entre deux passes successives**

Entre deux passes successives, il peut s'écouler quelques secondes à quelques heures suivant la taille de la pièce et la vitesse pistolet - substrat, ce qui va engendrer une couche d'oxyde entre chaque passe

c) Oxydation des substrats

Comme le préchauffage des substrats améliore l'étalement des particules et l'adhésion des dépôts, il peut provoquer l'oxydation de la surface du substrat, ce qui influe sur les propriétés des dépôts, essentiellement à l'adhésion sur les substrats [63, 64]. Les caractéristiques de la couche d'oxyde sont liées à la nature du substrat, à son environnement, ainsi qu'à la vitesse, à la température et au temps de préchauffage [65].

II-3-2 Etalement des particules

De nombreux auteurs ont fait l'hypothèse que les phénomènes d'étalement et de solidification n'étaient pas simultanés, en supposant que la vitesse du front de solidification à travers la lamelle était plus faible que les vitesses d'impact des gouttes. Cet étalement des lamelles a fait et fait l'objet de nombreuses études, afin de comprendre à terme les mécanismes de formation des dépôts projetés [68, 69].

Les travaux de Codelle [70] montre que le préchauffage d'un substrat au-delà d'une température appelée température de transition T_t engendrait la formation de pics d'oxydes à l'échelle nanométrique en surface de l'acier inoxydable ; cela, influe directement l'impact des gouttes sur le substrat par le fait que les pics construits par l'échauffement augmentent considérablement le nombre de points de contact entre chaque lamelle et le substrat tout simplement parceque la mouillabilité du substrat accroît lorsque la température de ce dernier est supérieure à T_t . Contrairement au cas où le substrat est maintenu à température ambiante, la formation entraîne des lamelles déchiquetées.

Les expériences montrées sur la figure (II.3) sont faites après l'impact de gouttes de nickel sur le substrat dans les deux cas avec la même vitesse de projection :

- Sur le substrat froid (température ambiante) ; l'étalement des lamelles est sous forme de lamelle déchiquetée présentant des vitesses de refroidissement relativement faibles de l'ordre de 10^4 K.s^{-1} (Figure II.3-(a)).
- Sur le substrat chaud (température supérieure à T_t) ; l'étalement des lamelles est sous forme des lamelles circulaires, de forme régulière, avec des vitesses de refroidissement beaucoup plus élevées (5.10^4 à $7,5.10^4 \text{ K.s}^{-1}$) (Figure II.3-(b)).

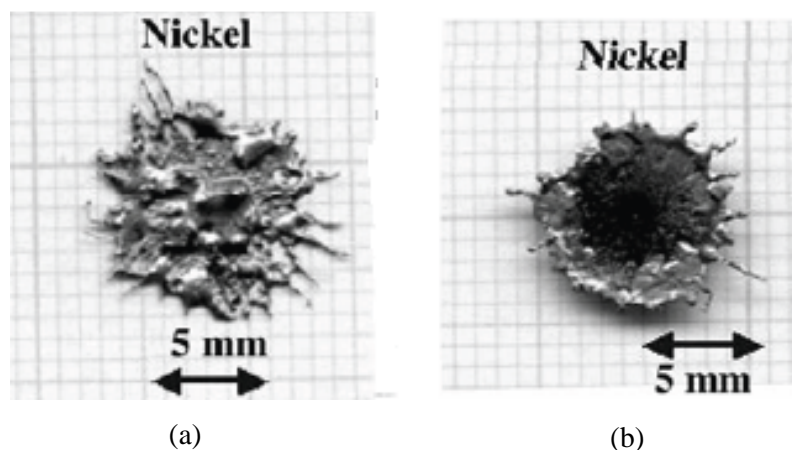


Figure II.3 : Présentation de l'étalement d'une lamelle de Nickel

(a) : Lamelle déchiquetée à température ambiante ;

(b) : Lamelle circulaire à température supérieure à la température de transition (T_t) ;

(Source : J. Cedelle, Etude de la formation de lamelles résultantes de l'impact de gouttes millimétrique et micrométriques, Application à la réalisation d'un dépôt par projection plasma, Thèse de l'université de Limoges. (2005))

D'autres auteurs [71, 72, 73] ont étudié le rôle que joue le préchauffage des substrats avec l'impact des lamelles, ils ont conclu à des liaisons renforcées entre les lamelles et les substrats préchauffés. Le préchauffage entraînerait une légère oxydation superficielle (pour les substrats métalliques) et une désorption de molécules comme l'eau qui améliorerait le mouillage du substrat.

Les transferts thermiques de la lamelle vers le substrat, et les vitesses de solidification et de refroidissement, peuvent beaucoup varier et déterminent la microstructure finale de la lamelle. Des études traitent l'évolution de la morphologie des lamelles en fonction des paramètres de projection à savoir les vitesses et les températures des particules au moment de l'impact, la nature et la température du substrat. V.V. Kudinov *et al* [74], ont présenté un classement qualitatif de 30 morphologies différentes de particules d'alumine étalée en fonction de leur vitesse et température au moment de l'impact (Figure II.4).

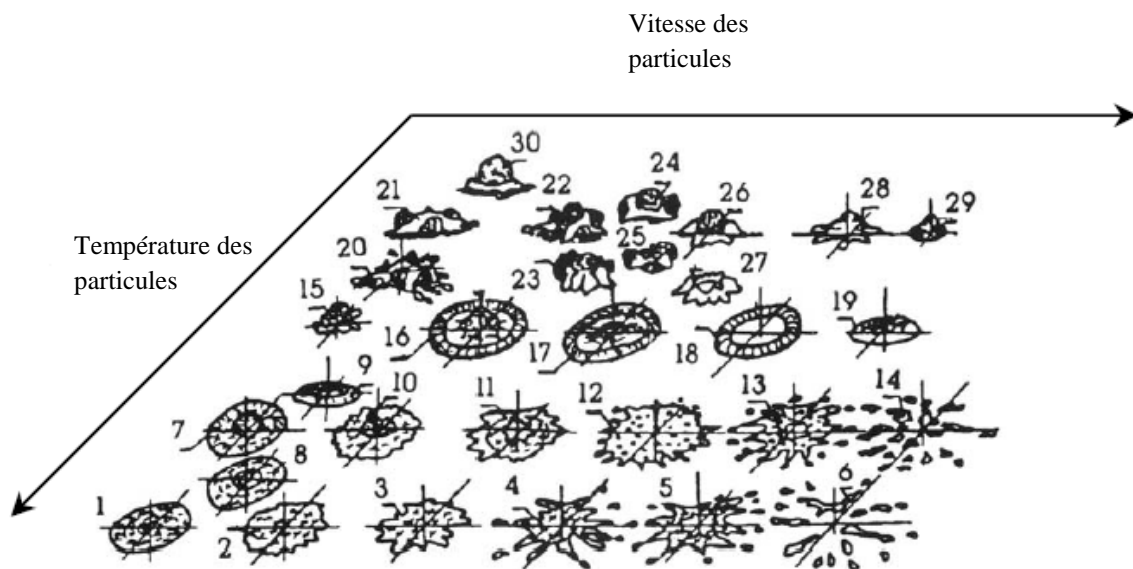


Figure II.4 : Morphologie de particules d'alumine projetées par plasma en fonction de leurs vitesses et température avant impact

(Source : V. V. KUDINOV, P. Y. PEKSHEV et V. A. SAFIULLIN, « Forming of the Structure of Plasma Sprayed Materials », High Temp. Dust. Laden Jets, (éd.) Solonenko et Fedorchenko, p. 381-418, 1989)

Une gouttelette correctement fondue s'étalerait correctement avec une vitesse faible (exemple : cas N°1 de la figure (II.6)), mais éclaterait au moment de l'impact sous l'action des forces de surface avec une vitesse élevée (exemple : cas 6). Une particule avec une température faible ne serait fondue que partiellement (cas 30). Le noyau solide resterait piégé

au centre de la lamelle ou éjecté conduisant à une lamelle de forme annulaire lorsque celle-ci se situe à la moyenne de chauffage et l'éjection (cas 17). Il est à noter que, V.V. Kudinov et al, n'ont pas pris en compte la nature du substrat et de l'interface.

Le phénomène d'étalement des lamelles est très complexe, et très varié ; beaucoup d'études par plusieurs auteurs ont essayé d'expliquer cet étalement afin de comprendre la morphologie des dépôts produits par projection thermique ; les résultats obtenus sont les suivants :

- R. McPHERSON expliquait cet éclatement, appelé aussi « splashing » en faisant l'hypothèse que le film de liquide d'une goutte s'écrasant à grande vitesse, devenait vite instable et se désintérait en fines gouttelettes sous l'action des tensions de surface [75].
- En outre, une interface de mauvaise qualité (occlusions gazeuses, rugosité, oxydation superficielle du substrat) réduirait la surface de contact lamelle/substrat,
- Une lamelle de type « crêpe » aurait alors un bon contact avec le substrat et se serait solidifiée avant l'éjection de la gouttelette qui suit. Cette explication ne fait plus l'hypothèse que les phénomènes d'étalement et de solidification sont découplés : c'est la vitesse de solidification qui détermine la qualité de l'étalement.
- Les zones de mauvais contacts thermiques ne permettraient pas une évacuation rapide de la chaleur : les grains seraient alors plus grossiers ;
- Les particules non ou mal fondues ne sont rentrées en contact qu'avec la périphérie du plasma où les vitesses sont les plus lentes. J. Guyonnet propose d'utiliser une barrière d'air perpendiculaire au jet de particule afin d'empêcher ces particules lentes d'atteindre le substrat [76].

II-3-3 Porosités dues aux contacts

Lorsque la température d'une particule au moment de l'impact est trop faible, celle-ci s'étalement mal. Ces particules trop visqueuses ne peuvent pas remplir toutes les anfractuosités de

la surface ; un empilement de telles particules génère un dépôt à forte rugosité (Figure II.7) [77]. Ceci génère des accidents de surface, les lamelles s'étalant sur l'accident empêchent les suivantes de s'étaler parfaitement : ils forment alors des pores à l'endroit de l'accident

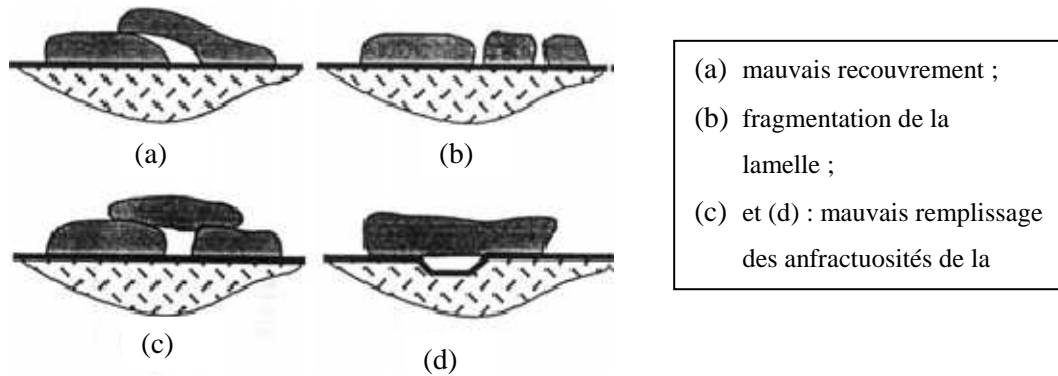


Figure II.5 : Représentations schématiques de mauvais étalements de lamelles qui génèrent des pores

(Source : D. BERNARD, « Projection par plasma de la couche céramique de barrière thermiques ZrO₂- Y₂O₃ – Etude des divers mécanismes rentrant en jeu », Thèse de doctorat, Université de Limoges, 1990.)

II-3-3 Fissures inter-lamellaires

Les contraintes de trempe générées à la solidification et le refroidissement des lamelles au moment de la construction de dépôt par empilement des particules chaudes sont généralement de tension supérieure à la limite d'élasticité du matériau [78], lorsqu'elles sont trop élevées, il faut qu'elles se relaxent donc. Lorsque le contact entre les lamelles est de bonne qualité, ces contraintes sont relaxées par fissuration perpendiculairement au sens des lamelles. En revanche lorsque ces contacts sont moins bons, des glissements inter-faciaux peuvent se produire [79]. Des observations au MEB de coupes de dépôts imprégnés par du cuivre électro-déposé confirment que les zones de contact réelles entre les lamelles ne représentaient que 25% à 30% de la surface totale [80],

Ces travaux montrent une étude sur le mécanisme de la construction des dépôts abrasables, ils donnent une explication au volume de la porosité connectée avec les surfaces des lamelles du dépôt, c'est-à-dire la porosité ouverte ou microfissures. C'est ce qui explique l'origine de la rugosité et l'irrégularité des surfaces des matériaux abrasables.

II-4 Mesure de taux de porosité des éprouvettes

Les trois séries de micrographies exposées ci-dessous présentent les micrographies des trois éprouvettes élaborées au sien du laboratoire LERMPS, dont les détails de paramètres de projection sont présentés au chapitre (I) de cette étude, pour lesquelles on va effectuer nos tests expérimentaux. Le traitement de ces micrographies a été fait par un logiciel de traitement d'image (Scion image), permettant à partir d'une structure réelle, d'obtenir des niveaux de gris ou de couleur, afin de donner le taux de porosité. Il faut savoir que les résultats sont estimatifs puisque juste une partie de la micrographie a été traitée. Les différentes étapes pour l'utilisation du logiciel permettant de déterminer le taux de porosité, sont motionnées dans la partie annexe de cette étude.

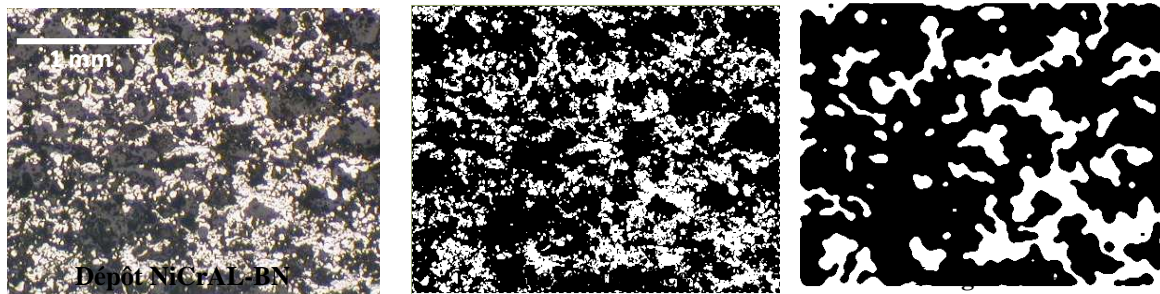
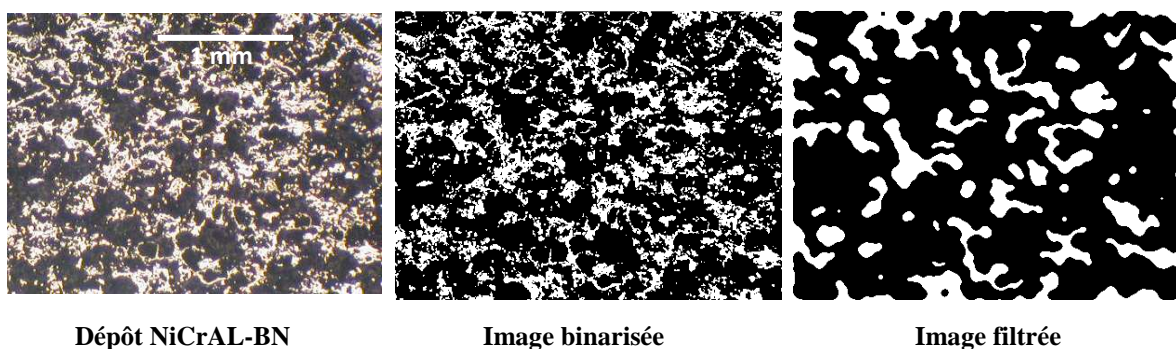


Figure II.6 : *Traitement d'image d'une éprouvette NiCrAl-BN-Polyester (E13)*

Tableau II.01 : *Valeur des porosités de l'éprouvette (E13)*

Mesures	Valeur de mesure
Surface totale de l'image	138023 μm^2
Surface occupée par la porosité	98737 μm^2
Pourcentage de la porosité	71 %



Dépôt NiCrAl-BN

Image binarisée

Image filtrée

Figure II.7 : *Traitement d'image d'une éprouvette NiCrAl-BN-Polyester (E7)*

Tableau II.02: Valeur des porosités de l'éprouvette (E7)

Mesures	Valeur de mesure
Surface totale de l'image	149747 μm^2
Surface occupée par la porosité	100281 μm^2
Pourcentage de la porosité	66 %

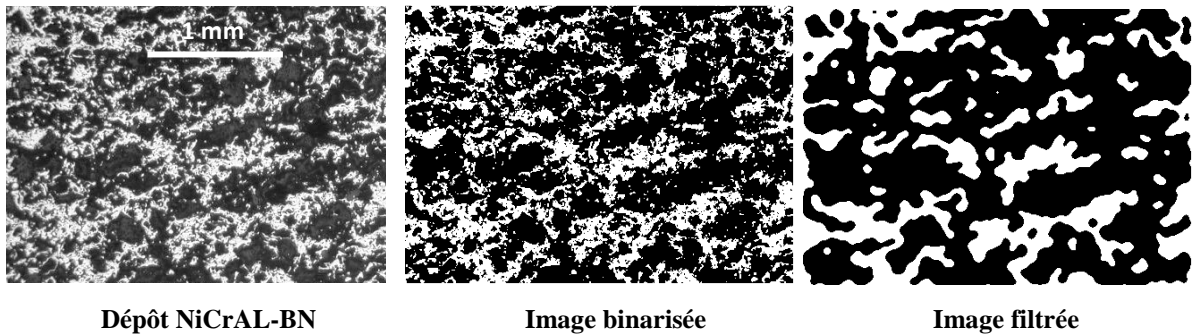


Figure II.8 : Traitement d'image de la troisième éprouvette (E4)

Tableau II.03 : Valeur des porosités de l'éprouvette (E4)

Mesures	Valeur de mesure
Surface totale de l'image	155146 μm^2
Surface occupée par la porosité	99408 μm^2
Pourcentage de la porosité	64 %

Les tableaux II.01, II.02, II.03, donnent les valeurs de la porosité mesurée à partir des surfaces choisies des 3 éprouvettes. Comme les projections ne sont pas très uniformes sur toute la surface, ces résultats peuvent varier d'une zone à une autre. Les trois micrographies donnent des taux de porosité assez élevés variés entre 64% et 71 % pour des surfaces choisies. Cela est dû essentiellement à l'influence de tous les paramètres mentionnés auparavant lors de la construction d'un dépôt réalisé principalement par la projection au plasma. Ce taux de porosité calculé confirme et prouve la notion de friabilité et d'hétérogénéité sur le matériau considéré.

II-5 Relation entre la morphologie et la fonction des abrasables

A travers les explications et les définitions données aux paragraphes précédents, on constate que les revêtements abrasables présentent une structure poreuse, hétérogène, d'une faible densité. En effet, cette morphologie a été bien conçue et étudiée pour remplir le rôle du matériau abrasable en cas d'excitation dynamique de la structure pendant le fonctionnement, d'où, en cas de contact entre le bout de l'aube, le revêtement doit subir l'abrasion par le détachement des particules discrètes grâce aux micros fractures ce qui permet à la friction d'engendrer immédiatement des débris de sorte que la pale ne reste pas en contact avec le revêtement un long moment. Si cette condition d'hétérogénéité ne remplit pas la structure abrasable, l'aspect prend une autre forme de compréhension sur le phénomène, et l'abrasable perd son rôle attendu alors qu'il ne doit engendrer qu'un endommagement minimal à l'extrémité de l'ailette ; d'où, si le glissement de la pale continu sur le revêtement, une déformation plastique aura lieu sur l'une ou les deux parties qui interviennent ; la surface est parfaitement lissée ce qui implique un glissement prolongé et pousse le mécanisme à prédominer une usure par fusion qui implique la création des points chauds et donne une probabilité de l'usure de l'ailette.

II-5-1 Localisation du mécanisme d'enlèvement des constituants de l'abrasable

L'aspect repose sur la capacité du matériau à se disloquer, cela est dû à la présence d'un lubrifiant solide et de porosités qui fragilisent le composite et favorisent la rupture par cisaillement. Cette étude a été proposée par Ghasripour durant un test du revêtement Aluminium-polymère. Pour mieux appréhender la dégradation au contact avec l'aube, les observations ont été faites lorsque la vitesse de rotation est inférieure à 100 m/s, [81].

Après le passage de la pale, si les liaisons entre les particules sont suffisamment faibles, celles-ci se détacheront et emporteront une grande partie de l'énergie de collision. Il s'agirait dans ce cas d'un mécanisme d'usure efficace (Figure II.9). La particule I est poussée par la pale et accélérée vers l'intérieur du revêtement. La particule II a reçu l'impact un instant avant et elle a subi la même accélération. La particule III a emmagasiné l'énergie absorbée durant l'impact en énergie élastique. La particule IV est accélérée hors du revêtement grâce à l'énergie élastique emmagasinée.

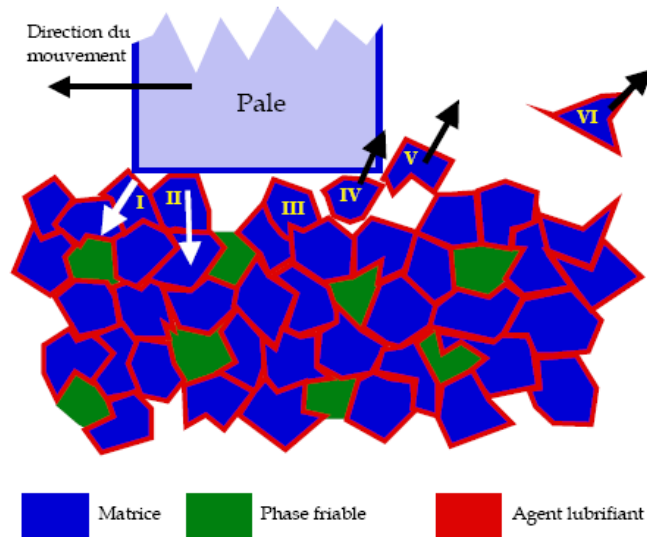


Figure II.9 : Schématisation du modèle d'abrasivité

(Source : F. Ghasripoor, R. Schmid, and M. Dorfman. Abradable coatings increase gas turbine engine efficiency. *Materials World*, 5 (6): 328–330, 1997)

Les débris d'usure obtenus, peuvent produire un autre problème dû à la formation de zones de transfert adhésif aux points où l'échauffement est le plus important si l'épaisseur de l'ailette demeure large, c'est-à-dire ; il faut utiliser une ailette avec une extrémité plus mince de sorte qu'elle permet l'évacuation des éclats par l'arrière, si ce n'est pas le cas, dans les cas où son épaisseur est trop importante, cette large épaisseur ne permet pas l'éjection des débris. Les fragments seront emprisonnés entre le revêtement et la pale (Figure II.10), et cette zone entraînera différents types d'usure notamment l'usure par fusion.

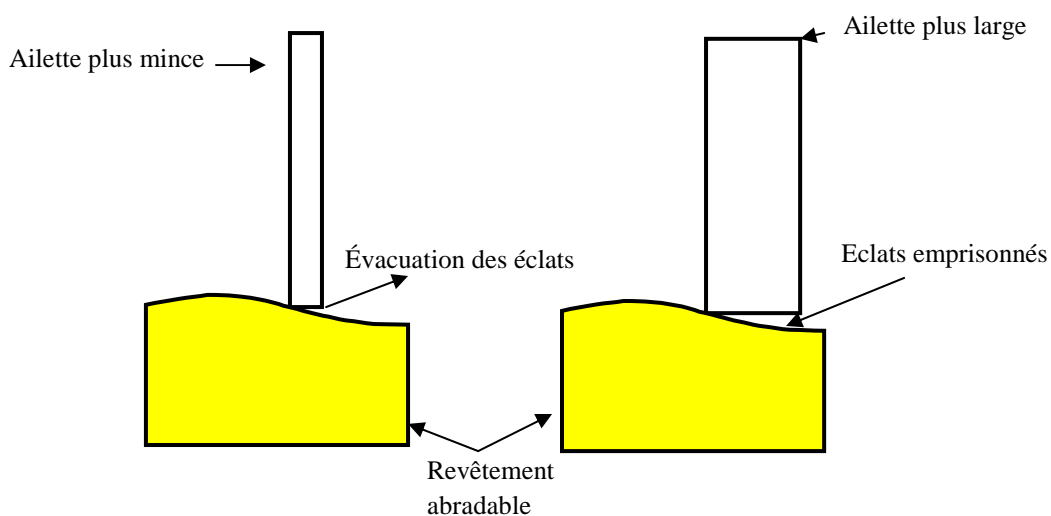


Figure II.10 : Schématisation d'un abrasible usiné par la pale

(Source : Construit par nos soins)

Les revêtements abradables peuvent se présenter sous forme de deux catégories :

- Un abradable d'une structure poreuse, hétérogène ;
- Un abradable sous forme de revêtements denses ;

Lorsque le revêtement abradable se présente sous une structure avec un taux de porosité très élevé, la résistance au cisaillement des particules est plus faible, mais lorsqu'il s'agit du deuxième type d'abradable, la porosité dans ce genre de matériau varie entre 2 à 15%, l'interaction avec la pale pendant la friction est plus complexe que pour la première, la formation d'un front de particules se déplaçant tout en s'enfonçant dans le revêtement entraîne une déformation plastique, observable sous forme de traînées. Lorsqu'il est important, l'échauffement peut également nuire à l'intégrité de l'aube.

Cette notion a donné naissance à l'ajout de polyester dans les revêtements denses pour qu'il donne une certaine forme de fragilité sur les liaisons inter-particules afin que les particules puissent se détacher facilement.

D'autre part, pendant le fonctionnement, le matériau abradable est consommé suivant des mécanismes d'usure très complexes et variés, incluant le découpage, le transfert adhésif, le rainurage, l'abrasion, la micro-rupture, la fusion, la corrosion...etc

II-6 Principaux modes d'usure des abradables

Dans tous les cas, il est nécessaire d'essayer de bien comprendre les mécanismes du frottement sec de manière à adapter au mieux les principaux modes d'usure. Cette usure se traduit par une augmentation progressive du jeu nécessaire au fonctionnement du mécanisme, et peut s'accompagner par la détérioration des surfaces visibles à l'œil nu. Les principaux modes d'usure rencontrés sont :

II-6-1 Usure abrasive

L'usure abrasive apparaît lorsqu'une surface de dureté élevée vient glisser sur un matériau souple (Figure II.11- (a)). Ce mécanisme de dégradation fait produire et intervenir dès les premiers instants de l'abrasion des corps antagonistes, cela devient rapidement une usure à trois corps (Figure II.11-(b)). Les particules peuvent être étrangères ou issues de la dégradation des surfaces elles mêmes.

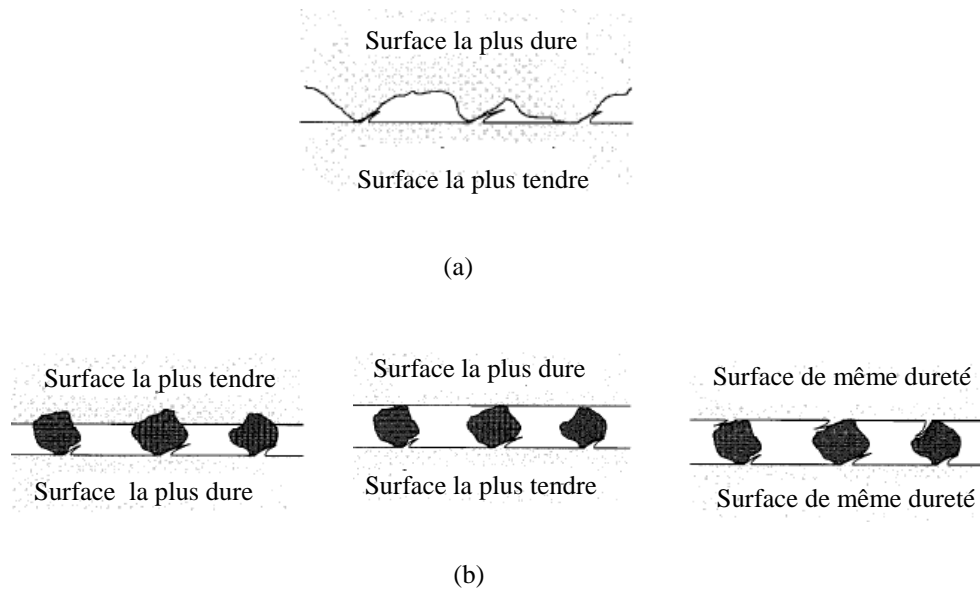


Figure II.11 : Usure par abrasion :

(a) *Abrasion à deux corps*

(b) *Abrasion à trois corps*

(Source: A. Cornet, et J.-P. Deville « Physique et ingénierie des surfaces ». Second Edition 1998, page 108)

II-6-2 Usure adhésive

L'usure adhésive se rencontre lorsque deux surfaces de faible dureté glissent l'une sur l'autre. Des particules d'une des surfaces viennent adhérer à l'autre surface (Figure II.12). Ensuite ces particules peuvent soit revenir sur l'autre surface soit être éjectées. L'usure adhésive est donc le transfert de matière d'un corps vers l'autre durant le contact sous un mouvement relatif. [82, 83].

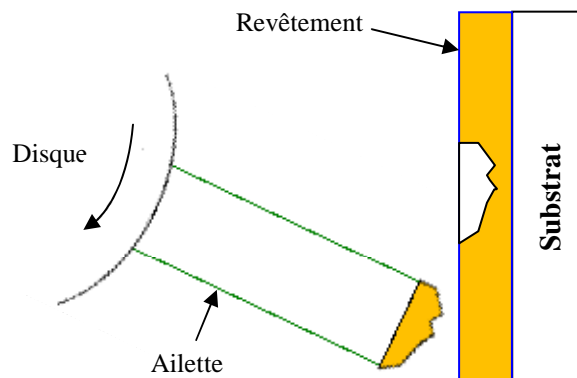


Figure II.12 : Présentation schématique d'usure adhésive

(Source : Construit par nos soins)

II-6-3 Usure corrosive

Dans un mécanisme, les réactions chimiques ou électrochimiques avec le milieu environnant, peuvent dominer le processus d'usure. Cette réaction est créée par l'énergie dégagée durant le frottement et conduit à la formation d'une couche superficielle qui pourrait plus ou moins nuire au fonctionnement du joint en modifiant le comportement en frottement des deux surfaces.

II-6-4 Usure érosive

Les dégradations sont induites par l'énergie cinétique des particules transportées par le fluide liquide ou gazeux (Figure II.13). Ces particules sont souvent des grains de poussière plus ou moins gros, ingérés de l'environnement extérieur. Vu leur relative fragilité, les joints abrasives sont hautement susceptibles à ce genre d'agression, et le taux de perte de matière peut être considérable [84].

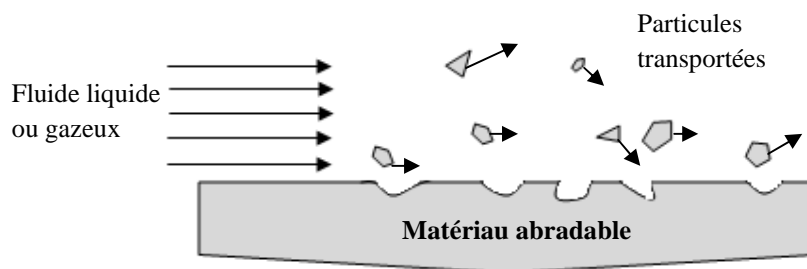


Figure II.13 : *Présentation schématique d'usure érosive*

(Source : Construit par nos soins)

II-6-5 Usure par fatigue.

L'usure par fatigue de surfaces est observée durant des glissements répétés. Les cycles de charge et décharge vont induire dans le matériau des craquements à la surface qui peuvent former de larges fragments qui se détachent. Cette détérioration se trouve dans le cas des mouvements cycliques, en particulier le frottement répétitif. La structure en lamelles des revêtements abrasives augmente leur disposition à ce type d'usure. Cependant, la durée de vie opérationnelle d'un joint abrasif est souvent raccourcie par d'autres mécanismes d'usure avant que la fatigue n'engendre des détériorations significatives.

II-6-6 Usure par fusion :

Ce genre d'usure est une conséquence de l'échauffement par friction, et est donc restreint aux zones superficielles, créant ainsi des surfaces lisses couvertes de couches minces fondues. Donc il s'agit de l'usure due à la fusion totale ou partielle de l'une ou des deux parties du joint. C'est l'un des mécanismes les plus significatifs d'usure de l'ailette [85].

L'activation des différents mécanismes d'usure au contact outil/revêtement peut expliquer les différences d'abrasivité entre les revêtements. La meilleure façon d'analyse c'est de faire reproduire l'usure sur un banc d'essai.

II-7 Objectifs des essais de frottement (Banc d'essais)

L'objectif de cette partie est de caractériser le comportement en frottement de l'abrasif et de mettre en évidence les mécanismes d'usure mis en jeu, pour les conditions de contact testées, et pour reproduire les mécanismes d'usure majeurs observés lors du service. A cet effet, des essais de frottement ont été développés sur un tribomètre capable de simuler les paramètres primaires du tribosystème du joint abrasif, Dans tous les cas, cela implique d'une part de choisir les variables opératoires susceptibles d'influer sur le frottement et l'usure, et d'autre part, de choisir la manière d'évaluer l'usure, donc il est très important de porter une attention particulière à la simulation des conditions extrêmes. Ceci requiert la combinaison de plusieurs facteurs:

- La vitesse de rotation relative (de l'ailette par rapport au revêtement),
- Le taux d'incursion de l'ailette dans le revêtement,
- Le contrôle de la température,
- La géométrie du contact,
- Le contrôle des effets de refroidissement en surface causé par le déplacement de l'air.

Dans l'intérêt de la reproductibilité des tests, ainsi que pour des raisons économiques, plusieurs simplifications par rapport aux cas réels doivent être envisagées [86].

II-7-1 Description du banc d'essais :

Les premiers essais réalisés sur ce banc en 1989, sur des joints abrasables de type Al-Si/Polyester et Nickel/Graphite, ont permis de mettre en évidence cinq mécanismes de dégradation qui se distinguent les uns des autres par le taux d'usure et/ou l'élévation de température lors du contact : la coupe, la déformation plastique, le transfert adhésif, la fusion et la tribo-oxydation [87].

Le banc Sulzer-Metco (Figure II.14), consiste en un rotor possédant une vitesse de rotation élevée, un porte-échantillon amovible, un dispositif d'échauffement et une conduite hydrodynamique. Le rotor est enveloppé dans une enceinte isolante pour canaliser les gaz chauds produits par la combustion. La température de l'isolant peut être mesurée durant le test, donnant ainsi une estimation de la température des gaz circulant dans l'enceinte et par suite celle de l'aube. L'aube se constitue d'une matière très rigide fixée sur le disque en rotation à une vitesse linéaire de 2 à 2000 $\mu\text{m/s}$ frotte une fois par tour contre une paroi abrasable qui peut être déplacée radialement et axialement avec un pas aussi petit que 0,15 μm dans la trajectoire de cette aube. La vitesse en bout d'aube peut atteindre 450 m s^{-1} , et la température d'essai contrôlée jusqu'à 350°C . Un maximum de 700°C a été atteint quand le banc a été utilisé pour les tests haute température [88]

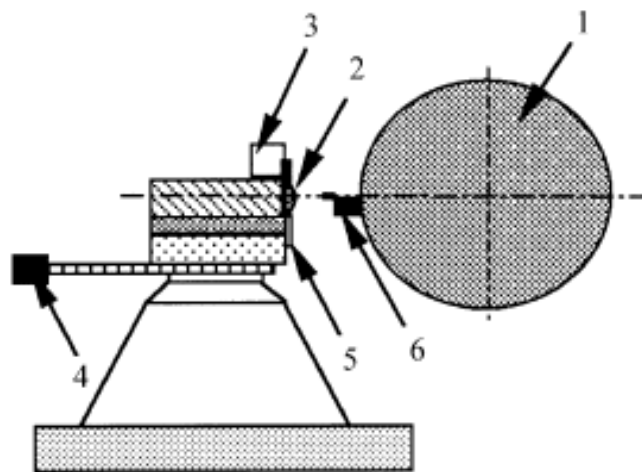


Figure II.14 : Configuration du banc d'essais *SULZER-METCO*

1 : rotor ; 2 : paroi abrasable ; 3 : thermocouple ; 4 : moteur pas à pas ; 5 : capteur de force ; 6 : aube

(Source: M. Bounazef, S. Guessasma, and B. Ait Saadi. The wear, deterioration and transformation phenomena of abrasable coating bn-sial-bounding organic element, caused by the friction between the blades and the turbine casing. *Materials Letters*, 58: 3375–3380, 2004.)

L'usure est souvent évaluée par la perte de masse ou de volume rapportée à une distance parcourue ou à une surface de contact. Généralement, lorsque plusieurs mécanismes sont impliqués dans un processus d'usure, et en présence de plusieurs résultats variés, la meilleure façon pour interpréter les résultats obtenus est la lecture directe des cartes d'usure pour la raison de la clarté et la lisibilité des réponses.

II-8 Carte d'usure

L'un des meilleurs outils mis au point pour permettre d'évaluer une grande quantité d'informations tribologiques est l'utilisation des cartes d'usure [89, 90]. Les cartes d'usure, permet d'explorer des cas où l'usure résulte de l'interaction de plusieurs mécanismes d'usure. Une carte d'usure est une représentation graphique des données expérimentales qui distingue des domaines d'usure comme montrés sur la figure (II.15). Cette représentation donne la possibilité de voir les différentes évaluations du taux d'usure en fonction des paramètres de fonctionnement, par exemple dans ce cas de figure représenté, le taux d'usure est montré en fonction de la variation de la vitesse d'incursion et la vitesse linéaire pour une configuration d'essais effectués sur le banc d'essai *SULZER-METCO* sur le matériau SiAl-BN. Cela peut aider à choisir l'intervalle de fonctionnement pour lequel le taux d'usure demeure minimal.

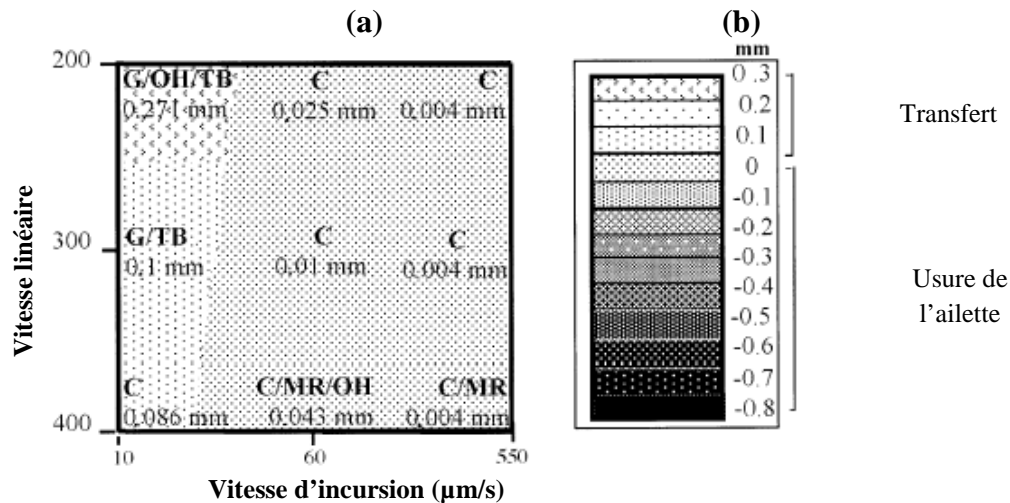


Figure II.15 : Présentation de la forme de la carte d'usure

a): Représentation de la carte d'usure b): Représentation de la légende de la carte d'usure)

C : Coupe de matériau, G : Sillon profond, TB : Transfert sur l'ailette, OH : Fusion de surface, MR : Micro-rupture

(Source: M. Bounazef, S. Guessasma, and B. Ait Saadi. The wear, deterioration and transformation phenomena of abrasable coating bn–sial–bounding organic element, caused by the friction between the blades and the turbine casing. *Materials Letters*, 58: 3375–3380, 2004.)

II-9 Influence de l'usure sur la texture de la surface abradable

En mécanique, les surfaces peuvent être classées en surfaces aléatoires lorsque celles-ci sont réalisées par un outil non guidé (Figure II.16-a), et en surfaces déterministes lorsqu'elles sont réalisées par un outil guidé (figure II.16-b) [91],

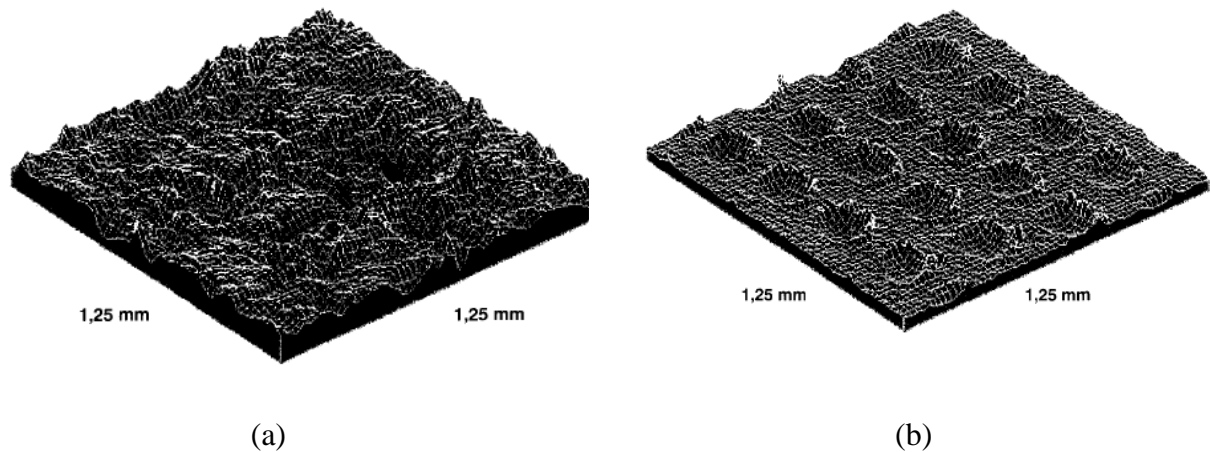


Figure II.16 : *Représentation isométrique d'une surface ;*
(a) Représentation d'une surface aléatoire
(b) Représentation d'une surface déterministe

(Source: A. Cornet, et J.-P. Deville « Physique et ingénierie des surfaces ». Second Edition 1998, page 44)

Cette définition concernant les états de surfaces, à été donné pour le cas des matériaux homogènes, mais dans notre cas, on est en face à une surface abradable friable pleine d'aspérités et de porosités, comme expliqué au paragraphe précédent, ce qui veut dire qu'il peut y avoir des dégradations au niveau de l'état de surface après avoir subi ces mécanismes d'usure. D'un autre terme et pour rapprocher l'idée, vu la morphologie qui constitue le matériau abradable, la surface engendrée par l'ailette (outil guidé) peut prendre une surface aléatoire comme elle peut prendre une surface déterministe, cela dépend de l'abrasabilité du matériau. Il paraît donc très important de savoir quelle est la nature de surface, ou bien d'un autre terme la rugosité de surface obtenue après qu'elle soit rentrée en friction avec l'ailette ; cela peut causer des pertes de pression, et à cette échelle ces pertes peuvent causer des situations accidentelles.

Dans ce qui suit, le contexte va se diriger sur l'étude bibliographique des paramètres constituant un état de surface afin de compléter le but recherché de notre étude. On a choisi de faire cet enchaînement dans le même chapitre parce que cet état de surface est le résultat direct de l'impact de l'usure sur la surface abrasable.

II-10 Les défauts de surface

L'état de rugosité dépend en effet de la nature de la géométrie d'une surface (Figure II.17), c'est pour cette raison, la nature fait l'objet d'une classification des défauts comme suit :

➤ Défauts du premier ordre :

Ce sont des défauts dus à des écarts de forme (rectitude, cylindricité, etc.) et de position (perpendicularité, parallélisme, etc.). Provenant de la déformation de la pièce pendant et après la friction, des défauts de bridage, de la flexion des éléments de la turbine, d'un mauvais guidage des éléments mobiles ou de l'usure des organes.

➤ Défauts du second ordre ou (ondulation de surface) :

Ce sont des défauts plus petits ayant l'aspect général d'une ondulation, et provenant de l'avance de l'ailette sur la surface de l'abrasable, de vibrations de basse fréquence. Ces défauts se manifestent sous forme d'ondulations.

➤ Défauts du troisième ordre :

Ce sont des stries et sillons dus à l'avance de l'arête coupante de la pale, ou à l'avance par tour ou à des vibrations haute fréquence.

➤ Défauts du quatrième ordre

Ce sont des défauts dus à l'hétérogénéité de la matière, à des accidents divers, à des défauts de coupe : ils se manifestent par des arrachements, des fentes, des marques diverses non périodiques.

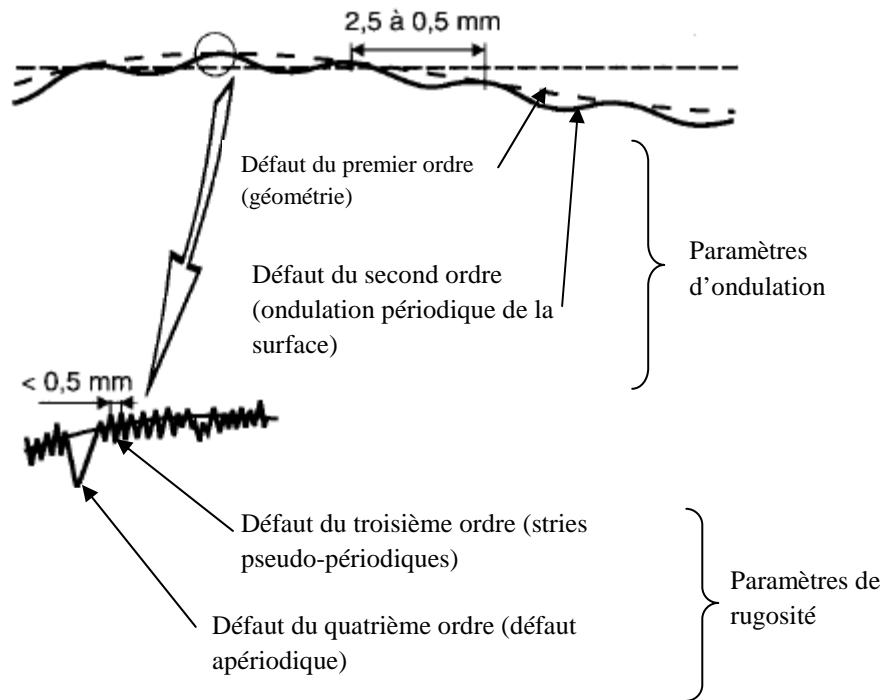


Figure II.17 : Les quatre premiers ordres de défauts superficiels ;

(Source: A. Cornet, et J.-P. Deville « Physique et ingénierie des surfaces ». Second Edition 1998, page 46)

D'après la définition des niveaux de défauts rencontrés dans une surface, on constate qu'on parle de la rugosité qu'à partir du troisième et le quatrième niveau. Pour notre cas, la composition du matériau et le procédé d'élaboration donne l'état réel de la surface ; on est en face à une rugosité du troisième et quatrième ordre dû à la présence des aspérités. Cela se dit avant l'utilisation de l'abrasable, mais à cette étude on cherche à mesurer les défauts globaux sur la surface du NiCrAl-BN après le fonctionnement, ce qui nous ramène à donner un aperçu sur les critères permettant de caractériser une surface.

II-11 Caractéristiques et paramètres des surfaces

Les critères caractérisant une surface devraient permettre de caractériser la topographie des surfaces indépendamment du procédé de fonctionnement, et d'expliquer certaines de leurs propriétés fonctionnelles. Nous ne pouvant pas savoir a priori quel est le paramètre pertinent pour notre problème, ce qui nous ramène à définir les paramètres classiques pour décrire la rugosité des surfaces en deux dimensions (2D), et par la suite on définit les paramètres d'une topographie à trois dimensions (3D). On note que l'étude de ces paramètres est très vaste, et un seul chapitre ne suffit pas pour donner des explications

profondes. Dans ce qui suit on présente juste les détails nécessaires dont on a besoin pour effectuer notre étude. [92, 93]

II-11-1 Paramètres classiques à deux dimensions (2D)

La détermination d'un tel profil (rugosité 2D) n'a de sens que si on connaît les directions significatives, c'est-à-dire l'orientation de la texture de la surface. La ligne moyenne est obtenue par le calcul de la droite de régression dans le cas du profil brut ou par filtrage pour les profils d'ondulation et de rugosité. La ligne moyenne n'est pas la seule ligne de référence, on peut utiliser la ligne enveloppe inférieure (LEI) ou la ligne enveloppe supérieure (LES) (Figure II.18).

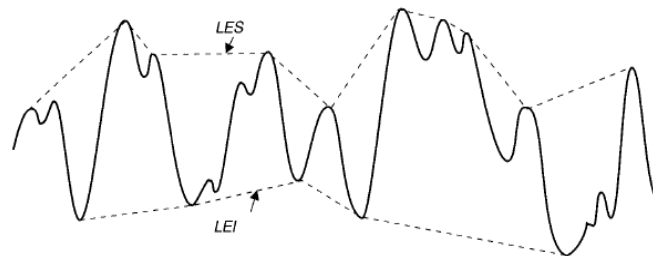


Figure II.18 : Lignes enveloppes supérieure et inférieure ;

(Source: A. Cornet, et J.-P. Deville « Physique et ingénierie des surfaces ». Second Edition 1998, page 49)

On désigne par (R) la rugosité ; (L) la longueur de base mesurée suivant une direction générale du profil, (Figure II.19)

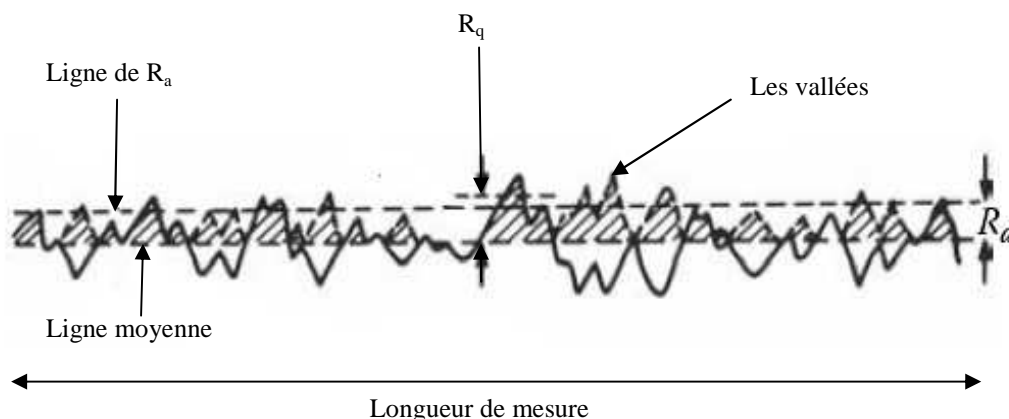


Figure II.19 : Présentation des paramètres R_a et R_q

(Source: David J. Whitehouse "Handbook of surface and nanometrology" / -- 2nd ed. Rev. ed. of: Handbook of surface metrology, TA418.7.W47 2011, page 12)

Les principaux paramètres d'amplitude sont :

a) L'écart arithmétique moyen

C'est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des ordonnées $z(x)$ à l'intérieur d'une longueur de base, telle que :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \quad (\text{II.01})$$

b) L'écart quadratique moyen :

C'est la moyenne quadratique des valeurs des ordonnées $z(x)$ à l'intérieur d'une longueur de base

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z^2(x) dx} \quad (\text{II.02})$$

Avec :

- $Z(x)$: c'est l'écart entre l'altitude du point de coordonnées $(x,)$ et celle du plan moyen
- L : Longueur de mesure

II-11-2 Analyse tridimensionnelle

Une mesure topographique doit être considérée comme un échantillon extrait de l'ensemble de toutes les mesures réalisables sur la surface, donc il est naturellement très significatif d'utiliser des méthodes d'analyse du processus pour caractériser toutes les zones de la surface. Dans cette partie, nous nous intéressons à une méthode de caractérisation de la topographie de surface qui représente une extension évidente des méthodes normalisées dans le cas des profils 2D, le principe se base du passage d'une étude de la distribution $z = F(x)$, à la distribution $z = F(x, y)$, c'est-à-dire que les mesures de z se font sur 2 axes x et y ; en finalité le résultat se donne en 3D

a) Moyenne arithmétique des écarts

S_a : C'est l'équivalent au R_a pour 2D mais cette fois-ci à 3 dimensions telle que :

$$S_a = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{X=0}^{N_x-1} \sum_{Y=0}^{N_y-1} |Z_{X,Y}| \quad (\text{II.03})$$

Avec :

- $|Z_{x,y}|$: c'est l'écart entre l'altitude du point de coordonnées (x, y) et celle du plan moyen
- N_y : c'est le nombre des points échantillonnés dans la direction y ;
- N_x : c'est le nombre de points échantillonnés dans la direction x ;

b) Moyenne quadratique des écarts :

S_q : C'est la moyenne quadratique des écarts, et c'est l'équivalent au Rq mais cette fois-ci à 3 dimensions telle que :

$$S_q = \left[\frac{1}{N_x N_y} \sum_{X=0}^{N_x-1} \sum_{Y=0}^{N_y-1} (Z_{X,Y})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{II.04})$$

Pour obtenir une bonne analyse de surface, il faut donc inclure un balayage serré sur deux directions. Pratiquement il y a des critères de calcul répondent à toutes ces conditions essentiellement avec l'utilisation soit de la moyenne arithmétique des écarts ou bien la moyenne quadratique des écarts. Pour le cas d'étude précise, les deux critères servent bien à la détermination des caractéristiques de la surface abrasable après avoir subi la friction ; on se contente donc uniquement à l'utilisation de la moyenne arithmétique des écarts (S_a) puisque cette dernière suffit pour déterminer la rugosité en 3D.

II-12 Appareillages de mesure de l'état de surface

Il existe plusieurs moyens pour mesurer l'état de surface que l'on peut classer en deux groupes selon si la mesure est effectuée avec contact ou si la mesure est effectuée sans contact entre l'appareil de mesure et la surface à caractériser.

II-12-1 Rugosimètre tactile: mesure avec contact mécanique

Le rugosimètre tactile (Figure II.20) est constitué principalement d'un transducteur à induction possédant une pointe en diamant de rayon de courbure pouvant varier entre 2 μm et

10 μm , et d'un ensemble de trois moteurs pas à pas. Un des moteurs permet le déplacement de la pointe suivant la direction horizontale (X). Un deuxième moteur permet le positionnement de la pointe suivant la direction latérale (Y). Le troisième moteur permet le dégagement de la pointe suivant la direction (Z). La mesure du déplacement vertical fait appel à un capteur inductif. Les méthodes tactiles ont des limitations liées au principe même, les erreurs peuvent être commises dans les creux en raison du rayon de courbure du stylet. Cette méthode de mesure d'état de surface est relativement lente, et sous l'action de la force d'application, le stylet peut endommager la surface, essentiellement lorsqu'il s'agit dans les cas des matériaux abrasables vu la facilité d'abrasion de ce genre de matériau, mais elle est néanmoins bien adaptée aux industries mécaniques.

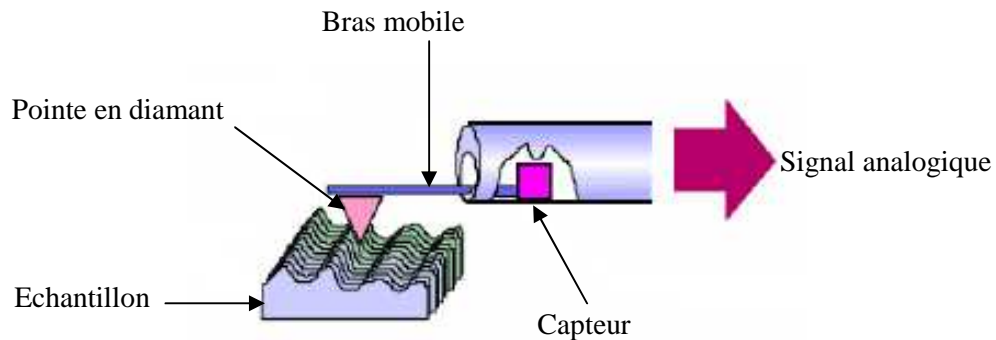


Figure II.20 : Rugosimètre tactile

(Source : Houcine BEN ABDELOUNIS. « dynamique et vibroacoustique du contact rugueux: expérimentation et modélisation »
Thèse doctorat de l'école central de Lyon)

II-12-2 Interféromètre optique: mesure sans contact

L'interféromètre optique est un microscope interférentiel. Il permet la mesure des surfaces de quelques dizaines de μm^2 à plusieurs mm^2 . Le principe de la mesure du relief est basé sur une technique de détection de phase par interférométrie où la lumière blanche réfléchi par la surface. Pour mesurer l'amplitude du relief, les objectifs de ce microscope émettant la lumière blanche solidairement à un translateur piézo-électrique dont le déplacement est contrôlé par un microcalculateur. Les franges d'interférences se déplacent avec le mouvement du translateur et elles sont enregistrées pour chacune des positions verticales de l'objectif. A chacune de ces positions, il correspond des images (x, y) en franges d'interférences. Un algorithme adapté traduit ces images en variations de relief.

La figure (II.21) donne un exemple d'acquisition avec ce type de dispositif. la rugosité de surface est obtenue à l'aide d'un profilomètre laser adapté pour la caractérisation de la topographique.

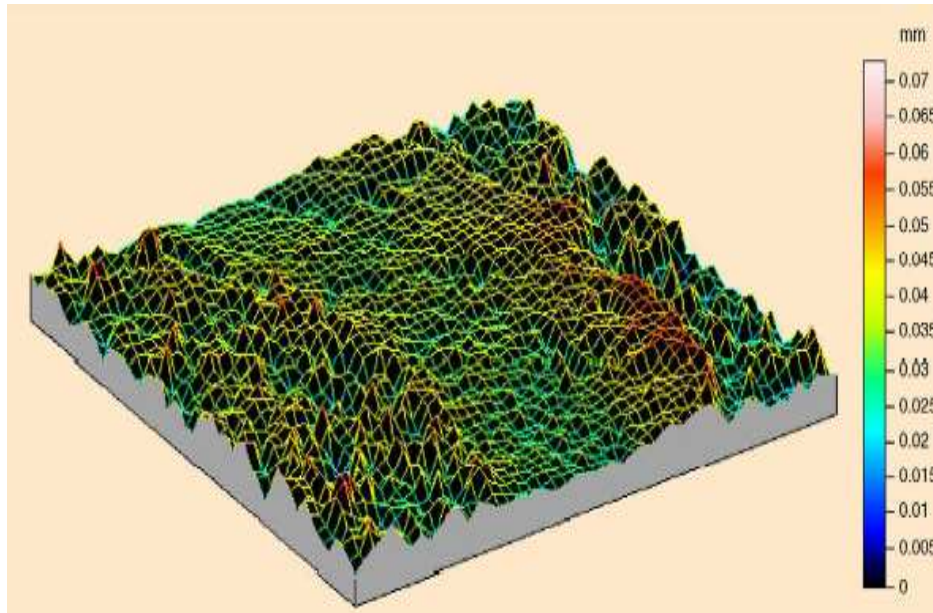


Figure II.21 : Rugosité de surface obtenue à l'aide d'un profilomètre laser

(Source : Sofiane Guessasma, Mokhtar Bounazef, Philippe Nardin, Tahar Sahraoui "Wear behavior of alumina–titania coatings: analysis of process and parameters" *Ceramics International* 32 (2006) 13–19)

Donc automatiquement et par défaut, l'appareil qui sera considéré dans cette étude en fonction des définitions donnée sur les appareils de mesure c'est l'interférométrie à laser puisqu'il donne la possibilité de détecter avec précision la rugosité des surface abrasable après la friction sur les trois dimensions. Cela permet de voir avec exactitude la nouvelle morphologie de la surface engendrée par l'effet du frottement.

II-13 Conclusion

Ce chapitre s'est donné le rôle d'exposer le problème principal et les méthodes de mesure de la rugosité, il s'est attaché principalement à la définition de la relation qui existe entre la morphologie, la texture et la fonction du matériau abrasable. Cet espace d'intérêt peut

être soumis dans certaine condition, à des contraintes qui peuvent être soit positives, ou soit négatives du fait que cette relation peut influencer l'état de surface.

L'aspect sur l'influence du système mécanique sur la rugosité des états de surface apparait simple lorsqu'il s'agit d'un matériau homogène, mais lorsqu'il s'agit d'un revêtement abradable, le problème prend une autre forme parce que dans ce cas là plusieurs paramètres agissent directement sur le comportement, car d'un coté le fait de l'existence d'un pourcentage de porosité très élevé, et d'un autre coté le fait que les paramètres de fonctionnement comme la vitesse de rotation, et la vitesse d'incursion peuvent changer dans des large intervalles ; cela influe directement le comportement du dislocation des particules.

La simulation devient donc une étape très importante dans le traitement de ce problème de fiabilité. Les essais expérimentaux permettent de vérifier et d'expliquer ainsi de compléter la compréhension du phénomène par l'établissement des modèles mathématiques et des lois tirées des observations expérimentales. Pour atteindre cet objectif, le chapitre IV fait une analyse détaillée du comportement traitée de tous les cotés (Usure et impact d'usure sur le matériau.

CHAPITRE III

Méthode des plans d'expériences

CHAPITRE III

Méthode des plans d'expériences

III-1 Introduction

D'une manière générale, on cherche à reproduire par calculs les comportements physiques des dispositifs réels soumis à des conditions particulières, notamment en mécanique, où des études peuvent être abordées conjointement avec les différents paramètres comme la vitesse de rotation, et d'incursion...etc. Les stratégies couramment employées pour mener à bien ces expérimentations sont souvent informelles, parfois quelque peu inutiles, et elles peuvent conduire à un nombre de résultats difficiles à exploiter. Dans notre étude, on est en face à un comportement d'un matériau abradable qui semble difficile à être interprété, vu la morphologie constituant le matériau comme expliqué au chapitre précédent, il est possible qu'il peut se comporter donc d'une manière très variable en fonction de la variation des paramètres de fonctionnement.

Ce terme de difficulté désigne en définitive une méthodologie complète pour la caractérisation comportementale du système. Elle est basée sur la modification et la mesure des variables propres au dispositif considéré ; cela comprend principalement les grandeurs étudiées ainsi que leurs sources de variation ; elle permet de déterminer les relations existant entre les groupes de variables et la réponse, en établissant une relation mathématique. L'expérimentateur peut en déduire des informations plus ou moins précises qualitativement et quantitativement. Pour optimiser l'organisation des expériences et exploiter efficacement les résultats obtenus, le scientifique peut avoir intérêt à recourir à des méthodes telles que la méthode des Plans d'Expériences.

La méthode des plans d'expériences cherche à déterminer une relation entre deux types de grandeurs :

- La réponse : qui correspond à la grandeur physique étudiée ;
- Les facteurs : qui correspondent aux grandeurs physiques modifiables par l'expérimentateur, et sensés influencer sur les variations de la réponse.

Ce chapitre présente la méthode des plans d'expériences qui permettra de trouver la réponse dynamique du système (abradable/aube). Une dépendance fondamentale existe entre l'objectif recherché et la définition du plan d'expériences ; le principe consiste à extraire du domaine expérimental, un nombre suffisant « N » de combinaisons particulières afin d'estimer le comportement du matériau abradable à l'aide de la méthode des plans d'expériences.

III-2 Définition

Les Plans d'Expériences visent à établir des relations liant la réponse avec les facteurs, qu'avec les facteurs entre eux (interactions). Les plans d'expériences correspondent à une suite d'essais organisés à l'avance de manière à déterminer, en un minimum d'essais, un maximum de précision, et de voir l'influence de multiples paramètres sur une ou plusieurs réponses [94, 95].

Cette méthode permet de répondre à deux familles de questions :

- Comment estimer et comparer les effets des paramètres de réglage d'un processus ?
- Comment affiner les paramètres de réglage d'un processus pour atteindre un optimum ?

Il suffit de rechercher le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt ou bien la réponse (Y) et les différentes variables, ou facteurs (x_i) qui construisent l'environnement du système. (Figure III.1).

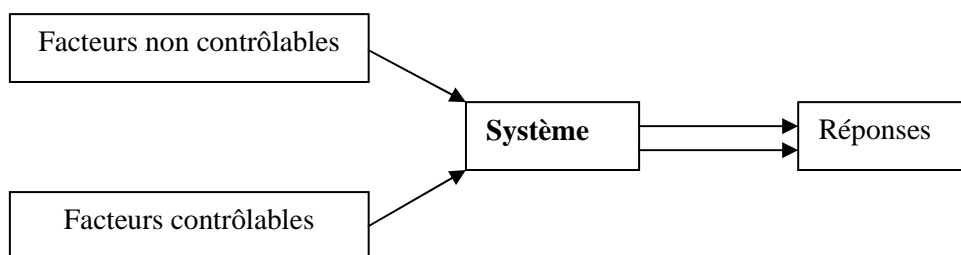


Figure III.1 : *L'environnement du système*

(Source : Construit par nos soins)

La méthode consiste donc à établir la relation entre une réponse (résultats) et les différents facteurs sous forme d'une fonction du type :

$$y = f(x_i) \quad \text{(III.1)}$$

Avant d'aller plus loin, il est important de bien définir les principaux termes utilisés dans la méthodologie des plans d'expérience.

III-2-1 Facteur

Les facteurs, parfois appelés Variables Indépendantes, sont les causes supposées provoquant le phénomène. Tous les facteurs susceptibles d'avoir une influence sur le phénomène doivent être pris en compte, faute de quoi les résultats risquent d'être faussés et donc inutilisables. Un facteur peut être qualitatif ou quantitatif, continu ou discontinu, contrôlable ou non contrôlable [96].

Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure III.2). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée « niveau ». Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes.

- La borne inférieure (niveau bas que l'on note le plus souvent -1),
- La borne supérieure (niveau haut que l'on représente généralement par +1).

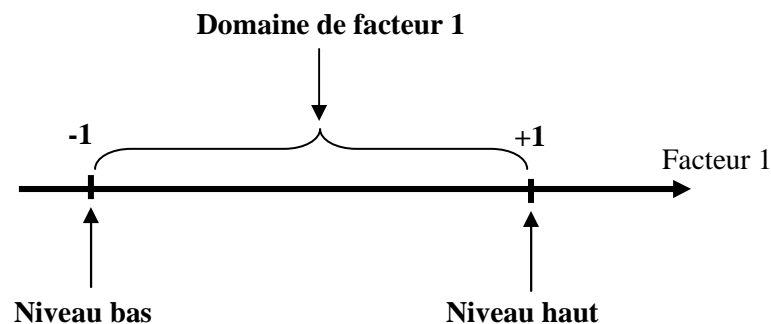


Figure III.2 : *Présentation du domaine d'étude d'un seul facteur*

(Source : Construit par nos soins)

Les points intérieurs de ce domaine sont les points d'expériences, car ils sont la traduction mathématique par leurs coordonnées, des combinaisons de valeurs des grandeurs physiques leur correspondant. L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement domaine du facteur.

En présence de K facteurs, Le domaine expérimental ou domaine d'étude peut être défini comme l'ensemble de tous les points de la surface délimitée par les niveaux bas et haut de chaque facteur [97].

Lorsque $k = 2$, un carré est obtenu pour le domaine d'étude. Les points expérimentaux sont alors situés aux quatre sommets du carré (Figure III.3).

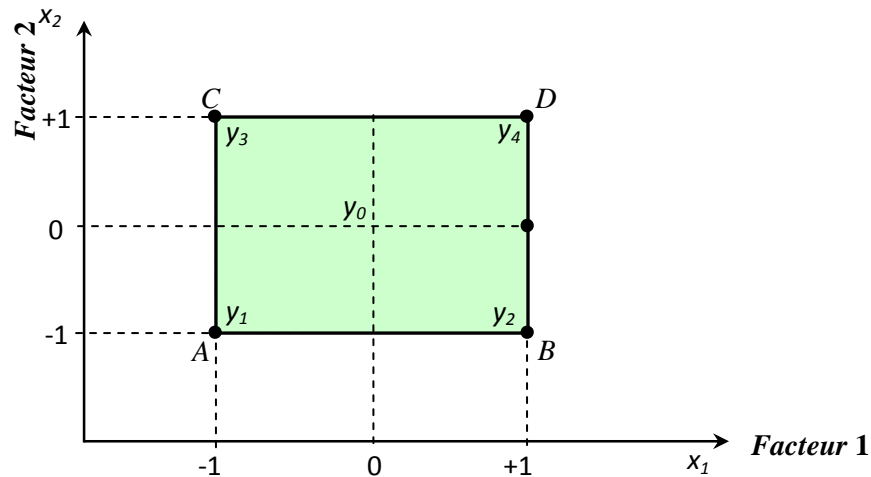


Figure III.3 : Représentation du domaine d'étude de deux facteurs

(Source : Construit par nos soins)

Lorsque $k = 3$, nous obtenons un cube dont les huit sommets représentent les huit essais du plan.

Tout point de cet espace de « K » dimensions est défini par ces coordonnées, c'est-à-dire par un vecteur « x » à « K » éléments, et ses dimensions étant imposées par les plages de variation des facteurs; ainsi tout point de cet espace défini par ces coordonnées est également une réponse Y_i .

Le passage du plan d'expérimentations composé des valeurs utilisées pour les différents facteurs lors des essais à la matrice d'expériences composée des diverses modalités des facteurs s'illustre avec l'exemple d'une table à deux facteurs présenté dans la table III.1 :

Tableau III.1 : Exemple de passage du plan d'expérimentation à la matrice d'expériences

	Facteur 1	Facteur 2		Facteur 1	Facteur 2	
N°	Vitesse linéaire (m/s)	Vitesse d'incursion (μ m/s)		N°	Vitesse linéaire (m/s)	Vitesse d'incursion (μ m/s)
1	100	10	➔	1	-1	-1
2	350	10		2	+1	-1
3	100	500		3	-1	+1
4	350	500		4	+1	+1

Il ne s'agit là que de remplacer les valeurs réelles des niveaux des facteurs par les modalités (-1), (+1) dans la matrice d'expériences.

III-2-2 Réponse

Une réponse expérimentale, est une caractéristique mesurable d'un produit ou d'un processus, et dont la variation est analysée en fonction des variations des facteurs. La réponse doit être la plus représentative possible du phénomène observé. Le choix des réponses est un problème difficile qui ne relève pas directement de la théorie des plans d'expériences. Ce n'est qu'après une analyse minutieuse des phénomènes, des enjeux, des objectifs et des contraintes que la ou les bonnes réponses peuvent être définies.

III-3 Démarche méthodologique d'un plan d'expérience

Toute expérience doit être l'objet d'une planification précise qui se concrétise sous la forme d'un plan d'expériences ou protocole expérimental. La démarche méthodologique d'un plan d'expériences peut être décomposée en différentes étapes [98, 99].

III-3-1 Définition des objets et des réponses

En tenant compte des objectifs à atteindre, il est d'abord nécessaire de faire la liste des réponses expérimentales qui peuvent être étudiées. Cette étape permet également de mettre en place les moyens et le budget nécessaires à l'étude.

III-3-2 Choix des facteurs et du domaine expérimental

C'est de loin l'étape la plus importante dans la conduite d'un plan d'expériences. Il faut :

- ✓ Sélectionner les paramètres, et choisir les modalités et les interactions à étudier.
- ✓ Recenser les paramètres pouvant influencer la réponse.
- ✓ Identifier les interactions susceptibles d'être recherchées.
- ✓ Dissocier les facteurs principaux des facteurs bruits.
- ✓ Fixer le domaine d'étude pour chacun des facteurs.

III-3-3 Proposition d'un modèle

Le plan le plus adapté à la situation sera retenu. Le plan doit présenter les propriétés suivantes :

- ✓ Bien représenter la réponse expérimentale étudiée dans le domaine expérimental d'intérêt.
- ✓ Aboutir pour la valeur de la réponse étudiée à une estimation de qualité acceptable.

III-3-4 Estimation des coefficients du modèle

La valeur de la réponse expérimentale doit pouvoir être estimée avec une qualité acceptable en n'importe quel point du domaine expérimental d'intérêt.

III-3-5 Validation du modèle

Deux possibilités existent :

- ✓ Soit le modèle est validé, ce qui signifie qu'il représente suffisamment bien le phénomène étudié dans le domaine expérimental et dans ce cas, les objectifs sont atteints : nous pouvons utiliser ce modèle pour faire de la prévision en n'importe quel point du domaine expérimental ;
- ✓ Soit le modèle n'est pas validé et alors son utilisation n'est pas possible. Il faut donc s'acheminer vers la proposition d'un modèle différent.

III-3-6 Mise en œuvre et suivi

La mise en œuvre se fait par :

- ✓ Le calcul de la réponse est possible en tout point du domaine expérimental.
- ✓ A partir du modèle calculé, nous pouvons prédire les résultats correspondant à la configuration optimale du produit ou du processus.

La méthode des plans d'expériences repose essentiellement sur la création et l'exploitation de modèles de la fonction objective (réponse), tout en fournissant au moins un essai pour chaque combinaison de facteur. Il est donc naturel d'analyser dans les détails cette composante primordiale, tout simplement par ce qu'elle permet une interprétation rapide.

III-4 Plan factoriel

L'étude d'un plan complet consiste à étudier toutes les combinaisons possibles des facteurs pris en considération dans l'expérience. Un plan factoriel est obtenu lorsqu'au moins un essai pour chaque combinaison de facteur est réalisé. Il faut déterminer quelles sont les combinaisons des facteurs qui feront l'objet d'expériences. Le choix doit être fait pour obtenir des expériences faites la meilleure information possible. L'objectif est la mise en forme d'un modèle, le plus souvent polynomial, décrivant les variations de la fonction réponse y prenant les valeurs y_1, y_2, \dots, y_N relativement aux valeurs de k facteurs x_1, x_2, \dots, x_k .

En présence de deux facteurs, et chaque facteur prend deux niveaux, c'est-à-dire le niveau bas et le niveau haut ; le nombre d'expériences à réaliser se calcule par :

$$\text{Nombre d'expérience} = 2^2 \quad (\text{III.2})$$

Tels que :

- le 2 en exposant signifie qu'il y a deux facteurs étudiés ;
- l'autre 2 signifie que chaque facteur prend deux niveaux ;

Donc en présence de deux facteurs, pour deux niveaux à chaque un, l'expérimentateur doit faire 4 expériences. Comme règle générale, en présence de plusieurs facteurs de nombre « k », et chaque facteur prend deux niveaux, le nombre d'expérience à réaliser se calcule par :

$$N = 2^k \quad (\text{III.3})$$

Il est maintenant possible d'introduire la matrice d'expériences qui permet de déterminer les essais ou les simulations à réaliser. Le Tableau (III.2) présente une matrice d'expériences pour 2 facteurs à 2 niveaux, d'où si en appliquant la formule (III.3) on aura 4 expériences à réaliser.

Tableau III.2 : *Matrice d'expériences pour 2 facteurs à 2 niveaux.*

	Facteur 1	Facteur 2	
N°	(x_1)	(x_2)	Réponse
1	-1	-1	Y_1
2	+1	-1	Y_2
3	-1	+1	Y_3
4	+1	+1	Y_4

A chaque essai, l'expérimentateur mesure la réponse qu'il a choisie. Par exemple, la réponse de l'essai N° 1 est y_1 . Celle de l'essai N° 2 est y_2 , et ainsi de suite. Ces réponses sont indiquées en face de chaque essai et sont rassemblées dans la colonne «Réponse». On choisit a priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs.

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2 \quad (\text{III.4})$$

La réalisation de la matrice d'expériences, permet à l'expérimentateur de calculer l'effet de chaque facteur (coefficient). Dans ce qui suit, on va voir la méthode à suivre pour calculer le modèle mathématique qui permet l'optimisation du système étudié, ainsi la signification des coefficients du modèle

III-4-1 Calcul des coefficients

Les quatre points expérimentaux donnés au tableau (III.2) apportent quatre valeurs de la réponse: y_1, y_2, y_3 et y_4 ; Il y a donc un système de quatre équations à quatre inconnues. Les inconnues étant les coefficients du modèle : a_0, a_1, a_2 et a_{12} . ; [100]

En remplaçant dans la relation (III.4), on obtient les quatre équations suivantes :

$$y_1 = a_0 + a_1 x_{1,-1} + a_2 x_{2,-1} + a_{12} x_{1,-1} x_{2,-1} \quad (\text{III.5})$$

$$y_2 = a_0 + a_1 x_{1,+1} + a_2 x_{2,-1} + a_{12} x_{1,+1} x_{2,-1} \quad (\text{III.7})$$

$$y_3 = a_0 + a_1 x_{1,-1} + a_2 x_{2,+1} + a_{12} x_{1,-1} x_{2,+1} \quad (\text{III.8})$$

$$y_4 = a_0 + a_1 x_{1,+1} + a_2 x_{2,+1} + a_{12} x_{1,+1} x_{2,+1} \quad (\text{III.9})$$

En remplaçant dans ces relations les x_i par leur valeur codée, on obtient:

$$y_1 = a_0 - a_1 - a_2 + a_{12} \quad (\text{III.10})$$

$$y_2 = a_0 + a_1 - a_2 - a_{12} \quad (\text{III.11})$$

$$y_3 = a_0 - a_1 + a_2 - a_{12} \quad (\text{III.12})$$

$$y_4 = a_0 + a_1 + a_2 + a_{12} \quad (\text{III.13})$$

La résolution de ce système donne la valeur des coefficients :

$$a_0 = \frac{1}{4} (+y_1 + y_2 + y_3 + y_4) \quad (\text{III.14})$$

$$a_1 = \frac{1}{4} (-y_1 + y_2 - y_3 + y_4) \quad (\text{III.15})$$

$$a_2 = \frac{1}{4} (-y_1 - y_2 + y_3 + y_4) \quad (\text{III.16})$$

$$a_{12} = \frac{1}{4} (+y_1 - y_2 - y_3 + y_4) \quad (\text{III.17})$$

Connaissant les coefficients, on peut écrire le modèle de régression qui servira à faire des prévisions

a) Signification de a_0

Si l'on donne à x_1 et à x_2 la valeur zéro, on définit le centre du domaine d'étude. La relation (III.5) devient alors :

$$y_0 = a_0 \quad (\text{III.18})$$

Le coefficient a_0 est donc la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude;

b) Signification de a_1

Afin de voir la signification du coefficient a_1 , on définit :

- La moyenne des réponses au niveau bas du facteur 1 :

$$y_- = \frac{I}{2} (+ y_1 + y_3) \quad (\text{III.19})$$

- La moyenne des réponses au niveau haut du facteur 1 :

$$y_+ = \frac{I}{2} (+ y_2 + y_4) \quad (\text{III.20})$$

Faisant une soustraction de la relation (III.20) dans la relation (III.19), on trouve :

$$y_+ - y_- = \frac{1}{2} (-y_1 + y_2 - y_3 + y_4) \quad (\text{III.21})$$

Divisons cette dernière par 2, on trouve :

$$y_+ - y_- = \frac{1}{4} (-y_1 + y_2 - y_3 + y_4) \quad (\text{III.22})$$

On compare les relations (III.22) et (III.15), on trouve que le coefficient a_1 est la moitié de la différence entre la moyenne des réponses au niveau haut et la moyenne des réponses au niveau bas

On définit alors l'effet moyen (ou plus simplement effet) d'un facteur par la moitié de la différence entre la moyenne des réponses lorsque le facteur prend sa valeur haute et la moyenne des réponses lorsque le facteur prend sa valeur basse.

Ce résultat est important car il donne la signification du coefficient a_1 . C'est la variation de la réponse due au facteur 1 seul, quand on passe du centre du domaine d'étude au niveau haut de ce facteur ; donc a_1 s'appelle l'effet du facteur 1.

On démontrerait de même que a_2 est l'effet du facteur 2. Il est commode de représenter l'effet d'un facteur comme l'indique la figure III.4 où l'on fait appel au plan de coupe $yo x_1$ passant par $x_2 = 0$ pour le facteur 1.

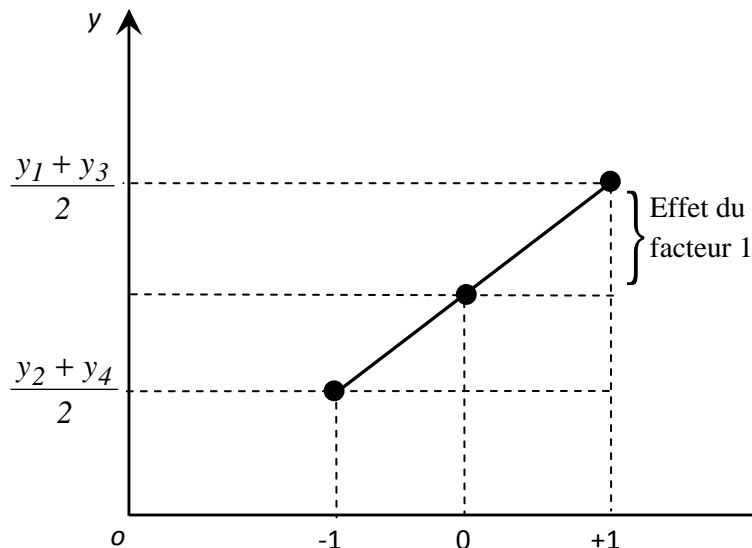


Figure III.4 : Représentation de l'effet d'un facteur dans le plan vertical passant par x_2

(Source : Jacques GOUPY ; LES PLANS D'EXPERIENCES ; Revue MODULAD, 2006 ; P 83)

c) Signification de a_{12}

A travers les résultats de la matrice d'expériences donnée au tableau III.2, on remarque que lorsque le facteur 1 est à l'état bas, la variation du facteur 2 fait varier la valeur de la réponse, et lorsque le facteur 1 est à l'état haut, la réponse varie. Ainsi, suivant la valeur du facteur 1, l'effet du facteur 2 n'est plus le même sur la réponse. Il en est de même du facteur 2 suivant la valeur du facteur 1. Il y a donc interaction entre les deux facteurs.

On définit alors :

- L'effet moyen du facteur 2 au niveau bas du facteur 1 est :

$$E_1 = \frac{1}{2}(-y_1 + y_3) \quad (\text{III.23})$$

- L'effet moyen du facteur 2 au niveau haut du facteur 1 vaut :

$$E_2 = \frac{1}{2}(-y_2 + y_4) \quad (\text{III.24})$$

Faisant maintenant soustraire la relation (III.23) de la relation (III.24), et divisons après sur 2 on trouve :

$$E_2 - E_1 = \frac{1}{4} (+y_1 - y_2 - y_3 + y_4) \quad (\text{III.25})$$

Donc on trouve que la dernière relation (III.25) égale à la relation (III.17).

On définit alors l'*interaction du facteur 2 sur le facteur 1* comme étant la moitié de la différence entre l'effet du facteur 2 lorsque le facteur 1 est à l'état bas et l'effet du facteur 2 lorsque le facteur 1 est à l'état haut.

On calcule l'effet de l'interaction entre deux facteurs en multipliant les signes de colonne du facteur 1 par les signes du facteur 2 (Tableau III.3), et on multiplie chaque signe obtenu par la réponse qui suit l'expérience, puis on fait la somme de tous ces produits. Avec cette méthode on obtiendra la relation (III.17)

Tableau III.3 : Matrice d'expérience avec interaction

	Facteur 1	Facteur 2		
N°	(A)	(B)	(A)*(B)	Réponse
1	-1	-1	+	Y ₁
2	+1	-1	-	Y ₂
3	-1	+1	-	Y ₃
4	+1	+1	+	Y ₄

On peut augmenter le nombre de facteurs ; d'où l'espace expérimental possède autant de dimensions qu'il y a de facteurs. Un plan comportant k facteurs à deux niveaux est noté 2^K ; on remarquera que cette notation indique également le nombre d'essais à réaliser. Ce nombre devient rapidement très important, ce qui signifie que le calcul des coefficients du modèle mathématique devient difficile ; une approche matricielle est donc nécessaire pour le calcul des coefficients.

III-5 Approche matricielle pour le calcul des plans factoriels complets

Le modèle mathématique adopté a priori est un polynôme qui prend en compte la moyenne, les effets de chaque facteur et toutes les interactions entre les facteurs pris deux à deux, trois à trois, quatre à quatre, ..., k à k [102]. D'une manière générale, le but est la recherche de l'expression d'un modèle polynomial décrivant les variations de la fonction réponse (y) relativement aux valeurs de k facteurs (x_1, x_2, \dots, x_k), de telle façon :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijl} x_i x_j x_l + \dots + \sum a_{ij\dots k} x_i x_j \dots x_k \quad (\text{III.26})$$

On choisit a priori une fonction mathématique qui relie la réponse à deux facteurs (x_1 et x_2) pour simplifier la compréhension.

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2 \quad (\text{III.27})$$

En tenant compte de la matrice d'expériences montrée au tableau III.4 :

Tableau III.4 : Matrice d'expériences pour 2 facteurs à 2 niveaux avec interaction

	Facteur 1	Facteur 2		
N°	x_1	x_2	$x_1 \cdot x_2$	Réponse
1	-1	-1	+1	Y_1
2	+1	-1	-1	Y_2
3	-1	+1	-1	Y_3
4	+1	+1	+1	Y_4

En remplaçant dans la relation (III.27) les x_i par leur valeur codée du tableau III.4, on obtient:

$$y_1 = a_0 - a_1 - a_2 + a_{12} \quad (\text{III.28})$$

$$y_2 = a_0 + a_1 - a_2 - a_{12} \quad (\text{III.29})$$

$$y_3 = a_0 - a_1 + a_2 - a_{12} \quad (\text{III.30})$$

$$y_4 = a_0 + a_1 + a_2 + a_{12} \quad (\text{III.31})$$

La généralisation mathématique de l'étude des plans d'expériences se fait en général par l'utilisation de l'approche matricielle, d'où ce système d'équations peut se mettre sous la forme matricielle suivante:

$$Y = Xa \quad (\text{III.32})$$

Avec :

Y : vecteur ayant pour composantes les réponses de chaque essai, et représenté par une matrice colonne $(2^k, 1)$,

a : vecteur ayant pour composantes la moyenne, les effets des facteurs et toutes les interactions, et représenté par une matrice colonne $(2^k, 1)$; ces composantes sont les inconnues que l'on cherche à déterminer,

X : matrice carrée $(2^k, 2^k)$ composée de -1 et $+1$ suivant les valeurs des niveaux x_i .

Si nous reprenons le système du plan 2^2 la relation (III.32) prend la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.33})$$

La matrice X comporte une colonne de $+1$ et trois colonnes ayant chacune autant de signes positifs que de signes négatifs. Si l'on multiplie signe à signe deux quelconques de ces

quatre colonnes et que l'on additionne les produits, on trouve zéro. On dit que la matrice est orthogonale. Cette propriété est très importante car, dans ce cas, l'inverse de X est égale à la transposée de X divisée par le nombre de lignes n . En effet, d'après *Hadamard*, on a, pour ce type de matrice, la relation suivante :

$$X^t X = nI \quad (\text{III.34})$$

Telle que : I représentant la matrice unité.

Tenant compte des relations (III.32) et (III.34), on obtiendra les relations suivantes :

$${}^t X.Y = {}^t X.X.a \quad (\text{III.35})$$

Ce qui donne :

$${}^t X.Y = n.I.a \quad (\text{III.36})$$

Ce qui signifie que le vecteur colonne de l'inconnue (a) se calcule par :

$$a = \frac{1}{n}.{}^t X.Y \quad (\text{III.37})$$

Cette relation (III.37) est valable pour tous les plans factoriels complets. Nous avons vu que le calcul des coefficients des plans factoriels 2^k est possible avec le calcul matriciel. Comme le plan employé ici est saturé, le modèle passe exactement par tous les points d'expérience.

La première partie de ce chapitre s'est intéressée à définir la méthode des plans d'expériences et plus spécialement à définir l'aspect lorsqu'un facteur se présente avec ces deux niveaux (bas et haut). Le processus de la méthode prend un autre aspect lorsque le facteur prend plusieurs niveaux particuliers dans la plage de variation qui leur est associée puisque la nature quantitative continue des facteurs induit un nombre de combinaisons infini pour le domaine expérimental [103]. Nous nous intéressons donc à ce cas d'étude vu que nos expériences sur le matériau abradable effectuées sur le banc d'essai se font avec plusieurs niveaux au niveau des facteurs ; cela nous ramène à la méthodologie des surfaces de réponse.

III-6 Méthodologie des surfaces de réponse

Les étapes à suivre dans le cas d'une étude de surface de réponse sont les mêmes que celles mentionnées dans la première partie du chapitre. Cependant, leur contenu est différent. En effet, le modèle à établir lors d'une étude de surface de réponse n'a pas la même forme que celui recherché avant ; la méthode des surfaces de réponses suppose qu'un modèle polynomial du second degré représente une approximation suffisante pour décrire la variation d'une réponse au sein du domaine expérimental. La surface de régression ainsi obtenue doit posséder une qualité descriptive et prédictive la meilleure possible au sein du domaine expérimental. [104,105, 106]

La méthodologie des surfaces de réponse constitue le second volet de la méthode des plans d'expériences ; cette technique vise à optimiser une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses par le fait de définir au sein du domaine expérimental, un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse.

III-6-1 Codage associé aux modèles polynomiaux

Les paramètres de réglage d'un processus traduisent le plus souvent des grandeurs différentes ; ainsi, dans certain cas il faut donner à chaque facteur le nombre de niveaux nécessaires aux exigences de l'étude ; donc il n'y a aucune raison de ne pas considérer des plans ayant des facteurs qui prenant plus de deux niveaux. Pour cela et comme les facteurs traduisent des grandeurs différentes et/ou s'expriment dans des unités différentes, il est nécessaire de procéder à une normalisation à partir de la relation de codage suivante :

$$x_i = \frac{u_i - \left(\frac{u_{\min i} + u_{\max i}}{2} \right)}{\left(\frac{u_{\max i} - u_{\min i}}{2} \right)} \quad (\text{III.38})$$

Avec :

u_{\min} : représente la borne inférieure des niveaux ;

u_{\max} : représente la borne supérieure des niveaux ;

u_i : représente la valeur sur laquelle on va effectuer le codage ;

x_i : représente la valeur codée ;

Il s'agit d'une relation de centrage et réduction. Ainsi dans l'espace mathématique, toutes les variations de chaque facteur appartiennent à l'intervalle $[-1 ; +1]$; cela fait de la méthodologie de la surface de réponse un support de connaissance, à partir duquel une étude plus complète de la fonction réponse peut être menée.

III-6-2 Estimation des coefficients des modèles polynomiaux

On veut ici choisir une forme de modèle qui définit correctement les variations de la réponse. Il est aujourd'hui couramment admis qu'une forme quadratique satisfait cette exigence dans un grand nombre de cas. Cette hypothèse sera vérifiée a posteriori grâce à une analyse statistique du modèle obtenu afin de vérifier si la surface de régression donne une interprétation utilisable du phénomène réel. On utilise les notations présentées au début de la partie traitant de la modélisation. L'expérimentateur qui réalise un essai en un point expérimental, obtient une réponse y_1 qu'il peut modéliser. S'il y a deux facteurs influents et qu'un modèle du second degré peut expliquer la réponse, on écrira :

$$y_1 = a_0 + a_1x_{1,1} + a_2x_{2,1} + a_{12}x_{1,2}x_{2,2} + a_{11}x_{1,1}^2 + a_{22}x_{2,1}^2 + e_1 \quad (\text{III.39})$$

Avec :

- y_1 : représente la valeur observée de la réponse pour l'essai 1 ;
- e_1 : représente l'écart entre la valeur expérimentale et la valeur calculée de la réponse ;
- $x_{1,1}$ et $x_{2,1}$: Représente la valeur lue dans la matrice d'expériences pour le 1^{er} essai, pour les facteurs 1 et 2 ;
- $a_0, a_1, a_2, a_{12}, a_{11}, a_{22}$ sont des coefficients constants et inconnus ;

Si l'expérimentateur réalise un deuxième essai en un autre point expérimental, il obtiendra une nouvelle réponse y_2 qu'il modélisera de la même manière :

$$y_2 = a_0 + a_1x_{1,2} + a_2x_{2,2} + a_{12}x_{1,2}x_{2,2} + a_{11}x_{1,2}^2 + a_{22}x_{2,2}^2 + e_2 \quad (\text{III.40})$$

Où $x_{1,2}$ et $x_{2,2}$ sont les coordonnées du point expérimental numéro 2.

Dans un plan d'expériences comportant n points expérimentaux, on écrira n relations identiques à celles des essais 1 et 2

$$\begin{cases} y_1 = a_0 + a_1x_{1,1} + a_2x_{2,1} + a_{12}x_{1,1}x_{2,1} + a_{11}x_{1,1}^2 + a_{22}x_{2,1}^2 + e_1 \\ y_2 = a_0 + a_1x_{1,2} + a_2x_{2,2} + a_{12}x_{1,2}x_{2,2} + a_{11}x_{1,2}^2 + a_{22}x_{2,2}^2 + e_2 \\ y_3 = a_0 + a_1x_{1,3} + a_2x_{2,3} + a_{12}x_{1,3}x_{2,3} + a_{11}x_{1,3}^2 + a_{22}x_{2,3}^2 + e_3 \\ \dots \\ y_n = a_0 + a_1x_{1,n} + a_2x_{2,n} + a_{12}x_{1,n}x_{2,n} + a_{11}x_{1,n}^2 + a_{22}x_{2,n}^2 + e_n \end{cases} \quad (\text{III.41})$$

Nous avons déjà rencontré le même type de problème et nous connaissons la plupart des matrices qui vont intervenir :

- La matrice des réponses (matrice $n, 1$) :

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (\text{III.42})$$

- La matrice des coefficients (matrice $p, 1$)

$$a = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_{12} \\ a_{11} \\ a_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{III.43})$$

- La matrice X (matrice n, p) est obtenue à partir du plan d'expériences et du modèle choisi a priori par l'expérimentateur

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & x_{2,1} & x_{1,1}x_{2,1} & x_{1,1}^2 & x_{2,1}^2 \\ 1 & x_{1,2} & x_{2,2} & x_{1,2}x_{2,2} & x_{1,2}^2 & x_{2,2}^2 \\ 1 & x_{1,3} & x_{2,3} & x_{1,3}x_{2,3} & x_{1,3}^2 & x_{2,3}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{1,n} & x_{2,n} & x_{1,n}x_{2,n} & x_{1,n}^2 & x_{2,n}^2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.44})$$

- La seule matrice nouvelle est la matrice des écarts (matrice n, 1)

$$e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ \dots \\ e_n \end{bmatrix} \quad (\text{III.45})$$

Ces quatre matrices permettent d'écrire le système de n équations sous la forme simple :

$$Y = X.a + e \quad (\text{III.46})$$

Nous avons simplement transformé l'écriture du problème de l'expérimentateur sans y apporter pour moment le moindre début de solution. Le fait qu'il y a plus d'inconnues que d'équations se traduit ici par une matrice rectangle. En effet, la matrice X est matrice (n, p) qui n'est pas inversible puisqu'elle n'est pas carrée.

L'objectif est de trouver un ensemble de p coefficients qui résout le mieux possible le système d'équations. On cherche le jeu des coefficients qui minimise la somme des carrés des écarts. C'est l'hypothèse des moindres carrés.

La somme des carrés des écarts s'écrit sous forme matricielle :

$$e'e \quad (III.47)$$

Cette somme sera minimale par rapport aux coefficients si :

$$\frac{\partial e'e}{\partial a} = 0 \quad (III.48)$$

Cette relation matricielle représente n équations à p coefficients. Pour trouver les coefficients il suffit de résoudre le système suivant :

$$\begin{cases} Y = X.a + e \\ \frac{\partial e'e}{\partial a} = 0 \end{cases} \quad (III.49)$$

La solution est donc de la forme :

$$a = (X'X)^{-1} X'Y \quad (III.50)$$

Cette relation est fondamentale et nous l'utiliserons constamment par la suite. Elle est valable pour tous les modèles polynomiaux quel que soit leur degré et quel que soit le nombre de coefficients.

Pour évaluer la signification des coefficients du modèle en utilisant des tests statistiques.

III-7 Analyse statistique des modèles

Les valeurs expérimentales introduites dans le modèle sont entachées d'erreurs expérimentales (grandeurs aléatoires) qui se transmettent aux coefficients du modèle mathématique obtenu, puis ces erreurs se transmettent aux valeurs calculées des réponses prédites. Bien qu'à ce stade nous ayons des estimations des coefficients du modèle, nous ne pouvons pas les utiliser car nous ne savons pas si celui-ci représente la réponse expérimentale étudiée dans le domaine expérimental d'intérêt. Il est donc primordial de valider et de connaître la qualité de la modélisation obtenue. Nous pouvons envisager deux situations :

✓ Le nombre d'expériences distinctes est supérieur au nombre de coefficients du modèle ($N > p$). Nous pouvons utiliser un outil statistique comme l'analyse de variance, procurant des coefficients de détermination qui nous permettront de rejeter ou de ne pas rejeter le modèle en considérant un risque acceptable.

✓ Le nombre d'expériences distinctes est égal au nombre de coefficients du modèle. Dans ce cas, aucun outil statistique ne pourra nous aider. Il faudra accepter le modèle et le vérifier en faisant quelques expériences dans le domaine d'intérêt.

Nous allons ici brièvement énoncer comment il est possible, à partir d'un ensemble de mesures, d'extraire l'information la plus précise possible. L'analyse statistique devient donc une étape importante. Les tests statistiques portent naturellement sur les résultats obtenus [107, 108].

III-7-1 Homogénéité de la variance de l'erreur expérimentale

Lorsque plusieurs expériences identiques sont faites dans un même point, on doit utiliser le test C de *Cochran*. L'homogénéité des variances est faite quand le nombre de répétitions d'une expérience dans des conditions identiques est supérieur à 1 ($r > 1$).

Le test C de *Cochran* se fait de la façon suivante:

$$C_{max} = \frac{\max(s_{yk}^2)}{\sum_{k=1}^N s_{yk}^2} \quad (\text{III.51})$$

Avec :

s_{yk} : l'estimation de l'écart type sur la réponse donnée par :

$$s_{yk}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{r - 1} \quad (\text{III.52})$$

N : nombre des lignes de la matrice du plan d'expériences ;

Ensuite on compare C_{max} avec la valeur C_T lue dans le tableau de *Cochran*. Les variances sont homogènes si :

$$C_{max} < C_T$$

Ce qui signifie que la précision est acceptable.

III-7-2 Test de signification des coefficients du modèle

La méthode consiste à estimer l'erreur sur l'effet et à comparer cette erreur à l'effet lui-même:

a) Estimation de l'erreur de mesure expérimentale

La figure III.5 permet de distinguer trois types d'écart différents. Le premier est, pour une concentration donnée, l'écart entre une réponse mesurée et la moyenne des réponses mesurées au même point expérimental. Pour illustrer cela, prenons par exemple la concentration de 3 d'un niveau donné. Il y a deux réponses mesurées $y_{k,1}$ et $y_{k,2}$ dont la moyenne est $\overline{y_k}$, donc il y a deux écarts :

$$\begin{cases} e_{k,1} = y_{k,1} - \overline{y_k} \\ e_{k,2} = y_{k,2} - \overline{y_k} \end{cases} \quad (\text{III.53})$$

Ces écarts sont les écarts enregistrés lors de la détermination des réponses. Il s'agit donc de l'erreur expérimentale.

Le second écart est celui que l'on constate entre la moyenne des réponses pour une concentration donnée et la réponse prédite pour cette même concentration. Si on se place à la concentration donnée avant, la moyenne des réponses mesurées est $\overline{y_k}$ et la réponse prédite est \hat{y}_k déterminée avec le modèle postulé. L'écart entre ces deux réponses est :

$$\Delta_k = \overline{y_k} - \hat{y}_k \quad (\text{III.54})$$

Cet écart correspond à la différence entre la courbe de régression et la véritable courbe moyenne du phénomène. Cette différence est caractéristique du manque d'ajustement.

Enfin le troisième écart est celui qui existe entre chacune des réponses mesurées et la réponse prédite. Cet écart est le résidu et il a été noté e_i

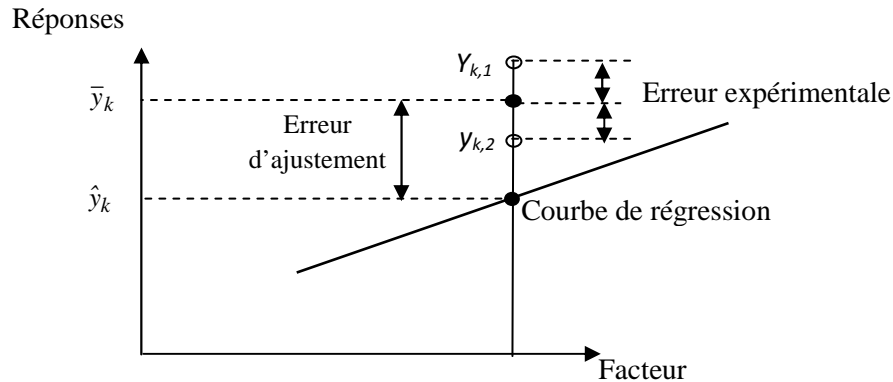


Figure III.5 : Le résidu se décompose en deux écarts :

1. L'écart expérimental ;
2. L'écart d'ajustement

(Source : Jacques GOUPY « Plans d'expériences pour surfaces de réponse », Paris : Dunod, c1999 ISBN : 2-10-003993-8)

Cette étude sur l'estimation de l'erreur de mesure servira pour calculer la variance. On commence par calculer la variance de l'erreur expérimentale (variance des mesures) :

$$s_y^2 = \frac{SCEE}{ddl_{SCEE}} \quad (\text{III.55})$$

Avec : $SCEE$: la somme des carrés des écarts expérimentaux :

ddl_{SCEE} : degré de liberté des variances de mesure

$$SCEE = \sum (y_{ki} - y_k)^2 \quad (\text{III.56})$$

$$ddl_{SCEE} = N(r - 1) \quad (\text{III.57})$$

r : nombre de **répétitions** ;

Y_{ki} : **réponse observée** lors de la réalisation des expériences, $k = 1 \dots N$, $i = 1 \dots r$;

$\hat{y}_k = Y_k^{est}$: **réponse estimée** à l'aide du modèle, pour une ligne du plan d'expériences,

$k = 1 \dots N$;

$\overline{y_k} = Y_k$: **moyenne des réponses observées**, pour une ligne du plan d'expériences,
 $k=1 \dots N$;

$Y_{ki} - Y_k$: les **écarts expérimentaux**, $k = 1 \dots N$, $i = 1 \dots r$;

$Y_{ki} - Y_k^{est}$: les **résidus**, $k = 1 \dots N$, $i = 1 \dots r$;

$Y_k^{est} - Y_k$: les **écarts d'ajustement**, $k = 1 \dots N$, $i = 1 \dots r$;

Dans ces conditions la variance sur un effet est donnée par :

$$s_i^2 = \frac{s_y^2}{n} \quad (\text{III.58})$$

b) Estimation sur la variance et réalisation du test de signification des effets :

Les calculs statistiques qui permettent de savoir si les effets sont significatifs, de calculer les intervalles de confiance ou de valider la linéarité du modèle font intervenir d'une part les résidus e_i , c'est-à-dire la différence entre la valeur expérimentale et la valeur prédite par le modèle, et d'autre part un estimateur de la variance commune des résidus. Cet estimateur est donné par :

$$s^2 = \frac{1}{n-p} \sum e_i^2 \quad (\text{III.59})$$

Où : n est le nombre d'expériences réalisées et p le nombre de coefficients du modèle.

Dans ces conditions, on peut montrer que tous les effets ont la même variance donnée

par :

$$s_i^2 = \frac{s^2}{n} \quad (\text{III.60})$$

Dans la pratique, il est d'usage de négliger les interactions d'ordre élevé (3 ou plus). Par ce que si on réalise un plan complet et que l'on calcule tous les effets, le calcul de s^2 est impossible puisque alors $n = p$ (un plan complet 2^3 conduit à 8 expériences et 8 effets : 1 effet pour la constante, 3 effets pour les facteurs, 3 effets pour les interactions d'ordre 2 et enfin 1 effet pour l'interaction d'ordre 3) C'est souvent le contexte et la connaissance de lois régissant le phénomène étudié qui permet de négliger certaines interactions et donc de pouvoir conduire des calculs statistiques.

A partir d'une analyse statique, W.S. Gosset a proposé l'utilisation d'un terme correctif, la distribution « Student ». Alors le test utilisé est le test " t " de *Student*. Un effet sera dit significatif (c'est-à-dire que la variable ou l'interaction qui lui est associée a une influence sur la réponse), s'il est, pour un risque donné, significativement différent de 0. On testera donc l'hypothèse :

$$H_0 = \langle\langle a_i = 0 \rangle\rangle \quad (\text{III.61})$$

Contre l'hypothèse :

$$H_1 = \langle\langle a_i \neq 0 \rangle\rangle \quad (\text{III.62})$$

Pour cela, on calcule

$$t_i = \frac{|a_i|}{s_i} \quad (\text{III.63})$$

On utilise alors une table dite de *Student* (voir l'annexe) à $\nu = n-p$ degrés de liberté (n est le nombre d'expériences réalisées et p le nombre d'effets y compris la constante). On choisit un risque de première espèce α (le plus souvent 1% ou 5%) et on lit dans cette table la valeur $t_{crit}(\alpha, \nu)$, en utilisant la partie relative à un test bilatéral. La règle du test est alors la suivante :

- Si $t_i > t_{crit}(\alpha, \nu)$: on rejette H_0 au risque toléré.
- Si $t_i < t_{crit}(\alpha, \nu)$, on accepte H_0 au risque toléré.

Si l'hypothèse H_0 est acceptée, cela veut dire que l'effet en question n'est pas, au risque α significativement différent de 0 et donc que la variable qui lui est associée n'a pas d'influence sur la réponse.

Le calcul de s^2 , permet de déduire la variance commune des effets. On choisit alors un risque α et on détermine avec la [table de Student](#) le nombre $t(\alpha, \nu)$. L'intervalle de confiance d'un effet a_i est alors donné par :

$$[a_i - t(\alpha, \nu)s_1 ; a_i + t(\alpha, \nu)s_1] \quad (\text{III.64})$$

III-7-3 Validation du modèle

L'analyse de la variance obtenue au paragraphe précédant consiste à comparer à l'aide d'un test F la somme des carrés des écarts due uniquement à la régression (donc au modèle), avec la somme des carrés des résidus. Avant d'entamer l'analyse sur la validation du modèle, on définit alors trois types de "variations" [109]

- La variation due à la liaison linéaire :

$$SCEL = \sum (Y_i^{est} - Y_{moy})^2 \quad (III.65)$$

$SCEL$ se lit : "somme des carrés des écarts dues à la liaison".

- La variation résiduelle :

$$SCER = \sum (Y_i - Y_i^{est})^2 \quad (III.66)$$

$SCER$ se lit : "somme des carrés des écarts des résidus".

- La variation totale :

$$STCE = SCEL + SCER \quad (III.67)$$

$STCE$ se lit : " somme totale des carrés des écarts".

On note :

Y_i les réponses observées lors de la réalisation des expériences

Y_i^{est} la réponse estimée à l'aide du modèle linéaire.

Y_{moy} la moyenne des réponses.

On définit de plus un "carré moyen" qui est le quotient d'une somme de carrés par son degré de liberté.

$SCEL$ aura $(p - 1)$ degrés de liberté (p est le nombre de coefficients estimé à partir du modèle).

$SCER$ aura $(n - p)$ degrés de libertés (n est le nombre d'expériences réalisées).

$SCET$ aura $(n - 1)$ degrés de liberté.

Le test F permet de tester si les variances de deux populations sont égales. Il permet donc de comparer pour un risque fixé à l'avance le F_{obs} que l'on a calculé dans le tableau (III.5) avec un F (critique) lu dans la [table de Fisher-Snedecor](#) avec $(p-1)$ et $(n-p)$ degrés de liberté.

Le test est de la manière suivante :

- L'hypothèse nulle H_0 : " les deux carrés moyens sont de même grandeur" et donc la régression n'est pas significative
- L'hypothèse H_1 : " le carré moyen dû à la régression est significativement plus grand que le carré moyen dû aux résidus" donc la régression est globalement significative

La règle du test est alors pour un risque α choisi:

- ✓ Si F_{obs} est inférieure au F (critique), on accepte l'hypothèse H_0 .
- ✓ Si F_{obs} est supérieur au F (critique), on accepte l'hypothèse H_1 avec la confiance $1 - \alpha$.

Tableau III.5 : Tableau de l'analyse de régression.

Variation due à	Somme des carrés	DDL	Carré moyen	F
Liaison	$SCEL$	$p - 1$	$\frac{SCEL}{p - 1} = CML$	$F_{obs} = \frac{CML}{s^2}$
Résidus	$SCER$	$n - p$	$\frac{SCEE}{n - p} = s^2$	
Totale	$SCET$	$n - 1$		

III-7-4 Qualité du modèle

Il est primordial de connaître la qualité de la modélisation obtenue. Comme pour l'analyse de variance, il y a comparaison du vecteur des réponses mesurées y avec celui des réponses calculées $y_{estimer}$. Dans tous les cas, la somme des carrés des écarts sert de support.

a) Qualité descriptive du modèle :

On peut chercher à savoir si le modèle mathématique obtenu explique bien l'ensemble des résultats, ou bien d'un autre sens si le modèle décrit toutes les réponses. Le coefficient de détermination est donné par la relation suivante [110]:

$$R^2 = \frac{SCEL}{STCE} = 1 - \frac{SCER}{STCE} \quad (\text{III.68})$$

En présence de plusieurs variables explicatives, ce qui est généralement le cas dans l'analyse des résultats d'essais provenant d'un plan d'expériences, il faut impérativement éviter l'utilisation du coefficient de détermination R^2 pour comparer la qualité descriptive de différents modèles. Il faut recourir à l'utilisation du coefficient de détermination ajusté $R^2_{ajusté}$

Pour tenir compte du nombre de coefficients présents dans un modèle et pour comparer différents modèles entre eux, on définit le coefficient de détermination ajusté à partir de la formule suivante:

$$R^2_{ajusté} = 1 - \frac{\frac{SCER}{N - P}}{\frac{STCE}{N - 1}} \quad (\text{III.69})$$

D'après cette formule on voit que le rapport $R^2_{ajusté}$ varie entre 0 et 1. S'il vaut zéro c'est que le modèle n'explique rien, s'il vaut 1 c'est que le modèle explique toutes les réponses mesurées.

b) Qualité prédictive du modèle:

Le modèle obtenu peut servir à prédire la valeur de la réponse non encore réalisée. Donc il est possible de définir maintenant la qualité prédictive d'un modèle à partir d'un coefficient noté $R^2_{prédicatif}$ ou Q^2 .

Comme on dispose de N erreurs de prédiction, on définit la statistique suivante :

$$PRESS = \sum_{i=1}^N \frac{(e_i)^2}{(1 - h_i)^2} \quad (\text{III.70})$$

Avec h_i l'i ème élément diagonal de la matrice H (*Hat Matrix*) à partir de la relation

$$H = X.(X'.X)^{-1}.X' \quad (\text{III.71})$$

On notera que :

$$\frac{1}{N} \leq h_i \leq 1 \quad (\text{III.72})$$

Dans cette relation, *PRESS* est l'acronyme de la locution anglaise *Prediction Error Sum of Squares*. Plus la valeur de *PRESS* est faible, plus le modèle est prédictif. Par analogie avec le coefficient de détermination R^2 , on définit le coefficient $R^2_{\text{prédictif}}$ encore noté Q^2 à partir de la relation suivante :

$$Q^2 = 1 - \frac{PRESS}{SCM} \quad (\text{III.73})$$

Avec *SCM* se lit : la somme des carrés des réponses mesurées (expérimentales) corrigée de la moyenne. Telle que :

$$SCM = y^t.y - y_{moy}^t.y_{moy} \quad (\text{III.74})$$

Plus la valeur du coefficient Q^2 est proche de 1, plus la qualité prédictive du modèle est importante.

III-8 Conclusion

La méthode des plans d'expériences est constituée d'outils sûrs et pratiques permettant de conduire avec la meilleure efficacité possible une étude où interviennent de nombreux paramètres. Bien utilisée, elle doit conduire par exemple dans des phases d'élaboration de produits à des délais de conception et de production limités, à des coûts moindres, à une augmentation de la précision dans l'obtention des résultats, et à une amélioration de la fiabilité.

Dans notre étude, le problème principal était d'interpréter et de comprendre les résultats d'essais effectués au sien du laboratoire ; faire varier les niveaux de chaque paramètre pour constater la variation de chaque résultat, ne suffit pas pour donner une

interprétation et une synthèse judicieuse. Lorsqu'il s'agit d'un phénomène qui se passe au niveau d'un turboréacteur, le meilleur outil d'interprétation et de modélisation est de faire recours à la méthode des plans d'expériences.

Nous avons présenté dans ce chapitre des éléments bibliographiques essentiels relatifs à la méthodologie des Plans d'Expériences. En tout premier lieu, les différents types de variables ont été recensés et présentés, ainsi que la méthodologie à suivre pour le calcul des plans factoriels complets. Le deuxième volet de ce chapitre a porté sur un aspect fondamental de la méthode des surfaces de réponse qu'on va adopter pour notre étude.

CHAPITRE IV

Approche expérimentale et modélisation du comportement

Conclusion générale

Annexes

CHAPITRE IV

Approche expérimentale et modélisation du comportement

IV-1 Introduction

Le caractère friable des revêtements abrasables comme expliqué aux chapitres précédents explique le détachement des particules après le passage de la pale ; il s'agit donc d'une usure. Les débris d'usure peuvent produire un autre problème, il s'agit de la formation d'une zone de transfert de matériau à partir du dépôt sur l'ailette. En effet, là on est devant un mécanisme "usure-transfert". En s'inspirant de cette courte définition, on trouve qu'à la suite de ce phénomène on obtient une trace d'usure sur le matériau abrasable dû au frottement de l'ailette dessus ; dans ces conditions, le but recherché est de chercher les conditions du bon fonctionnement de la machine productrice d'énergie. Il apparaît donc très important d'étudier l'usure et la texture engendrée sur la surface du matériau afin de minimiser le jeu de fonctionnement provoqué par la friction dans le but d'obtenir un bon rendement.

Afin de mieux décrire le problème, la dernière partie de ce mémoire a pour objectif d'étudier et de comparer les différents paramètres agissant sur le comportement au cours du fonctionnement ; c'est une des raisons pour laquelle nous avons envisagé d'utiliser des modèles mathématiques engendrés par la méthode des plans d'expériences tout en s'appuyant sur les résultats obtenus sur le banc d'essai. Il s'agit donc d'étudier en tant que mécanicien la possibilité de résoudre le problème et de voir les intervalles et les plages des différents paramètres sur lesquels on peut se baser pour prévoir le bon fonctionnement.

Ce chapitre se compose de deux grandes parties. La première partie présente la modélisation du comportement du matériau avec la méthode des plans d'expériences du revêtement abrasable NiCrAl-BN lors de l'usure ou du transfert après qu'il soit rentré en friction avec les ailettes tout en prenant en compte les paramètres qui agissent d'une façon prépondérante sur le phénomène. Nous détaillons ensuite dans la deuxième partie, une étude de l'impact de la friction sur l'état de surface de ce même matériau protecteur.

IV-2 Tests expérimentaux sur le revêtement abrasable

Les tests expérimentaux présentés dans ce chapitre ont été réalisés sur un dépôt obtenu par le procédé de projection thermique “Atmospheric Plasma Spraying“ en projetant de la poudre NiCrAl-Nitru de Bore-Polyester dont la composition est donnée par le tableau (IV.01). Une torche à plasma est utilisée et des paramètres de projection sont soigneusement choisis et optimisés pour obtenir le dépôt souhaité (voir Chapitre I)

Tableau IV. 01 : *Composition massique de la poudre NiCrAl-BN-Polyester*

Nickel	Chrome	Aluminium	Fer	Cobalt	Nitru de bore	Polyester	Densité
61,54%	3,86%	3,43%	0,26%	0,01%	15,9%	15%	5,6

Pour étudier l’usure et la texture de la surface du matériau NiCrAl-BN rentré en friction avec des ailettes de TiAlV-6-4 et mettre visuellement en évidence les impacts des différents paramètres physiques agissant sur ce matériau protecteur, une série de tests expérimentaux sont effectués de manière précise sur un banc d’essai capable de simuler les paramètres réels influents sur le joint sacrificiel (Figure IV.01) au LERMPS de Belfort Montbéliard “Laboratoire d’Etudes et de Recherches sur les Matériaux, Procédés et Surfaces”.

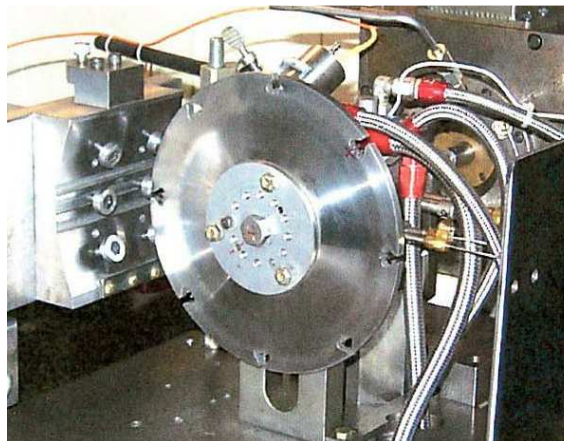


Figure IV.01 : *Photo réelle du banc d’essai*

Source : Usine Sulzer Metco, Suisse, 2004

Etant donnée la diversité des paramètres physiques agissant sur le comportement, et leur dépendance sur les résultats, il est nécessaire de disposer d'informations relatives aux données des tests expérimentaux récoltées sur des installations à l'échelle réduite et dont les conditions d'essais sont représentatives par rapport à celles rencontrées en service.

IV-2-1 Les données des tests expérimentaux

Les résultats obtenus avec les tests effectués sur le banc d'essai, varient en fonction de divers paramètres qui sont :

- La vitesse de rotation relative de l'ailette par rapport au revêtement (vitesse linéaire).
- La vitesse d'incursion de l'ailette dans le dépôt.
- Le taux d'incursion de l'ailette dans le revêtement
- Le contrôle de la température
- La géométrie du contact
- Le contrôle des autres effets en surface causés par le contact ailette – dépôt.

IV-2-2 Principe de fonctionnement

Sur le banc d'essai développé au sein de la société Sulzer Metco (Figure IV.02), deux aubes rigides fixées sur un disque en rotation frottent une fois par tour contre une paroi abrasable ; elles sont déplacées radialement et axialement dans donnant une trajectoire bien définie à cette aube. Le rotor est enveloppé dans une enceinte isolante pour canaliser les gaz chauds produits par la combustion au niveau du générateur à flamme.

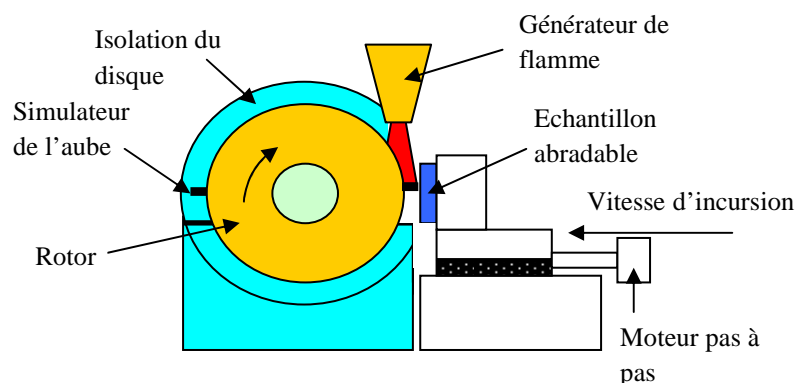


Figure IV.02 : Description des différents accessoires du banc d'essai

Le montage standard peut être utilisé pour des tests dans l'intervalle de température allant de 25°C à 1200°C sur l'échantillon. Pour des aubes destinées aux hautes températures, un alliage à base de nickel est utilisé pour le disque. L'échantillon abrasable est monté sur un porte échantillon connecté à un moteur pas à pas permettant d'obtenir un déplacement très petit et d'une façon lente. L'incursion ainsi que la vitesse d'incursion sont contrôlées par un contrôleur logique programmable. Des capteurs piézoélectriques prélèvent la position instantanée (ainsi que la vitesse) de l'échantillon pour obtenir une description d'abrasion de l'échantillon et une vidéo caméra équipée de stroboscope est installée pour observer l'incursion. La température réelle à l'intérieur d'une turbine est reproduite par le générateur de flamme (genre de chalumeau), la vitesse linéaire est donnée par un moteur asynchrone simulant la vitesse des ailettes d'une turbine, alors que la vitesse et la profondeur d'incursion sont obtenues grâce au moteur pas à pas de grande précision et d'un pas extrêmement bas. La profondeur finale d'incursion pendant le test représente la résultante des différentes dilatations des parties de la turbine, essentiellement celles des ailettes et de l'enveloppe. Ces dernières, étant données leur géométrie et leur coefficient de dilatation se dilatent différemment et à un certain moment se touchent et se frottent. Il y a donc ici usure de l'ailette et déplacement du matériau.

IV-3 Etude de l'usure du dépôt abrasable après friction avec l'ailette

Sur le banc d'essai présenté ci-avant, le contact d'une aube en TiAlV-6-4 contre une paroi abrasable (NiCrAl-BN) a été réalisé pour obtenir l'usure du matériau (Figure IV.03).

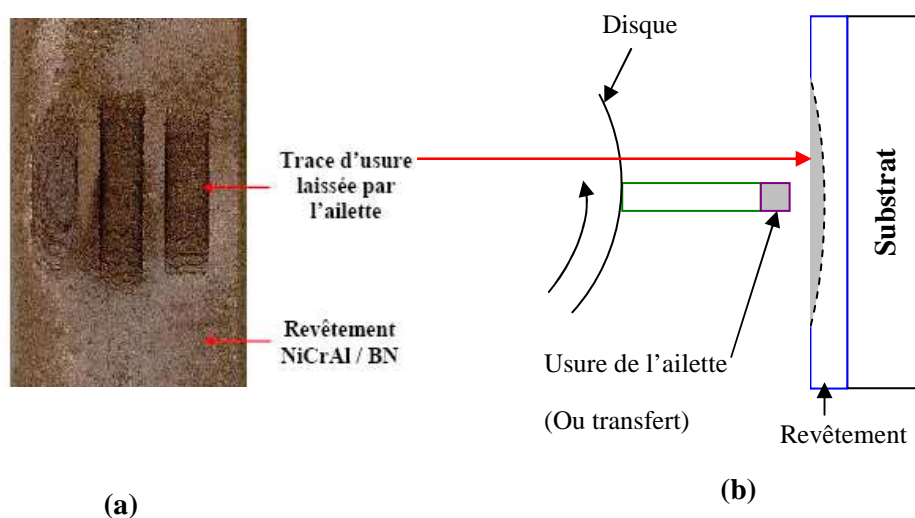


Figure IV.03 : Trace d'usure sur l'échantillon

(a) Photo réel d'une trace d'usure ; (b) schéma du fonctionnement du mécanisme

Pour une meilleure reproductibilité des expériences, plusieurs simplifications ont été portées sur les tests par rapport aux cas réels. Les paramètres jugés primordiaux tels que les vitesses linéaire et d'incursion, la température, ainsi la profondeur d'incursion sont reconduites avec une exactitude fine et exacte, alors que d'autres facteurs qui sont considérés moins importants tels que le nombre de d'ailettes, le milieu gazeux des gaz brûlés, ne sont pas pris en compte.

Le rotor est porté à la vitesse requise pendant que l'échantillon est chauffé jusqu'à la température désirée ; on note ici que la température est fixée à 500 °C. Lorsque la vitesse linéaire et la température deviennent constantes, l'échantillon est avancé vers le rotor indiquant le début du test. La température et la position exacte de l'échantillon ainsi que les vitesses des extrémités des ailettes et d'avance de l'échantillon sont régulièrement visualisées et enregistrées.

Quand la profondeur d'incursion désirée est obtenue, le test s'achève et l'échantillon est rapidement retiré. La profondeur d'incursion est définie comme étant la somme de l'incursion de l'ailette dans le revêtement et de la valeur de l'usure de l'extrémité de l'ailette.

En chaque point de l'expérimentation, la réponse obtenue au niveau de l'ailette est mesurée. On présente dans le tableau IV.02 les résultats des tests effectués.

Tableau IV.02 : Conditions des tests d'abradabilité

N°	Vitesse d'incursion (µm/s)	Vitesse linéaire (m/s)	Profondeur d'incursion (µm)	Réponse (Usure ou transfert de l'ailette) (µm)
1	760	153	289	711
2	2,5	305	543	457
3	138	305	1478	-178
4	760	153	822	178
5	138	305	1330	-30
6	760	153	970	30
7	2,5	305	1000	0
8	760	153	594	406
9	500	250	379	381
10	100	397	525	-25
11	10	397	475	25
12	100	397	525	-25
13	10	397	525	-25

IV-3-1 Analyse des résultats d'essai

Étant donnée la friabilité de ce matériau et afin de limiter la détérioration de l'aube au contact avec le stator, il arrive qu'au cours du frottement, la perte d'épaisseur du revêtement se transforme en dépôt sur le bout de l'aube (transfert). Ainsi, il est possible que tantôt il y ait transfert de matériau tantôt usure de l'ailette. Cette explication se voit clairement sur les résultats obtenus par les tests d'abrasabilité ; le signe moins désigne le transfert (Tableau IV.02). On remarque dans l'expérience N° 07 qu'un résultat est égal à zéro, cela veut dire qu'il y'a ni transfert ni usure, et que cette valeur coïncide avec la valeur initiale de la longueur de l'ailette (Figure IV.04). Lorsqu'on place le repère de mesure dans cette position, la valeur de mesure positive signifie qu'il y'a une usure de l'ailette, par contre la valeur négative indique qu'il y'a transfert, c'est-à-dire augmentation de la longueur de l'aube.

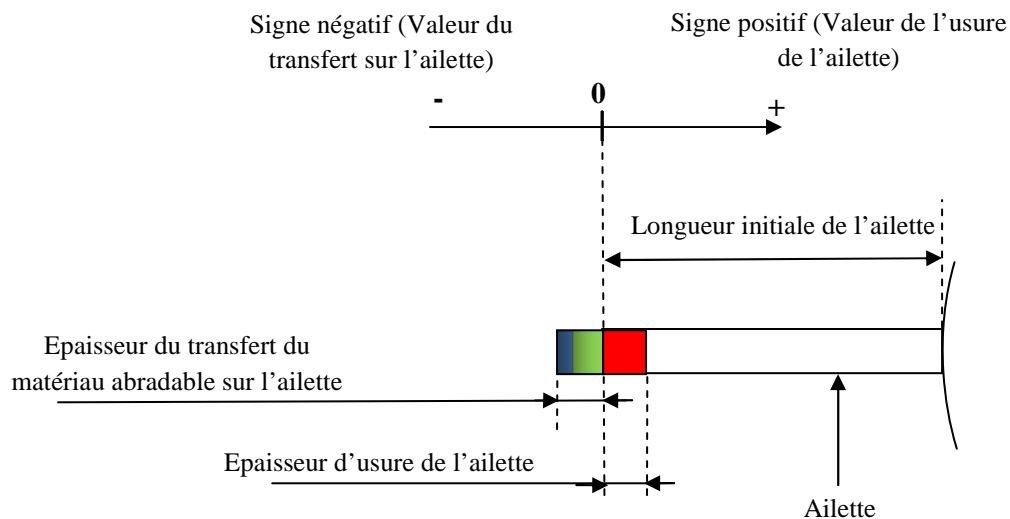


Figure IV.04 : Schéma d'usure et de transfert de matériau

Il est donc nécessaire de déterminer si le comportement mécanique de l'abrasable pendant son usure (ou transfert) observés expérimentalement peuvent expliquer les comportements indésirables de l'ailette en fonction des différents paramètres de fonctionnement. La méthode consiste à décrire le phénomène avec un modèle mathématique afin de faciliter l'interprétation des résultats obtenus ainsi de prévoir les zones dangereuses vis-à-vis des variations des paramètres de fonctionnement.

IV-3-2 Modélisation avec la méthode des plans d'expériences

Dans le cadre de l'exploitation des résultats des essais, la méthode des plans d'expériences semble appropriée pour l'étude de l'influence des différents paramètres. La modélisation nécessite de former la matrice d'expériences (selon les explications données dans le chapitre III) ; il est nécessaire de noter les niveaux ou bien les points expérimentaux, des différents facteurs, d'où pour notre cas on a :

- ✓ Le facteur vitesse d'incursion prend six niveaux : 2,5, 10, 100, 138, 500, 760.
- ✓ Le facteur vitesse linéaire prend quatre niveaux : 153, 250, 305, 397
- ✓ Le facteur profondeur d'incursion prend onze niveaux : 289, 379, 475, 525, 543, 594, 822, 970, 1000, 1330, 1478.

Comme la méthode des plans d'expériences nécessite un codage des niveaux des facteurs, on prend la valeur maximale codée comme +1, et la valeur minimale codée comme -1. Les valeurs intermédiaires doivent alors se trouver entre -1 et +1, c'est-à-dire que le facteur doit se trouver dans l'intervalle [-1, +1]. Comme tous les facteurs prennent plusieurs niveaux, et sont exprimés dans des unités différentes, il est nécessaire de procéder à une codification qui permet d'éliminer ces unités de mesure et d'obtenir des valeurs codées permettant de comparer les facteurs. Cette codification se fait à partir de la relation suivante :

$$x_i = \frac{u_i - \left(\frac{u_{\min i} + u_{\max i}}{2} \right)}{\left(\frac{u_{\max i} - u_{\min i}}{2} \right)} \quad (\text{IV.01})$$

Où :

u_{\min} : Représente la borne inférieure des niveaux ;

u_{\max} : Représente la borne supérieure des niveaux.

En utilisant la formule (IV.01), pour tous les facteurs, on obtient la matrice d'expériences montrée par le tableau IV.03 ; elle a été obtenue à partir du plan d'expériences dans lequel une série de 13 expériences a été effectuée en combinant suivant un ordre précis

les valeurs des 3 paramètres qui agissent sur la réponse, autrement dit sur le paramètre de l'usure:

Tableau IV.03 : Matrice d'expériences

N°	V _{inc}	V _{lin}	Pro	V _{inc} *V _{lin}	V _{inc} *Pro	V _{lin} *Pro	V _{inc} ²	V _{lin} ²	Pro ²
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
2	-1	0,245	-0,573	-0,245	0,572	-0,14	1	0,06	0,328
3	-0,642	0,245	1	-0,157	-0,642	0,245	0,412	0,06	1
4	1	-1	-0,103	-1	-0,103	0,103	1	1	0,01
5	-0,642	0,245	0,751	-0,157	-0,482	0,184	0,412	0,06	0,564
6	1	-1	0,145	-1	0,145	-0,145	1	1	0,021
7	-1	0,245	0,196	-0,245	-0,195	0,048	1	0,06	0,038
8	1	-1	-0,487	-1	-0,486	0,486	1	1	0,237
9	0,313	-0,204	-0,849	-0,064	-0,266	0,173	0,098	0,041	0,72
10	-0,742	1	-0,603	-0,742	0,447	-0,603	0,551	1	0,363
11	-0,98	1	-0,687	-0,98	0,673	-0,687	0,96	1	0,472
12	-0,742	1	-0,603	-0,742	0,447	-0,603	0,551	1	0,363
13	-0,98	1	-0,603	-0,98	0,591	-0,603	0,96	1	0,363

Avec :

V_{inc} : Représente la vitesse d'incursion ;

V_{lin} : Représente la vitesse de rotation ;

Pro : Représente la profondeur d'incursion.

Après avoir effectué le codage des différents niveaux des facteurs agissant sur le comportement nous permettant d'obtenir la matrice d'expériences associée aux tests expérimentaux, il est maintenant possible de définir le modèle mathématique. Le choix d'un modèle de degré 2 pour ce cas d'étude réside dans le fait que ce modèle semble particulièrement adapté à la forme de la réponse. Les termes quadratiques traduisent la courbure des surfaces et les interactions des facteurs montrent l'action de l'un sur l'autre.

Le calcul des coefficients du polynôme modélisateur n'est pas présent dans cette partie. Ce sujet sera abordé dans la partie annexe (Annexe B). Le but est la recherche d'un modèle polynomial décrivant la variation de la réponse 'y' relativement aux valeurs de k facteur x₁, x₂, x₃. La relation mathématique reliant ces variables sera de la forme :

$$y_i = a_0 + a_1x_{i,1} + a_2x_{i,2} + a_3x_{i,3} + a_{12}x_{i,1}x_{i,2} + a_{13}x_{i,1}x_{i,3} + a_{23}x_{i,2}x_{i,3} + a_{11}x_{i,1}^2 + a_{22}x_{i,2}^2 + a_{33}x_{i,3}^2 + e_i \quad (IV.02)$$

Où :

- $x_{i,1}$: Représente la valeur lue dans la matrice d'expériences pour le $i^{\text{ème}}$ traitement, pour le facteur vitesse d'incursion ;
- $x_{i,2}$: Représente la valeur lue dans la matrice d'expériences pour le $i^{\text{ème}}$ traitement, pour le facteur vitesse linéaire ;
- $x_{i,3}$: Représente la valeur lue dans la matrice d'expériences pour le $i^{\text{ème}}$ traitement, pour le facteur profondeur d'incursion ;
- y_i : Représente la valeur observée de la réponse pour le $i^{\text{ème}}$ traitement
- e_i : Représente l'écart entre la valeur observée et la valeur calculée de la réponse.

Par le calcul des coefficients du polynôme modélisateur on obtient le modèle mathématique suivant :

$$y = 188,57 - 2370,79x_1 - 2626,69x_2 - 594,5x_3 - 1343,12x_1x_2 + 0,0008x_1x_3 + 0,0006x_2x_3 - 2158,86x_1^2 + 487,77x_2^2 - 0,0003x_3^2 \quad (\text{IV.03})$$

a) Qualité du modèle :

*** Qualité descriptive du modèle :**

Il est primordial de connaître la qualité de la modélisation obtenue ; l'analyse nécessite l'utilisation du coefficient de détermination de la qualité descriptive $R_{ajusté}^2$. Il permet de nous montrer comment le modèle mathématique décrit le phénomène usure – transfert et quel est le degré de rapprochement par rapport aux valeurs réelles mesurées. Après le calcul du coefficient de détermination on trouve :

$$R_{ajusté}^2 = 0,99 \quad (\text{IV.04})$$

Plus la valeur du coefficient de détermination ajustée de la qualité descriptive se rapproche de 1, plus la qualité descriptive du modèle est satisfaisante. Pour notre cas on peut donc dire que le modèle obtenu décrit convenablement le phénomène.

b) Qualité prédictive du modèle :

Comme précédemment pour la qualité descriptive du modèle à partir du coefficient de détermination ajusté, il est possible de définir maintenant la qualité prédictive du modèle à partir de ce coefficient noté Q^2 . Après calcul on trouve :

$$Q^2 = 0,99 \quad (\text{IV.05})$$

Plus la valeur du coefficient de la qualité prédictive Q^2 est proche de 1, plus la qualité prédictive du modèle est satisfaisante. On peut conclure que notre modèle est acceptable et qu'on peut prédire des valeurs des réponses sans avoir à effectuer d'autres essais tout en étant sûr qu'on ne s'éloigne pas des cas réels.

IV-3-3 Effet séparé de facteurs sur la distribution des réponses

Cette partie constitue une illustration numérique et graphique interprétant le comportement de l'ailette lorsqu'elle rentre en friction avec le dépôt.

Le principe est de représenter le plus simplement possible l'influence de la variation de trois paramètres qui sont, la vitesse d'incursion de l'ailette dans le dépôt, la vitesse de déplacement de l'ailette par rapport au dépôt et enfin la profondeur d'incursion de l'ailette à l'intérieur du matériau séparément sur la variation de la réponse. Donc, l'idée c'est d'étudier séparément chaque effet afin de pouvoir analyser et interpréter l'action de chacun d'eux.

a) Illustration de la variation des réponses en fonction de la vitesse d'incursion

x_1

Cette partie d'étude devrait nous permettre d'analyser le premier paramètre à savoir la vitesse d'incursion dans le dépôt, soit x_1 , sur le comportement de l'ailette. Seule la variation de ce dernier permet dans le polynôme de nous montrer la variation du comportement tout en ne tenant pas compte des 2 autres. On le fait varier de sa valeur minimale à sa valeur maximale tout en gardant les deux autres paramètres nuls dans leurs valeurs codées.

Éliminons les 2 autres à savoir, la vitesse linéaire des ailettes représentée par la variable x_2 et la profondeur d'incursion représentée par la variable x_3 , du modèle mathématique global (IV.03), on obtient alors:

$$y_1 = 188,57 - 2370,79x_1 - 2158,86x_1^2 \quad (\text{IV.06})$$

Le graphe obtenu illustre l'action de la vitesse d'incursion à elle seule sur la réponse (usure ou transfert), sans que les deux autres ne soient pris en compte. La courbe (Figure IV.05) étant tracée avec "Excel" avec comme abscisses des valeurs codées de la vitesse d'incursion, alors que la deuxième étant tracée avec "Modde 6.0" cette fois-ci en utilisant les valeurs réelles afin de faciliter l'interprétation des résultats (Figure IV.06)

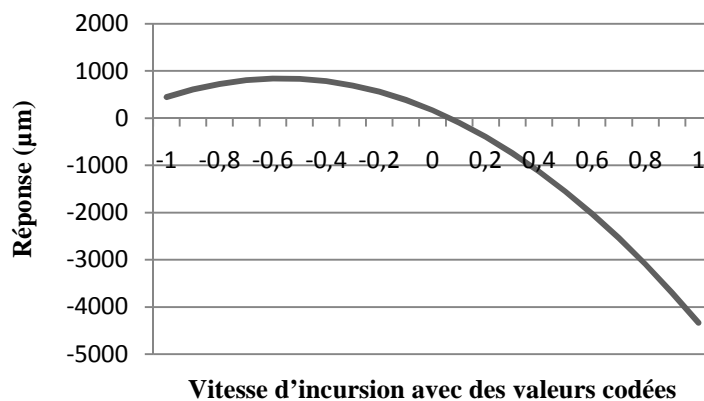


Figure IV.05 : Variation de la réponse en fonction des valeurs codées de la vitesse d'incursion (x_1)

En regardant la distribution des réponses en fonction de la variation de la vitesse d'incursion, on remarque qu'il y a deux comportements complètement différents en allant de la valeur minimale à la valeur maximale de la vitesse d'incursion. Ces figures illustrent à travers ces courbes comment et quand se font l'usure de l'ailette ou le transfert du matériau. En effet l'usure de l'ailette a lieu que lorsque la vitesse d'incursion se situe entre 2,5 µm/s et 409,25 µm/s ; on remarque dans cet intervalle de vitesses que la valeur d'usure augmente à partir de la valeur initiale de la vitesse d'incursion de 2,5 µm/s (valeur du 403 µm) jusqu'à la valeur maximale de 839,65 µm lorsque la vitesse atteint 173.3 µm/s, et à partir de là, il commence à décroître progressivement. Au-delà de ça (2,5 µm/s jusqu'à 409,25 µm/s) jusqu'à la valeur maximale de 760 µm/s, c'est le transfert du matériau abrasable vers l'ailette qui commence ; le maximum est enregistré lorsque la vitesse d'incursion est de 760 µm/s (valeur de -4341.09 µm).

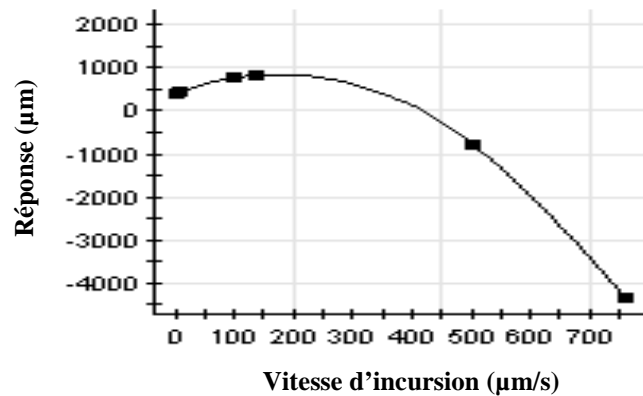


Figure IV.06 : Variation de la réponse en fonction de la vitesse d'incursion x_1

Donc, à partir de ces interprétations, on conclue que l'augmentation de la vitesse d'incursion agit en deux phases, sur la première, on enregistre l'usure en deux étapes différentes, l'augmentation puis la diminution de l'usure, et sur la deuxième on remarque le transfert qui s'effectue à partir de 409,25 µm/s.

b) Illustration de la variation des réponses en fonction de la vitesse linéaire (x_2)

Comme cela a été vu dans le cas précédent concernant la réponse en fonction uniquement de la variation de la vitesse d'incursion (x_1), on effectue exactement la même étude, cette fois-ci, on étudie la distribution des réponses en fonction uniquement de la variation de la vitesse linéaire du bout d'ailettes due à la rotation de la roue tout en fixant la profondeur d'incursion à 883,5 µm (valeur codée de la profondeur d'incursion égale à zéro), et la vitesse d'incursion à 381,25 µm/s (valeur codée de la vitesse d'incursion égale à zéro). Ce qui revient à poser dans le modèle global qui gère tout le phénomène $x_1 = 0$ et $x_3 = 0$. Le polynôme quadratique global prend la forme suivante:

$$y_2 = 188,57 - 2626,69x_2 + 487,77x_2^2 \quad (IV.07)$$

Comme dans le premier cas, nous représentons graphiquement cette équation de deux manières, l'une avec les valeurs codées de la vitesse linéaire (figure IV.07), l'autre avec les valeurs réelles afin de faciliter l'interprétation (figure IV.08).

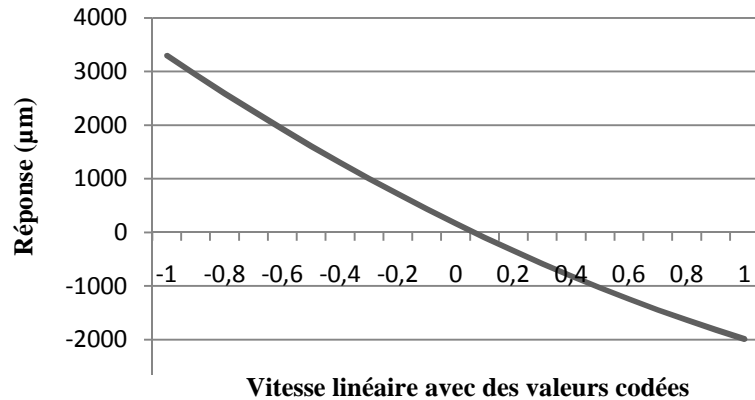


Figure IV.07 : *Variation de la réponse en fonction des valeurs codées de la vitesse linéaire*

On peut observer sur les deux figures (VI.07 et IV.08) qu'en adoptant le modèle (IV.07), l'usure prend son maximum (3301,67 µm) dès que la vitesse linéaire atteint son niveau bas, c'est-à-dire lorsque la vitesse linéaire prend la plus petite valeur des essais (153 m/s). Plus la valeur de la vitesse linéaire augmente (de 153 µm à 283,75 m/s), l'usure diminue jusqu'à une valeur avoisinant de zéro, c'est-à-dire là où il y'a ni usure ni transfert, c'est là le but recherché par les exploitants de la machine. A partir de cette valeur, le comportement change, un transfert du dépôt abrasable sur l'ailette est remarqué jusqu'à la valeur maximale de la vitesse linéaire de 397 m/s, à cette valeur le transfert atteint son maximum.

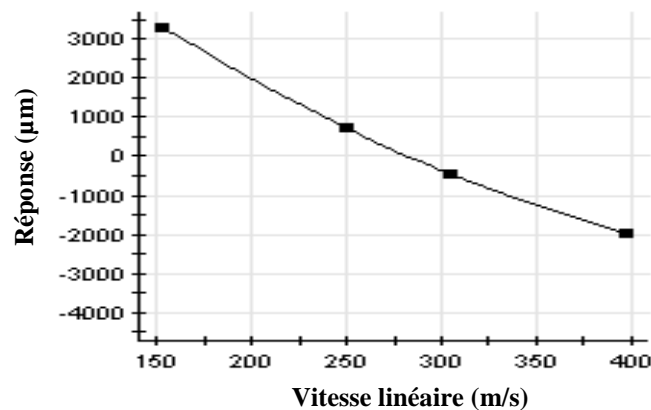


Figure IV.08 : *Variation de la réponse en fonction de la vitesse linéaire x_2*

On peut conclure à travers cette analyse, que l'augmentation de la vitesse linéaire du bout d'ailette fait diminuer l'usure de son maximum à la valeur zéro. Au-delà de 283 m/s, elle contribue à l'augmentation du transfert.

c) Illustration de la variation des réponses en fonction de la profondeur d'incursion x_3

Similairement aux deux premiers cas, on peut cette fois-ci voir comment agit le troisième paramètre à savoir la profondeur d'incursion (x_3) sur le comportement de l'ailette. Il suffit donc d'éliminer du polynôme quadratique général les facteurs décrivant les deux premiers paramètres en posant $x_1 = 0$ et $x_2 = 0$. Le polynôme prend donc la forme suivante :

$$y_3 = 188,57 - 594,5x_3 - 0,0003x_3^2 \quad (\text{IV.08})$$

On s'appuyant sur la formule (IV.08) pour tracer les graphes, les figures (IV.09 et IV.10) illustrent la variation de la réponse en fonction des valeurs codées et réelles respectivement.

Une remarque intéressante est déduite des deux figures ; le comportement est sensiblement différent que le cas précédent ; la différence réside sur les valeurs de la réponse, et la courbe présente une même allure et un même comportement. Cette fois-ci, les valeurs des réponses lues sur le graphe chutent d'une façon presque linéaire ; ce résultat s'explique par le fait que le coefficient du degré 2 du modèle (IV.08) est presque négligeable ($a_3 = 0,0003$). La courbe demeure tout de même du second degré.

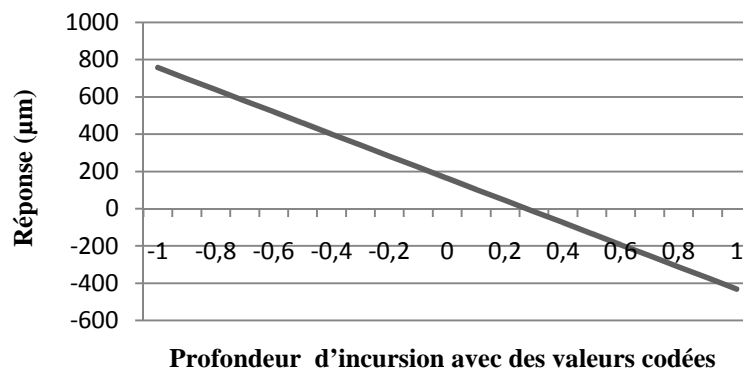


Figure IV.09 : Variation de la réponse en fonction des valeurs codées de la profondeur d'incursion x_3

L'allure décroît le long du domaine du paramètre profondeur d'incursion. Lorsque la profondeur d'incursion est à son niveau bas (289 μm), l'usure se trouve à sa valeur maximale (779,93 μm). A ce moment là, cette valeur décroît jusqu'au moment où elle atteint la valeur zéro lorsque la profondeur d'incursion est voisine de 1069 μm . Au-delà de cette

valeur, le transfert du matériau abrasable commence jusqu'au moment où il atteint la valeur maximale (409,06 μm) lorsque la profondeur d'incursion se situe à la valeur de 1478 μm .

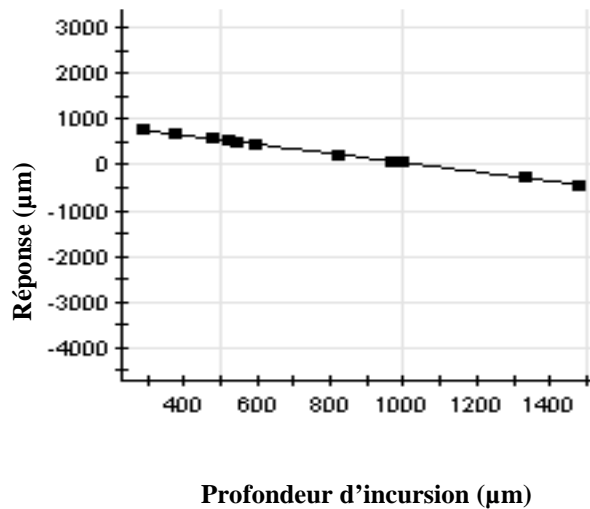


Figure IV.10 : Variation de la réponse en fonction de la profondeur d'incursion x_3

D'une manière générale ces résultats nous ont montré que l'usure décroît avec l'augmentation de la valeur de la profondeur d'incursion jusqu'à la valeur de 1069 μm et à partir de là, le transfert commence à augmenter avec l'augmentation de facteur x_3 .

D'après les résultats étudiés aux paragraphes précédents, il apparaît qu'il y a un même comportement, c'est-à-dire que nous passons d'une usure vers un transfert avec l'augmentation des niveaux de chaque facteur pris séparément. On constate aussi que la réponse prend des valeurs nulles lorsqu'il y a passage de l'usure vers le transfert à des moments où les paramètres prennent des valeurs intermédiaires moyennes.

IV-3-4 Effet de variation d'un paramètre combiné aux 2 valeurs extrêmes d'un deuxième

Dans ce qui suit, nous allons comparer nos résultats avec la combinaison de la variation de deux paramètres en même temps tout en fixant la troisième. Le premier paramètre est varié progressivement de sa valeur minimale à sa valeur maximale alors que le deuxième est pris dans, soit sa valeur minimale, soit dans sa valeur maximale. Cela nous permet d'obtenir 2 allures distinctes sous forme de droites joignant les points montrant les valeurs des réponses. Cela nous facilite la comparaison entre elles et nous permet de faire des conclusions.

a) Effet de la vitesse d’incursion combinée avec les valeurs extrêmes de la vitesse linéaire

Examinons à présent l’effet de la vitesse d’incursion et linéaire sur la distribution des réponses. Le principe c’est de faire varier la vitesse d’incursion (x_1) de sa valeur minimale à sa valeur maximale et d’obtenir les réponses (usure ou transfert) en donnant des valeurs constantes, l’une maximale, l’autre minimale à la vitesse linéaire (x_2). Le troisième paramètre ‘la profondeur d’incursion’ reste constant à son niveau réel intermédiaire moyen, c'est-à-dire à 883,5 μm , ce qui équivaut à la valeur zéro ($x_3=0$) par sa valeur codée. La formule mathématique qui gère cette variation s’écrit sous la forme ci-après; elle est bien entendue tirée du modèle général global :

$$y_{12} = 188,57 - 2370,79x_1 - 2626,69x_2 - 1343,12x_1x_2 - 2158,86x_1^2 + 487,77x_2^2 \quad (\text{IV.09})$$

La figure (IV.11), visualise respectivement les champs de variation des réponses (usure ou transfert) en fonction de la variation de la vitesse d’incursion combinée avec les valeurs extrêmes de la vitesse linéaire. On note que la représentation graphique de ce comportement se fait à l’aide de cinq points liés entre eux. La première courbe (en noir) illustre les réponses lorsque la vitesse linéaire se fixe à son minimum alors que la deuxième courbe (en rouge) illustre la variation de la réponse lorsque la vitesse linéaire se fixe à son maximum. Les droites joignant les points ne sont que des liaisons entre les réponses et non l’allure de l’équation IV.09.

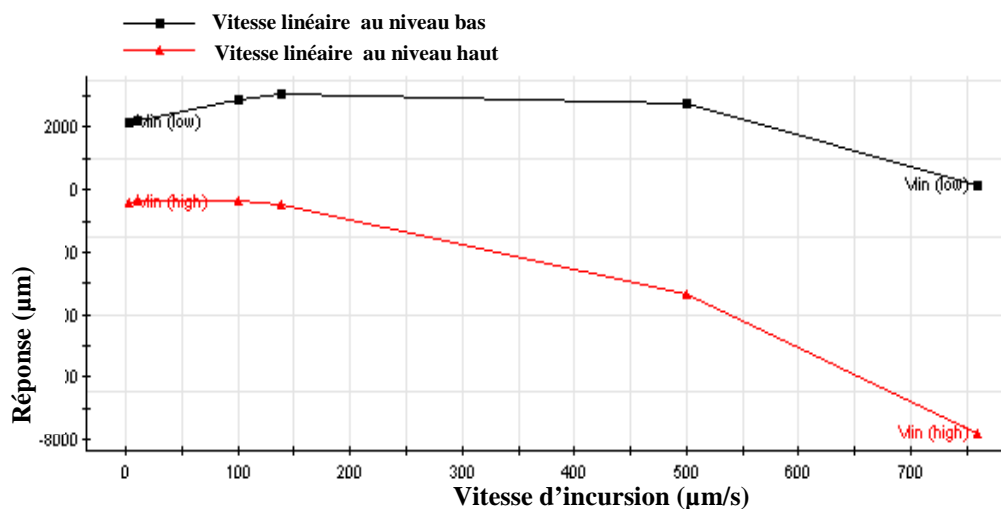


Figure IV.11 : Effet combiné de la vitesse linéaire constante, et de la vitesse d’incursion

En augmentant la vitesse d’incursion, on remarque qu’il y a deux comportements complètement différents en passant du niveau haut au niveau bas de la vitesse linéaire. Ceci s’explique par le fait que lorsqu’on fixe la vitesse linéaire à son niveau haut, la variation de la

vitesse d'incursion n'engendre que le transfert du dépôt abradable vers l'ailette, par contre lorsque la vitesse linéaire se situe à son niveau bas, on remarque qu'il y a présence de deux phénomènes qui caractérisent la friction.

Le premier montre l'augmentation de l'usure de l'ailette jusqu'à atteindre son maximum lorsque la vitesse d'incursion se situe entre 2,5 $\mu\text{m/s}$ à 304 $\mu\text{m/s}$; puis va en diminuant progressivement jusqu'au moment où la vitesse d'incursion atteint son maximum (760 $\mu\text{m/s}$).

Finalement on ne remarque que l'usure de l'ailette diminuant ainsi la longueur de l'ailette tout le long de l'augmentation de la vitesse d'incursion au niveau bas de la vitesse linéaire.

D'une façon générale, on enregistre deux phénomènes, le premier étant l'usure à la petite valeur de la vitesse linéaire, le deuxième étant le transfert du dépôt vers l'ailette à la grande valeur de la vitesse linéaire.

b) Effet de la vitesse d'incursion combinée aux valeurs extrêmes de la profondeur d'incursion

Cette fois-ci, on fixe la vitesse linéaire à son niveau intermédiaire de 275 m/s (valeur codée égale à zéro, ce qui nous permet d'éliminer x_2 de l'équation principale, puis on varie la vitesse d'incursion pour deux valeurs différentes de la profondeur d'incursion, l'une étant maximale de 1478 μm (valeur codée égale à $x_3=+1$), l'autre étant minimale de 289 μm (valeur codée égale $x_3=-1$). En remplaçant donc ce qui a été mentionné dans le modèle global, nous obtenons la relation suivante :

$$y_{13} = 188,57 - 2370,79x_1 - 594,5x_3 - 0,0008x_1x_3 - 2158,86x_1^2 - 0,0003x_3^2 \quad (\text{IV.10})$$

Sur la Figure (IV.12), on présente les deux variations du phénomène pour les deux niveaux de la profondeur d'incursion en se basant sur le modèle d'écrit par l'équation (IV.10)

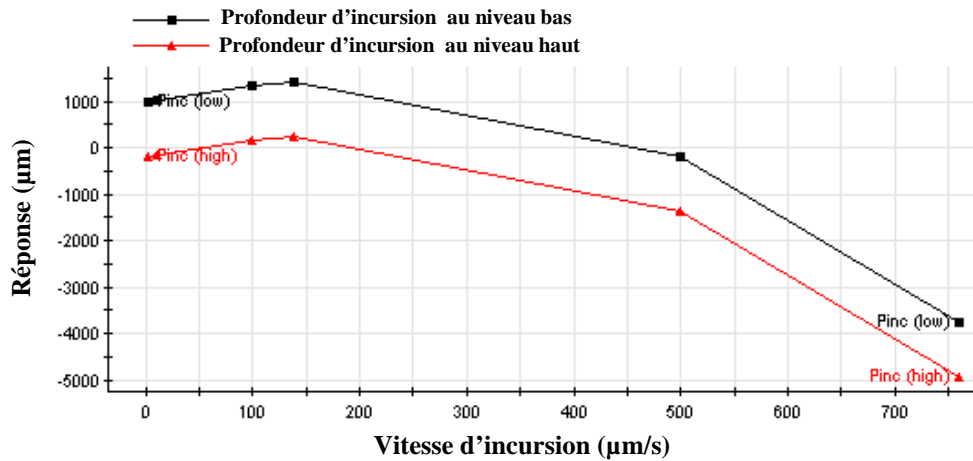


Figure IV.12 : Effet combinée de la profondeur constante et de vitesse d'incursion

Rappelons tout d'abord que les droites ne sont que des liaisons entre les points montrant la croissance ou la décroissance des valeurs des réponses. L'augmentation de la vitesse d'incursion avec les deux niveaux de la profondeur d'incursion engendre des conséquences similaires sur la variation du comportement comme le montre la figure (IV.12). Même si l'écart entre les profondeurs d'incursion est considérable, on remarque que les régressions de "y" sur "x_i" restent similaires et possèdent la même allure avec cependant des valeurs de réponses différentes. Les valeurs du signe positif de la réponse augmentent pour le cas du niveau bas jusqu'à 1433.95 µm lorsque la vitesse d'incursion se situe autour de 173 µm/s ; on enregistre par la suite pour le même niveau de la profondeur, le décroissement de la réponse "y" passant par la valeur zéro lorsque la vitesse d'incursion se situe à 481,5 µm/s ; à ce moment là, le transfert commence jusqu'au moment où il atteint son maximum (-3746,58 µm) quand la vitesse d'incursion atteint son maximum. Il en est de même pour la deuxième représentation sauf que pour cette fois-ci le comportement commence par un transfert puis une usure. A un certain moment la réponse passe au dessous du zéro, le transfert du matériau sur l'ailette s'exécute alors. La remarque à faire concernant les deux cas d'étude (niveau bas et niveau haut), est que l'usure prend les valeurs maximales pour la même valeur de la vitesse d'incursion à savoir 173 µm/s.

A travers cette interprétation on peut conclure que l'augmentation de la vitesse d'incursion entraîne tout d'abord l'usure de l'ailette et par la suite engendre l'augmentation de cette dernière avec le transfert du dépôt sur le bout des ailettes pour les deux cas de la profondeur d'incursion.

c) Effet de vitesse linéaire combinée aux valeurs extrêmes de la profondeur d'incursion :

Avec la même procédure et le même raisonnement effectués auparavant dans les premiers cas nous fixons maintenant la vitesse d'incursion à son niveau intermédiaire moyen égale à 381,25 $\mu\text{m/s}$ (valeur codée est de $x_1=0$) mettant ainsi en évidence la variation de la réponse en fonction du changement de la vitesse linéaire pour deux valeurs extrêmes de la profondeur d'incursion (1478 μm ; $x_3=+1$) et (289 μm ; $x_3=-1$). Cela nous amène à la formule mathématique suivante tirée du modèle global :

$$y_{23} = 188,57 - 2626,69x_2 - 594,5x_3 + 0,0006x_2x_3 + 487,77x_2^2 - 0,0003x_3^2 \quad (\text{IV.11})$$

La même façon de faire pour les deux cas précédents est appliquée pour tracer la figure (IV.13)

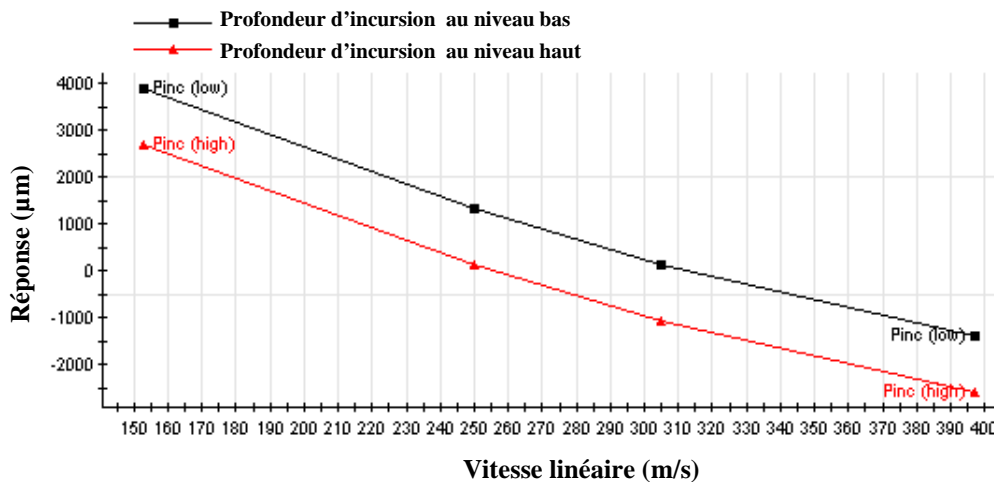


Figure IV.13 : Effet combinée de la profondeur constante et de vitesse linéaire

Avant d'interpréter les valeurs des réponses montrées sur la figure (IV.13), on remarque que c'est le même comportement enregistré dans le cas d'étude de la variation des réponses en fonction de la variation de la vitesse linéaire en gardant les autres paramètres constant (Paragraphe IV-3-4 (b)). Il y a une chute progressive de la réponse de son maximum à son minimum en fonction de l'augmentation de la vitesse linéaire dans notre cas. Analysons maintenant les résultats obtenus dans cette partie. Là aussi on enregistre comme dans le cas

précèdent la similarité de la régression de la fonction ‘y’ pour les deux cas (maximum et minimum de la profondeur d’incursion) sur les x_i ; il y a parallélisme des segments de droites joignant les points trouvés par l’équation IV.11. Le passage de l’usure de l’ailette au transfert du matériau vers l’ailette se fait à une vitesse linéaire inférieure pour le niveau haut de la profondeur d’incursion comparativement au niveau bas de la profondeur d’incursion. Cela se voit d’ailleurs dans l’équation IV.11 où les coefficients du facteur x_3 sont négatifs ; ils collaborent donc dans la diminution de ‘y’.

En résumé, l’augmentation de la vitesse linéaire provoque en premier lieu l’usure de l’ailette pour les deux cas de la profondeur d’incursion puis par la suite, augmente le transfert du matériau sur l’ailette à partir d’une certaine valeur de la vitesse linéaire.

Nous nous sommes intéressés plus particulièrement dans les paragraphes précédents à comparer les variations des valeurs des réponses (usure ou transfert) à travers la variation d’un paramètre, soit seul, soit combiné avec un autre.

IV-3-5 Effet simultané des trois facteurs sur la distribution des réponses

Le domaine expérimental étant défini à partir de la variation de trois facteurs ; il est difficile de montrer par une illustration graphique la variation de la réponse sous l’action des 3 facteurs. On a donc recours à la méthodologie des surfaces de réponse pour compléter cette étude comparative en utilisant 2 axes pour les 2 facteurs et le 3^{ème} axe pour les réponses.

Les surfaces de réponse sont des graphiques en trois dimensions, le plan horizontal de la figure matérialise le domaine de variation de deux facteurs ; l’axe vertical matérialise la variation de la réponse à partir du modèle. Au-delà de deux facteurs ; il est nécessaire de maintenir à un niveau constant du troisième facteur (minimal, intermédiaire, et maximal) dont les variations ne sont pas décrites ni représentées sur l’un des axes du plan horizontal. Le principe consiste à faire varier deux facteurs en même temps tout en fixant le troisième facteur dans sa valeur minimale ($x_i=-1$), intermédiaire ($x_i=0$), ou maximale ($x_i=+1$). L’analyse graphique du modèle consiste à illustrer l’équation de ce dernier sous deux formes : Les surfaces de réponse et les courbes iso-réponse.

a) Surfaces de réponse en fonction simultanée de la profondeur d'incursion et de la vitesse d'incursion

La Figure (IV.14) montre de deux manières la représentation des réponses, l'une dans l'espace avec une surface courbe, l'autre étant la projection de cette surface sur un plan qu'on appelle iso-réponses (usure ou transfert) en fonction de la vitesse d'incursion et de la profondeur d'incursion en utilisant des valeurs constantes de la vitesse linéaire.

Nous avons choisi 3 vitesses linéaires différentes, l'une étant minimale (153 m/s), l'autre maximale (397 m/s) puis une troisième intermédiaire moyenne (275 m/s) sur les valeurs possibles mesurées expérimentalement.

Cela nous permet de voir le comportement de l'ailette sur les trois niveaux différents. Ces deux représentations jumelées nous renseignent convenablement sur les résultats.

Ces représentations sont obtenues à partir bien entendu du modèle global du comportement de l'ailette obtenu auparavant (IV.3), rappelons qu'il est composé de termes du premier degré, des termes de second degré et des termes prenant en compte les interactions entre eux.

Rappelons que :

- x_1 : Représente la vitesse d'incursion
- x_2 : Représente la vitesse linéaire
- x_3 : Représente la profondeur d'incursion.

L'obtention des surfaces de réponse ainsi que des lignes iso-réponse ont été obtenues en utilisant le logiciel "Modde" version 6. Cet outil mathématique très convivial a été conçu pour tracer ces courbes en se basant sur des calculs statistiques élaborés avec la méthode des moindres carrés quadratiques. Pour cela, il suffit simplement de former le plan d'expériences pour qu'il soit transformé en matrice d'expériences. A partir de là, les courbes, les surfaces, les lignes, les écarts, les estimateurs et bien autres choses sont obtenus avec facilité. Il ne reste à l'utilisateur que de faire des interprétations et donner des conclusions.

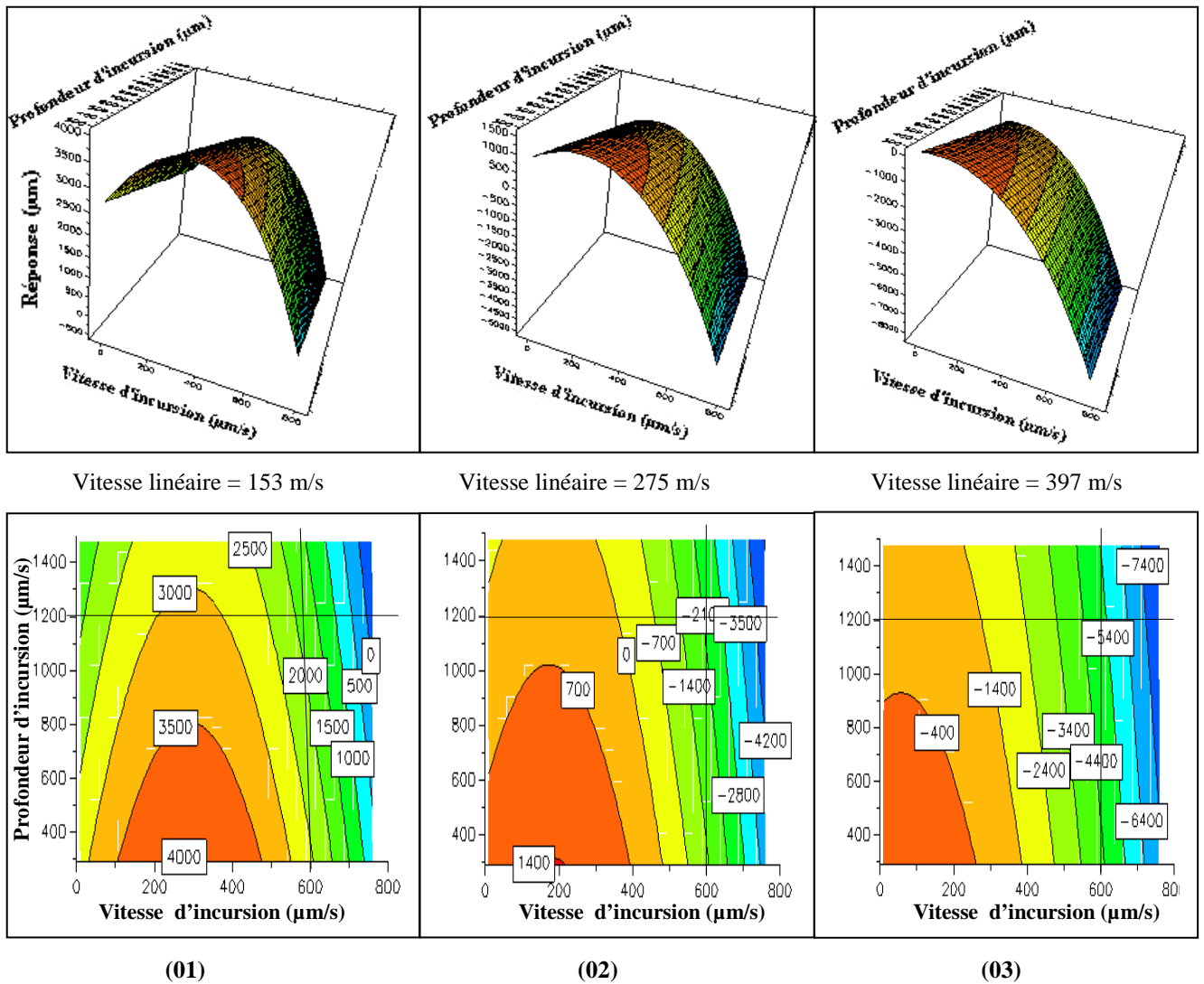


Figure IV.14 : Variation de la réponse en fonction simultanée de la profondeur et de la vitesse d'incursion

Les courbes représentent trois approches différentes, elles n'ont évidemment pas la même allure. La première, (Surface et iso-réponse) représente l'évolution des résultats pour une vitesse linéaire fixée à 153 m/s, la seconde représente cette évolution pour une vitesse linéaire fixée à 275 m/s, et la troisième représente la régression de "y" sur "x" quand la vitesse linéaire atteint son maximum (397 m/s). Nous remarquons que sur le premier, il n'y a que le phénomène de l'usure qui se produit, sur le deuxième, on remarque un passage de l'usure de l'ailette vers le transfert du matériau, alors que sur le troisième, il n'y a que le transfert.

Pour une meilleure lecture du graphe, faisons une analyse verticale des iso-réponses en prenant comme exemple une vitesse d'incursion constante de 600 $\mu\text{m/s}$ et voyons ce que donne la variation de la vitesse linéaire (Tableau IV.04)

Tableau IV.04 : Valeurs des réponses en fonction de la variation simultanée de la vitesse linéaire et la profondeur d'incursion

Vitesse d'incursion = 600 $\mu\text{m/s}$	Vitesse linéaire 153 m/s	Vitesse linéaire 275 m/s	Vitesse linéaire 397 m/s
Profondeur d'incursion = 575 μm	2296 μm	-1593 μm	-4508 μm
Profondeur d'incursion = 840 μm	2031 μm	-1858 μm	-4773 μm
Profondeur d'incursion = 1100 μm	1771 μm	-2118 μm	-5033 μm
Profondeur d'incursion = 1300 μm	1571 μm	-2318 μm	-5233 μm

Pour une vitesse linéaire égale à 153 m/s, et lorsque la vitesse d'incursion est de 600 $\mu\text{m/s}$, l'usure diminue avec l'augmentation de la valeur de la profondeur d'incursion (de 2296 μm à 1571 μm). Par contre, lorsqu'on augmente la vitesse linéaire (275 m/s et 397 m/s), il n'y a que le transfert du matériau du dépôt vers l'ailette et cela pour toutes les valeurs d'incursion. On remarque donc que le transfert augmente en parallèle avec l'augmentation de la profondeur d'incursion, il passe de -1593 μm à -2318 μm lorsque la vitesse est de 275 m/s, et de -4508 μm jusqu'à -5233 μm à 397 m/s.

Avec le même raisonnement, on effectue une analyse horizontale des iso-réponses en prenant comme exemple une profondeur d'incursion constante de 1200 μm et voyons ce que donne la variation de la vitesse linéaire (Tableau IV.05)

Tableau IV.05 : Valeurs des réponses en fonction de la variation simultanée de la vitesse linéaire et la vitesse d'incursion

Profondeur d'incursion = 1200 μm	Vitesse linéaire 153 m/s	Vitesse linéaire 275 m/s	Vitesse linéaire 397 m/s
Vitesse d'incursion = 100 $\mu\text{m/s}$	2561 μm	443 μm	-699 μm
Vitesse d'incursion = 300 $\mu\text{m/s}$	3107 μm	280 μm	-1571 μm
Vitesse d'incursion = 500 $\mu\text{m/s}$	2451 μm	-1085 μm	-3645 μm
Vitesse d'incursion = 700 $\mu\text{m/s}$	592 μm	-3652 μm	-6922 μm

Lorsque la profondeur d'incursion se fixe à 1200 μm , et pour le niveau bas de la vitesse linéaire (153 m/s), la variation de la vitesse d'incursion de son niveau bas (100 $\mu\text{m/s}$) vers son niveau haut fait diminuer l'usure de la valeur élevée de 2561 μm jusqu'à la valeur de 592 μm . Lorsque la vitesse linéaire est de 275 m/s, on enregistre deux comportements, le premier étant l'usure (443 μm ; 280 μm), le deuxième étant le transfert du dépôt abrasable (-1085 μm ; -3652 μm). Pour une vitesse linéaire de 397 m/s, on enregistre un grand transfert de matériau (-6922 μm) lorsque la vitesse d'incursion atteint 700 $\mu\text{m/s}$.

La ligne iso-réponse de valeur zéro (la non usure et le non transfert : cas idéal) ne peut se rencontrer que dans les 2 premiers cas, lorsque la vitesse linéaire est de 153 m/s pour les profondeurs d'incursion supérieures à 1000 μm et les vitesses d'incursion avoisinant 800 $\mu\text{m/s}$ ainsi que pour la vitesse linéaire de 275 m/s essentiellement lorsque la profondeur d'incursion dépasse 1000 μm et une vitesse d'incursion variant entre 310 $\mu\text{m/s}$ et 490 $\mu\text{m/s}$.

On peut en conclure, pour ce cas d'étude, que d'une façon globale l'augmentation simultanée de la profondeur d'incursion et de la vitesse d'incursion diminue l'usure voire même augmente le transfert du matériau du dépôt vers le bout de l'ailette.

b) Surfaces de réponse en fonction de vitesse linéaire et la vitesse d'incursion

On ne se contente pas seulement d'analyser les réponses en fonction de la variation de la profondeur d'incursion et de la vitesse d'incursion tout en gardant la vitesse linéaire fixe, mais nous faisons une étude similaire avec la méthodologie des surfaces de réponse et les iso-réponses en analysant la variation de la réponse en fonction de la vitesse linéaire et de la vitesse d'incursion (figure IV.15). Le paramètre qui est gardé constant cette fois-ci est le facteur profondeur d'incursion (289 μm ; 883,5 μm ; et 1478 μm).

En analysant les 3 graphes ci-dessous, nous remarquons que le changement de la profondeur d'incursion n'agit nullement sur la forme et l'allure des lignes et des surfaces de réponse. Elles restent donc similaires ; seules bien sûr les valeurs des réponses changent en fonction des valeurs des 2 facteurs qui agissent dessus. Nous comprenons par cela qu'il y a une différence entre les 3 cas lorsqu'il y a début de l'usure, début de transfert et surtout passage entre l'usure de l'ailette et transfert de matériau. L'iso-réponse de valeur "zéro" par exemple (Il en est de même pour les autres lignes) change de position dans le champ car les

valeurs des vitesses linéaires et des vitesses d'incursion donnant la valeur zéro de la réponse ne sont pas les mêmes dans les 3 cas.

Pour ce qui concerne la profondeur d'incursion de 289 μm , à une vitesse d'incursion de 100 $\mu\text{m/s}$, la valeur de l'usure de l'ailette est de 1708 μm , lorsque la vitesse linéaire est de 250 m/s ; l'augmentation de la vitesse d'incursion jusqu'à 500 $\mu\text{m/s}$ fait diminuer l'usure à 471 μm , et enfin à 700 $\mu\text{m/s}$, c'est plutôt le transfert dont la valeur vaut $-1951 \mu\text{m}$. Les valeurs avec les profondeurs d'incursion de 883,5 μm et 1478 μm sont portées directement sur le tableau IV.06 ; c'est le même comportement, il passe d'une usure vers un transfert.

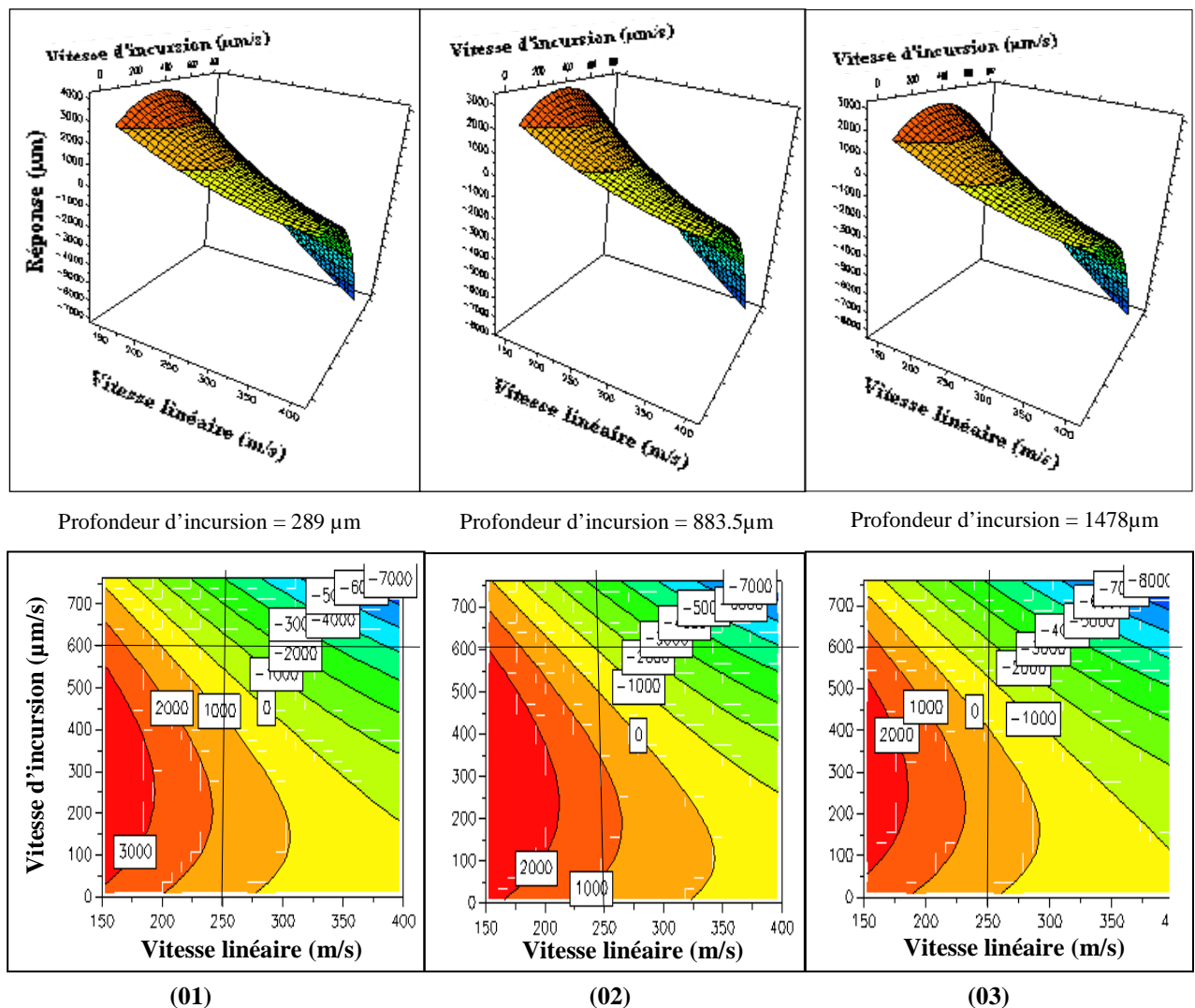


Figure IV.15 : Variation de la réponse en fonction simultanée de la vitesse linéaire et de la vitesse d'incursion

Donnons certaines valeurs d'interaction entre la profondeur d'incursion et la vitesse d'incursion dans le tableau IV.06 et remarquons que le transfert de matériau se fait pour les 3 cas de la profondeur d'incursion pour la vitesse d'incursion de 700 $\mu\text{m/s}$.

Tableau IV.06 : *Valeurs des réponses en fonction de la variation simultanée de la profondeur d'incursion et de la vitesse d'incursion*

Vitesse linéaire 250 m/s	Profondeur d'incursion 289 μm	Profondeur d'incursion 883,5 μm	Profondeur d'incursion 1478 μm
Vitesse d'incursion =100 $\mu\text{m/s}$	1708 μm	1114 μm	519 μm
Vitesse d'incursion =300 $\mu\text{m/s}$	1691 μm	1096 μm	502 μm
Vitesse d'incursion =500 $\mu\text{m/s}$	471 μm	-123 μm	-717 μm
Vitesse d'incursion =700 $\mu\text{m/s}$	-1951 μm	-2545 μm	-3140 μm

L'analyse verticale de la même iso surface (vitesse d'incursion à 600 $\mu\text{m/s}$) (Tableau IV.07) nous fournit la valeur de 2582 μm d'usure à 153 m/s, d'un transfert de -589 μm à 250 m/s, et d'un transfert de -2620 μm et -3769 μm à 325 m/s, et 375 m/s respectivement. Pour les deux autres cas, c'est-à-dire pour une profondeur de 883,5 μm et 1478 μm , il y a une parfaite similitude avec le premier, la seule différence c'est que, plus la profondeur d'incursion croît, plus le transfert de matériau prend d'autres valeurs plus grandes jusqu'au moment où il atteint -4958 μm . Regroupons tout cela dans un tableau :

Tableau IV.07 : *Valeurs des réponses en fonction de la variation simultanée de la profondeur d'incursion et de la vitesse linéaire*

Vitesse d'incursion 600 $\mu\text{m/s}$	Profondeur d'incursion 289 μm	Profondeur d'incursion 883,5 μm	Profondeur d'incursion 1478 μm
Vitesse linéaire =153 m/s	2582 μm	1988 μm	1393 μm
Vitesse linéaire =250 m/s	-589 μm	-1184 μm	-1778 μm
Vitesse linéaire =325 m/s	-2620 μm	-3214 μm	-3809 μm
Vitesse linéaire =375 m/s	-3769 μm	-4363 μm	-4958 μm

En conclusion pour cette partie d'analyse, on constate que l'usure diminue avec l'augmentation de la valeur de la vitesse d'incursion et la vitesse linéaire pour toutes valeurs de la profondeur d'incursion.

c) Surfaces de réponse en fonction de la profondeur d'incursion et la vitesse linéaire:

Similairement aux cas précédents, étudions maintenant la troisième combinaison entre les paramètres non étudiés qui restent en analysant les réponses du cas où la profondeur d'incursion et la vitesse linéaire sont variables tout en gardant la vitesse d'incursion constante. La figure (IV.16) présente la distribution des réponses sous forme de surfaces de réponse, et d'iso-réponses pour trois niveaux de la vitesse d'incursion : 2,5 $\mu\text{m/s}$; 381,25 $\mu\text{m/s}$; 760 $\mu\text{m/s}$. Les paramètres qui varient sont la profondeur d'incursion et la vitesse linéaire.

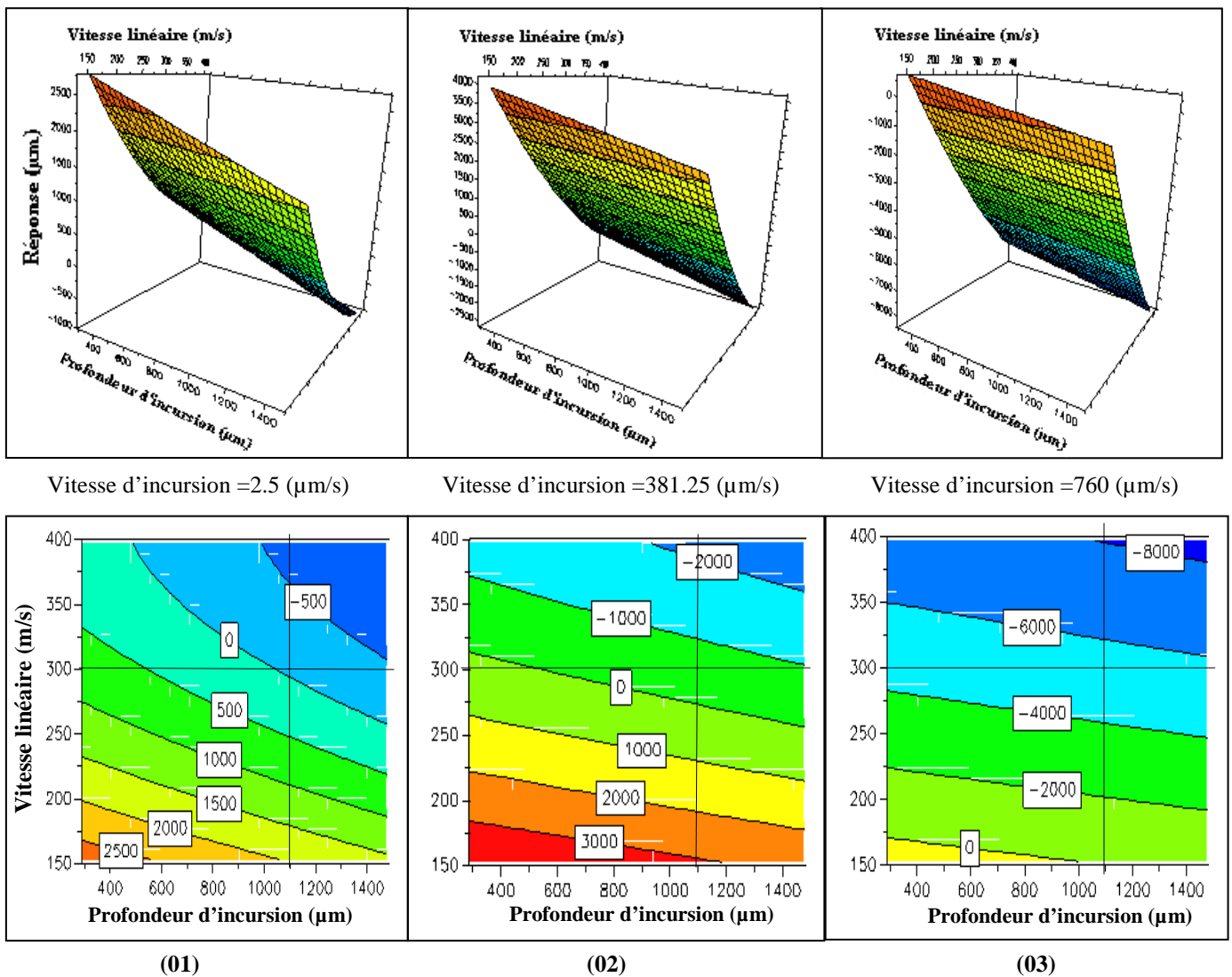


Figure IV.16 : Variation de la réponse en fonction de la vitesse linéaire et la profondeur d'incursion

Par l'analyse horizontale des iso-réponses (Tableau IV.08), nous remarquons que pour une vitesse linéaire fixée à 300 m/s, et pour une vitesse d'incursion égale à 2,5 $\mu\text{m/s}$, l'usure diminue de 468 μm à 203 μm lorsque la profondeur d'incursion augmente de 575 $\mu\text{m/s}$ à 840

μm ; le comportement passe vers un transfert avec l'augmentation de la profondeur d'incursion à $1100 \mu\text{m}$ puis passe de $-56 \mu\text{m}$ à $-256 \mu\text{m}$ lorsque la profondeur d'incursion atteint $1300 \mu\text{m}$.

La variation de la valeur de la vitesse d'incursion à $381,25 \mu\text{m/s}$, et à $760 \mu\text{m/s}$ provoque un grand écart au niveau des valeurs des réponses car on remarque dans cette intervalle de vitesses que les réponses prennent que le signe négatif, ce qui veut dire qu'un transfert de matériau vers le bout de l'ailette est engendré.

Ceci confirme la conclusion donnée précédemment ; il est clair que lorsque la vitesse d'incursion prend des grands niveaux du champ expérimental, le taux du transfert prend ces grandes valeurs. Ce n'est donc pas le facteur profondeur qui influe beaucoup plus, mais plutôt la vitesse d'incursion.

Tableau IV.08 : Réponses en fonction de la variation simultanée de la vitesse et la profondeur d'incursion

Vitesse linéaire = 300 m/s	Vitesse d'incursion $2,5 \mu\text{m/s}$	Vitesse d'incursion $381,25 \mu\text{m/s}$	Vitesse d'incursion $760 \mu\text{m/s}$
Profondeur d'incursion = $575 \mu\text{m}$	468 μm	-22 μm	-4825 μm
Profondeur d'incursion = $840 \mu\text{m}$	203 μm	-287 μm	-5090 μm
Profondeur d'incursion = $1100 \mu\text{m}$	-56 μm	-547 μm	-5350 μm
Profondeur d'incursion = $1300 \mu\text{m}$	-256 μm	-747 μm	-5550 μm

L'analyse verticale de la distribution des réponses (Tableau IV.09), montre que lorsque la profondeur d'incursion est de $1100 \mu\text{m}$, le comportement du processus a tendance à passer d'une usure vers un transfert avec l'augmentation de la vitesse linéaire.

A une vitesse d'incursion égale à $2,5 \mu\text{m/s}$, l'augmentation de la vitesse linéaire de 153 m/s à 375 m/s montre le passage d'une usure de $1959 \mu\text{m}$ à un transfert de $-539 \mu\text{m}$. La réponse prend la valeur nulle aux environs de 275 m/s .

Lorsque la vitesse linéaire se trouve entre 250 m/s et 325 m/s , il n'y a que le transfert de matériau et cela quelque soit la valeur de la vitesse d'incursion. Le transfert passe de $-258 \mu\text{m}$ à $7483 \mu\text{m}$ avec l'augmentation simultanée de la vitesse d'incursion et de la vitesse linéaire.

Tableau IV.09 : Valeurs des réponses en fonction de la variation simultanée de la vitesse d'incursion et la vitesse linéaire

Profondeur d'incursion = 1100 μm	Vitesse d'incursion 2,5 $\mu\text{m/s}$	Vitesse d'incursion 381,25 $\mu\text{m/s}$	Vitesse d'incursion 760 $\mu\text{m/s}$
Vitesse linéaire =153 m/s	1959 μm	3085 μm	-100 μm
Vitesse linéaire =250 m/s	470 μm	529 μm	-3723 μm
Vitesse linéaire =325 m/s	-258 μm	-1024 μm	-6102 μm
Vitesse linéaire =375 m/s	-539 μm	-1855 μm	-7483 μm

La plus grande valeur de transfert (-7483 μm), est enregistrée parallèlement avec les grandes valeurs de la vitesse linéaire, et d'incursion. A travers cette interprétation, on remarque que la vitesse linéaire et d'incursion influe d'une façon prépondérante sur le comportement par rapport à la profondeur d'incursion.

IV-3-6 Conclusion sur l'étude de l'usure du dépôt abrasable

Rappelons que le but essentiel de cette étude est de minimiser au maximum l'usure de l'ailette lorsqu'elle rentre en contact avec le matériau abrasable, puis d'essayer d'éviter le plus possible les grands transferts du matériau abrasable du dépôt vers l'ailette. Pour aboutir à cela, on a fait une analyse sur le comportement tout en combinant plusieurs cas. La complexité du phénomène est expliquée par le fait que les réponses peuvent prendre des grandes valeurs réparties sur le champ de variation des paramètres de fonctionnement. Dans certains cas, on a remarqué que chaque paramètre influe d'une façon direct sur le comportement lorsque les autres se fixent dans un niveau bien déterminé, alors qu'on a constaté par la suite qu'avec la combinaison des trois paramètres, qu'il y a toujours des facteurs qui prennent le dessus sur d'autres en changeant le comportement du phénomène. A partir de cette analyse, on peut conclure que les facteurs vitesse d'incursion et vitesse linéaire agissent sur le changement du comportement en passant d'une usure vers un transfert

IV-4 Etude de la texture du dépôt abrasable après friction avec l'ailette

Nous avons déjà constater au chapitre II que le matériau abrasable présente une structure poreuse pleines d'aspérités due au procédé d'élaboration ; le taux d'aspérités sur la

surface des matériaux abrasables est souvent mesuré par les constructeurs de turbines avant l'utilisation et après le fonctionnement dans l'étage dans lequel il est situé, car il nous permet de nous renseigner sur leur comportement.

Dans ce chapitre, nous étudions l'état de surface du matériau après que celui-ci est rentré en friction avec l'ailette afin de le relier avec l'étanchéité de ce joint abrasable dans le but de minimiser les fuites de gaz de combustion ou d'air du compresseur axial. Le principal objectif donc de cette partie est d'étudier l'impact du choix des différents paramètres de fonctionnement agissant sur la rugosité de surface de la trace d'usure obtenue. (IV.17).

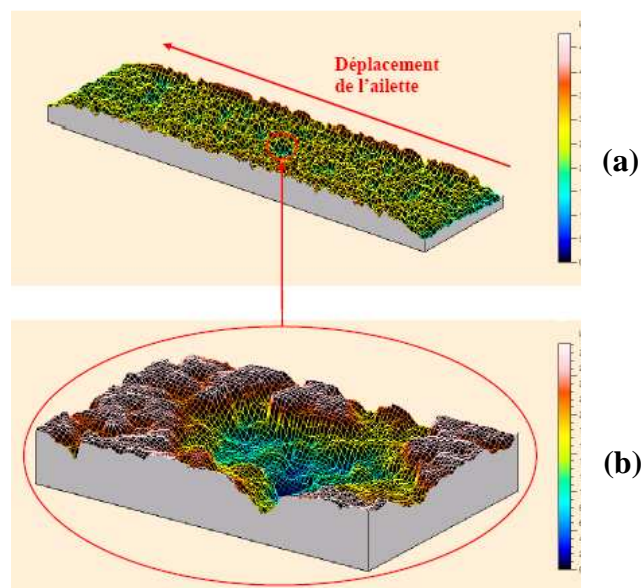


Figure IV.17 : *Cartographie en trois dimensions de la rugosité d'une trace d'usure*
(a) *Présentation de la rugosité de surface d'une trace d'usure laissée par l'ailette*
(b) *Agrandissement d'une partie de la rugosité de surface*

Sur cette surface, la rugosité obtenue par un rugosimètre à laser après double balayages en longueur puis en largeur de l'éprouvette, les hauteurs des crêtes et les profondeurs des vallons sont mesurées afin de définir certains paramètres qui caractérisent la rugosité.

Dans ce qui suit, on suit la même démarche utilisée dans la première partie de ce chapitre, sauf que cette fois-ci la réponse (rugosité) est modélisée en fonction des facteurs de déplacement de l'ailette par rapport au matériau.

IV.4.1 Description du paramètre de rugosité “ S_a ”

Les tests expérimentaux décrits auparavant ont permis de donner les valeurs de la réponse (usure ou transfert) obtenue lors du frottement du NiCrAl- BN avec la TiAlV6-4. Avec les mêmes valeurs des paramètres d’essais et avec les mêmes conditions des tests sur le même matériau, on mesure avec l’interféromètre à laser qui est piloté par ordinateur la valeur S_a (Figure IV.18). Cette valeur est affichée sur l’écran après que le logiciel de ce tribomètre à laser à 3 dimensions ait effectué les calculs d’après la formule IV.12.

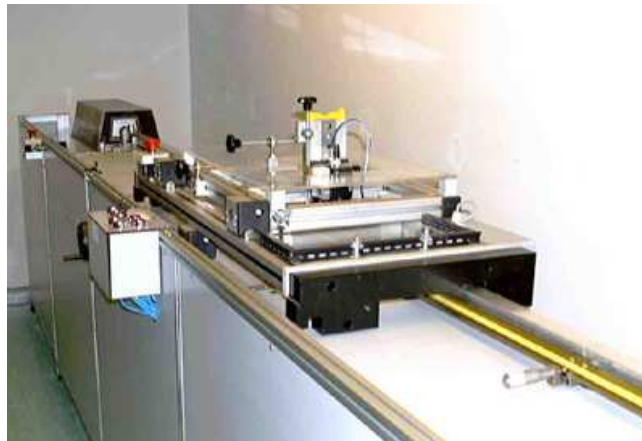


Figure IV.18 : *Présentation de l’interférométrie à laser*

On rappelle cependant brièvement que le paramètre de rugosité S_a représente la moyenne arithmétique des valeurs absolues des ordonnées des sommets des crêtes et des fonds des vallons par rapport à la ligne moyenne à l’intérieur d’une longueur de base dans les deux directions (x et y) comme montré sur la figure (IV.19). C’est l’équivalent de R_a connu dans la rugosité à 2 dimensions mesuré par un rugosimètre mécanique à contact par palpeur pour deux dimensions.

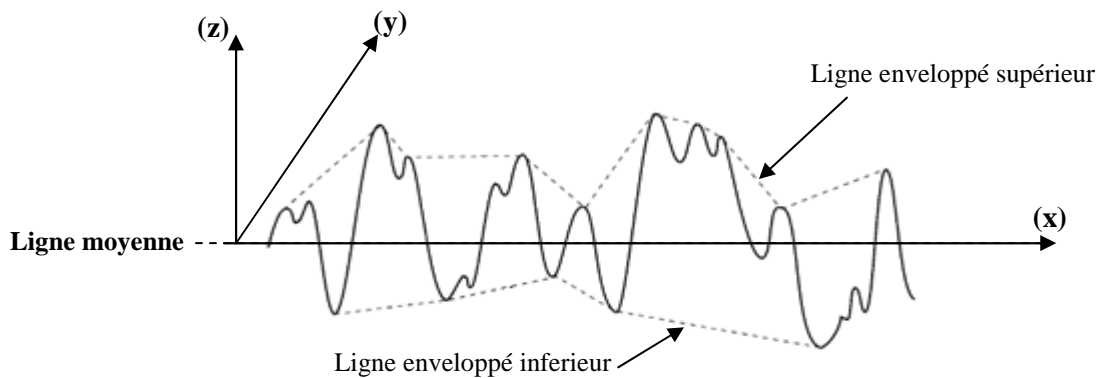


Figure IV.19 : *Présentation des directions de mesure du paramètre de rugosité S_a*

La formule théorique pour calculer le paramètre de rugosité S_a est donnée par :

$$S_a = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{X=0}^{N_x-1} \sum_{Y=0}^{N_y-1} |Z_{X,Y}| \quad (\text{IV.12})$$

Où :

- ✓ $|Z_{x,y}|$: Ecart entre l'altitude du point de coordonnées (x, y) et celle du plan moyen
- ✓ N_x : Nombre de points échantillonnés dans la direction x ;
- ✓ N_y : Nombre de points échantillonnés dans la direction y

Le domaine de variation des facteurs agissant sur S_a définis par les tests expérimentaux est représenté sur le tableau (IV.10) :

Tableau IV.10 : Valeurs de la rugosité S_a obtenue lors des tests expérimentaux

N°	Vitesse d'incursion ($\mu\text{m/s}$)	Vitesse linéaire (m/s)	Profondeur d'incursion (μm)	S_a (μm)
1	760	153	289	61,5
2	2,5	305	543	93,4
3	138	305	1478	25,4
4	760	153	822	41,9
5	138	305	1330	34,1
6	760	153	970	37,8
7	2,5	305	1000	40,9
8	760	153	594	48,3
9	500	250	379	115,4
10	100	397	525	37,2
11	10	397	475	34,3
12	100	397	525	37,3
13	10	397	525	26

IV.4.2 Modélisation de la rugosité avec la méthode des plans d'expériences

La stratégie de modélisation et d'optimisation utilisée pour cette seconde partie est similaire à celle employée dans l'application précédente ; la réponse étant cette fois-ci S_a .

Tableau IV.03 : Matrice d'expériences associée

N°	V _{inc}	V _{lin}	Pro	V _{inc} *V _{lin}	V _{inc} *Pro	V _{lin} *Pro	V _{inc} ²	V _{lin} ²	Pro ²
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
2	-1	0,245	-0,573	-0,245	0,572	-0,14	1	0,06	0,328
3	-0,642	0,245	1	-0,157	-0,642	0,245	0,412	0,06	1
4	1	-1	-0,103	-1	-0,103	0,103	1	1	0,01
5	-0,642	0,245	0,751	-0,157	-0,482	0,184	0,412	0,06	0,564
6	1	-1	0,145	-1	0,145	-0,145	1	1	0,021
7	-1	0,245	0,196	-0,245	-0,195	0,048	1	0,06	0,038
8	1	-1	-0,487	-1	-0,486	0,486	1	1	0,237
9	0,313	-0,204	-0,849	-0,064	-0,266	0,173	0,098	0,041	0,72
10	-0,742	1	-0,603	-0,742	0,447	-0,603	0,551	1	0,363
11	-0,98	1	-0,687	-0,98	0,673	-0,687	0,96	1	0,472
12	-0,742	1	-0,603	-0,742	0,447	-0,603	0,551	1	0,363
13	-0,98	1	-0,603	-0,98	0,591	-0,603	0,96	1	0,363

Avec :

V_{inc} : Représente la vitesse d'incursion ;

V_{lin} : Représente la vitesse de rotation ;

Pro : Représente la profondeur d'incursion.

Le choix d'un modèle de degré 2 pour les cas d'étude précédents nous à donné la possibilité d'utiliser les interactions des 3 facteurs ; nous allons utiliser la même forme de modèle pour décrire la réponse S_a mesurée dans cette partie d'analyse. On note aussi ici que le calcul des coefficients du polynôme modélisateur n'est pas présent dans cette partie ; le lecteur pourra voir les détails du calcul dans la partie annexe (Annexe B). La relation mathématique reliant la réponse rugosité S_a avec les variables est la suivante :

$$y = 84,92 - 58,46x_1 - 90,57x_2 - 43,15x_3 - 2,60x_1x_2 + 17,15x_1x_3 - 14,97x_2x_3 - 68,04x_1^2 - 11,65x_2^2 + 10,9x_3^2 \quad (\text{IV.13})$$

Où :

- x₁ : Représente le facteur vitesse d'incursion ;
- x₂ : Représente le facteur vitesse linéaire ;
- x₃ : Représente le facteur profondeur d'incursion ;
- y : Représente la valeur observée de la rugosité S_a

a) Qualités du modèle :

La validité du modèle est assurée par les deux critères suivants :

*** Qualité descriptive du modèle :**

Le calcul du coefficient de qualité descriptive a donné :

$$R_{ajusté}^2 = 0,99 \quad (IV.14)$$

Une valeur du coefficient de qualité descriptive ajusté étant proche de 1, cela signifie que la qualité descriptive du modèle est satisfaisante pour décrire la rugosité S_a .

*** Qualité prédictive du modèle :**

Concernant la qualité prédictive du modèle le calcul a donné :

$$Q^2 = 0,86 \quad (IV.15)$$

Là aussi, plus la valeur du coefficient de la qualité prédictive Q^2 est proche de 1, plus la qualité prédictive du modèle est satisfaisante.

Ces estimateurs calculés sur la qualité du modèle montrent que notre modèle est acceptable, non seulement il décrit convenablement le phénomène physique de la rugosité mais aussi prédit des valeurs de la réponse sans avoir à effectuer d'autres expériences.

IV.4.3 Effet séparé de facteurs sur la distribution des réponses

Expérimentalement, et comme déjà vu dans les paragraphes précédents ; la séparation des facteurs afin de visualiser l'effet de chacun d'eux sur la distribution des réponses donne la possibilité d'analyser l'action de chacun d'eux. Dans ce qui suit, on utilise le même raisonnement effectué auparavant facteur par facteur.

a) Illustration de la variation des réponses en fonction de la vitesse d'incursion

En utilisant le modèle mathématique IV.13, nous pouvons estimer l'effet du paramètre x_1 en éliminant x_2 et x_3 , cela revient à leur donner une valeur réelle moyenne qui correspond à une valeur codée égale à zéro.

Le modèle mathématique IV.13 prend alors la forme suivante :

$$y_1 = 84,92 - 58,46x_1 - 68,04x_1^2 \quad (\text{IV.16})$$

Les figures ci-dessous représentent la distribution de la réponse en fonction de la vitesse d'incursion. La figure IV.20 illustre la réponse en fonction des valeurs codées de la vitesse d'incursion. Pour une meilleure interprétation des résultats et pour faciliter l'analyse, la figure IV.21 illustre la même variation sauf que cette fois-ci elle est tracée avec des valeurs réelles de la vitesse d'incursion en utilisant le logiciel MODDE 6.0.

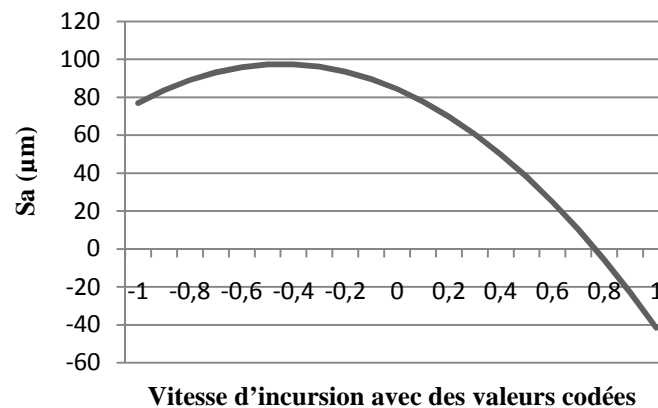


Figure IV.20 : Variation de la rugosité S_a en fonction des valeurs codées de la vitesse d'incursion

Cette courbe fournit trois informations intéressantes :

- ✓ La première, la rugosité (75,43 μm) s'enregistre lorsque la vitesse d'incursion se situe à son niveau bas (2,5 $\mu\text{m/s}$) ;
- ✓ La deuxième, l'évolution de S_a jusqu'à atteindre le maximum de 97,47 μm lorsque la vitesse est de 220 $\mu\text{m/s}$;
- ✓ La dernière est que l'augmentation de la vitesse d'incursion fait diminuer la rugosité jusqu'au moment où il s'annule lorsque la vitesse d'incursion atteint 664 $\mu\text{m/s}$.

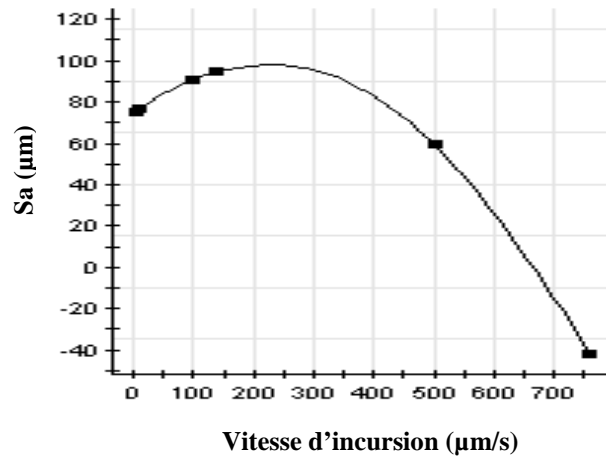


Figure IV.21 : Variation de la rugosité S_a en fonction de la vitesse d'incursion

A une vitesse de 664 $\mu\text{m/s}$, la rugosité s'annule, cela signifie qu'au niveau de ce point la ligne moyenne de la rugosité passe par ce point.

On note ici, et de même pour les autres cas qui suivent, que les réponses peuvent être négatives théoriquement puisqu'elles dérivent du modèle mathématique ; cependant ils n'ont aucune signification physique ; la rugosité ne pouvant pas être négative. Elles sont donc rejetées comme réponse à étudier ou à traiter. Le raisonnement porte donc que sur les valeurs positives de S_a . Ce sont dans cette situation les signes négatifs des termes du modèle qui prédominent sur les termes positifs, cela donne donc des valeurs de "y" négatives.

b) Illustration de la variation des réponses en fonction de la vitesse linéaire

Compte tenu qu'on fixe la profondeur d'incursion et la vitesse d'incursion à leurs valeurs intermédiaires moyennes (883,5 μm , et 381,25 $\mu\text{m/s}$ respectivement), on varie la vitesse linéaire pour analyser l'effet séparé de cette dernière. Après avoir donné la valeur codée de zéro à x_1 et x_3 , le modèle mathématique IV.13 prend la forme suivante :

$$y_2 = 84,92 - 90,57x_2 - 11,65x_2^2 \quad (\text{IV.17})$$

On présente graphiquement cette équation de deux manières différentes comme cela a été fait pour le cas précédent, l'une avec des valeurs codées de la vitesse linéaire (Figure IV.22), et l'autre avec les valeurs réelles. (Figure IV.23).

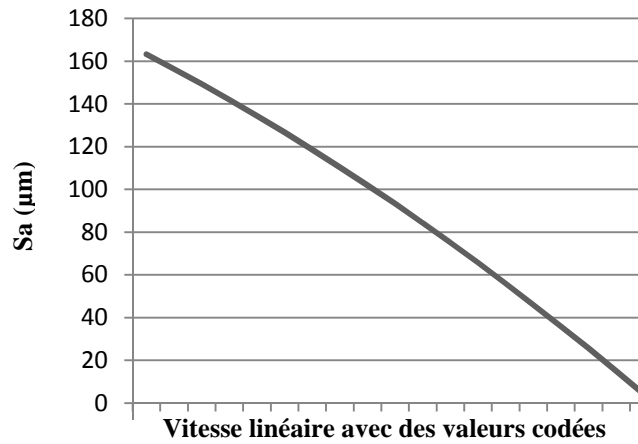


Figure IV.22 : *Variation de la rugosité S_a en fonction des valeurs codées de la vitesse linéaire*

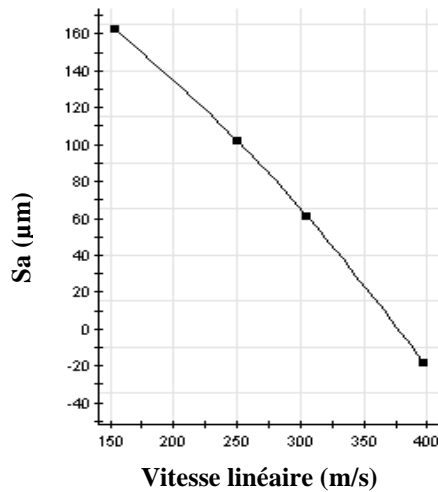


Figure IV.23 : *Variation de la rugosité S_a en fonction de la vitesse linéaire réelle*

La rugosité est plus intense avec des valeurs de vitesse linéaire basses, elle se situe à 163,8 μm . Ensuite, plus la vitesse linéaire augmente, plus la rugosité diminue. On enregistre ici une rugosité nulle lorsque la vitesse linéaire atteint 376 m/s.

c) Illustration de la variation des réponses en fonction de la profondeur d'incursion

Concernant la formule IV.18 à simple influence de la variation du paramètre profondeur d'incursion sur la rugosité S_a , la vitesse d'incursion a été fixée sur sa valeur intermédiaire moyenne (381,25 $\mu\text{m/s}$, ce qui est équivalent à zéro pour les valeurs codées), et de même pour la vitesse linéaire fixée à 275 m/s (zéro en valeur codée).

$$y_3 = 84,92 - 43,15x_3 + 10,9x_3^2 \quad (\text{IV.18})$$

Là aussi, on présente la variation de la réponse en fonction des valeurs codées de la profondeur d'incursion (Figure IV.24), et en fonction des valeurs réelles (Figure IV.25).

Le comportement est déjà observé dans la section précédente, plus la valeur de la profondeur d'incursion est élevée plus la rugosité S_a est faible comme montré sur la figure (IV.24, sauf que cette fois-ci la diminution de la réponse est de moindre valeur.

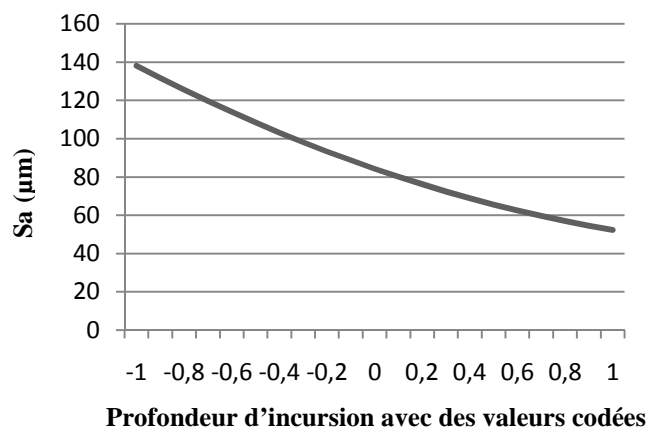


Figure IV.24 : Variation de la rugosité S_a en fonction des valeurs codées de la profondeur d'incursion

Nous remarquons sur ce graphe que quelque soient les valeurs codées de la profondeur d'incursion, le paramètre S_a qui caractérise la rugosité reste positif donc ayant une signification physique.

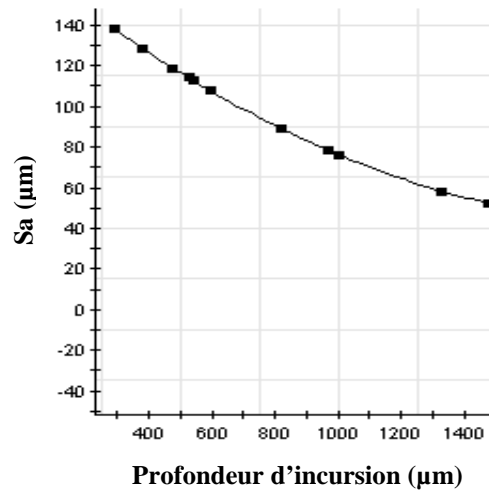


Figure IV.25 : Variation de la rugosité S_a en fonction de la profondeur réelle d'incursion

La valeur maximale de la rugosité S_a (138,93 μm) est enregistrée au minimum de la profondeur d'incursion ; S_a diminue progressivement suivant la loi IV.18 jusqu'à atteindre 52,63 μm lorsque la profondeur atteint son maximum.

En conclusion, la remarque retenue pour ces trois cas précédents est que la rugosité diminue avec l'augmentation des valeurs de chaque paramètre étudié séparément en gardant les autres constants.

IV.4.4 Effet de variation d'un paramètre combiné aux valeurs extrêmes d'un deuxième

Dans cette partie, le même principe de raisonnement des cas précédents pour la l'analyse des résultats est suivi ; les réponses (rugosité S_a) en fonction de la variation d'un paramètre dans son domaine d'étude en donnant des valeurs constantes, l'une maximale et l'autre minimale au deuxième paramètre est alors obtenue ; le troisième possède sa valeur codée égale à zéro.

a) Effet de la vitesse d'incursion combinée avec les valeurs extrêmes de la vitesse linéaire

Pour ce premier cas d'analyse des réponses, le paramètre profondeur d'incursion se fixe à son niveau intermédiaire moyen ($x_3=0$), ce qui ramène à écrire le modèle mathématique IV.13 sous la forme suivante :

$$y_{12} = 84,92 - 58,46x_1 - 90,57x_2 - 2,60x_1x_2 - 68,04x_1^2 - 11,65x_2^2 \quad (\text{IV.19})$$

La figure IV.26 illustre la variation des réponses (rugosité S_a) selon le formule mathématique IV.19. Le premier graphe (en noir) montre les valeurs de la rugosité aux différents points montrés en fonction de la vitesse d'incursion lorsque la vitesse linéaire se situe à son niveau bas (153 m/s), par contre le deuxième (en rouge) illustre la valeur de S_a aux 5 points lorsque la vitesse linéaire se situe à son maximum (397 m/s). Les droites entre les points montrent encore une fois seulement l'ascendance ou la descendance (inclinaison) entre les points voisins.

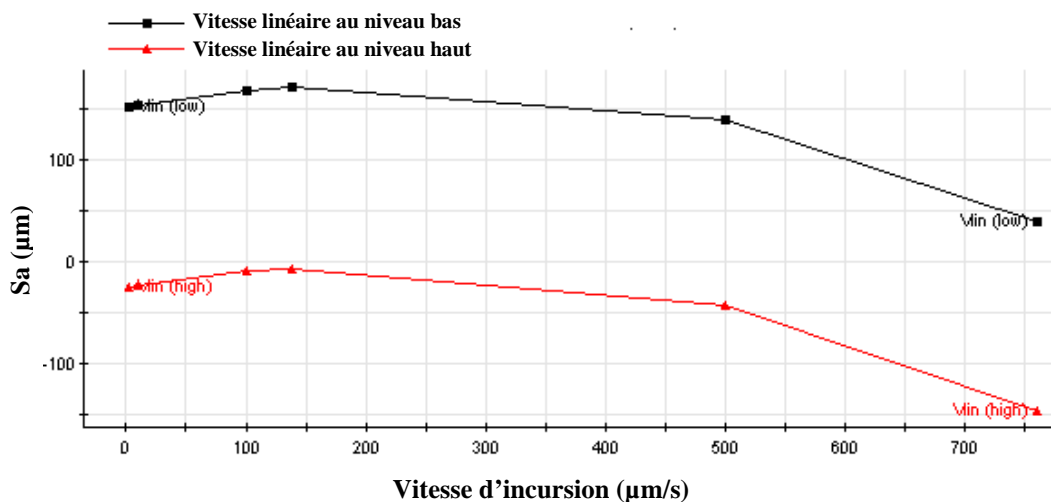


Figure IV.26 : Effet combiné de la vitesse linéaire constante, et de la vitesse d'incursion

L'illustration graphique de la figure IV.26 montre clairement que pour les valeurs de haut niveau de la vitesse linéaire, toutes les valeurs de S_a demeurent négatives ; il est évident que ce ne sont que des valeurs théoriques obtenues par calculs à partir du modèle. Elles sont donc rejetées physiquement car la rugosité ne peut être que positive.

Concernant maintenant l'interprétation physique proprement dite de la courbe supérieure, on observe que la rugosité est élevée (151,75 μm) au niveau bas de la vitesse d'incursion (2,5 $\mu\text{m/s}$) ; l'augmentation de cette vitesse jusqu'à 240 $\mu\text{m/s}$ provoque

l'augmentation de la rugosité jusqu'à 175,2 μm . Au-delà de 240 $\mu\text{m/s}$ la rugosité diminue au fur et à mesure avec l'augmentation de la vitesse d'incursion ; on enregistre ici une rugosité égale à 39,93 μm pour une vitesse de 760 $\mu\text{m/s}$.

b) Effet de la vitesse d'incursion combinée aux valeurs extrêmes de la profondeur d'incursion

Faisons maintenant varier la vitesse d'incursion, mais cette fois-ci en combinant cette variation avec les valeurs extrêmes de la profondeur d'incursion (289 μm et 1478 μm) afin de visualiser la variation de la rugosité S_a . Par analogie de raisonnement aux cas précédents, le paramètre vitesse linéaire est fixé à son niveau moyen ($x_2 = 0$), ce qui ramène le modèle mathématique IV.13 à se réécrire sous la forme suivante :

$$y_{13} = 84,92 - 58,46x_1 - 43,15x_3 + 17,15x_1x_3 - 68,04x_1^2 + 10,9x_3^2 \quad (\text{IV.20})$$

La Figure IV.27 représente la distribution des réponses de la rugosité S_a en fonction de la variation de la vitesse d'incursion selon le modèle mathématique IV.20. Cette distribution se fait de deux manières différentes, l'une avec le niveau bas de la profondeur d'incursion et l'autre avec le niveau haut de ce même paramètre.

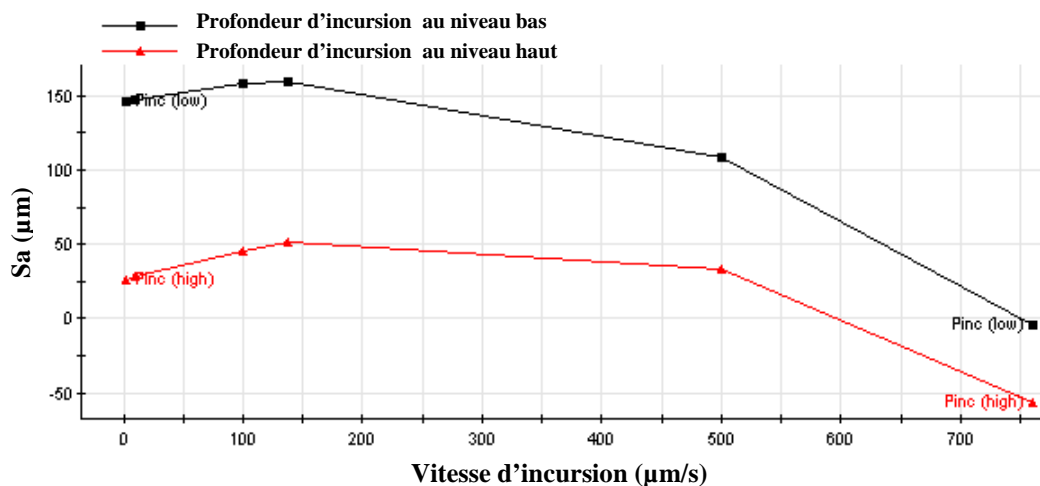


Figure IV.27 : Effet combiné de la profondeur d'incursion constante, et de la vitesse d'incursion

Similairement au cas précédent, on remarque sur la figure IV.27 que la rugosité commence à augmenter dès les premières augmentations de la vitesse d'incursion, et à un certain niveau, la rugosité marque son maximum et commence à diminuer progressivement avec l'augmentation de la vitesse d'incursion. Il est bien de faire remarquer que le maximum de la rugosité est enregistré à une vitesse d'incursion égale à 200 $\mu\text{m/s}$.

Lorsque la profondeur d'incursion se situe à son niveau bas, la rugosité prend un maximum égal à 222,27 μm , par contre au niveau haut de la profondeur, le maximum de la rugosité diminue à 150 μm . Au-delà de 200 $\mu\text{m/s}$, la rugosité diminue progressivement pour les deux cas (bas et haut de la profondeur d'incursion) lorsque la vitesse d'incursion atteint 746 $\mu\text{m/s}$.

A travers cette interprétation, et contrairement au cas précédent, on constate que pour le niveau haut de la profondeur d'incursion, les valeurs négatives sans signification physique ne sont atteintes qu'à partir de 600 $\mu\text{m/s}$. Ici aussi l'augmentation de la vitesse d'incursion pour les 2 niveaux de la profondeur d'incursion diminue la rugosité essentiellement à 200 $\mu\text{m/s}$.

c) Effet de vitesse linéaire combinée aux valeurs extrêmes de la profondeur d'incursion :

Après avoir fixé la profondeur d'incursion et la vitesse linéaire pour analyser l'effet simultané sur la variation de la réponse, il nous reste maintenant à fixer la vitesse d'incursion à son niveau intermédiaire moyen (valeur codée $x_1 = 0$), ce qui ramène le modèle mathématique IV.13 à la forme suivante :

$$y_{23} = 84,92 - 90,57x_2 - 43,15x_3 - 14,97x_2x_3 - 11,65x_2^2 + 10,9x_3^2 \quad (\text{IV.21})$$

Grace à l'expression IV.21, calculons la rugosité pour 4 points différents du champ de la vitesse linéaire en combinant ces valeurs avec les valeurs extrêmes de la profondeur d'incursion (niveau bas et niveau haut).(Figure IV.28).

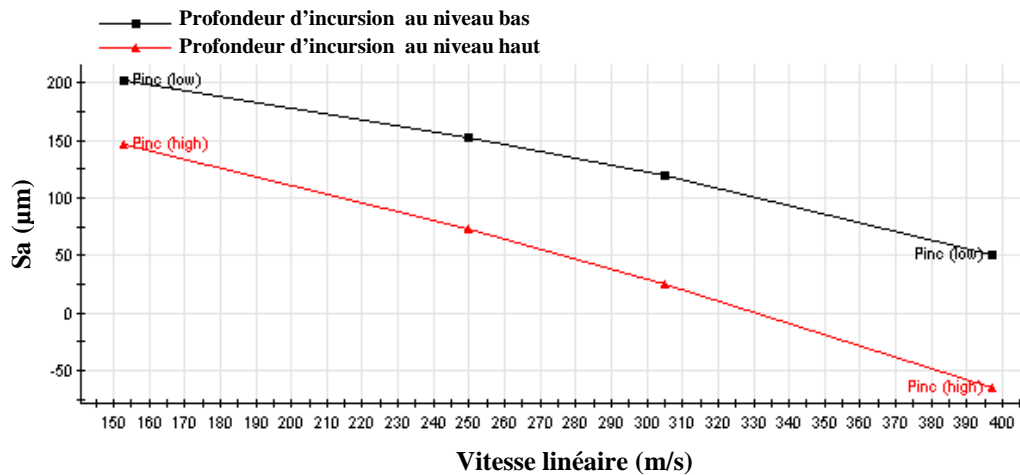


Figure IV.28 : Effet combiné de la profondeur d'incursion constante et de la vitesse linéaire

La Figure (IV.28) montre deux comportements de la réponse, ils sont similaires du côté variation, mais bien entendu différents du côté valeurs, l'augmentation de la vitesse linéaire fait diminuer la rugosité S_a jusqu'au moment où elle s'annule et prend des valeurs théoriques négatives essentiellement pour le niveau haut de la profondeur d'incursion. Pour les deux cas de la profondeur d'incursion, la rugosité n'augmente pas d'abord pour les petites valeurs de la vitesse linéaire comme précédemment, mais diminue d'un point à un autre sur tout le champ de la variation de la vitesse linéaire. La rugosité prend ses maximums lorsque la vitesse linéaire se situe à son niveau bas de 207,97 μm pour le cas du niveau bas de la profondeur d'incursion et de 117,34 μm pour le cas du niveau haut de la profondeur d'incursion.

Donc, on peut dire que l'augmentation du facteur vitesse linéaire dans l'expression mathématique améliore l'état de surface du matériau abrasable quelque soit le niveau de la profondeur d'incursion et cela en diminuant S_a .

IV.4.5 Surfaces de réponse

Dans cette dernière section d'analyse de la rugosité S_a , des surfaces de réponse et des lignes iso-réponses sont élaborées à partir du modèle mathématique IV.13. Ces graphes nous permettront de connaître la valeur de la rugosité quelque soient les coordonnées des facteurs. Cela nous donne la possibilité de détailler les résultats obtenus en observant la variation de la rugosité relativement aux données des trois facteurs des tests expérimentaux.

a) Surface de réponse en fonction de la profondeur d'incursion et de la vitesse linéaire:

Dans un premier temps, nous allons utiliser le modèle mathématique global IV.13 pour réaliser trois surfaces de réponse et trois iso-réponses avec 3 niveaux de la vitesse d'incursion (Basse, moyenne et haute). La réponse S_a sous forme de surfaces et de leur projection (Iso-réponses) sont obtenues en variant deux paramètres (Profondeur d'incursion, et vitesse linéaire) (Figure IV.29)

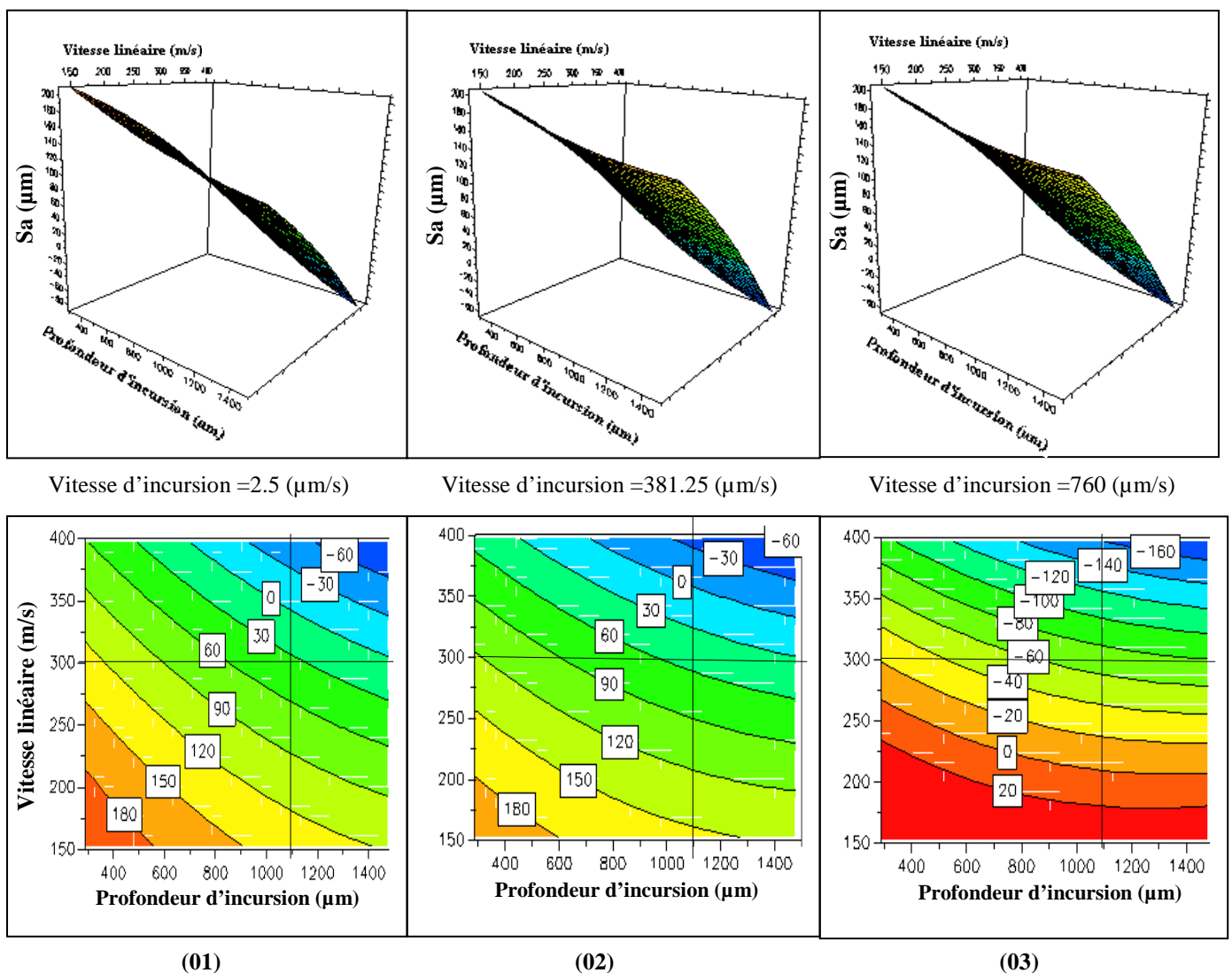


Figure IV.29 : Variation de la rugosité S_a en fonction de la profondeur d'incursion et la vitesse linéaire

Les trois surfaces de réponse présentées sur la figure IV.29 montrent du côté forme et allure trois comportements identiques, mais différents bien entendu du côté valeurs numériques des résultats de la rugosité obtenus lorsque la vitesse d'incursion passe de 2,5 $\mu\text{m/s}$ à 381,25 $\mu\text{m/s}$ puis à 760 $\mu\text{m/s}$. Nous nous sommes intéressés à détecter les intervalles des paramètres pour lesquels la rugosité prend des valeurs hautes ainsi que les intervalles qui permettent d'avoir des surfaces de fonctionnement dont la rugosité tend à s'annuler. Pour une meilleure interprétation des résultats obtenus, analysons horizontalement les iso-réponses. (Tableau IV.11).

Tableau IV.11 : Réponses en fonction de la variation combinée de la vitesse d'incursion et la profondeur d'incursion

Vitesse linéaire = 300 m/s	Vitesse d'incursion 2,5 $\mu\text{m/s}$	Vitesse d'incursion 381,25 $\mu\text{m/s}$	Vitesse d'incursion 760 $\mu\text{m/s}$
Profondeur d'incursion = 575 μm	92 μm	92 μm	-43 μm
Profondeur d'incursion = 840 μm	61 μm	69 μm	-58 μm
Profondeur d'incursion = 1100 μm	35 μm	50 μm	-70 μm
Profondeur d'incursion = 1300 μm	17 μm	38 μm	-76 μm

Lorsque la vitesse linéaire se fixe à 300 m/s et que la vitesse d'incursion à 2,5 $\mu\text{m/s}$, la rugosité diminue de 92 μm à 17 μm lorsqu'on augmente la profondeur d'incursion de 575 μm à 1300 μm ; par contre la diminution est moins accentuée lorsqu'on passe à une vitesse d'incursion supérieure à la première, telle 381,25 $\mu\text{m/s}$. La rugosité diminue seulement jusqu'à 38 μm . L'augmentation de la vitesse d'incursion jusqu'à son maximum (760 $\mu\text{m/s}$) inverse les signes des valeurs ; on passe alors aux valeurs théoriques négatives de la rugosité qui ne correspondent pas à la réalité, elles sont donc rejetées comme solution.

Faisons maintenant une analyse verticale des iso-réponses en prenant comme exemple une profondeur d'incursion constante de 1100 μm et voyons ce que donne la variation de la vitesse linéaire (Tableau IV.12).

a) Lorsque la vitesse d'incursion est de 2,5 $\mu\text{m/s}$, on enregistre d'abord une rugosité très élevée de 136 μm à la vitesse linéaire de 100 m/s, une diminution jusqu'à 73 μm à la vitesse linéaire de 250 m/s, puis une autre réduction jusqu'à 14 μm à 325 m/s.

b) Lorsque la vitesse d'incursion est de 381,25 $\mu\text{m/s}$, on enregistre une rugosité élevée par rapport au cas précédent de 154 μm à la vitesse linéaire de 153 m/s, elle diminue à 89 μm

à 250 m/s, puis à 29 μm à la vitesse linéaire de 325 m/s. Au delà on passe vers des valeurs de signe négatif.

c) Lorsque la vitesse d'incursion est de 760 $\mu\text{m/s}$, on enregistre une rugosité égale à 37 μm à une vitesse linéaire de 153 m/s, ce qui veut dire que la rugosité a diminué par rapport au deux cas précédents de la vitesse d'incursion.

Tableau IV.12 : Valeurs des réponses en fonction de la variation combinée de la vitesse d'incursion et la vitesse linéaire

Profondeur d'incursion = 1100 μm	Vitesse d'incursion 2,5 $\mu\text{m/s}$	Vitesse d'incursion 381,25 $\mu\text{m/s}$	Vitesse d'incursion 760 $\mu\text{m/s}$
Vitesse linéaire =153 m/s	136 μm	154 μm	37 μm
Vitesse linéaire =250 m/s	73 μm	89 μm	-29 μm
Vitesse linéaire =325 m/s	14 μm	29 μm	-91 μm
Vitesse linéaire =375 m/s	-29 μm	-15 μm	-138 μm

A travers ces deux analyses (verticale et horizontale) effectuées sur les iso-réponses, on peut dire que la vitesse d'incursion agit considérablement sur le comportement, les valeurs maximales de la rugosité sont atteintes à une vitesse d'incursion de 381,25 $\mu\text{m/s}$. Une vitesse linéaire basse de 153 m/s combinée à la vitesse d'incursion citée engendre une rugosité de 154 μm .

b) Surfaces de réponse en fonction de la vitesse linéaire et la vitesse d'incursion

Cette fois-ci nous varions la vitesse linéaire et la vitesse d'incursion pour tracer les courbes de surfaces et les iso-réponses pour trois valeurs de profondeurs d'incursion à savoir 289 μm , 883,5 μm et 1478 μm comme montré sur la figure (IV.30)

Les surfaces de réponses obtenues sont sensiblement identiques dans les trois cas, c'est ce qui démontre un même comportement pour les trois valeurs de profondeur d'incursion.

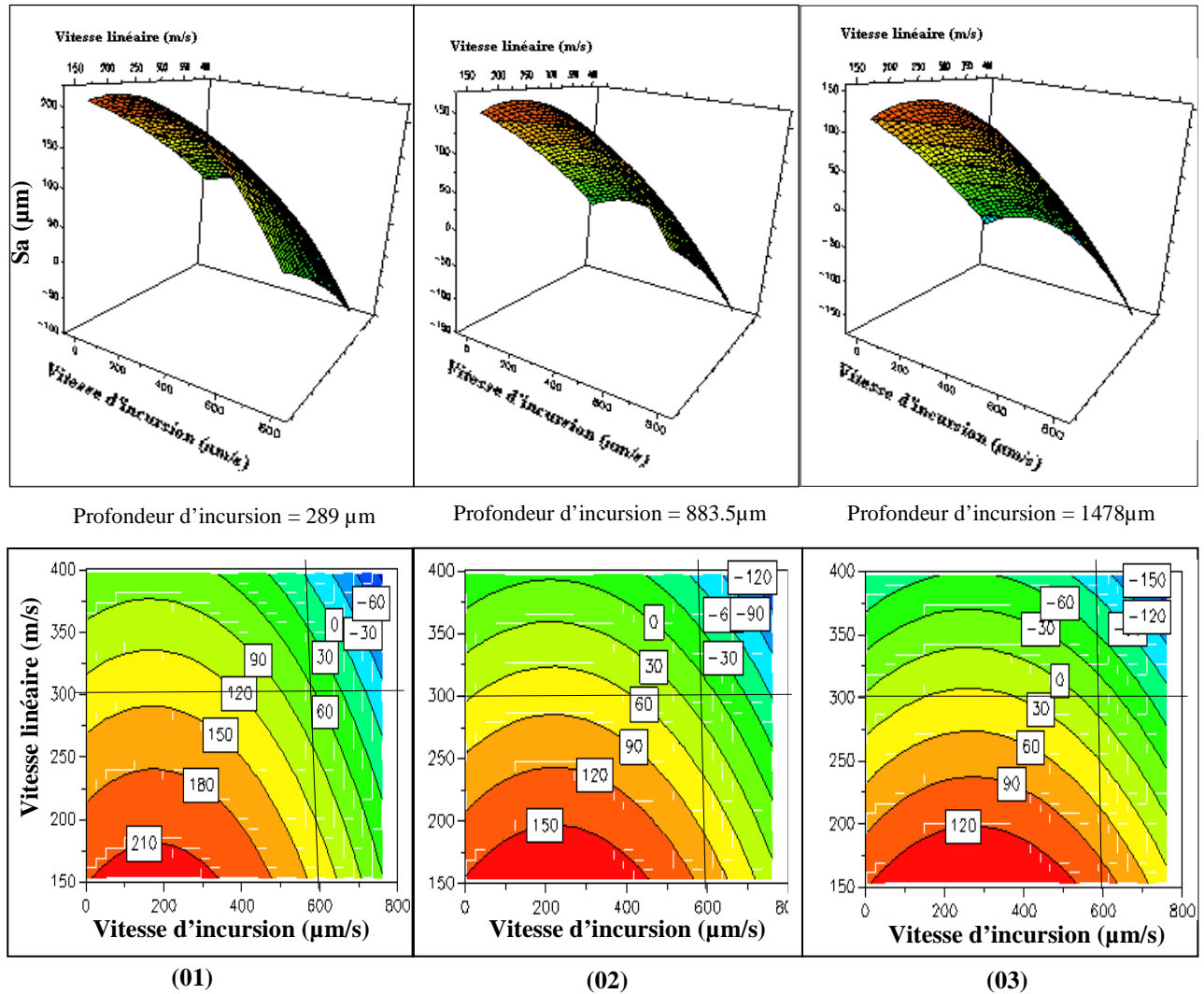


Figure IV.30 : Variation de la rugosité S_a en fonction de la vitesse d'incursion et la vitesse linéaire

Nous adoptons ici le même raisonnement que dans les cas précédents ; comme vitesse linéaire conservons toujours 300 m/s pour l'analyse horizontale des iso surfaces, et comme vitesse d'incursion prenons 600 µm/s pour l'analyse verticale des iso surfaces (Tableau IV.14). Pour ce qui concerne la profondeur d'incursion de 289 µm, à une vitesse d'incursion de 100 µm/s, la valeur de la rugosité est de 142 µm, à 300 µm/s, elle diminue sensiblement à 136 µm, à 500 µm /s, la rugosité diminue à 92 µm, et enfin à 700 µm/s elle chute à 10 µm. En ce qui concerne la profondeur d'incursion de 883,5 µm, à une vitesse de 100 µm/s la rugosité est de 72 µm, à 300 µm/s on enregistre une légère augmentation jusqu'à 75 µm ; au-delà de cette vitesse jusqu'à 500 µm/s, la rugosité diminue à nouveau jusqu'à 40 µm. Lorsque la profondeur d'incursion atteint 1478 µm, on enregistre le même comportement que le cas

précédent de la profondeur, sauf que cette fois-ci avec des valeurs différentes de S_a . Les valeurs sont portées directement sur le tableau IV.13.

Tableau IV.13 : Valeurs des réponses en fonction de la variation simultanée de la profondeur et de la vitesse d'incursion

Vitesse linéaire 300 m/s	Profondeur d'incursion 289 μm	Profondeur d'incursion 883,5 μm	Profondeur d'incursion 1478 μm
Vitesse d'incursion =100 $\mu\text{m/s}$	142 μm	72 μm	24 μm
Vitesse d'incursion =300 $\mu\text{m/s}$	136 μm	75 μm	36 μm
Vitesse d'incursion =500 $\mu\text{m/s}$	92 μm	40 μm	10 μm
Vitesse d'incursion =700 $\mu\text{m/s}$	10 μm	-31 μm	-52 μm

L'analyse verticale de la même iso surface (profondeur 525 μm) (tableau IV.14) nous fournit la valeur de 138 μm de rugosité à 153 m/s, 87 μm à 250 m/s, et une autre diminution jusqu'à 39 μm à 325 m/s, et finalement une approche de zéro (1 μm) à 375 m/s. Pour les deux autres cas, c'est-à-dire pour une profondeur de 883,5 μm et 1478 μm , il y a une parfaite similitude avec le premier, à la différence que, plus la profondeur d'incursion croît, plus la rugosité diminue sur ces valeurs pour chaque cas de la vitesse linéaire.

Tableau IV.14 : Valeurs des réponses en fonction de la variation simultanée de la profondeur d'incursion et de la vitesse linéaire

Vitesse d'incursion 600 $\mu\text{m/s}$	Profondeur d'incursion 289 μm	Profondeur d'incursion 883,5 μm	Profondeur d'incursion 1478 μm
Vitesse linéaire =153 m/s	138 μm	108 μm	101 μm
Vitesse linéaire =250 m/s	87 μm	46 μm	27 μm
Vitesse linéaire =325 m/s	39 μm	-11 μm	-39 μm
Vitesse linéaire =375 m/s	1 μm	-54 μm	-89 μm

En conclusion pour ces deux cas d'études, pour toutes valeurs de la profondeur d'incursion, l'augmentation de la vitesse linéaire et de la vitesse d'incursion simultanément diminue le paramètre S_a définissant de rugosité de la surface du matériau abradable.

c) Surfaces de réponse en fonction simultanée de la profondeur d'incursion et de la vitesse d'incursion :

Analysons maintenant le dernier cas qui reste. Cette fois-ci nous varions simultanément la profondeur d'incursion et la vitesse d'incursion pour tracer les surfaces et les iso-réponses pour trois valeurs de la vitesse linéaire à savoir 153 m/s, 275 m/s et 397 m/s. (Figure IV.31)

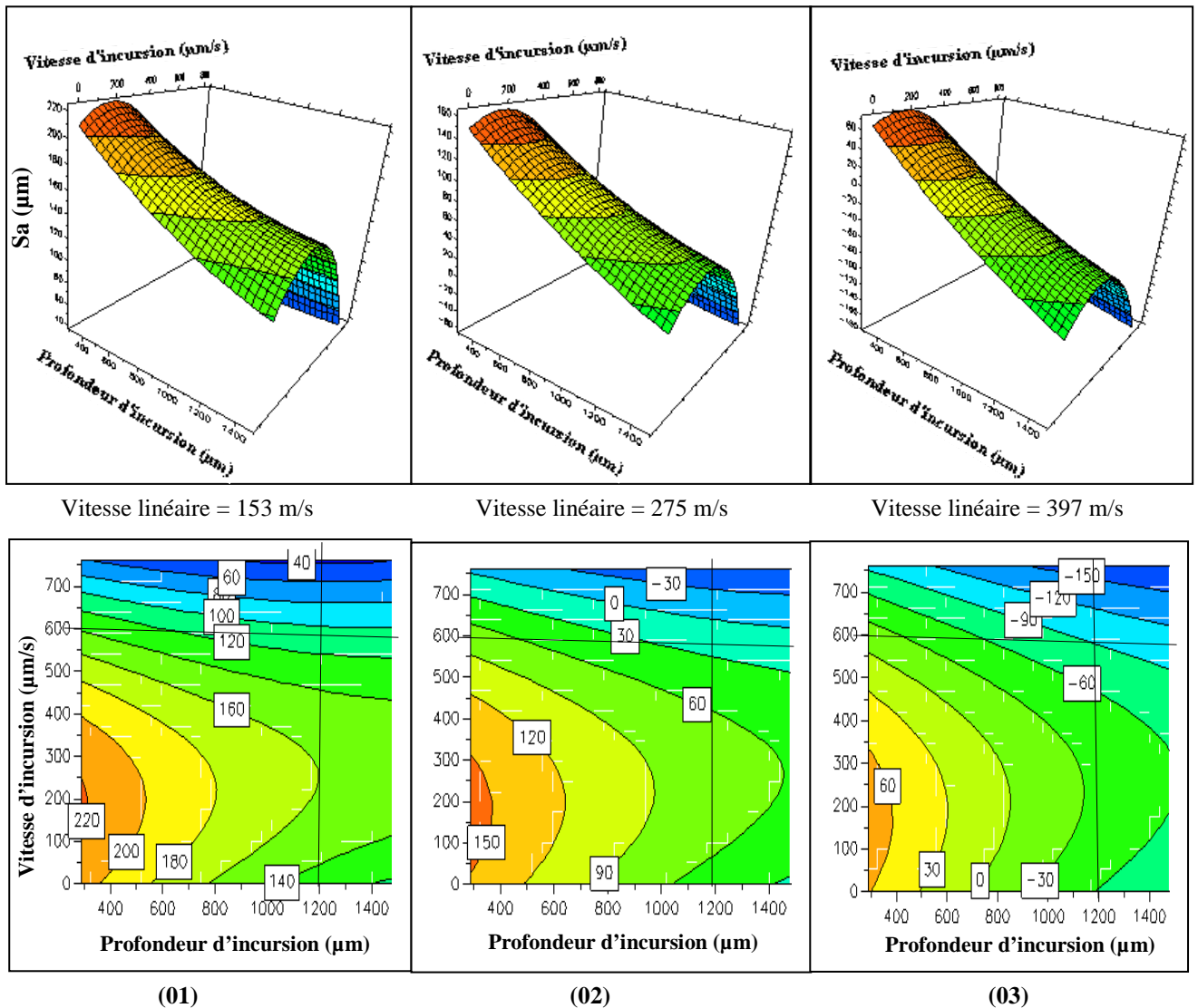


Figure IV.31 : Variation de la rugosité S_a en fonction de la profondeur d'incursion et la vitesse d'incursion

Dans ce cas aussi, nous avons des surfaces de réponses quasi similaires dans les trois cas du point de vue allure et forme, elles sont sous forme de “Selle à cheval” ; seulement on remarque aisément que la zone théorique de valeur négatives de S_a délimitée par la ligne zéro augmente avec l'augmentation de la vitesse linéaire. Par exemple, sur l'analyse horizontale

(Tableau IV.15), à une vitesse d'incursion laissée invariable de 600 $\mu\text{m/s}$, la rugosité est de 121 μm à 153 m/s de vitesse linéaire et 575 μm de la profondeur ; l'augmentation de cette profondeur jusqu'à 1300 μm ne fait diminuer la rugosité que légèrement en passant à 101 μm , par contre à une vitesse linéaire de 275 m/s, on a cette fois-ci une différence assez conséquente en passant de 48 μm à 10 μm (les valeurs sont portées directement sur le tableau IV.15. Remarquons que pour une vitesse linéaire de 397 m/s à une vitesse d'incursion de 600 $\mu\text{m/s}$, les valeurs de S_a sont données par le modèle avec des signes négatifs ; cela est bien entendu à rejeter physiquement.

Tableau IV.15 : Valeurs des réponses en fonction de la variation simultanée de la vitesse linéaire et la profondeur d'incursion

Vitesse d'incursion = 600 $\mu\text{m/s}$	Vitesse linéaire 153 m/s	Vitesse linéaire 275 m/s	Vitesse linéaire 397 m/s
Profondeur d'incursion = 575 μm	121 μm	48 μm	-47 μm
Profondeur d'incursion = 840 μm	110 μm	30 μm	-71 μm
Profondeur d'incursion = 1100 μm	103 μm	17 μm	-91 μm
Profondeur d'incursion = 1300 μm	101 μm	10 μm	-103 μm

On conclut qu'à une vitesse d'incursion élevée de 600 $\mu\text{m/s}$, la rugosité diminue d'une façon claire avec l'augmentation de la vitesse linéaire, par contre la profondeur d'incursion n'influe pas beaucoup sur le comportement de la rugosité S_a .

Observons maintenant l'analyse verticale des mêmes iso-surfaces. Pour une profondeur d'incursion de 1200 μm (Tableau IV.16), et pour une vitesse linéaire de 153 m/s, la rugosité est de 149 μm à 100 $\mu\text{m/s}$, à 300 $\mu\text{m/s}$ elle augmente légèrement jusqu'à 158 $\mu\text{m/s}$, et à 500 $\mu\text{m/s}$, elle diminue jusqu'à 130 μm ; cette diminution continue jusqu'à 64 μm lorsque la vitesse d'incursion atteint 700 μm . Quand la vitesse linéaire passe à 275 m/s, on enregistre le même comportement, mais avec des valeurs différentes de S_a . A une vitesse linéaire encore supérieure que la précédente (397 m/s), les valeurs prennent des signes négatifs ; elles n'ont aucune signification physique.

Tableau IV.16 : Valeurs des réponses en fonction de la variation de la vitesse linéaire et de la vitesse d'incursion

Profondeur d'incursion = 1200 μm	Vitesse linéaire 153 m /s	Vitesse linéaire 275 m /s	Vitesse linéaire 397 m /s
Vitesse d'incursion = 100 $\mu\text{m/s}$	149 μm	64 μm	-44 μm
Vitesse d'incursion = 300 $\mu\text{m/s}$	158 μm	72 μm	-37 μm
Vitesse d'incursion = 500 $\mu\text{m/s}$	130 μm	42 μm	-68 μm
Vitesse d'incursion = 700 $\mu\text{m/s}$	64 μm	-24 μm	-137 μm

Finalement, on remarque à travers l'analyse du tableau précédent que le fait d'augmenter simultanément la vitesse linéaire et la vitesse d'incursion, on arrive à diminuer la hauteur des crêtes et la profondeur des vallons, ceux-là même qui caractérisent S_a .

IV-4-6 Conclusion sur l'étude de la texture et de la rugosité du dépôt abradable après friction avec l'ailette

Cette dernière partie d'étude sur la texture et la rugosité du dépôt abradable après friction avec l'ailette a permis de montrer l'intérêt des intervalles des paramètres de fonctionnement provoquant une faible ou une grande rugosité. Nous avons mis en évidence l'évolution de la rugosité en fonction de la variation des trois paramètres à savoir la vitesse d'incursion, la vitesse linéaire, et la profondeur d'incursion, soit d'une façon isolée, soit d'une façon simultanée de 2 facteurs ou encore de 3 facteurs à la fois. Nous avons donc étudié globalement par étape l'effet de variation de chacun de ces paramètres sur la distribution des réponses ainsi que l'effet de l'action combinée de deux paramètres, et finalement l'action des trois paramètres de fonctionnement sur la rugosité. Les surfaces de réponse et les iso-lignes ont donné des résultats illustrés sur lesquels on peut même prévoir des réponses non effectuées expérimentalement. Cela nous a permis aussi de voir la prépondérance de chaque facteur par rapport à l'autre sur S_a .

IV-5 Conclusion

Ces études ont montré que le choix des paramètres expérimentaux qui prédéfinissent les domaines de fonctionnement sont des étapes importantes dans l'évaluation de l'influence des paramètres dans le traitement du problème de la rugosité et de l'usure du dépôt abradable.

Ce chapitre s'est attaché à définir la procédure avec laquelle les tests ont été effectués sur le banc d'essai. Ainsi, en tout premier lieu, les différents types de variation de paramètres ont été recensés et présentés : il s'agit principalement des facteurs et des réponses. A la suite de ces considérations générales, le traitement du phénomène usure-transfert du matériau NiCrAl-BN rentré en friction Ti-Al-V-6-4 est abordé. Le but principal est d'élaborer une liaison entre la nature réelle du matériau, les conditions de fonctionnement pendant la friction et les résultats obtenus, à savoir l'usure, le transfert et la rugosité. Cela nous a permis de constater l'influence des différents facteurs sur les réponses. L'avantage de cette méthode est que nous pouvons utiliser la prédiction des réponses non étudiées expérimentalement, nous pouvons définir les facteurs qui permettent d'obtenir aucune usure, aucun transfert et donc une rugosité nulle.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le remplacement des languettes de métal doux composant les labyrinthes destinés pour former un barrage contre les gaz brûlés au niveau des turbines à gaz et moteurs d'avion ainsi qu'au niveau des compresseurs axiaux fournissant le l'air comprimé pour combustion et refroidissement par une couche de matériau abrasable est l'une des dernières trouvailles et découvertes rentrant dans le perfectionnement du fonctionnement de ces machines et l'amélioration de leur rendement. Cependant l'obtention de ce matériau très particulier par le procédé de la projection thermique est une chose délicate du moment que la qualité de la couche est dépendante d'une cinquantaine de facteurs extérieurs agissant directement ou indirectement qui se règlent et qui se déterminent sur l'équipement de la projection. La couche est donc destinée à remplacer les languettes qui se détériorent facilement pendant les démarrages, les arrêts accidentels, les vibrations causant ainsi un jeu considérable entre les aubes et l'enveloppe interne de la turbine, permettant une fuite important de gaz brûlés de s'échapper sans production de puissance. Ajouté à cela, la difficulté de leur remplacement causant un arrêt prolongé exige une compétence spécialisée et engendre une perte de production. Les matériaux abrasables apportent une solution intéressante pour la réalisation de l'étanchéité. Ces matériaux présentent notamment deux avantages, ils servent d'un coté à ajuster les jeux de fonctionnement, et également à réduire les dégâts causés par des contacts directs aubes/carter puisque les contacts entre les différents composants de la structure sont logiquement plus fréquents. Les tests expérimentaux ont permis de valider l'objectif attendu des matériaux abrasables et de révéler la présence d'une solution très pratique pour l'industrie. Cette validation a été confirmée par une analyse avancée d'un certains nombre d'essais sur l'usure et la rugosité du matériau après être rentré en friction avec le matériau extrêmement dur de l'ailette, le TiAlV6-4. La surface de la couche du matériau déposé présente une rugosité (après friction) dont l'un des paramètres étudié dans cette thèse doit répondre à certaines attentes de telle façon que les gaz soient freinés voire arrêtés d'une part et que d'autre part le paramètre ne soit pas trop important pour que tout contact aubes/matériau ne présente pas des chocs dynamiques entraînant un changement de rugosité, un arrachement de

Conclusion Générale

débris important, un déplacement de matériau vers le bout de l'ailette (création de masselottes vibratoires) et une usure du bout des ailettes. Les essais de contact abrasable/ailette ont été menés avec différentes configurations ; l'approche consiste à prendre en compte les effets des facteurs extérieurs qui décrivent le phénomène et de les utiliser pour la création des réponses recherchées tout en faisant varier la vitesse de rotation, la vitesse d'incursion et la profondeur d'incursion. Les expériences et les observations qui en découlent ont permis d'analyser les valeurs du paramètre de rugosité étudié, de découvrir l'intensité de la prépondérance des facteurs extérieurs, de modéliser cette rugosité puis de l'optimiser en fonction de ce que nous avons voulu obtenir. Cela a été fait par la méthode des plans d'expériences qui permet grâce à des statistiques récoltées pendant l'expérimentation d'aboutir au but recherché.

A partir de cela ; et après un couplage des différents facteurs sur les distributions des deux réponses étudiées (usure, rugosité), l'analyse des données nous a renseigné sur les points principalement localisés au niveau des paramètres de fonctionnements qui pourraient être une source de déclenchement d'un grand taux d'usure ou d'une grande rugosité au niveau de la surface abrasable provoquant les grands transferts sur l'ailette elle-même. D'où il apparaît clairement des résultats que la variation des facteurs ainsi que leurs interactions dépendent les valeurs de la rugosité, la détermination du modèle mathématique qui décrit le phénomène et par conséquent les valeurs prédictives des résultats dont on n'a pas effectué les expérimentations. Cette thèse a donc effectué une liaison entre un phénomène physique purement mécanique de friction et d'usure et une théorie mathématique très utilisée ces derniers temps dans tous les domaines essentiellement lorsqu'il a été mis à notre disposition des outils informatiques très puissants pour résoudre certaines opérations mathématiques difficiles à résoudre auparavant. Les résultats obtenus montrent que les matériaux abrasables donnent une meilleure offre qualité/prix comparativement au changement et à la réparation des labyrinthes d'étanchéité, une obtention fonctionnelle par raclage suite à une friction du matériau du jeu ajusté au niveau de la turbomachine, et que par conséquent leurs utilisations peuvent être élargies à l'échelle industrielle. Actuellement, des essais poussés sont en cours d'exécution sur des machines industrielles au niveau des bancs réels des constructeurs de moteurs d'avions et de turbines de sol après que les essais sur machines expérimentales ont donné des résultats plus que satisfaisants.

Annexe

ANNEXE A

Procédure de traitement d'images avec le logiciel

« Scion Image »

A- 1 Introduction

La mesure du taux de porosité des trois éprouvettes élaborées au sien du laboratoire LERMPS, s'est faite a l'aide du logiciel " Scion image " afin d'analyser notre microstructure. Le logiciel *Scion image* est un programme de traitement et d'analyse d'images. Il peut acquérir, montrer, éditer, augmenter, analyser et animer des images. Il lit des dossiers sous extension BMP, TIFF, et autres fournissant la compatibilité de beaucoup d'autres applications, y compris des programmes pour le balayage, traitement, et l'analyse des images. Il permet également d'effectuer des traitements y compris le filtrage, la détection des bords, et le calcul des densités et des surfaces. Ce qui permet aux utilisateurs de définir sa structure.

A- 2 Procédure de traitement d'image avec le logiciel " Scion image "

La procédure de calcul du taux de porosité dans un échantillon commence à partir des micrographies MEB. Donc la première des choses est de faire rentrer la micrographie à la fenêtre du scion image.

On doit suivre les étapes suivantes (Figure A.01):

Fichier → Open → On choisit la micrographie qu'on veut traiter (Figure A.1)

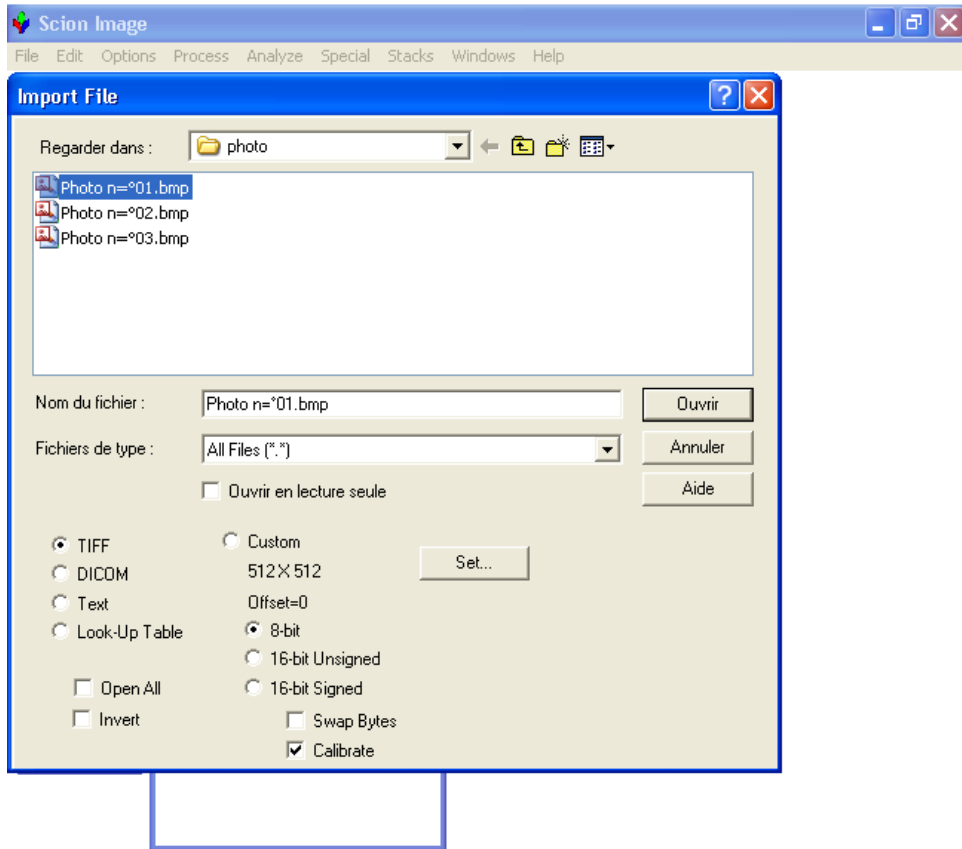


Figure A.01 : *Choix de la micrographie*

En cliquant sur l'icône « ouvrir », il y aura l'apparition automatique de la micrographie choisie (Figure A.02)

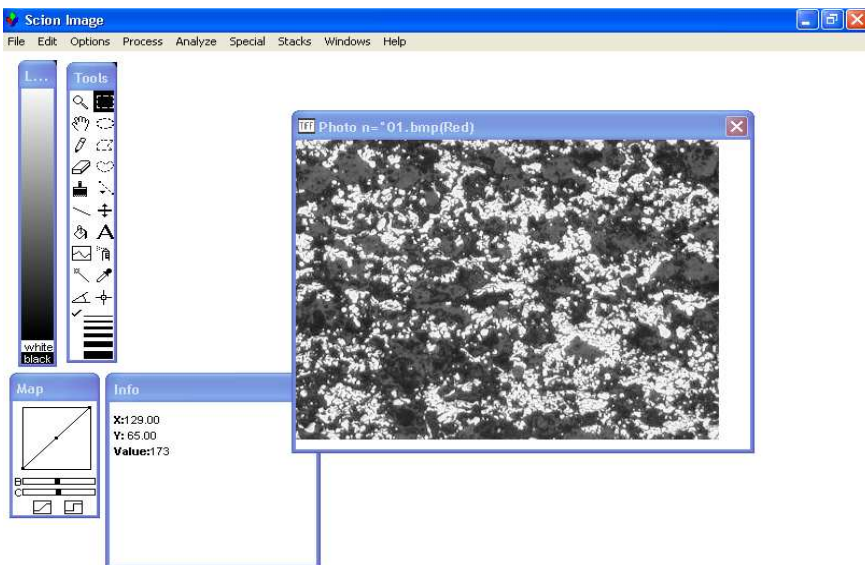


Figure A. 02 : *Apparition de la micrographie choisie*

Avant d'entamer les différents calculs, il faut tout d'abord régler les unités de mesure. Dans notre cas on a choisi le micron. La procédure est comme la suivante :

Analyze (Dans le menu) → Set Scale

A l'apparition de la fenêtre de réglage de l'unité de mesure, on règle pour une distance de 500 μm , un nombre de 115 pixels (Documentation Scion image).

Puis on choisit également l'unité de mesure de la distance « Micromètre » (Figure A.03)

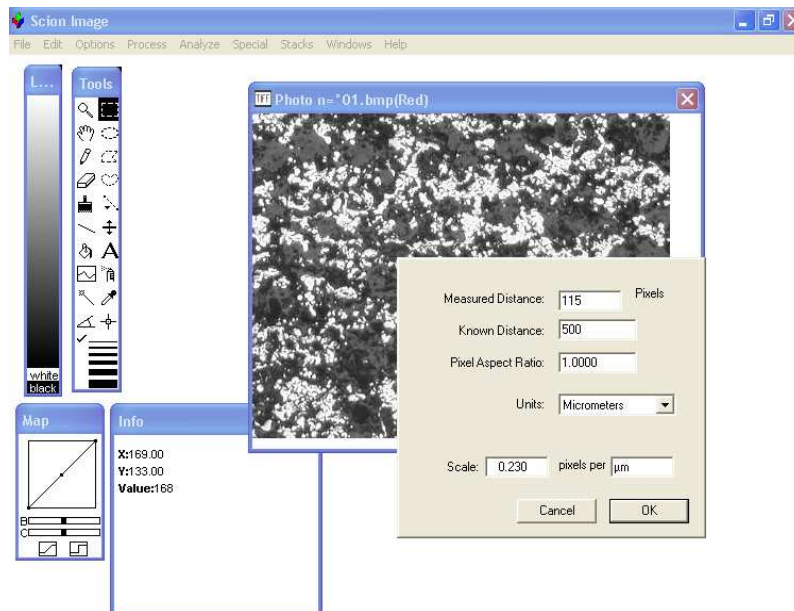


Figure A.03 : Réglage de l'unité de mesure

Après le réglage de l'unité de mesure, il faut ajuster l'image, c'est-à-dire faire la neutralisation des éléments constituant de l'image.

Cette procédure s'effectue en suivant les étapes suivantes :

Options (Dans le menu) → Threshold (Figure A.04)

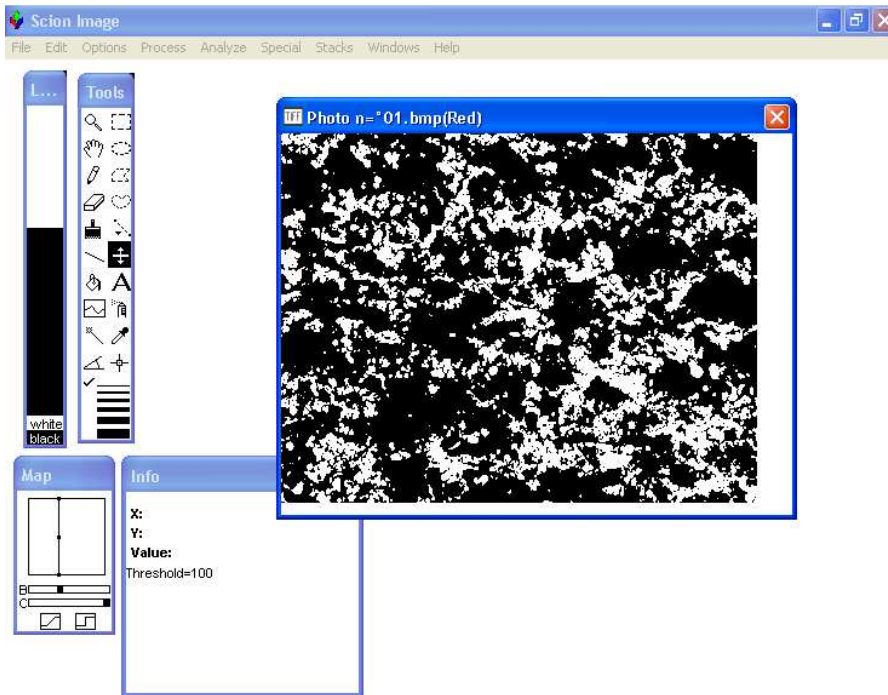


Figure A.04 : *Neutralisation de la micrographie*

Après la neutralisation, il faut définir et séparer les deux phases de la micrographie. Cette procédure permet une binarisation de l'image, c'est-à-dire une valeur de « 0 » pour tout ce qui est blanc dans l'image, et une valeur de « 1 » pour tous ce qui est noir. (Tous les gris sont éliminés)

La procédure est décrite de la manière suivante :



Avant de calculer la surface occupée par la porosité, il est préférable de faire une filtration sur la micrographie. Cette procédure consiste à éliminer les points noirs des surfaces blanches et vis versa.

La filtration s'effectue en suivant les étapes suivantes :

Sélectionner la partie de l'image qu'on veut traiter ;

Process → Rank Filters → on choisit du nombre de filtration (Figure A.5)

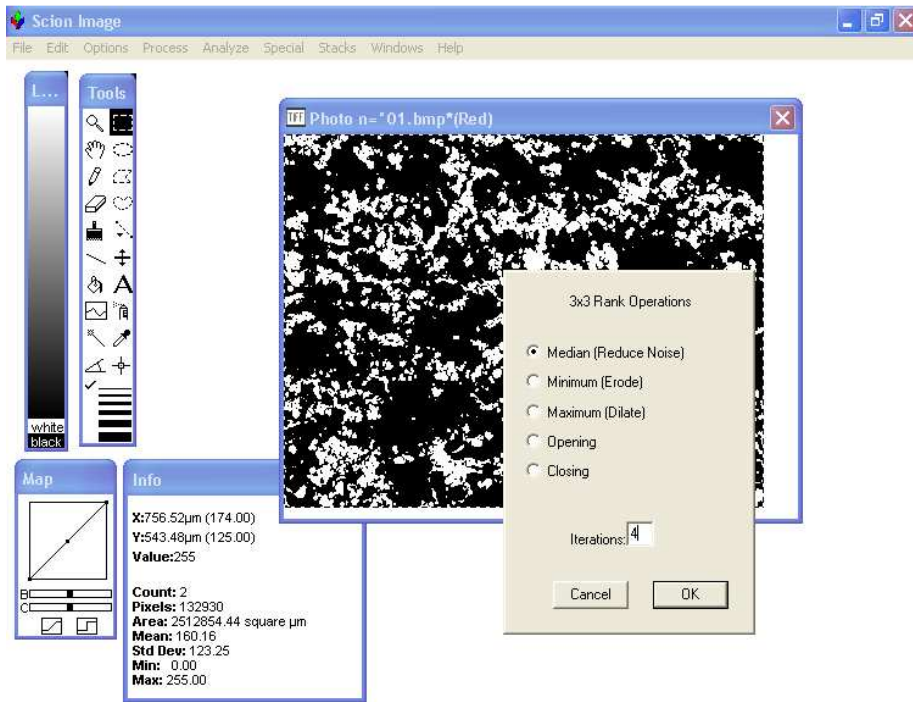


Figure A.05 : Choix du nombre de filtration

Dans cet exemple, on a choisi un nombre de 4 filtrations. On confirme par OK, il y aura une filtration de l'image comme montrée sur la figure A.06

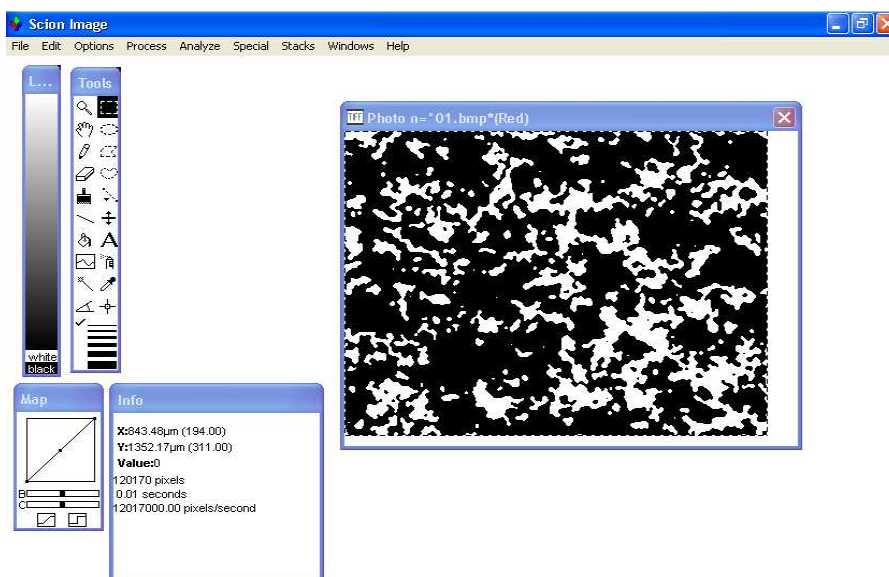


Figure A.06 : Filtration de l'image après "binarisation"

Après la filtration de l'image, on peut maintenant accéder au calcul de la surface total de l'image ainsi qu'au calcul de la surface occupé par la porosité. Il suffit de suivre les étapes suivantes :

Analyze → measure → Show results

ANNEXE B

Elaboration du modèle mathématique du comportement du matériau abradable pendant la friction engendrant son usure ou son transfert

B-1 Introduction

L'usure comme expliquée au chapitre (II), est un phénomène très compliqué, il est le résultat des différents paramètres agissant sur le comportement au cours du fonctionnement. Dans notre étude, la loi mathématique regroupant les différents paramètres participant au phénomène est beaucoup plus intuitive. Basée sur un calcul statistique avec la méthode des plans d'expériences, cette partie d'annexe présente les étapes suivies afin de calculer le modèle mathématique qui nous a permis d'analyser le comportement du matériau abradable pendant son usure ou son transfert.

B-2 Présentation des résultats d'essai

Sur le banc d'essai, le contact d'une aube en TiAlV-6-4 contre une paroi abradable (NiCrAl-BN) a été réalisé pour obtenir l'usure du matériau. En chaque point de l'expérimentation, la réponse obtenue au niveau de l'ailette est mesurée. Le tableau B.01 présente les résultats des tests effectués

Tableau B.01 : Conditions des tests d'abradabilité

N°	Vitesse d'incursion (µm/s)	Vitesse linéaire (m/s)	Profondeur d'incursion (µm)	Réponse (Usure ou transfert de l'ailette) (µm)
1	760	153	289	711
2	2,5	305	543	457
3	138	305	1478	-178
4	760	153	822	178
5	138	305	1330	-30
6	760	153	970	30
7	2,5	305	1000	0
8	760	153	594	406
9	500	250	379	381
10	100	397	525	-25
11	10	397	475	25
12	100	397	525	-25
13	10	397	525	-25

Rappelons que les signes négatifs et positifs représentent respectivement l'usure et le transfert figure (B.01).

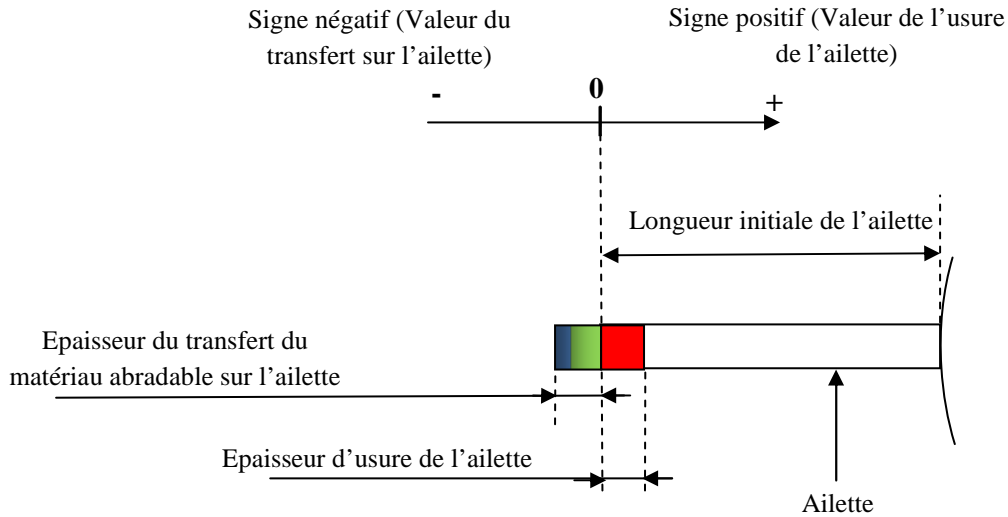


Figure B.01 : Schéma d'usure et de transfert de matériau

B-3 Codage des valeurs des facteurs d'essais

La méthode des plans d'expériences, nécessite un codage sur les niveaux des facteurs ; on prend la valeur maximale codée comme +1, et la valeur minimale codée comme -1. Les valeurs intermédiaires doivent alors se trouver entre -1 et +1, c'est-à-dire que le facteur doit se trouver dans l'intervalle [-1, +1]. Les valeurs intermédiaires se codent avec la formule suivante :

$$x_i = \frac{u_i - \left(\frac{u_{\min i} + u_{\max i}}{2} \right)}{\left(\frac{u_{\max i} - u_{\min i}}{2} \right)} \quad (\text{B.01})$$

Telles que :

- u_{\min} : Représente la borne inférieure des niveaux ;
- u_{\max} : Représente la borne supérieure des niveaux ;
- u_i : Représente la valeur sur laquelle on effectue le codage ;
- x_i : Représente la valeur codée.

➤ **Codage du facteur vitesse d'incursion ($\mu\text{m/s}$):**

Ce facteur prend six niveaux : 2,5, 10, 100, 138, 500, 760. La valeur minimale étant 2,5, elle prend le code -1, la valeur maximale étant 760, elle prend le code +1. Pour les autres valeurs intermédiaires, on effectue un codage suivant la formule (B.01), on aura :

✓ Pour la valeur 10 par exemple :

$$x_{10} = \frac{10 - \frac{(2.5 + 760)}{2}}{\frac{(760 - 2.5)}{2}} \Rightarrow x_{10} = -0.98 \quad (\text{B.02})$$

En appliquant cette formule pour le reste des niveaux intermédiaires, le facteur vitesse d'incursion va prendre les niveaux codés suivant: [-1 ; -0,98 ; -0,742 ; -0,642 ; +0,313 ; +1].

➤ **Codage du facteur vitesse linéaire (m/s) :**

En utilisant la formule (B.01), le facteur vitesse linéaire prend les valeurs codées suivantes: 1 ; -0,204 ; 0,245 ; 1.

➤ **Codage du facteur profondeur d'incursion μm :**

Le facteur profondeur d'incursion prend les niveaux codés suivants: -1 ; 0,751 ; 0,196 ; 0,145 ; -0,103 ; -0,487 ; -0,573 ; -0,603 ; -0,687 ; -0,849 ; 1.

Une fois le codage des différents facteurs obtenu, nous formons la matrice d'expérience associée à partir du tableau (B.02), sachant que :

V_{inc} : Représente la vitesse d'incursion ;

V_{lin} : Représente la vitesse linéaire ;

Pro : Représente la profondeur d'incursion

Tableau B.02 : Matrice d'expériences

N°	V _{inc}	V _{lin}	Pro	V _{inc} *V _{lin}	V _{inc} *Pro	V _{lin} *Pro	V _{inc} ²	V _{lin} ²	Pro ²
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
2	-1	0,245	-0,573	-0,245	0,572	-0,14	1	0,06	0,328
3	-0,642	0,245	1	-0,157	-0,642	0,245	0,412	0,06	1
4	1	-1	-0,103	-1	-0,103	0,103	1	1	0,01
5	-0,642	0,245	0,751	-0,157	-0,482	0,184	0,412	0,06	0,564
6	1	-1	0,145	-1	0,145	-0,145	1	1	0,021
7	-1	0,245	0,196	-0,245	-0,195	0,048	1	0,06	0,038
8	1	-1	-0,487	-1	-0,486	0,486	1	1	0,237
9	0,313	-0,204	-0,849	-0,064	-0,266	0,173	0,098	0,041	0,72
10	-0,742	1	-0,603	-0,742	0,447	-0,603	0,551	1	0,363
11	-0,98	1	-0,687	-0,98	0,673	-0,687	0,96	1	0,472
12	-0,742	1	-0,603	-0,742	0,447	-0,603	0,551	1	0,363
13	-0,98	1	-0,603	-0,98	0,591	-0,603	0,96	1	0,363

B-4 Calcul du modèle mathématique

Après avoir construit la matrice d'expérience, La forme générale du modèle polynomial du second degré qu'on a adopté pour l'analyse des résultats d'essais s'écrit sous la forme:

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k a_{ij} x_i x_j \quad (\text{B.03})$$

La forme développée du modèle polynomial s'écrit alors :

$$y_i = a_0 + a_1 x_{i,1} + a_2 x_{i,2} + a_3 x_{i,3} + a_{12} x_{i,1} x_{i,2} + a_{13} x_{i,1} x_{i,3} + a_{23} x_{i,2} x_{i,3} + a_{11} x_{i,1}^2 + a_{22} x_{i,2}^2 + a_{33} x_{i,3}^2 + e_i \quad (\text{B.04})$$

Le terme e_i étant le résidu qu'il faut rajouter pour que la valeur mesurée et la valeur donnée par le polynôme soient les mêmes. Il est à souligner que nous avons trois paramètres avec lesquels nous avons effectué 13 expériences. Le polynôme est formé avec des facteurs qui tiennent compte des valeurs lues du premier degré, du deuxième degré, et de leur interaction deux à deux. Cela nous donne 10 coefficients à déterminer.

En application pour notre cas de la formule (B.04) et pour des raisons de simplification de notation, on note:

$X_{i,1}$: Représente la valeur lue dans la matrice d'expérience pour le i^{eme} traitement, pour le facteur vitesse d'incursion ;

$X_{i,2}$: Représente la valeur lue dans la matrice d'expérience pour le i^{eme} traitement, pour le facteur vitesse linéaire ;

$X_{i,3}$: Représente la valeur lue dans la matrice d'expérience pour le i^{eme} traitement, pour le facteur profondeur d'incursion ;

y_i : Représente la valeur observée de la réponse pour le i^{eme} traitement

e_i : Représente l'écart entre la valeur observée et la valeur calculée de la réponse.

Il est donc possible de construire le système d'équations suivant à partir des observations expérimentales :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 y_1 = a_0 + a_1x_{1,1} + a_2x_{1,2} + a_3x_{1,3} + a_{12}x_{1,1}x_{1,2} + a_{13}x_{1,1}x_{1,3} + a_{23}x_{1,2}x_{1,3} + a_{11}x_{1,1}^2 + a_{22}x_{1,2}^2 + a_{33}x_{1,3}^2 + e_1 \\
 y_2 = a_0 + a_1x_{2,1} + a_2x_{2,2} + a_3x_{2,3} + a_{12}x_{2,1}x_{2,2} + a_{13}x_{2,1}x_{2,3} + a_{23}x_{2,2}x_{2,3} + a_{11}x_{2,1}^2 + a_{22}x_{2,2}^2 + a_{33}x_{2,3}^2 + e_2 \\
 y_3 = a_0 + a_1x_{3,1} + a_2x_{3,2} + a_3x_{3,3} + a_{12}x_{3,1}x_{3,2} + a_{13}x_{3,1}x_{3,3} + a_{23}x_{3,2}x_{3,3} + a_{11}x_{3,1}^2 + a_{22}x_{3,2}^2 + a_{33}x_{3,3}^2 + e_3 \\
 y_4 = a_0 + a_1x_{4,1} + a_2x_{4,2} + a_3x_{4,3} + a_{12}x_{4,1}x_{4,2} + a_{13}x_{4,1}x_{4,3} + a_{23}x_{4,2}x_{4,3} + a_{11}x_{4,1}^2 + a_{22}x_{4,2}^2 + a_{33}x_{4,3}^2 + e_4 \\
 \dots \qquad \qquad \qquad \dots \qquad \qquad \qquad \dots \qquad \qquad \qquad \dots \qquad \qquad \qquad (B.05) \\
 y_{10} = a_0 + a_1x_{10,1} + a_2x_{10,2} + a_3x_{10,3} + a_{12}x_{10,1}x_{10,2} + a_{13}x_{10,1}x_{10,3} + a_{23}x_{10,2}x_{10,3} + a_{11}x_{10,1}^2 + a_{22}x_{10,2}^2 + a_{33}x_{10,3}^2 + e_{10} \\
 \dots \qquad \qquad \qquad \dots \qquad \qquad \qquad \dots \qquad \qquad \qquad \dots \qquad \qquad \dots \\
 y_{13} = a_0 + a_1x_{13,1} + a_2x_{13,2} + a_3x_{13,3} + a_{12}x_{13,1}x_{13,2} + a_{13}x_{13,1}x_{13,3} + a_{23}x_{13,2}x_{13,3} + a_{11}x_{13,1}^2 + a_{22}x_{13,2}^2 + a_{33}x_{13,3}^2 + e_{13}
 \end{array} \right.$$

On écrit le système précédent sous forme matricielle suivante

$$(Y) = (X).(Coefficients) + (E) \tag{B.06}$$

De façon à faire apparaître clairement les 13 équations qui comportent les inconnues à estimer, à savoir les coefficients et les résidus, le système d'équation (B.05) s'écrit sous la forme :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ \dots \\ y_i \\ \dots \\ y_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} & x_{1,1}x_{1,2} & x_{1,1}x_{1,3} & x_{1,2}x_{1,3} & x_{1,1}^2 & x_{1,2}^2 & x_{1,3}^2 \\ 1 & x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} & x_{2,1}x_{2,2} & x_{2,1}x_{2,3} & x_{2,2}x_{2,3} & x_{2,1}^2 & x_{2,2}^2 & x_{2,3}^2 \\ 1 & x_{3,1} & x_{3,2} & x_{3,3} & x_{3,1}x_{3,2} & x_{3,1}x_{3,3} & x_{3,2}x_{3,3} & x_{3,1}^2 & x_{3,2}^2 & x_{3,3}^2 \\ 1 & x_{4,1} & x_{4,2} & x_{4,3} & x_{4,1}x_{4,2} & x_{4,1}x_{4,3} & x_{4,2}x_{4,3} & x_{4,1}^2 & x_{4,2}^2 & x_{4,3}^2 \\ 1 & x_{5,1} & x_{5,2} & x_{5,3} & x_{5,1}x_{5,2} & x_{5,1}x_{5,3} & x_{5,2}x_{5,3} & x_{5,1}^2 & x_{5,2}^2 & x_{5,3}^2 \\ 1 & x_{6,1} & x_{6,2} & x_{6,3} & x_{6,1}x_{6,2} & x_{6,1}x_{6,3} & x_{6,2}x_{6,3} & x_{6,1}^2 & x_{6,2}^2 & x_{6,3}^2 \\ 1 & x_{7,1} & x_{7,2} & x_{7,3} & x_{7,1}x_{7,2} & x_{7,1}x_{7,3} & x_{7,2}x_{7,3} & x_{7,1}^2 & x_{7,2}^2 & x_{7,3}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{i,1} & x_{i,2} & x_{i,3} & x_{i,1}x_{i,2} & x_{i,1}x_{i,3} & x_{i,2}x_{i,3} & x_{i,1}^2 & x_{i,2}^2 & x_{i,3}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{13,1} & x_{13,2} & x_{13,3} & x_{13,1}x_{13,2} & x_{13,1}x_{13,3} & x_{13,2}x_{13,3} & x_{13,1}^2 & x_{13,2}^2 & x_{13,3}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{23} \\ a_{11} \\ a_{22} \\ a_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \\ e_7 \\ \dots \\ e_i \\ \dots \\ e_{13} \end{bmatrix} \quad (B.07)$$

On remplace dans l'équation (B.07) les valeurs de x_i par des valeurs codées lues de la matrice d'expériences et les valeurs des réponses obtenues, on obtient forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} 711 \\ 457 \\ -178 \\ 178 \\ -30 \\ 30 \\ 0 \\ 406 \\ 381 \\ -25 \\ 25 \\ -25 \\ -25 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0,245 & -0,573 & -0,245 & 0,572 & -0,14 & 1 & 0,06 & 0,328 \\ 1 & -0,642 & 0,245 & 1 & -0,157 & -0,642 & 0,245 & 0,412 & 0,06 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -0,103 & -1 & -0,103 & 0,103 & 1 & 1 & 0,01 \\ 1 & -0,642 & 0,245 & 0,751 & -0,157 & -0,482 & 0,184 & 0,412 & 0,06 & 0,564 \\ 1 & 1 & -1 & 0,145 & -1 & 0,145 & -0,145 & 1 & 1 & 0,021 \\ 1 & -1 & 0,245 & 0,196 & -0,245 & -0,195 & 0,048 & 1 & 0,06 & 0,038 \\ 1 & 1 & -1 & -0,487 & -1 & -0,486 & 0,486 & 1 & 1 & 0,237 \\ 1 & 0,313 & -0,204 & -0,849 & -0,064 & -0,266 & 0,173 & 0,098 & 0,041 & 0,72 \\ 1 & -0,742 & 1 & -0,603 & -0,742 & 0,447 & -0,603 & 0,551 & 1 & 0,363 \\ 1 & -0,98 & 1 & -0,687 & -0,98 & 0,673 & -0,687 & 0,96 & 1 & 0,472 \\ 1 & -0,742 & 1 & -0,603 & -0,742 & 0,447 & -0,603 & 0,551 & 1 & 0,363 \\ 1 & -0,98 & 1 & -0,603 & -0,98 & 0,591 & -0,603 & 0,96 & 1 & 0,363 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{23} \\ a_{11} \\ a_{22} \\ a_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \\ e_7 \\ e_8 \\ e_9 \\ e_{10} \\ e_{11} \\ e_{12} \\ e_{13} \end{bmatrix} \quad (B.08)$$

Dans l'expression (B.08), (X) représente la matrice du modèle déjà évoquée lors de la construction du plan d'expériences, (Y), la matrice des réponses, (E) la matrice des résidus. L'estimation des coefficients a_i du modèle mathématique se fait à partir de la méthode des moindres carrés ; il suffit de résoudre le système suivant :

$$\begin{cases} Y = X.a + e \\ \frac{\partial e'e}{\partial a} = 0 \end{cases} \quad (\text{B.09})$$

La solution est donc de la forme :

$$\text{Coefficients} = (X'X)^{-1} X'Y \quad (\text{B.10})$$

Où :

tX : Transposée de la matrice X ;

$({}^tXX)^{-1}$: Matrice inverse de $({}^tXX)$.

En traitant donc l'équation générique (B.10), on obtient les valeurs des coefficients ; ils sont reportés dans le tableau ci après :

Tableau B.03 : Valeurs des coefficients

Coefficients	Valeurs
a_0	188,57
a_1	-2370,79
a_2	-2626,69
a_3	-594,5
a_{12}	-1343,12
a_{13}	0,0008
a_{23}	0,0006
a_{11}	-2158,86
a_{22}	478,77
a_{33}	-0,0003

Une fois les coefficients calculés, on établit le modèle mathématique suivant :

$$y = 188,57 - 2370,79x_1 - 2626,69x_2 - 594,5x_3 - 1343,12x_1x_2 + 0,0008x_1x_3 + 0,0006x_2x_3 - 2158,86x_1^2 + 478,77x_2^2 - 0,0003x_3^2 \quad (\text{B.11})$$

Les réponses estimées par le modèle sont ensuite obtenues à partir de l'équation suivante:

$$y_{calculé} = (X).(Coefficients) \quad (B.12)$$

L'estimation du modèle mathématique nous ramène à calculer les résidus par la formule (B.13). On remplace les valeurs mesurées et les valeurs calculées pour chaque essai, on a alors les valeurs des résidus données par le tableau (B.04) :

Le résidu pour le traitement « i », est défini à partir de la relation :

$$e_i = y_{i,mesurée} - y_{i,calculée} \quad (B.13)$$

Tableau B.04 : Estimation des résidus

N	Réponse mesurée (µm)	Réponse calculée (µm)	Résidu (µm)
1	711	711,00212	-0,00212
2	457	454,862921	2,13707918
3	-178	-178,080863	0,08086306
4	178	178,001985	-0,00198459
5	-30	-30,0809019	0,0809019
6	30	30,0020325	-0,00203254
7	0	-2,13767544	2,13767544
8	406	406,001983	-0,00198349
9	381	382,564509	-1,56450925
10	-25	-24,4250344	-0,57496555
11	25	24,3123591	0,68764094
12	-25	-24,4250344	-0,57496555
13	-25	-25,6876873	0,68768726

B-5 Test de signification des coefficients du modèle

Les coefficients des facteurs et ceux des interactions nécessitent un test de signification. Ce test fait intervenir d'une part les résidus e_i , c'est-à-dire la différence entre la

valeur expérimentale et la valeur prédite par le modèle, et d'autre part un estimateur de la variance commune des résidus.

La variance est donné par :

$$s^2 = \frac{1}{n-p} \sum e_i^2 \quad (\text{B.14})$$

Avec :

n : Nombre d'expériences effectuées

p : Nombre des coefficients du modèle mathématique

Pour l'estimation et la signification des effets des coefficients, on utilise le test de Student. Pour cela, la table de *Student* de laquelle on tire, pour un risque de 5% et $\nu = n - p = 13 - 10 = 3$, la valeur de $t_{\text{critique}}(0,05 ; 3) = 3,182$ (Annexe D). On dit qu'un effet est significatif au risque de 5% si le test statistique " t_i " correspondant est supérieur à la valeur tirée du tableau de Student, c'est dire à 3,182.

Avec :

$$t_i = \frac{|a_i|}{s_i} \quad (\text{B.15})$$

Et

$$s_i^2 = \frac{s^2}{n} \quad (\text{B.16})$$

Tableau B.05 : Analyse de signification des effets

Variable	Coefficient	ti	Résultats
Constante	$a_0 = 188,57$	$t_0 = 324,07 > 3,182$	Significatif
Vinc	$a_1 = -2370,79$	$t_1 = 4074,4 > 3,182$	Significatif
Vlin	$a_2 = -2626,69$	$t_2 = 4514,19 > 3,182$	Significatif
Pro	$a_3 = -594,5$	$t_3 = 1021,7 > 3,182$	Significatif
Vinc*Vlin	$a_{12} = -1343,12$	$t_{12} = 2308,26 > 3,182$	Significatif
Vinc*Pro	$a_{13} = 0,0008$	$t_{13} = 0,001 < 3,182$	Non Significatif
Vlin*Pro	$a_{23} = 0,0006$	$t_{23} = 0,001 < 3,182$	Non Significatif
Vinc ^2	$a_{11} = -2158,86$	$t_{11} = 3710,18 > 3,182$	Significatif
Vlin ^2	$a_{22} = 487,77$	$t_{22} = 838,27 > 3,182$	Significatif
Pro ^2	$a_{33} = 0,0003$	$t_{33} = 0,0006 < 3,182$	Non Significatif

A travers les résultats obtenus (Tableau B.05), on constate que la majorité des effets sont plus ou moins significatifs puisqu'ils dépassent la valeur de 3,182. Il est clair que l'action de la vitesse linéaire sur le phénomène usure - transfert est le plus prépondérant avant la vitesse incursion et la profondeur. Le moins significatif étant le quadratique de la vitesse linéaire montrée par le coefficient a_{22} . Par contre l'effet du quadratique de la profondeur d'incursion a une influence presque négligeable sur la réponse ; ainsi on remarque que les deux effets des deux interactions (Vitesse d'incursion ; profondeur d'incursion) et (Vitesse linéaire ; profondeur d'incursion) mentionné a_{13} ; a_{23} ont un effet non significatif sur la réponse, cela veut dire que l'effet de ces interaction ne fait pas changer considérablement le comportement, autrement dit que le comportement de la distribution des réponses reste constant avec la variation des niveaux d'un paramètre quelque soit le niveau de l'autre paramètre sur lequel se trouve cette interaction. Cette dernière explication se voit clairement sur l'analyse effectuée au chapitre (IV), d'où on a remarqué que l'augmentation de la vitesse d'incursion avec les deux niveaux de la profondeur d'incursion engendre des conséquences similaires sur la variation du comportement (paragraphe IV-3-4-b), ainsi il y'a donc une similarité de la distribution des réponses pour les deux cas (maximum et minimum de la profondeur d'incursion) en fonction de la vitesse linéaire (paragraphe IV-3-4-c).

Même si ces trois effets sont non significatifs sur les réponses (usure/transfert), on préfère les laisser figurés sur le modèle mathématique afin de donner une analyse complète de tous les cas possibles dans l'étude.

B-6 Qualité du modèle :

B-6-1 Qualité descriptive du modèle :

Le coefficient de détermination de la qualité descriptive se calcule à partir de la relation :

$$R^2_{ajustè} = 1 - \frac{\frac{SCER}{N - P}}{\frac{STCE}{N - 1}} \quad (B.17)$$

Telles que :

$$SCER = \sum (Y_i - Y_i^{est})^2 \quad (B.18)$$

$$STCE = SCEL + SCER \quad (B.19)$$

$$SCEL = \sum (Y_i^{est} - Y_{moy})^2 \quad (B.20)$$

SCER se lit : "Somme des Carrés des Ecartés des Résidus".

STCE se lit : " Somme Totale des Carrés des Ecartés"

En appliquant ces équations on trouve:

$$R_{ajusté}^2 = 0,99 \quad (B.21)$$

Puisque le coefficient de détermination ajusté de la qualité descriptive se rapproche de la valeur 1, on peut donc dire que le modèle obtenu décrit convenablement le phénomène.

B-6-2 Qualité prédictive du modèle :

la qualité prédictive du modèle est décrite par un coefficient noté Q^2 , il est calculé suivant la formule :

$$Q^2 = 1 - \frac{PRESS}{SCM} \quad (B.22)$$

Avec:

$$PRESS = \sum_{i=1}^N \frac{(e_i)^2}{(1-h_i)^2} \quad (B.23)$$

Avec h_i le $i^{ème}$ élément diagonal de la matrice H (*Hat Matrix*) à partir de la relation :

$$H = X.(X'.X)^{-1}.X' \quad (B.24)$$

Et

$$SCM = y'.y - y_{moy}^t.y_{moy} \quad (B.25)$$

PRESS se lit: "Prediction Error Sum of Squares "

SCM se lit : la somme des carrés des réponses mesurées (expérimentales) corrigée de la moyenne.

En appliquant ces équations on trouve :

$$Q^2 = 0,99 \quad (B.26)$$

La qualité prédictive Q^2 est proche de 1, on peut conclure que notre modèle est acceptable.

ANNEXE C

Elaboration du modèle mathématique décrivant le paramètre de la rugosité “ S_a ” de la surface de l’abradable

C-1 Introduction

Les essais effectués sur le banc ont permis d’un coté de simuler le comportement du matériau abradable du côté usure, et d’un autre coté, ils ont permis de mesurer avec l’interféromètre à laser la valeur “ S_a ” de la rugosité de la surface afin d’analyser l’état de surface après être rentré en friction avec la TiAlV-6-4. Rappelons cependant que le paramètre de rugosité S_a représente la moyenne arithmétique des valeurs absolues des ordonnées des sommets des crêtes et des fonds des vallons par rapport à la ligne moyenne à l’intérieur d’une longueur de base dans les deux directions (x et y). Dans cette partie d’annexe, le principe et les étapes de calcul du modèle mathématique qui décrit la rugosité par son paramètre “ S_a ” étudié au chapitre (IV), restent les mêmes décrites à l’annexe (B), seulement le seul changement réside sur la réponse étudiée ; cela signifie que la matrice d’expériences reste la même. Pour cette raison, cette partie d’annexe ne va pas être détaillée ; les étapes sont déjà expliquées à l’annexe (B).

C-2 Présentation des résultats d’essais

Tableau C.01 : Valeurs de la rugosité S_a obtenue lors des tests expérimentaux

N°	Vitesse d’incursion ($\mu\text{m/s}$)	Vitesse linéaire (m/s)	Profondeur d’incursion (μm)	S_a (μm)
1	760	153	289	61,5
2	2,5	305	543	93,4
3	138	305	1478	25,4
4	760	153	822	41,9
5	138	305	1330	34,1
6	760	153	970	37,8
7	2,5	305	1000	40,9
8	760	153	594	48,3
9	500	250	379	115,4
10	100	397	525	37,2
11	10	397	475	34,3
12	100	397	525	37,3
13	10	397	525	26

Le domaine de variation des facteurs agissant sur S_a définis par les tests expérimentaux est représenté sur le tableau (C.01). Rappelons la matrice d'expériences associée après avoir effectué le codage des différents facteurs participant à la variation de la réponse S_a avec la formule (C.01)

$$x_i = \frac{u_i - \left(\frac{u_{\min i} + u_{\max i}}{2} \right)}{\left(\frac{u_{\max i} - u_{\min i}}{2} \right)} \quad (\text{C.01})$$

Tableau C.02 : Matrice d'expériences associée

N°	V _{inc}	V _{lin}	Pro	V _{inc} *V _{lin}	V _{inc} *Pro	V _{lin} *Pro	V _{inc} ²	V _{lin} ²	Pro ²
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
2	-1	0,245	-0,573	-0,245	0,572	-0,14	1	0,06	0,328
3	-0,642	0,245	1	-0,157	-0,642	0,245	0,412	0,06	1
4	1	-1	-0,103	-1	-0,103	0,103	1	1	0,01
5	-0,642	0,245	0,751	-0,157	-0,482	0,184	0,412	0,06	0,564
6	1	-1	0,145	-1	0,145	-0,145	1	1	0,021
7	-1	0,245	0,196	-0,245	-0,195	0,048	1	0,06	0,038
8	1	-1	-0,487	-1	-0,486	0,486	1	1	0,237
9	0,313	-0,204	-0,849	-0,064	-0,266	0,173	0,098	0,041	0,72
10	-0,742	1	-0,603	-0,742	0,447	-0,603	0,551	1	0,363
11	-0,98	1	-0,687	-0,98	0,673	-0,687	0,96	1	0,472
12	-0,742	1	-0,603	-0,742	0,447	-0,603	0,551	1	0,363
13	-0,98	1	-0,603	-0,98	0,591	-0,603	0,96	1	0,363

Avec :

V_{inc} : Représente la vitesse d'incursion ;

V_{lin} : Représente la vitesse de rotation ;

Pro : Représente la profondeur d'incursion.

C-3 Elaboration du modèle mathématique

La forme générale du modèle polynomial du second degré qu'on a adopté pour l'analyse des résultats d'essais s'écrit sous la forme :

$$y_i = a_0 + a_1 x_{i,1} + a_2 x_{i,2} + a_3 x_{i,3} + a_{12} x_{i,1} x_{i,2} + a_{13} x_{i,1} x_{i,3} + a_{23} x_{i,2} x_{i,3} + a_{11} x_{i,1}^2 + a_{22} x_{i,2}^2 + a_{33} x_{i,3}^2 + e_i \quad (\text{C.02})$$

Avec :

$x_{i,1}$: Représente la valeur lue dans la matrice d'expérience pour le i^{eme} traitement, pour le facteur vitesse d'incursion ;

$x_{i,2}$: Représente la valeur lue dans la matrice d'expérience pour le i^{eme} traitement, pour le facteur vitesse linéaire ;

$x_{i,3}$: Représente la valeur lue dans la matrice d'expérience pour le i^{eme} traitement, pour le facteur profondeur d'incursion ;

y_i : Représente la valeur observée de la réponse pour le i^{eme} traitement

e_i : Représente l'écart entre la valeur observée et la valeur calculée de la réponse.

En présence de 13 essais, le système de 13 équations obtenu peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$(Y) = (X).(Coefficients) + (E) \quad (C.03)$$

(X) : représente la matrice du modèle déjà évoqué lors de la construction du plan d'expériences, (Y) : la matrice des réponses S_a , (E) : la matrice des résidus.

On remplace dans l'équation (C.03) les valeurs de x_i par des valeurs codées lues de la matrice d'expériences ainsi que les valeurs des réponses obtenues, on obtient l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} 61,5 \\ 93,4 \\ 25,4 \\ 41,9 \\ 34,1 \\ 37,8 \\ 40,9 \\ 48,3 \\ 115,4 \\ 37,2 \\ 34,3 \\ 37,3 \\ 26 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0,245 & -0,573 & -0,245 & 0,572 & -0,14 & 1 & 0,06 & 0,328 \\ 1 & -0,642 & 0,245 & 1 & -0,157 & -0,642 & 0,245 & 0,412 & 0,06 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -0,103 & -1 & -0,103 & 0,103 & 1 & 1 & 0,01 \\ 1 & -0,642 & 0,245 & 0,751 & -0,157 & -0,482 & 0,184 & 0,412 & 0,06 & 0,564 \\ 1 & 1 & -1 & 0,145 & -1 & 0,145 & -0,145 & 1 & 1 & 0,021 \\ 1 & -1 & 0,245 & 0,196 & -0,245 & -0,195 & 0,048 & 1 & 0,06 & 0,038 \\ 1 & 1 & -1 & -0,487 & -1 & -0,486 & 0,486 & 1 & 1 & 0,237 \\ 1 & 0,313 & -0,204 & -0,849 & -0,064 & -0,266 & 0,173 & 0,098 & 0,041 & 0,72 \\ 1 & -0,742 & 1 & -0,603 & -0,742 & 0,447 & -0,603 & 0,551 & 1 & 0,363 \\ 1 & -0,98 & 1 & -0,687 & -0,98 & 0,673 & -0,687 & 0,96 & 1 & 0,472 \\ 1 & -0,742 & 1 & -0,603 & -0,742 & 0,447 & -0,603 & 0,551 & 1 & 0,363 \\ 1 & -0,98 & 1 & -0,603 & -0,98 & 0,591 & -0,603 & 0,96 & 1 & 0,363 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{23} \\ a_{11} \\ a_{22} \\ a_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \\ e_7 \\ e_8 \\ e_9 \\ e_{10} \\ e_{11} \\ e_{12} \\ e_{13} \end{bmatrix} \tag{C.04}$$

:

Pour estimer les coefficients a_i du modèle mathématique à partir de la méthode des moindres carrés, il suffit de résoudre le système suivant :

$$\begin{cases} Y = X.a + e \\ \frac{\partial e'e}{\partial a} = 0 \end{cases} \tag{C.05}$$

La solution est donc de la forme :

$$\text{Coefficients} = (X'X)^{-1} X'Y \tag{C.06}$$

Telle que :

tX : Transposée de la matrice X ;

$({}^tXX)^{-1}$: Matrice inverse de $({}^tXX)$.

De l'équation (C.06), on obtient les valeurs des coefficients du modèle mathématique (Tableau C.03)

Tableau C.03 : Valeurs des coefficients

Coefficients	Valeurs
a ₀	84,92
a ₁	-58,46
a ₂	-90,57
a ₃	-43,15
a ₁₂	-2,60
a ₁₃	17,15
a ₂₃	-14,97
a ₁₁	-68,04
a ₂₂	-11,65
a ₃₃	10,90

Le modèle mathématique qui va permettre de décrire la rugosité ‘‘S_a’’ est le suivant :

$$y = 84,92 - 58,46x_1 - 90,57x_2 - 43,15x_3 - 2,60x_1x_2 + 17,15x_1x_3 - 14,97x_2x_3 - 68,04x_1^2 - 11,65x_2^2 + 10,9x_3^2 \quad (C.07)$$

Afin de pouvoir faire le test de signification des coefficients du modèle, on calcule les réponses estimées par le modèle obtenues à partir de l'équation suivante:

$$y_{calculé} = (X).(Coefficients) \quad (C.08)$$

Le résidu pour le traitement « i », est défini à partir de la relation :

$$e_i = y_i - y_{i,calculé} \quad (C.09)$$

On remplace les valeurs mesurées et les valeurs calculées pour chaque essai ; on a alors les valeurs des résidus données par le tableau (C.04) :

Tableau C.04 : Estimation des résidus

N	Sa mesuré (µm)	Sa calculé (µm)	Résidu (µm)
01	61,5	61,86341	-0,36341
02	93,4	93,2297164	0,17028358
03	25,4	24,8773012	0,52269875
04	41,9	41,1897218	0,71027823
05	34,1	34,5290656	-0,42906562
06	37,8	38,5581749	-0,75817495
07	40,9	40,8758599	0,02414013
08	48,3	47,8881627	0,4118373
09	115,4	115,45216	-0,05216022
10	37,2	37,216086	-0,016086
11	34,3	33,8134582	0,48654177
12	37,3	37,216086	0,083914
13	26	26,3268006	-0,32680059

C-4 Test de signification des coefficients du modèle

Ce test fait intervenir d'une part les résidus e_i , et d'autre part un estimateur de la variance commun des résidus donné par :

$$s^2 = \frac{1}{n-p} \sum e_i^2 \quad (\text{C.10})$$

Avec :

n : Nombre d'expériences effectuées

p : Nombre des coefficients du modèle mathématique

De la table de *Student* on tire, pour un risque de 5% et $\nu = n - p = 13 - 10 = 3$, la valeur de $t_{\text{critique}}(0,05 ; 3) = 3,182$.

L'effet est significatif au risque de 5% si le test statistique " t_i " correspondant est supérieur à la valeur tirée du tableau de Student, c'est dire à 3,182.

Avec :

$$t_i = \frac{|a_i|}{s_i} \quad (C.11)$$

Et

$$s_i^2 = \frac{s^2}{n} \quad (C.12)$$

Le tableau C.05 regroupe le calcul de t_i

Tableau C.05 : Analyse de signification des effets

Variable	Coefficient	t_i	Résultats
Constante	$a_0 = 84,92$	$t_0 = 355,83 > 3,182$	Significatif
V_{inc}	$a_1 = -58,46$	$t_1 = 244,95 > 3,182$	Significatif
V_{lin}	$a_2 = -90,57$	$t_2 = 379,5 > 3,182$	Significatif
Pro	$a_3 = -43,15$	$t_3 = 180,84 > 3,182$	Significatif
$V_{inc} * V_{lin}$	$a_{12} = -2,60$	$t_{12} = 10,9 > 3,182$	Significatif
$V_{inc} * Pro$	$a_{13} = 17,15$	$t_{13} = 71,88 > 3,182$	Significatif
$V_{lin} * Pro$	$a_{23} = -14,97$	$t_{23} = 62,74 > 3,182$	Significatif
V_{inc}^2	$a_{11} = -68,04$	$t_{11} = 285,12 > 3,182$	Significatif
V_{lin}^2	$a_{22} = -11,65$	$t_{22} = 48,84 > 3,182$	Significatif
Pro^2	$a_{33} = 10,90$	$t_{33} = 45,98 > 3,182$	Significatif

Le calcul de t_i montre que tous les effets sont significatifs car toutes les valeurs sont supérieures à 3,182. L'action de la vitesse linéaire sur la rugosité de la surface abradable après avoir subi la friction est le plus prépondérant avant la vitesse d'incursion et la profondeur. Le moins significatif étant l'interaction entre la vitesse d'incursion et la vitesse linéaire montrée par le coefficient a_{12} .

C-5 Qualité du modèle

C-5-1 Qualité descriptive du modèle :

Rappelons brièvement que le coefficient de qualité se calcule à partir de la relation :

$$R_{ajustè}^2 = 1 - \frac{\frac{SCER}{N-P}}{\frac{STCE}{N-1}} \quad (C.13)$$

Telles que :

$$SCER = \sum (Y_i - Y_i^{est})^2 \quad (C.14)$$

$$STCE = SCEL + SCER \quad (C.15)$$

$$SCEL = \sum (Y_i^{est} - Y_{moy})^2 \quad (C.16)$$

SCER se lit : "Somme des Carrés des Ecart des Résidus".

STCE se lit : " Somme Totale des Carrés des Ecart"

N : Nombre d'expériences effectuées

P : Nombre des coefficients du modèle mathématique

L'application de ces équations donne:

$$R_{ajustè}^2 = 0,99 \quad (C.17)$$

Cette valeur du coefficient ajusté de la qualité descriptive, signifie que le modèle obtenu décrit convenablement le phénomène.

C-5-2 Qualité prédictive du modèle :

Au même titre, on définit maintenant la qualité prédictive du modèle à partir de ce coefficient noté Q^2 , il est calculé suivant la formule :

$$Q^2 = 1 - \frac{PRESS}{SCM} \quad (C.18)$$

Avec:

$$PRESS = \sum_{i=1}^N \frac{(e_i)^2}{(1-h_i)^2} \quad (C.19)$$

Avec h_i le $i^{\text{ème}}$ élément diagonal de la matrice H (*Hat Matrix*) à partir de la relation

$$H = X.(X^t.X)^{-1}.X^t \quad (C.20)$$

Et

$$SCM = y^t.y - y_{moy}^t.y_{moy} \quad (C.21)$$

PRESS se lit: "Prediction Error Sum of Squares "

SCM se lit : Somme des carrés des réponses mesurées (expérimentales) corrigée de la moyenne.

En appliquant ces équations on trouve :

$$Q^2 = 0,86 \quad (C.22)$$

Une qualité prédictive Q^2 égale à 0,86 proche de 1, on peut conclure que notre modèle est acceptable et qu'on peut prédire des valeurs des réponses sans avoir à effectuer les essais tout en étant sûr qu'on ne s'éloigne pas de la réalité.

ANNEXE D

La table de Student

Loi de Student de $t(\alpha, \nu)$													
ν	α												
	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,158	0,325	0,510	0,727	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619
2	0,142	0,289	0,445	0,617	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,598
3	0,137	0,277	0,424	0,584	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,941
4	0,134	0,271	0,414	0,569	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,132	0,267	0,408	0,559	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,859
6	0,131	0,265	0,404	0,553	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,130	0,263	0,402	0,549	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,405
8	0,130	0,262	0,399	0,546	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,335	5,041
9	0,129	0,261	0,398	0,543	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,129	0,260	0,397	0,542	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,129	0,260	0,396	0,540	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,128	0,259	0,395	0,539	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,128	0,259	0,394	0,538	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,128	0,258	0,393	0,537	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,128	0,258	0,393	0,536	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,128	0,258	0,392	0,535	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,128	0,257	0,392	0,534	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,127	0,257	0,392	0,534	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,127	0,257	0,391	0,533	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,127	0,257	0,391	0,533	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,127	0,257	0,391	0,532	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,127	0,256	0,390	0,532	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,127	0,256	0,390	0,532	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,767
24	0,127	0,256	0,390	0,531	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,127	0,256	0,389	0,531	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,690
28	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,659
30	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
40	0,126	0,255	0,388	0,529	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
60	0,126	0,254	0,387	0,527	0,679	0,849	1,046	1,296	1,671	2,000	2,399	2,680	3,460

Références
Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [01] : **S. Li, C. Langlade-Bomba, and D. Treheux.** Mécanismes d'endommagements des matériaux abrasables à base métallique pour turbines : expertises, simulations. Journal de Physique IV, 10 (4): 113–118, 2000
- [02] : **R.E. Chupp.** Development of higher temperature abrasible seals for industrial gas turbines. In NASA Seal/Secondary Air System Workshop, Nov. 5-6, 2003, Ohio Aerospace Institute, Cleveland, OH, 2003
- [03] : **MATHIAS LEGRAND** ; Thèse de Doctorat de L'École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes « MODELES DE PREDICTION DE L'INTERACTION ROTOR/STATOR DANS UN MOTEUR D'AVION »
- [04] : **V. Nezym.** A statistical model for the effect of casing treatment recesses on compressor rotor performance. Experimental Thermal and Fluid Science, 31: 1165–1176, 2007.
- [05] : **Loïc SALLES**, thèse doctorat de l'ÉCOLE DOCTORALE DEMÉCANIQUE DE LYON (UCBL/INSA/ECL) « ÉTUDE DE L'USURE PAR FRETTING SOUS CHARGEMENTS DYNAMIQUES DANS LES INTERFACES FROTTANTES (Application aux pieds d'aubes de turbomachines) »
- [06] : **J.R. Davis & Associates**, Handbook of Thermal Spray Technology; prepared under the direction of the Thermal Spray Society Training Committee; 2004 ASM International
- [07] : **E.R. Novinski.** The design of thermal sprayed abrasible seal coatings for gas turbine engines. In Proceedings of the 4th National Thermal Spray Conference, USA, p.451– 454, 1991
- [08] : **S. AUDISIO, M. CAILLET, A. GALERIE et H. MAZILLE**, « Revêtements et Traitements de Surface », (éd.) Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 1998
- [09] : **L. PAWLOWSKI**, « The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings », (éd.) John Wiley and Sons, Chichester, 1995.
- [10] : **A. PRONER**, « Revêtements par Projection Thermique », (éd.) Techniques de l'Ingénieur, MD, M 1645, p. 1-20, 1999.
- [11] : **N. Zheng, M.A.Daubler, K.K. Schweitzer, W. Hensle, and H. Schlegel.** Development of air seal systems for modern jet engines. 2003.
- [12] : **Fauchais P., Vardelle A., Dussoubs B.**, “Quo vadis thermal spraying”, pp 1-32 of Thermal Spray 2001 : New Surfaces for a New Millennium, Ed. C.C. Berndt, K.A. Khor and E.F. Lugscheider, Pub. ASM international, Materials Park, OH-USA, 1360+ pages (Singapore)

- [13] : **Smith C.W.**, “The basic principles of flame spraying.” Science and Technology of Surface Coating, 1974, pp 262-270
- [14] : **Kreye H.**, “Characteristics of coatings produced by high velocity flame spraying” Paper n° 24.1-24.9, 12th International Thermal Spraying Conference, London, 4-9 June, 1989
- [15] : **Kadyrov E.**, “Gas-particle interaction in detonation spraying systems”, Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 5, No 2, 1996, pp. 185-195.
- [16] : **B. Arsenault, J.G. Legoux, H. Hawthorne**, HVOF Process Optimization for the Erosion Resistance of WC-12Co and WC-10Co-4Cr Coatings: New Surfaces for a New Millennium, (Ed.) C.C Berndt, K.A. Khor, E. Lugscheider, ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2001), pp1051-1060
- [17] : **K. Korpiola, P. Vuoristo**, Effect of HVOF Gas Velocity and Fuel to Oxygen Ratio on the Wear Properties of Tugsten Carbide Coating: Practical Solutions for Engineering Problems, (Ed.) C.C. Berndt, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1996), pp177-184
- [18] : **Sampson E. R.**, “Cored wire application using electric arc spray”, pp 133-137 of "Thermal Spray Meeting the Challenges of the 21st Century" Ed. C. Coddet, Pub. ASM international, Materials Park, OH-USA, 1998, 1693+ pages (Nice)
- [19] : **Smith R.W.**, “Plasma spray processing, the state of the art, and future from a surface to a materials processing technology”, pp 17-38, 2nd Plasma-Technik-Symposium Lucerne, Switzerland, Vol. 1, 5 au 7 june 1991
- [20] : **Jurewicz J., Kaczmark R., Boulos M.I.**, “Radio Frequency Induction Plasma deposition of metals and alloys under reduced pressure”, ISPC 7, Eindhoven, 1985.
- [21] : **P. Fauchais**, Understanding plasma spraying, J. Phys. D : Appl. Phys., 37, p 86-108, (2004).
- [22] : **Fauchais P., Vardelle M.**, “Plasma spraying: present and future”, Pure and Applied Chemistry, Vol. 66, No 6, pp.1247-1258, 1994
- [23] : **Spores R., Pfender E.**, “Flow Structure of a turbulent thermal plasma jet”, Surface and Coating technology, Vol. 37, pp 251-270, 1989.
- [24] : **Muehlberger E.**, “A high energy plasma coating process”, Welding Institute, 7-th International Metal Sparying Conference, 1974, pp 245-256.
- [25] : **Boulos M. I.**, “The inductively coupled RF plasma”, Pure and Applied Chemistry, Vol. 57, No 9, pp 1321-1352, 1985.
- [26] : **X. Wang, D. Zhuang**, Effect of Atomising Gas Pressure on Coating Properties in Wire Arc Spraying: Thermal Spray Science & Technology, (Ed.) C.C. Berndt and S. Sampath, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1995), pp587-592

- [27] : **X. Wang, J. Heberlein, E. Pfender, W. Gerberich**, Effect of Shrouded CO₂ Atomization on Coating Properties in Wire Arc Spraying: Thermal Spray Science & Technology, (Ed.) C.C. Berndt and S. Sampath, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA
- [28] : **Fauchais, A. Grimaud, A. Vardelle, M. Vardelle**, La projection par Plasma : une revue, Annales de Physique Fr., 14, p 261-310, (1989)
- [29] : **P. Fauchais, A. Vardelle, M. Vardelle, A. Denoirjean, B. Pateyron, M. El Ganaoui**, Formation and Layering of Alumina Splats : Thermal History of Coating Formation, Resulting Residual Stresses and Coating Microstructure, In Thermal Spray 2001 : New Surface For a New Millennium, (Ed.) C.C. Brendt, K.A. Khor and E.F. Lugscheider, (pub) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, p 865-874, (2001)
- [30] : **Verdy C.**, “Structures multicouches mises en forme par projection thermique: élaboration, caractérisation et applications”, Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Sévenans, 1998
- [31] : **R. Ghafouri-Azar, S. Shakeri, S. Chandra, J. Mostaghimi**, Interactions between molten metal droplets impinging on a solid surface, International Journal of Heat and Mass Transfer 46, p 1395–1407, (2003)
- [32] : **S. Shakeri, S. Chandra**, Splashing of molten tin droplets on a rough steel surface, International Journal of Heat and Mass Transfer 45, p 4561–4575, (2002)
- [33] : **Shiraz D. Aziz, Sanjeev Chandra**, Impact, recoil and splashing of molten metal droplets, International Journal of Heat and Mass Transfer 43, p 2841-2857, (2000)
- [34] : **O. Knotek, R. Elsing**, Monte-Carlo simulation of the lamellar structure of thermally sprayed coating, Surface & Coatings Technology, 32, p 261-271, (1987)
- [35] : **I. Ahmed, T. L. Bergman**, Thermal modeling of plasma spray deposition of nanostructured ceramics, J. of Thermal Spray Technology, 4 (1), p 315-322, (1995)
- [36] : **M. Pasandideh-Fard, S. Chandra, J. Mostaghimi**, A three-dimensional modèle of droplet impact and solidification, International Journal of Heat and Mass Transfer 45, p 2229– 2242, (2002)
- [37] : **M. Pasandideh-Fard, S. D. Aziz, S. Chandra, J. Mostaghimi**, Numerical simulation of thermal spray coating formation, in Proceedings of the 1st International Thermal Spray Conference, p 125-134, Montréal, Quebec, May 8-11, (Ed.) C.C. Berndt, (Pub.) ASM International Materials Park OH, USA, (2000)
- [38] : **Moreau C., Cielo P., Lamontagne M.**, “Flattening and solidification of thermally sprayed particles”, Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 1, No. 4, 1992, pp. 317- 323.

- [39] : **H.I. Faraoun, J.L. Seichepine, C. Coddet, H. Aourag, J. Zwick, N. Hopkins, D. Sporer, and M. Hertter.** Modelling route for abradable coatings. *Surface & Coatings Technology*, 200: 6578–6582, 2006.
- [40] : **S. Atkinson.** Gas turbines use ‘abradable’ coatings for clearancecontrol seals. *Sealing Technology*, 97: 7–8, 2002.
- [41] : **Sofiane Guessasma, Mokhtar Bounazef, Philippe Nardin, Tahar Sahraoui** “Wear behavior of alumina–titania coatings: analysis of process and parameters” *Ceramics International* 32 (2006) 13–19
- [42] : **D. Chappel.** Status of seal development at technetics. In *NASA Seal / Secondary Air System Workshop*, 2001
- [43] : **F. Ghasripoor, R. Schmid, and M. Dorfman.** Abradable coatings increase gas turbine engine efficiency. *Materials World*, 5 (6): 328–330, 1997.
- [44] : **R. Schmid.** “New high temperature abradables for gas turbines”. Thèse de doctorat de l’institut fédérale suisse de technologie de Zürich, Suisse (1997).
- [45] : **M.O. Borel and R.K. Schmid.** “Abradable Increase Turbine Blade Life”. *Sulzer Technical Review*, 4/1990.
- [46] : **P. Morrell, D.F. Bettridge, M. D. Greaves, M.R. Dorfman, L.D. Russo, C. Britton and K. Harrison.** “A new aluminum-silicon/boron nitride powder for clearance control applications”. *Thermal Spray Meeting the Challenges of the 21st Century* Ed. C. Coddet, Pub. ASM international, Materials Park, OH-USA, Nice. pp1187-1192 (1998)
- [47] : **J. T. DeMasi-Marcin and D. K. Gupta.** “Protective Coatings in the Gas Turbine Engine”. *Surface and Coatings Technology*, 68/69, pp1-9 (1994).
- [48] : **T. Oka, H. Nakahira, T. Noritoh.** “Basic characteristics of different abradable coatings”. *Thermal spraying conference Essen - Editors German Welding Society, Dusseldorf.* pp59-67. 29-31 august 1990.
- [49] : **M. Yi, J. He, B. Huang, and H. Zhou.** Friction and wear behaviour and abradability of abradable seal coating. *Wear*, 231: 47–53, 1999.
- [50] : **C.K. Lin, C.C. Bendt,** Measurement and Analysis of Adhesion Strength for Thermally Sprayed Coating, *Thermal Spray Technology*, Vol. 3 (No.1), 1994, pp75-104
- [51] : **R.E. Chupp.** Development of advanced seals for industrial gas turbines– abradable seals. In *NASA Seal/Secondary Air System Worksho*, NASA Glenn Research Center, Cleveland, OH GE Global Research Center, 2002.
- [52] : **M. Bounazef, S. Guessasma, and B. Ait Saadi.** The wear, deterioration and transformation phenomena of abradable coating bn–sial–bounding organic element, caused by the friction between the blades and the turbine casing. *Materials Letters*,

58: 3375–3380, 2004

- [53] : **Y. Nava, Z. Mutasim, and M. Coe.** Abradable coatings for lowtemperature applications. ITSC 2001, Singapore, ASM International, Material Parks, OH, USA, page 119, 2001
- [54] : **R.C. Hendricks, B.M. Steinetz, and M.J. Braun.** Turbomachine sealing and secondary flows, part 1—review of sealing performance, customer, engine designer, and research issues. Technical report, NASA, 2004.
- [55] : **David J. Whitehouse** “Handbook of surface and nanometrology”/ -- 2nd ed. Rev. ed. of: Handbook of surface metrology, TA418.7.W47 2011
- [56] : **L. PAWLOWSKI**, « The Relationship Between Structure and Dielectric Properties in Plasma-Sprayed Alumina Coatings », Surf. Coat. Technol., 35, p. 285-298, 1988
- [57] : **L. PAWLOWSKI et P. FAUCHAIS**, « Thermal Transport Properties of Thermally Sprayed Coatings », Int. Mater. Reviews, 37(6), p. 271-289, 1992
- [58] : **A. Hadadi, A. Grimaud, A. Denoirjean, F. Nardou, P. fauchais**, « Generation of the first layers of a zirconia plasma sprayed coating, correlation between splat layering and spraying parameters in thermal spray », Pub international, Materials Park, ohio, USA (1995), 249-254
- [59] : **O. Lagnoux**, Projection de poudres métalliques par plasma d’arc soufflé à l’air libre – Etudes de l’entraînement de l’air et de son influence sur l’oxydation des poudres en vol et des dépôts, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, N° d’Ordre 47-1999, 1999.
- [60] : **R. Nieminen, P. Vouristo, K. Niemi, T. Mantyla, G. Barbezat**, Rolling contact fatigue failure mechanisms in plasma and HVOF sprayed WC-Co coatings, Wear, 212, 1997, pp 66-77.
- [61] : **A. Vardelle, P. Fauchais, N. J. Themelis**, Oxidation of metal droplets in plasma sprays, in Advances in Thermal Spray : Science and Technology, (ed.) C. C. Berndt and S. Sampath, (pub.) ASM International, Materials Park, OH, USA, 1995, pp 175-180.
- [62] : **K. Volenik, F. Hanousek, P. Chraska, J. Ilavsky, K. Neufuss**, In-flight oxidation of high-alloy steels during plasma spraying, Material Science and Engineering A, 272, 1999, pp 199-206.
- [63] : **L. Bianchi, A. C. Leger, M. Vardelle, A. Vardelle, P. Fauchais**, Splat formation and cooling of plasmasprayed zirconia, Thin Solid Films, 1997, 305, pp 35-47.
- [64] : **J. Pech, B. Hannyoy, A. Denoirjean, P. Fauchais**, Influence of Substrate preheating monitoring on alumina splat formation in dc plasma process, in Thermal Spray: Surface Engineering via Applied Research, (ed.) C.C. Brendt, (pub.) ASM International, Materials Park, OH, USA, 2000, pp 759-765.

- [65] : **J. Pech**, Préoxydation générée par jet de plasma d'arc soufflé. Relation entre surface, oxydation et adhérence de dépôts, Thèse de Doctorat, Université de Rouen, France, 1999.
- [66] : **J. MADEJSKI**, « Solidification of Droplets on a Cold Surface », Int. J. Heat Mass Transfer., 9, p. 1009-1013, 1976
- [67] : **H. JONES**, « Cooling, Freezing and Substrate Impact of Droplets Formed by Rotary Atomization », J. Phys. D. : Appl. Phys., 4, p. 1657-1660, 1971.
- [68] : **P. fauchais, M. Fukomoto, A. Vardelle, M. vardelle**, (Knowledge concerning splat formation: an invited review), accepted in journal of thermal spray technologie, 2003
- [69] : **M. FUKUMOTO**, (proposal of new criterion for splashing of thermal sprayed particle onto flat substrate surface) in thermal spray 2001
- [70] : **J. Cedelle**, Etude de la formation de lamelles résultantes de l'impact de gouttes millimétrique et micrométriques, Application à la réalisation d'un dépôt par projection plasma, Thèse de l'université de Limoges. N° d'ordre –2005 (2005)
- [71] : **L. BIANCHI**, « Projection par plasma d'arc et plasma inductif de dépôts céramiques : mécanismes de formation de la première couche et relation avec les propriétés mécaniques des dépôts », Thèse de doctorat, Université de Limoges, 1995.
- [72] : **A. HASUI, S. KITAHARA et T. FUKUSHIMA**, « On Relation Between Properties of Coating and Spraying Angle in Plasma Jet Spraying », Transaction of National Research Institute for Metals, 12(1), p. 9-20, 1970.
- [73] : **M. MELLALI**, « Influence de la rugosité et de la température de surface du substrat sur l'adhérence et les contraintes résiduelles au sein de dépôts d'alumine projetés par plasma », Thèse de doctorat, Université de Limoges, 1994.
- [74] : **V. V. KUDINOV, P. Y. PEKSHEV et V. A. SAFIULLIN**, « Forming of the Structure of Plasma Sprayed Materials », High Temp. Dust. Laden Jets, (éd.) Solonenko et Fedorchenko, p. 381-418, 1989.
- [75] : **R. McPHERSON**, « The Relationship Between the Mechanism of Formation, Microstructure and Properties of Plasma-Sprayed Coatings », Thin Solid Films, 83, p. 297-310, 1981.
- [76] : **J. GUYONNET**, Brevet CNRS 124111, 1968
- [77] : **D. BERNARD**, « Projection par plasma de la couche céramique de barrière thermiques ZrO₂- Y₂O₃ – Etude des divers mécanismes rentrant en jeu », Thèse de doctorat, Université de Limoges, 1990.
- [78] : **S. KURODA, T. DENDO et S. KITAHARA**, « Quenching Stress in Plasma Sprayed Coatings and its Correlation with the Deposit Microstructure », J. Thermal Spray Technol., 4(1), p. 75- 84, 1995.

- [79] : **A. OHMORI et C. J. LI**, « Quantitative Characterization of the Structure of Plasma Sprayed Alumina Coatings by Using Copper Electroplating », *Thin Solid Films*, 201, p. 241-252, 1991.
- [80] : **C. J. LI et A. OHMORI**, « Relationships Between the Microstructure and Properties of Thermally Sprayed Deposits », *J. Thermal Spray Technol.*, 11(3), p. 365-374, 2002.
- [81] : **F. Ghasripoor, R. Schmid, and M. Dorfman**. Abradable coatings increase gas turbine engine efficiency. *Materials World*, 5 (6): 328–330, 1997.
- [82] : **I. M. Hutchings**. “Tribology : Friction and Wear of Engineering Materials”. Published in USA and North America by CRC Press, Inc., 2000 Corporate Blvd. Boca Raton, FL 33431. ISBN 0-8493-7764-1, Cat. No. F7764. Published in UK by Arnold, division of Hodder Headline, London. ISBN 0-340-56184 X. (1992).
- [83] : **D. A. Rigney**. “Fundamentals of Friction and Wear of Materials”. Papers presented at the 1980 ASM Materials Science Seminar, 4-5 october 1980, Pittsburgh, Pennsylvania. ISBN 0-87170-115-4 Metals Park, Ohio - American Society for Metals: cop. 1981
- [84] : **W. Tabakoff and A. Hamed**. “Hostile Atmospheric Environment Effects on Jet Engines”. *International Journal of Turbo and Jet engines*, V5, pp1-11 (1988).
- [85] : **M.O. Borel, A.R. Nicoll, H.W. Schläpfer and R.K. Schmid**. “Th wear Mechanisms Occurring in Abradable Seals of Gas Turbines”. *Surface and Coatings Technology*, 39/40, pp117-126 (1989).
- [86] : **Quiniou J.F.**, Description et caractérisation de la topographie des surfaces a l’aide d’outils issus de la géométrie euclidienne et fractale, Thèse, université de Franche-Comté, Besançon (1995).
- [87] : **M.O. Borel**. The wear mechanisms occuring in abradable seals of gas turbines. *Surface & Coatings Technology*, 39/40: 117–126, 1989.
- [88] : **S. Wilson**. “Sulzer Innotec Abradable Facility – Standard Abradability Test Description”. Sulzer Markets and Technology Ltd, Winterthur, Suisse. July 2003
- [89] : **R.K. Schmid and A.R. Nicoll**. “Advances in Abradable Coatings for Gas Turbine”. ASME number 94-GT-449. Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, The Hague, Netherlands, 13-16 June 1994.
- [90] : **M.F. Ashby and S.C. Lim**. “Wear-Mechanism Maps”. *Scripa Metallurgica et Materialia*, Vol. 24, 805-810 (1990).
- [91] : **B. Bhushan**. Surface roughness analysis and measurement techniques. *Modern tribology handbook*, 1 :49–119, 2001.
- [92] : **NFE-05-052**, État de surface des produits : profilomètres d’état de surface a contact,

- AFNOR, 1986, France.
- [93] : **Tholath J and Radhakrishnan V.** 1997. Three dimensional filtering of engineering surfaces using a least squares non parametric B spline surface. *Proc. Inst Mech. Eng.* 211 B 557.
- [94] : **G.E.P. Box, J.S. Hunter**, “The $2k-p$ fractional factorial plans”, *Technometrics*, Vol 4, 1962
- [95] : **R.L. Rechtschaffner**, “Saturated fractions of $2n$ and $3n$ factorial designs”, *Technometrics*, Vol 9, 1967.
- [96] : **Jean-Jacques DROESBEKE, Jeanne FINE, Gilbert SAPORTA**, « Plans d'expériences : applications en entreprise : [7e Journées d'étude en statistique, 1996, Marseille] », l'Association pour la statistique et ses utilisations et la Société statistique de France; Paris : Éd. Technip, 1997 ISBN : 2-7108-0733-5
- [97] : **Michel VIGIER** « Pratique des plans d'expériences : méthodologie Taguchi et compléments », Paris : Les Editions d'Organisation, c1988 ISBN : 2-7081-0850-6
- [98] : Témoignage de l'association Expérimentique [1996-2005]; sous la coordination de **François LOUVET et Luc DELPLANQUE** « Design of experiments : une approche pragmatique et illustrée : the French touch », Orléans : Expérimentique, DL 2005 ISBN : 2-9525126-0-4
- [99] : **Maurice PILLET** « Appliquer la maîtrise statistique des procédés (MSP-SPC) », Paris : les Ed. d'Organisation, 1994 ISBN 2-7081-1774-2 Paris : Ed. d'Organisation, c2000 2e éd. [rev. et augm]. ISBN : 2-7081-2438-2
- [100] : **GOUPY Jacques** «Introduction aux Plans d'expériences». Dunod. Paris. (2001).
- [101] : **Jacques GOUPY** ; LES PLANS D'EXPERIENCES ; Revue MODULAD, 2006 ;
- [102] : **R. Morar, A. Iuga, L. Dascalescu, and A. Samuila**, “Factors which influence the insulation-metal electroseparation”, *J. Electrostatics*, Vol. 30, pp. 403-412, 1993
- [103] : **J.J. Drosbeke J. Fine G. Saporta**, “Plan d'expériences – Application à l'entreprise”, Ed. Technip, 1997.
- [104] : **BOX George.E. P. , HUNTER William G. , HUNTER J. Stuart** «Statistics for Experimenters» deuxième édition. John Wiley and Sons. New-York. 633 pages. (2005).
- [105] : **Stéphane VIVIER** « Stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et application aux dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis » Doctorat délivré conjointement par l'Ecole Centrale de Lille et l'Université des Sciences et Technologies de Lille – préparée au L2EP et soutenue le 11/07/2002
- [106] : **George E P BOX William G HUNTER J Stuart HUNTER** « Statistics for

experimenters an introduction to design data analysis and model building », New York : J. Wiley & Sons, c1978, ISBN : 0-471-09315-7

- [107] : **N.G. Becker**, “Models for the response of a mixture” , J. Royal Statistical Society, Serie B, Vol. 30, pp. 349-358, 1968.
- [108] : **L. Dascalescu, K. Medles, S. Das, M. Younes, A. Mihalcioiu**, “Using Design of Experiments and Virtual Instrumentation to Evaluate the Tribocharging of Pulverulent Materials in Compressed-air Devices”, Conf. Rec. IEEE/IAS Ann. Meet., Berkeley, 2006
- [109] : **F. Louvet, L. Delplanque**, “Les Plans d’expériences une approche pragmatique et illustrée”, Expérimentique, 2005.
- [110] : **L. Eriksson, E. Johansson, N. Kettaneh-Wold, C. Wikström, and S. Wold**, “Design of Experiments. Principles and Applications”. Learnways AB, Stockholm, 2000.

Table de matières

	Pages
Liste des figures.....	i
Liste des tableaux	v
Liste des symboles et notations.....	xiii
Résumé.....	01
Introduction	02

Chapitre I

I- Généralités sur les matériaux abrasables

I-1 Introduction	05
I-2 Définition du revêtement abrasable.....	06
I-3 Fonction des joints abrasables.....	06
I-3-1 Sollicitations du joint en fonctionnement.....	07
I-4 Elaboration des matériaux abrasables.....	08
I-4-1 Principe de la Projection thermique.....	08
a) Projection à la flamme.....	10
b) Projection à la flamme supersonique (HVOF).....	11
c) Projection à détonation.....	12
d) Projection par arc électrique entre deux fils.....	13
e) Projection par plasma.....	14
✓ Formation du jet plasma.....	16
I-5 Préparation de substrat.....	17
I-5-1 Différentes méthodes de traitement	17
✓ Le dégraissage.....	17
✓ Le traitement mécanique	18
I-6 Construction du dépôt	18
I-7 Qualité de dépôt	19
I-8 Famille d'abrasables.....	20
a) Abrasables à base du mélange aluminium – polymère.....	21

Table de matières

b) Les abrasables à base du mélange métaux- lubrifiants solides...	22
c) Les revêtements MCrAlY.....	23
d) Les barrières thermiques.....	23
I-9 Performances d'un joint abrasable.....	23
I-9-1 Bonne usinabilité	24
I-9-2 Résistance à l'érosion.....	24
I-9-3 Résistance à l'oxydation.....	24
I-9-4 Dégagement minimal de chaleur.....	24
I-10 Essais d'abrasabilité.....	24
I-11 Présentation du matériau considéré dans cette étude.....	25
I-11-1 Composition de la Poudre NiCrAl- BN.....	25
I-11-2 Projection de la poudre NiCrAl- BN	28
I-12 Conclusion	31

Chapitre II

II- Aspects de l'usure et de la topographie des surfaces des matériaux abrasables

II-1 Introduction.....	32
II-2 Topographie et texture des surfaces abrasables.....	33
II-3 Origine de la rugosité et de l'irrégularité des surfaces abrasables.....	34
II-3-1 Phénomènes d'oxydation.....	36
a) Oxydation des particules en vol.....	36
b) Oxydation du dépôt en croissance.....	37
✓ Oxydation des lamelles.....	37
✓ Oxydation entre deux passes successives.....	37
c) Oxydation des substrats.....	37
II-3-2 Etalement des particules.....	37
II-3-3 Porosités dues aux contacts.....	40
II-3-3 Fissures inter-lamellaires	41
II-4 Mesure de taux de porosité des éprouvettes.....	42
II-5 Relation entre la morphologie et la fonction des abrasables	44
II-5-1 Localisation du mécanisme d'enlèvement des constituants de	

Table de matières

l'abradable.....	44
II-6 Principaux modes d'usure des abradables.....	46
II-6-1 Usure abrasive.....	46
II-6-2 Usure adhésive	47
II-6-3 Usure corrosive.....	48
II-6-4 Usure érosive.....	48
II-6-5 Usure par fatigue.....	48
II-6-6 Usure par fusion.....	49
II-7 Objectifs des essais de frottement (Banc d'essais).....	49
II-7-1 Description du banc d'essais.....	49
II-8 Carte d'usure	51
II-9 Influence de l'usure sur la texture de la surface abradable.....	52
II-10 Les défauts de surface.....	53
II-11 Caractéristiques et paramètres des surfaces	54
II-11-1 Paramètres classiques à deux dimensions (2D).....	55
a) L'écart arithmétique moyen.....	56
b) L'écart quadratique moyen.....	56
II-11-2 Analyse tridimensionnelle.....	56
a) Moyenne arithmétique des écarts.....	56
b) Moyenne quadratique des écarts	57
II-12 Appareillages de mesure de l'état de surface.....	57
II-12-1 Rugosimètre tactile: mesure avec contact mécanique.....	57
II-12-2 Interféromètre optique: mesure sans contact.....	58
II-13 Conclusion.....	59

Chapitre III

III- Méthode des plans d'expériences

III-1 Introduction.....	61
III-2 Définition.....	62
III-2-1 Facteur.....	63
III-2-2 Réponse.....	65
III-3 Démarche méthodologique d'un plan d'expériences.....	65

Table de matières

III-3-1 Définition des objets et des réponses.....	65
III-3-2 Choix des facteurs et du domaine expérimental.....	66
III-3-3 Proposition d'un modèle.....	66
III-3-4 Estimation des coefficients du modèle.....	66
III-3-5 Validation du modèle.....	66
III-3-6 Mise en œuvre et suivi.....	67
III-4 Plan factoriel.....	67
III-4-1 Calcul des coefficients.....	69
a) Signification de a_0	70
b) Signification de a_1	70
c) Signification de a_{12}	71
III-5 Approche matricielle pour le calcul des plans factoriels complets.....	73
III-6 Méthodologie des surfaces de réponse.....	76
III-6-1 Codage associé aux modèles polynomiaux.....	76
III-6-2 Estimation des coefficients des modèles polynomiaux.....	77
III-7 Analyse statistique des modèles.....	80
III-7-1 Homogénéité de la variance de l'erreur expérimentale.....	81
III-7-2 Test de signification des coefficients du modèle.....	82
a) Estimation de l'erreur de mesure expérimentale.....	82
b) Estimation sur la variance et réalisation du test de signification des effets.....	84
III-7-3 Validation du modèle.....	86
III-7-4 Qualité du modèle.....	87
a) Qualité descriptive du modèle.....	87
b) Qualité prédictive du modèle.....	88
III-8 Conclusion.....	89

Chapitre IV

IV- Approche expérimentale et modélisation du comportement

IV-1 Introduction.....	91
IV-2 Test expérimentaux sur le revêtement abrasable.....	92
IV-2-1 Les données des tests expérimentaux.....	93

Table de matières

IV-2-2 Principe de fonctionnement.....	93
IV-3 Etude de l'usure du dépôt abradable après friction avec l'ailette.....	94
IV-3-1 Analyse des résultats d'essai.....	96
IV-3-2 Modélisation avec la méthode des plans d'expériences.....	97
a) Qualité du modèle.....	99
✓ Qualité descriptive du modèle.....	99
✓ Qualité prédictive du modèle.....	100
IV-3-3 Effet séparé de facteurs sur la distribution des réponses.....	100
a) Illustration de la variation des réponses en fonction de la vitesse d'incursion x_1	100
b) Illustration de la variation des réponses en fonction de la vitesse linéaire (x_2).....	102
c) Illustration de la variation des réponses en fonction de la profondeur d'incursion x_3	104
IV-3-4 Effet de variation d'un paramètre combiné aux 2 valeurs extrêmes d'un deuxième.....	105
a) Effet de la vitesse d'incursion combinée avec les valeurs extrêmes de la vitesse linéaire.....	106
b) Effet de la vitesse d'incursion combinée aux valeurs extrêmes de la profondeur d'incursion.....	107
c) Effet de vitesse linéaire combinée aux valeurs extrêmes de la profondeur d'incursion.....	109
IV-3-5 Effet simultané des trois facteurs sur la distribution des réponses.....	110
a) Surfaces de réponse en fonction simultanée de la profondeur d'incursion et de la vitesse d'incursion.....	111
b) Surfaces de réponse en fonction de vitesse linéaire et la vitesse d'incursion.....	114
c) Surfaces de réponse en fonction de la profondeur d'incursion et la vitesse linéaire.....	117
IV-3-6 Conclusion sur l'étude de l'usure du dépôt abradable.....	119
IV-4 Etude de la texture du dépôt abradable après friction avec l'ailette.....	119
IV-4-1 Description du paramètre de rugosité "S _a ".....	121

Table de matières

IV-4-2 Modélisation de la rugosité avec la méthode des plans d'expériences.....	122
a) Qualités du modèle.....	124
✓ Qualité descriptive du modèle.....	124
✓ Qualité prédictive du modèle.....	124
IV-4-3 Effet séparé de facteurs sur la distribution des réponses.....	124
a) Illustration de la variation des réponses en fonction de la vitesse d'incursion.....	124
b) Illustration de la variation des réponses en fonction de la vitesse linéaire.....	126
c) Illustration de la variation des réponses en fonction de la profondeur d'incursion.....	128
IV-4-4 Effet de variation d'un paramètre combiné aux valeurs extrêmes d'un deuxième.....	129
a) Effet de la vitesse d'incursion combinée avec les valeurs extrêmes de la vitesse linéaire.....	129
b) Effet de la vitesse d'incursion combinée aux valeurs extrêmes de la profondeur d'incursion.....	131
c) Effet de vitesse linéaire combinée aux valeurs extrêmes de la profondeur d'incursion.....	132
IV-4-5 Surfaces de réponse.....	133
a) Surface de réponse en fonction de la profondeur d'incursion et de la vitesse linéaire.....	134
b) Surfaces de réponse en fonction de la vitesse linéaire et la vitesse d'incursion.....	136
c) Surfaces de réponse en fonction simultanée de la profondeur d'incursion et de la vitesse d'incursion.....	139
IV-4-6 Conclusion sur l'étude de la texture et de la rugosité du dépôt abradable après friction avec l'ailette.....	141
IV-5 Conclusion.....	141

Table de matières

Conclusion générale	143
Annexe A	145
Annexe B	151
Annexe C	162
Annexe D	171
Références bibliographiques	172