

Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
Ecole Doctorale Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques

THESE

Présentée pour obtenir le grade de

**Docteur de l'Université de Franche-Comté et de l'Université de
Technologie de Belfort-Montbéliard en Sciences pour l'Ingénieur**

Présentée et soutenue publiquement le 4 décembre 2007 par

Abdoul-Fatah KANTA

**Développement d'un système expert basé sur l'intelligence
artificielle pour la prédiction et le contrôle du procédé
de projection plasma**

Rapporteurs

- Christopher C. BERNDT, Professeur, James Cook University, Townsville, Australie
- Michel VARDELLE, Professeur, Faculté des Sciences, Université de Limoges, France

Examineurs

- Christian CODDET, Professeur, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Sévenans, France
- Ghislain MONTAVON, Professeur, Faculté des Sciences, Université de Limoges, France
- Marie-Pierre PLANCHE, Maître de Conférences, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Sévenans, France
- Daniel RIVOLET, Ingénieur, Sulzer-Metco France, Bron, France
- Stephan SIEGMANN, Docteur, EMPA, Thun, Suisse

Remerciements

Je tiens à remercier le Professeur Christian Coddet, pour l'accueil qu'il m'a réservé au sein du laboratoire.

Je remercie Professeur Ghislain Montavon de l'Université de Limoges pour avoir dirigé cette étude et m'avoir fait partager son savoir faire et sa rigueur scientifique, ainsi que ses multiples compétences. Qu'il soit assuré de toute ma gratitude et de ma reconnaissance.

A Marie-Pierre Planche, Maître de Conférences de l'Université de Technologie Belfort-Montbéliard, pour les précieux conseils qu'elle m'a donnés, et qui ont contribué au bon déroulement de ce travail. Qu'il me soit permis de la remercier pour la confiance qu'elle m'a accordée pendant ces trois années.

Merci au Professeur Michel Vardelle de l'Université de Limoges et au Professeur Christopher Berndt de *James Cook University* de Townsville pour avoir accepté d'être membres du jury et de juger ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude.

Merci également à monsieur Daniel Rivolet de Sulzer-Metco France et à monsieur Stephan Siegmann de l'EMPA, Suisse pour m'avoir fait l'honneur de faire partie de mon jury.

J'étends ces remerciements à l'ensemble des membres du LERMPS pour l'entraide dont ils ont toujours fait preuve et l'ambiance amicale qu'ils ont su faire régner au LERMPS et ailleurs. Chacun a toujours mis en avant ses compétences et son enthousiasme pour contribuer de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Enfin, je tiens tout particulièrement à remercier ma famille, mes amis et tous ceux qui voudront bien se reconnaître ici, pour leurs constants encouragements, leurs conseils pratiques, les discussions fructueuses et pour tout ce qui a permis de mener à terme cette étude.

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	I
Liste des Figures.....	IV
Liste des Tableaux.....	IX
Nomenclature.....	X
1. Préambule.....	1
1.1 Introduction.....	5
1.2 Principe de la projection thermique.....	5
1.3 Différents paramètres opératoires.....	9
1.3.1. Paramètres relatifs aux matériaux d'apport.....	10
1.3.2. Paramètres d'injection de la poudre.....	13
1.3.3. Paramètres cinématiques.....	14
1.3.4. Paramètres relatifs à l'interaction dépôt/substrat.....	15
1.3.5. Paramètres environnementaux.....	16
1.3.6. Paramètres énergétiques.....	17
1.4 Instabilités du pied d'arc et érosion des électrodes.....	18
1.5 Contrôle du procédé.....	21
2.1. Introduction.....	25
2.2. Modèles.....	26
2.3. Méthodes de construction.....	26
2.4. Réseau de neurones artificiels.....	27
2.4.1. Principe du fonctionnement.....	29
2.4.2. Constitution de la base de données.....	30
2.4.3. Architecture du RNA.....	33
2.4.4. Apprentissage.....	33
a. Estimation des paramètres.....	35
b. Calcul du gradient.....	36
c. Algorithme du gradient.....	37
d. Algorithmes de minimisation du second ordre.....	38
2.4.5. Initialisation des paramètres.....	38
2.4.6. Règles d'arrêt des algorithmes.....	39
2.5. Concepts de la logique floue.....	39
2.5.1. Commande floue.....	40

2.5.2.	Variables floues	40
2.5.3.	Règles linguistiques	42
2.5.4.	Fuzzification	42
2.5.5.	Règles d'inférences.....	42
2.5.6.	Défuzzification	43
a.	<i>Méthode du centre de gravité</i>	44
b.	<i>Méthode du maximum</i>	44
c.	<i>Méthode de la moyenne des maxima</i>	44
2.5.7.	Avantages et limites de la logique floue.....	45
2.5.8.	Application au contrôleur flou.....	45
2.6.	Conclusion.....	46
3.1.	Introduction	47
3.2.	Poudre.....	47
3.3.	Substrats	51
3.4.	Préparation des substrats	51
3.5.	Montage expérimental	53
3.5.1.	Paramètres de projection	55
3.5.2.	Campagnes d'essais	56
3.5.3.	Diagnostic des particules en vol	58
3.5.4.	Mesure de la température des dépôts.....	59
3.6.	Préparation des couches	62
3.6.1.	Tronçonnage	62
3.6.2.	Enrobage.....	62
3.6.3.	Polissage.....	62
3.7.	Etude structurale des dépôts	64
3.7.1.	Morphologie des dépôts	64
a.	<i>Epaisseur du dépôt</i>	66
b.	<i>Taux de porosité</i>	66
3.7.2.	Propriétés mécaniques des dépôts	67
<i>Microdureté du dépôt</i>	67	
3.8.	Conclusion.....	68
4.1.	Introduction	69
4.2.	Application de l'intelligence artificielle.....	70
4.2.1.	Réseau de neurones artificiels	70

4.2.2.	Logique floue.....	73
4.3.	Effets des paramètres de puissance	76
4.3.1.	Représentation des résultats.....	76
4.3.2.	Caractéristiques du jet de plasma	76
a.	<i>Puissance nette</i>	76
b.	<i>Tension aux bornes des électrodes</i>	80
c.	<i>Enthalpie</i>	84
4.3.3.	Caractéristiques moyennes des particules en vol	86
a.	<i>Flux des particules</i>	86
b.	<i>Vitesse et température moyennes</i>	90
4.3.4.	Propriétés du dépôt	94
a.	<i>Épaisseur moyenne déposée par passe</i>	94
b.	<i>Taux global de porosité</i>	97
c.	<i>Microdureté</i>	100
4.4.	Synthèse.....	104
4.5.	Prédiction des paramètres opératoires en fonction des attributs structuraux du dépôt	106
4.5.1.	Paramètres de puissance en fonction du taux de porosité	107
4.5.2.	Paramètres de puissance en fonction de la dureté requise.....	109
4.5.3.	Paramètres de puissance en fonction de l'épaisseur moyenne	110
4.5.4.	Paramètres de l'étalement des particules.....	112
4.5.5.	Estimation du temps de vol et du temps de fusion	116
4.6.	Contrôle du procédé	121
4.6.1.	Variantes du problème.....	121
4.6.2.	Principe du contrôle.....	123
4.6.3.	Critères de corrections	124
4.6.4.	Fonctionnement du régulateur	127
4.7.	Conclusion.....	130
5.	Conclusion générale et perspectives.....	131
	Bibliographie	136

Liste des Figures

Figure 1	Principe du système intelligent de la prédiction et du contrôle flou du procédé de la projection plasma.	3
Figure 2	Schéma synthétique du principe de la projection plasma.	6
Figure 3	Interactions entre les différents paramètres intervenant au cours d'une projection thermique.	10
Figure 4	Démarche générale de construction heuristique d'un modèle structurel.	27
Figure 5	Neurone formel.	28
Figure 6	Structure générique d'un RNA	30
Figure 7	Principe d'apprentissage	34
Figure 8	Nœuds d'un réseau quelconque.	36
Figure 9	Architecture classique d'un système à base de la logique floue.	40
Figure 10	Exemple de partition floue des variables du problème.	41
Figure 11	Analyseur Coulter LS130.	47
Figure 12	Distribution granulométrique de la poudre METCO 130.	48
Figure 13	Observation au microscope électronique à balayage (MEB) en mode électrons rétro-diffusés ou BSE (Back Scattering Electrons), $\times 200$ et $\times 500$ respectivement de la poudre $\text{Al}_2\text{O}_3 - 13\%$ masse TiO_2 (Metco 130).	49
Figure 14	Analyse de la composition chimique de la poudre par spectroscopie dispersive en énergie (EDS) : a) zone blanche (rutile); b) zone grise (alumine).	50
Figure 15	Profil de la rugosité de la surface des substrats.	53
Figure 16	Configuration d'essai.	54
Figure 17	Disposition de mesure.	58
Figure 18	Mesure de la température du dépôt.	60
Figure 19	Evolution du gaz porteur.	61
Figure 20	Profil général de la distribution radiale de l'intensité lumineuse émise par les particules en vol.	61
Figure 21	Dispositif Buehler Vanguard de polissage des échantillons.	64
Figure 22	Observation en coupe d'un dépôt d'alumine-rutile par microscope électronique à balayage en mode électrons secondaires (SE), $\times 1000$.	65
Figure 23	Isolation des profils du substrat et du dépôt: (a) section du dépôt, (b) seuillage à deux niveaux avec application des opérateurs morphologiques ouverture / fermeture, (c) construction des profils et calcul de l'épaisseur du dépôt	66

Figure 24	Processus de prédiction et du contrôle développés.	70
Figure 25	Illustration de la prédiction par réseau de neurones artificiels.	71
Figure 26	Interface utilisateur.	72
Figure 27	Aperçu de la boîte de dialogue.	73
Figure 28	Variation de la puissance nette en fonction de l'intensité de courant d'arc ($V_{\text{Total}} = 50 \text{ NI.min}^{-1}$, $V_{\text{H2/Ar}} = 25 \%$).	77
Figure 29	Variation de la puissance nette en fonction du taux massique d'hydrogène ($V_{\text{Total}} = 50 \text{ NI.min}^{-1}$, $I = 530 \text{ A}$). Les barres d'erreur représentent la variabilité du taux d'hydrogène.	78
Figure 30	Variation de la puissance nette en fonction du débit total des gaz plasmagènes (taux volumique d'hydrogène : $V_{\text{H2/Ar}} = 25 \%$, $I = 530 \text{ A}$). Les barres d'erreur représentent la variabilité du débit.	79
Figure 31	Variation de la tension en fonction de l'intensité de courant d'arc ($V_{\text{Total}} =$ 50 NI.min^{-1} , $V_{\text{H2/Ar}} = 25\%$).	81
Figure 32	Variation de la tension en fonction du taux massique d'hydrogène ($V_{\text{Total}} =$ 50 NI.min^{-1} , $I = 530 \text{ A}$). Les barres d'erreur représentent la variabilité du taux d'hydrogène.	82
Figure 33	Variation de la tension en fonction du débit total des gaz plasmagènes (taux volumique d'hydrogène : $V_{\text{H2/Ar}} = 25 \%$, $I = 530 \text{ A}$). Les barres d'erreur représentent la variabilité du débit.	83
Figure 34	Variation de l'enthalpie du jet en fonction de l'intensité de courant d'arc ($V_{\text{Total}} = 50 \text{ NI.min}^{-1}$, $V_{\text{H2/Ar}} = 25$).	84
Figure 35	Variation de l'enthalpie du jet en fonction du taux d'hydrogène ($V_{\text{Total}} =$ 50 NI.min^{-1} , $I = 530 \text{ A}$). Les barres d'erreur représentent la variabilité du taux d'hydrogène.	85
Figure 36	Variation de l'enthalpie du jet en fonction du débit total des gaz plasmagènes (taux volumique d'hydrogène : $V_{\text{H2/Ar}} = 25\%$, $I = 530 \text{ A}$). Les barres d'erreur représentent la variabilité du débit.	86
Figure 37	Variation de l'intensité du flux des particules en fonction de l'intensité de courant d'arc ($V_{\text{Total}} = 50 \text{ NI.min}^{-1}$, $V_{\text{H2/Ar}} = 25\%$). Les barres d'erreur représentent l'écart type sur le flux mesuré.	87
Figure 38	Variation de l'intensité du flux des particules en fonction du taux d'hydrogène ($V_{\text{Total}} = 50 \text{ NI.min}^{-1}$, $I = 530 \text{ A}$). Les barres d'erreur x représentent la variabilité du taux d'hydrogène et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur le flux mesuré.	88
Figure 39	Variation de l'intensité du flux des particules en fonction du débit total	89

	des gaz plasmagènes (taux volumique d'hydrogène : $V_{H_2/Ar} = 25\%$, $I = 530$ A). Les barres d'erreur x représentent la variabilité du débit et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur le flux mesuré.	
Figure 40	Variation des caractéristiques des particules en vol (vitesses et températures) en fonction de l'intensité de courant d'arc ($V_{Total} = 50$ $Nl.min^{-1}$, $V_{H_2/Ar} = 25\%$). Les barres d'erreur représentent l'écart type sur les vitesses et températures mesurées.	90
Figure 41	Variation des caractéristiques des particules en vol (vitesses et températures) en fonction du taux d'hydrogène ($V_{Total} = 50$ $Nl.min^{-1}$, $I = 530$ A). Les barres d'erreur x représentent la variabilité du taux d'hydrogène et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur les vitesses et températures mesurées.	91
Figure 42	Variation des caractéristiques des particules en vol (vitesses et températures) en fonction du débit total des gaz plasmagènes (taux volumique d'hydrogène : $V_{H_2/Ar} = 25\%$, $I = 530$ A). Les barres d'erreur x représentent la variabilité du débit et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur les vitesses et températures mesurées.	93
Figure 43	Evolution de l'épaisseur de dépôt par passe en fonction de l'intensité de courant ($V_{Total} = 50$ $Nl.min^{-1}$, $V_{H_2/Ar} = 25\%$). Les barres d'erreur représentent l'écart type sur l'épaisseur.	95
Figure 44	Evolution de l'épaisseur de dépôt par passe en fonction du taux massique d'hydrogène ($V_{Total} = 50$ $Nl.min^{-1}$, $I = 530$ A). Les barres d'erreur x représentent la variabilité du taux d'hydrogène et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur l'épaisseur.	96
Figure 45	Evolution de l'épaisseur de dépôt par passe en fonction du débit total des gaz plasmagènes ($I = 530$ A, $V_{H_2/Ar} = 25\%$). Les barres d'erreur x représentent la variabilité du débit et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur l'épaisseur.	97
Figure 46	Evolution du taux de porosité en fonction de l'intensité de courant ($V_{Total} = 50$ $Nl.min^{-1}$, $V_{H_2/Ar} = 25\%$). Les barres d'erreur représentent l'écart type sur la porosité.	98
Figure 47	Evolution du taux de porosité en fonction du taux d'hydrogène ($V_{Total} = 50$ $Nl.min^{-1}$, $I = 530$ A). Les barres d'erreur x représentent la variabilité du taux d'hydrogène et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur la porosité.	99
Figure 48	Evolution du taux global de porosité du dépôt en fonction du débit total	100

	des gaz plasmagènes ($V_{H_2/Ar} = 25\%$, $I = 530$ A). Les barres d'erreur représentent x représentent la variabilité du débit et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur la porosité.	
Figure 49	Evolution de la dureté moyenne du dépôt en fonction de l'intensité de courant ($V_{Total} = 50$ $Nl.min^{-1}$, $V_{H_2/Ar} = 25\%$). Les barres d'erreur représentent l'écart type sur la dureté.	101
Figure 50	Evolution de la dureté moyenne du dépôt en fonction du taux d'hydrogène ($V_{Total} = 50$ $Nl.min^{-1}$, $I = 530$ A). Les barres d'erreur x représentent la variabilité du taux d'hydrogène et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur la dureté.	102
Figure 51	Evolution de la dureté moyenne du dépôt en fonction du débit total des gaz plasmagènes ($V_{H_2/Ar} = 25\%$, $I = 530$ A). Les barres d'erreur x représentent la variabilité du débit et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur la dureté.	103
Figure 52	Méthodologie mise en application pour prédire les paramètres du processus en fonction des attributs structuraux.	105
Figure 53	Prédiction des paramètres de puissance en fonction du taux de porosité désiré.	107
Figure 54	Prédiction des caractéristiques des particules en vol correspondant aux paramètres de puissance en fonction du taux de porosité désiré.	108
Figure 55	Prédiction des paramètres de puissance en fonction de la dureté de dépôt requise.	109
Figure 56	Prédiction des caractéristiques des particules en vol correspondant aux paramètres de puissance en fonction de la dureté de dépôt requise.	110
Figure 57	Prédiction des paramètres opératoire en fonction de l'épaisseur du dépôt désirée.	111
Figure 58	Prédiction des caractéristiques des particules en vol correspondant aux paramètres de puissance en fonction de l'épaisseur du dépôt désirée.	112
Figure 59	Degré d'étalement et nombre de Sommerfeld liés aux caractéristiques des particules en vol correspondant aux paramètres de puissance prédits en fonction de la dureté de dépôt désirée.	114
Figure 60	Degré d'étalement et nombre de Sommerfeld liés aux caractéristiques des particules en vol correspondant aux paramètres de puissance prédits en fonction de la porosité du dépôt désirée.	115
Figure 61	Degré d'étalement et nombre de Sommerfeld liés aux caractéristiques des particules en vol correspondant aux paramètres de puissance prédits en	116

	fonction de l'épaisseur du dépôt désirée.	
Figure 62	Modèle de la particule.	117
Figure 63	Prédiction des vitesses et températures des particules en fonction de leurs diamètres.	118
Figure 64	Temps de vol et temps de fusion des particules en vol en fonction de leurs diamètres.	119
Figure 65	Index de fusion.	120
Figure 66	Processus de correction à base de la logique floue.	122
Figure 67	Boucle de régulation floue.	123
Figure 68	Système expert intelligent de régulation du procédé de projection plasma.	128
Figure 69	Interface utilisateur de régulation.	129

Liste des Tableaux

Tableau 1	Caractéristiques des différents procédés en projection thermique.	8
Tableau 2	Propriétés de l'alumine et du rutile.	12
Tableau 3	Limites physiques des paramètres du processus de projection plasma considéré dans cette étude.	32
Tableau 4	Opérateurs les plus utilisés.	43
Tableau 5	Principales caractéristiques du substrat.	51
Tableau 6	Paramètres du profilomètre Surtronic.	52
Tableau 7	Paramètres moyens de rugosité.	53
Tableau 8	Paramètres opératoires.	55
Tableau 9	Variation des paramètres opératoires.	57
Tableau 10	Paramètres du polissage automatique.	63
Tableau 11	Valeurs expérimentales des caractéristiques en vol des particules et du dépôt.	68
Tableau 12	Décomposition des paramètres opératoires.	74
Tableau 13	Synthèse des résultats obtenus.	104
Tableau 14	Paramètres du degré d'étalement suivant plusieurs auteurs.	106
Tableau 15	Effets des paramètres opératoires de puissance sur les caractéristiques moyennes en vol des particules (vitesse et température).	122
Tableau 16	Corrections des paramètres de puissance en fonction de l'amplitude des variations des caractéristiques en vol des particules.	126
Tableau 17	Comparaison entre les différentes méthodes de prédiction.	132
Tableau 18	Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites.	133
Tableau 19	Comparaison entre le RNA et la LF.	134

Nomenclature

Symbole	Signification	Unités
Ar+H ₂	Débit total massique ou volumique des gaz plasmagènes	g.min ⁻¹ ou Nl.min ⁻¹
Bi	Nombre adimensionné de Biot	
C _p	Chaleur spécifique à pression constante	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
ddl	Degré de liberté (nombre de paramètres opératoires considérés)	
d _I	Distance d'injection	mm
d _p	Diamètre des particules en vol	μm
d _{proj}	Distance de projection	mm
D	Dureté	HV
D _e	débit de l'eau de refroidissement	l.min ⁻¹
$e^k = y_p^k - y^k$	Erreur relative à l'exemple k	
f	Fonction d'activation d'un neurone	
$g(x, \theta)$	Fonction réalisée par un modèle prédictif de paramètres θ	
h	Matrice hessienne ou Hessien	
H ₂ /Ar	Taux massique ou volumique d'hydrogène	%
I	Intensité de courant d'arc	A
I_n	Matrice identité de rang n	
IA	Intelligence artificielle	
IF	Index de fusion	
$J(\theta)$	Coût total	
$J^k(\theta)$	Coût partiel relatif à l'exemple k	
K	Nombre adimensionné de Sommerfeld	
K _f	conductivité thermique à l'état de fusion	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
LF	Logique floue	
n	Nombre d'entrées d'un réseau de neurones	
n_c	Nombre de neurones cachés	
n_s	Nombre de neurones de sortie	

P	Taux global de porosité	%
q_i^k	Valeurs rétropropagées	
Q_{poudre}	Débit massique de poudre	kg.s^{-1}
Q_{GP}	Débit volumique de gaz porteur	Nl.min^{-1}
Re	Nombre adimensionné de Reynolds	
RNA	Réseau de neurones artificiels	
RNA^{-1}	Réseau de neurones artificiels inverse	
T_{amb}	Température ambiante	K
T_e	Température d'entrée d'eau	K
T_p	Température de surface des particules en vol	K
T_s	Température de sortie d'eau	K
u.a	Unité arbitraire	
V_p	Vitesse des particules en vol	m.s^{-1}
V_{proj}	Vitesse de projection	m.s^{-1}
v_i^k	Valeur du potentiel au $i^{\text{ième}}$ nœud (entrée du réseau de neurones, ou potentiel d'un neurone) pour $k^{\text{ième}}$ exemple de l'ensemble d'apprentissage	
We	Nombre adimensionné de Weber	
x	Matrice (N,n) certaine de l'expérience	
\mathbf{x}	Vecteur des entrées secondaires d'un modèle	
\mathbf{x}^k	Valeur du vecteur \mathbf{x} pour l'exemple k	
$x_i^k = [x]_{ki}$	Éléments de la matrice x	
Y	Épaisseur moyenne déposée par passe	μm
$y(\theta)$	Vecteur des N valeurs $\{g(\mathbf{x}^k, \theta)\}$ fournies par la sortie d'un modèle	
Y^k	Variable aléatoire exprimant la sortie d'un modèle relative à l'entrée \mathbf{x}^k	
Y_p^k	Variable aléatoire exprimant la sortie mesurée sur un processus relative à l'entrée \mathbf{x}^k	
α	Angle d'injection	degré
δ	Cordon	
μ	Pas de progression dans la direction de descente	

μ_p	Viscosité dynamique des particules à impact	Pa.s^{-1}
ξ	Degré d'étalement	
ρ_p	Masse volumique des particules à l'impact	kg.m^{-3}
σ_p	Tension superficielle des particules à impact	N.m^{-1}
θ_p	Vecteur des paramètres certain et inconnu	
Δt_{fusion}	Temps de fusion	ms
Δt_{vol}	Temps de vol	ms
Φ_{anode}	Diamètre d'anode	mm
Φ_{inj}	Diamètre interne de l'injecteur de poudre	mm

1. Préambule

La projection thermique est une technique qui permet de produire des dépôts de matière à la surface de composants mécaniques afin de leur conférer des propriétés d'usage spécifiques. Parmi les techniques de projection thermique, le procédé de projection à la torche à plasma est l'un des plus utilisés et les applications des dépôts réalisés par cette technique sont nombreuses et diverses [1]. Ce procédé consiste à injecter des particules solides (entre 10 et 100 μm de diamètre moyen généralement) dans un jet de gaz, dont la température atteint couramment 12000K et la vitesse 1500 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ et dans lequel elles sont fondues et simultanément accélérées avant de s'écraser sur la surface à revêtir. Ces particules forment, après impact, étalement et solidification, des lamelles de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres de diamètre et de quelques micromètres d'épaisseur. C'est de l'empilement de ces lamelles que résulte le dépôt.

Le dépôt obtenu par ce procédé présente un ensemble de propriétés qui dérive directement de sa structure et qui est par ailleurs indirectement couplé aux paramètres opératoires. En effet, les propriétés des dépôts dérivent des caractéristiques à l'impact des particules fondues (quantité de mouvement, viscosité, etc.) ; les caractéristiques à l'impact des particules fondues dérivent des caractéristiques thermodynamiques du jet de plasma ; les caractéristiques thermodynamiques du jet de plasma découlent de l'ajustement des paramètres opératoires.

Ainsi, malgré la grande variété d'applications des dépôts obtenus par projection plasma, certains phénomènes mis en jeu dans ce procédé méritent encore aujourd'hui de s'attarder sur leur origine, de mieux comprendre leur interaction avec le jet et d'approfondir leurs incidences sur le dépôt produit. En particulier, le comportement dynamique de l'arc électrique et sa relation avec les électrodes sont d'un intérêt tout prioritaire puisqu'ils se traduisent par des fluctuations de la tension d'arc, fluctuations qui génèrent à leur tour des variations d'énergie fournie au gaz plasma et qui introduisent finalement un caractère fortement aléatoire dans le procédé. Ces phénomènes, qui ne sont pas sans conséquences sur la reproductibilité des résultats, portent sur l'usure de l'électrode et les instabilités intrinsèques du jet : la puissance nette du jet plasma change en modifiant de manière significative ses propriétés et les

coefficients thermodynamiques de transport, par conséquent la quantité de mouvement et les transferts thermiques aux particules.

Pour limiter les effets de ces instabilités sur la qualité des dépôts, l'une des actions envisagée est de contrôler les caractéristiques en vol des particules (température de surface, vitesse, diamètre et flux) et de chercher à les maintenir constantes au cours de la construction du dépôt. Différents systèmes de diagnostic sont actuellement disponibles sur le marché et permettent d'obtenir, avec plus ou moins de pertinence en fonction des systèmes, les informations souhaitées sur les particules en vol. En revanche, un système qui fasse le lien entre caractéristiques des particules en vol et paramètres opératoires et qui permette d'interagir avec le procédé en cours de projection reste à créer en grande partie. C'est le travail développé pendant cette thèse, qui concerne la mise en place d'un système expert basé sur des méthodes d'intelligence artificielle. Beaucoup de laboratoires travaillent sur le contrôle des procédés de projection thermique avec des approches différentes. Actuellement aucune équipe n'a développé l'approche basée sur l'utilisation de l'intelligence artificielle, bien que l'équipe du Professeur Lugscheider à l'institut des sciences matériaux de l'Université de Technologie d'Aachen (Allemagne) ait débuté des travaux visant à exploiter les possibilités des réseaux de neurones artificiels [2], sans viser toutefois la mise au point d'un contrôleur.

Ce système expert met en coopération deux méthodes d'intelligence artificielle : les réseaux de neurones artificielles (RNA) - afin de prédire les paramètres opératoires pour des conditions données - et la logique floue (LF) pour définir la stratégie de régulation des paramètres opératoires afin de tenir compte des fluctuations et des instabilités inhérentes au procédé. Les travaux de thèse de S. Guessasma [3], débutés en 2000 et soutenus en 2003, ont démontré la faisabilité des réseaux de neurones artificielles (RNA) à constituer des outils d'analyse et d'interprétation pouvant être mis en œuvre dans le cadre général de la réalisation de dépôts par projection plasma. Par ailleurs, la logique floue permet une approche novatrice par rapport à l'automatique classique pour le contrôle d'un processus [4] puisque les systèmes flous basés sur des règles linguistiques permettent de prendre en compte les états intermédiaires entre "le tout et le rien" [5].

Ainsi, l'originalité de l'approche envisagée concerne non seulement la prise en compte de l'ensemble des paramètres opératoires mais également la prise en compte des non-linéarités des effets couplés entre ces mêmes paramètres. Le système proposé dans le cadre de cette thèse devrait permettre, une fois implanté réellement sur une installation de projection, un pilotage total des paramètres opératoires en imposant de respecter une ou plusieurs données de consigne du procédé afin de pallier aux problèmes des fluctuations et d'instabilités liées notamment à l'usure de la torche. Ce système, illustré par la Figure 1, repose sur deux unités principales, à savoir l'unité de prédiction (RNA) et l'unité de régulation floue.

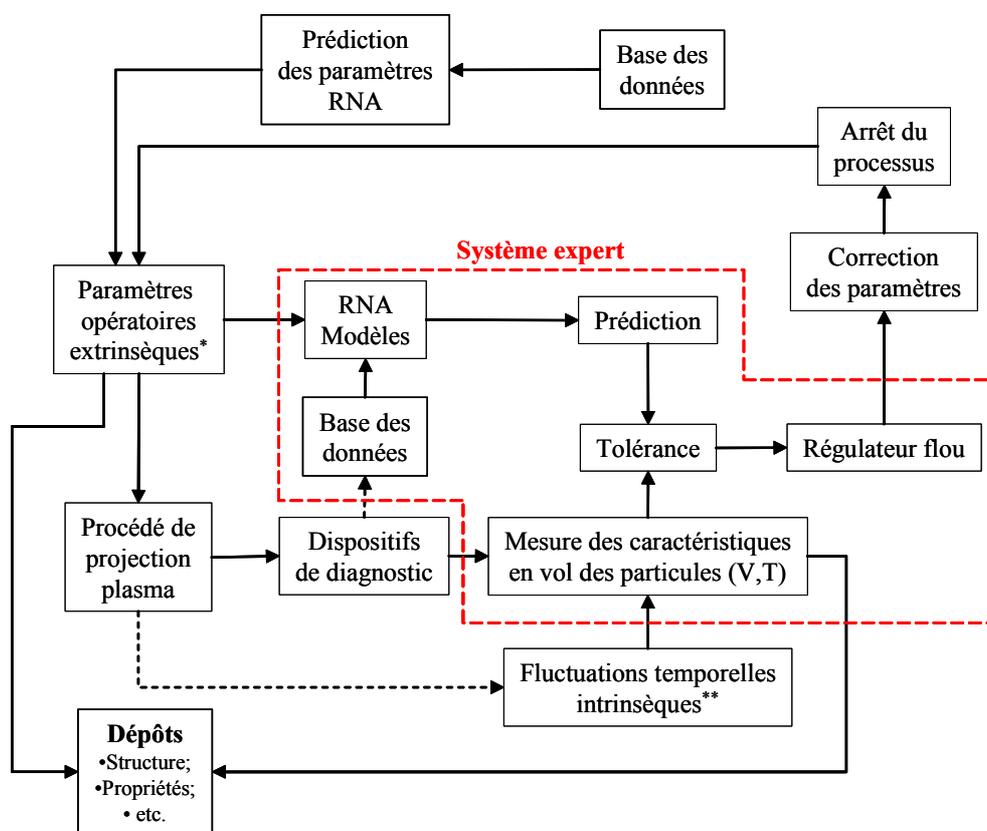


Figure 1 : Principe du système intelligent de la prédiction et du contrôle flou du procédé de la projection plasma (* paramètres directement ajustables par l'opérateur, dits paramètres extrinsèques ; ** paramètres non ajustables directement par l'opérateur, dits paramètres intrinsèques).

L'unité RNA permet de prédire les paramètres à atteindre (combinaison possible pour tendre vers la valeur cible) alors que le régulateur corrige les écarts en tenant compte de certaines dérives et fluctuations pouvant être diagnostiquées. Pour se faire, trois paramètres opératoires, dits paramètres de puissance de la torche, ont été retenus pour

les ajustements : l'intensité de courant d'arc, le débit total des gaz plasmagènes en considérant un mélange binaire Ar + H₂ (mélange majoritairement utilisé sur les torches mono-cathodes) et la fraction d'hydrogène de ce mélange.

L'objectif initial de la démarche proposée dans ce travail est de démontrer l'intérêt de la méthodologie et de la valider. Afin de comprendre les interactions qui interviennent, cette démarche s'est décomposée en deux étapes : la prédiction en fonction des paramètres opératoires (RNA et LF) et la prédiction en fonction des propriétés des dépôts désirés (RNA). Pour consolider les résultats, un modèle analytique a permis de déduire l'influence des paramètres expérimentaux sur l'écrasement des particules sur le substrat (degré d'étalement, nombre de Reynolds, index de fusion, etc.).

Compte tenu de la complexité des effets des paramètres opératoires et de la synergie de certains de leurs effets, cette étude s'est focalisée pour l'essentiel au diagnostic des caractéristiques en vol des particules et à l'ajustement des mesures de ces caractéristiques à leurs valeurs de référence en agissant sur les seuls paramètres de puissance. La méthodologie globale et les étapes clés du processus ont été validées par des mesures expérimentales. Ces mesures ont servi d'une part à construire la base de données expérimentale et d'autre part à mettre au point les règles du système intelligent.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à la présentation du contexte général de l'étude, à savoir le procédé de projection plasma et les paramètres opératoires, les phénomènes de dérives et les fluctuations de l'arc. Dans le deuxième chapitre, le concept d'intelligence artificielle qui a servi de base au développement du système expert (outil de prédiction et du contrôle) est détaillé. Les dispositifs expérimentaux et la méthodologie utilisée pour mener à bien cette étude, tant au niveau du procédé que des techniques de caractérisation des particules et des dépôts font l'objet du troisième chapitre. L'analyse de l'interaction entre les paramètres opératoires, les caractéristiques des particules en vol et les propriétés du dépôt d'une part, et, l'ajustement des paramètres opératoires pour corriger les fluctuations et dérives inhérentes d'autre part, est exposé dans le quatrième chapitre. Une conclusion présente un bilan de cette étude et propose des perspectives à ce travail.

CHAPITRE I :

CONTEXTE DE L'ETUDE

1.1 Introduction

La projection thermique est une technique permettant de créer un revêtement sur une surface afin de conférer à cette dernière des caractéristiques singulières pour la protéger de phénomènes tels que l'usure, la corrosion, l'isolation électrique, etc. [6]. Le revêtement peut être constitué d'alliages métalliques, de céramiques carbures ou oxydes, de composites céramométalliques, de polymères thermoplastiques ou tout autre composite associé. La projection thermique à la torche à plasma d'arc soufflé atmosphérique, communément désignée par son acronyme anglais APS (*Atmospheric Plasma Spraying*) est l'un des procédés les plus utilisés [1]. C'est ce procédé qui a été considéré dans le cadre de cette étude.

Au cours de la projection thermique, plusieurs paramètres opératoires influencent la qualité du dépôt [7] puisque ses propriétés, dérivant directement de sa structure, sont indirectement couplées aux paramètres opératoires. En fait, les propriétés des dépôts dérivent des caractéristiques à l'impact des particules fondues (quantité de mouvement et viscosité), les caractéristiques à l'impact des particules fondues dérivent elles-mêmes des caractéristiques thermodynamiques du jet de plasma, les caractéristiques thermodynamiques du jet de plasma découlent de l'ajustement des paramètres opératoires.

Ce chapitre traite d'abord des principaux paramètres opératoires qui interviennent au cours d'une opération de projection thermique à la torche à plasma d'arc soufflé atmosphérique et des dérives et fluctuations liés à ce procédé. Ensuite, les principaux moyens de diagnostic et de contrôle sont exposés et enfin la problématique de la prédiction et du contrôle par l'intelligence artificielle est introduite.

1.2 Principe de la projection thermique

La projection thermique regroupe un ensemble de procédés pour lesquels des matériaux métalliques ou non, sous forme pulvérulente (des particules de tailles inférieures généralement à environ 100 μm) sont déposés à grande vitesse, dans un état fondu ou semi-fondu, sur des substrats préalablement préparés (dégraissage et projetage) [8 - 9]. Il a été développé un certain nombre de procédés, parmi lesquels les plus courants sont

les projections à l'arc électrique (*Twin-Wire Electric Arc spraying*, TWEA), à la torche à plasma d'arc soufflé atmosphérique (*Atmosphérique Plasma Spraying*, APS), à la torche à plasma d'arc soufflé sous basse pression d'une atmosphère neutre (*Low Pressure Plasma Spraying*, LPPS), à la flamme oxyacétylénique (*Flame Spraying*, FS), à la flamme supersonique (*High Velocity Oxy-Fuel spraying*, HVOF), au canon à détonation (*Detonation Gun*, D-Gun) parmi les principaux. Les principales caractéristiques de ces procédés sont résumées dans le Tableau 1. La Figure 2 illustre quant à elle le principe de base du procédé de la projection APS.

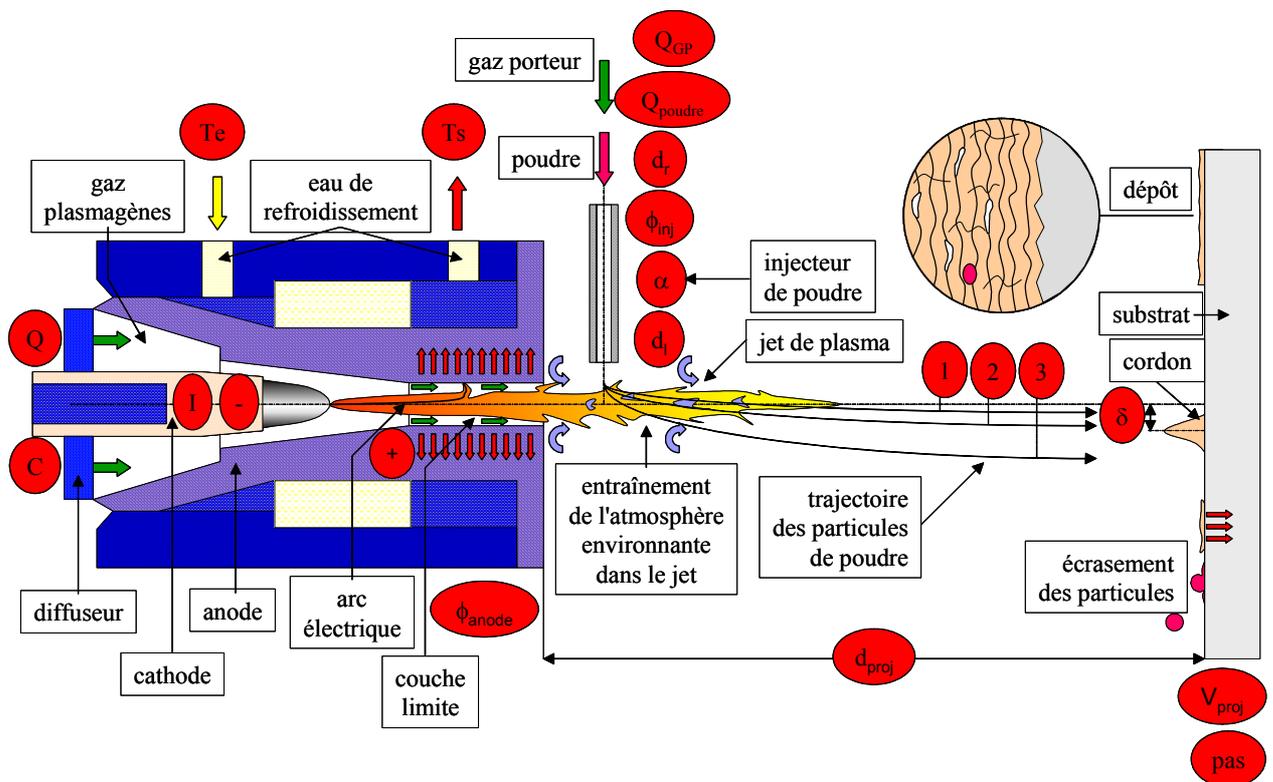


Figure 2: Schéma synthétique du principe de la projection plasma.

Le principe de la projection APS consiste en l'utilisation d'une torche à plasma d'arc soufflé comme source pour fondre et accélérer une poudre du matériau dont on souhaite revêtir le substrat [6, 10 - 11]. Un injecteur tubulaire permet l'injection dans le jet de plasma précédemment créé le matériau à projeter sous forme de poudre, transportée elle-même par un gaz porteur. Un arc électrique de forte intensité est généré entre deux électrodes refroidies par une circulation d'eau, pour ioniser les gaz plasmagènes (argon, hydrogène, hélium ou azote) principalement suivant le mécanisme d'avalanche électronique. Le milieu ainsi créé est électriquement neutre et est constitué d'un

mélange d'électrons et ions, mais également de molécules et d'atomes excités, puisque l'ionisation n'est pas complète. L'appellation "plasma thermique" est toutefois retenue pour décrire ce milieu.

Tableau 1 : Caractéristiques des différents procédés en projection thermique [11].

Caractéristiques	Flamme-poudre	Flamme-fil	Arc électrique	Torche à plasma d'arc soufflé	Flamme supersonique	Canon à détonation
Source de chaleur	flamme oxyacétylénique	flamme oxyacétylénique	arc électrique	plasma	flamme	flamme oxyacétylénique
Température maximale approximative (°C)	3000	3000	6000	12000	3000	3000
Vitesse moyenne des particules (m.s ⁻¹)	40	150	250	200	700	950
Forme du produit d'apport	poudre	fil ou cordon	fil	poudre	poudre	poudre
Taux de dépôt (kg.h ⁻¹)	1 à 3	1 à 10	5 à 15	1 à 4	3 à 5	3 à 5
Rendement intrinsèque de dépôt caractéristique (%)	50	70	80	70	70	70
Adhérence moyenne (MPa)	20 à 40	20 à 40	40	30 à 70	50 à 80	50 à 80
Taux moyen de porosité (%)	2 à 10	2 à 10	1 à 10	1 à 10	0,5 à 2	0,5 à 2
Epaisseur déposée (mm)	0,2 à 1,5	0,2 à 1,5	0,2 à 3	0,1 à 1,5	0,1 à 1	0,1 à 1
Exemples de matériaux projetés	<ul style="list-style-type: none"> • alliages • oxydes • polymères 	<ul style="list-style-type: none"> • alliages • oxyde • carbure dans matrice métallique 	<ul style="list-style-type: none"> • alliages 	<ul style="list-style-type: none"> • alliages • oxydes • carbures 	<ul style="list-style-type: none"> • alliages • oxydes • carbure dans matrice métallique 	<ul style="list-style-type: none"> • carbures alliages dans matrice métallique

1.3 Différents paramètres opératoires

Les gammes opératoires de traitement de surface par projection thermique comprennent tout ou partie des étapes telle que la préparation de surface, la définition des cinématiques torche/pièce, la réalisation du dépôt et l'usinage final [7]. La Figure 3 synthétise les principaux paramètres opératoires en projection plasma. Ces paramètres sont interdépendants ; certains d'entre eux peuvent être contrôlés par l'opérateur (paramètres extrinsèques), comme l'intensité de courant d'arc, les débits ou les compositions des gaz. D'autres ne sont pas directement maîtrisables par l'opérateur (paramètres intrinsèques) : la tension aux bornes des électrodes, l'efficacité du refroidissement, l'usure des électrodes, etc., autant de paramètres dont dépend également la qualité finale du dépôt.

Ainsi, l'ensemble des paramètres opératoires peuvent être repartis en six grandes classes, à savoir : les paramètres relatifs aux matériaux d'apport, les paramètres d'injection de la poudre, les paramètres cinématiques (mouvement relatif entre la torche et le substrat à revêtir), les paramètres relatifs à l'interaction entre le dépôt et le substrat, les paramètres environnementaux et les paramètres énergétiques. Ce sont ces derniers paramètres qui font l'objet d'une attention particulière dans les travaux de cette thèse.

Ce procédé se caractérise par des phénomènes aléatoires et parfois instables. Les causes de ces instabilités sont nombreuses : instabilités de l'arc électrique dans la tuyère dépendant, en particulier, de l'usure de l'anode et du mélange de gaz plasmagènes utilisé, instabilités dans la distribution des poudres, dérive du courant électrique, dérive des débits des gaz due à d'éventuelles fuites, déviation aléatoire des trajectoires des particules due à une accumulation de poudre sur l'extrémité de l'injecteur, etc.

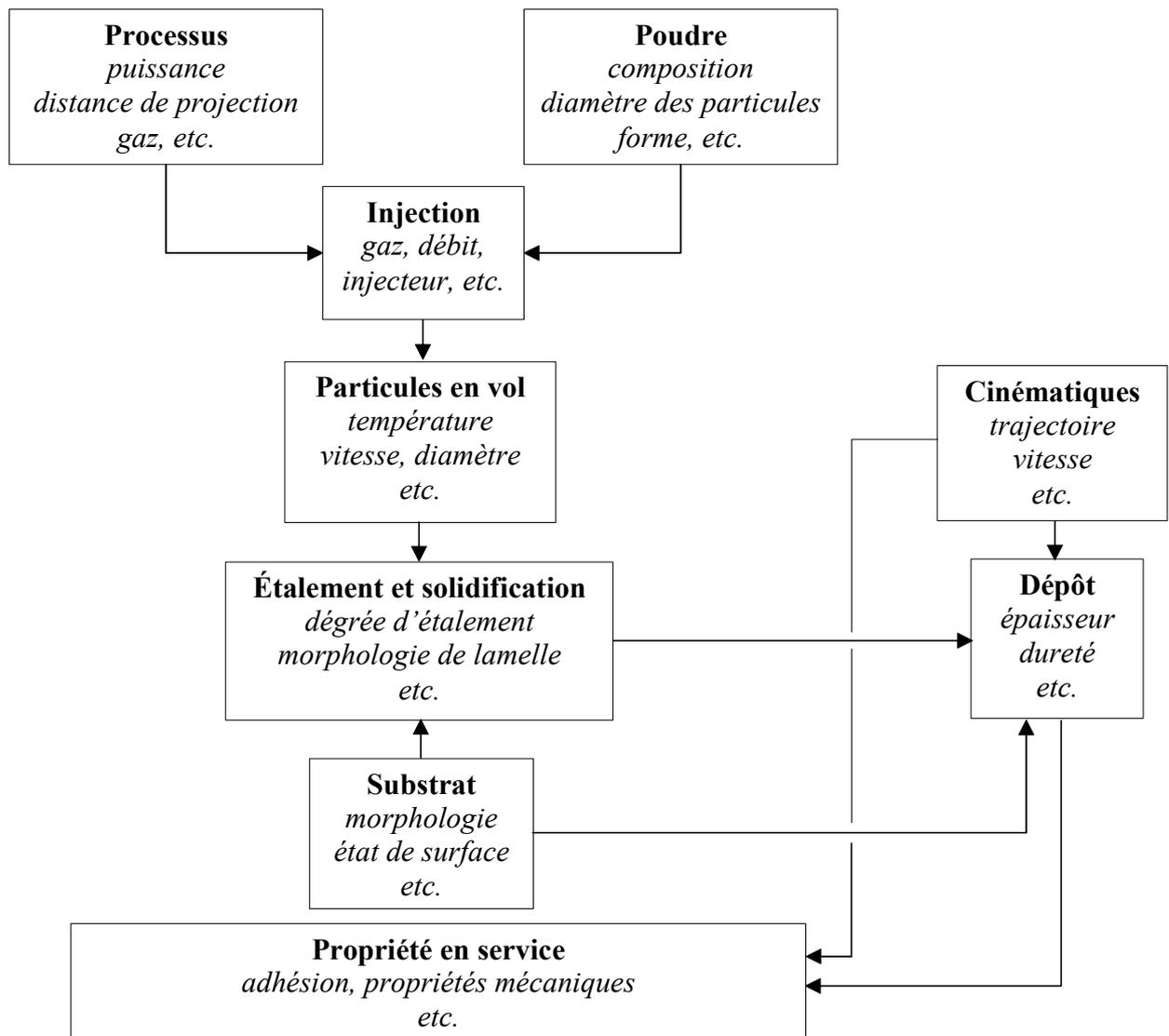


Figure 3 : Interactions entre les différents paramètres intervenant au cours d'une projection thermique.

1.3.1. Paramètres relatifs aux matériaux d'apport

Les matériaux d'apport se caractérisent essentiellement par leur composition chimique, leur forme liée au mode d'élaboration et aux traitements de parachèvement et leur taille (distribution granulométrique). Les poudres sont élaborées suivant différents procédés choisis en fonction de la morphologie spécifique à donner à l'application considérée, des caractéristiques physico-chimiques des matériaux et de critères économiques. Les procédés les plus utilisés pour l'élaboration des poudres céramiques sont l'agglomération / séchage et la fusion / broyage. Dans le cadre de cette étude, une

poudre d'alumine- rutile, $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ (13 % masse) obtenue par le procédé de fusion/broyage a été utilisée. Cette poudre, dense, présente une morphologie anguleuse et une distribution granulométrique $[-45 +22 \mu\text{m}]$. La convention adoptée pour la notation de la granulométrie considère que 95 % des particules en nombre ont un diamètre compris dans cette gamme. Les caractéristiques de la poudre d'alumine- rutile sont illustrées dans le Tableau 2. Ces caractéristiques ont une grande importance dans la détermination des paramètres énergétiques et des paramètres d'injection, pilotant à leur tour l'efficacité du transfert thermique ainsi que le rendement de projection.

L'alumine présente une bonne tenue mécanique aux hautes températures, une grande résistivité électrique, une dureté élevée, une résistance à l'usure excellente et une inertie chimique importante. Ces propriétés font de l'alumine un matériau très largement mis en oeuvre par projection thermique pour des applications en service diverses et très variées, allant de couches à fonction tribologique à des couches anticorrosion en passant par des barrières diélectriques. L'apport en rutile permet d'augmenter l'adhérence du dépôt ainsi que la complaisance aux déformations mais conduit également à la diminution de la dureté et à l'augmentation du taux de porosité des revêtements [12].

Les températures de fusion et de vaporisation des éléments ont une importance capitale car le matériau projeté 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 pour pouvoir raisonnablement envisager d'élaborer des couches de ce matériau par projection thermique). Ainsi la source de chaleur doit pouvoir fournir suffisamment de chaleur au matériau pour qu'il puisse atteindre la fusion (transfert thermique) et produire un jet gazeux capable de transporter les particules jusqu'au substrat (transfert cinétique).

Tableau 2 : Propriétés de l'alumine et du rutile [3, 13 - 14].

	Alumine ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\alpha$)	Rutile (TiO_2)
Propriétés physiques		
Apparence	Gris, solide cristallin	Blanche, solide cristallin
Masse volumique à la température de fusion (g.cm^{-3})	3,98	4,25
Propriétés mécaniques		
Dureté (GPa)	15-23	7-11
Module d'Young (GPa)	300-400	283
Propriétés thermiques		
Température de fusion (K)	2318-2345	2113-2130
Température de vaporisation (K)	2766-3253	3591
Chaleur spécifique à pression constante C_p ($\text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$)	1300 (à $>1500\text{K}$)	18225 (à 298K)
Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) à 293 K > 1200 K	26-35 <6	12-16 3,307
Chaleur latente de fusion (KJ.mol^{-1})	108,8	66,9
Coefficient de dilatation linéaire (10^{-6}K^{-1}) de 20 à 1000 °C	8-9	7-10
Propriétés optiques		
Indice de réfraction (-)	1,765	2,903

1.3.2. Paramètres d'injection de la poudre

Les paramètres d'injection de la poudre contrôlent la trajectoire des particules au sein du jet de plasma et par conséquent les transferts, notamment thermiques. Ces paramètres extrinsèques concernent principalement le débit massique de la poudre, le diamètre interne de l'injecteur, la distance et l'angle d'injection, la nature et le débit du gaz porteur de la poudre. Ils permettent l'ajustement de la quantité de mouvement des particules lors de leur pénétration dans le jet de plasma.

L'injecteur est généralement perpendiculaire au jet de plasma, de diamètre interne réduit (1,2 mm à 2 mm) afin de limiter la dispersion du jet de poudre. La position de la sortie d'injecteur par rapport à la sortie de tuyère et à l'axe de la torche est également importante puisqu'elle va définir (avec le débit de gaz porteur) la trajectoire du jet de poudre, par conséquent le traitement thermique des particules par le plasma.

Le débit massique de poudre a une influence sur le rendement de projection. Les poudres les plus fines présentent également des difficultés à s'écouler correctement dans les tuyaux d'amenée à l'injecteur. Ces problèmes d'injection des petites particules ont conduit à envisager l'emploi de distributeurs adaptés [15]. Le débit du gaz porteur contrôle la quantité de mouvement des particules à la sortie de l'injecteur et détermine la trajectoire moyenne des particules dans le plasma. Il doit être l'objet d'un réglage afin de permettre un séjour optimal des particules dans le plasma et d'obtenir le meilleur rendement de projection

Le choix d'un diamètre interne d'injecteur couplé au débit de gaz porteur permet l'ajustement de la vitesse initiale d'éjection des particules. La quantité de mouvement ainsi communiquée aux particules influe à son tour sur leur trajectoire au sein d'un jet de plasma (caractérisé par sa densité de quantité de mouvement) et donc leurs caractéristiques en vol [16].

La distance d'injection des particules, représentant la distance entre le dernier plan géométrique de l'injecteur de poudre et l'axe géométrique de la torche, permet d'ajuster, pour des caractéristiques d'injection fixées (diamètre de l'injecteur, débit de gaz porteur, etc.), la largeur du cône de particules et leur pénétration dans le jet de plasma. Une grande distance d'injection s'accompagne d'une dispersion importante des particules et leur pénétration dans des zones du jet de plasma présentant des propriétés différentes en raison des forts gradients longitudinaux caractérisant ce milieu lorsque généré par une torche à arc soufflé. L'injection des particules dépend également de leur taille : plus

elles sont petites, plus elles doivent être injectées avec une vitesse élevée afin de maintenir leur quantité de mouvement à une valeur adéquate permettant leur introduction dans le jet de plasma. Il est communément admis que les paramètres d'injection doivent être ajustés de manière à obtenir une trajectoire faisant un angle de $3,5^\circ$ avec l'axe géométrique de la torche. Cette trajectoire est considérée comme idéale en cela qu'elle permet d'obtenir les vitesses et les températures superficielles des particules maximales [17].

1.3.3. Paramètres cinématiques

Les paramètres cinématiques de projection comprennent pour l'essentiel, le pas de balayage (décalage latéral de la torche de projection lors de la réalisation de passes successives permettant de couvrir une surface donnée), la vitesse relative torche/substrat (vecteur vitesse entre la torche de projection et la tangente à la surface du substrat), la distance de projection (distance entre le plan géométrique de la torche et la tangente à la surface à revêtir au point d'intersection) et l'angle de projection (angle entre l'axe géométrique de la torche et la tangente à la surface à revêtir au point d'intersection).

Parmi ces paramètres, la distance de projection est le paramètre le plus facilement ajustable pour faire varier l'état des particules à l'impact sur le substrat. En effet, les transferts thermiques particules / environnement et le freinage aérodynamique des particules modifient les caractéristiques des particules à leur impact. La vitesse et la température des particules diminuent lorsqu'elles s'éloignent de la torche [18]. Le contrôle de la distance de projection permet donc de modifier la structure du revêtement. L'angle de projection a également une influence sur le profil du cordon déposé [19 - 20] et par conséquent sur la structure du dépôt formé, notamment en terme de taux de porosité. Il est à noter également que le rendement de dépôt diminue significativement dès lors que l'angle de projection devient inférieur à une valeur critique.

La vitesse relative torche/substrat influe sur la géométrie radiale du cordon formé à chaque passe et donc en partie sur l'épaisseur moyenne déposée par passe ainsi que sur les caractéristiques du flux thermique transmis au substrat d'une part par la chaleur latente de solidification des particules et leur refroidissement à la température moyenne du substrat lors de la réalisation de la couche [21], d'autre part par le flux transféré des gaz chaud de recombinaison venant mouiller la surface du substrat. Le pas de balayage aura des influences identiques, tant sur la quantité de matière déposée que sur le flux de

chaleur transmis au substrat. Il aura de plus un effet sur l'homogénéité de répartition de la matière déposée à une échelle macroscopique [22].

1.3.4. Paramètres relatifs à l'interaction dépôt/substrat

Les paramètres relatifs à l'interaction dépôt/substrat concernent principalement la température moyenne du substrat sur lequel viennent s'écraser les particules, la physicochimie de la surface, son état de surface aux échelles nanométriques et micrométriques ainsi que les caractéristiques thermiques et mécaniques du substrat ou celles du composite substrat / dépôt lorsqu'une couche d'épaisseur significative a d'ores et déjà été formée.

A l'échelle macroscopique, le contrôle de la température moyenne du dépôt et de la pièce à revêtir permet de contrôler le niveau de contraintes résiduelles au sein de la couche [23]. En effet, lors de la construction du dépôt, la quasi-totalité de la chaleur des particules est transmise au substrat lors de leurs solidifications et de leurs refroidissements [8]. Il s'en suit alors un échauffement de la pièce et du dépôt. Lors du refroidissement de l'ensemble, la différence entre les coefficients linéaires de dilatation du substrat, souvent de nature métallique, et du dépôt, souvent de nature céramique, conduit couramment au développement de contraintes résiduelles dites thermiques. Ces contraintes augmentent avec l'épaisseur du dépôt et peuvent, additionnées aux contraintes résiduelles dites de trempe se développant à l'échelle de chacune des lamelles constitutives du dépôt consécutivement à leur solidification et refroidissement rapide par transfert conductif orienté, conduire à la délamination d'une partie ou de tout le dépôt lorsque le niveau atteint localement dépasse le niveau d'adhérence. Des études ont montré que les particules s'étalent mieux, c'est-à-dire avec un plus grand degré d'étalement et de plus faibles projections périphériques de matière, sur un substrat chaud [24 - 25 - 26]. Cette observation trouve plusieurs explications. Le préchauffage de la surface du substrat, lorsque effectué à l'air, entraîne une légère oxydation superficielle (donc une modification de la physicochimie de la surface ainsi qu'une modification de sa topologie à l'échelle nanométrique) et une désorption de molécules comme l'eau ou tout autre contaminant adsorbé qui améliore le mouillage du substrat par la céramique liquide [27 - 28 - 29]. Ainsi, des températures critiques de substrat ont été définies en dessous desquelles la moitié de la population de lamelles collectées présenteraient un faciès avec un taux d'éclaboussure significatif [30 - 31]. Ces

éclaboussures (*flattening splashing* en anglais) dont l'origine proviendrait de la solidification locale prématurée du liquide au contact du substrat perturbant en cela l'écoulement visqueux conduisent à la formation des pores à l'interface [32]. La nature du substrat détermine les forces d'interactions possibles avec les particules encore liquides et celles solidifiées. Ces forces influencent le mouillage du substrat par le liquide et donc la qualité de l'étalement des particules. Elles influencent également la qualité de l'adhérence substrat/dépôt [33 - 34].

1.3.5. Paramètres environnementaux

L'environnement de projection constitue aussi un des paramètres qui influence les caractéristiques des revêtements élaborés par projection thermique. Ainsi, en raison de la viscosité élevée du jet de plasma couplée à sa grande vitesse d'éjection, l'atmosphère environnant le jet, froide, est entraînée par effet de pompe dans le jet [35]. Lorsque l'atmosphère considérée est l'air, comme dans le cas de la projection plasma atmosphérique, le mélange de l'air froid avec le plasma conduit à une diminution de la vitesse et de la température du jet en raison de l'enthalpie consommée pour dissocier une fraction élevée des molécules d'oxygène (à 3500K) et une fraction plus faible de celles d'azote (à 7500K) ainsi qu'à des turbulences fortes en périphéries du jet. Une première conséquence quant au traitement des particules en vol est de plus faibles transferts de chaleur et de quantité de mouvement [36]. Une seconde conséquence peut être le développement de réactions chimiques d'oxydation et / ou de nitruration en fonction de la nature des particules introduites. Certaines de ces réactions peuvent se poursuivre lors que les particules quittent le jet de plasma (généralement défini par l'isotherme 8000K) avant d'atteindre le substrat [35, 37]. Dans certains cas également, il est possible d'observer la vaporisation préférentielle de certains éléments d'alliages pour les alliages métalliques ou d'éléments constitutifs pour les céramiques en fonction de la pression de vapeur du matériau et en fonction des pressions partielles des éléments constituant le jet de plasma, l'oxygène en particulier. A titre d'exemple, des particules de zirconium partiellement stabilisée à l'yttrium peuvent impacter le substrat dans un état sous-stoechiométrique consécutivement à la vaporisation d'ions d'oxygène. La transformation du carbure de tungstène WC en carbure W_2C consécutivement à une décarburation est un autre exemple significatif de ce phénomène.

Employer une atmosphère contrôlée présente, entre autres avantages dont un plus faible refroidissement du jet de plasma et consécutivement une augmentation de la longueur du jet associée à un allongement des isothermes et des iso-vitesses, celui d'éviter ou fortement limiter l'oxydation des poudres et des substrats métalliques lorsque l'atmosphère est faite d'un gaz neutre.

Si la nature de l'atmosphère environnante joue un rôle prédominant, sa pression également. Ainsi, à une pression inférieure à la pression atmosphérique, l'expansion du jet de plasma est beaucoup plus grande qu'à la pression atmosphérique. Cela permet d'obtenir des transferts de quantité de mouvement du jet de plasma aux particules plus importants. Cela, dans certains cas, peut améliorer l'étalement des particules et en conséquence la densité et l'adhérence du dépôt au substrat. Toutefois, la plus faible densité d'énergie du jet ne permet pas le traitement de particules très réfractaires. En parallèle, les échanges convectifs entre le substrat et l'atmosphère environnante sont également plus limités ce qui induit un échauffement plus élevé du substrat.

A l'opposé, une atmosphère environnante en surpression conduit à une expansion plus faible du plasma. On observe ainsi une augmentation de la densité d'énergie dans le jet qui devrait améliorer le chauffage des particules de poudre introduite. La vitesse des particules en vol est alors plus faible et leur température de surface peut dans certains cas approcher celle du point d'ébullition du matériau [38]. Ces conditions particulières ont montré qu'elles permettaient dans certains cas spécifiques l'obtention de dépôts plus denses [39]. Toutefois, les gains obtenus ne sont pas toujours significatifs alors que les difficultés de mise en œuvre augmentent considérablement. C'est pourquoi ces conditions de travail sont très rarement employées dans la pratique.

1.3.6. Paramètres énergétiques

Les paramètres énergétiques de la torche plasma permettent de contrôler la température et la vitesse des particules en vol par ajustement des caractéristiques du jet de plasma. Ces paramètres ajustables, pour une géométrie fixée des électrodes et du mode d'injection du mélange de gaz plasmagènes au sein de la chambre d'arc (les injections longitudinale ou radiale sont les plus communément employées), sont l'intensité de courant d'arc, le débit massique et la nature des gaz plasmagènes.

L'intensité du courant d'arc doit être choisie de manière judicieuse. Une faible intensité de courant conduit à une fusion insuffisante des particules et pour une intensité trop importante, le taux de vaporisation des particules devient significatif [40].

Les transferts thermiques et de quantité de mouvement du plasma aux particules dépendent de leur durée d'interaction et de la nature des gaz plasmagènes utilisés. De bons transferts sont nécessaires afin d'obtenir le plus grand nombre de particules complètement fondues lors de l'impact sur le substrat. Dans une majorité des cas aujourd'hui, le gaz plasmagène primaire est l'argon car il forme un plasma visqueux stable ($\mu_{10000K} = 2,7 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}$) mais de faible conductivité thermique ($k_{10000K} = 0,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}$). Il permet une meilleure stabilisation de l'arc électrique dans la chambre d'arc en comparaison à l'azote par exemple et apporte la quantité de mouvement au jet. L'hydrogène est très souvent utilisé comme gaz plasmagène secondaire en mélange avec l'argon [41]. Sa viscosité ($\mu_{10000K} = 3,1 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}$) et sa conductivité thermique ($k_{10000K} = 3,7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}$), dans la gamme de température des plasmas thermiques issus de torches à arc soufflé, permettent de meilleurs transferts thermiques aux particules. L'hydrogène en mélange avec l'argon permet d'augmenter l'enthalpie et la conductivité thermique du plasma et ainsi améliorer les transferts thermiques plasma – particules [42]. Dans certains cas toutefois, le chauffage excessif peut entraîner une baisse des transferts thermiques due à la formation d'un nuage de vapeur périphérique [43]. L'hélium est également utilisé. La grande viscosité ($\mu_{15000K} = 4,3 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}$) de ce gaz permet de générer des plasmas de viscosité plus homogène et ainsi améliorer les transferts thermiques plasma/particules [44]. Du fait de sa faible conductivité thermique ($k_{10000K} = 2,4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}$), l'hélium ajouté au mélange permet de compenser la baisse du taux d'hydrogène tout en gardant un plasma suffisamment visqueux.

1.4 Instabilités du pied d'arc et érosion des électrodes

Le principe de fonctionnement de la torche à plasma d'arc soufflé consiste à transférer l'énergie d'un arc électrique, créé entre la cathode et l'anode, à un mélange de gaz pour former un plasma. Le plasma est sensible à diverses instabilités dont les temps caractéristiques diffèrent de plusieurs ordres de grandeur. Les conditions d'injection de la poudre (position et diamètre de l'injecteur, angle par rapport à l'axe de la torche, débit du gaz porteur), fixées en fonction de sa nature et de sa granulométrie, ont une influence sur les particules en vol de façon à leur donner une quantité de mouvement adaptée à

celle du plasma au point d'injection et ainsi, leur assurer une bonne pénétration dans le jet. La composition des gaz plasmagènes et leur proportion respective ont un effet direct sur le régime de fonctionnement de la torche [45].

L'instabilité du jet se manifeste par :

- la déviation et la dispersion des trajectoires des particules à cause de la variation de la quantité de mouvement du jet ;
- l'élargissement des distributions locales de vitesse et de température des particules. En effet, la variation continue de l'enthalpie fournie au gaz se traduit par des fluctuations dans les dimensions du jet et ses caractéristiques (vitesse, température, composition).

L'arc électrique se compose d'une colonne d'arc principale, fixée à l'extrémité de la pointe de la cathode qui est la source des électrons, et d'une colonne de connexion qui se termine par le pied d'arc sur la surface de l'anode. Le pied d'arc se déplace de façon permanente sur la surface de l'anode dans un mouvement de va-et-vient avec une phase d'allongement de l'arc en aval de l'anode, interrompue par un claquage de l'arc qui se réamorce en amont ou en aval du précédent pied d'arc.

Ces fluctuations du pied d'arc se traduisent par des fluctuations de la tension aux bornes des électrodes. La tension mesurée entre les électrodes est la somme de la chute cathodique, de la chute anodique et de la tension d'arc. Il est impossible, par la mesure de la tension de dissocier ces trois composantes. Le plus souvent la somme de la chute cathodique et de la chute anodique est supposée constante si bien que seule la variation de la tension d'arc est à l'origine de la variation de la tension globale aux bornes des électrodes.

Des études [46 - 47] ont mis en évidence l'effet des fluctuations de la position du pied d'arc sur l'anode sur le traitement des particules : l'augmentation de la longueur de l'arc par exemple provoque une accélération et un meilleur chauffage des gaz. L'usure, due à la stagnation du pied d'arc sur l'anode, creuse progressivement la paroi anodique et après quelques dizaines d'heures de fonctionnement, la durée de vie des pieds d'arc augmente avec l'usure de l'anode rendant l'usure de plus en plus exponentielle. La fusion de la paroi aux points où le pied d'arc s'accroche crée des aspérités qui constituent ensuite des points d'accrochage préférentiels pour le pied d'arc.

Les fluctuations de l'arc ont un effet sur le traitement des particules. Cet effet se traduit par une variation spatiale et temporelle des caractéristiques des particules (trajectoire, vitesse, température, état de fusion, etc.), ce qui peut nuire à l'homogénéité et à la reproductibilité des dépôts réalisés par projection plasma.

Cependant la différence d'échelles de temps entre les fluctuations du pied d'arc (dans le domaine des 100 à 500 μ s) et le développement de l'érosion (en dizaines d'heures) rend les mesures complexes.

Pour un usage dans des conditions industrielles, la durée de vie de l'anode est d'environ 30 à 60 heures [48]. Cette durée dépend des conditions opératoires (intensité de courant d'arc, nature et débit du gaz plasmagène, etc.), du nombre de démarrages de la torche (de l'ordre de 300 à 400 sur 30 à 50 heures) et de la façon dont ces démarrages sont effectués.

L'anode, collecteur d'électrons, est soumise à des flux thermiques élevés en particulier au point d'accrochage de l'arc. Ces flux peuvent être supérieurs à ceux subis par la cathode qui est refroidie par l'émission des électrons [49 - 50].

Des études sur la cathode (qui fournit les électrons à l'arc) ont permis de démontrer [51] que :

- la forme et la taille de la cathode ont une faible influence sur les caractéristiques de l'arc mais affectent fortement l'érosion de la cathode ;
- elles jouent très peu sur la température de la tache cathodique qui est essentiellement contrôlée par la densité de courant et la nature du matériau. Cependant un diamètre de cathode plus large conduit à un gradient de température plus élevé et à une tache cathodique plus limitée ;
- la température électronique dans l'arc est souvent plus élevée en bordure de cette tache, par conséquent l'érosion est plus importante ;

Lorsque la cathode est neuve, son extrémité est lisse et pointue. Il en résulte donc un fort gradient de vitesse avec un maximum sur l'axe relativement élevé. Au fur et à mesure que le temps s'écoule, la pointe de cathode devient arrondie dû certainement à la fusion du matériau soumis au bilan énergétique. On note une atténuation des vitesses maximales et une répartition des vitesses plus homogènes.

L'érosion de la cathode est principalement déterminée par les caractéristiques de l'arc (c'est-à-dire la densité du courant) et par le matériau de la cathode [52 - 53]. Les densités de courant d'arc, plus grandes dans le cas de l'argon hydrogène, entraînent des

températures de pointe de cathode plus élevées. Avec des courants d'arc plus grands que 50A, l'émission électronique est le mécanisme prédominant du refroidissement au centre du spot cathodique et les modifications dans la géométrie de la cathode (un plus large diamètre par exemple) n'ont qu'un effet minime sur la température de la pointe de cathode.

A ce jour il n'existe pas de méthodes pour mesurer directement l'érosion des électrodes. Pour estimer l'efficacité de la torche et corriger les effets de l'érosion des électrodes, on procède par des techniques de contrôle en ligne qui consistent principalement à suivre l'évolution des caractéristiques des particules en vol.

L'érosion des électrodes des torches induit une diminution de l'enthalpie du plasma, par conséquent la vitesse et la température des particules en vol diminuent. Cela peut modifier les propriétés finales du dépôt ou bien entraîner sa destruction par incorporation de particules des électrodes.

Le mode de fonctionnement d'une torche plasma peut donc être caractérisée par son signal de tension. La forme et l'amplitude des fluctuations de tensions permettent d'avoir une estimation du mouvement et donc de la dynamique de l'arc électrique suivant les conditions opératoires.

1.5 Contrôle du procédé

La qualité du dépôt peut être évaluée par ses caractéristiques structurales (taux de porosité, pourcentage d'oxydes, épaisseur, taux de contraintes résiduelles, etc.), par ses propriétés physicochimiques et thermomécaniques apparentes (dureté, module d'Young apparent, conductivité thermique apparente, etc.) et par ses propriétés en service (résistance à la corrosion, résistance à l'usure, etc.). L'ensemble de ces caractéristiques et propriétés est conditionné par les caractéristiques à l'impact des particules et des propriétés physicochimique du substrat. La mise en relation directe des paramètres opératoires de projection et des propriétés du dépôt permet de définir des plages optimales de fonctionnement. Des contrôleurs permettent de maintenir dans ces plages les paramètres opératoires. Toutefois, afin de contrôler mieux encore le procédé, plusieurs techniques de diagnostic en ligne utilisant des détecteurs capables de fonctionner dans les conditions des cabines de projection ont été développées [54]. Ces

techniques permettent soit de caractériser l'état des particules en vol (vitesses, températures superficielles et diamètres) et à l'impact, soit de surveiller les températures du dépôt ou du substrat ou bien encore de suivre l'épaisseur déposée à chaque passe. Ces différentes techniques sont basées pour l'essentiel sur la technologie des caméras CCD et/ou sur la pyrométrie.

Il existe non seulement des systèmes de contrôle en ligne pour lesquels la torche est positionnée devant le capteur du système de contrôle avant et après le tir de la pièce à revêtir mais aussi des systèmes de contrôle en ligne dans les conditions réelles de fonctionnement, où le capteur est fixé à la torche. Parmi les différents systèmes de contrôle en ligne, on distingue :

- DPV2000 (TECNAR¹) [55]. Il permet d'obtenir la vitesse des particules (par mesures de temps de vol), leur température (par pyrométrie bichromatique) et d'évaluer leur diamètre (à partir de l'émission thermique des particules). Il suit aussi l'évolution de la position du jet de particules grâce à une caméra CCD ;
- Accuraspray (TECNAR) [56] permet le contrôle de la température et de la vitesse des particules respectivement par pyrométrie deux couleurs ($T > 900^{\circ}\text{C}$) et mesures du temps du vol ;
- Plumespector (TECNAR) [57] permet le contrôle du jet de particules chaudes sur un plan de coupe avec une caméra CCD ;
- IPP - In-Flight Particle Pyrometer [58]. La température fournie est une moyenne de celle de toutes les particules qui traversent un volume assez important (5mm de diamètre et 50mm de long). Il s'agit d'une mesure globale ;
- Spray-Watch (OSEIR²) [59]. Il est composé d'une caméra CDD noir et blanc à obturation rapide et d'un pyromètre deux couleurs qui fournissent respectivement la vitesse des particules déduites des longueurs des traces laissées par les particules en vol pendant un temps d'exposition connu et la température ($T > 1300^{\circ}\text{C}$) ;
- Ignatiev et al [60] ont aussi développé une caméra CCD capable de mesurer la taille, la vitesse et la température des particules chaudes en vol (entre 1200 et 3500°C) ;

¹ Tecnar, 1321 Hocquart Street, St-Bruno, Québec J3V 6B5, Canada.

² Oseir Ltd, Hermiankatu 6A, FIN-33720 Tempere, Finland.

- STRATONICS³ [61] propose un pyromètre deux couleurs qui utilise une caméra CDD et qui permet de mesurer les températures des particules comprise entre 1000 et 2700K ;
- SDC⁴ (Spray Deposit Control) [62]. Il comprend une caméra CCD, qui fournit, dans un plan de coupe du jet, la distribution du flux de chaleur associé aux particules chaudes en vol. La vitesse des particules peut être déduite des traces laissées pendant un temps d'exposition connu. Un pyromètre mesure la température du substrat et du dépôt en construction. Enfin la mesure du déplacement d'un échantillon témoin (déflexion d'une poutre) permet de déduire les contraintes thermiques et de trempe auxquelles il est soumis pendant les étapes de préchauffage, de dépôt et de refroidissement.

L'utilisation de ces dispositifs dans la pratique repose sur le suivi en continu ou de manière séquentielle des caractéristiques mesurées et de leur comparaison avec des valeurs de référence préalablement établies au cours de l'optimisation des conditions opératoires comme permettant d'élaborer le dépôt avec les caractéristiques et les propriétés désirées. Des plages admissibles de variation sont définies de même lors de l'optimisation de ces mêmes conditions opératoires. Lorsqu'une dérive paramétrique est détectée et si elle se trouve dans la plage de variation admissible, soit l'opérateur procède à un réajustement de paramètres opératoires en se basant sur son expérience ou des règles plus ou moins bien formalisées, soit aucun ajustement n'est effectué. Dans le premier cas, celui d'un réajustement des paramètres opératoires, des fluctuations dans les caractéristiques et propriétés des dépôts variant en fonction de la pertinence des ajustements sont observées, même si elles restent confinées aux plages admissibles. Dans le second cas, des variations dans les caractéristiques et propriétés des dépôts s'amplifiant avec le temps sont enregistrées et des actions sont décidées dès lors que des valeurs mesurées divergent de la fenêtre admissible, la réalisation des dépôts s'arrête, une recherche des causes est entreprise et des actions correctrices sont enclenchées (changement des électrodes de la torche plasma par exemple).

³ Stratonics Inc., 23151 Verdugo Dr. #114 Laguna Hills, CA 92653, USA.

⁴ SPCTS, Université de Limoges, 123 Avenue Albert Thomas, 87060 Limoges cedex, France.

Dans ces travaux, des algorithmes à base de l'intelligence artificielle sont proposés afin de prédire et d'ajuster certains paramètres opératoires en tenant compte de certaines dérives et fluctuations pouvant être diagnostiquées sur les caractéristiques des particules en vol. L'objectif premier est de démontrer d'un point de vue théorique cette méthodologie et de la valider. Compte tenu de la complexité des effets des paramètres opératoires et de la synergie de certains de leurs effets, cette étude de faisabilité est cantonnée pour l'essentiel au diagnostic des seules caractéristiques en vol des particules (température de surface et vitesse à la distance de projection) et de leur ajustement à leur valeur de référence en agissant sur les seuls paramètres de puissance. La méthodologie globale et les étapes clés du processus sont validées par des mesures expérimentales.

Le système proposé repose sur la coopération de deux méthodes basées sur l'intelligence artificielle : les réseaux de neurones artificielles concernant la prédiction des paramètres à atteindre (à quel(s) ajustement(s) doit-il être procédé pour tendre vers la valeur cible ?), la logique floue concernant la stratégie à adopter pour réguler les paramètres opératoires de puissance (sur quel(s) paramètre(s) agir et avec quelle(s) amplitude(s) ?).

Les travaux de thèse de S. Guessasma [3] ont démontré que les réseaux de neurones pouvaient constituer des outils d'analyse et d'interprétation pouvant être mis en œuvre dans la cadre général de la réalisation de dépôts par projection plasma. Cette démarche a été retenue et développée plus en avant dans le cadre de ce travail afin d'adresser la problématique de l'estimation des ajustements à effectuer. L'idée de la logique floue à travers le concept ensembliste d'appartenance graduelle d'un élément à un ensemble, a été de définir une logique qui permette de modéliser ces imperfections c'est-à-dire prendre en compte les états intermédiaires entre «le tout et le rien » [5].

Le chapitre suivant présente plus en détail le concept de la méthodologie de l'intelligence artificielle.

CHAPITRE II :

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

2.1. Introduction

Les incertitudes et les imperfections de toutes natures et de toutes origines ont fait depuis longtemps l'objet de multiples recherches. Ainsi, la première réelle volonté de formaliser la prise en compte de connaissances incertaines conduisit au développement de la théorie des probabilités à partir du XVII^e siècle dans le domaine des mathématiques. Toutefois, la théorie des probabilités ne peut traiter que des données explicites (ou objectives) et ne peut pas adresser par exemple des incertitudes de nature psychologique ou linguistique (données implicites ou subjectives). C'est pourquoi progressivement sont apparues la théorie de la probabilité subjective (dans les années 50) puis celle de l'évidence (dans les années 60).

Dans le cadre de ces travaux de thèse, l'intelligence artificielle basée sur la logique floue (LF) et sur les réseaux de neurones artificiels (RNA) est utilisée.

L'idée de Zadeh [5], en 1965, à travers le concept d'appartenance graduelle d'un élément à un ensemble, a été de définir une logique qui permette de modéliser ces imperfections, c'est-à-dire prendre en compte les états intermédiaires entre "le tout et le rien". La logique floue permet ainsi la formalisation d'imprécisions dues à une connaissance certes globale mais non complètement explicitée d'un système très complexe ainsi que l'expression du comportement de ce système par des mots. La logique floue permet donc la standardisation de la description du système considéré et le traitement de données aussi bien numériques qu'exprimées symboliquement par des qualifications linguistiques.

La logique floue permet une approche novatrice par rapport à l'automatique classique pour le contrôle d'un processus [4]. Les systèmes experts flous basés sur des règles peuvent être vus comme l'extension des systèmes experts classiques dans la mesure où ils intègrent des connaissances imparfaites.

Le concept de réseaux de neurones artificielles (RNA) quant à lui, introduit par Culloch et Pitts [63] en 1943 est un concept neuromimétique basé sur des modèles mathématiques et informatiques, des assemblages d'unités de calculs appelés neurones formels, et dont l'inspiration originelle était un modèle de la cellule nerveuse humaine [64 - 65].

Les réseaux de neurones peuvent se révéler être de puissants outils d'analyse et d'interprétation de données. Il existe deux types de RNA: les réseaux non bouclés (*static*, ou *feedforward neural networks*) et les réseaux bouclés (*dynamic*, ou *feedback* ou *recurrent neural networks*) [66]. Dans le cadre de cette étude, compte tenu des types des données, seuls les réseaux de type "*feedforward neural networks*" sont considérés.

2.2. Modèles

Construire un modèle structural consiste à choisir sa structure et le comportement de ses composants de façon à répondre à certaines spécifications [67]. Pour se faire, deux problèmes doivent être résolus : propager l'information à travers la structure du modèle d'une part et interpréter les comportements de ses composants d'autre part.

La mise au point d'un modèle basé sur l'intelligence artificielle consiste à calculer ses paramètres de telle sorte que la sortie du modèle prédise "en moyenne" celle du processus réel considéré. En termes statistiques, il s'agit d'estimer les paramètres de telle façon que la sortie du modèle soit aussi proche que possible de l'espérance mathématique de la sortie du processus. Cette espérance mathématique, qui est une fonction inconnue des entrées, est appelée régression. Dans le cas de la logique floue, l'estimation des paramètres se fait par la définition de la table des règles basée sur les valeurs mesurées sur le processus. Dans le cas du réseau de neurones artificiels, l'estimation des paramètres (apprentissage) est réalisée à l'aide d'un ensemble d'apprentissage constitué de couples {valeurs des entrées ; valeurs des sorties mesurées sur le processus réel} et d'un algorithme d'estimation destiné à trouver les valeurs des paramètres qui minimisent une fonctionnelle des écarts entre les sorties du processus réel et celles du réseau pour différents exemples d'apprentissage [66, 68 - 69].

2.3. Méthodes de construction

La construction d'un modèle d'intelligence artificielle nécessite de définir un paradigme de modélisation (Figure 4). Les choix sont effectués automatiquement grâce à des règles algorithmiques (qui mènent de façon certaine à un modèle répondant aux spécifications) ou heuristiques (qui mènent au résultat dans la plupart des cas, mais peuvent échouer parfois) [70].

Le problème de la prédiction d'un processus consiste donc à estimer l'état futur d'un processus à partir d'un historique de son comportement et des variables environnementales attenantes. Dans le cas de l'utilisation de telles approches avec pour finalité le contrôle d'un processus, il s'agit alors non seulement d'estimer passivement l'état futur, mais aussi d'intervenir de façon à atteindre un but donné [64].

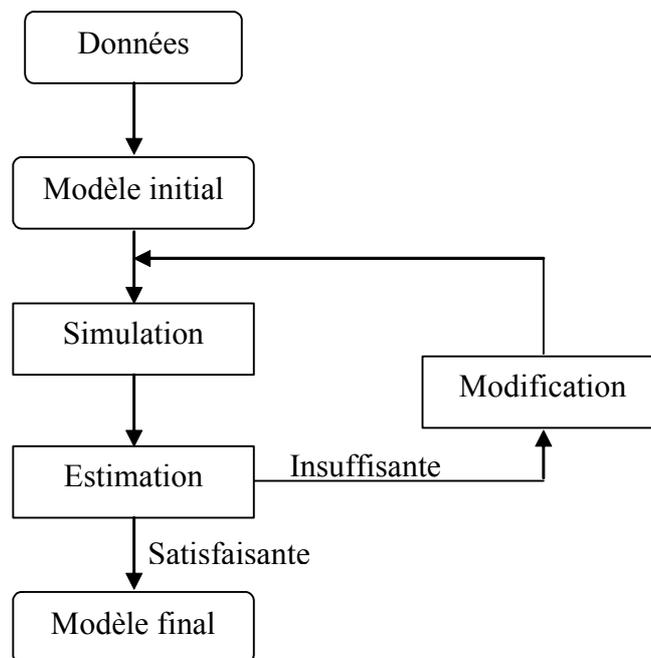


Figure 4 : Démarche générale de construction heuristique d'un modèle structurel.

2.4. Réseau de neurones artificiels

La mise au point d'un modèle neuronal consiste à estimer ses paramètres de telle sorte que la sortie du modèle prédise celle du processus réel. L'estimation des paramètres, appelé l'apprentissage, est réalisée à l'aide d'un ensemble de données types dites données d'apprentissage et d'un algorithme d'apprentissage qui permet de minimiser les écarts entre les valeurs réelles et les valeurs calculées par le RNA pour les exemples d'apprentissage considérés.

Le réseau de neurones est formé d'un ensemble de neurones formels constituant le processeur élémentaire du RNA. Il apparaît donc comme un automate indépendant dont l'état, une valeur scalaire, se nomme activation ou activité [64]. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones appartenant à un niveau situé en amont

(neurones "amonts"). Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui peut éventuellement se ramifier ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones appartenant à un niveau situé en aval (neurones "avals") [65].

D'un point de vue mathématique, un neurone formel est un opérateur algébrique qui effectue une somme pondérée de ses entrées, appelée potentiel. Sa sortie est alors une fonction de ce potentiel [66] et peut s'exprimer suivant :

$$y = f(v) = f\left(\theta_0 + \sum_{i=1}^n \theta_i x_i\right) \quad (\text{Eq. 2.1})$$

où les $\{x_i\}$ sont les n entrées du neurone, v son potentiel et y sa sortie. Ses n paramètres $\{\theta_i\}$ sont appelés poids ou coefficients synaptiques, θ_0 est le biais (représentation numérique pour interpréter un nombre à point fixe).

La Figure 5 illustre un neurone formel.

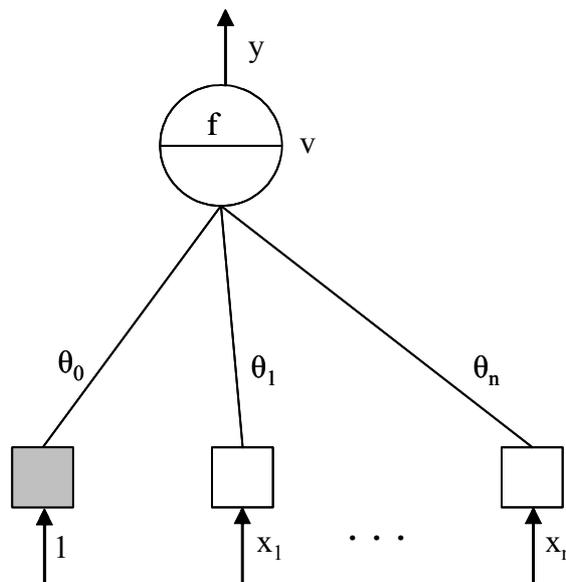


Figure 5 : Neurone formel.

Le neurone x_i est caractérisé par :

- l'entrée comme étant la somme des flux provenant des autres neurones connectés en amont ;
- la fonction d'activation rendant l'entrée non linéaire [71] et animant le neurone en déterminant son activation. La non-linéarité est nécessaire pour que les

couches internes du réseau, dites couches cachées, soient utiles [64]. Le rôle principal de cette fonction est d'encoder la non-linéarité du problème à l'échelle des neurones. Les fonctions les plus utilisées sont la tangente hyperbolique (entre -1 et 1) et la fonction sigmoïde (entre 0 et 1) [66, 72 - 73] ;

- la sortie issue de la transformation permettant d'alimenter les neurones connectés en aval.

2.4.1. Principe du fonctionnement

Le RNA peut donc se décomposer en trois ensembles distincts [64 - 65] :

- l'ensemble E des neurones d'entrées qui reçoivent les données d'entrée sous la forme d'un vecteur de valeurs scalaires, le vecteur d'entrée représentant les paramètres du problème posé. Ces valeurs sont communiquées aux neurones par l'entremise de leurs valeurs d'entrée extérieure. Elles influencent donc l'activation de ces derniers, et par extension, le comportement du réseau entier ;
- l'ensemble S des neurones de sortie dont les activations constituent le vecteur de sortie et sont collectivement interprétées comme le résultat du calcul du réseau. Un même neurone peut à la fois être à l'entrée et à la sortie du réseau. Donc E et S ne sont pas nécessairement disjoints ;
- l'ensemble C des neurones cachés qui n'appartiennent pas aux ensembles E et S, mais les reliant, représente les corrélations encodées par le système. En général, la présence de neurones cachés dans un réseau démultiplie sa puissance de calcul, et lui permet d'aborder des problèmes plus complexes.

Un mécanisme de codage extérieur au réseau transforme les données en une séquence de vecteurs d'entrées [64, 74]. De même, un mécanisme de décodage récupère les vecteurs de sortie et les interprète pour produire des valeurs utilisables [64].

D'après la Figure 6, la sortie est donnée sous forme :

$$y(x, \theta) = \theta_0 + \sum_{i=1}^n \theta_i z_i \quad (\text{Eq. 2.2})$$

$$y(x, \theta) = \theta_0 + \sum_{i=1}^n \theta_i f \left(\theta_{i0} + \sum_{j=1}^n \theta_{ij} x_j \right) \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Il est cependant à retenir que les neurones en amont ont une influence qui est fonction de leur propre activation et de la pondération du lien (poids synaptique θ) les reliant au neurone courant. L'influence totale de l'ensemble des neurones en amont se nomme activation pondérée.

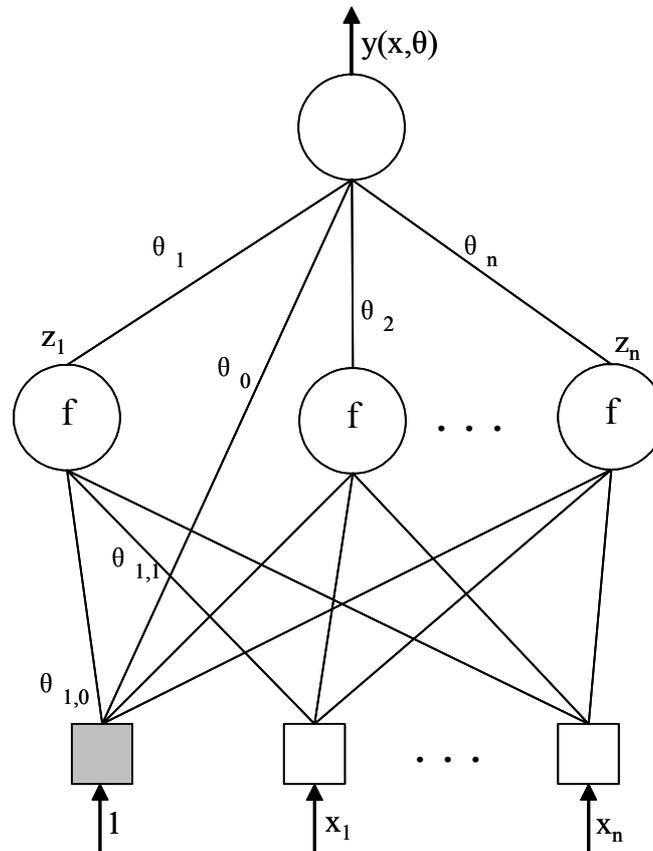


Figure 6 : Structure générique d'un RNA.

2.4.2. Constitution de la base de données

La taille de la base de données nécessaire à l'apprentissage d'un réseau de neurones est globalement proportionnelle au nombre de poids du réseau. Un grand nombre de poids nécessite généralement un apprentissage plus long sur une base d'apprentissage élargie [64]. Pour des raisons techniques, mais surtout économiques, il n'est pas toujours possible de créer une base de données comportant le nombre requis de cas. On procède alors à l'élargissement de la base de données en prenant pour critère d'élargissement la flexibilité du système autour d'un point donné dans l'espace des paramètres, par exemple l'écart-type associé à une grandeur moyenne [65].

La technique utilisée pour augmenter artificiellement le nombre de données d'apprentissage consiste à créer des données artificielles en ajoutant un bruit aléatoire aux données réelles. Le bruit correspond à la tolérance sur les paramètres opératoires, selon l'équation 4. Ainsi, en choisissant judicieusement la distribution des valeurs aléatoires, la taille de la base peut être multipliée sans dénaturer sa représentativité, ce qui améliore la généralisation du réseau (sa capacité à réagir correctement lors de son utilisation à des entrées qui n'ont pas été vues lors de l'apprentissage) [64], aussi il permet d'éviter l'excès d'apprentissage, de vérifier la reproductibilité des essais [75].

$$(I_f, O_f) \leftarrow (I_i, O_i) \pm Gauss() * (Var_I, Var_O) \quad (\text{Eq. 2.4})$$

où les indices i et f sont relatifs à un cas donné de la base de données avant et après introduction du bruit, respectivement. (I, O) est un couple d'entrées/sorties de la base de données. Gauss () est une fonction permettant de générer des nombres aléatoires entre 0 et 1 avec une distribution gaussienne autour de zéro. Var_I et Var_O sont les variabilités associées à un couple donné d'entrées et de sorties de la base de données.

Pour éviter toute oscillation perpétuelle, les données d'entrées sont formatées entre 0 et 1 [67, 74], suivant les équations 5 ou 6 :

$$\hat{x} = \frac{\tilde{x} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

où \hat{x} représente l'expression formatée du paramètre permettant d'exprimer les valeurs de ce dernier entre 0 et 1, x_{\min} et x_{\max} sont les limites physiques du paramètre x et \tilde{x} la valeur expérimentale.

$$\hat{x} = \frac{\tilde{x} - \bar{x}}{\sigma_x} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

où \hat{x} représente l'expression formatée du paramètre permettant d'exprimer les valeurs de ce dernier entre 0 et 1, \tilde{x} la valeur expérimentale, \bar{x} la valeur moyenne des données et σ_x la déviation standard.

Le Tableau 3 donne les limites considérées dans cette étude pour les différents paramètres opératoires.

Tableau 3 : Limites physiques des paramètres du processus de projection plasma considéré dans cette étude.

Paramètres	Limites physiques	
	minimum	maximum
Intensité de courant d'arc (A)	300	750
	limite de fonctionnement de la torche	destruction de la torche
Tension (v)	40	75
Puissance électrique (kW)	3	50
	minimum mesuré	destruction de la torche
Flux (u.a)	30	145
	minimum détecté	maximum détecté
Température des particules (°C)	2000	3000
	fusion des particules	évaporation des particules
Vitesse des particules (m.s ⁻¹)	150	400
	minimum détectable	maximum détectable
Enthalpie massique du jet de plasma (w.kg ⁻¹ .s ⁻¹)	0,5 10 ⁷	2,5 10 ⁷
Taux massique d'hydrogène (%)	0	3
	limite de fonctionnement	destruction
Débit total massique des gaz plasmagènes (g.min ⁻¹)	10	150
	limite de fonctionnement	destruction
Débit du gaz porteur (Nl.min ⁻¹)	2	4
Epaisseur par passe du dépôt (µm)	0	15
Dureté (HV _{0,3} kgf)	500	1500
Taux de porosité (%)	1	10

2.4.3. Architecture du RNA

Plusieurs techniques empiriques sont couramment utilisées pour déterminer le nombre de neurones cachés et la connectivité d'un réseau. Celles-ci sont des variations de deux idées simples : commencer petit et grandir, ou commencer grand et réduire [64, 66].

Une couche cachée trop petite ne permet pas au réseau de représenter l'essentiel du problème. Ceci produit alors de mauvaises performances à la fois en apprentissage et en généralisation. A l'opposé, une couche cachée trop grande permet au réseau de bien apprendre sa base, en améliorant son apprentissage aux dépens de ses performances de généralisation. La technique est alors d'augmenter progressivement le nombre de neurones jusqu'au moment où l'erreur de généralisation cesse de décroître [76].

Par ailleurs, la présence de neurones peu utilisés est l'un des signes d'une couche cachée trop grande. On peut aussi diminuer progressivement le nombre de neurones jusqu'à ce que la variabilité moyenne des neurones cesse de décroître.

2.4.4. Apprentissage

L'apprentissage est un processus graduel, itératif ou récursif, dans lequel les poids du réseau sont modifiés plusieurs fois selon une règle définie avant d'atteindre leurs valeurs finales. Il s'agit donc pour le réseau d'adapter sa structure (le plus souvent les poids des connexions) [77]. La Figure 7 synthétise les différentes étapes lors de l'apprentissage.

Les informations à traiter sont codées sous la forme d'un vecteur appelé patron d'entrée, qui est communiqué aux neurones d'entrée du réseau. La réponse du réseau s'interprète à partir de la valeur d'activation de ses neurones de sortie, dont le vecteur s'appelle patron de sortie. L'estimation des paramètres d'un réseau de neurones comporte toujours les phases [66] à savoir la définition d'une fonction de coût, le choix de l'algorithme et l'initialisation des paramètres.

A la présentation d'un exemple, on doit disposer de modules effectuant :

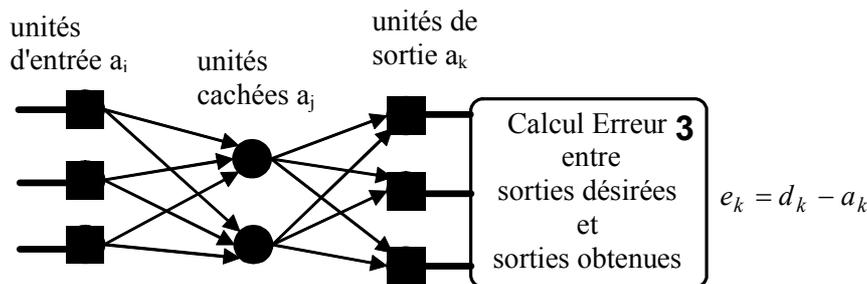
- le calcul du résultat ;
- le calcul du gradient du résultat ;
- le calcul de la direction de la descente ;
- le calcul du pas de progression dans la direction de descente ;

- la modification des paramètres.

Pour définir tous ces paramètres, on considère un réseau non bouclé avec des neurones cachés à potentiel et des fonctions d'activation dérivables. Les seuls paramètres ajustables sont les poids de connexion entre nœuds : ils constituent le vecteur θ .

$$S_j = \sum_i a_i W_{ij} \quad \boxed{\text{1 Calcul activations unités cachées}} \quad \boxed{\text{2 Calcul activations unités de sortie}} \quad S_k = \sum_i a_j W_{jk}$$

$$a_j = f(S_j) \quad a_k = f(S_k)$$



$$\delta_j = \left(\sum_k \theta_{jk} \delta_k \right) f'(S_j) \quad \boxed{\text{5 Calcul de l'erreur sur les unités cachées}} \quad \boxed{\text{4 Calcul de l'erreur sur les unités de sortie}} \quad \delta_k = e_k \cdot f'(S_k)$$

6	Ajustement des poids
Apprentissage des unités cachées	Apprentissage des unités de sortie
$\Delta\theta_{ij} = \varepsilon\delta_j a_i$	$\Delta\theta_{jk} = \varepsilon\delta_k a_j$

Figure 7 : Principe d'apprentissage.

De multiples problèmes d'apprentissage peuvent survenir, parmi lesquels :

- les minima locaux : l'apprentissage par descente de gradient peut conduire à une solution sous optimale. En pratique, ce type de problème est particulièrement difficile à éviter parce que la forme de la surface d'erreur est généralement inconnue ;
- le sur-apprentissage (*overfitting*) : quand l'apprentissage est prolongé, son choix des poids reflète de trop près les particularités de la base d'apprentissage au détriment de la tâche réelle. Ce genre de problème peut être évité par l'emploi de la validation croisée [78] ;
- si le nombre de patrons dont on dispose n'est pas assez grand, on ne peut pas

estimer correctement l'erreur. Donc, on ne peut pas se fier à la valeur de la fonction du coût après apprentissage. Dans ce cas, on a recours à de meilleurs estimateurs telles que l'erreur quadratique moyenne sur un ensemble indépendant de l'ensemble d'apprentissage et les erreurs quadratiques moyennes obtenues par « validation croisée ». Ces estimateurs sont meilleurs que le coût de fin d'apprentissage car ils prennent en considération les erreurs du modèle sur des exemples qui n'ont pas participé à l'estimation des paramètres. Ils rendent mieux compte de l'aptitude à la « généralisation » d'un modèle. Une fois le meilleur modèle sélectionné, il est indispensable de calculer une estimation par intervalle, c'est-à-dire de construire un intervalle de confiance pour la régression $E(Y_p)$, qui est l'espérance mathématique de la sortie du processus [66].

a. Estimation des paramètres

Les algorithmes de minimisation qui sont développés dans cette étude sont fondés sur le calcul du gradient du résultat : la direction de descente est une transformation linéaire du gradient.

Pour tous les algorithmes itératifs d'estimation des paramètres, la direction de descente est une transformation linéaire du gradient du résultat total de forme générale :

$$\theta(itér) = \theta(itér - 1) + \mu(itér)d(itér) \quad (\text{Eq. 2.7})$$

$$\theta(itér) = \theta(itér - 1) + \mu(itér)m(itér)\frac{\partial J}{\partial \theta}\Big|_{\theta(itér-1)} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

avec $\mu(itér) > 0$, $m(itér)$ matrice carrée positive, $d(itér)$ la direction de descente calculée à l'itération itér avec la valeur $\theta(itér - 1)$ de θ obtenue à l'itération précédente et $\mu(itér)$ est le pas de progression dans cette direction.

Le coût total est la somme des N résultats partiels s'écrivent :

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N J^k(\theta) = \sum_{k=1}^N \frac{1}{2} (y_p^k - g(\mathbf{x}^k, \theta))^2 \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Le gradient du résultat total s'obtient, à l'itération itér, en calculant successivement les gradients des N résultats partiels et en les sommant :

$$\frac{\partial J}{\partial \theta}\Big|_{\theta(itér-1)} = \sum_{k=1}^N \frac{\partial J^k}{\partial \theta}\Big|_{\theta(itér-1)} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

b. Calcul du gradient

Dans cette étude, le très usité algorithme de rétropropagation de l'erreur sera adapté.

C'est une technique de descente de gradient qui minimise la distance entre la sortie du réseau et la sortie désirée [69].

L'intérêt principal de cette technique est qu'elle profite de l'architecture très contrainte du réseau pour permettre un calcul efficace du gradient de l'erreur du réseau par rapport à ses poids [64, 79 - 80].

On désigne par E l'ensemble des indices des n entrées, par H l'ensemble des indices des n_c neurones cachés et S l'ensemble des indices des n_s sorties (Figure 8). Le paramètre θ_{ij} désignant le poids de la connexion allant du neurone j vers le neurone i , P_i l'ensemble des numéros des nœuds qui agissent sur le neurone i , et par R_i l'ensemble des numéros sur lesquels agit le neurone i , les $\{x_m\}$ sont des entrées du réseau ou des sorties de neurones.

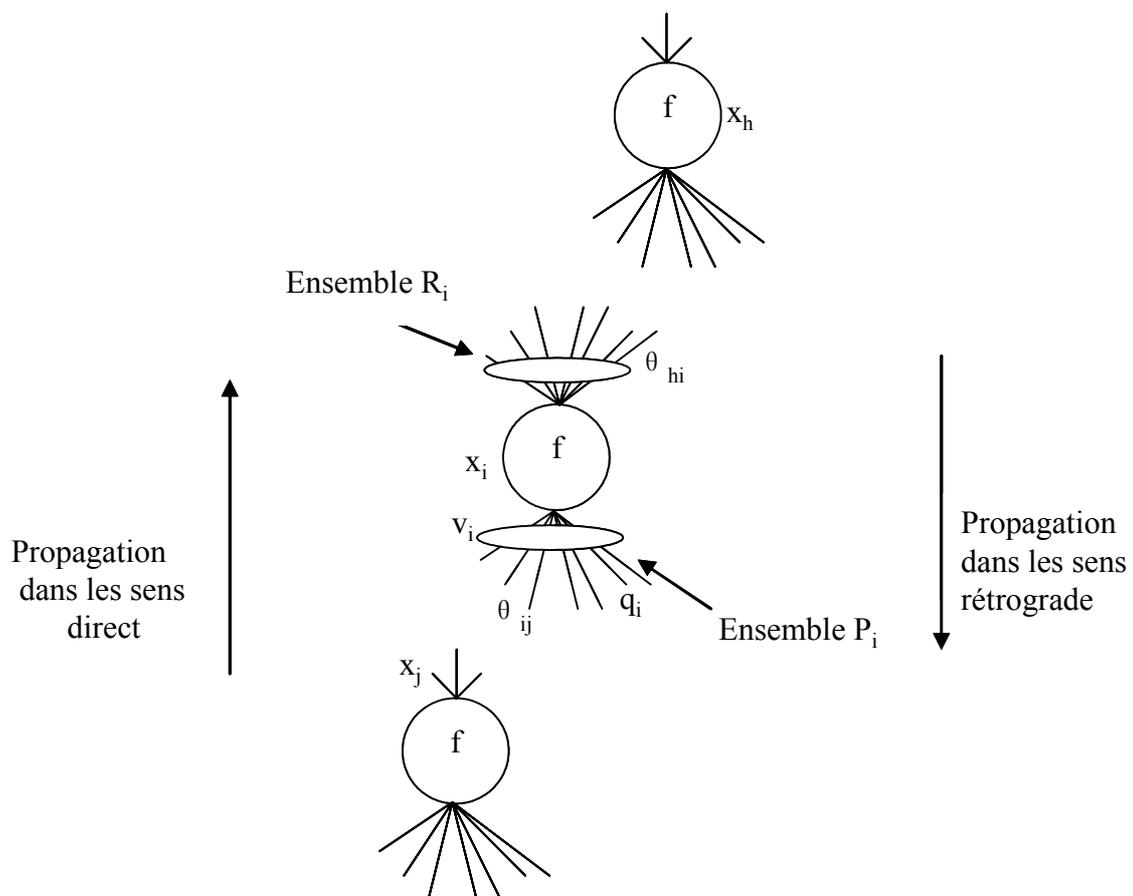


Figure 8 : Nœuds d'un réseau quelconque.

Les valeurs des entrées du réseau pour l'exemple k sont notées $\{x_i^k\} (i \in E)$, les valeurs des sorties des neurones sont notées $\{x_r^k\} (r \in S)$. L'ensemble d'apprentissage comporte N exemples $\{x_i^k, y_{pr}^k\}_{k=1 \text{ à } N}$ avec $(i \in E)$ et $(r \in S)$. La sortie du neurone i pour l'exemple k vaut alors :

$$x_i^k = f(v_i^k) = f\left(\sum_{j \in P_i} \theta_{ij}^- x_j^k\right) \quad (\text{Eq. 2.11})$$

où f est la fonction d'activation du neurone, θ_{ij}^- la valeur disponible du paramètre θ_{ij} .

Le coût quadratique partiel relatif à l'exemple k s'écrit ainsi :

$$J^k(\theta) = \sum_{r \in S} J_r^k(\theta) = \sum_{r \in S} \frac{1}{2} pr (y_{pr}^k - x_r^k(\theta))^2 = \sum_{r \in S} \frac{1}{2} pr (e_r^k(\theta))^2 \quad (\text{Eq. 2.12})$$

Les pondérations $\{p_r\}$ sont nécessaires car il y a un seul réseau pour réaliser les ns fonctions.

c. *Algorithme du gradient*

L'algorithme du gradient consiste à modifier les paramètres, à l'itération i selon la relation :

$$\theta(i) = \theta(i-1) - \mu(i) \frac{\partial J}{\partial \theta} \Big|_{\theta(i-1)} \quad (\text{Eq. 2.13})$$

avec $\mu(i) > 0$

La direction de descente est donc l'opposée de celle du gradient : c'est la direction selon laquelle la fonction diminue rapidement. μ est le pas de progression dans la direction de descente.

C'est un algorithme simple qui présente les caractéristiques suivantes :

- il est généralement efficace loin d'un minimum ;
- au voisinage d'un minimum, le gradient tend vers zéro, donc l'évolution des paramètres devient très lente.

d. Algorithmes de minimisation du second ordre

Dans ce cas des algorithmes de minimisation du second ordre, la direction de descente $d(i)$ est une transformation linéaire appropriée du gradient du coût total s'énonçant :

$$\theta(i) = \theta(i-1) - \mu(i)d(i) = \theta(i)m(i)\frac{\partial J}{\partial \theta}\Big|_{\theta(i-1)} \quad (\text{Eq. 2.14})$$

avec $\mu(i) > 0$

Pour que $d(i) = -m(i)\frac{\partial J}{\partial \theta}$ soit une direction de descente, il faut que la matrice $m(i)$ soit positive. Le pas $\mu(i)$ est asservi à l'aide d'un algorithme de recherche unidimensionnelle dans la direction $d(i)$.

L'algorithme employé dans le cadre de ces travaux est celui de Levenberg-Marquardt [81 - 82].

2.4.5. Initialisation des paramètres

Le potentiel $v_i = 0$ de chaque neurone caché i définit un hyperplan dans l'espace des entrées :

$$v_i = \theta_{i0} + \sum_{j=1}^N \theta_{ij} x_j = 0 \quad (\text{Eq. 2.15})$$

Si au début de l'apprentissage les paramètres $\{\theta_{ij}\}$ sont initialisés à zéro, les valeurs des $\{q_i^k\}$ (valeurs rétropropagées) des neurones cachés ($i \in H$) sont nulles à la première itération. Il en résulte que les paramètres des neurones cachés ne seront jamais modifiés. Pour que l'algorithme démarre, il faut que donc que ces paramètres soient initialement non nuls.

D'autre part, pour que l'apprentissage démarre dans des bonnes conditions, une solution pratique et efficace consiste à initialiser à zéro les paramètres des neurones cachés relatifs aux entrées constantes (biais). Ainsi, les hyperplans initiaux passent tous par l'origine.

Une autre précaution doit être prise pour l'initialisation des valeurs des paramètres : il faut qu'ils ne soient pas trop grands afin que tous les potentiels des neurones cachés $\{v_i\}$ soient dans la partie quasi linéaire de la fonction de transfert (une tangente hyperbolique par exemple).

2.4.6. Règles d'arrêt des algorithmes

Dans le cas de la minimisation, il est nécessaire de définir des règles d'arrêt de l'algorithme mis en œuvre. Ces règles portent sur les valeurs de grandeurs qui, lorsqu'elles sont très faibles, traduisent le fait que l'algorithme a atteint un minimum absolu ou relatif, par exemple :

- la norme euclidienne du gradient ;
- la norme euclidienne de la variation du gradient entre deux itérations ;
- la norme euclidienne de la variation du vecteur des paramètres entre deux itérations.

Il est nécessaire de définir en outre une règle d'arrêt fondée sur un nombre maximal d'itérations au cas où les règles précédentes n'interrompent pas l'apprentissage.

2.5. Concepts de la logique floue

La théorie mathématique des sous-ensembles flous définit de nombreuses opérations sur ces sous-ensembles et sur les fonctions d'appartenances qui rendent ces notions utilisables. Ainsi, un sous-ensemble flou F est défini sur un ensemble de valeur, l'univers de discours U (le référentiel). Il est caractérisé par une fonction d'appartenance :

$$\mu : x \in U \rightarrow \mu(x) \in [0,1] \quad (\text{Eq. 2.16})$$

qui quantifie le degré d'appartenance de chaque élément de U à F .

Le concept de la théorie des sous-ensembles flous (et par extension, la logique floue) s'appuie sur la notion de degré d'appartenance d'un élément à un sous-ensemble flou. Les sous-ensembles flous sont caractérisés par une fonction d'appartenance, notée μ , définie sur $[0, 1]$. En d'autres termes, dans le langage ensembliste classique, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble tandis qu'un élément appartient à un sous-ensemble flou avec un certain degré. Un sous-ensemble flou permet de représenter différentes notions, en particulier la spécificité et la précision [83].

La logique floue a été dans plusieurs applications. La plupart de ces applications s'appuient sur les travaux de Mamdani [84, 85 - 86], qui fut certainement le premier à entrevoir la potentialité de la théorie des sous-ensembles flous dans ce domaine.

2.5.1. Commande floue

La commande floue est l'application la plus utilisée de la logique floue. Elle consiste à remplacer les algorithmes de réglage conventionnels par des règles linguistiques. La Figure 9 illustre les différentes étapes du développement du processus.

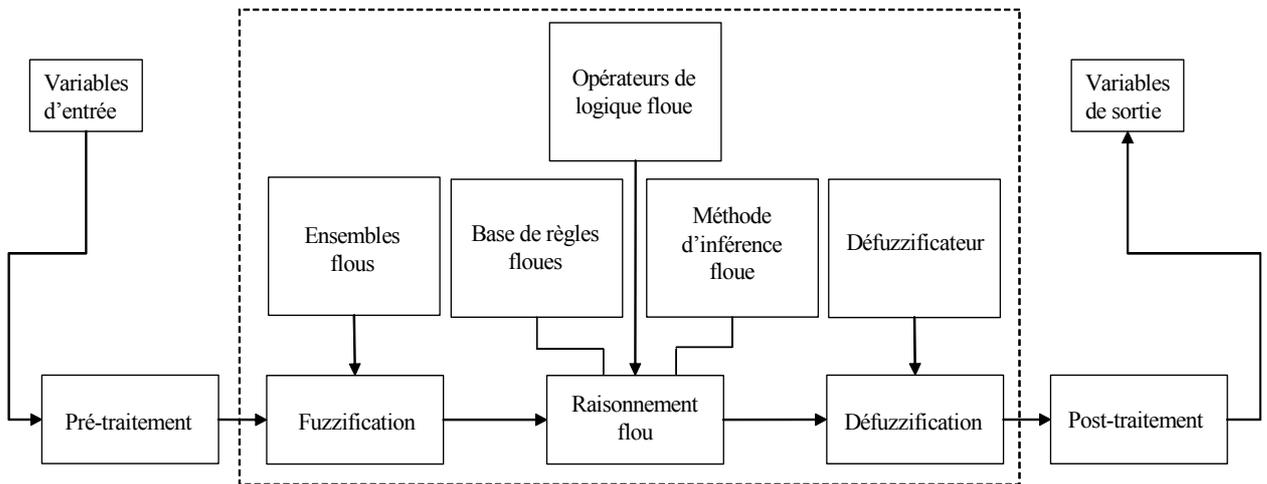


Figure 9 : Architecture classique d'un système à base de la logique floue.

On procède d'abord à la partition en sous-ensembles flous des différents univers de discours que le système impose. Ensuite on détermine la base de règles qui va caractériser le fonctionnement désiré du système. Puis on transforme les variables réelles, c'est à dire celles qui ont une réalité physique, en variables floues. C'est l'étape de la fuzzification.

On utilise alors ces variables floues dans un mécanisme d'inférence qui crée et détermine les variables floues de sortie en utilisant les opérations sur les fonctions d'appartenance.

Enfin, on opère à la défuzzification qui consiste à extraire une valeur réelle de sortie à partir de la fonction d'appartenance du sous-ensemble flou de sortie établi par le mécanisme d'inférence [87].

2.5.2. Variables floues

La logique floue est basée sur des variables floues dites variables linguistiques à valeurs linguistiques dans l'univers du discours U . Chaque valeur linguistique constitue alors un ensemble flou de l'univers du discours. Graphiquement, une variable linguistique peut

être représentée comme dans la Figure 10 [88]. Les grandeurs utilisées dans un système de réglages sont converties en variables floues. Les grandeurs d'entrée et de sortie peuvent être définies à l'aide d'un certain nombre d'intervalles flous et diverses fonctions d'appartenance. Les fonctions d'appartenance permettent d'établir une relation entre le degré de vérité de la variable floue et la grandeur d'entrée correspondante.

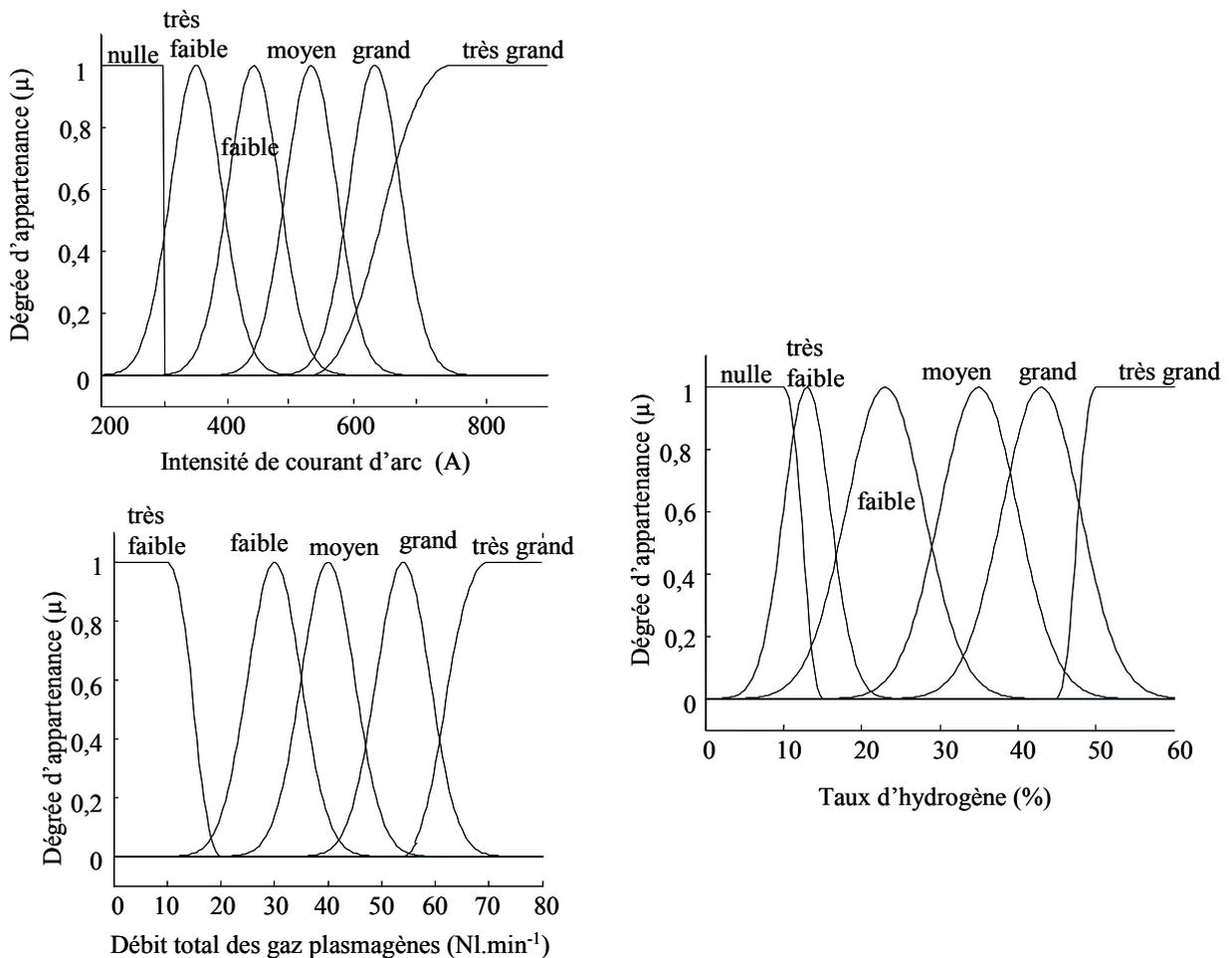


Figure 10 : Exemple de partition floue des variables du problème.

Variables linguistiques : Paramètres opératoires : l'intensité de courant (I), le débit total des gaz plasmagènes (Ar + H₂) et le taux d'hydrogène (H₂/Ar).

Valeurs linguistiques : "Nulle", "Très faible", "Faible", "Moyen", "Grand", "Très grand".

Univers du discours : Gamme des paramètres opératoires de 200 à 800 A pour I, de 0 à 80 Nl.min⁻¹ pour Ar + H₂ et de 0 à 60 % pour H₂/Ar.

2.5.3. Règles linguistiques

Les règles linguistiques permettent de coder la connaissance que l'on a sur le contrôle du processus. Ce sont des règles floues dont la forme générale est la suivante :

- « si prémisses alors conclusion » , où les prémisses portent sur les entrées du contrôleur flou et les conclusions sur les sorties. Ces règles sont en fait des propositions floues incluant un opérateur d'implication. Les conclusions de règles peuvent être de deux sortes [89 - 90] :

- les règles de type Mamdani où les conclusions, comme les prémisses, sont des propositions floues :

$$\text{si } x \text{ est } A_1 \text{ et } y \text{ est } B_1 \text{ alors } z \text{ est } C_1$$

- les règles de type Sugeno où dans les conclusions, une sortie est fonction des entrées :

$$\text{si } x \text{ est } A_1 \text{ et } y \text{ est } B_1 \text{ alors } z = f(x; y)$$

Dans cette étude, la méthode de Mamdani a été utilisée.

2.5.4. Fuzzification

La fuzzification est l'étape de transformation permettant de passer d'un niveau discret à un niveau continu et d'un niveau numérique/quantitatif à un niveau symbolique/qualitatif [83 - 89]. Les valeurs délivrées par les capteurs, décrivant l'état du système contrôlé, sont traduites en labels de sous-ensembles flous caractérisant les variables linguistiques associées (Figure 10).

2.5.5. Règles d'inférences

L'inférence sur les règles est l'étape du raisonnement du contrôleur. On regroupe souvent les phases d'inférence et de composition sous le vocable générique d'inférence. Les règles d'inférence sont l'ensemble des différentes règles reliant les variables floues d'entrée d'un système aux variables floues de sortie de ce système. Le mécanisme d'inférence consiste à déterminer les règles floues activées (c'est-à-dire les règles dont le degré d'activation $\mu_{\text{prémisse}}$ issu des prémisses est non nul). Au niveau de chacune de ces règles, ce degré va permettre de déterminer une valeur floue pour la (les) variable(s) de sortie apparaissant dans la partie « conclusion ».

Les deux méthodes d'inférence les plus couramment utilisées sont le MINIMUM et le PRODUIT. L'inférence MINIMUM (l'implication de Mamdani) consiste à tronquer à la valeur $\mu_{\text{prémisse}}$ la caractérisation floue associée à une variable de sortie, alors que l'inférence PRODUIT (l'implication de Larsen) revient à affecter à celle-ci un facteur d'échelle correspondant à $\mu_{\text{prémisse}}$.

Les règles d'inférences font appel aux opérateurs et, ou et non, qui s'appliquent aux variables floues. Dans le cas de la logique binaire ces opérateurs sont définis de façon simple et univoque. Dans le cas de la logique floue, la définition de ces opérateurs n'est plus univoque et on utilise le plus souvent les relations présentées dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Opérateurs les plus utilisés.

Dénomination	Opérateurs de Zadeh MIN/MAX	Probabiliste PROD/PROBOR
Intersection ET	$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$	$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \times \mu_B(x)$
Réunion OU	$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$	$\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \times \mu_B(x)$
Complément NON	$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$	$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$

Les opérations minimum et maximum présentent l'avantage de la simplicité lors du calcul, par contre, elles privilégient l'une des deux variables. Les opérations de produit et valeurs moyennes sont plus complexes à calculer mais elles produisent un résultat qui tient compte des valeurs des deux variables. Les méthodes de composition MAXIMUM (couplée le plus souvent avec l'inférence MINIMUM) et SOMME (couplée le plus souvent avec l'inférence PRODUIT) sont les plus utilisées.

2.5.6. Défuzzification

Après la phase d'inférence, pour chaque variable linguistique de sortie du contrôleur, il s'agit de regrouper les caractérisations floues issues de l'inférence pour obtenir une seule par variable.

C'est la partie duale de la fuzzification, consistant à combiner les sorties des règles calculées à l'étape précédente, dans le but de déterminer les commandes effectives du

robot. La phase de défuzzification permet de générer les commandes qui peuvent être appliquées au système réel contrôlé [91]. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification dont les plus communément usitées sont la méthode du centre de gravité, la méthode du maximum et la méthode de la moyenne des maxima.

a. Méthode du centre de gravité

La technique du centre de gravité consiste à tracer, sur un même diagramme, les différentes zones trapézoïdales correspondant à chacune des règles et à calculer le centre de gravité de la zone consolidée.

$$sortie = \frac{\int_U y \cdot \mu(y) dy}{\int_U \mu(y) dy} \quad (\text{Eq. 2.17})$$

où U=univers du discours (toutes les valeurs de sortie considérées)

Le calcul du centre de gravité permet bien d'obtenir une seule valeur pour la grandeur de sortie. Son calcul est cependant relativement complexe puisqu'il nécessite le calcul d'une intégrale, ou dans le cas simple de fonctions d'appartenance en raies, d'une somme pondérée.

b. Méthode du maximum

Pour une variable de sortie donnée, si la fonction d'appartenance associée à la caractérisation floue de sortie ne possède qu'un maximum, la valeur numérique renvoyée est égale à ce maximum.

c. Méthode de la moyenne des maxima

$$sortie = \frac{\int_S y dy}{\int_S dy} \quad (\text{Eq. 2.18})$$

$$\text{où } S = \left\{ y_0 \in U / \mu(y_0) = \text{SUP}_{y \in U} (\mu(y)) \right\} \quad (\text{Eq. 2.19})$$

Pour une variable de sortie donnée, la valeur numérique délivrée est calculée comme la moyenne des valeurs appartenant à la caractérisation floue de sortie et ayant comme

degré d'appartenance le maximum de la fonction caractéristique de cette caractérisation floue.

La méthode de la moyenne des maxima assure de meilleures performances de transitions tandis que la méthode du centre de gravité est plus régulière dans ses sorties [92]. Les performances de la première méthode sont comparables à celles d'un système de relais à plusieurs niveaux et les performances de la seconde méthode sont comparables à celles d'un contrôleur PI. Un contrôleur utilisant la méthode du centre de gravité garantit une erreur quadratique moyenne inférieure à celle d'un contrôleur utilisant la méthode de la moyenne des maxima. Cette dernière est cependant plus performante que la méthode du maximum.

2.5.7. Avantages et limites de la logique floue

Il est possible de décrire les règles sous une forme proche du langage de l'expert (tiède, chaude, baisser légèrement, etc.) mais, il est nécessaire de passer par une phase de correspondance entre cette terminologie et des valeurs numériques pour correspondre aux valeurs des capteurs. Les actions générées peuvent être plus progressives que des échelons liés à des seuils fixes :

- le système possède une moindre sensibilité aux seuils ;
- la présentation des actions sous forme de tables permet d'assurer une cohérence visuelle entre les différentes actions ;
- la combinaison des actions de plusieurs règles actives permet de prendre en compte des non linéarités de comportement par la mise en place conviviale d'actions pouvant être non linéaires.

2.5.8. Application au contrôleur flou

Lors de la mise au point d'un contrôleur flou, plusieurs problèmes peuvent survenir : bien que l'écriture des règles floues constituant la base soit relativement aisée, car plus ou moins intuitive, il s'est rapidement avéré difficile de faire cohabiter plusieurs comportements dans la même base. En effet, suivant la situation courante, certains comportements devaient avoir une importance qui ne ressortait pas de par l'écriture des règles. Il s'agissait donc de déterminer un paramètre de la base de connaissance, qui permette d'adapter au mieux le comportement global du contrôleur. Parmi tous les

paramètres possibles, le choix de la détermination de poids associés à chaque règle floue de la base a été opté. L'idée intuitive est que chaque règle se voit dotée d'un poids représentant son importance relativement aux autres règles de la base. Dans un premier temps, la détermination de ces poids s'est faite de manière empirique.

Les protocoles neuraux couplés à la logique floue devraient permettre de développer un contrôleur indépendant qui pourrait ajuster en temps réel les paramètres opératoires en fonction des propriétés désirées.

2.6. Conclusion

Les réseaux de neurones sont de puissants outils d'analyse et d'interprétation de données et qui sont capables d'approximer n'importe quelle fonction aussi complexe soit-elle. Les RNA sont entraînés à partir de données incorporées au système. Ainsi ils s'améliorent avec l'expérience et leur réponse sera d'autant meilleure qu'ils emmagasinent des informations.

Les RNA possèdent une propriété fondamentale qui les distingue des techniques classiques de traitement des données. Pour obtenir un modèle non linéaire de précision donnée, un RNA a besoin de moins de paramètres ajustables que les méthodes de régression classiques (par exemple la régression polynomiale). Par conséquent, un RNA nécessite moins de données qu'une méthode de régression classique pour élaborer un modèle non linéaire de précision équivalente.

Quant à la logique floue, de par la quantité des travaux de recherche et des réalisations existantes, celle-ci présente un certain nombre de points forts. D'abord, elle simplifie la conception d'un contrôleur dans la mesure où l'on décrit directement le fonctionnement de celui-ci sur le système contrôlé. Dans le cas de systèmes complexes, cela représente un avantage indéniable par rapport à la plupart des autres méthodes qui s'attachent à modéliser les systèmes. De plus, un contrôleur flou est relativement ouvert à travers l'utilisation de règles linguistiques écrites en langage naturel; il est possible de gérer de manière assez souple ces règles.

Cependant, le problème majeur réside dans le fait que l'on ne puisse pas prouver la stabilité d'un système flou, contrairement aux modèles mathématiques classiques. Cela peut présenter des problèmes certains dans des domaines fortement contraints.

En ce qui concerne notre travail, nous considérons que notre contrôleur peut être entièrement codé par un contrôleur flou dont les sorties pourront éventuellement être filtrées dans les situations nécessitant une sécurité.

CHAPITRE III :

METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

3.1. Introduction

La fiabilité d'un modèle dépend beaucoup des conditions dans lesquelles les protocoles expérimentaux permettant de collecter les données servant à l'établir ou à le valider ont été menés. Pour cela, toutes les étapes tel que la chronologie, la pertinence et le choix des paramètres doivent être effectuées avec minutie.

La fiabilité et la reproductibilité des dépôts sont critiques pour réduire les coûts de la réalisation d'un dépôt par projection thermique. Parmi les causes de défaillance dans la réalisation d'un dépôt, on peut citer [54] :

- les erreurs de conception des pièces à revêtir ;
- les erreurs dues à l'opérateur pouvant intervenir au cours des différentes phases de traitements (sablage, dégraissage, etc.) [93]. On a souvent recours aux systèmes qualités pour minimiser ce facteur.

3.2. Poudre

Dans le cadre de cette étude, une poudre d'alumine- rutil METCO 130⁵ (Al_2O_3 -13% en masse TiO_2) obtenue par le procédé de fusion / broyage a été utilisée. La distribution granulométrique est mesurée par voie sèche à l'aide d'un analyseur Coulter LS130⁶. La Figure 11 illustre le dispositif de mesure.



Figure 11 : Analyseur Coulter LS130.

⁵ Sulzer-Metco, Rigackerstrasse 16, 5160 Wohlen, Switzerland

⁶ Beckman Coulter France S.A. Paris Nord 2 33 rue des Vanesses BP 50359 Villepinte 95942 ROISSY CDG Cedex

Cet appareil emploie la diffusion de la lumière d'un rayonnement laser pour mesurer la taille de poudre. Par la suite, la taille de la poudre est évaluée correspondant au diamètre équivalent moyen de la sphère projetée.

Avant son utilisation, la poudre est agitée mécaniquement pour être homogénéisée durant trente minutes environs. Pendant la phase de projection, l'injection descendante de la poudre se fait perpendiculairement à l'axe du jet de plasma par l'intermédiaire d'un tube de 1,8 mm de diamètre (interne), et débouche dans le canal de la tuyère à 3 mm en amont de la sortie de la tuyère à une distance de 6 mm de l'axe géométrique de la torche.

L'analyse de la distribution granulométrique de la poudre utilisée est présentée sur la Figure 12. Elle est centrée autour de 36 μm (valeur moyenne $d_{0,5}$). Une série de cinq mesures a été réalisée. Les résultats représentés sont une moyenne de ces mesures.

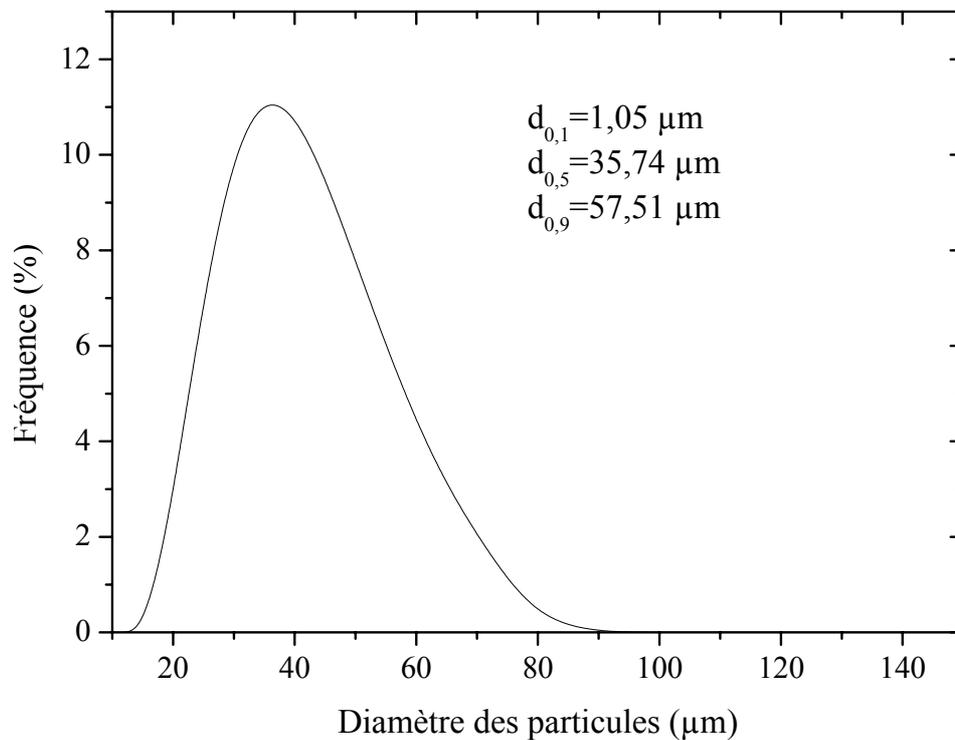


Figure 12 : Distribution granulométrique de la poudre METCO 130.

La poudre présente une morphologie irrégulière et dense (Figure 13), spécifique au procédé de fusion / broyage permettant de contrôler l'homogénéité de la poudre. Ce procédé de fabrication conduit toutefois à une morphologie de grains anguleux conférant à la poudre une coulabilité moyenne.

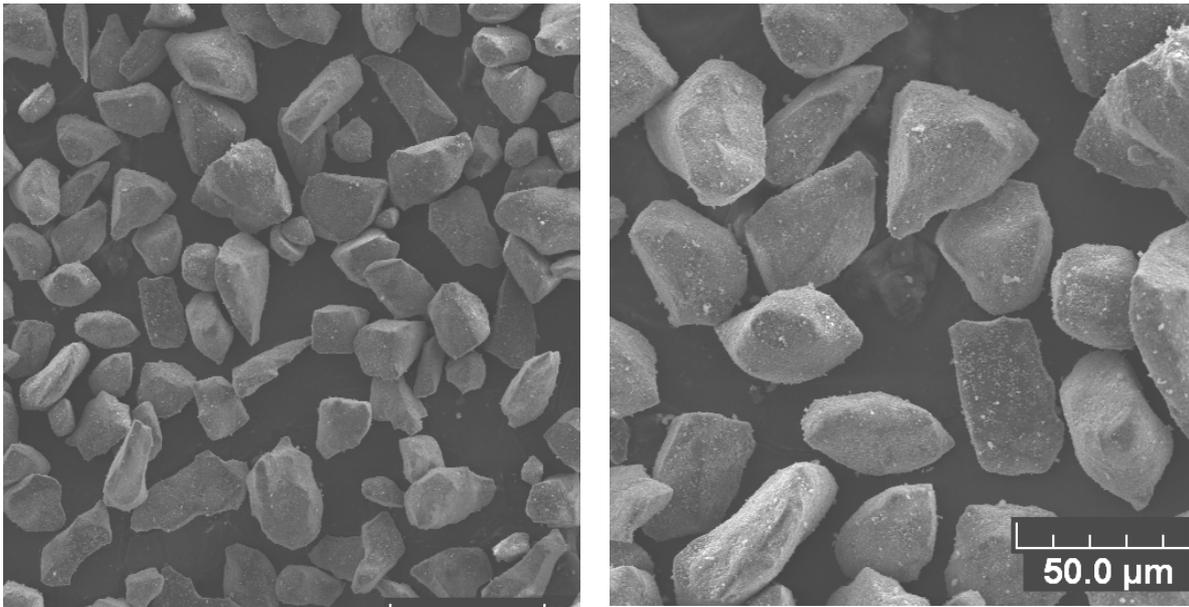


Figure 13 : Observation au microscope électronique à balayage (MEB) en mode électrons rétro-diffusés ou BSE (Back Scattering Electrons), $\times 200$ et $\times 500$ respectivement de la poudre $\text{Al}_2\text{O}_3 - 13\%$ masse TiO_2 (Metco 130).

La composition chimique de la poudre a été analysée par spectroscopie dispersive en énergie (EDS). Sur la Figure 13, les zones blanches sont riches en Ti, par conséquent il s'agit de la phase rutile (TiO_2). Les zones grises sont riches en Al et O : il s'agit donc de la phase alumine (Al_2O_3) ainsi que les spectres présentés sur la Figure 14 l'explicitent.

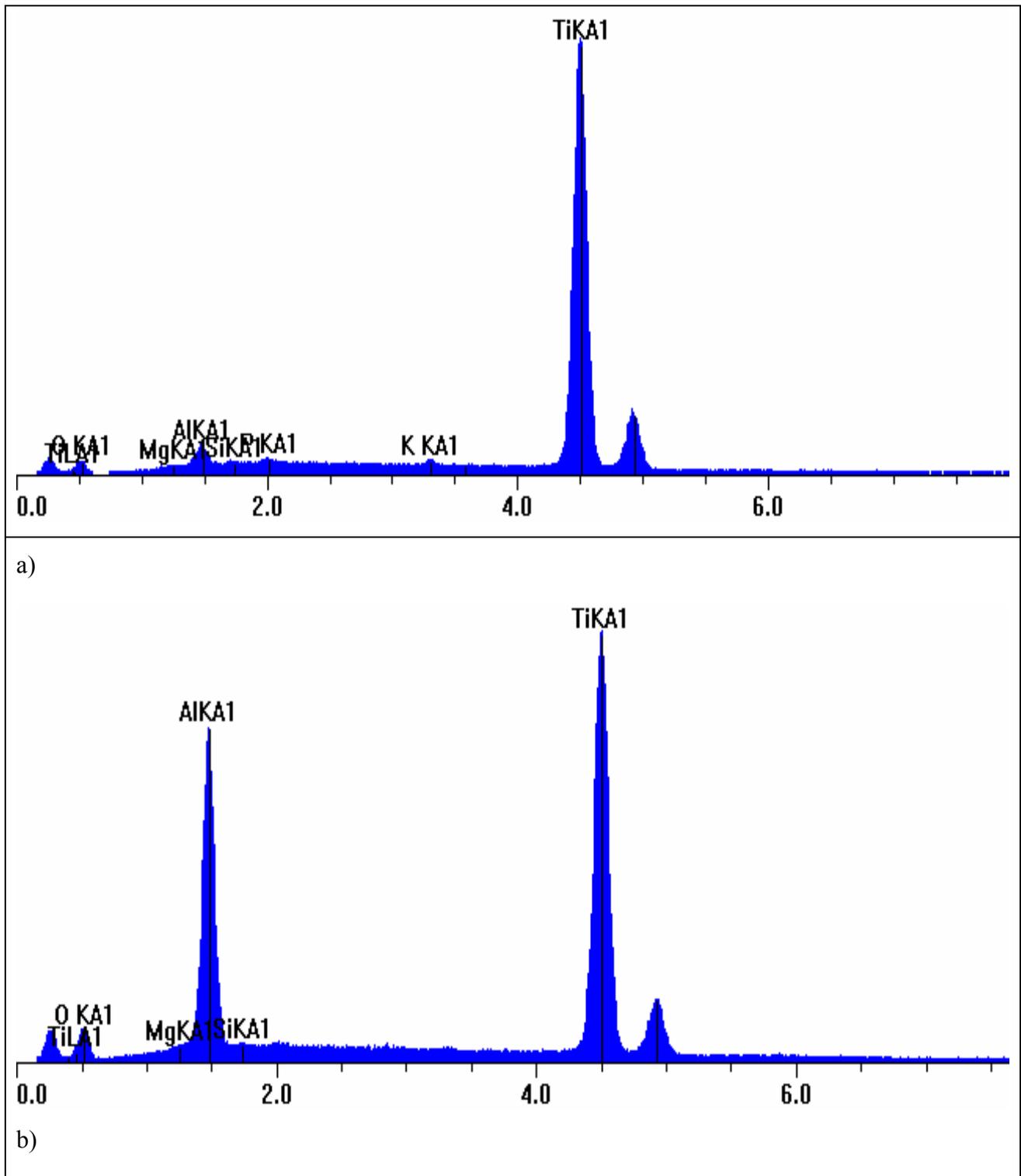


Figure 14 : Analyse de la composition chimique de la poudre par spectroscopie dispersive en énergie (EDS) : a) zone blanche (rutile); b) zone grise (alumine).

3.3. Substrats

Les substrats sont constitués en acier inoxydable austénitique correspondant à la norme AISI 304 L (mise en forme sous forme de barreau étiré de 25 mm de diamètre). Les principales propriétés physiques de ce type d'acier sont données dans le Tableau 5 [94]. Ce choix a été guidé non seulement par la différence de coefficients linéaires de dilatation entre le substrat et le dépôt, mais aussi par l'utilisation courante de ces substrats dans l'industrie. Les applications de l'acier 304 L sont très nombreuses. Sa biocompatibilité permet une utilisation soit comme implant (prothèse de hanche), soit en contact direct avec le corps humain (montre, piercing, etc). Son excellente tenue au froid permet de l'utiliser à de très basses températures (conduits pour helium liquide [95]) et sa résistance à l'oxydation lui autorise des applications dans les domaines mécaniques (pompes, etc.).

Les substrats destinés à la réalisation de dépôts (échantillons) sont découpés et usinés sous forme des disques de 25 mm de diamètre et d'épaisseur 20 mm. L'une des extrémités de l'échantillon sera revêtue après une préparation de surface spécifique.

Tableau 5 : Principales caractéristiques du substrat.

Coefficient linéaire de dilatation (20-100°C)	Masse volumique	Point de fusion	Conductivité thermique (23°C)
$18 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	7930 kg.m^{-3}	1400-1455°C	$16,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

3.4. Préparation des substrats

Les surfaces des substrats sont préparées préalablement avant d'être revêtues afin d'augmenter au mieux l'adhérence des couches puisque le mode principal dans le cas d'une projection atmosphérique d'une couche céramique sur un substrat métallique est l'ancrage mécanique.

Cette préparation se décompose suivant deux étapes, une étape de dégraissage en vue de dissoudre les graisses adsorbées en surface puis une étape de projetage ("sablage") en vue de générer une micro-géométrie propice à l'ancrage mécanique de la couche.

L'opération de dégraissage est conduite en immergeant durant une dizaine de minutes les échantillons dans des vapeurs d'acétone CH_3COCH_3 (famille des cétones aliphatiques).

Le sablage des échantillons est effectué manuellement à l'aide d'une sableuse à pression équipée d'une buse de diamètre interne de 7 mm et dont les paramètres fixes sont les suivants : abrasif corindon blanc ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) 425 - 600 μm , débit massique d'abrasif $1\pm 0,2 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$, pression de sablage 6 bars. La distance de sablage est maintenue aux environs de 120 mm et l'angle de sablage à environ 45° . Après sablage, la rugosité des substrats est mesurée à l'aide de l'appareil Surtronic 3P-Pick Up 112/1503 commercialisé par Taylor-Hobson⁷. Pour effectuer les mesures, l'appareil a été réglé aux valeurs décrites dans le Tableau 6 (valeurs considérées comme "optimales" par expérience pour quantifier la rugosité de ce type de surface).

Tableau 6 : Paramètres du profilomètre Surtronic (certaines de ces données sont des données du constructeur (* dans le tableau), d'autres sont sélectionnées lors des mesures).

Paramètres	Valeurs
Type de stylet *	Diamant
Rayon de l'extrémité de stylet *	$10\pm 2,5 \mu\text{m}$
Gamme Ra	0 - 25 μm
Gamme Rmax	0 - 199 μm
Gamme (Rp, Rt)	0 - 199,9 μm
Mouvement vertical maximal de stylet *	0,5 mm
Longueur de base	0,8 mm
Nombre de mesures par dépôt	20

Les paramètres calculés sur le profil sont Ra (écart moyen arithmétique du profil de rugosité), Rmax (hauteur pic-à-vallée maximale d'une longueur de base du profil de rugosité) et Rymax (profondeur maximale du profil de rugosité). Deux critères de rugosité mesurés sur deux substrats témoins sont présentés ici. La Figure 15 montre le

⁷ Taylor-Hobson, P.O. Box 36, 2 New Star Road, Leicester LE4 9JQ, Angleterre.

profil de la surface du substrat. Les caractéristiques de la rugosité sont données par le Tableau 7. Les valeurs obtenues sont tout à fait caractéristiques de celles recherchées en projection thermique pour assurer un ancrage du dépôt.

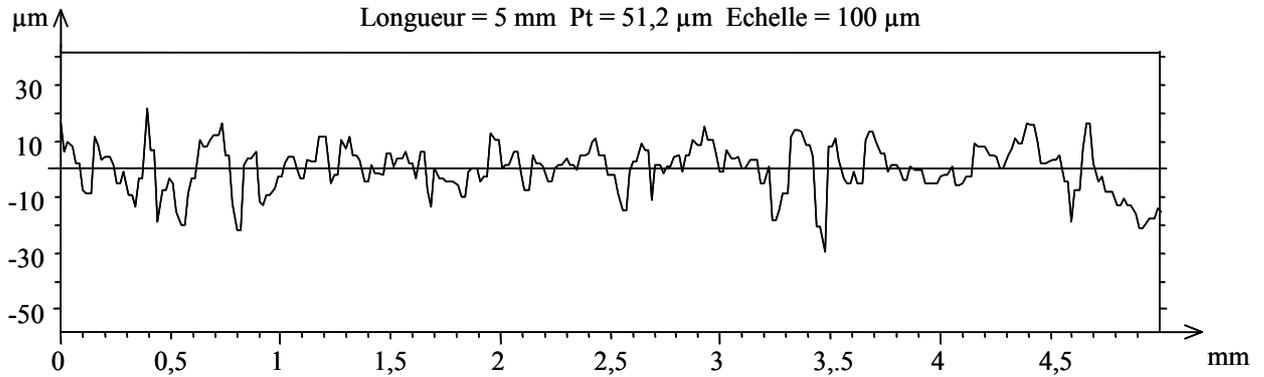


Figure 15 : Profil de la rugosité de la surface des substrats.

Tableau 7 : Paramètres moyens de rugosité.

	Ra (μm)	Rymax (μm)
échantillon#1	4,8 \pm 0,4	38,1 \pm 2,9
échantillon#2	4,7 \pm 0,1	51,38 \pm 6,2

3.5. Montage expérimental

La Figure 16 illustre la configuration d'essai retenue pour cette étude. La torche à plasma utilisée est une Sulzer Metco F4 dont la puissance maximale de fonctionnement est 55 kW. Cette torche est utilisée avec une tuyère en tungstène de 6 mm de diamètre interne. L'injection de la poudre est assurée par un distributeur régulant le débit de poudre au moyen d'un débitmètre massique.

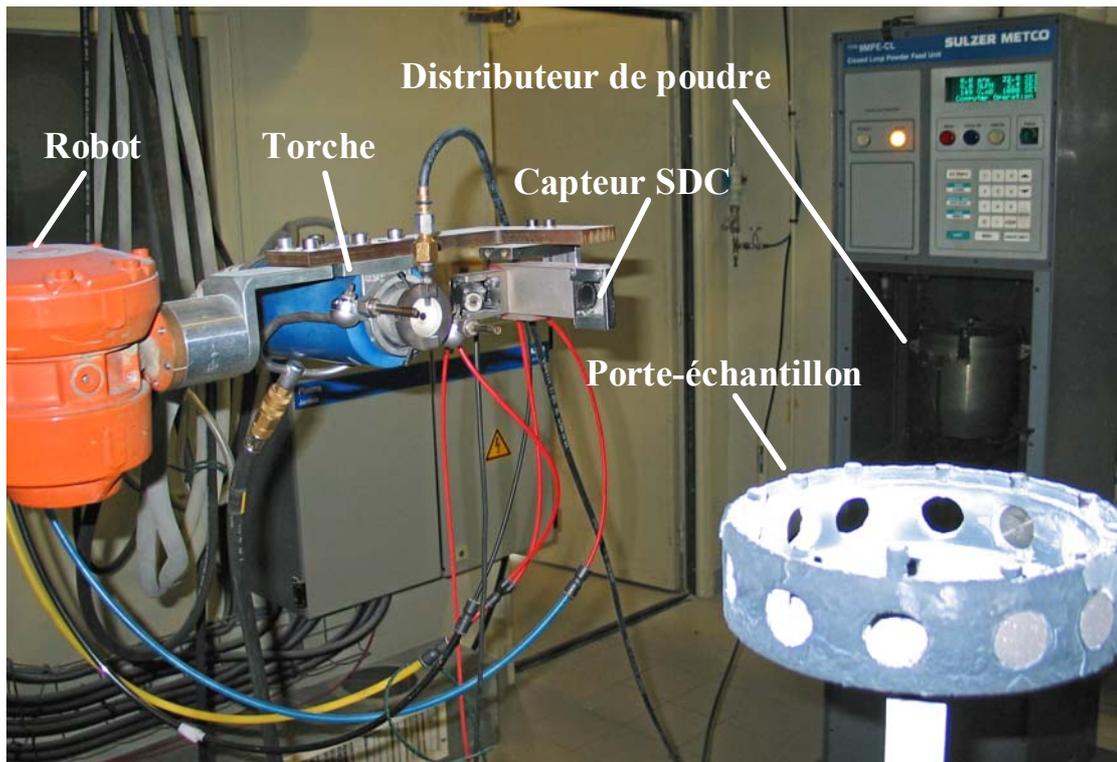


Figure 16 : Configuration d'essai.

La torche est fixée sur un robot ABB, et l'ensemble est piloté par un Multicoat contrôlant les paramètres de tir, le refroidissement de la torche, l'alimentation électrique. Pendant les tirs, la cabine de projection est ventilée au moyen d'une aspiration.

Le robot est programmé pour effectuer un balayage vertical en face d'un porte-échantillon de forme cylindrique (200 mm de diamètre) en rotation dans le sens anti-horaire. Ainsi, une trajectoire hélicoïdale est décrite par le balayage vertical couplé à la rotation. Les caractéristiques de l'hélicoïde sont contrôlées par la vitesse de balayage et la vitesse de rotation. Afin d'éviter le développement des contraintes aux extrémités des échantillons lors du retour de la torche de projection en raison d'une charge thermique trop importante, les deux points de retour sont décalés de 70 mm des extrémités du porte-échantillon.

Les caractéristiques en vol des particules sont déterminées grâce au dispositif SprayWatch (voir paragraphe 3.5.3). Le dispositif Spray Deposit Control (SDC) a été utilisé pour déterminer la température moyenne des dépôts en cours de projection (voir paragraphe 3.5.4).

3.5.1. Paramètres de projection

L'ensemble des paramètres de projection a été optimisé pour permettre d'avoir le meilleur rendement de dépôt possible. Le Tableau 8 illustre les paramètres opératoires considérés dans cette étude.

Tableau 8 : Paramètres opératoires.

Paramètres	Valeur	
Substrat	acier 304 L	
Caractéristiques de la torche	Sulzer-Metco F4 ⁸	
Diamètre interne de sortie de la buse (anode)	6 mm	
Intensité de courant d'arc (I)	de 350 à 750 A	
Débit total des gaz plasmagène (H₂ + Ar)	débit volumique	de 34 à 70 Nl.min ⁻¹
	débit massique à T _{amb}	de 50 à 100 kg.s ⁻¹
Taux d'hydrogène (H₂/ Ar)	taux volumique	de 5 à 30 %
	massique	de 0,25 à 1,50 %
Débit du gaz porteur (Ar) de poudre	de 2 à 4 Nl.min ⁻¹	
Type de poudre	METCO 130	
Débit massique de poudre	22 g.min ⁻¹	
Position de l'injecteur de poudre	externe à la torche	
Diamètre interne de l'injecteur de poudre	1,8 mm	
Distance radiale d'injection (entre l'extrémité de l'injecteur et l'axe géométrique de la torche)	6 mm	
Angle d'injection (angle entre l'axe de l'injecteur et l'axe géométrique de la torche)	normal	
Distance longitudinale d'injection (distance entre l'axe de l'injecteur et le dernier plan physique de la torche)	3 mm	
Distance de projection (distance entre le dernier plan géométrique de la torche et la tangente à la surface à revêtir)	125 mm	
Vitesse de balayage	12 mm.s ⁻¹	
Vitesse de rotation du porte-échantillon	120 tr.min ⁻¹	
Diamètre du porte-échantillon	200 mm	
Nombre de passes	30	

⁸ Sulzer-Metco, Rigackerstrasse 16, 5160 Wohlen, Switzerland.

3.5.2. Campagnes d'essais

Un essai utilisant des conditions opératoires dites de référence a été réalisé dans un premier temps pour vérifier la stabilité des conditions de projection.

En cours de projection, la puissance électrique délivrée à la torche, la puissance de refroidissement, ainsi que la tension aux bornes de la torche sont relevées afin d'en déduire l'enthalpie ainsi que le rendement de la torche.

Afin de construire la base de données, les paramètres considérés dans cette étude ont été variés (Tableau 9) en appliquant un critère de représentativité. Chaque paramètre est modifié individuellement par rapport à une valeur moyenne de référence pour permettre un bon échantillonnage.

Une série d'expériences complémentaires a permis de compléter la base de données avec l'état des particules en vol (vitesse et température moyenne de surface des particules émissives) et la température moyenne du dépôt. Le nombre de passes sélectionné a permis d'élaborer des couches présentant des épaisseurs de l'ordre de 300 μm d'épaisseur, permettant dans un second temps l'étude de certaines caractéristiques structurales.

Tableau 9 : Variation des paramètres opératoires.

Essai	Intensité du courant d'arc [A]	Débit total des gaz plasmagènes (H ₂ +Ar)*		Fraction d'hydrogène (H ₂ /Ar)*		Débit du gaz porteur* [Nl.min ⁻¹]
		volumique [Nl.min ⁻¹]	massique [10 ⁻³ Kg.s ⁻¹]	volumique [%]	massique [%]	
ref	600	51,87	1,21	30,00	1,50	3,60
#1	350	50,00	1,21	25,00	1,25	3,60
#2	450	50,00	1,21	25,00	1,25	3,20
#3	530	50,00	1,21	25,00	1,25	3,20
#4	650	50,00	1,21	25,00	1,25	3,20
#5	700	43,00	1,19	7,50	0,38	3,20
#6	530	34,57	0,83	25,00	1,25	2,00
#7	530	41,48	1,00	25,00	1,25	3,20
#8	530	55,31	1,33	25,00	1,25	3,20
#9	530	62,22	1,50	25,00	1,25	3,20
#10	530	69,14	1,67	25,00	1,25	3,20
#11	530	42,42	1,21	5,00	0,25	3,20
#12	530	44,33	1,21	10,00	0,50	3,20
#13	530	46,23	1,21	15,00	0,75	3,60
#14	530	48,12	1,21	20,00	1,00	3,60
#15	530	51,87	1,21	30,00	1,50	3,60
#16	530	50,00	1,21	25,00	4,25	2,40
#17	530	50,00	1,21	25,00	1,25	2,80
#18	530	50,00	1,21	25,00	1,25	3,20
#19	530	50,00	1,21	25,00	2,25	3,60
#20	530	50,00	1,21	25,00	3,25	4,00

* valeurs affichées. Les débits des gaz sont régulés par des débitmètres massiques présentant une précision de $\pm 3\%$ de leur pleine échelle sur l'indication volumique. Ainsi, pour le débitmètre des gaz plasmagènes, leur pleine échelle équivaut à 50 Nl.min⁻¹, soit une précision de $\pm 1,5$ Nl.min⁻¹. Le débitmètre régulant le débit de gaz porteur offre une pleine échelle de 10 Nl.min⁻¹, soit une précision de $\pm 0,3$ Nl.min⁻¹.

3.5.3. Diagnostic des particules en vol

Les caractéristiques des particules en vol sont mesurées à l'aide du dispositif Spray-Watch [59]. L'appareil est composé d'une caméra CCD noir et blanc à obturation rapide et d'un pyromètre deux couleurs qui fournissent respectivement la vitesse des particules émissives déduites des longueurs des traces laissées par les particules en vol pendant un temps d'exposition connu et la température de surface des particules détectées par le dispositif ($T > 1300$ °C).

Ce système est basé sur le traitement d'images obtenues à l'aide d'une caméra CCD, sensible dans le visible (12 bits), rapide (temps d'exposition typique de 100 ns à 10 ms) et dont la matrice de diodes est équipé de deux filtres opérant à deux longueurs d'ondes (425-575 nm et 625-750 nm). Le Spray-Watch base sa mesure sur l'intensité lumineuse rayonnée ou diffusée par les particules [96].

Un système optique permet de visualiser une partie du jet de particules ($28,8 \times 24,2$ mm²) sous la forme d'un ensemble de trajectoires.

Pour déclencher la mesure, le Spray-Watch doit détecter suffisamment de particules distinctes (> 1000 particules) à tout instant.

La Figure 17 illustre le disposition du Spray-Watch pour le diagnostic des caractéristiques des particules en vol [97].

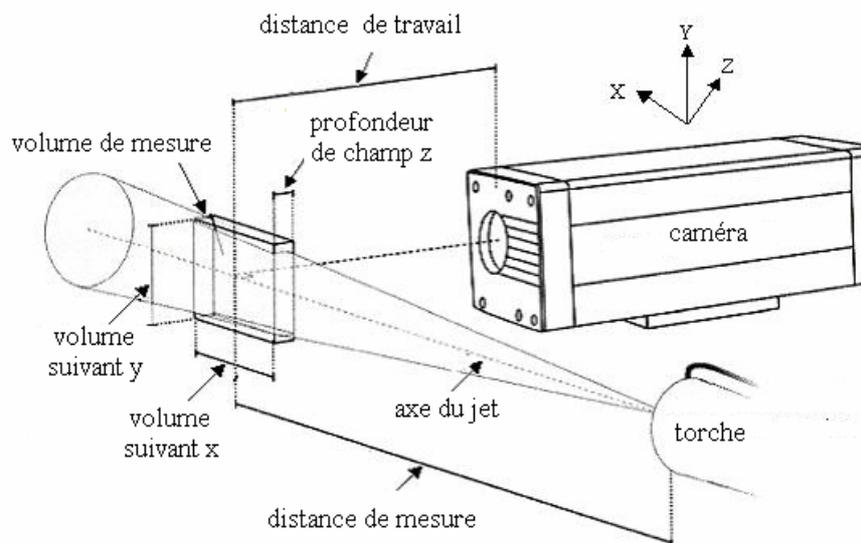


Figure 17 : Disposition de mesure.

Sur le CCD, les particules apparaissent sous forme de traînées dans des régions spectrales différentes et décalées dans l'espace.

La vitesse moyenne des particules est calculée à partir des longueurs de leurs traces sur l'image pendant un temps d'exposition donné. L'incertitude sur la mesure varie de 0,1 à 1 m.s⁻¹ en fonction de l'intervalle de variation de la vitesse [97].

La longueur et l'angle de direction de la trace dépendent de la vitesse de la particule, de la géométrie d'image et du temps d'exposition. La température de surface moyenne des particules est mesurée à l'aide d'un pyromètre à deux couleurs.

Les informations (vitesse et température de surface mesurées) sont traitées et affichées en direct à l'aide d'un PC.

Les mesures sont effectuées dans un volume (X=33mm, Y=25mm, Z=35mm) du jet de particules. Ce volume de mesure peut être ajusté en réglant la mise au point de la caméra. Les valeurs obtenues pour chaque image sont en fait, une moyenne des valeurs mesurées sur un ensemble de particules détectées dans ce volume. Pour chaque cas des paramètres opératoires on a enregistré 60 images.

La détermination des caractéristiques en vol des particules est affectée par des perturbations induites par le rayonnement du jet plasma. Il est également à noter que seules les particules émissives sont détectées [97].

A la suite de ce travail, dès lors que les grandeurs ont été déterminées à partir de la capture de 60 images, une valeur moyenne et son écart-type associé ont été calculés. Ce sont ces grandeurs qui ont été retenues pour être représentées graphiquement. Le Tableau 11 détaille les valeurs déterminées expérimentalement.

3.5.4. Mesure de la température des dépôts

Le Spray Deposit Control (SDC) [62] est constitué d'une caméra CCD qui fournit dans un plan de coupe du jet la distribution des particules en vol suffisamment émissives pour être détectées dans le visible et d'un pyromètre (9 et 14 μm) infrarouge mesurant la température de la surface du dépôt en construction (Figure 18). A l'aide de ce dispositif, le débit du gaz porteur a été ajusté pour chaque famille de paramètres afin d'obtenir le maximum de flux détecté (Figure 19) : il est considéré dans ces conditions que le gaz porteur est optimisé de telle sorte qu'il communique une forte quantité de mouvement aux particules permettant leur meilleure pénétration dans le jet de plasma. Le flux est

caractérisé par un maximum (I_{max}), une position radiale (Y) par rapport à l'axe de la torche plasma et une divergence du jet de particules (Figure 20).

Les passages successifs de la torche sur et à côté du porte-échantillons font osciller le signal. Lorsque la position du capteur est en dehors de la cible (spot), les mesures réalisées s'écartent des valeurs moyennes. Une tendance moyenne est toutefois observable.

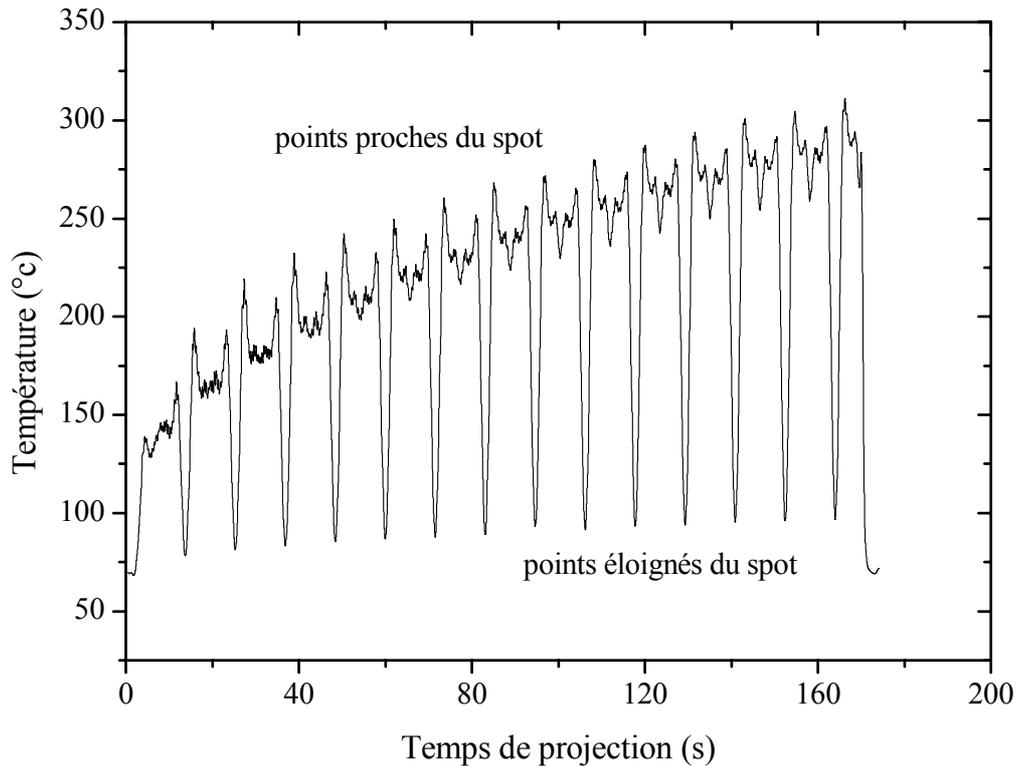


Figure 18 : Mesure de la température du dépôt (cas#10).

La détermination de la température par cette méthode dépend fortement de l'émissivité du matériau. Cette dernière est liée à la température et à l'état de surface du matériau. Une erreur aussi minime soit-elle sur l'émissivité peut entraîner une erreur non négligeable sur la valeur de température.

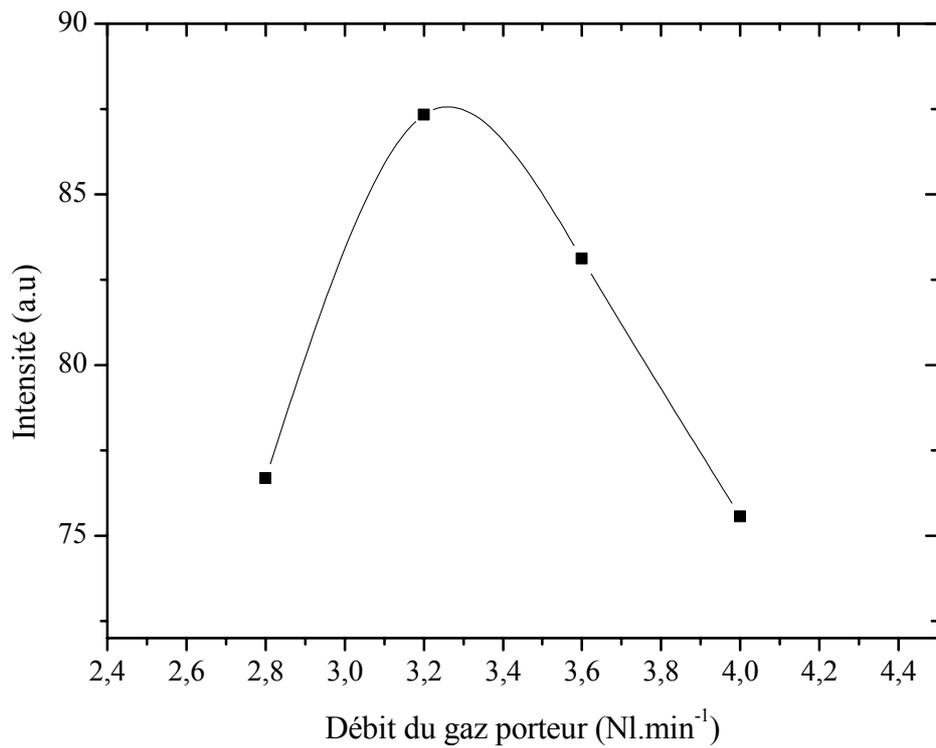


Figure 19 : Evolution du gaz porteur (cas#3).

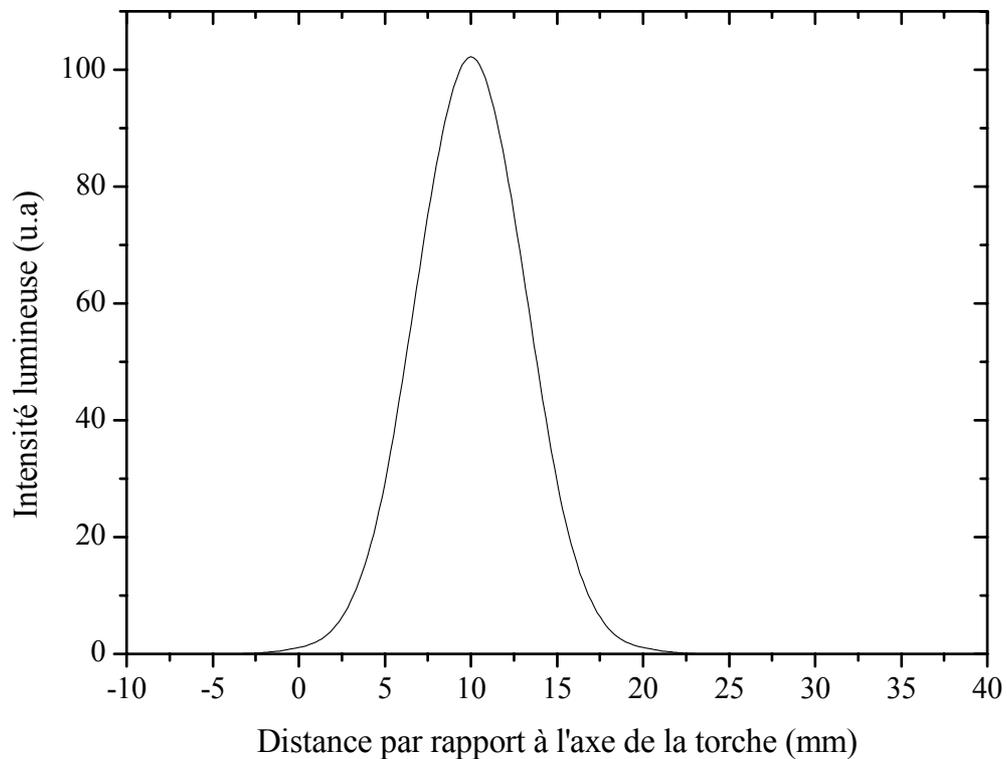


Figure 20 : Profil général de la distribution radiale de l'intensité lumineuse émise par les particules en vol.

3.6. Préparation des couches

3.6.1. Tronçonnage

Les échantillons revêtus sont tronçonnés perpendiculairement au dépôt à l'aide d'une microtronçonneuse automatique Struers Accutom – 5⁹ équipée d'une meule de type Struers 356 CA adaptée aux matériaux durs comme les céramiques. Le tronçonnage est réalisé avec une vitesse de tronçonnage de 0,020 mm.s⁻¹ et 2500 tr.min⁻¹ comme vitesse de la meule.

3.6.2. Enrobage

Après tronçonnage et dégraissage, les échantillons sont placés dans des moules de 30 mm de diamètre et imprégnés d'une résine époxyde très fluide de type Struers Epofix Resin, BUEHLER¹⁰. La résine est mélangée à un durcisseur (Epo-Thin Hardner, BUEHLER) avec une proportion de 33% en volume dans le mélange. Ce dernier est introduit dans une cloche maintenue sous vide primaire à une pression de 10⁻¹ Pa. La chambre est évacuée et ramenée à la pression atmosphérique 4 à 5 fois pour permettre l'évacuation des bulles d'air emprisonnées dans la résine. Les échantillons enrobés sont ensuite laissés à la température ambiante pendant 20 h en moyenne pour garantir une polymérisation complète de la résine.

3.6.3. Polissage

Pour assurer une bonne reproductibilité dans la préparation métallographique des échantillons, leur polissage est réalisé de manière automatique sur une polisseuse de marque Vanguard-BUEHLER (Figure 21). Le Tableau 10 synthétise la gamme et les valeurs utilisées.

⁹ Struers SAS, 370, rue du Marché Rollay. F- 94507 champigny-sur-Marne, France

¹⁰ Buehler, Ltd., 41 Waukegan Road, Lake Bluff, IL 60044, USA.

Tableau 10 : Paramètres du polissage automatique.

	Etape 1	Etape 2	Etape 3	Etape 4	Etape 5	Etape 6
Fluide	Eau	Eau	Suspension aqueuse de particules de diamant 9 μm	Suspension aqueuse de particules de diamant 3 μm	Suspension aqueuse de particules de diamant 1 μm	Suspension aqueuse de particules de diamant 1/4 μm
Fréquence/ Durée (s)	0/0	0/0	30/1	30/1	30/1	30/1
Plateau	SiC P600	SiC P1200	Drap Ultra-pad	Drap Texmet 1000	Drap Texmet 1000	Drap Texmet 1000
Rinçage Durée (min)	sans 3	sans 2	sans 6	sans 5	00 :01 10	00 :01 5
Pression (N/écha.)	8	8	8	8	8	8
Vitesse de rotation du plateau (tr.min⁻¹)	120	120	150	150	150	150
Vitesse tête (tr.min⁻¹)	60	60	60	60	60	60
Position*	6	6	5	4	3	2

* Position représente l'excentration du porte-échantillons par rapport au plateau. De plus, la rotation de la tête a lieu dans le même sens que celui du plateau.

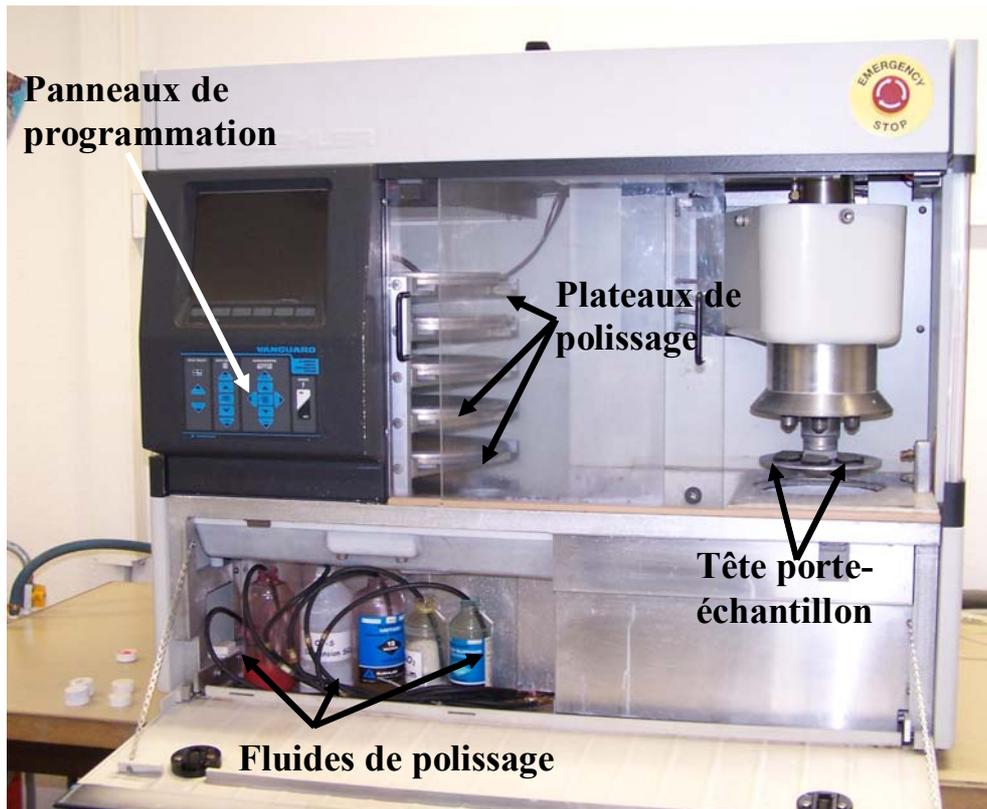


Figure 21 : Dispositif Buehler Vanguard de polissage des échantillons.

3.7. Etude structurale des dépôts

3.7.1. Morphologie des dépôts

La technique utilisée est basée sur une observation de coupes métallographiques par microscope électronique à balayage (MEB) ou *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Les images ont été prises avec l'appareil JEOL JSM 5800LV¹¹ à 15 keV. La profondeur de champ et la résolution sont plus importantes qu'en microscopie optique. Il n'est pas nécessaire d'avoir une surface plane pour l'observation. La quantification est faite par la technique d'analyse d'images [98]. La microstructure des dépôts de type lamellaire résulte de l'empilement successif de lamelles issues de l'écrasement et de la solidification des particules incidentes (Figure 22). Caractérisé principalement par des fissures et des micros défauts formés par le contact imparfait entre les lamelles (défauts d'empilements), il peut aussi contenir des défauts dus à :

- une mauvaise adhésion au substrat ;

¹¹ JEOL, 78 290 Croissy sur seine

- un effet de stratification dû aux passages successifs de la torche ou aux contraintes résiduelles ;
- la présence de particules infondues enchassées dans la structure.

Compte tenu du mode de génération des dépôts, la cohésion de ces derniers est liée directement au contact entre les lamelles et donc à la densité de défauts d'empilement.

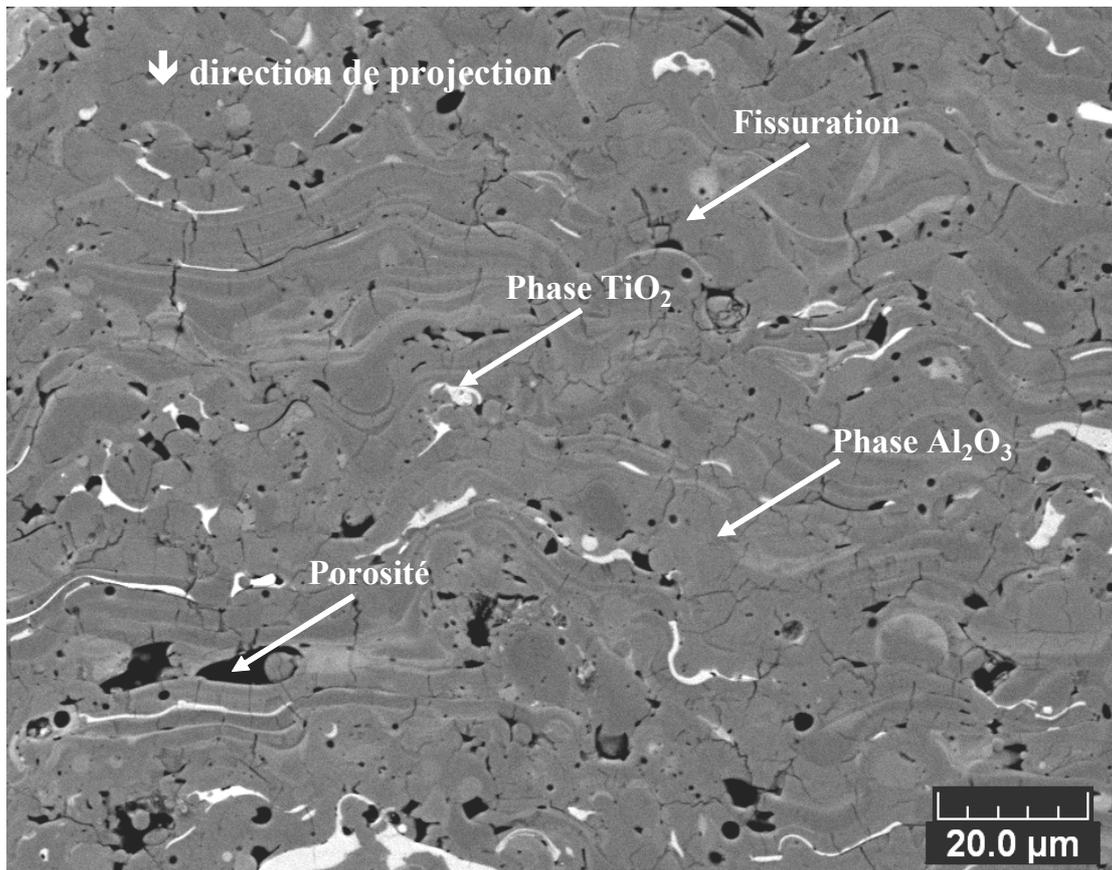


Figure 22 : Observation en coupe d'un dépôt d'alumine-rutile par microscope électronique à balayage en mode électrons secondaires (SE), $\times 1000$.

Les images numériques prises avec une résolution de $0,75 \mu\text{m}$ par pixel sont traitées à l'aide du logiciel d'analyse d'images "Image J" développé et maintenu par le département de la santé américaine (NIH, Bethesda, NH, USA) et disponible gratuitement par téléchargement sur www.scioncorp.com. Les résultats obtenus ont été moyennés.

Les résultats obtenus sont représentés dans le Tableau 11.

a. Épaisseur du dépôt

Pour chaque échantillon, trois images de sections de dépôts choisies aléatoirement ont été analysées afin de déterminer les caractéristiques microstructurales, notamment l'épaisseur moyenne du dépôt. En effet, cette épaisseur moyenne permet d'estimer dans un second temps l'épaisseur moyenne déposée par passe de la torche. Cette quantité est un indicateur relatif du rendement intrinsèque de dépôt. Les résultats obtenus expérimentalement sont illustrés dans le Tableau 11. La démarche adoptée est décrite ci-dessous :

- l'image originale (Figure 23.a) est binarisée par un seuillage à deux niveaux;
- on fait disparaître les pixels moins isolés en appliquant l'opérateur morphologique ouverture (cycle "d'érosion" suivi du cycle de "dilatation"). Ensuite on applique l'opérateur morphologique fermeture (cycle de "dilatation" suivi du cycle "d'érosion") pour éliminer les pixels isolés (Figure 23.b) ;
- l'image est traitée en appliquant un algorithme qui permet de déterminer pour chaque objet d'intérêt, les pixels qui lui sont attribués (Figure 23.c). Le profil recherché correspond à l'objet possédant le nombre maximal de pixels.

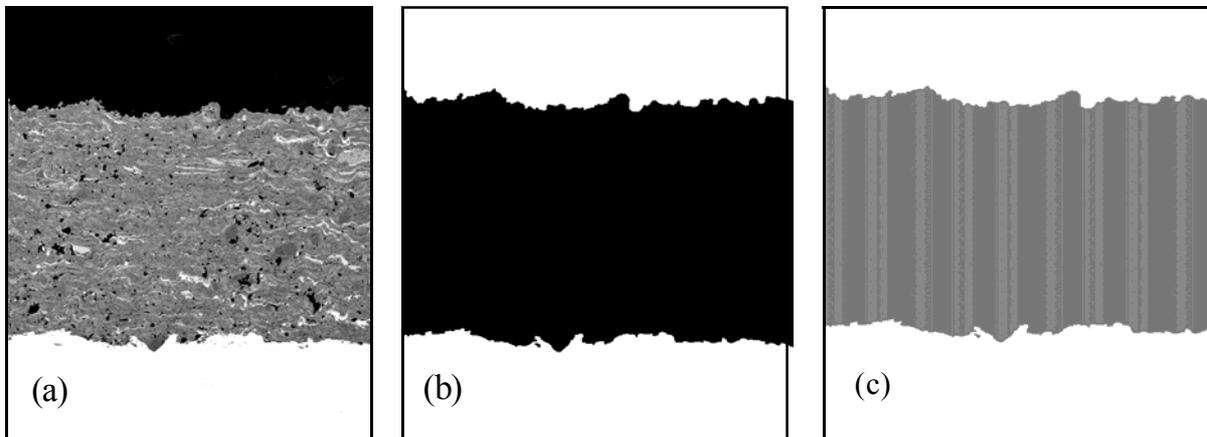


Figure 23 : Isolation des profils du substrat et du dépôt: (a) section du dépôt, (b) seuillage à deux niveaux avec application des opérateurs morphologiques ouverture / fermeture, (c) construction des profils et calcul de l'épaisseur du dépôt.

b. Taux de porosité

La porosité au sein des dépôts peut prendre plusieurs faciès [99] :

- fermé : ce qui correspond à des pores inter- ou intra-lamellaires mais sans connexions ni avec le substrat ni avec la surface,
- ouvert : le pore part de la surface jusqu'à l'intérieur du dépôt sans atteindre la surface du substrat,
- interconnecté : elle découle de la porosité ouverte mais dans ce cas, elle se propage à travers tout le dépôt mettant le substrat en contact avec l'extérieur.

L'observation du revêtement en coupe (Figure 22) avec un traitement d'image couplé à une analyse statistique a permis de déterminer le taux global de porosité avec une résolution limite de 0.2 μm [100].

Pour chaque échantillon, dix images en coupe choisies aléatoirement ont été acquises et analysées. Compte tenu de la méthode utilisée, les résultats présentent des dispersions plus ou moins importantes autour des valeurs moyennes

3.7.2. Propriétés mécaniques des dépôts

Microdureté du dépôt

La mesure de la dureté des dépôts consiste à faire une indentation dans la tranche du matériau afin d'en déterminer sa résistance à la pénétration d'un corps. La valeur obtenue donne une idée de la cohésion du dépôt.

La dureté Vickers est caractérisée par l'empreinte faite par un indenteur appliqué sous une charge de 300 g durant 15 secondes. L'indenteur est formé d'une pyramide en diamant à base carrée dont les faces opposées font un angle de 136°. Le côté de l'empreinte étant de l'ordre de 500 μm dans le cas des couches étudiées, la mesure s'effectue à l'aide d'un microscope optique (avec une résolution de l'ordre de 2 μm). La diagonale de cet indenteur est successivement positionnée parallèlement et perpendiculairement à la direction de projection. La première mesure est sensible aux contraintes de trempe et aux fissurations associées. La deuxième est corrélée aux fissurations interlamellaires.

La dureté Vickers (HV) est calculée à l'aide de la relation $HV = \frac{1,854F}{D^2}$ où F est la charge appliquée en kg.f et D la diagonale de l'empreinte en mm.

Pour chaque échantillon, 10 mesures aléatoirement réparties suivant la coupe du dépôt ont été effectuées et les résultats moyennés (Tableau 11).

Tableau 11 : Valeurs expérimentales des caractéristiques en vol des particules et du dépôt.

Essai	Température de surface des particules en vol [°C]	Vitesse en vol des particules [m.s ⁻¹]	Epaisseur par passe [μm]	Taux de porosité [%]	Dureté [Hv]
Ref	2516±4	307±7	313,2±6,2	4,2±1,5	913±53
# 1	2318±3	264±8	286,9±11,2	8±2,4	845±33
#2	2421±4	285±10	280±6,6	5,9±1,1	864±20
#3	2458±2	302±7	293,4 ±7,9	4,9±0,9	883±60
#4	2515±5	324±6	340,7±6,9	7,8±2,6	1053±52
#5	2396±3	336±6	273,5±15,4	6,6±1,5	847±43
#6	2415±4	251±3	360,2±10,2	4,3±0,7	794±51
#7	2429±5	270±7	324,6±2,2	6,8±3,5	856±35
#8	2433±7	314±9	269,6±13,8	6,9±1,1	876±39
#9	2433±5	311±8	226±8,8	8,7±2,5	830±18
#10	2419±7	348±13	211,6±4,3	9±1,3	909±75
#11	2302±4	267±6	196,2±5,1	7,2±1,1	626±36
#12	2357±3	299±6	277,3±7,5	5,5±1	770±23
#13	2389±3	303±9	260,4±3,7	7±1,2	862±34
#14	2409±5	301±10	284,4±4	4,8±1,4	741±167
#15	2441±5	29±7	274,4±12,2	5,3±1,8	949±28
#16	2433±8	305±8	305,1±11	3,9±0,6	800±72
#17	2441±5	305±10	267,9±7,3	3,5±0,5	881±54
#18	2458±2	302±7	293,4 ±7,9	4,9±0,9	883±60
#19	2430±7	297±7	//	//	//
#20	2427±6	288±8	295,5±6,5	4,7±0,9	898±33

3.8. Conclusion

Les expériences ont été minutieusement réalisées afin d'assurer une reproductibilité. Pour se faire, on a utilisé des protocoles robustes et standard. La plupart de ces protocoles expérimentaux a été automatisé (polissage, etc.) ou réalisés de manière systématique (étapes d'analyse d'image, etc.).

CHAPITRE IV :

SIMULATION, PREDICTION ET CONTROLE PAR INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

4.1. Introduction

La prédiction et le contrôle des paramètres (paramètres opératoires, caractéristiques en vol des particules, microstructures et propriétés du dépôt) du processus de projection thermique exigent une approche globale des corrélations entre l'ensemble de ces paramètres. Une telle étude est difficilement abordable par des méthodes traditionnelles de modélisation. Par contre, l'utilisation de méthodes basées sur l'intelligence artificielle (IA) peut présenter une approche convenable [101 - 102]. Cependant, la compréhension des corrélations est nécessaire pour un contrôle robuste du processus.

L'étude a été menée selon les étapes ci-dessous (Figure 24) :

- le procédé de projection thermique à la torche à plasma d'arc soufflé atmosphérique (APS) a, dans un premier temps, été étudié à l'aide de la logique floue (LF) et de réseaux de neurones artificiels (RNA) pour corrélérer d'une part les paramètres opératoires aux caractéristiques des particules en vol et d'autre part les paramètres opératoires aux propriétés et caractéristiques du dépôt ;
- une fois les corrélations établies, le réseau de neurones artificiel a ensuite été utilisé afin de prédire les paramètres opératoires du processus pour réaliser un dépôt avec des propriétés structurales requises ;
- enfin, la logique floue a été utilisée pour contrôler les caractéristiques des particules en vol (vitesse et température des particules) en ajustant les paramètres de puissance (intensité de courant d'arc, débit total de gaz plasmagènes et taux d'hydrogène) afin de tenir compte des fluctuations liées au procédé.

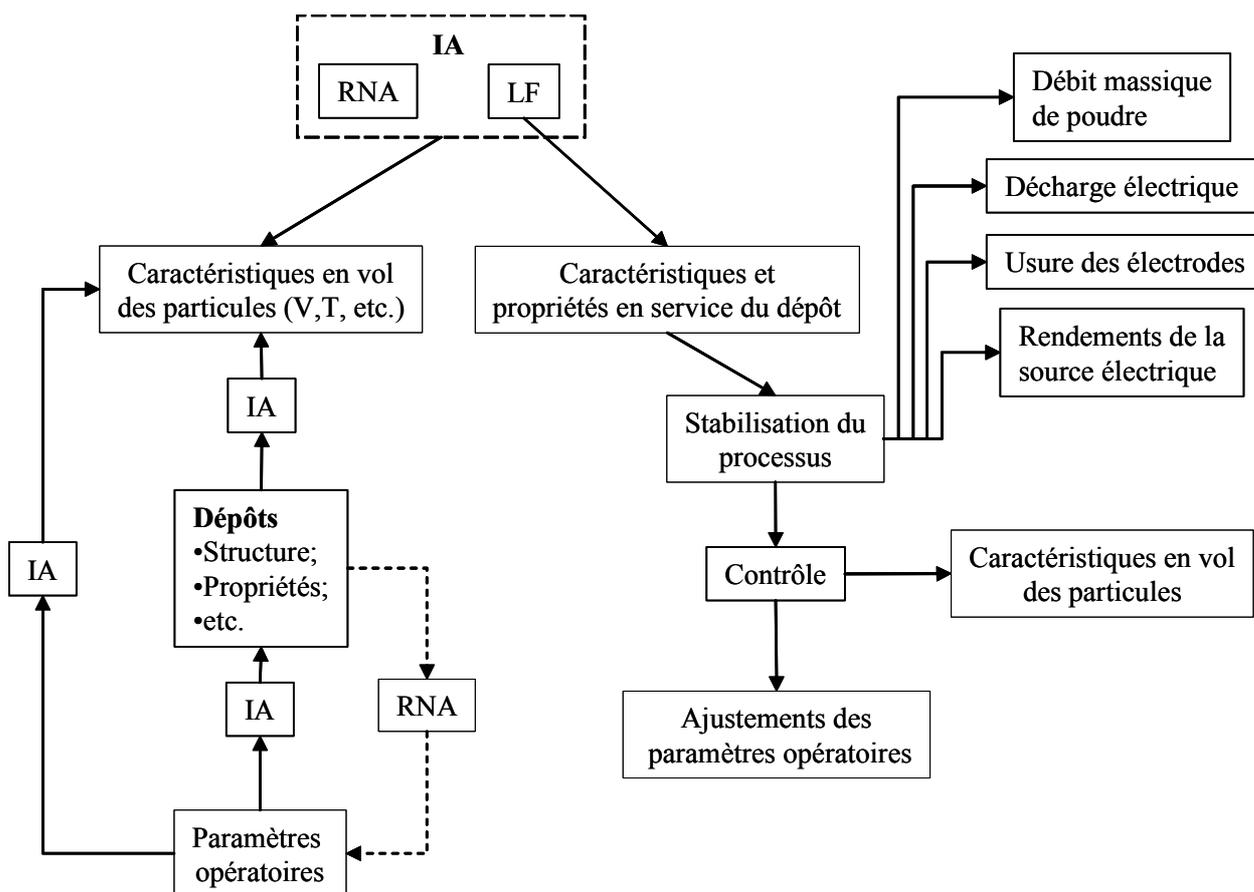


Figure 24 : Processus de prédiction et du contrôle développés.

4.2. Application de l'intelligence artificielle

4.2.1. Réseau de neurones artificiels

L'application des RNA à l'étude des procédés de projection thermique consiste en la définition de schémas connexionnistes entre les variables du processus et les comportements des particules en vol et du jet de plasma ou encore les propriétés du dépôt (Figure 25).

La base des données expérimentales contenant 20 cas a été élargie à 60 en tenant compte de la variabilité des paramètres afin d'avoir un nombre significatif de données (paragraphe 2.4.2). Cette base est ensuite scindée en trois catégories d'égales importances [103] : la catégorie d'apprentissage est dédiée à l'ajustement des poids suivant l'algorithme d'apprentissage ; la catégorie de test permet de vérifier les prédictions du réseau de neurones afin de valider les paramètres du RNA obtenus lors

de la phase d'apprentissage ; enfin la catégorie de validation permet de fixer et de généraliser les paramètres du RNA.

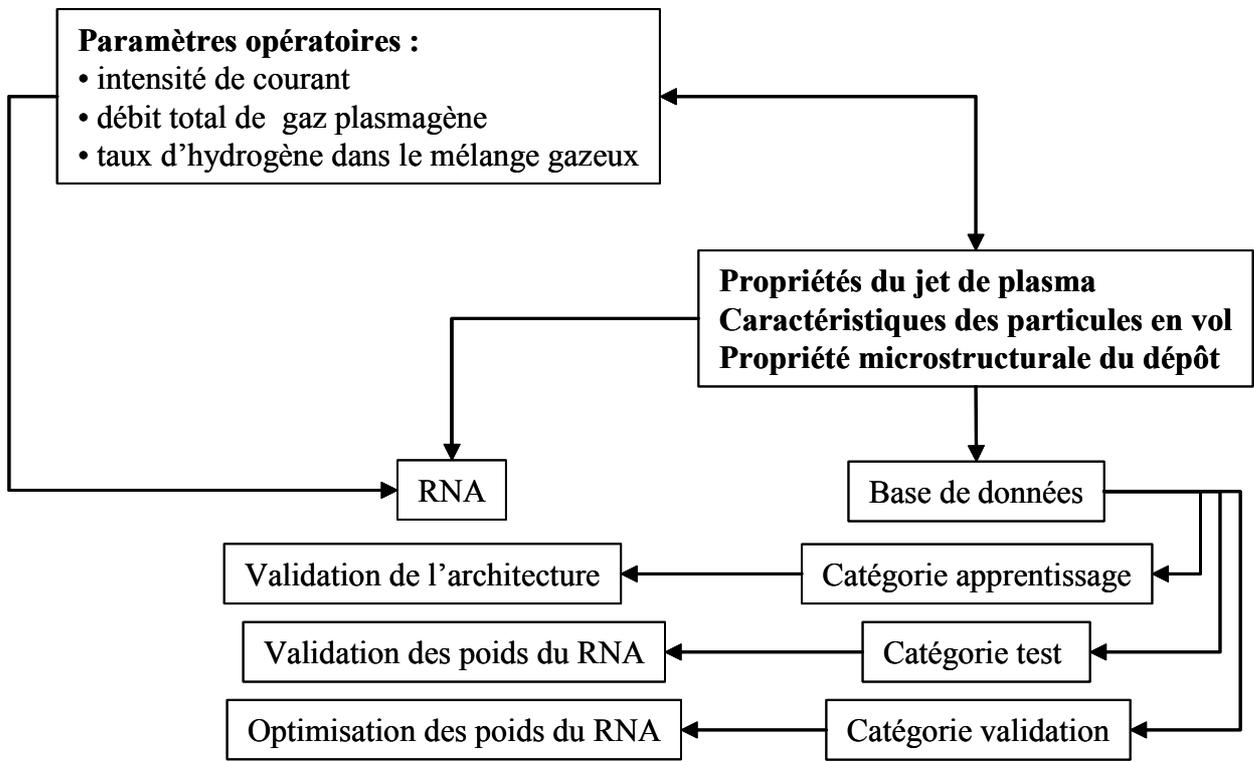


Figure 25 : Illustration de la prédiction par réseau de neurones artificiels.

Afin de simplifier l'utilisation du RNA, une interface a été développée (Figure 26).

Cette interface est scindée en grands groupes :

- une partie est dédiée au choix de la structure et des paramètres du RNA. Les paramètres à choisir dépendent de chaque algorithme d'apprentissage ;
- une partie est consacrée au choix de l'algorithme d'apprentissage ;
- une partie est destinée à la validation et à la prédiction.

Le RNA considère le nombre d'entrées comme nombre de neurones de la couche d'entrées. Le nombre de neurones de la couche de sortie indique le nombre de paramètres de sortie (il y a autant de neurones que de sorties). On peut choisir le nombre de neurones de la couche cachée. Par exemple, une structure du RNA de type "HHHHHHHHH, LH-----" indique que le RNA a 9 neurones dans la couche cachée (représentées par des fonctions de transfert sigmoïde H), 2 neurones sur la couche de sortie (dont 1 L : linéaire et 1 H : sigmoïde).

Avant de procéder à l'apprentissage, les données sont formatées entre 0 et 1 selon l'équation 2.5 ou l'équation 2.6. Ces données seront entrées sous forme d'une matrice.

Le menu "Aide" donne plus de détails sur la procédure à suivre afin d'utiliser cette interface graphique. Il fournit également des informations sur les différents algorithmes mis en œuvre.

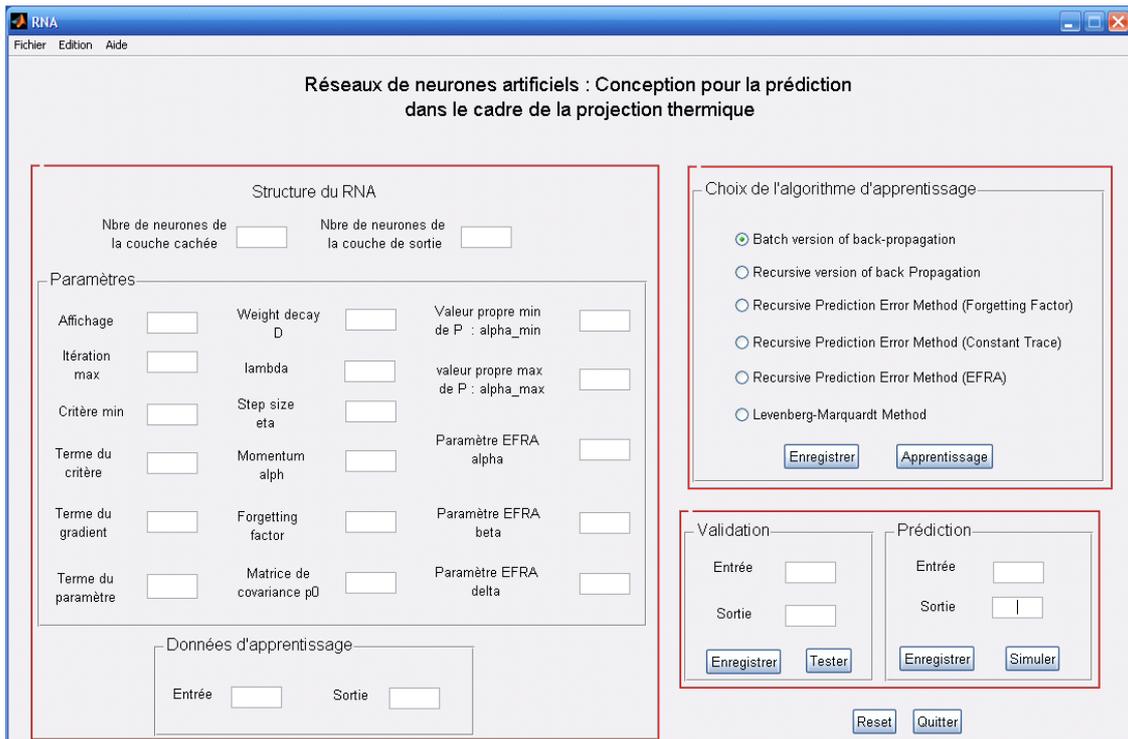


Figure 26 : Interface utilisateur.

La Figure 27 permet de suivre toutes les étapes de l'apprentissage à la prédiction avec affichage en cours d'exécution. L'affichage des informations permet d'intervenir afin de corriger les éventuelles erreurs lors des différentes étapes de calcul.

```

D:\Thèse\Code de calcul\interface ann\RNA\RNA.exe
La structure globale du Réseau de neurones artificiels retenue est :
HHHHHHHH
HH-----

Les différents paramètres d'apprentissage considérés sont les suivants :
- Les paramètres communs à tous les différents algorithmes d'apprentissage :
1. Afficher peu (valeur 0) ou assez d'informations (valeur 1) pendant l'apprentissage?
   0
2. Le nombre maximum d'itérations
   500
3. Le critère minimum : Stop le calcul si le critère est au-dessous de cette valeur
   0
4. Le terme du critère : Stop le calcul si le changement dans le critère est au-dessous de cette valeur
   1.0000e-007
5. Le terme du gradient : Stop le calcul si le plus grand élément dans le gradient

```

Figure 27 : Aperçu de la boîte de dialogue.

Après avoir procédé à la phase d'apprentissage, les graphes suivants sont obtenus :

- sortie réelle (valeurs expérimentales) ainsi que sortie du RNA (valeurs prédites) après apprentissage ;
- erreur d'apprentissage ;
- fonction d'autocorrélation d'erreur de prédiction ;
- histogramme montrant la distribution des erreurs de prédiction ;
- architecture du RNA choisi.

Afin de comprendre au mieux l'utilisation de cette interface, des informations complémentaires peuvent être obtenues dans le menu "Aide".

4.2.2. Logique floue

Le principe prédictif de base est illustré par la Figure 9. Pour appliquer ce concept au cas de la projection thermique, des entrées (paramètres de puissance) et des sorties (propriétés du dépôt, caractéristiques en vol des particules, etc.) ont d'abord été définies sous forme des variables linguistiques (Tableau 12). On attribue à chaque variable des degrés d'appartenance à différents états que l'on doit définir (*fuzzification*).

Tableau 12: Décomposition des paramètres opératoires.

	I [200 900]	Ar + H ₂ [0 80]	H ₂ /Ar [0 60]
Nulle (N)	Fonction : Z Paramètres : [300 300]	- -	Fonction : Z Paramètres : [10 15]
Très faible (TF)	Fonction: Gauss Paramètres : [40 350]	Fonction : Z Paramètres : [10 20]	Fonction : Gauss Paramètres : [5 13]
Faible (F)	Fonction : Gauss Paramètres : [40 440]	Fonction : Gauss Paramètres : [5 30]	Fonction : Gauss Paramètres : [5 23]
Moyen (M)	Fonction : Gauss Paramètres : [40 530]	Fonction : Gauss Paramètres : [5 40]	Fonction : Gauss Paramètres : [5 35]
Grand (G)	Fonction : Gauss Paramètres : [40 630]	Fonction : Gauss Paramètres : [5 54]	Fonction : Gauss Paramètres : [5 43]
Très grand (TG)	Fonction : S Paramètres : [530 750]	Fonction : S Paramètres : [54 70]	Fonction : S Paramètres : [45 50]

Le choix des fonctions d'appartenance est lié au type des paramètres et de leurs variabilités. Ainsi, les fonctions d'appartenance suivantes ont été utilisées :

- la fonction d'appartenance Z (dû à sa forme en z) donnée par :

$$\left. \begin{array}{l} 1, x \leq a \\ 1 - 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{b-x}{b-a}\right), \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 0, x \geq b \end{array} \right\} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Les paramètres a et b localisent les extrémités de la partie inclinée de la courbe, x représente la valeur du paramètre considéré ;

- la fonction d'appartenance de type gaussienne symétrique qui dépend des deux paramètres σ et c comme donné par :

$$f(x, \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Les paramètres pour la fonction gaussienne d'adhésion sont représentés par le vecteur $[\sigma \ c]$;

- la fonction d'appartenance S (dû à sa forme en s). Les paramètres a et b

localisent les extrémités de la partie inclinée de la courbe ;

- la fonction d'appartenance triangulaire. Cette fonction dépend de trois paramètres scalaires a , b , et c , comme donné par :

$$f(x, a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Les fonctions d'appartenance de sortie considérées sont toutes de type triangulaire.

La base de données expérimentales a également permis de déterminer les règles ayant servi de base à déterminer l'évolution des propriétés du jet de plasma, des caractéristiques des particules en vol ou encore des propriétés microstructurales du dépôt en fonction des paramètres de puissance *via* le concept de la logique floue. Ces règles établies permettent de lier les données aux actions.

Par exemple pour prédire la puissance nette en fonction de l'intensité de courant, on introduit d'abord la valeur numérique de courant. Par la suite, le modèle procède à la *fuzzification* et définit le degré d'appartenance (degré de vérité de la condition) de cette valeur à une variable linguistique (N, TF, F, M, G, TG). Pour tenir compte de tous les cas et des états intermédiaires, une soixantaine de règles ont été élaborées. Quelques unes de ces règles sont illustrées ci-dessous :

- *If (Current is F) then (Power is MF1);*
- *If (Current is M) then (Power is MF2);*
- *If (Current is G) then (Power is MF3);*
- *If (Current is TG) then (Power is MF4);*
- *etc.*

MF1, MF2, MF3 et MF4 sont des fonctions triangulaires définies par rapport à la base de données.

Si $I = 440$ A (F) ou $I = 530$ A (M), le modèle prédit une puissance nette de MF1 ou MF2 respectivement. Par contre si $I = 485$ A (c'est-à-dire 50 % F et 50 % M à la fois) on procède à l'agrégation des règles (paragraphe 2.5.5) pour avoir la "surface réponse". Cette procédure permet d'éviter l'activation simultanée de plusieurs règles qui donneraient des réponses contradictoires. La sortie du modèle correspond au centre de gravité de cette surface (*defuzzification*).

4.3. Effets des paramètres de puissance

Les effets des paramètres opératoires (I, Ar+H₂, H₂/Ar) sur les caractéristiques du jet plasma (puissance nette, flux, enthalpie, etc.), les caractéristiques en vol des particules (vitesse et température moyennes) et enfin sur les propriétés et microstructure du dépôt.

4.3.1. Représentation des résultats

Les valeurs expérimentales sont représentées par leur valeur moyenne. Pour des raisons de clarté des figures, les écarts-types associées ne sont pas représentés dans certains cas. Ils sont toutes fois détaillés dans le Tableau 9 et le Tableau 11 présentant de manière exhaustive les résultats expérimentaux.

Concernant les valeurs prédites par la logique floue (LF), elles sont représentées par une valeur unique correspondant pour certains cas, à la réponse du système. En aucun cas il n'a été procédé à une étude systématique de sensibilité de la réponse.

Concernant les réseaux de neurones artificiels, la réponse est illustrée par une courbe d'évolution dès lors qu'il est possible d'obtenir une grande quantité des données autorisant leur lissage par une fonction mathématique. Cette fonction mathématique est définie sur un intervalle de variation représentant les limites réelles de la fenêtre des paramètres opératoires. En aucun cas, cette fonction lissée ne saurait représenter une interpolation des grandeurs expérimentales. Elle représente uniquement la réponse, une fois encore du réseau de neurones artificiels.

4.3.2. Caractéristiques du jet de plasma

a. Puissance nette

La puissance nette est définie comme étant la puissance disponible dans le jet de plasma. Cette puissance est composée de la puissance électrique dissipée aux électrodes minorée de la puissance du refroidissement de la torche. Elle s'exprime suivant :

$$P_{nette} = P_{\text{électrique}} - P_{\text{refroidissement}} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

$$\text{où } P_{\text{électrique}} = I * U \text{ et } P_{\text{refroidissement}} = D_e * C_p * (T_2 - T_1)$$

I représente l'intensité de courant d'arc [A], U est la tension électrique aux bornes des électrodes [V], C_p est la chaleur spécifique à pression constante du fluide de refroidissement [$J.kg^{-1}.K^{-1}$] ($4180 J.kg^{-1}.K^{-1}$ dans le cas de l'eau pure au voisinage de la température ambiante), T_1 , T_2 et D_e sont respectivement la température d'entrée, de sortie [K]. et le débit de l'eau de refroidissement [$l.min^{-1}$].

Consécutivement au traitement de données issues d'expérimentations, la Figure 28 montre l'évolution de la puissance nette en fonction de l'intensité de courant d'arc. Le taux massique d'hydrogène est fixé à 1,25 % (soit 25% en taux volumique) et le débit massique total des gaz plasmagènes à $72,32 g.min^{-1}$ (soit $50 Nl.min^{-1}$ en débit volumique). Les autres paramètres sont fixés aux conditions de référence (Tableau III.4). Le RNA retenu est de type 7H_1L.

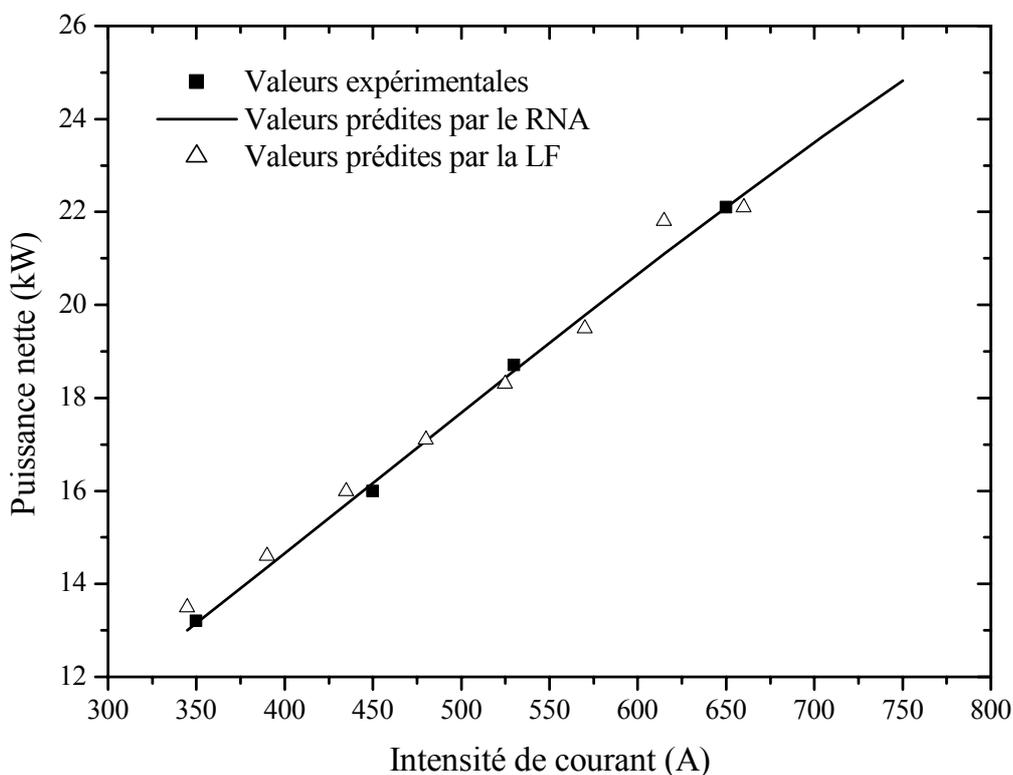


Figure 28 : Variation de la puissance nette en fonction de l'intensité de courant d'arc ($V_{Total} = 50 Nl.min^{-1}$, $V_{H_2/Ar} = 25 \%$), (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

D'une manière générale, les résultats prédits par les méthodes d'intelligence artificielle montrent la même tendance que ceux obtenus expérimentalement. La puissance nette augmente de l'ordre de 67% (soit de 8,9 kW) lorsque l'intensité de courant d'arc évolue

de 350 à 650 A. L'écart absolu maximum entre les valeurs expérimentales et celles prédites par le RNA est de 0,17 kW et 0,3 kW pour le cas de la prédiction avec la LF.

L'effet du taux d'hydrogène est étudié en fixant l'intensité de courant à 530 A, le débit total massique des gaz plasmagènes à $72,32 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ (soit $50 \text{ Nl}\cdot\text{min}^{-1}$). La Figure 29 montre l'évolution de la puissance nette en fonction du taux d'hydrogène. Après optimisation, le RNA retenu est de la forme 7H_1L. D'un point de vue expérimental, l'augmentation de la puissance nette pour un taux massique d'hydrogène compris entre 0,25 et 1,50% (5 et 30% en taux volumique) est de 37 % (soit de 5,3 kW). L'écart maximum absolu obtenu entre les valeurs expérimentales et celles prédites par le RNA est de 0,095 kW et 0,5 kW avec la LF. Par ailleurs, les résultats suivent la même tendance que dans le cas de l'étude de Chen et al. [104].

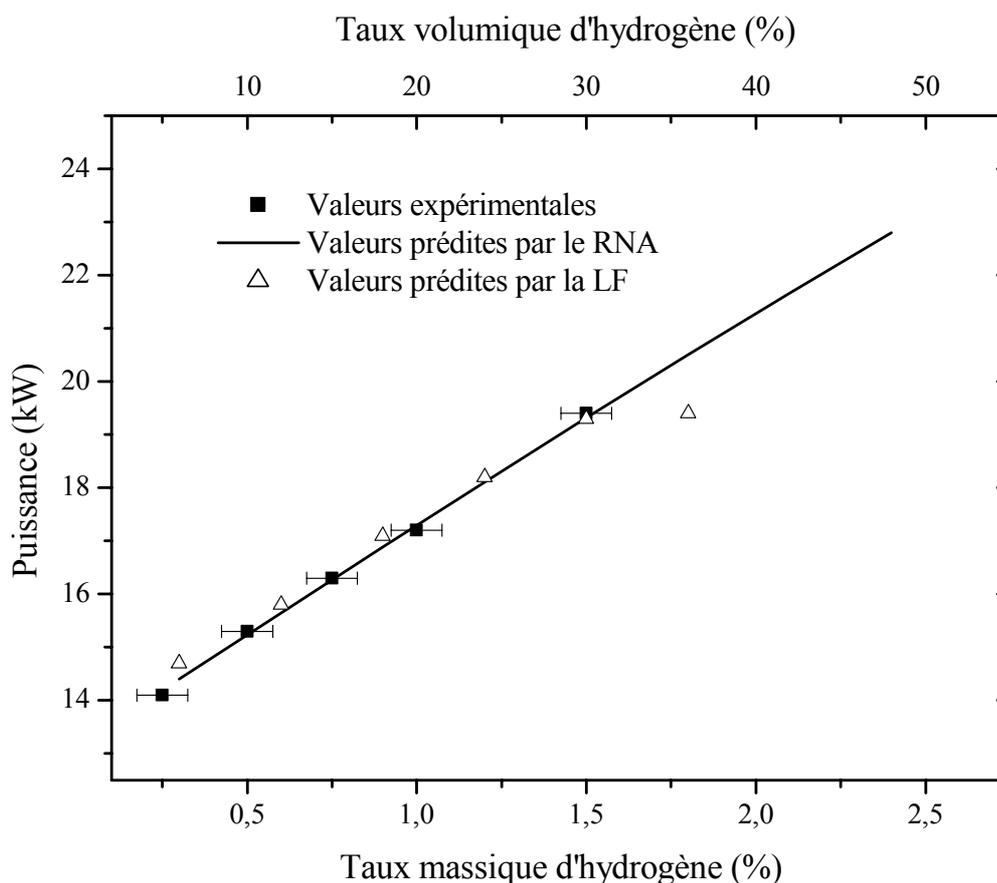


Figure 29 : Variation de la puissance nette en fonction du taux massique d'hydrogène ($V_{\text{Total}} = 50 \text{ Nl}\cdot\text{min}^{-1}$, $I = 530 \text{ A}$). Les barres d'erreur représentent la variabilité du taux d'hydrogène, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

La Figure 30 illustre l'évolution de la puissance utile en fonction du débit total de gaz plasmagènes. L'effet de ce paramètre est étudié en fixant l'intensité de courant à 530 A et le taux massique d'hydrogène à 1,25% (25% en taux volumique). D'un point de vue expérimental, en variant le débit total des gaz plasmagènes entre 50 et 100 g.min⁻¹ (34,6 et 69,2 Nl.min⁻¹), la puissance nette augmente de 45% (soit de 6,5 kW). L'optimisation du réseau a conduit à une structure de type 9H_1H (9 neurones sur la couche cachée et un seul neurone sur la couche de sortie à fonction de transfert sigmoïde). L'écart maximum absolu est de 0,67 kW entre les valeurs expérimentales et celles obtenues par le RNA et 0,9 kW avec celles obtenues grâce à la LF.

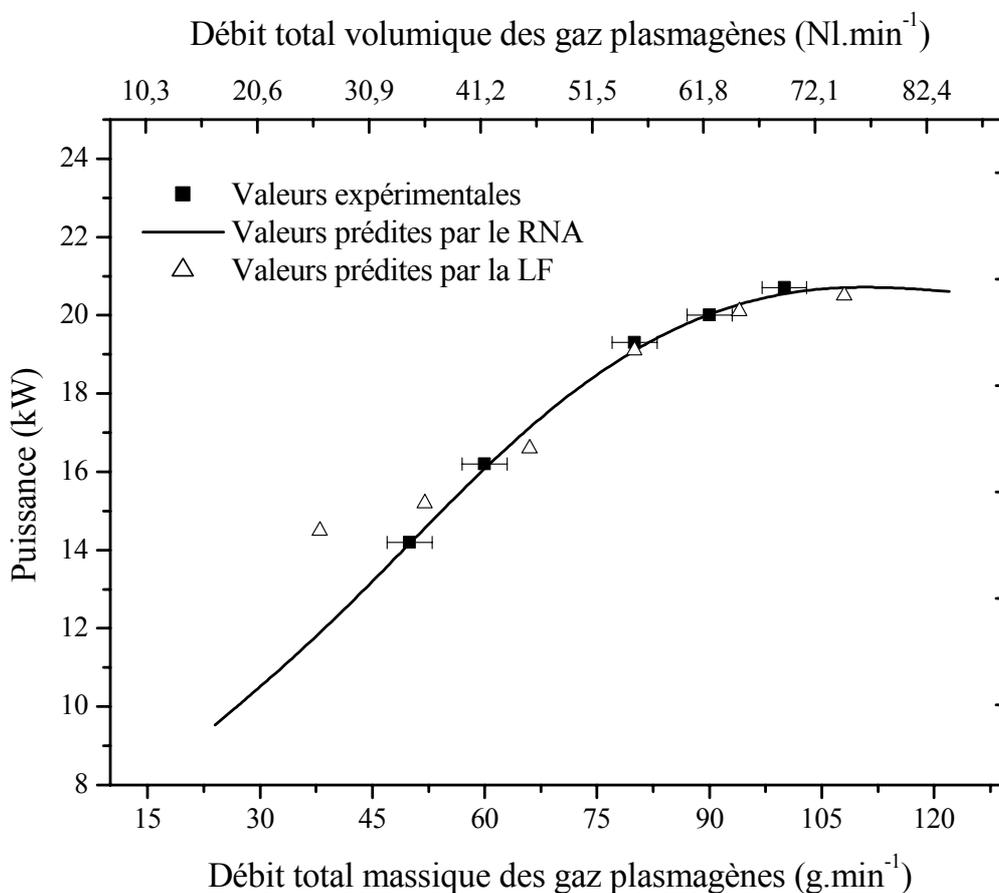


Figure 30 : Variation de la puissance nette en fonction du débit total des gaz plasmagènes (taux volumique d'hydrogène : $V_{H_2/Ar} = 25\%$, $I = 530$ A). Les barres d'erreur représentent la variabilité du débit, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

Conclusion

L'intensité de courant d'arc a une influence plus marquée sur la puissance nette du jet de plasma comparée au taux d'hydrogène ou au débit total des gaz plasmagènes. L'augmentation de la puissance du plasma par l'intermédiaire de celle de l'intensité de courant d'arc conduit à une augmentation du taux d'ionisation des atomes et du taux de dissociation des molécules. L'énergie contenue dans le gaz plasmagène se libère différemment suivant que celui-ci est diatomique ou monoatomique. Ainsi, l'hydrogène (gaz diatomique) permet d'obtenir une énergie plus importante.

b. Tension aux bornes des électrodes

La tension aux bornes d'un arc électrique de longueur l est donnée par :

$$U = U_a + U_c + \int_0^l E(z) dz \quad (\text{Eq. 4.5})$$

où U_a et U_c sont les chutes de potentiel à l'anode et à la cathode [V], $E(z)$ représente le champ électrique [$V \cdot m^{-1}$] dans la colonne à la distance z de la cathode.

$\int_0^l E(z) dz$ est la tension utile [V] reliée à l'énergie dissipée dans la colonne et convertie

en enthalpie lors de sa redistribution sur les différents degrés de liberté.

Les chutes de potentiel à la cathode et à l'anode sont en partie responsables des pertes thermiques aux électrodes et sont constantes ($U_a \approx 10$ V et $U_c \approx 5$ V).

Le champ électrique dans la colonne dépend notamment du diamètre de l'arc, lui-même résultant de la stabilisation thermique où entrent en jeu également les caractéristiques thermophysiques des gaz plasmagènes.

La Figure 31 montre l'évolution de la tension aux bornes des électrodes en fonction de la variation de l'intensité de courant, les autres paramètres étant fixés aux conditions de référence (Tableau 8). Il apparaît ainsi que l'augmentation de courant induit une diminution de la tension aux bornes des électrodes. Cette diminution est de l'ordre de 2,8 % (soit 1,8 V) pour un courant variant de 350 à 650 A. L'écart maximum absolu entre les valeurs expérimentales et celles prédites par la LF est de 0,10 V. Cet écart est de 0,24 V pour les valeurs calculées par le RNA. Les travaux réalisés par Fazilleau [105] confirment cette tendance.

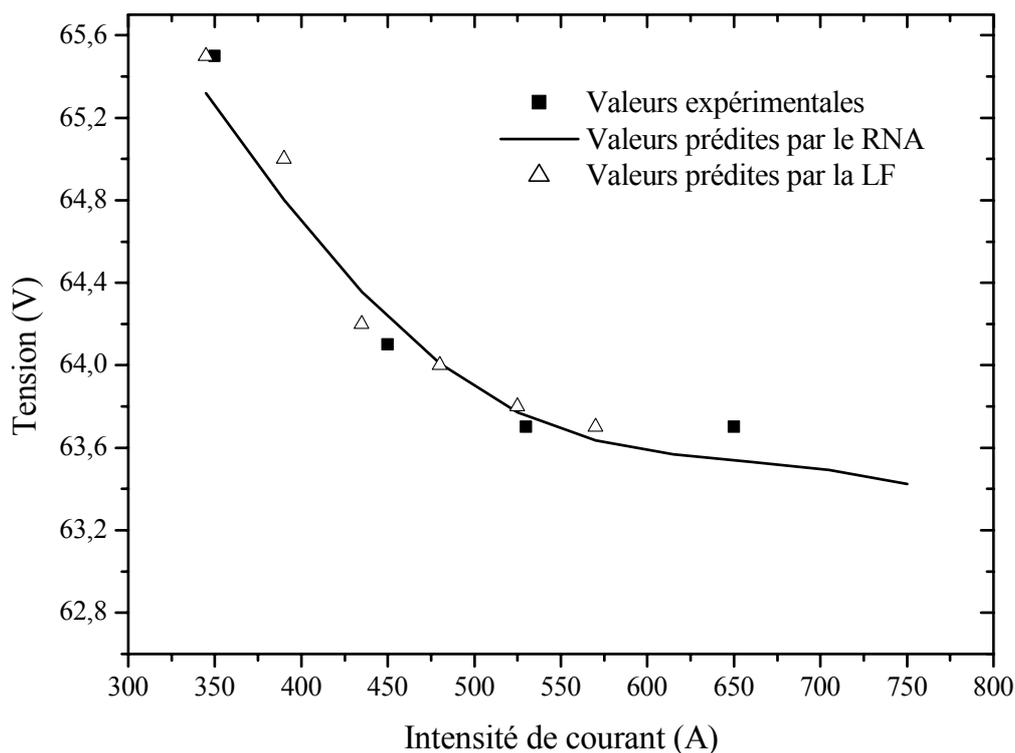


Figure 31 : Variation de la tension en fonction de l'intensité de courant d'arc ($V_{\text{Total}} = 50 \text{ Nl.min}^{-1}$, $V_{\text{H}_2/\text{Ar}} = 25\%$), (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

La tension aux bornes des électrodes est étudiée également en faisant varier le taux d'hydrogène. Ainsi, cette tension augmente de 31% (15,4 V) lorsqu'on fait passer le taux massique d'hydrogène de 0,25 à 1,50% (soit de 5 à 30% en volumique) tout en fixant les autres paramètres aux conditions de référence (Figure 32). Les valeurs prédites diffèrent de 1,1 V pour le cas du RNA et de 2,62 V en utilisant la méthode de la LF, soit respectivement des variations de 2,2% et 5,3%.

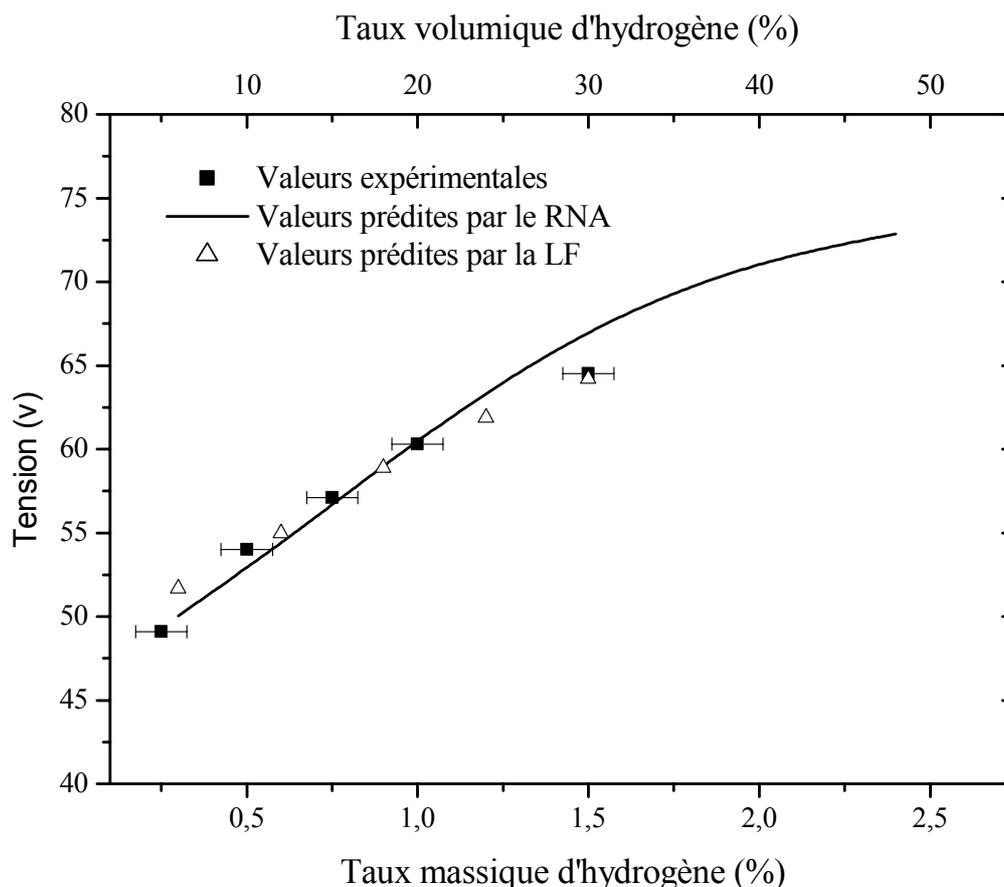


Figure 32 : Variation de la tension en fonction du taux massique d'hydrogène ($V_{\text{Total}} = 50 \text{ NL}\cdot\text{min}^{-1}$, $I = 530 \text{ A}$). Les barres d'erreur représentent la variabilité du taux d'hydrogène, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

La Figure 33 montre l'évolution de la tension en fonction du débit total des gaz plasmagènes. On constate une augmentation de 20% de la tension lorsque le débit total massique des gaz plasmagènes varie de 50 à $100 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ (soit de $34,6$ à $69,2 \text{ NL}\cdot\text{min}^{-1}$). L'écart maximum absolu entre les valeurs expérimentales et celles prédites par le RNA est de $0,62 \text{ V}$. Cet écart est de $1,6 \text{ V}$ pour le cas de la prédiction avec la LF, soit dans ce cas des variations de l'ordre de 2% et 3% respectivement.

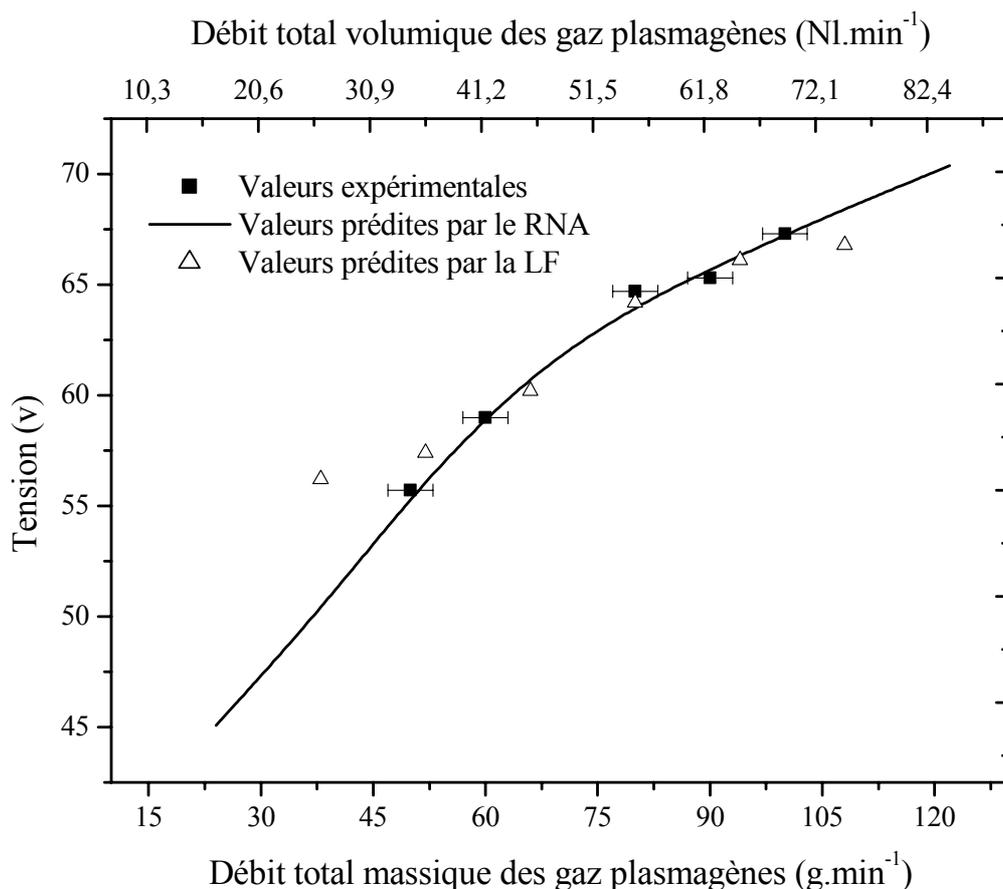


Figure 33 : Variation de la tension en fonction du débit total des gaz plasmagènes (taux volumique d'hydrogène : $V_{H_2/Ar} = 25 \%$, $I = 530 \text{ A}$). Les barres d'erreur représentent la variabilité du débit, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

Conclusion

Le taux d'hydrogène et le débit total des gaz plasmagènes sont les deux paramètres qui permettent d'augmenter la tension aux bornes des électrodes. L'intensité de courant d'arc diminue lorsque la tension croît. Puisque la tension d'arc est limitée en valeur haute par les performances en tension du redresseur d'alimentation de la torche, l'arc devient instable dès que la tension d'arc croît en s'approchant de la tension maximale susceptible d'être délivrée par ledit redresseur d'alimentation.

Il est à noter que la structure optimale du réseau retenue pour prédire la tension aux bornes des électrodes en fonction des paramètres de puissance est de type 9H_1H.

c. Enthalpie

Le bilan énergétique de la torche permet de définir une enthalpie massique moyenne, telle que :

$$\bar{h} = \frac{P_{utile}}{\dot{m}_p} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

où \dot{m}_p est le débit massique du gaz plasmagène [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$].

L'évolution de l'enthalpie massique en fonction de la variation de l'intensité du courant d'arc a été étudié en fixant le taux massique d'hydrogène à 1,25% (25% du taux volumique) et le débit total massique des gaz plasmagènes à $72,32 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ (soit $50 \text{ NI}\cdot\text{min}^{-1}$). La Figure 34 montre que l'enthalpie du jet de plasma augmente de 67% lorsque l'intensité de courant passe de 350 à 650 A. Jenista [106] a mis en évidence que l'importance de la diffusion thermique augmente avec le courant.

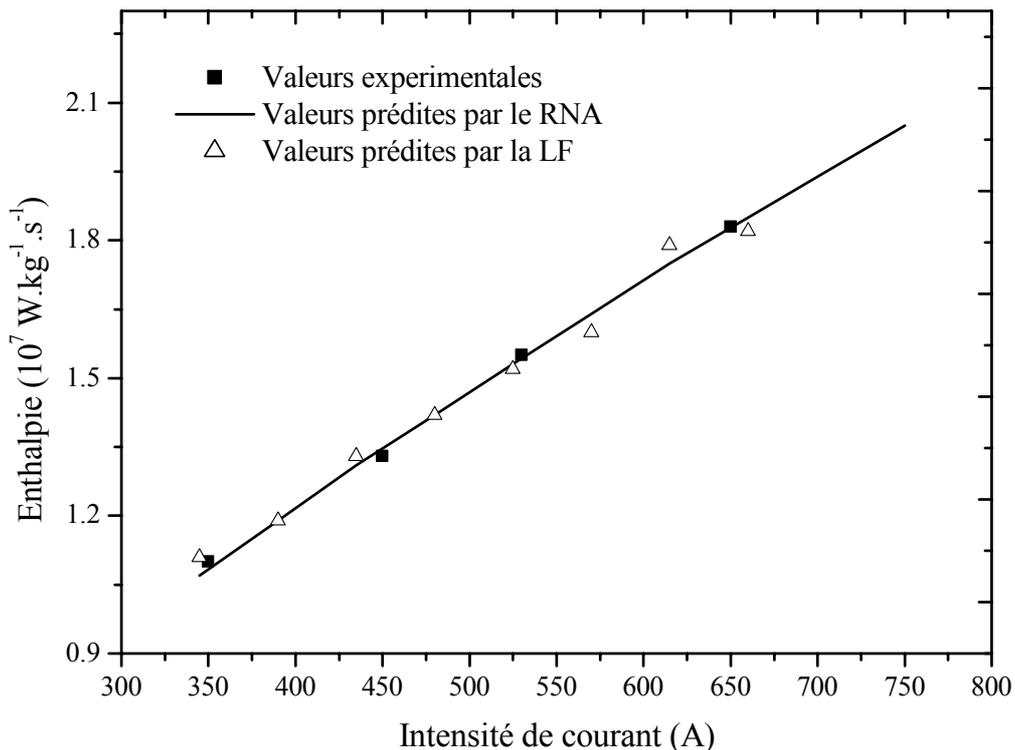


Figure 34 : Variation de l'enthalpie du jet en fonction de l'intensité de courant d'arc ($V_{\text{Total}} = 50 \text{ NI}\cdot\text{min}^{-1}$, $V_{\text{H}_2/\text{Ar}} = 25 \%$), (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

La Figure 35 montre l'augmentation de l'enthalpie du jet avec celle du taux d'hydrogène. En faisant varier le taux massique d'hydrogène de 0,25 à 1,50% (5 à 30% en taux volumique) et en fixant le courant à 530 A et le débit total massique à 72,32 g.min⁻¹ (50 Nl.min⁻¹), l'enthalpie augmente de 37%. Les résultats prédits présentent une bonne concordance par rapport aux résultats obtenus expérimentalement.

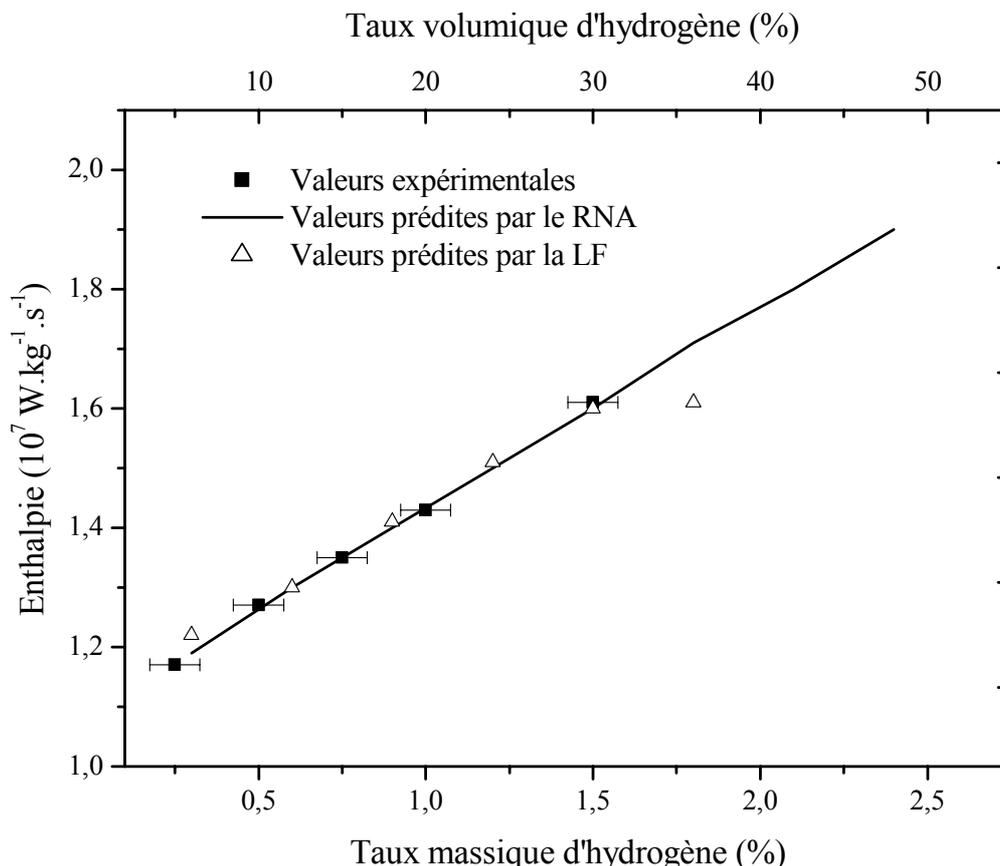


Figure 35 : Variation de l'enthalpie du jet en fonction du taux d'hydrogène ($V_{\text{Total}} = 50$ Nl.min⁻¹, $I = 530$ A). Les barres d'erreur représentent la variabilité du taux d'hydrogène, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

L'augmentation du débit total des gaz plasmagènes (Figure 36) entraîne une diminution de l'enthalpie. L'effet de ce paramètre est étudié en considérant l'intensité de courant à 530 A et en fixant le taux massique d'hydrogène à 1,25% (25% en taux volumique). Les résultats prédits sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. En augmentant le débit total massique des gaz plasmagènes de 50 à 100 g.min⁻¹ (34,6 à 69,2 Nl.min⁻¹), l'enthalpie diminue de 27%.

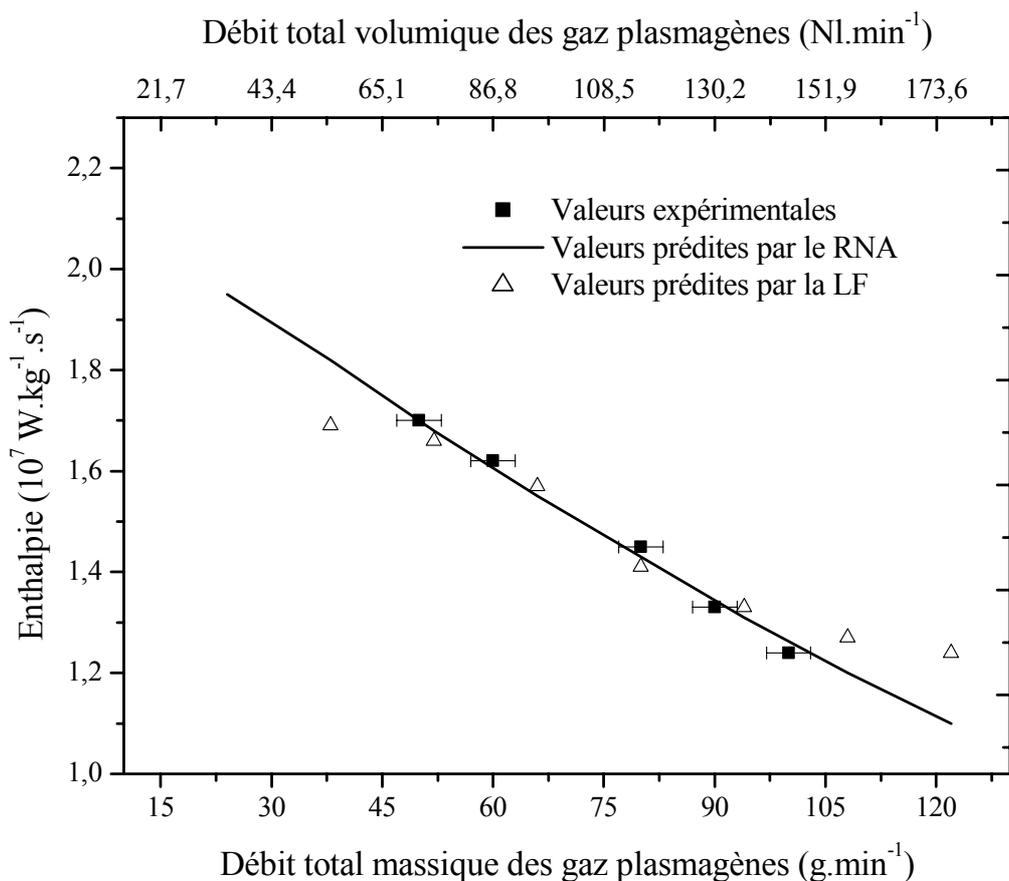


Figure 36 : Variation de l'enthalpie du jet en fonction du débit total des gaz plasmagènes (taux volumique d'hydrogène : $V_{H_2/Ar} = 25\%$, $I = 530$ A). Les barres d'erreur représentent la variabilité du débit, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

Conclusion

L'enthalpie est un paramètre énergétique directement fonction de la puissance utile du jet de plasma et du débit total massique des gaz plasmagènes.

4.3.3. Caractéristiques moyennes des particules en vol

a. Flux des particules

Le flux détecté est un indicateur du comportement du jet des particules. Les caractéristiques des particules en vol mesurées sont liées également à ce flux. Pour chaque famille de paramètres opératoires, le flux est mesuré sur la moyenne de 60

mesures effectuées. La **Figure 37** montre l'évolution du flux en fonction de l'intensité de courant. Du point de vue expérimental, une faible intensité de courant n'a pas d'effet sur le flux détecté. Au-delà d'une intensité de courant de 450 A, on note une augmentation continue du flux pour se stabiliser aux alentours de 700A. Cela correspond aux limites physiques du fonctionnement de la torche. L'augmentation du flux des particules est liée à un taux d'ionisation important des atomes présents dans le mélange gazeux par le courant. Le RNA optimisé est de structure 10H_1H. Le flux augmente de 18% (soit 14 u.a) en augmentant l'intensité de courant de 350 à 650 A et en fixant le taux massique d'hydrogène à 1,25% (25% en fraction volumique) et le débit total massique à 72, 32 g.min⁻¹ (50 Nl.min⁻¹). L'écart maximum absolu entre les valeurs expérimentales et prédites par les méthodes basées sur l'intelligence artificielle est de 1 u.a.

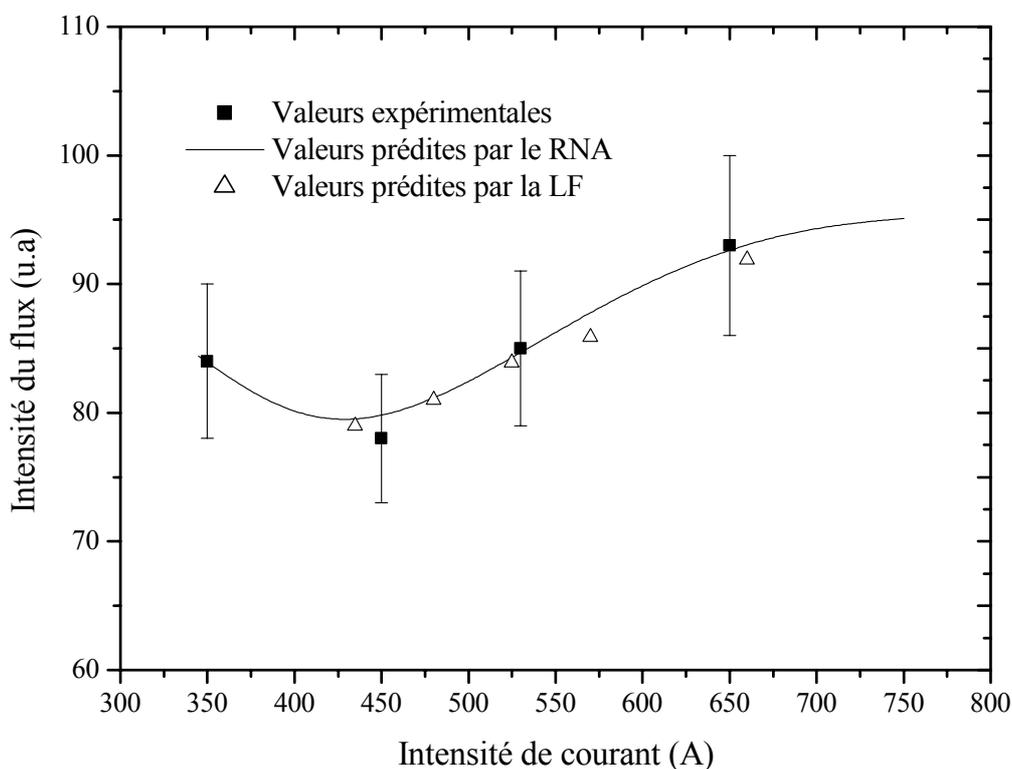


Figure 37 : Variation de l'intensité du flux des particules en fonction de l'intensité de courant d'arc ($V_{\text{Total}} = 50 \text{ Nl.min}^{-1}$, $V_{\text{H}_2/\text{Ar}} = 25\%$). Les barres d'erreur représentent l'écart type sur le flux mesuré, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

La Figure 38 illustre l'impact du taux d'hydrogène variant entre 0,25 et 1,5 g.min⁻¹ (5 et 30% en taux volumique) sur le flux du jet des particules. Les autres paramètres sont fixés aux conditions de référence (Tableau 8). La structure du RNA est 7H_1H. Les résultats prédits montrent que le flux diminue de 12% jusqu'à un taux massique d'hydrogène de 0,75% (soit 15% en taux volumique). Entre un taux massique d'hydrogène 0,75% et 1,5% (15 à 30% en taux volumique), le flux ne varie. Au-delà de cette valeur, on note une faible augmentation du flux. De cette étude, il ressort que le taux d'hydrogène n'a pas beaucoup d'effets sur le flux des particules.

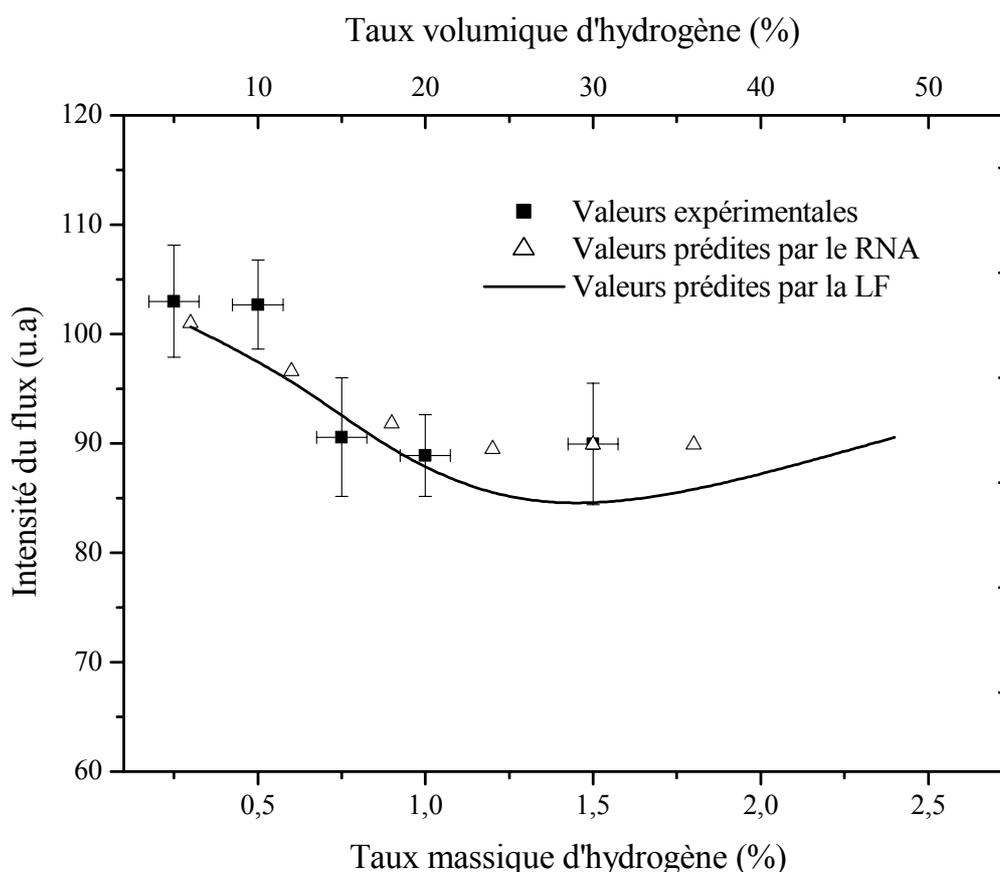


Figure 38 : Variation de l'intensité du flux des particules en fonction du taux d'hydrogène ($V_{\text{Total}} = 50 \text{ Nl.min}^{-1}$, $I = 530 \text{ A}$). Les barres d'erreur x représentent la variabilité du taux d'hydrogène et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur le flux mesuré, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

L'effet du débit total des gaz plasmagènes est étudié en fixant l'intensité de courant à 530 A et le taux massique d'hydrogène à 1,25% (25% de taux volumique). La Figure 39 montre l'évolution du flux du jet des particules en fonction du débit total des gaz plasmagènes. L'augmentation du débit massique total des gaz plasmagènes de 50 à 100

$\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ diminue le flux des particules de 36% (soit 39 u.a). Les résultats prédits s'inscrivent dans la même tendance que les points expérimentaux. L'écart maximum absolu obtenu entre les valeurs expérimentales et celles prédites par le RNA est de 1 u.a et 5 u.a avec la LF.

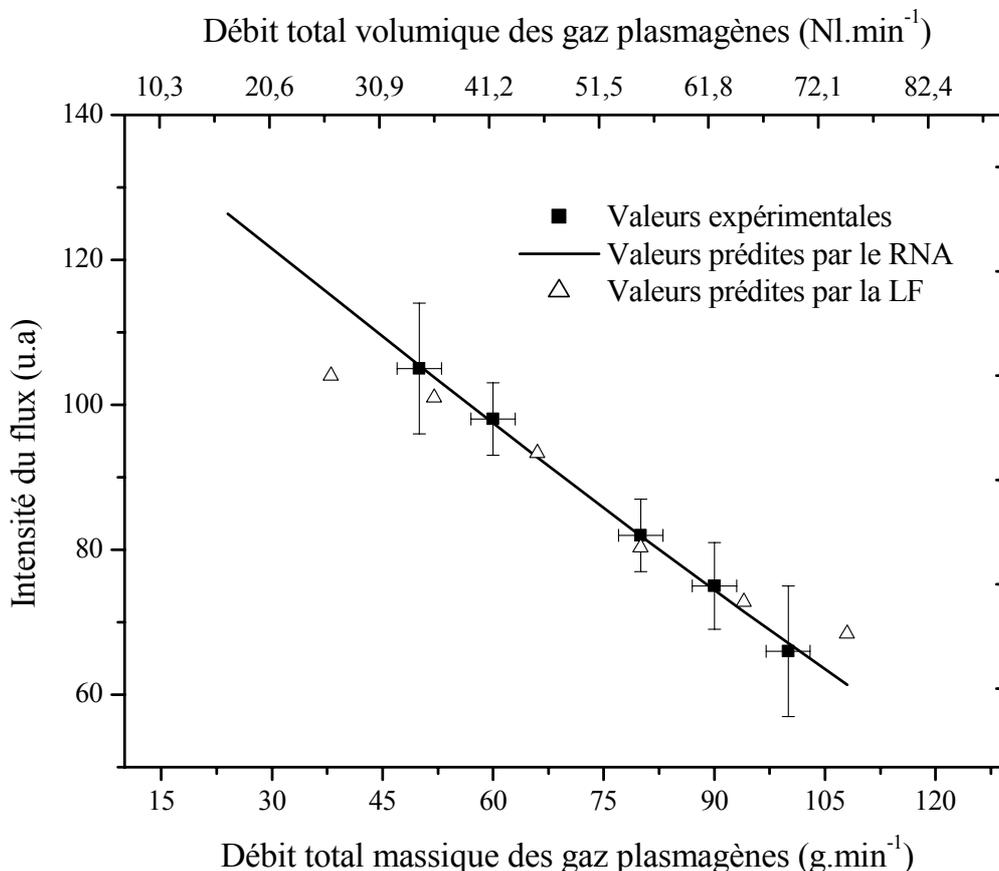


Figure 39 : Variation de l'intensité du flux des particules en fonction du débit total des gaz plasmagènes (taux volumique d'hydrogène : $V_{\text{H}_2/\text{Ar}} = 25\%$, $I = 530\text{ A}$). Les barres d'erreur x représentent la variabilité du débit et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur le flux mesuré, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

Conclusion

L'augmentation de l'intensité de courant induit un gain thermique pour les particules dans le jet de plasma, par conséquent la luminance émise par les particules chaudes augmente. L'augmentation du taux d'hydrogène induit un meilleur transfert de chaleur entre le plasma et les particules, par conséquent la luminance émise par ces particules très chaudes augmente. L'argon présent dans le mélange gazeux induit une augmentation drastique de quantité de mouvement et une diminution de l'enthalpie, et

ainsi l'intensité lumineuse émise par les particules diminue. Ces tendances ont été confirmées par l'étude de M. Vardelle *et al.* [62].

b. Vitesse et température moyennes

L'effet de l'intensité du courant d'arc sur les caractéristiques moyennes des particules en vol est étudié en variant ce paramètre entre 350 et 650 A, les autres paramètres sont fixés aux conditions de référence. Les résultats expérimentaux montrent que la vitesse et la température de surface des particules en vol augmentent respectivement de 22% et de 8% avec l'augmentation de l'intensité de courant (Figure 40).

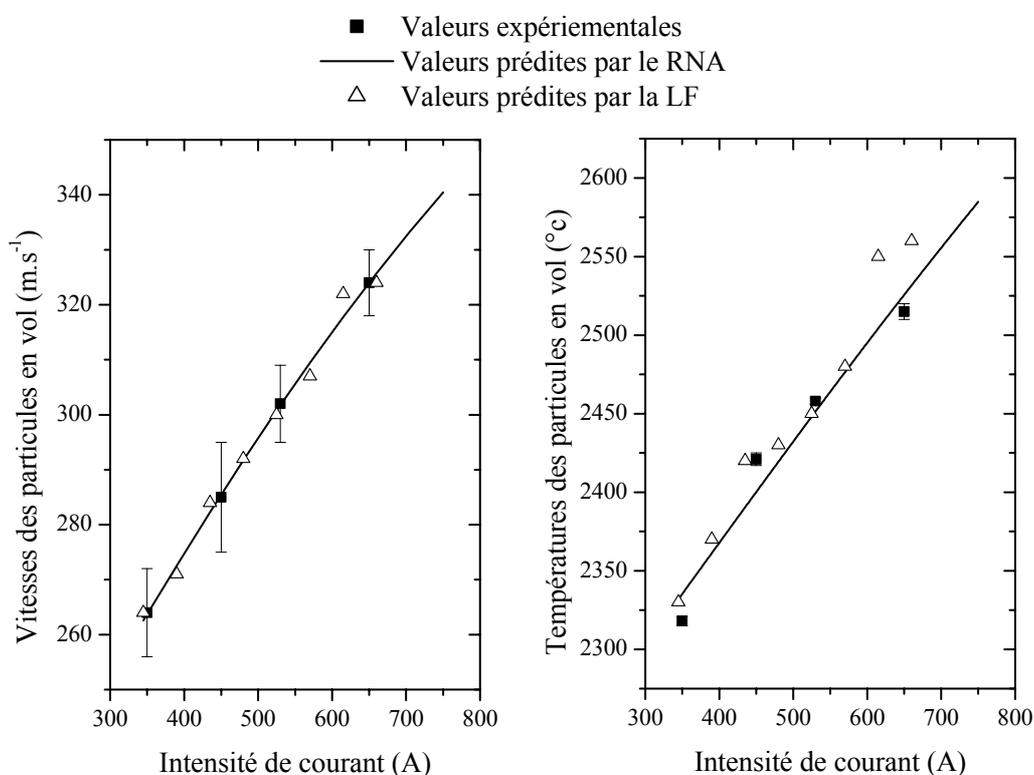


Figure 40 : Variation des caractéristiques des particules en vol (vitesses et températures) en fonction de l'intensité de courant d'arc ($V_{\text{Total}} = 50 \text{ Nl.min}^{-1}$, $V_{\text{H}_2/\text{Ar}} = 25\%$). Les barres d'erreur représentent l'écart type sur les vitesses et températures mesurées, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

Les résultats prédits par la méthode d'intelligence artificielle décrivent la même évolution. Avec le RNA, la prédiction montre une augmentation de 22% et de 7% respectivement pour la vitesse et la température des particules. En utilisant la LF, cette

augmentation est de 22% pour la vitesse et 9% pour la température des particules en vol. En effet, l'intensité de courant augmente les caractéristiques des particules en vol en augmentant la puissance nette de 67% (Figure 28).

Les évolutions des caractéristiques des particules en vol ont également été étudiées en faisant varier le taux massique d'hydrogène entre 0,25 et 1,50% (entre 5 et 30% en taux volumique) et en fixant le débit total massique des gaz plasmagènes à 72, 32 g.min⁻¹ (soit 50 Nl.min⁻¹) et l'intensité de courant à 530 A. La Figure 41 montre une augmentation des vitesses et températures de surface des particules en vol avec l'augmentation du taux d'hydrogène.

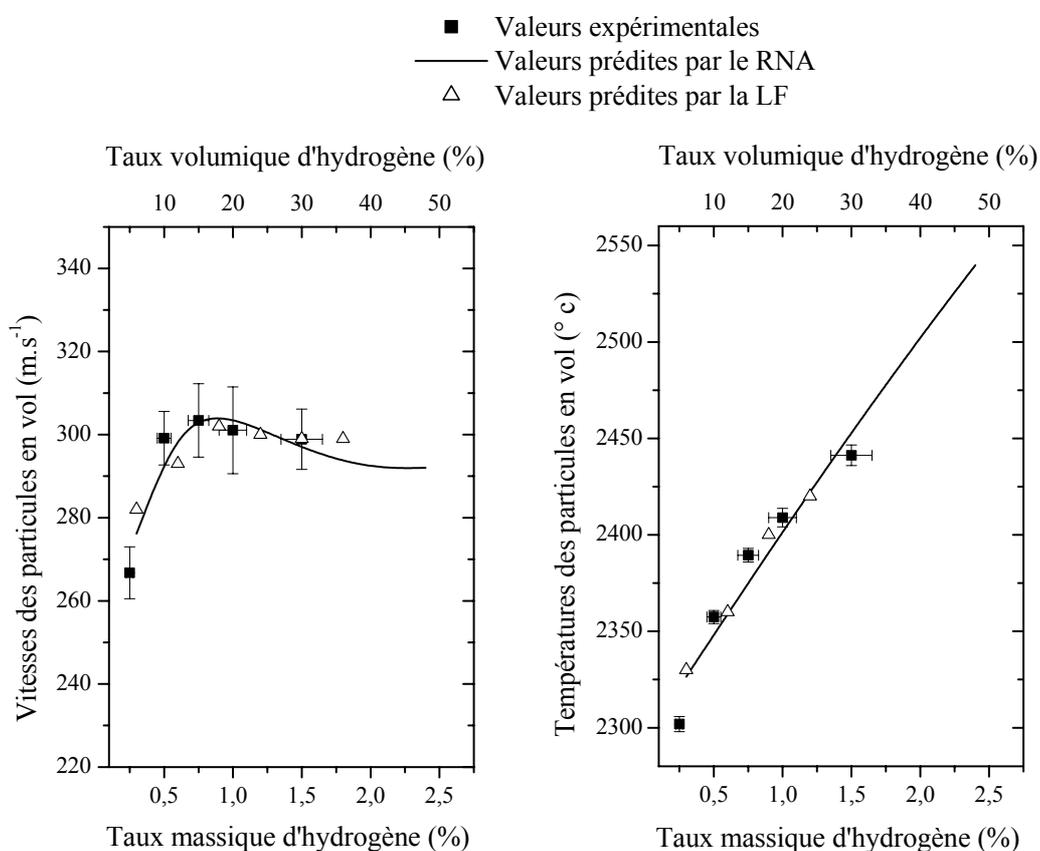


Figure 41 : Variation des caractéristiques des particules en vol (vitesses et températures) en fonction du taux d'hydrogène ($V_{\text{Total}} = 50 \text{ Nl.min}^{-1}$, $I = 530 \text{ A}$). Les barres d'erreur x représentent la variabilité du taux d'hydrogène et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur les vitesses et températures mesurées, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

Les résultats prédits indiquent la même tendance. En faisant passer le taux massique d'hydrogène de 0,25 à 1,50% (soit de 5 à 30% en taux volumique), la vitesse et la température de surface des particules en vol augmente de 12% et de 6% respectivement. Le taux d'hydrogène est un paramètre qui contribue à améliorer les propriétés thermodynamiques du jet de plasma, en favorisant notamment l'augmentation de sa conductivité thermique et de son enthalpie (Figure 35) ou encore la diminution de sa viscosité [107 - 108].

La Figure 42 montre l'évolution des caractéristiques moyennes des particules en vol en fonction du débit total des gaz plasmagènes. Les autres paramètres sont fixés aux conditions de référence. L'augmentation du débit total induit une augmentation significative de la vitesse et une faible variation de la température des particules en vol. Plusieurs études confirment cette tendance [109].

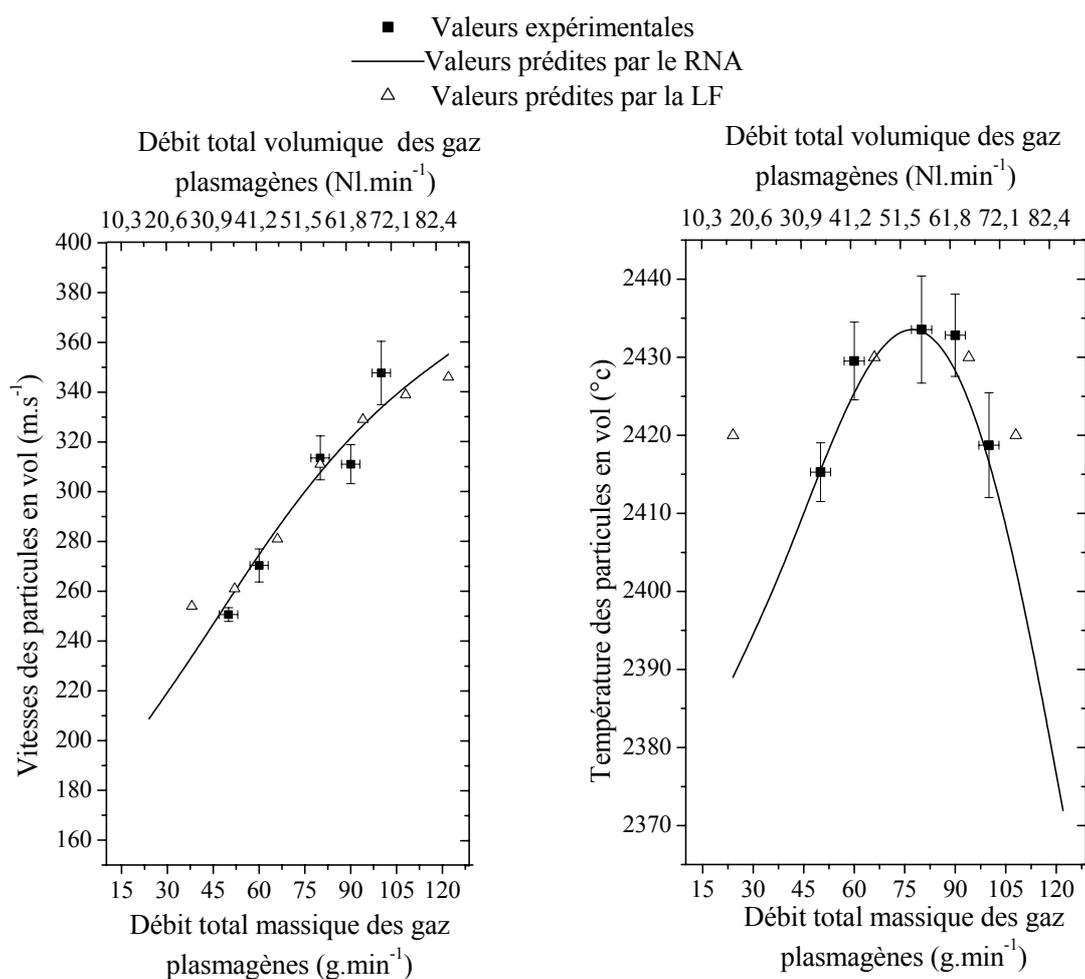


Figure 42 : Variation des caractéristiques des particules en vol (vitesses et températures) en fonction du débit total des gaz plasmagènes (taux volumique d'hydrogène : $V_{H_2/Ar} = 25\%$, $I = 530$ A). Les barres d'erreur x représentent la variabilité du débit et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur les vitesses et températures mesurées, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

Conclusion

L'intensité du courant d'arc permet une augmentation très significative de la température des particules et une augmentation modérée de la vitesse.

Le débit total des gaz plasmagènes permet une augmentation très significative la vitesse moyenne des particules sans changer significativement leur température de surface.

Le taux d'hydrogène induit une augmentation significative de la vitesse et température des particules.

Des études, comme le modèle de Friis *et al.* [22] par exemple, montrent une évolution similaire de la vitesse et de la température dans le cas de la projection plasma de particules de zircone partiellement stabilisée à l'yttrine.

4.3.4. Propriétés du dépôt

Les propriétés du dépôt (épaisseur déposée par passe, taux de porosité, dureté, etc.) dépendent entre autre des caractéristiques des particules à l'impact et donc par conséquent des paramètres de fonctionnement de la torche.

a. Epaisseur moyenne déposée par passe

L'épaisseur du dépôt est estimée par la méthode d'analyse d'images, ce qui permet d'obtenir des résultats statistiquement plus représentatifs [110]. L'épaisseur moyenne déposée par passe, représentative du rendement intrinsèque de dépôt, est définie par le rapport entre l'épaisseur moyenne du dépôt et le nombre de passes pour réaliser ce dépôt. Après apprentissage, la structure du RNA optimisé est 9H_1H.

L'effet de l'intensité de courant d'arc sur l'épaisseur déposée par passe a été étudié en faisant varier ce paramètre entre 350A et 650 A et en gardant les autres paramètres de projection aux conditions de référence (Tableau 8). La Figure 43 montre que l'épaisseur moyenne déposée par passe augmente avec l'intensité du courant d'arc. Une augmentation de 350 à 650 A permet d'augmenter l'épaisseur moyenne déposée par passe de 19%. Lorsque l'intensité de courant est élevée, une fraction importante de la distribution en taille des particules injectées dans le jet de plasma est fondue. Cela conduit à une augmentation du rendement intrinsèque de projection et par là même de l'épaisseur moyenne déposée par passe. L'intelligence artificielle a permis de prédire la limite (aux alentours de 700 A) au-delà de laquelle la variation de courant n'a plus un effet significatif sur l'évolution de l'épaisseur moyenne déposée par passe. Cela s'explique par le fait qu'aux grandes puissances, cette augmentation conduit à une évaporation marquée des particules, en particulier celles de plus petites tailles [111]. Ainsi, l'intensité de courant doit être choisie de manière judicieuse car une faible intensité conduit à une fusion insuffisante des particules et pour une intensité importante, le taux de vaporisation des particules devient significatif [40].

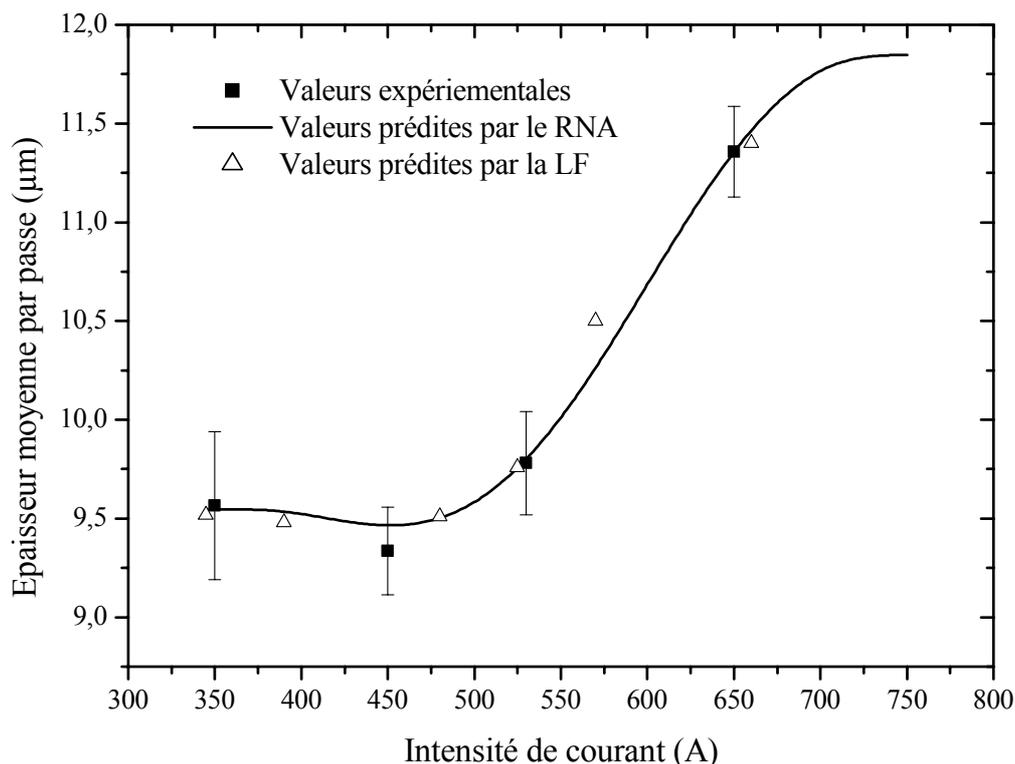


Figure 43 : Evolution de l'épaisseur de dépôt par passe en fonction de l'intensité de courant ($V_{\text{Total}} = 50 \text{ Nl.min}^{-1}$, $V_{\text{H}_2/\text{Ar}} = 25\%$). Les barres d'erreur représentent l'écart type sur l'épaisseur, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

L'évolution de l'épaisseur moyenne déposée par passe a été également étudiée en faisant varier le taux massique d'hydrogène entre 0,25% et 1,50% (5 à 30% du taux volumique) et en fixant l'intensité de courant d'arc à 530 A et le débit total des gaz plasmagènes à 72, 32 g.min^{-1} (soit 50 Nl.min^{-1} en débit volumique). La Figure 44 illustre les évolutions obtenues. Pour les faibles taux, l'hydrogène améliore la conductivité du jet et facilite des échanges thermiques entre les particules et le jet de plasma. Cela se traduit par conséquent par une augmentation de l'épaisseur moyenne déposée par passe de 41%. Lorsque le taux d'hydrogène est élevé (à partir de 1% en taux massique soit 20% en taux volumique), l'augmentation de l'épaisseur déposée est de 9% seulement, ce qui n'est plus une variation significative. Cet effet est dû à une enthalpie élevée du jet [112]. Planche *et al.* [21] ont démontré par ailleurs que l'augmentation de la puissance électrique, donc celle de l'intensité de courant, induit une augmentation du rendement de dépôt.

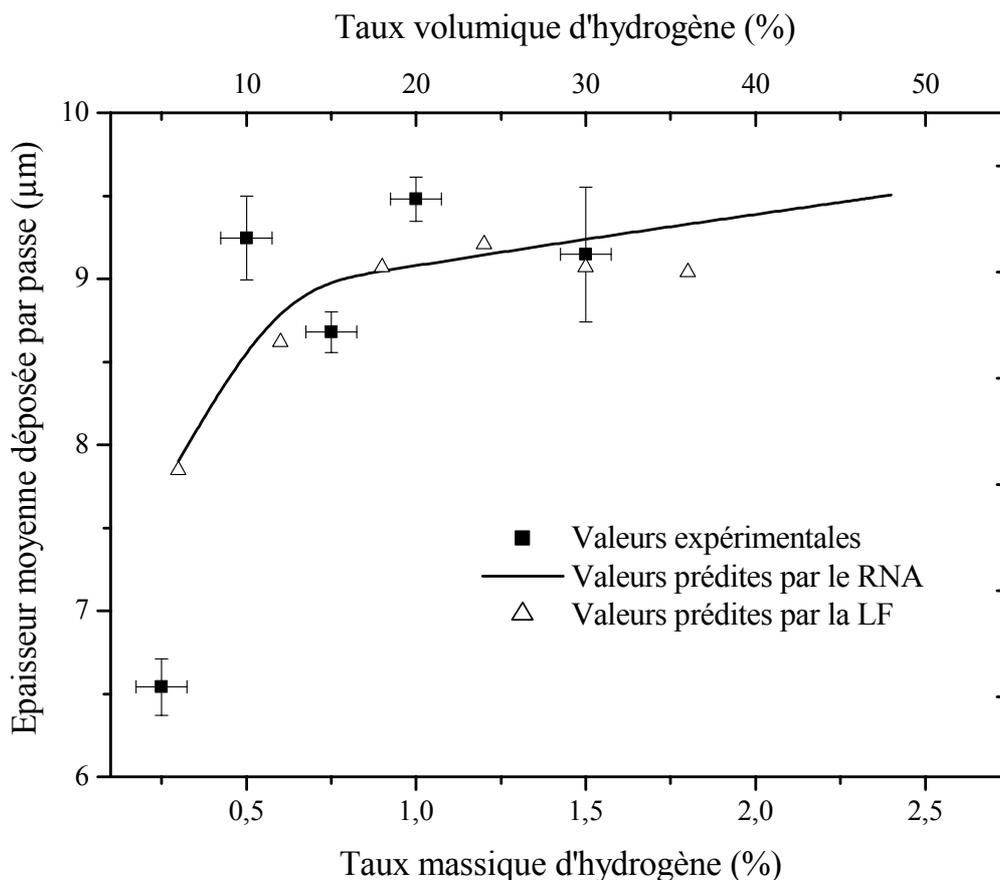


Figure 44 : Evolution de l'épaisseur de dépôt par passe en fonction du taux massique d'hydrogène ($V_{\text{Total}} = 50 \text{ Nl.min}^{-1}$, $I = 530 \text{ A}$). Les barres d'erreur x représentent la variabilité du taux d'hydrogène et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur l'épaisseur, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

La Figure 45 montre une diminution de 41% de l'épaisseur moyenne déposée par passe avec l'augmentation du débit total des gaz plasmagènes. L'augmentation de ce paramètre induit une augmentation continue de la vitesse moyenne des particules. De ce fait, il contribue à la diminution du temps d'interaction entre les particules et le jet plasma. Par contre, son effet est limité sur la température moyenne de surface des particules en vol [22, 111] (paragraphe 4.3.3).

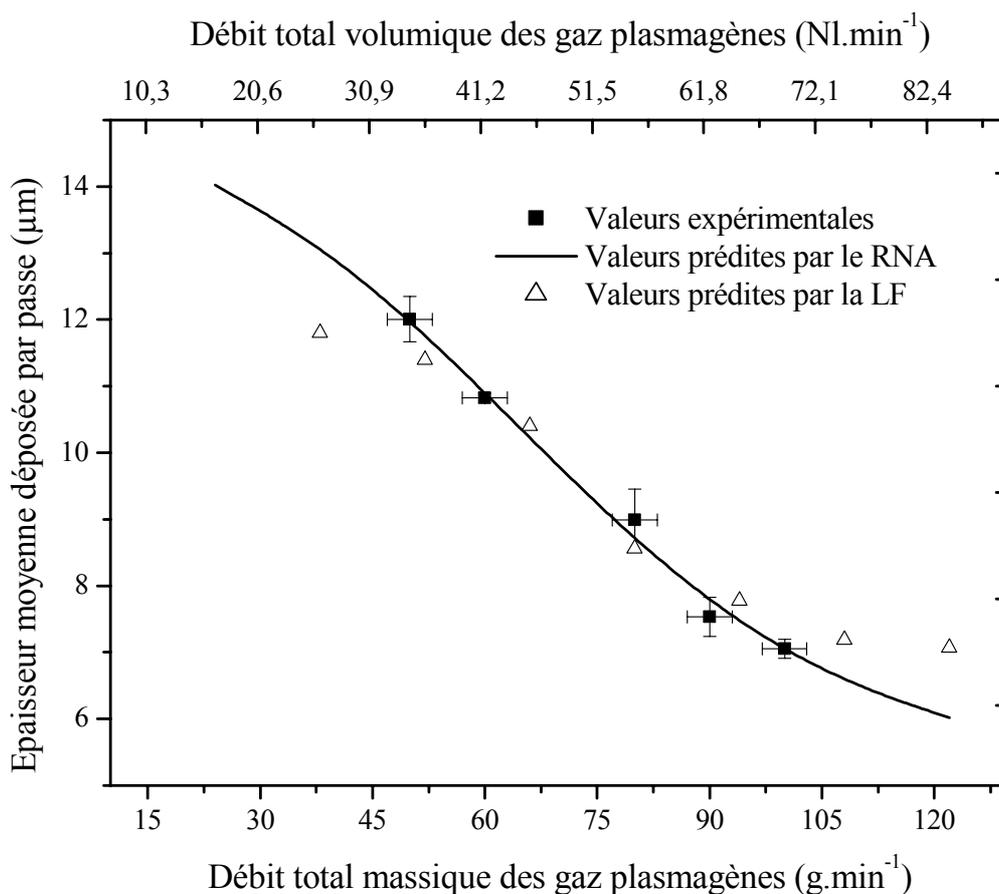


Figure 45 : Evolution de l'épaisseur de dépôt par passe en fonction du débit total des gaz plasmagènes ($I = 530 \text{ A}$, $V_{\text{H}_2/\text{Ar}} = 25\%$). Les barres d'erreur x représentent la variabilité du débit et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur l'épaisseur, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

b. Taux global de porosité

Le taux global de porosité des dépôts est étudié en fonction des paramètres de puissance. Le RNA a été optimisé et la structure retenue est de type 8H_1H.

L'effet de l'intensité de courant d'arc a été étudié en fixant le taux massique d'hydrogène à 1,50% (25% de taux volumique) et le débit massique total des gaz plasmagènes à $72,32 \text{ g.min}^{-1}$ (soit 50 Nl.min^{-1} en débit volumique). La Figure 46 montre que le taux de porosité diminue de l'ordre de 27% lorsque l'intensité de courant évolue de 350 A et 650 A.

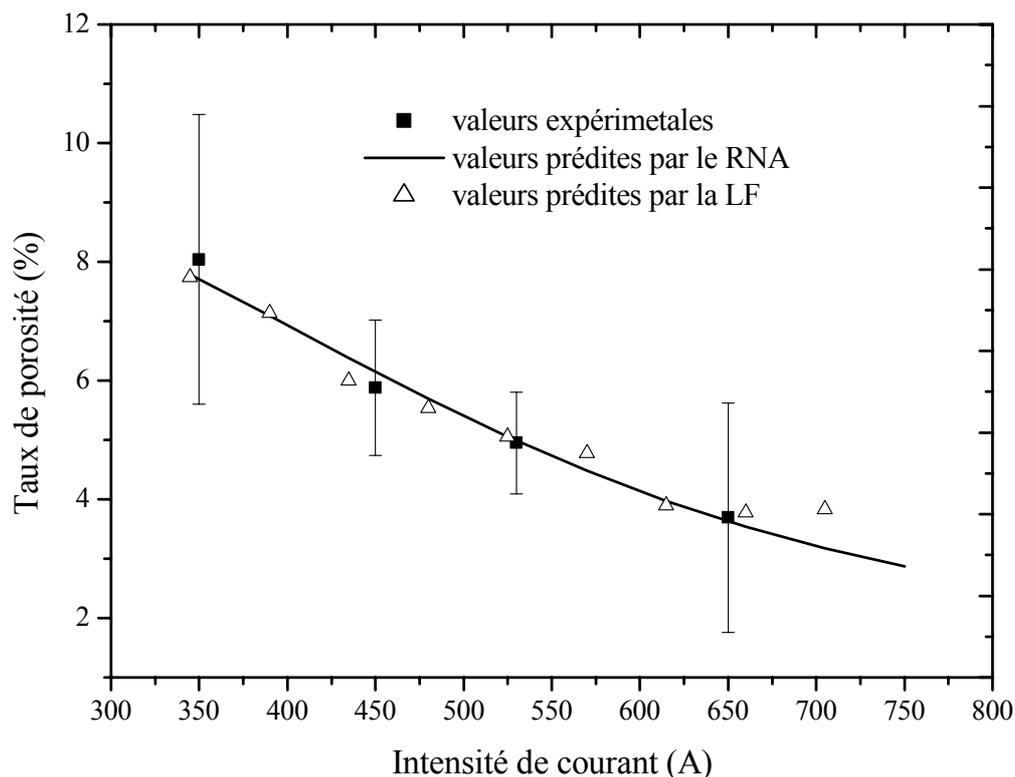


Figure 46 : Evolution du taux de porosité en fonction de l'intensité de courant ($V_{\text{Total}} = 50 \text{ Nl.min}^{-1}$, $V_{\text{H}_2/\text{Ar}} = 25\%$). Les barres d'erreur représentent l'écart type sur la porosité, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

La Figure 47 indique une diminution de 33% du taux global de porosité des dépôts lorsque le taux d'hydrogène varie de 0,25% à 1,50% (entre 5 et 30% en taux volumique). Le taux d'hydrogène est un paramètre qui conduit à l'augmentation de la puissance nette du jet ainsi que du coefficient de transfert thermique. Par conséquent les caractéristiques des particules en vol et notamment leur température de surface moyenne s'en trouvent augmentées.

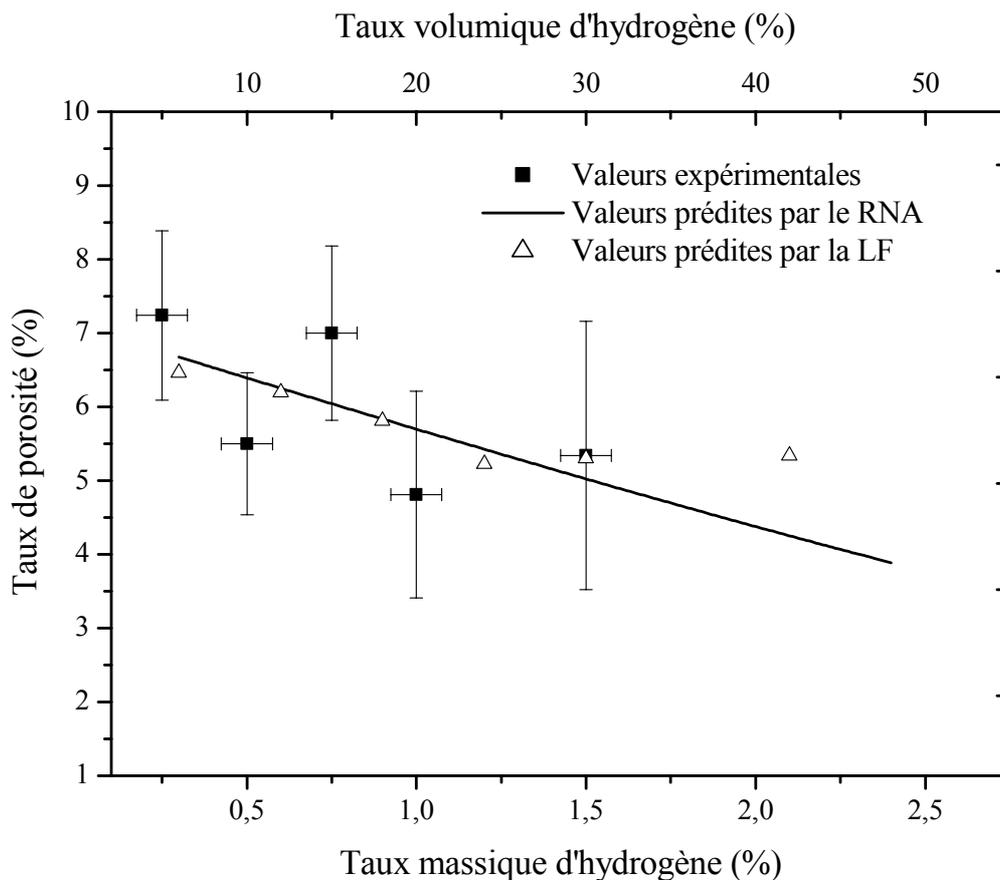


Figure 47 : Evolution du taux de porosité en fonction du taux d'hydrogène ($V_{\text{Total}} = 50 \text{ Nl.min}^{-1}$, $I = 530 \text{ A}$). Les barres d'erreur x représentent la variabilité du taux d'hydrogène et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur la porosité, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

L'évolution du taux de porosité est étudiée en fonction du débit total des gaz plasmagènes (Figure 48). Les autres paramètres sont fixés aux conditions de référence (Tableau 8). Le taux de porosité présente une variation prononcée, jusqu'à 110%, avec la variation du débit total de gaz plasmagènes. Au fur et à mesure qu'il augmente, la durée d'interaction plasma / particule diminue et l'état de fusion des particules les plus grandes s'en trouve diminué, modifiant alors les conditions d'écrasement et augmentant simultanément le taux global de porosité du dépôt [113].

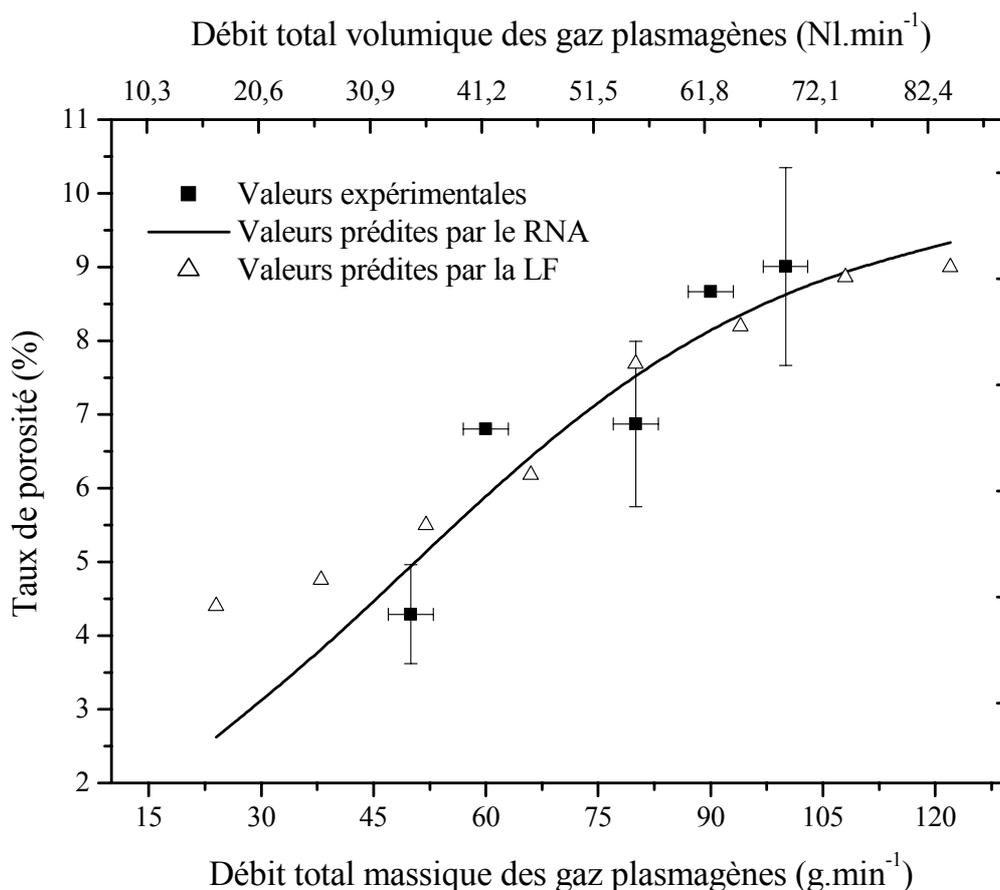


Figure 48 : Evolution du taux global de porosité du dépôt en fonction du débit total des gaz plasmagènes ($V_{H_2/Ar} = 25\%$, $I = 530$ A). Les barres d'erreur x représentent la variabilité du débit et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur la porosité, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

c. *Microdureté*

La dureté, indicateur de la cohésion des dépôts, est mesurée par la méthode de Vickers sous une charge de 0,3 kgf soit 3 N.

La Figure 49 illustre l'évolution de la dureté du dépôt en fonction de l'intensité de courant. La structure du RNA est de type 8H_1H. En faisant varier l'intensité de courant d'arc entre 350 et 650 A, la dureté du dépôt augmente de l'ordre de 25%.

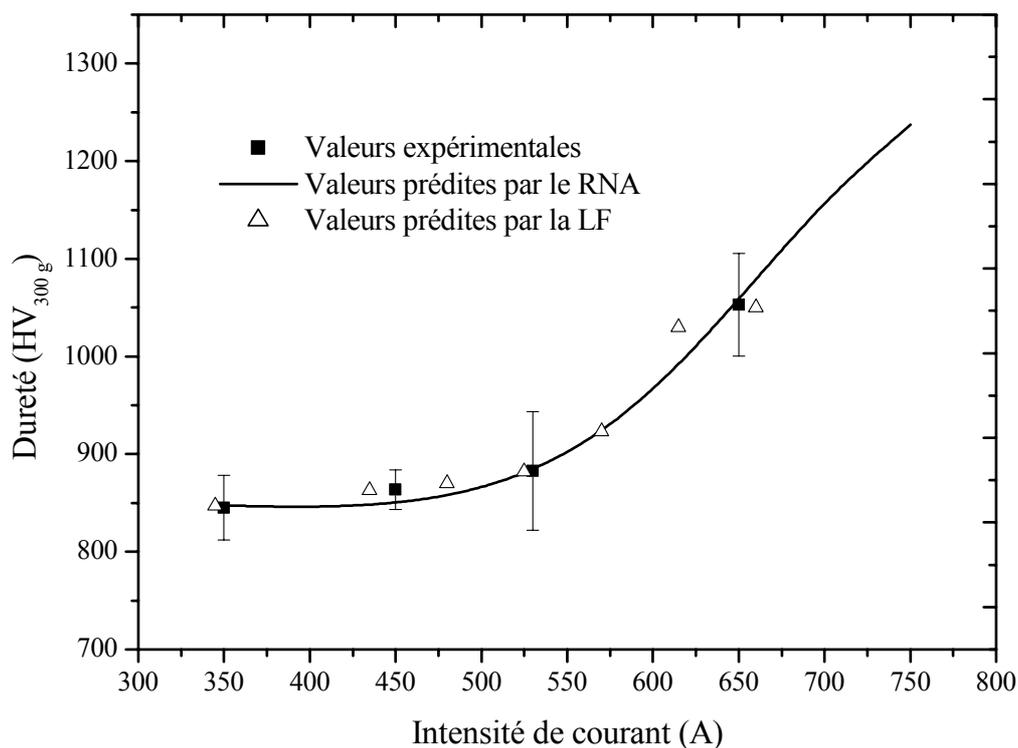


Figure 49 : Evolution de la dureté moyenne du dépôt en fonction de l'intensité de courant ($V_{\text{Total}} = 50 \text{ Nl.min}^{-1}$, $V_{\text{H}_2/\text{Ar}} = 25\%$). Les barres d'erreur représentent l'écart type sur la dureté, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

L'effet du taux d'hydrogène sur la dureté du dépôt a été étudié en fixant l'intensité du courant d'arc à 530 A et le débit total des gaz plasmagènes à $72,32 \text{ g.min}^{-1}$ (50 Nl.min^{-1}). Après optimisation, le RNA retenue est 12H_1H. La Figure 50 montre une augmentation globale de 51% de la dureté pour un taux massique d'hydrogène évoluant de 0,25 à 1,50% (de 5 à 30% en taux volumique). Cependant, il est à noter que la dureté est faiblement influencée lorsque le taux devient supérieur à 0,75% (15% en taux volumique), donnée confirmée par le point de vue Steeper *et al.* [114].

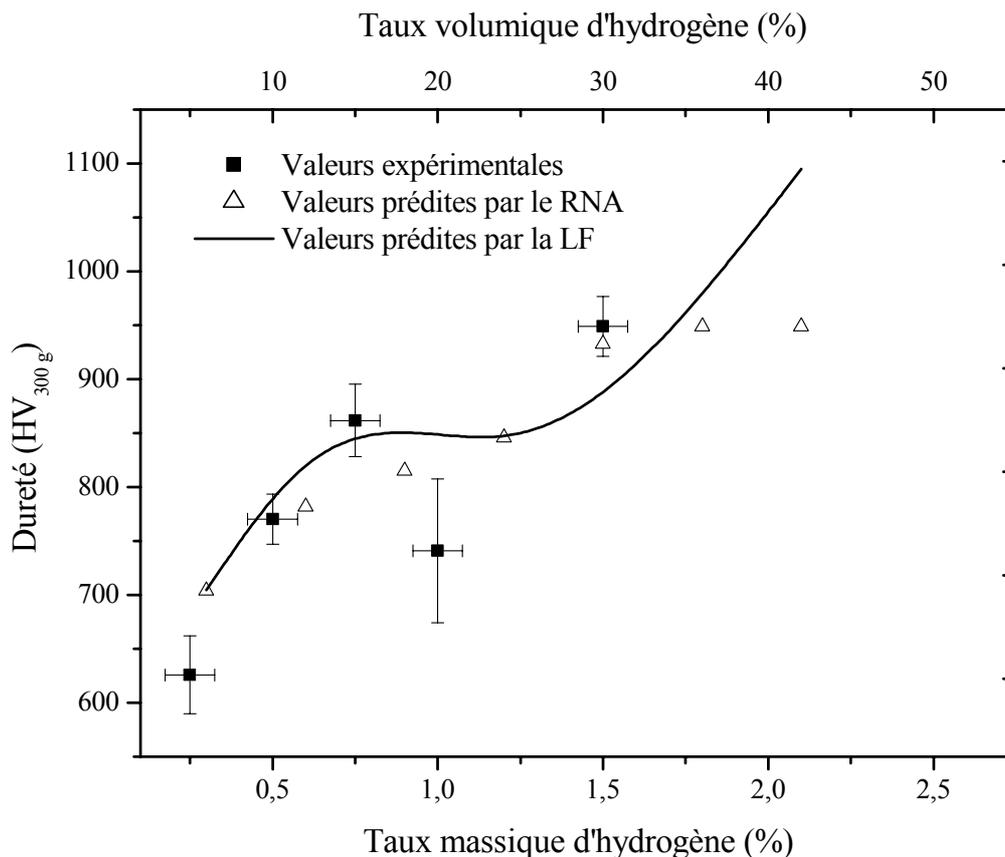


Figure 50 : Evolution de la dureté moyenne du dépôt en fonction du taux d'hydrogène ($V_{\text{Total}} = 50 \text{ Nl.min}^{-1}$, $I = 530 \text{ A}$). Les barres d'erreur x représentent la variabilité du taux d'hydrogène et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur la dureté, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

La Figure 51 illustre l'effet du débit total des gaz plasmagènes sur la dureté moyenne du dépôt. Le RNA retenu est de la forme 9H_1H. La prédiction à base d'intelligence artificielle donne une évolution de type parabolique. On note une augmentation de dureté de dépôt de 10% jusqu'à un débit massique de 80 g.min^{-1} (soit 55 Nl.min^{-1}). Au-delà, l'effet du débit total des gaz plasmagènes devient secondaire.

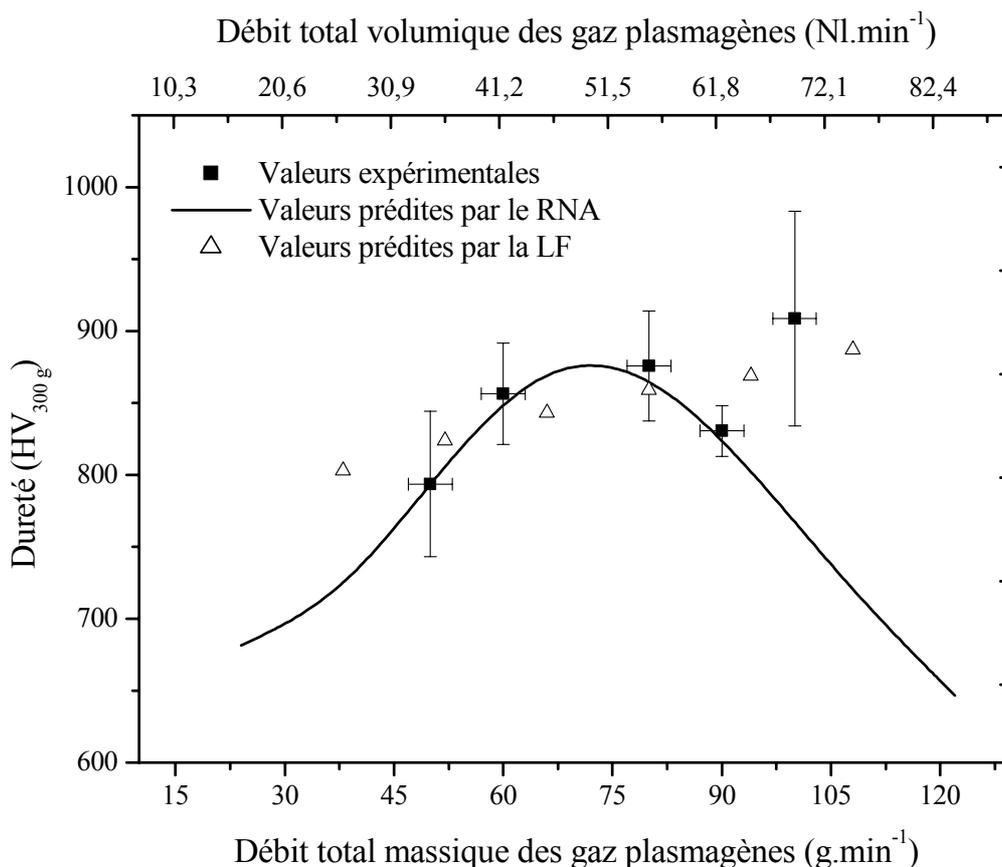


Figure 51 : Evolution de la dureté moyenne du dépôt en fonction du débit total des gaz plasmagènes ($V_{H_2/Ar} = 25\%$, $I = 530$ A). Les barres d'erreur x représentent la variabilité du débit et les barres d'erreur y représentent l'écart type sur la dureté, (voir paragraphe 4.3.1 quant à la représentation graphique des résultats).

Conclusion

Il est à noter que le degré de fusion des particules augmente avec la puissance nette du jet plasma. En raison des contraintes thermodynamiques, la température du jet diminue quand le débit total des gaz plasmagènes augmente. L'augmentation de l'intensité du courant d'arc et également l'augmentation de la fraction d'hydrogène permettent d'augmenter la quantité d'énergie qui favoriserait les échanges thermiques avec les particules. Les particules en vol s'écrasent sur le substrat avec des vitesses plus rapides améliorent les conditions d'étalement et donc la densité et l'adhérence du dépôt.

4.4. Synthèse

Le Tableau 13 synthétise l'ensemble des résultats obtenus.

Tableau 13 : Synthèse des résultats obtenus (I varie de 345 à 750 A, le taux massique d'hydrogène varie de 0,3 à 3% et le débit total massique varie entre 24 et 150 g.min⁻¹).

Paramètres		Plage de variation	Architecture
Puissance nette	I	↑ 13 à 25 kW	7H_1L
	H ₂ /Ar	↑ 14 à 25 kW	7H_1L
	H ₂ +Ar	↑ 9 à 18 kW	9H_1H
Tension	I	↓ 65 à 63 V	9H_1H
	H ₂ /Ar	↑ 50 à 74 V	9H_1H
	H ₂ +Ar	↑ 45 à 73 V	9H_1H
Flux des particules	I	↑ 84 à 95 u.a	10H_1H
	H ₂ /Ar	↓ 100 à 95 u.a	7H_1H
	H ₂ +Ar	↓ 126 à 34 u.a	7H_1H
Enthalpie du jet plasma	I	↑ 1,1 à 2,1.10 ⁷ J.kg ⁻¹	7H_1H
	H ₂ /Ar	↑ 1,2. .10 ⁷ à 2.10 ⁷ J.kg ⁻¹	7H_1H
	H ₂ +Ar	↓ 1,9. .10 ⁷ à 0,9.10 ⁷ J.kg ⁻¹	7H_1H
Vitesse des particules	I	↑ 260 à 340 m.s ⁻¹	7H_1H
	H ₂ /Ar	↑ 275 à 300 m.s ⁻¹	7H_1H
	H ₂ +Ar	↑ 200 à 375 m.s ⁻¹	7H_1H
Température des particules	I	↑ 2230 à 2585°C	7H_1H
	H ₂ /Ar	↑ 2325 à 2590°C	7H_1H
	H ₂ +Ar	2390 à 2290°C	7H_1H
Epaisseur du dépôt	I	↑ 9,5 à 11,8 μm	9H_1H
	H ₂ /Ar	↑ 8 à 9,7 μm	9H_1H
	H ₂ +Ar	↓ 14 à 5,8 μm	9H_1H
Taux de porosité	I	↓ 5 à 3,3%	8H_1H
	H ₂ /Ar	↓ 6,7 à 3,2%	8H_1H
	H ₂ +Ar	↑ 2,6 à 9,7%	8H_1H
Dureté	I	847 à 1237 HV	8H_1H
	H ₂ /Ar	700 à 1320 HV	12H_1H
	H ₂ +Ar	680 à 575 HV	9H_1H

Après avoir établi les RNA qui corrént d'une part les paramètres opératoires aux caractéristiques des particules en vol et aux propriétés du jet plasma, d'autre part les paramètres opératoires aux propriétés et caractéristiques du dépôt, un autre RNA (Figure 52) a été défini pour prédire les paramètres opératoires en fonction des propriétés et caractéristiques du dépôt désirées et par la suite pour prédire les caractéristiques en vol des particules qui en résultent. Un modèle analytique permet d'en déduire le degré d'étalement des particules à l'impact.

Les propriétés du dépôt sont reliées à 9 paramètres opératoires (9 ddl) à savoir : les paramètres de puissance (débit total de gaz plasmagènes, taux d'hydrogène, l'intensité de courant d'arc), les paramètres d'injection de la poudre (débit massique de poudre, débit de gaz porteur, diamètre d'injecteur) et aux paramètres cinématiques (distance d'injection, distance de projection et pas de balayage).

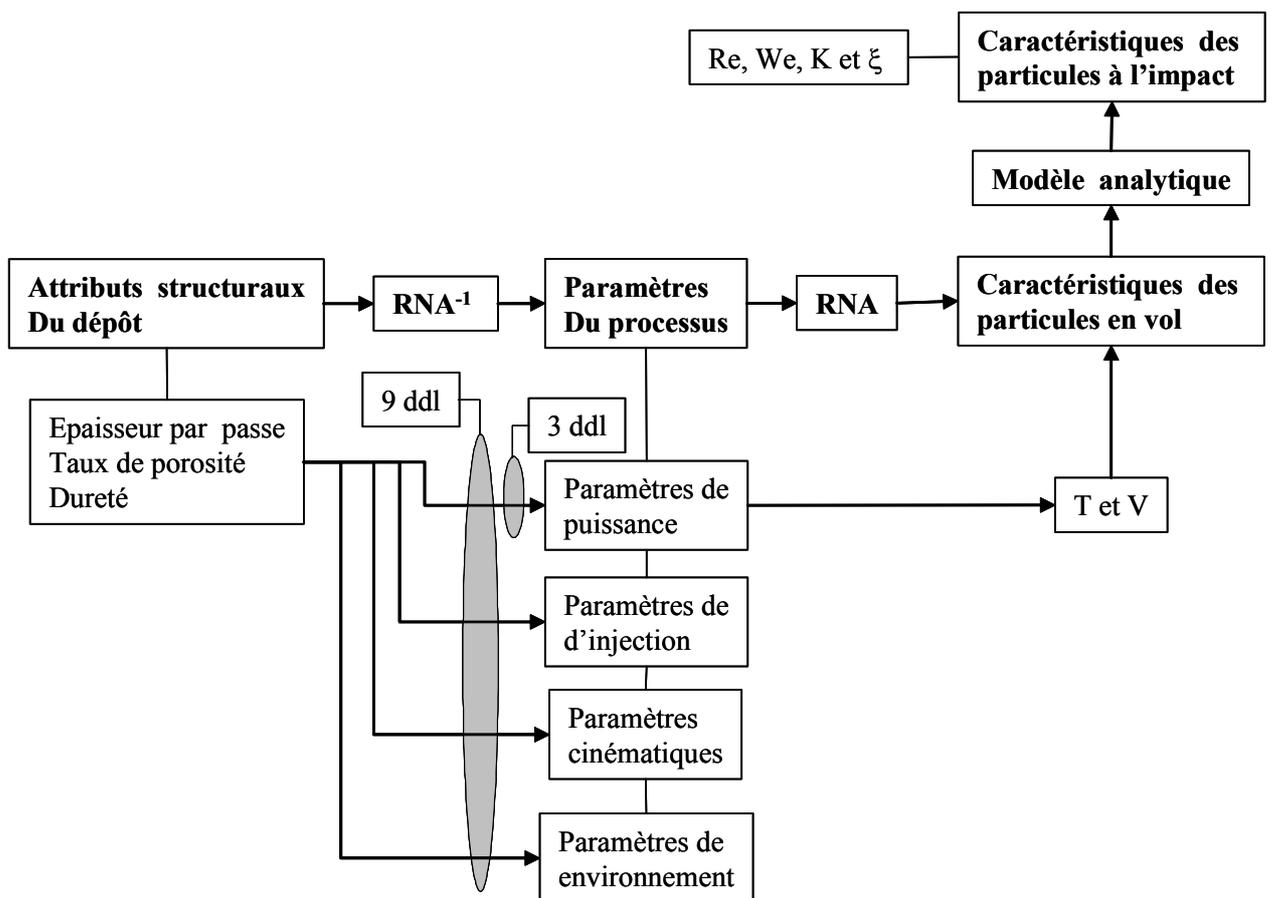


Figure 52 : Méthodologie mise en application pour prédire les paramètres du processus en fonction des attributs structuraux.

4.5. Prédiction des paramètres opératoires en fonction des attributs structuraux du dépôt

Les paramètres de puissance (intensité de courant d'arc, débit total des gaz plasmagènes et taux d'hydrogène) peuvent être prédits en fonction des propriétés requises du dépôt. Dans la présente étude, trois attributs structuraux ont été considérés : le rendement intrinsèque de dépôt estimé *via* l'épaisseur moyenne déposée par passe, le taux global de porosité et la dureté. Pour chaque propriété donnée, un réseau de neurones a été considéré pour étudier l'effet de 3 paramètres de puissance. Le RNA comprend un seul neurone en entrée correspondant à la propriété du dépôt considérée. Le vecteur de sortie du RNA est composé de 3 neurones correspondant aux paramètres de puissance à prédire. Les caractéristiques des particules en vol (vitesse et température) correspondant aux paramètres de puissance sont parallèlement prédites *via* un deuxième RNA. Pour se faire, ce deuxième RNA est constitué de 3 neurones d'entrée correspondant aux paramètres de puissance prédits précédemment et de 2 neurones de sortie représentant les caractéristiques en vol des particules.

Pour estimer le degré d'étalement des particules suivant leurs caractéristiques au moment de l'impact sur le substrat, le critère d'écrasement a été retenu [27]. Les paramètres de l'équation 4.7 sont définis dans le Tableau 14 :

$$\xi = \frac{D}{d_p} = A \cdot \text{Re}^\alpha \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Tableau 14 : Paramètres du degré d'étalement suivant plusieurs auteurs [115 - 116].

	A	α
Madejski	1,294	0,200
Jones	1,059	0,125
Trapaga	1,000	0,200
Fukumoto	1,060	0,120
Yoshida	0,810	0,200

4.5.1. Paramètres de puissance en fonction du taux de porosité

L'architecture complexe du réseau de pores peut par exemple être caractérisée par une distribution de taille de pores et un taux de connectivité se développant pendant le dépôt des céramiques en raison de fissures intra et interlamellaires. Ce réseau affecte de manière significative les propriétés du dépôt (conductivités thermique et ionique, etc.) et leurs comportements d'usage (résistance à l'usure et à la corrosion). Dans cette étude, le réseau de pores a été considéré globalement et aucune discrimination n'a été faite au sujet de la morphologie des pores (des fissures ou des pores globulaires) ou de leur connectivité.

Les résultats suivant représentent des tendances générales, car la morphologie des pores, la distribution de leur taille et la connectivité sont fortement influencées par les paramètres opératoires, particulièrement ceux liés à la puissance du plasma, alors que dans le cas présent, seul le taux global moyen a été considéré.

La Figure 53 montre l'évolution des paramètres de puissance prédits par le RNA en fonction du taux de porosité désiré. Les résultats présentent une prédiction simultanée des paramètres de puissance en fonction du taux de porosité désiré. Par exemple si on désire réaliser un dépôt avec un taux de porosité de 5%, alors le modèle nous propose de choisir propose de fixer simultanément l'intensité de courant à 534 A, le taux d'hydrogène à 1,12% et le débit total des gaz plasmagènes à 70,3 g.min⁻¹.

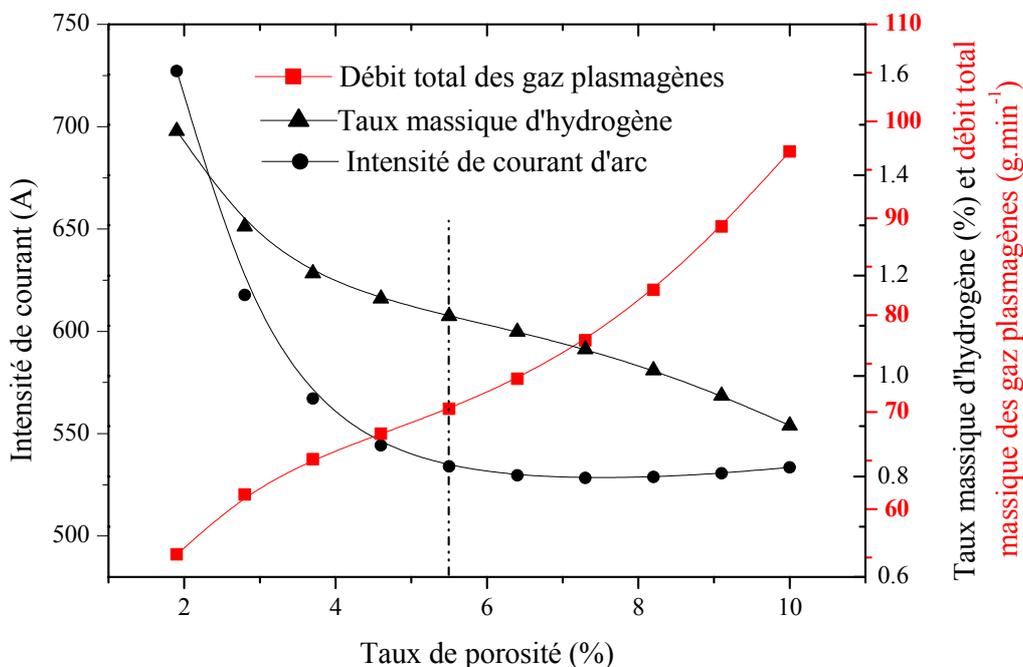


Figure 53 : Prédiction des paramètres de puissance en fonction du taux de porosité désiré.

Aucune autre contrainte n'étant appliquée au modèle neuronal, les prédictions ne mènent qu'à une diminution graduelle de la puissance nette du jet de plasma en diminuant simultanément l'intensité de courant et le taux d'hydrogène et en augmentant le débit total des gaz plasmagènes. Dans la pratique, ceci correspondrait à diminuer la température et la quantité de mouvement des particules à l'impact sur le substrat ou les couches précédemment déposées et à augmenter la vitesse des particules. Ce qui induit une diminution du degré d'étalement de la lamelle comme précédemment démontré et mène ainsi à une augmentation du taux de porosité [117]. Le RNA optimisé est de type 10H_1L2H.

La Figure 54 illustre l'évolution des caractéristiques en vol des particules prédites à partir des paramètres de puissance (Figure 53) précédemment prédits. Les autres paramètres opératoires sont fixés aux valeurs de référence. L'évolution des paramètres de puissance induit une augmentation de la vitesse des particules et une faible variation de leur température. L'augmentation du taux de porosité s'explique par le fait qu'à ces températures les grosses particules sont partiellement fondues.

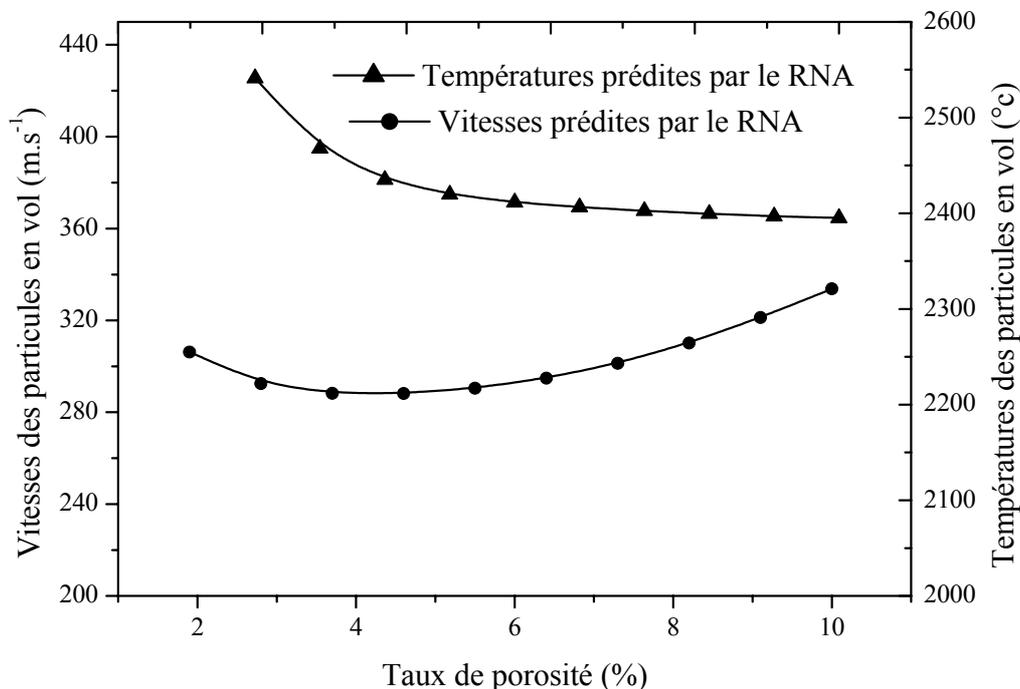


Figure 54 : Prédiction des caractéristiques des particules en vol correspondant aux paramètres de puissance en fonction du taux de porosité désiré.

4.5.2. Paramètres de puissance en fonction de la dureté requise

Un RNA permettant d'évaluer les paramètres opératoires du procédé en fonction de la dureté requise du dépôt a été défini et validé. La Figure 55 illustre les résultats obtenus. Le modèle propose d'augmenter simultanément les paramètres de puissance pour améliorer la microdureté du dépôt. Par exemple pour avoir une dureté de 1200 HV, le modèle suggère de choisir simultanément l'intensité de courant à 687 A, le taux d'hydrogène à 2% et le débit total des gaz plasmagènes à 85,5 g.min⁻¹. L'augmentation de la dureté du dépôt conduit à une augmentation des paramètres opératoires de puissance. L'augmentation de ces paramètres conduit à une amélioration des transferts thermiques et de quantité de mouvement du plasma vers les particules, par conséquent, un grand nombre de particules sont complètement fondues lors de l'impact [117]. Au fur et à mesure de l'augmentation des paramètres de puissance, le dépôt présente une meilleure dureté.

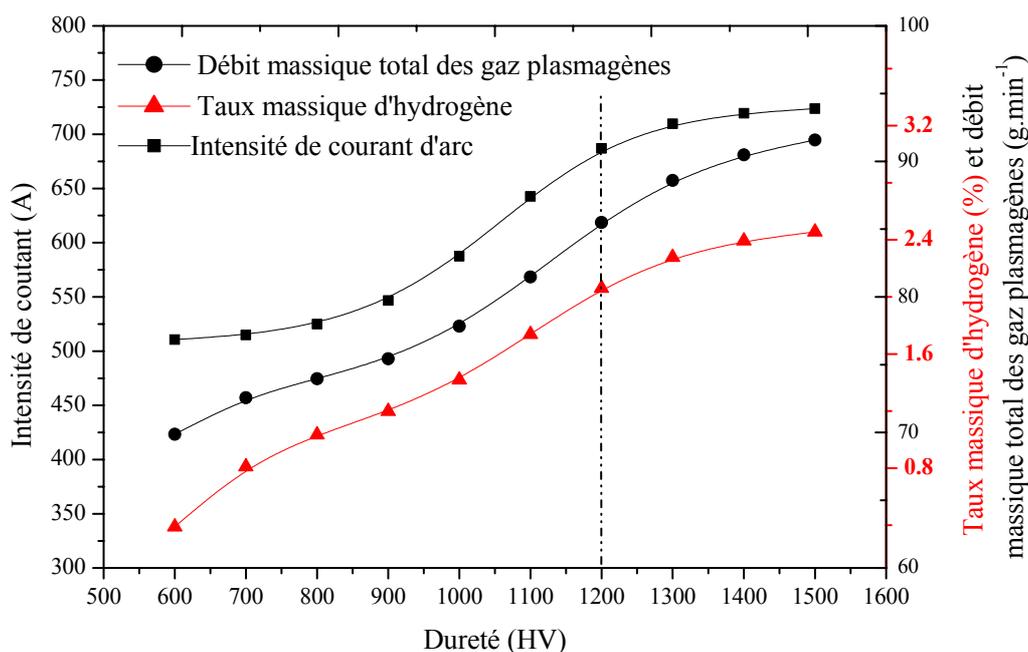


Figure 55 : Prédiction des paramètres de puissance en fonction de la dureté de dépôt requise.

L'évolution des caractéristiques en vol des particules (Figure 56) est prédite en fonction des paramètres de puissance précédemment prédits. Les autres paramètres opératoires sont fixés aux valeurs de référence. L'augmentation des paramètres de puissance induit une augmentation des caractéristiques en vol des particules (paragraphe 4.3.3).

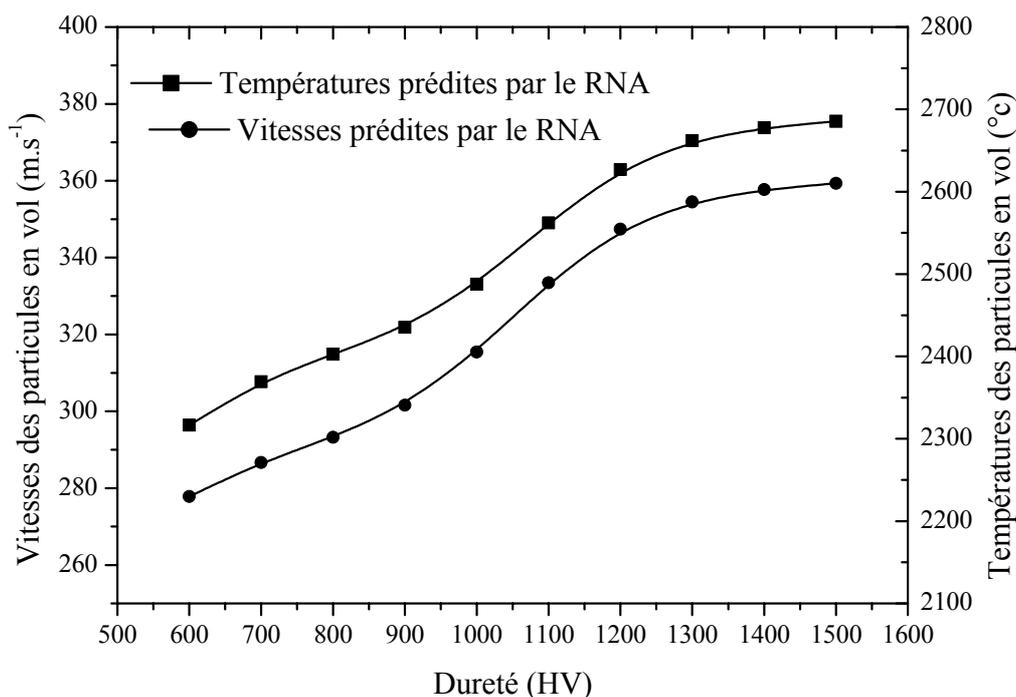


Figure 56 : Prédiction des caractéristiques des particules en vol correspondant aux paramètres de puissance en fonction de la dureté de dépôt requise.

4.5.3. Paramètres de puissance en fonction de l'épaisseur moyenne

L'épaisseur moyenne déposée par passe est représentative du rendement intrinsèque de dépôt. Ce critère est recherché pour être maximisé la plupart du temps en ajustant des paramètres opératoires, tout en se conformant simultanément aux d'autres attributs structuraux requis du dépôt.

La Figure 57 illustre les résultats obtenus (prédiction simultanée des paramètres opératoires pour chaque épaisseur moyenne par passe considérée). Les autres paramètres opératoires sont fixés aux valeurs de référence. Aucune autre contrainte n'étant appliquée au système, les prédictions mènent à une augmentation graduelle de la puissance nette du plasma jusqu'à un plateau en augmentant simultanément l'intensité de courant et le taux d'hydrogène et en diminuant le débit total des gaz plasmagènes. D'un point de vue physique, ceci correspondrait à fondre les particules de poudre de diamètres de plus en plus élevés afin d'augmenter le rendement de dépôt. Il apparaît que le taux d'hydrogène et l'intensité de courant d'arc sont les deux paramètres prédominants permettant d'augmenter l'épaisseur moyenne déposée par passe. Ces deux paramètres conditionnent en grande partie l'enthalpie du jet de plasma. Le débit total de gaz plasmagènes décroît dans un second temps seulement, diminuant la vitesse du jet de

plasma et permettant ainsi un temps de séjour des particules en son sein plus conséquent et ainsi très vraisemblablement une fusion complète des particules de poudre présentant les plus grands diamètres. Une plage de stabilité des paramètres apparaît à partir d'une certaine épaisseur de dépôt. Cela constitue la limite de contrôle du procédé dans les conditions retenues.

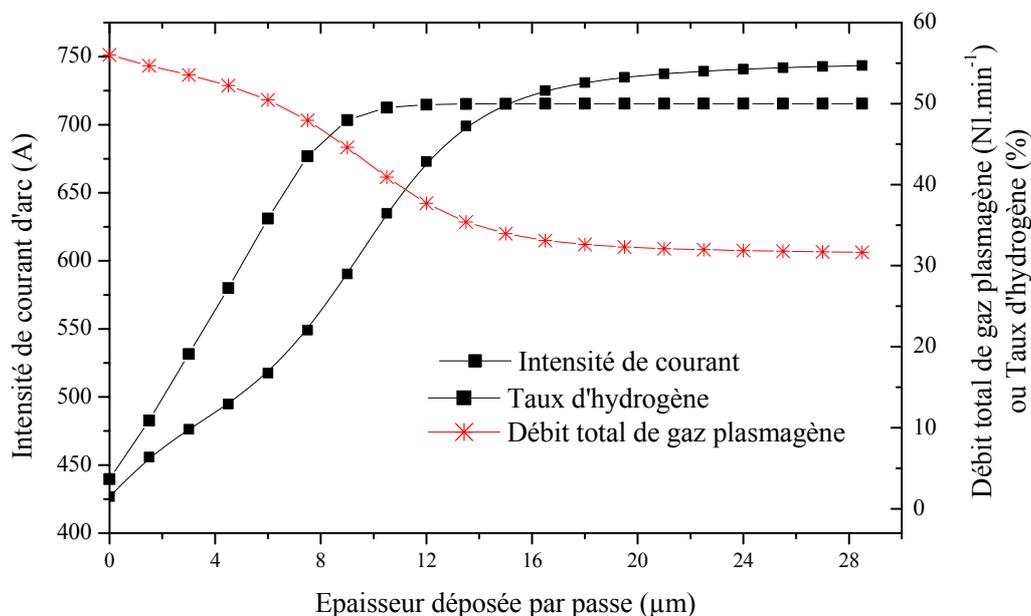


Figure 57 : Prédiction des paramètres opératoire en fonction de l'épaisseur du dépôt désirée.

La Figure 58 illustre l'évolution des caractéristiques moyennes des particules en vol. Ces caractéristiques ont été déduites des paramètres de puissance (Figure 57) précédemment prédits à l'aide d'un autre RNA. Pour améliorer les caractéristiques du dépôt, il s'avère plus que nécessaire de contrôler les caractéristiques des particules à travers les paramètres tels que la composition des gaz, le débit total des gaz, l'intensité de courant d'arc, etc. L'augmentation de l'intensité du courant d'arc avec celle de la fraction d'hydrogène permet d'augmenter la quantité d'énergie, ce qui favorise les échanges thermiques avec les particules. La valeur minimale du débit total de gaz plasmagènes correspond à celle en deçà de laquelle on a une perte notable d'enthalpie. Pour le débit massique, la limite physique est atteinte (environ 40 g.min^{-1}) à partir d'une épaisseur de 19 μm . On peut cependant envisager qu'au-delà de 40 g.min^{-1} , la fraction de particules infondues augmente significativement.

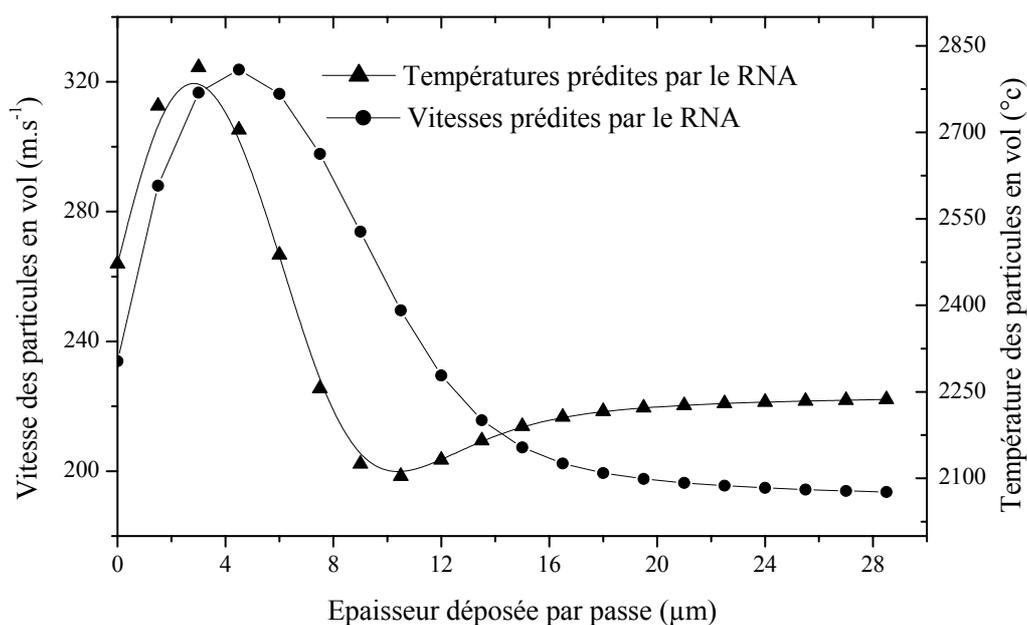


Figure 58 : Prédiction des caractéristiques des particules en vol correspondant aux paramètres de puissance en fonction de l'épaisseur du dépôt désirée.

Une limitation structurale apparaît pour une épaisseur moyenne déposée par passe inférieure à 6 μm : la température des particules de diamètre moyen de 38 μm, par conséquent des petits diamètres, semble atteindre la température de vaporisation de la phase rutile (1855°C) : la composition initiale de la poudre projetée n'est plus maintenue.

4.5.4. Paramètres de l'étalement des particules

D'après la relation de Madejski, le coefficient A est de 1,29 pour des lamelles aplaties sans éclaboussures et 0,80 quand un éclaboussement significatif se produit. La valeur de l'exposant α est toujours égale à 0,2.

Des valeurs moyennes de ξ et de K ont été calculées pour chaque ensemble de paramètres opératoires en fonction de la valeur moyenne de la température, de la vitesse des particules. Les valeurs de ρ_d , de μ_d et de σ_d supposées sont celles de l'alumine pure en l'absence de données disponibles pour l'alumine-rutile [118].

$$\rho_d = (3,15 - 1,12 \times 10^{-4} \times T) \times 10^{-3} [\text{kg.m}^{-3}] \quad \text{pour } 2300 < T < 3200 \text{ K} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

$$\mu_d = 6,83 \times 10^{-8} \times T \times \exp\left(\frac{110000}{8,32 \times T}\right) [\text{Pa.s}] \quad \text{pour } 2300 < T < 2550 \text{ K} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

$$\sigma_d = (1563 - 0,5 \times T + 43,2 \times 10^{-6} \times T^2) \times 10^{-3} [\text{N.m}^{-1}] \text{ pour } 2300 < T < 3000 \text{ K} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

Au moment de l'impact, la particule peut rebondir, s'écraser, partiellement s'éclabousser ou complètement s'éclabousser. Ces phénomènes sont liés aux valeurs du paramètre critique d'éclaboussure (K) ou nombre de Sommerfeld défini comme suit :

$$K = \sqrt{We\sqrt{Re}} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

où We et Re représentent respectivement les nombres adimensionnels de Weber (rapport des forces d'inertie aux forces de tension superficielle) et de Reynolds (rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité) de la particule incidente. Ces nombres sont définis comme suit :

$$We = \frac{\rho_p \cdot d_p \cdot V_p^2}{\sigma_p} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

$$Re = \frac{\rho_p \cdot d_p \cdot V_p}{\mu_p} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

où ρ_d est la masse volumique de la particule [kg.m^{-3}], d_p le diamètre moyen de la particule à l'impact [m], V_p la vitesse d'impact de la particule [m.s^{-1}], σ_d la tension superficielle de particules fondues [N.m^{-1}] et μ_p la viscosité dynamique de la particule fondue [Pa.s].

Les valeurs critiques pour les critères de Sommerfeld sont définies comme suit :

- $K < 3$: rebond de la surface ;
- $3 < k < 58$: dépôt sur la surface ;
- $K > 58$: dépôt et éclaboussure.

Le degré d'étalement ξ représente les forces de dissipation visqueuses. Il est simple et permet d'avoir le nombre de Reynolds. Quant au critère de Sommerfeld k, il présente l'inconvénient de ne pas pouvoir s'affranchir de la tension de surface.

La Figure 59 montre l'évolution du degré d'étalement et du critère de Sommerfeld en fonction de la dureté du dépôt désirée. Pour choisir la dureté, on procède directement au contrôle des paramètres de puissance, donc au contrôle des caractéristiques en vol des particules. Ainsi, on peut ajuster la quantité de particules fondues participant à la formation du dépôt. L'augmentation concomitante des paramètres de puissance, donc de

la vitesse et température des particules, mène à une augmentation du critère de Sommerfeld (particule diffusée avec moins d'éclaboussures) et du degré d'étalement des particules (le dépôt qui en résulte augmente) jusqu'à 5,5 selon le modèle choisi.

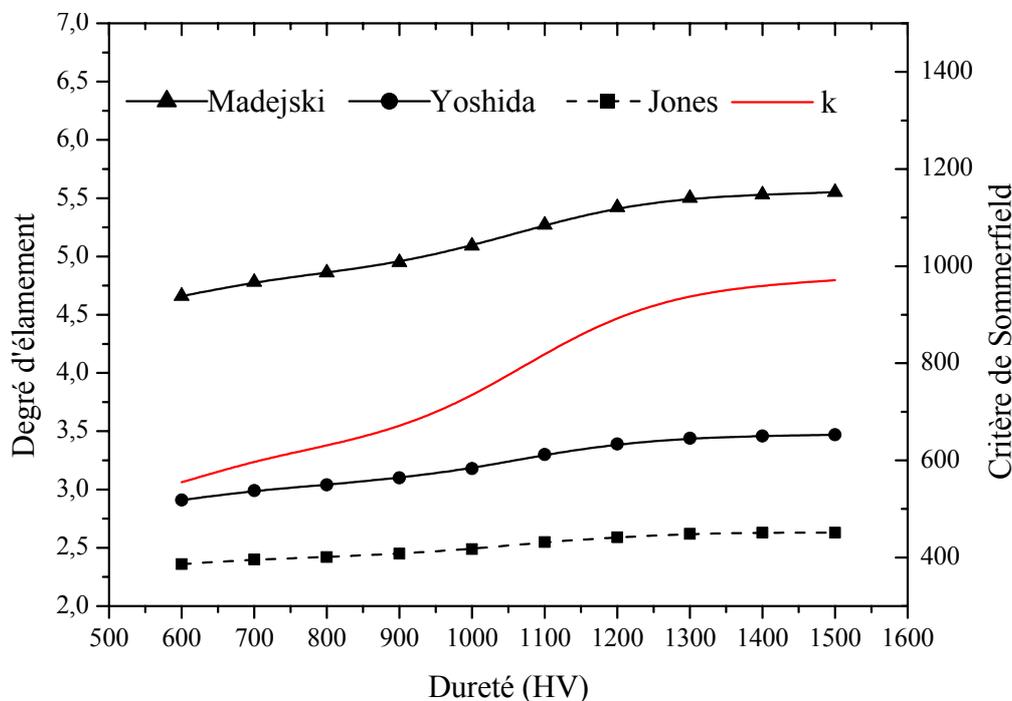


Figure 59 : Degré d'étalement et nombre de Sommerfeld liés aux caractéristiques des particules en vol correspondant aux paramètres de puissance prédits en fonction de la dureté de dépôt désirée.

La Figure 60 représente l'évolution des paramètres d'étalement (critère de Sommerfeld et du degré d'étalement) en fonction du taux de porosité requis. L'intensité de courant et le taux d'hydrogène diminuent dans un premier temps pour se stabiliser autour d'une porosité de 6%. Le débit total augmente sans cesse. Cela conduit à une faible variation de la température des particules aux alentours de cette valeur (6%) et à une augmentation de la vitesse des particules. Ces variations des paramètres opératoires induisent la faible évolution du degré d'étalement obtenu à partir du modèle analytique.

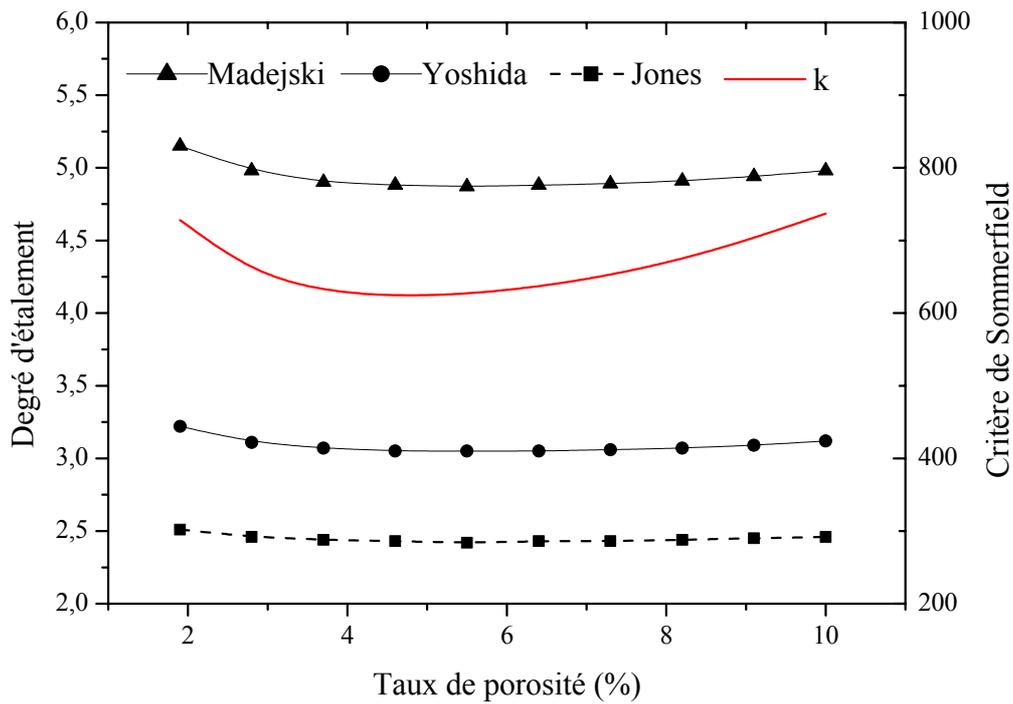


Figure 60 : Degré d'étalement et nombre de Sommerfeld liés aux caractéristiques des particules en vol correspondant aux paramètres de puissance prédits en fonction de la porosité du dépôt désirée.

La Figure 61 illustre la variation du critère de Sommerfeld et du degré d'étalement des particules en fonction de l'épaisseur du dépôt désirée. Pour choisir l'épaisseur du dépôt seulement en contrôlant les paramètres de puissance, seule l'ajustement de la quantité de particules fondues participant à la formation du dépôt est possible. Par conséquent, I et H_2/Ar augmentent et $Ar+H_2$ diminue. Ces évolutions concomitantes mènent à une diminution du critère de Sommerfeld (particule diffusée avec moins d'éclaboussures) jusqu'à la stabilisation autour de 350 et à une diminution du degré d'étalement des particules (l'épaisseurs du dépôt résultant augmente) jusqu'à la stabilisation entre 2,3 et 5,8 selon le modèle analytique considéré.

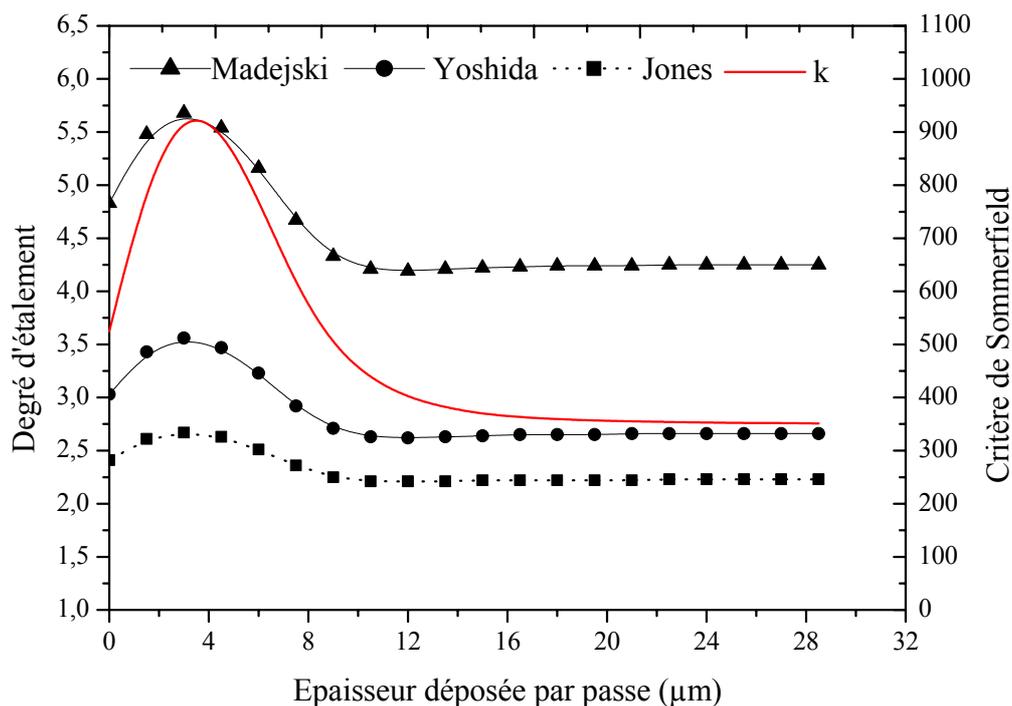


Figure 61 : Degré d'étalement et nombre de Sommerfeld liés aux caractéristiques des particules en vol correspondant aux paramètres de puissance prédits en fonction de l'épaisseur du dépôt désirée.

Les résultats précédemment présentés considèrent uniquement la variation des trois paramètres de puissance (3 ddl). Une autre étude faite en considérant la variation de l'ensemble des paramètres opératoires (9 ddl) [119], à savoir les paramètres de puissance, les paramètres d'injection de la poudre et les paramètres cinématiques a montré que les paramètres de puissance ont un effet plus significatif par rapport aux autres paramètres. Pour cela, cette étude s'est limitée aux seuls paramètres de puissance (3 ddl).

4.5.5. Estimation du temps de vol et du temps de fusion

La relation entre la température de surface des particules et la température du plasma peut se déduire à partir de l'équilibre thermique en considérant une symétrie sphérique (*i.e.*, la convection pendant la phase de fusion est négligeable), Figure 62.

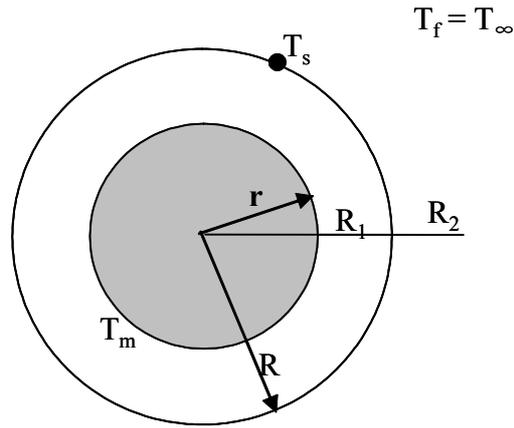


Figure 62 : Modèle de la particule. R_1 , R_2 représentent respectivement la résistance thermique d'échange interne et externe [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$], R est le rayon de la particule [m], r est le rayon de la partie infondue [m], T_m température à l'état de fusion [K], T_f température du plasma [K] et T_s est la température de surface de la particule [K].

A l'interface de fusion, la chaleur latente est compensée par une conduction de transfert de chaleur dans le liquide par l'équation ci-après [120] :

$$q'' = -\rho \cdot 4\pi r^2 \frac{dr}{dt} \cdot L = \frac{T_f - T_m}{R_1 + R_2} \quad (\text{Eq. 4.14})$$

$$R_1 = \frac{1}{4\pi k} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) \text{ et } R_2 = \frac{1}{4\pi R^2 h}$$

où ρ représente la masse volumique [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], L la chaleur latente [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$], K la conductivité thermique [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], h est le coefficient d'échange thermique [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}$].

En intégrant (Eq. IV.14) par rapport à la variable temps, la durée pour atteindre une fusion complète est donnée comme suit :

$$\Delta t_{\text{fusion}} = \frac{D^2}{24} \left(1 + \frac{4}{Bi} \right) \frac{\rho L}{k(T_f - T_m)} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

Le nombre adimensionnel de Biot Bi est exprimé par $Bi = \frac{h \cdot d_p}{k_f}$

où K_f est la conductivité thermique [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] à l'état de fusion et d_p représente le diamètre de la particule.

Le temps de vol requis Δt_{vol} est de la forme [121] :

$$\Delta t_{vol} \approx \frac{2d_{proj}}{V_p} \quad (\text{Eq. 4.16})$$

où V_p représente la vitesse de la particule en vol [m.s^{-1}] et d_{proj} est la distance de projection [m].

Afin d'obtenir des données quantifiées à même d'être intégrées dans les équations présentées ci-dessus, une étude *via* le RNA a été menée afin de prédire la vitesse et la température des particules en fonction de leurs diamètres tout en fixant les paramètres de puissance aux valeurs optimales. La Figure 63 montre les résultats prédits.

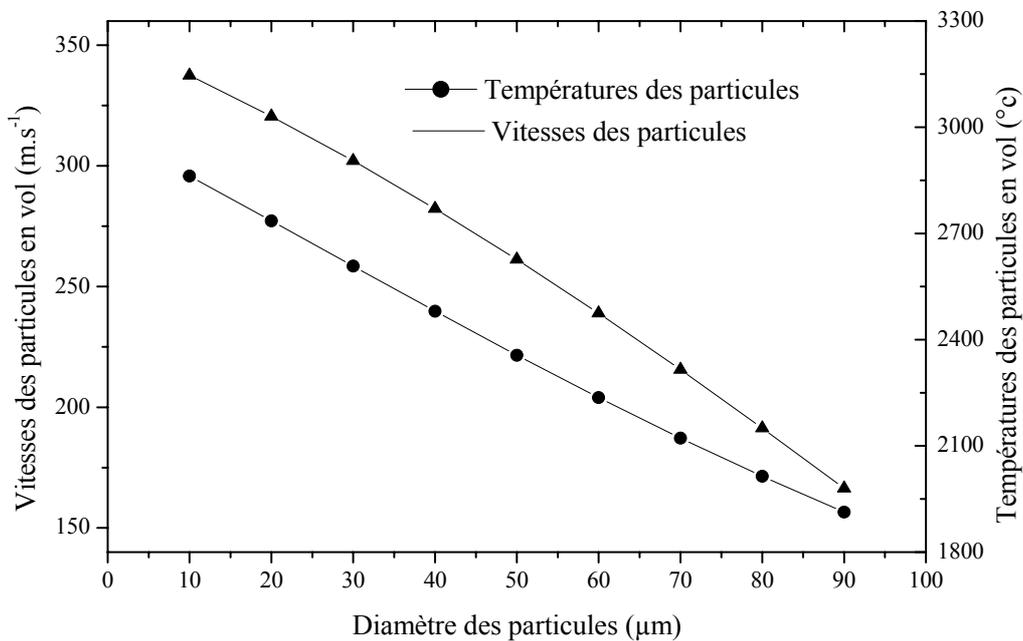


Figure 63 : Prédiction des vitesses et températures des particules en fonction de leurs diamètres.

Les résultats prouvent que les petites particules sont caractérisées par des vitesses élevées. *A contrario*, les particules les plus massives sont caractérisées par de faibles vitesses d'impact.

De la même manière, les petites particules ont des coefficients de transfert thermique plus élevés comparés aux plus grandes. En raison de la chaleur spécifique, la température de surface de petites particules peut augmenter rapidement pour atteindre un point de surchauffe. A l'opposé, les grosses particules prennent plus de temps pour

être chauffées et pour atteindre la température de fusion au cœur (2327 K pour Al_2O_3 et 2130 K pour TiO_2).

La Figure 64 montre le temps nécessaire pour atteindre une fusion complète des particules et le temps de vol correspondant en fonction de leur diamètre. Une limite du processus apparaît autour 50 μm puisque le cœur de particules de diamètres supérieurs sera incomplètement fondu. Ainsi, afin d'obtenir un dépôt formé de particules entièrement fondues à l'impact et pour les conditions énergétiques considérées, il convient de choisir les particules qui ont un diamètre moyen inférieur à 50 μm .

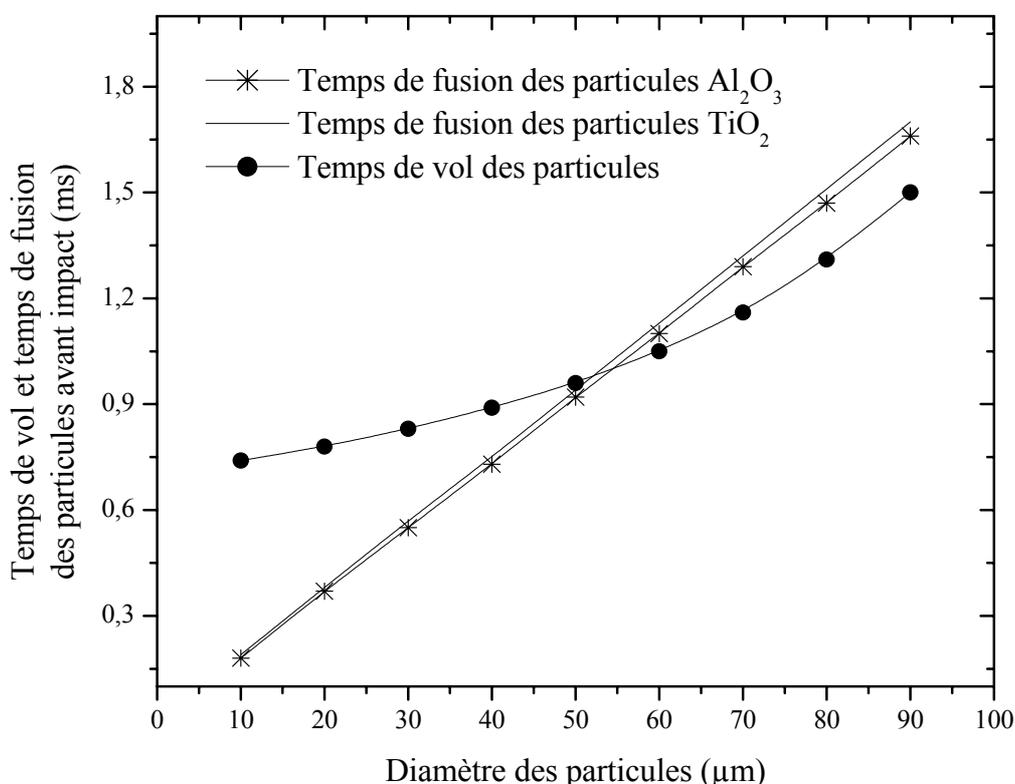


Figure 64 : Temps de vol et temps de fusion des particules en vol en fonction de leurs diamètres.

Le rapport entre le temps de vol et le temps de fusion $\frac{\Delta t_{vol}}{\Delta t_{fusion}}$ caractérise l'index de

fusion, Figure 65. Lorsque l'index de fusion est supérieur à l'unité, la particule est complètement fondue au moment de l'impact. De la même manière, lorsque l'index de fusion est inférieur à l'unité, on dénote la présence d'un noyau qui n'a toujours pas été fondu au moment de l'impact de la particule [122].

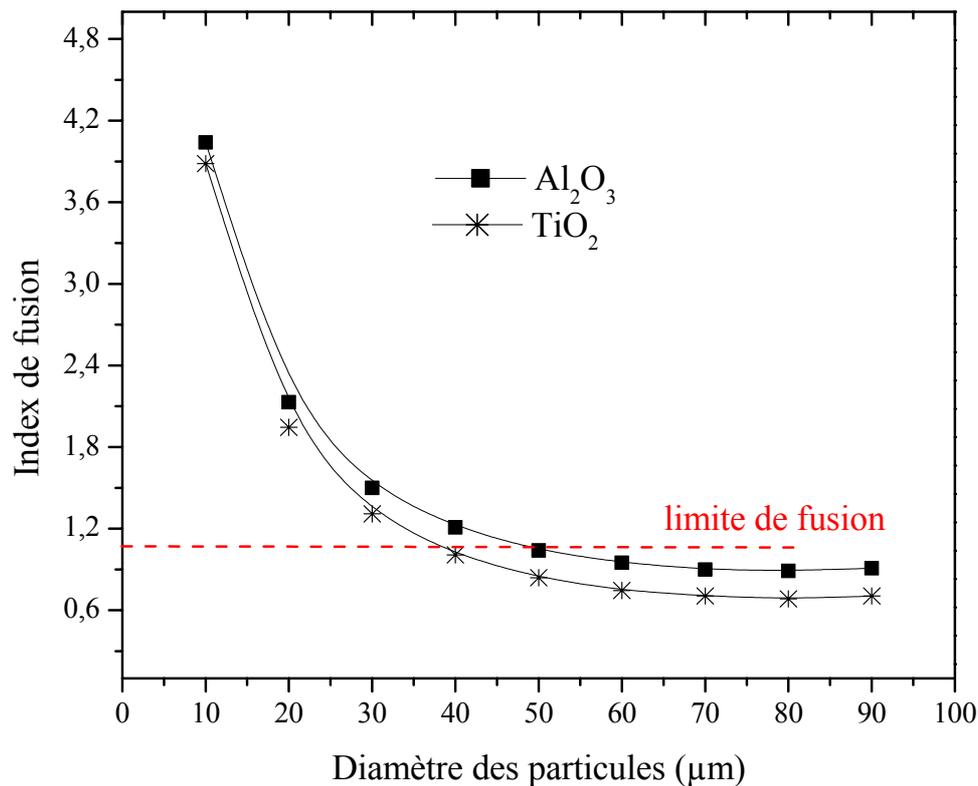


Figure 65 : Index de fusion.

Le rayon de noyau infondu correspond à la condition $R_1 = R_2$ (les résistances internes et externes sont égales entre elles) et peut être défini comme suit :

$$r = \frac{hR^2}{hR + k} \quad (\text{Eq. 4.17})$$

Ce facteur donne la limite pour atteindre l'état entièrement fondu des particules. Une température de surface de particules correspondant aux températures de fusion de Al₂O₃ et de TiO₂ est atteinte pour un diamètre de particules de l'ordre de 50 µm pour Al₂O₃ et de l'ordre de 40 µm pour TiO₂. Une telle valeur constitue la limite de diamètre au-dessus de laquelle les particules ne sont pas entièrement fondues au moment de l'impact.

Bien que la température de l'élément TiO₂ de fusion soit inférieure à la température de fusion de Al₂O₃, on note que le temps de fusion de TiO₂ est plus grand que celui de Al₂O₃.

Naturellement, cette différence peut s'expliquer par le fait que Al_2O_3 a une conductivité thermique plus élevée comparée à TiO_2 ($5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à comparer à $3,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, respectivement).

4.6. Contrôle du procédé

Le contrôle d'un procédé de projection nécessite la définition d'une stratégie pour corréler les caractéristiques en vol des particules aux paramètres opératoires afin de définir les règles d'ajustement de ces mêmes paramètres opératoires. Le contrôle des paramètres du processus en fonction des caractéristiques en vol des particules (vitesse et température de surface moyennes) pour obtenir des propriétés du dépôt désirées peut très rapidement devenir difficile et long au vu du nombre important des caractéristiques du dépôt à ajuster simultanément (architecture poreuse, dureté, adhérence, rendement intrinsèque de dépôt, etc.). Pour prendre en compte les non-linéarités des corrélations de l'ensemble des paramètres opératoires, l'approche de l'intelligence artificielle basée sur le contrôleur flou a été retenue dans le cadre de cette étude.

4.6.1. Variantes du problème

Pour obtenir un dépôt aux propriétés requises, l'idée première consiste à optimiser les paramètres opératoires en étudiant leurs effets sur les caractéristiques en vol des particules. Ainsi, pour contrôler ces caractéristiques, on procède au contrôle des paramètres opératoires, notamment ceux de puissance. Les différentes corrélations entre ces paramètres de puissance (intensité du courant d'arc I , débit total de gaz plasmagènes H_2+Ar et fraction d'hydrogène H_2/Ar) et les caractéristiques en vol des particules (vitesses et températures de surface moyennes des particules) d'une part, et les caractéristiques du dépôt d'autre part ont été établies. Ces corrélations permettent de quantifier les corrections à apporter sur chacun des paramètres de puissance lorsque cela s'avère nécessaire. Le Tableau 15 résume les effets des paramètres de puissance sur les caractéristiques en vol des particules. Les autres paramètres opératoires sont fixés aux conditions de référence décrites dans le Tableau 8.

La Figure 1 illustre le concept global de la démarche entreprise. Les règles d'ajustement sont définies à base de la logique floue. Le régulateur doit exécuter les séquences

d'actions en envoyant des consignes. Un tel système permettra à terme le pilotage *in situ* du procédé.

Dans l'architecture de système de contrôle (Figure 66), deux modules caractérisent le système de régulation. Le module "Tolérance" permet d'estimer l'écart et l'erreur entre les valeurs données par l'unité "Mesure" et l'unité "RNA". Le module "Ajustement" indique la décision à prendre en vue de corriger les valeurs des paramètres de puissance. Le rôle du contrôleur est d'assurer et contrôler de manière réactive le suivi des caractéristiques moyennes des particules en vol en envoyant des consignes d'ajustement.

Tableau 15 : Effets des paramètres opératoires de puissance sur les caractéristiques moyennes en vol des particules (vitesse et température).

	Intensité de courant d'arc 350 à 650 A	Débit total de gaz plasmagène 50 à 100 g.min ⁻¹	Taux d'hydrogène (en masse) 0,25 à 1,50 %
Température	↑ 8,5 %	↑ 0,7 % et ↓ 0,6 %	↑ 6 %
Vitesse	↑ 22,9 %	↑ 38,7 %	↑ 12 %

↑ augmentation de la caractéristique

↓ diminution de la caractéristique

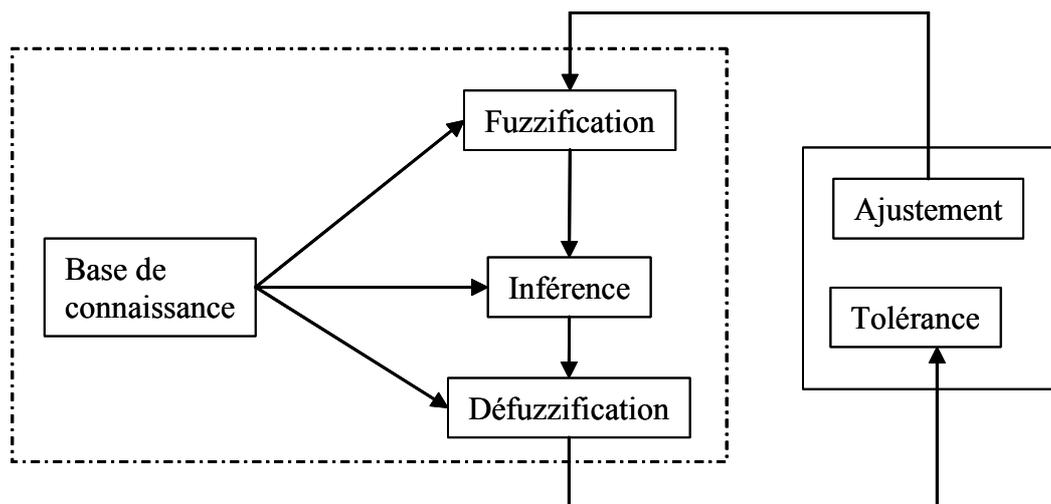


Figure 66 : Processus de correction à base de la logique floue.

La programmation du contrôleur (système expert flou) repose sur la logique floue, au travers de l'utilisation d'un contrôleur flou de type Mamdani [4, 86]. L'intérêt essentiel de cette approche est de coder les comportements désirés sous la forme de règles exprimées dans un langage proche du langage humain (intégrant de ce fait naturellement les notions d'incertitude, d'imprécision, d'imperfection) [123].

L'approche floue permet en effet de coder le comportement attendu de la part du contrôleur sous la forme de règles de type "système expert". Ce point est très important dans la mesure où le temps nécessaire à l'élaboration d'un tel contrôleur s'avère être très inférieur à celui demandé par d'autres approches [124].

4.6.2. Principe du contrôle

Le principe de la régulation, Figure 67, est de rétroagir automatiquement suivant des règles établies, sur les paramètres opératoire de puissance (intensité de courant, débit total des gaz plasmagènes, taux d'hydrogène) afin de maintenir constantes, dans la mesure du possible, les caractéristiques diagnostiquées en ligne de telle manière à réduire au maximum la variabilité de ces mêmes caractéristiques et donc par conséquent sur les propriétés des dépôts. Ainsi, la boucle de rétroaction permet de compenser certaines des variabilités liées au fonctionnement de la torche.

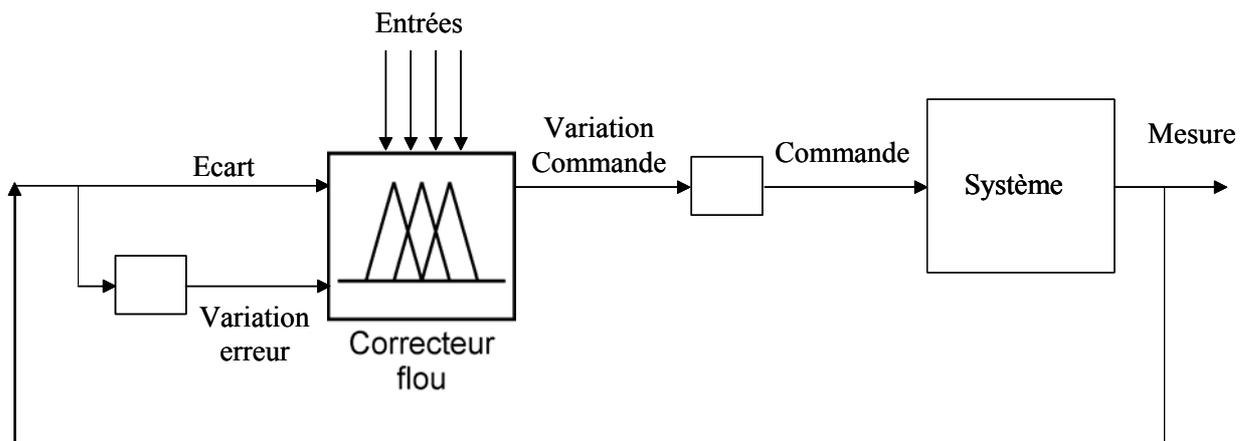


Figure 67 : Boucle de régulation floue.

4.6.3. Critères de corrections

Pour définir les règles de contrôle et d'ajustement des paramètres de puissance, deux critères, l'erreur relative et l'écart absolu, ont été retenus. Ces critères sont définis suivant :

$$E_p = \frac{P_{\text{exp}} - P_{\text{pred}}}{P_{\text{exp}}} \quad (\text{Eq. 4.18})$$

$$\Delta P = P_{\text{exp}} - P_{\text{pred}} \quad (\text{Eq. 4.19})$$

où P représente la caractéristique diagnostiquée, soit la température moyenne de surface T ou la vitesse moyenne V des particules.

L'écart entre la valeur expérimentale P_{exp} (vitesse ou température expérimentale) et la valeur P_{pred} (vitesse ou température prédite) est une quantité qui permet de savoir s'il est nécessaire d'augmenter ou de diminuer les paramètres opératoires (correction à apporter). Dans un premier temps, dans le cas considéré, les limites opérationnelles du système expert supposent que si la valeur absolue de $\Delta T > 300 \text{ }^\circ\text{C}$ et si $\Delta V > 200 \text{ m.s}^{-1}$, le processus stoppe pour vérifier l'ensemble de l'installation puisque de tels écarts apparaissent difficilement compensables par un simple ajustement paramétrique. Ces critères sont toutefois ajustables et paramétrables en fonction du problème étudié.

L'erreur permet quant à elle de définir l'amplitude de cette correction. Si cette erreur est grande (définie par défaut dans cette étude à $> 10 \%$), une forte correction paramétrique (forte augmentation ou diminution) doit être apportée. Dans le cas où l'erreur est faible (limité définie par défaut dans cette étude à $< 10 \%$), une plus faible correction paramétrique est à apporter. La tolérance admise, valeur en dessous de laquelle la correction n'est pas nécessaire, est définie par défaut dans cette étude à 2% . Ces limites sont toutefois ajustables et paramétrables en fonction du problème considéré.

L'enthalpie massique est fonction de la puissance utile au sein du jet et du débit massique de gaz plasmagène (Eq. 4.6). La puissance utile au sein du jet dépend elle-même de la puissance électrique délivrée aux électrodes de la torche de projection (intensité de courant d'arc et tension dépendant elle-même de la nature et des débits massiques des gaz plasmagènes (paragraphe 3.1.2)) minorée de la puissance dissipée pour le refroidissement de la torche, quantité ne variant *a priori* jamais sur une installation de projection. L'usure de ces électrodes (induite par son fonctionnement et

sévérisée par des allumages fréquents) induit une chute plus ou moins progressive de la tension et donc par conséquent une variation de la puissance électrique donc de la puissance utile dans le jet de plasma. Indirectement, cette chute de tension conduit donc à une modification des caractéristiques en vol des particules.

Les différentes corrélations établies entre les paramètres de puissance et les caractéristiques en vol des particules (paragraphe 4.3.3) permettent de définir les paramètres de puissance à ajuster et leurs plages de variation (Tableau 15).

La priorité est d'ajuster d'abord l'intensité de courant, puis le taux d'hydrogène et enfin le débit total. L'intervalle d'ajustement est lié aux fluctuations constatées. Selon les conditions (variations des caractéristiques des particules), on peut ajuster un seul de ces trois paramètres ou la combinaison des deux paramètres. En se basant sur ces critères, les conditions d'ajustements de l'enthalpie massique du jet de plasma et par conséquent des paramètres de puissance, pour maintenir les caractéristiques en vol des particules aux valeurs désirées, sont établies (Tableau 16).

Tableau 16 : Corrections des paramètres de puissance en fonction de l'amplitude des variations des caractéristiques en vol des particules.

Variations		Température moyenne des particules en vol						
		$E_T \geq 10\%$: Forte variation de la température			$E_T \leq 10\%$: Faible variation de la température			
		$\Delta T < -20$ Forte \uparrow de la température	$-20 \leq \Delta T \leq 20$ Pas de variation de la température	$\Delta T > 20$ Forte \downarrow de la température	$\Delta T < -20$ Faible \uparrow de la température	$-20 \leq \Delta T \leq 20$ Pas de variation de la température	$\Delta T > 20$ Faible \downarrow de la température	
Vitesse moyenne des particules en vol	$E_V \geq 10\%$: Forte variation de la vitesse	$\Delta V < -10$ Forte \uparrow de la vitesse	-15 % H ₂ /Ar	-10 % Ar+H ₂	+15 % H ₂ /Ar ET -10 % Ar+H ₂	-10 % Ar+H ₂ ET -10 % I	-10 % Ar+H ₂	-10 % Ar+H ₂ ET +10 % I
		$-10 \leq \Delta V \leq 10$ Pas de variation de la vitesse	-10 % H ₂ /Ar	→	+10 % H ₂ /Ar	-5 % I	→	+5 % I
		$\Delta V > 10$ Forte \downarrow de la vitesse	-10 % H ₂ /Ar ET +15 % Ar+H ₂	+10 % Ar+H ₂	+15 % H ₂ /Ar	+10 % Ar+H ₂ ET -10 % I	+10 % Ar+H ₂	+5 % Ar+H ₂ ET +10 % I
	$E_V \leq 10\%$: Faible variation de la vitesse	$\Delta V < -10$ Faible \uparrow de la vitesse	-10 % Ar+H ₂ ET -15 % H ₂ /Ar	-5 % I	+15 % H ₂ /Ar ET -10 % Ar+H ₂	-5 % I	-3 % I	-10 % Ar+H ₂ ET +10 % I
		$-10 \leq \Delta V \leq 10$ Pas de variation de la vitesse	-10 % H ₂ /Ar	→	+10 % H ₂ /Ar	-5 % I	→	+5 % I
		$\Delta V < -10$ Faible \downarrow de la vitesse	-15 % H ₂ /Ar ET +10 % Ar+H ₂	+5 % I	+15 % H ₂ /Ar ET +10 % Ar+H ₂	+10 % Ar+H ₂ ET -10 % I	+5 % I	+5 % I

↓ diminution ↑ augmentation → pas de variation

4.6.4. Fonctionnement du régulateur

Le système de régulation (Figure 68) d'une torche à plasma comporte les unités ou modules suivants nécessaires à son bon fonctionnement :

- un module "Paramètres opératoires" pour alimenter en courant, en gaz plasmagènes. Ledit module permet également d'afficher les paramètres de puissance proposés pour l'ajustement lorsque cela est nécessaire. L'ajustement des paramètres de puissance est sous la dépendance du "Régulateur flou" ;
- un module "Diagnostic" pour effectuer des mesures *in situ* ;
- l'unité "RNA" permet de définir pour chaque condition opératoire affichée, les valeurs de référence de vitesse moyenne et température de surface moyenne des particules ;
- le module "Tolérance" indique les éventuelles fluctuations dès lors que la variation est supérieure à 2%. Selon les cas donc, ce module peut ordonner d'effectuer des ajustements sur les paramètres du processus ;
- l'unité "Régulateur flou" contient les règles pour l'ensemble des situations qui peuvent éventuellement se présenter. Ce module commande l'intensité de courant et le mélange de gaz plasmagènes (débit et composition).

Les différentes unités du système fonctionnent séquentiellement, selon des cycles dont la durée totale dépendra de la puissance de l'unité de calcul mais aussi des systèmes de régulation (débitmètres massiques, etc.). Ce point reste à estimer dans le cadre d'une implémentation physique sur une unité.

Le système expert est conçu de telle sorte à éviter le soufflage de l'arc. En effet, dans une torche à plasma, l'intensité d'arc diminue lorsque la tension d'arc croît et *vice versa*. Dès que le seuil d'instabilité est atteint, on fait croître momentanément l'intensité de courant d'arc et on diminue le débit de gaz plasmagène alimentant la torche à plasma. Ainsi, le système expert développé aide non seulement la stabilisation de l'arc, mais permet encore le pilotage de la torche en lui imposant de fonctionner tout en respectant une ou plusieurs données de consigne.

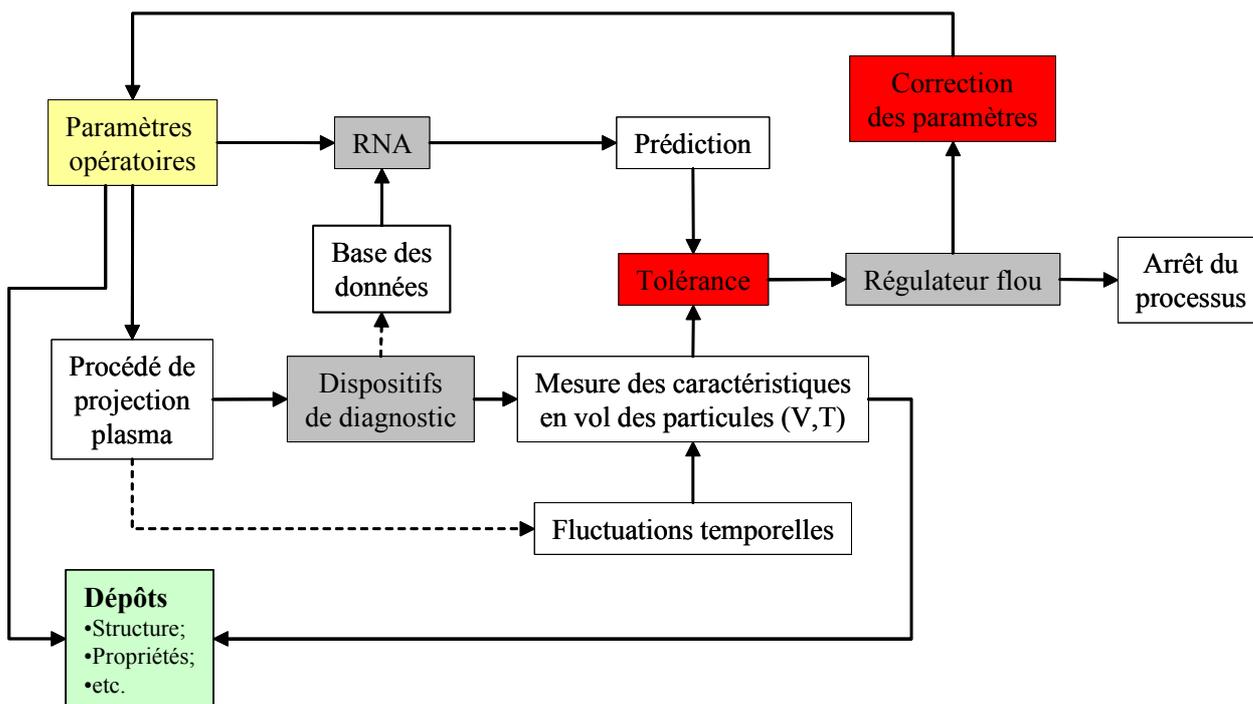


Figure 68 : Système expert intelligent de régulation du procédé de projection plasma (---fluctuations à l'origine de l'instabilité du procédé).

Le système expert, d'une part, reçoit les mesures de tension d'arc et d'intensité d'arc délivrées par le module "Diagnostic", et, d'autre part, le module "RNA" délivre des valeurs de consigne de l'intensité de courant d'arc, du débit total de gaz plasmagène et du taux d'hydrogène, calculées selon un programme, en fonction des conditions opératoires.

Aussi, selon une variante, le module "Diagnostic" comporte des moyens de mesure pour déterminer le débit, la température d'entrée et la température de sortie du fluide (eau par exemple) de refroidissement de la torche. Le débit du fluide de refroidissement, associé aux températures d'entrée et de sortie, permet de déterminer une première approximation des pertes thermiques dans la torche, de sorte que le système expert peut en tenir compte lors de l'ajustement des paramètres.

Pour faciliter l'utilisation, une interface a été mise au point (Figure 69). On dispose de trois parties : une partie "Paramètres initiaux" destinée à saisir les paramètres opératoires initiaux ; une partie pour contrôler les écart sur les caractéristiques des

particules en vol et enfin une partie dédiée à l'affichage des paramètres opératoires après ajustement.

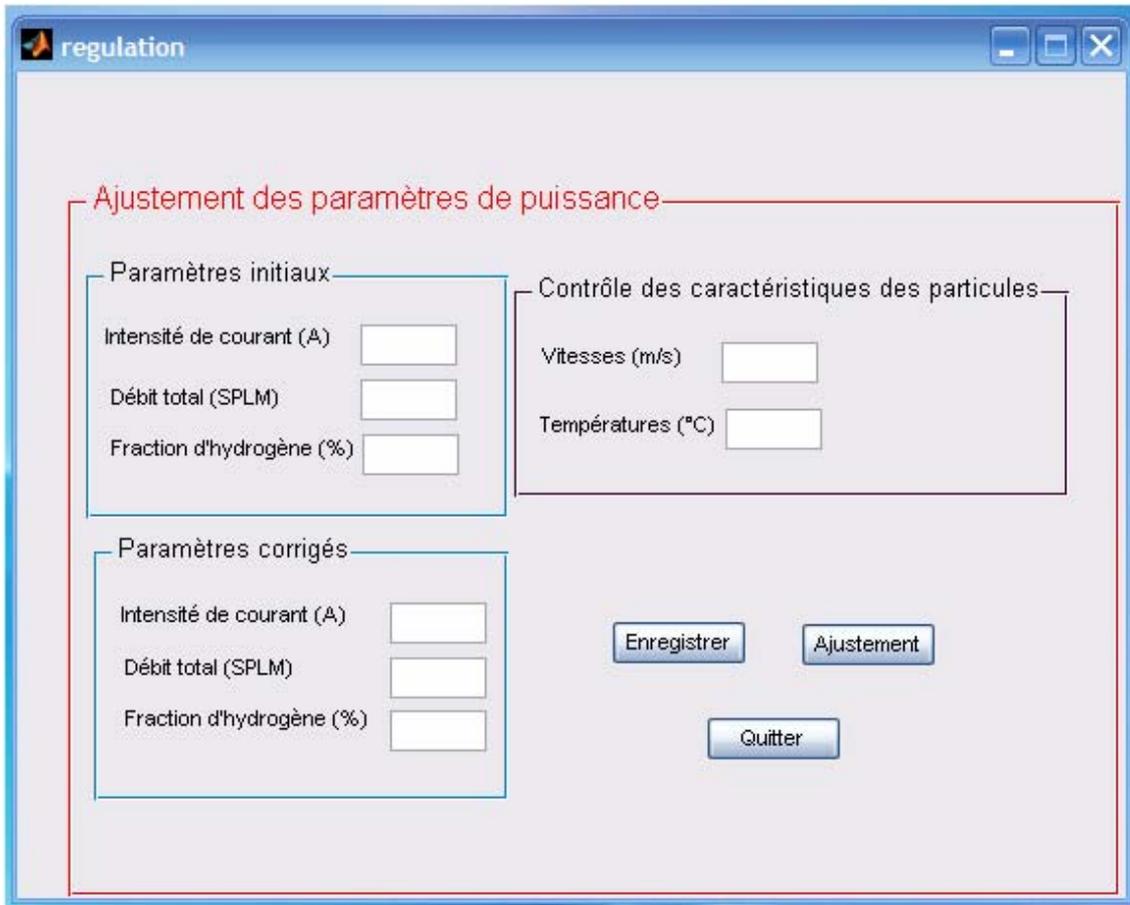


Figure 69 : Interface utilisateur de régulation.

Pour illustrer cette étude, on a considéré le cas où $H_2/Ar = 25\%$, $H_2 + Ar = 50 \text{ NL}\cdot\text{min}^{-1}$ et $I = 530$. D'après ces conditions, dans la base de connaissance (déterminer pour des conditions de fonctionnement optimales) on dispose d'une température (T_{exp}) des particules de 2458°C et d'une vitesse (V_{exp}) des particules de $302 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

On simule le cas où, pour ces mêmes conditions opératoires, on mesure une température (T_{pred}) de 2510°C et une vitesse (V_{pred}) de $355 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Donc le modèle doit ajuster les paramètres opératoires de puissance pour diminuer la vitesse et température des particules en vol.

Les principales étapes de contrôle sont présentées ci-après :

La variation de l'erreur sur la température est de :

0.0207

cette variation est supposée faible

L'écart entre $T_{\text{préd}}$ - T_{exp} est de :

52

Cet écart est petit: donc faible correction a apportée sur la température

La variation de l'erreur sur la vitesse est de :

0.1493

cette variation est supposée faible

L'écart entre $V_{\text{préd}}$ - V_{exp} est de :

53

Cet écart est petit: donc faible correction a apportée sur la vitesse

La valeur ajustée de l'intensité de courant est :

477

La valeur ajustée du débit total est :

50

La valeur ajustée de la réaction d'hydrogène est :

25

Le modèle propose de ramené donc l'intensité de courant à 477 A tout en conservant le débit total à 50 $\text{Nl}\cdot\text{min}^{-1}$ le taux d'hydrogène à 25%.

4.7. Conclusion

L'approche globale d'optimisation basée sur l'intelligence artificielle s'est avérée une voie intéressante eu égard l'interdépendance entre les différents paramètres opératoires (intrinsèques et extrinsèques) et les propriétés du dépôt qui en résulte.

La méthode employée a permis d'établir les effets des paramètres opératoires sur les caractéristiques en vol des particules, sur les caractéristiques du jet plasma (puissance, tension, enthalpie, etc.), et sur les propriétés du dépôt. L'autre approche a permis également de prédire les paramètres opératoires et les caractéristiques en vol des particules pour obtenir un dépôt avec des propriétés définies.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

5. Conclusion générale et perspectives

L'objectif de cette étude visait à développer un modèle de simulation, de prédiction et de contrôle du procédé de projection plasma d'arc soufflé atmosphérique (APS) à l'aide de méthodes basées sur l'intelligence artificielle : les réseaux de neurones artificiels et la logique floue. La poudre d'alumine – rutile (Al_2O_3 -13 % masse TiO_2) a été choisie comme base de développement de ce modèle.

Le procédé de projection plasma d'arc soufflé atmosphérique se caractérise par des instabilités liées à des phénomènes de fluctuations et des dérives. Ces phénomènes, qui ont pour origine principalement l'usure des électrodes et les fluctuations intrinsèques du pied de l'arc électrique, induisent une diminution de l'enthalpie du plasma, et par conséquent de la vitesse et la température de surface moyennes des particules en vol. Cela conduit finalement à des propriétés finales du dépôt modifiées. Au préalable à cette étude, les conditions opératoires de réalisation du dépôt ont été optimisées.

Compte tenu de l'interdépendance entre les différents paramètres opératoires (intrinsèques et extrinsèques) et les propriétés du dépôt qui en résulte, une approche globale d'optimisation basée sur l'intelligence artificielle s'est avérée une voie intéressante à explorer. Cette méthode, détaillée dans le deuxième chapitre présente de nombreux avantages (Tableau 17) par rapport aux méthodes traditionnelles d'optimisation.

Des séries d'expériences ont été réalisées pour développer la base de données expérimentales, qui permet :

- de recueillir les différentes informations relatives aux caractéristiques des particules en vol (vitesse et température de surface) pour différentes conditions opératoires d'intensité de courant, de débit de gaz plasmagène et de proportion d'hydrogène dans le mélange de gaz ;
- d'analyser les propriétés des dépôts réalisés pour les mêmes conditions opératoires en terme de dureté, porosité, épaisseur par passe et rendement de dépôt.

Tableau 17 : Comparaison entre les différentes méthodes de prédiction.

	Robustesse	Convenable face à bases de données limitées	Flexibilité d'ajustement	Visibilité du processus de raisonnement	Capacité à traiter des modèles complexes	Capacité d'intégration du savoir faire
Régression moindres carrés	Non	Non	Non	Oui	Non	Partiale
Régression robuste (Median Last Squares)	Oui	Partiale	Non	Oui	Non	Partiale
RNA	Non	Non	Partiale	Non	Oui	Partiale
FL	Partiale	Oui	Partiale	Oui	Oui	Oui

L'intelligence artificielle à base de la logique floue et de réseaux de neurones artificiels a permis d'établir les effets des paramètres de puissance sur les caractéristiques en vol des particules, sur les caractéristiques du jet plasma (puissance, tension, enthalpie, température), et sur les propriétés du dépôt. Ensuite, des réseaux de neurones artificiels ont été optimisés puis utilisés pour prédire les paramètres de puissance et les caractéristiques en vol des particules pour obtenir des propriétés requises du dépôt. Cette méthode nécessite une base de données expérimentales significative. Cette base de données a pu être élargie en introduisant la variabilité des différents facteurs.

Le Tableau 18 synthétise les effets des paramètres de puissance sur les caractéristiques en vol des particules et sur les propriétés du dépôt obtenus par expérience d'une part, et par prédiction d'autre part. Les modèles ne sont en rien une interpolation statique des données expérimentales. Par contre ces données sont la base de l'optimisation du réseau de neurones (apprentissage) et de l'établissement des règles de modèle logique floue.

Par ailleurs, un modèle analytique permet également de définir, à partir des caractéristiques en vol des particules, les nombres adimensionnels de Weber et de

Reynolds, et, par conséquent le nombre de Sommerfeld et le degré d'étalement des particules qui sont aussi des résultats intéressants en terme de qualité de dépôt.

Tableau 18 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites.

		Intensité de courant d'arc 350-650 A	Débit total massique de gaz plasmagène 50 à 100 g.min ⁻¹	Taux massique d'hydrogène 0,25 à 1,50 %
Vitesse	Exp	↑ 22,9%	↑ 38,7%	↑ 12,0%
	RNA	↑ 22,9%	↑ 35,7 %	↑ 10,4%
	LF	↑ 22,3%	↑ 27,7%	↑ 7,5%
Température	Exp	↑ 8,5%	↑ 0,7% puis ↓ 0,6%	↑ 6,0%
	RNA	↑ 8,2%	↑ 0,7% puis ↓ 0,9%	↑ 5,7%
	LF	↑ 9,9%	↑ 0,5% puis →	↑ 4,7%
Dureté	Exp	↑ 24,6%	↑ 14,5%	↑ 6,0%
	RNA	↑ 24,4 %	↑ 10,1%	↑ 5,7%
	LF	↑ 23,9%	↑ 6,0%	↑ 4,7%
Taux de porosité	Exp	↓ 26,8%	↑ 110,0%	↑ 12,0%
	RNA	↓ 26,5%	↑ 75,4%	↑ 10,4%
	LF	↓ 25%	↑ 56,6%	↑ 7,5%
Epaisseur du dépôt par passe	Exp	↑ 27,3%	↓ 41,2%	↑ 39,8%
	RNA	↑ 19,7%	↓ 41,80%	↑ 54,6%
	LF	↑ 19,5%	↓ 34,4%	↑ 17,8%

↓ diminution ↑ augmentation

De par cette première étude, il s'est avéré préférable d'utiliser le RNA par rapport à la LF pour la prédiction (Tableau 19). C'est pourquoi, seul le RNA a été retenu pour prédire les paramètres opératoires, dont dépendent les caractéristiques en vol des particules, en fonction des propriétés du dépôt requises.

Tableau 19 : Comparaison entre le RNA et la LF.

	LF	RNA
Représentation des connaissances	++	--
Tolérance à l'incertitude	++	++
Tolérance au manque de précision	++	++
Adaptabilité	-	++
Capacité d'apprentissage	--	++
Capacité d'explication	++	--
Découverte des connaissances et fouille de données	-	++

-- Mauvais -Plutôt mauvais + Plutôt bon ++ Bon

Un dernier aspect a été étudié : il concerne le développement d'un régulateur basé sur la logique floue qui permet d'ajuster en temps réel les paramètres opératoires du procédé en fonction des caractéristiques en vol des particules mesurées pour réaliser le dépôt. Pour se faire, le régulateur maintient constantes les vitesses et températures de surface moyennes des particules en ajustant les paramètres opératoires : l'intensité de courant d'arc, le débit total de gaz plasmagène et le taux d'hydrogène. Ce système de régulation permet justement de prendre en compte les instabilités et fluctuations intrinsèques inhérentes au procédé.

Le modèle présenté dans cette thèse a été développé pour le seul cas de la poudre d'alumine – rutil projetée par le procédé de la projection à la torche à plasma d'arc soufflé. Pour autant, cela n'empêche pas de l'appliquer à d'autres types de poudres ou de procédés de projection thermique en suivant la même méthodologie.

En perspective, différentes études pourraient être envisagées pour donner suite à ces travaux. Par exemple et à court terme, une implantation du régulateur sur site pour permettre un contrôle *in situ* du procédé de projection serait à mettre en place. A plus long terme, il serait intéressant d'étendre la démarche de régulation en introduisant le suivi de la température du dépôt et en tenant également compte des paramètres cinématiques du procédé. Le modèle de contrôle peut être simplifié en couplant le système d'acquisition à une interface logiciel à base de l'intelligence artificielle. Enfin,

le diagnostic des caractéristiques en vol des particules se doit d'être fiabilisé par la maîtrise de l'émissivité. Ce facteur est le plus souvent une source d'erreur sur la mesure des températures par les systèmes basés sur la pyrométrie optique.

Bibliographie

- [1] P. Fauchais, A. Vardelle, Heat, mass and momentum transfer in coating formation by plasma spraying, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 39, 2000, pp. 852-870.
- [2] E. Lugscheider, K. Seemann, Prediction of plasma coating properties by the use of neural networks, *Thermal Spray 2004: Advances in Technology and Application*, ASM International, May 10-12, 2004 (Osaka, Japan), ASM International, Materials Park, OH., USA, 2004.
- [3] S. Guessasma, Optimisation et contrôle de procédés de projection thermique par coopération de méthodes d'intelligence artificielle, Thèse de troisième cycle, Université de Technologie Belfort-Montbéliard, France, N°. 006, Novembre 2003.
- [4] E. H. Mamdani, S. Assilian, An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 7 (N°. 1), 1975, pp. 1-13.
- [5] L. A. Zadeh, Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 3 (N°. 1), 1973, pp. 28-44.
- [6] B. Normand, V. Fervel, C. Coddet, V. Nikitine, Tribological properties of plasma sprayed alumina-titania coatings: role and control of the microstructure, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 123 (N°. 2-3), 2000, pp. 278-287.
- [7] P. Fauchais, J.F. Coudert, A. Vardelle, M. Vardelle, A. Grimaud, P. Roumilhac, State of the art for the understanding of the physical phenomena involved in plasma spraying at atmospheric pressure, *Thermal Spray: Advances in Coatings Technology*, September 14-17, 1987, Orlando, USA, Ed. D.L. Houck, ASM International, Materials Park, OH. USA, 1988, pp. 11-19.
- [8] L. Pawlowski, *The science and engineering of thermal spray coatings*, ISBN-10: 0-471-49049-0, John Wiley and Sons, N.Y., USA, 1994.
- [9] P. Fauchais, A. Vardelle, B. Dussoubs, Quo Vadis Thermal Spraying?, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 10 (N°. 1), 2001, pp. 44-66.
- [10] S. Audisio, M. Caillet, A. Galerie, H. Mazille, *Revêtements et traitements de surface. Fonctionnalité, durabilité, procédés*, Presses polytechniques et universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 1999.

- [11] A. Proner, Revêtements par projection thermique, Techniques de l'ingénieur, MD, M 1645, 1999, pp. 1-20.
- [12] K. Ramachandran, V. Selvarajan, P.V. Ananthapadmanabhan, K.P. Streekumar, Microstructure, Adhésion microhardness, abrasive wear resistance and electrical resistivity of the plasma sprayed alumina and alumina-titania coatings, Thin Solid Films, Vol. 315 (N°. 1-2), 1998, pp. 144-152.
- [13] www.ceramic-center.com/alumine.php, avril 2005.
- [14] www.crystal-gmbh.com, avril 2005.
- [15] M. Dvorak, F. Dietrich, A New Powder Feeder for the Transport of Ultrafine Powders, Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millennium, May 28-30, 2001, Singapore, Ed. C. C. Berndt, K. A. Khor, E. F. Lugscheider, ASM International, Materials Park, OH., USA, 2001, pp. 539-541.
- [16] T. Zhang, D.T Gawne, B. Liu, Computer modelling of the influence of process parameters on the heating and acceleration of particles during plasma spraying, Surface and Coatings Technology, Vol. 132 (N°. 2-3), 2000, pp.233-243.
- [17] M. Vardelle, Etude de la structure des dépôts d'alumine obtenus par projection plasma en fonction des températures et des vitesses des particules au moment de leur impact sur la cible, Thèse de troisième cycle, Université de Limoges, France, 1980.
- [18] M. Vardelle, A. Vardelle, P. Fauchais, Spray parameters and particle behavior relationships during plasma spraying, Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 2 (N°. 1), 1993, pp. 79-91.
- [19] J. Ilavsky, A. Allen, G. G. Long, S. Krueger, Influence of spray angle on the pore and crack microstructure of plasma- sprayed deposits, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 80 (N°. 3), 1977, pp. 733-742.
- [20] M. F Smith, R.A Neister, R.C. Dykhuizen, An investigation of the effects of droplet impact angle in thermal spray deposition, Thermal Spray Industrial Applications, June 20-24, 1994, Boston, USA, Ed. C. C Berndt, S. Sampath, ASM International, Materials Park, OH., USA, 1994.
- [21] M. P. Planche, B. Normand, E. Suzon, C. Coddet, The relation between in-flight particles characteristics and coatings properties under plasma spraying conditions, In Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millennium, May 28-30, 2001, Singapore, Ed. C. C. Berndt, K. A. Khor, E. F. lugscheider, ASM International, Materials Park, OH, USA, 2001, pp. 771-777.

- [22] M. Friis, C. Persson, J. Wigren, Influence of particle in-flight characteristics on the microstructure of atmospheric plasma sprayed yttria stabilized ZrO₂, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 141, 2001, pp. 115-127.
- [23] Y. Zhu, H. Liao, C. Coddet, Transient thermal analysis and coating formation simulation of thermal spray process by finite difference method, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 200 (N° 16-17), 2006, pp. 4665-4673.
- [24] A. Hasui, S. Kitahara, T. Fukushima, On relation between properties of coating and spraying angle in plasma jet spraying, *Transaction of National Research Institute for Metals*, Vol. 12 (N° 1), 1970, pp. 9-20.
- [25] 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, France, 1994.
- [26] 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.
- [27] P. Fauchais, M. Fukumoto, A. Vardelle, M. Vardelle, Knowledge concerning splat formation, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 13 (N° 3), 2003, pp. 337-360.
- [28] S. Sampath, X. Jiang, Splat formation and microstructure development during plasma spraying: deposition temperature effects, *Materials Science and Engineering A-Structural Materials*, Vol. 304-306, 2001, pp. 144-150.
- [29] X. Jiang, Y. Wan, H. Herman, S. Sampath, Role of condensates on substrate surface on fragmentation of impinging molten droplets during thermal spray, *Thin Solid Films*, Vol. 385, 2001, pp. 132-141.
- [30] L. Bianchi, A. Grimaud, F. Blein, P. Lucchese, P. Fauchais, Comparison of plasma sprayed alumina coatings by RF and DC plasma spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 4 (N° 1), 1995, pp. 59-66.
- [31] N. Sakakibara, H. Tsukuda, A. Notomi, The splat morphology of plasma sprayed particles and the relation to coating properties, *Thermal Spray: Surface Engineering via Applied Research*, May 8-11, 2000, Montréal, Canada, Ed. C. C. Berndt, ASM International, Material Park, OH, USA, 2000, pp. 753-758.
- [32] M. Fukumoto, Y. Huang, Flattening mechanism in thermal sprayed nickel particle impinging on flat substrate surface, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 8 (N° 3), 1999, pp. 427-432.

- [33] V. V. Sobolov, J. M. Guilemany, Flattening of droplets of splats in thermal spraying: a review of recent work-Part 2, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 8 (N°. 2), 1999, pp. 301-314.
- [34] I. Hofinger, K. Raab, J. Möller, M. Bobeth, Effect of substrate roughness on the adherence of NiCrAlY thermal spray coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 11 (N°. 3), 2002, pp. 387-392.
- [35] E. Pfender, J. R. Fincke, R. Spores, Entrainment of cold gas into thermal plasma jets, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. 11(N°. 4), 1991, pp. 529-543.
- [36] J. R. Fincke, W. D. Swank, The effect of plasma jet fluctuations on particle time histories, *Thermal Spray Coatings: Properties, Processes and Applications*, May 4-10, 1991, Pittsburgh, PA, Ed. T. F. Bernecki, ASM International, Materials Park, OH. USA, 1992, pp. 193-198.
- [37] V. Guipont, R. Mollins, M. Jeandin, G. Barbezat, Plasma-Sprayed Ti-6Al-4V Coatings in a reactive nitrogen atmosphere up to 250 kPa, *International Thermal Spray Conference*, March 4-6, 2002, Essen, Allemagne, Ed. E. Lugscheider, C.C. Berndt, , DVS-German Welding Society, Düsseldorf, Allemagne, 2002, pp. 247-252.
- [38] S. Sodeoka, M. Suzuki, T. Inoue, Effect of chamber pressure and spray distance on the plasma sprayed alumina deposition, *Thermal Spray 2003: Advancing the Science and Applying the Technology*, May 5-8, 2003 Orlando, USA, Ed. B. R. Marple, C. Moreau, ASM International, Materials Park, OH., USA, Vol. 1, 2003, pp. 597-601.
- [39] S. Sodeoka, M. Suzuki, T. Inoue, Control of plasma sprayed particles temperature and velocity by chamber pressure, *Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millennium*, May 28-30, 2001 Singapore, Ed. C. C. Berndt, K. A. Khor, E. F. Lugscheider, ASM International, Materials Park, OH, 2001, pp. 737-741.
- [40] H. Chen, C. H. Choi, S. W. Lee, C. X. Ding, Deposition efficiency and microhardness of plasma sprayed zirconia coatings using different powders as feedstocks, *Thermal Spray 2004: Advances in Technology and Application*, May 10-12, 2004, Osaka, Japon, ASM International, Materials Park, OH. USA, 2004, pp. 19-20.
- [41] M. Tului, F. Ruffni, F. Arezzo, S. Lasisz, Z. Znamirowski, L. Pawlowski, Some properties of atmospheric air and inert gas high-pressure plasma sprayed ZrB₂ coatings, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 151-152, 2002, pp. 483-489.
- [42] B. Pateyron, G. Delluc, M. F. Elchinger, P. Fauchais, Study of the behavior of the heat conductivity and transport properties of a simple reacting system : H₂ - Ar and H₂ -

Ar -Air. Dilution effect in spraying process at atmospheric pressure, J. High Temp. Chem. Proc., Vol. 1 (N°. 3), 1992, p. 325-332.

[43] M. Vardelle, A. Vardelle, P. Fauchais, Diagnostics for particulate vaporization and interactions with surfaces, Pure and Applied Chemistry, Vol. 64 (N°. 5), 1992, pp. 637-644.

[44] S. Janisson, E. Meillot, A. Vardelle, J. F. Coudert, B. Pateyron, P. Fauchais, Plasma Spraying Using Ar-He-H₂ Gas Mixtures, Thermal Spray: Meeting the Challenges of the 21st Century, May 25-29, 1998, Nice, France, Ed. C. Coddet, ASM Int., Materials Park, Oh. USA, 1998, pp.803-808.

[45] B. Pateyron, M. F. Elchinger, G. Delluc, P. Fauchais, Thermodynamic and transport properties of Ar-H₂ and Ar-He plasma gases used for spraying at atmospheric pressure. I : Properties of the mixtures, Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 12, 1992, p. 421-449.

[46] B. Dussoubs, Modélisation tri-dimensionnelle du procédé de projection plasma : influence des conditions d'injection de la poudre et des paramètres de projection sur le traitement et la répartition des particules dans l'écoulement, Thèse de doctorat de l'Université de Limoges, France, 1998.

[47] J. F. Bisson, B. Gauthier, C. Moreau, Effect of Plasma Fluctuations on In-flight Particle Parameters, Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millennium,, May 28-30, 2001, Singapour, Ed. C.C. Berndt, K.A. Khor, E.F. Lugscheider, ASM International, Materials Park, OH. USA, 2001, pp. 715-721.

[48] D. Rigot, B. Pateyron, J. F. Coudert, P. Fauchais, J. Wigren, Evolutions et dérive des signaux émis par une torche à plasma à courant continu (type PTF4), 6^{èmes} Journées d'études sur les fluctuations des arcs, 17-18 mars 2003, Clermont-Ferrand, France.

[49] X. Zhou, J. Heberlein, Characterization of the arc cathode attachment by emission spectroscopy and comparison to theoretical predictions, Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 16 (N°. 1), 1996, pp. 229S-244S.

[50] H. P. Li, E. Pfender, X. Chen, Application of Steenbeck's Minimum Principle for Three-dimensional Modelling of DC Arc Plasma Torches, Journal of Physics D-Applied Physics, Vol. 36, 2003, pp. 1084-1096.

[51] J. Heberlein, Electrode phenomena in DC Arcs and their influence on plasma torch design progress, Plasma Processing of Materials, 2003, Ed. P. Fauchais, Begell House, pp. 147-164.

- [52] B. Rethfeld, J. Wendelstorf, T. Klein, G. Simon, A self-consistent model for the cathode fall region of a electric arc, *Journal of Physics D-Applied Physics*, Vol. 29, 1996, pp. 121-128.
- [53] K. C. Hsu, E. Pfender, Analysis of the cathode region of a free-burning high intensity argon arc, *Journal of Applied Physics*, Vol. 54 (N° 3), 1983, pp. 3818-3824.
- [54] P. Fauchais, M. Vardelle, How to improve the reliability and reproducibility of plasma sprayed coatings, *Thermal Spray 2003: Advancing the Science and Applying the Technology*, May 5-8, 2003, Orlando, USA, Ed. B. R. Marple, C. Moreau, ASM International, Materials Park, OH, USA, Vol. 2, 2003, pp. 1165-1173.
- [55] C. Moreau, P. Gougeon, M. Lamontagne, V. Lacasee, G. Vaudreuil, P. Cielo, On-line control of the plasma spraying process by monitoring the temperature, velocity and trajectory of the in-flight particles, *Thermal Spray Industrial Applications*, June 20-24, 1994, Boston, USA, Ed. C. C. Berndt, S. Sampath, ASM International, Materials Park, OH, USA, 1994, pp. 431-437.
- [56] J. F. Bisson, M. Lamontagne, C. Moreau, L. Pouliot, J. Blain, F. Nadeau, Ensemble in-flight particle diagnostics under thermal spray conditions, *Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millennium*, May 28-30, 2001, Singapore, Ed. C. C. Berndt, K. A. Khor, E. F. Lugscheider, ASM International, Materials Park, OH, USA, 2001, pp. 705-714.
- [57] www.tecnar.com, mai 2006.
- [58] W.D. Swank, J.R. Fincke, D.C. Haggard, A particle temperature sensor for monitoring and control of the plasma spray process, *Advances in Thermal Spray Science and Technology*, September 11-15, 1995, Houston, USA, Ed. C.C. Berndt, S. Sampath, ASM International Materials Park-OH, USA, 1995, pp. 111-116.
- [59] J. Vuttulainen, E. Hämäläinen, R. Hernberg, P. Vuoristo, T. Mäntylä, Novel method for in-flight particle temperature and velocity measurements in plasma spraying using a single CCD camera, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 10 (N° 1), 2001, pp. 94-104.
- [60] M. Ignatiev, V. Senchenko, V. Dozhnikov, I. Smurov, Ph. Bertrand, Digital diagnostic system based on advanced CCD image sensor for thermal spraying monitoring, *International Thermal Spray Conference*, March 4-6, 2002, Essen, Germany, Ed. E. Lugscheider, C. C. Berndt, DVS Deutscher Verband für Schweißen, 2002, pp. 1001-1006.

- [61] J. E. Craig, R. A. Parker, D. Y. Lee, Thermal Spray: Surface Engineering via Applied Research, May 8-11, 2000, Montréal, Canada, Ed. C. C. Berndt, ASM International, Materials Park, OH, USA, 2000, pp. 51-66.
- [62] T. Renault, M. Vardelle, P. Fauchais, H. Hoffmann, F. Brillard, On-line monitoring (SDC) through coating surface temperature of residual stresses in APS WC-Co17wt% coatings on Hastelloy X, Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millennium, May 28-30, 2001 Singapore, Ed. C.C. Berndt, K. A. Khor, E. F. Lugscheider, ASM International, Materials Park, OH, USA, 2001, pp. 743-750.
- [63] W.C Mc Culloch, W.H. Pitts, A logical calculus ideas immanent in nervous activity, Bulletin of Mathematical Biophysics, Vol. 5, 1943, pp. 115-133.
- [64] J. F. Jodouin, Les réseaux neuromimétiques, ISBN-10: 2866014367, Edition Hermès, Paris, France, 1994.
- [65] M. M Nelson, W. T. Illingworth, A practical guide to neural nets, ISBN-10: 0201633787, Addison-Wesley, New-York, USA, 1994.
- [66] L. Personnaz, I. Rivals, Réseaux de neurones formels pour la modélisation, la commande et la classification, Collection sciences et techniques de l'ingénieur, ISBN-10: 2271061032, CNRS Edition, Paris, France, 2003.
- [67] D. T. Pham, L. Xing, Neural Networks for identification, prediction and control, ISBN-10: 3540199594, Springer, London, Great Britain, 1995.
- [68] J. Zhan, F. Li, A New approach in multilayer perceptron-forward propagation, Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, USA, 1994, pp. 88-93.
- [69] M. Arisawa, J. Watada, Enhanced back-propagation learning and its application to business evaluation, Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, USA, 1994, pp. 155-160.
- [70] O. Sarzeaud, Les réseaux de neurones : Contribution à une théorie, Ouest Editions, France, 1995.
- [71] I. V. Tetko, V. Y. Tanchuk, A. I. Luik, Simple heuristic methods for input parameters' estimation in neural networks, Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, USA, 1994, pp. 386-390.
- [72] P. J Werbos, Generalization of back propagation with application to recurrent gas market model, Neural Networks, Vol. 1 (No. 4), 1988, pp.339-356.
- [73] L. Holmstrom, P. Koistinen, Using additive noise in back-propagation training,

IEEE Transaction on Neural Networks, Vol. 3, 1992, pp.24-38.

[74] S. Guessasma, G. Montavon, P.Gougeon, C. Coddet, Designing expert system using neural computation in view of the control of plasma spray processes, *Materials & Design*, Vol. 24 (N°. 7), 2003, pp. 497-502.

[75] K-C Jim, C. L. Giles, B. G. Horne, An analysis of noise in recurrent neural networks : convergence and generalization, *IEEE Transaction on Neural Networks*, Vol. 7, 1996, pp. 1424-1438.

[76] S. E. Fahlman, Fast-learning variations on back-propagation: an empirical study, *Proceedings of the 1988 Connectionist Models Summer School*, Pittsburgh, PA, Ed. D. Touretzky, G. Hinton, T. Sejnowski, Morgan Kaufman, San Mateo CA, USA, 1988, pp. 38-51.

[77] D. E Rumelhart, G.E Hinton, R. J. Williams, Learning representations by back-propagating errors, *Nature*, Vol. 323, 1986, pp.533-536.

[78] D. A. Pados, P. Papantoni-Kazakos, A note on estimation of the generalization error and the prevention of overfitting, *Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol. 1, 1994, p. 321-326.

[79] S. Guessasma, G. Montavon, C. Coddet, Neural Network, Design of experiments and other optimization methodologies to quantify parameter dependence of atmospheric plasma spraying, *Thermal Spray 2003 : Advancing the Science and Applying the Technology*, May 5-8, 2003 Orlando, USA, Ed. B. R. Marple, C. Moreau, ASM international, Materials Park, OH., USA, 2003, pp. 939-948.

[80] A. Zaghw, W. M. Dond, An automated approach for selecting the learning rate and momentum in back-propagation networks, *Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol. 1, 1994, pp. 464-469.

[81] K. Levenberg, A method for the solution of certain non-linear problems in least squares *Quartely, Journal of Applied Mathematics II* (N°. 2), 1944, pp. 164-168.

[82] D.W. Marquardt, An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters, *Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 11 (N°. 2), 1963, pp. 431-441.

[83] B. Bouchon-Meunier, *La logique floue*, Collection « Que sais-je? », Presses universitaires, France, 1993.

[84] E. H. Mamdani, Applications of fuzzy algorithms for simple dynamic plants, *Proc. IEEE*, Vol. 121 (N°. 12), 1974, pp. 1585-1588.

- [85] E. H. Mamdani, Advances in the Linguistic Synthesis of Fuzzy controllers, International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 8 (N°. 6), 1976, pp. 669-678.
- [86] E. H. Mamdani, Applications of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis, IEEE Transactions on Computers, Vol. 26 (N°. 12), 1977, pp. 1182-1191.
- [87] S. O. T. Ogaji, L. Marinai, S. Sampath, R. Singh, S. D. Prober, Gas-turbine fault diagnostics: a fuzzy-logic approach, Applied Energy, Vol. 82 (N°. 1), 2005, pp. 81-89.
- [88] A. F. Kanta, G. Montavon, M. P. Planche, C. Coddet, In-flight particle characteristics control by implementing fuzzy logic controller, Surface and Coatings Technology, submitted.
- [89] H. R. Berenji, Fuzzy Logic Controller. An introduction to fuzzy logic applications in intelligents systems, Kluwer academic, 1990.
- [90] M. C. Fritsch, E. Wendling, Commande de processus : les atouts de la logique floue, Technologies internationales, 1994.
- [91] N. Patcharaprakiti, S. Premrudeepreechacharnand, Y. Sriuthaisiriwong, Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system, Renewable Energy, Vol. 30 (N°. 11), 2005, pp. 1771-1788.
- [92] C. C. Lee, Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 20 (N°. 2), 1990, pp. 404-435.
- [93] L. Pejryd, J. Wigren, N. Hanner, The ultimate spray booth, Thermal Spray: A United Forum for Scientific Technological Advances, September 15-18, 1997, Indianapolis, USA, Ed. C. C. Berndt, ASM International, Materials Park, OH, USA, 1997, pp. 445-450.
- [94] www.goodfellow.com, mars 2006.
- [95] R. L. Tobler, A. Nishimura, J. Yamamoto, Design-relevant mechanical properties of 316-type steels for superconducting magnets, Cryogenics, Vol. 37, 1997, pp. 533-550.
- [96] P. Vuoristo, Optimization and monitoring of spray parameters by a CCD camera based imaging thermal spray monitor, Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millennium, May 28-30, 2001 Singapore, Ed. C. C. Berndt, K. A. Khor, E. F. Lugscheider, ASM International, Materials Park, OH, USA, 2001, pp. 678-685.
- [97] www.oseir.com, février 2007.
- [98] T. Koschlig, R. Lallament, Analysis of porosity and cracks in cross sections of

plasma sprayed oxide coatings, Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millennium, May 28-30, 2001 Singapore, Ed. C. C. Berndt, K. A. Khor, E. F. Lugscheider, ASM International, Materials Park, OH, USA, 2001, pp. 627- 632.

[99] S. Tobe, A review on protection from corrosion, oxidation and hot corrosion by thermal spray coatings, Thermal Spray: Meeting the challenge of the 21th century, Nice, France, 1998, Ed. C. Coddet, ASM International, Materials Park. OH, USA, 1998, pp.3-11.

[100] L. Palacio, P. Pradanos, J. I. Calvo and A. Hernandez, Porosity measurement by a gas penetration method and other techniques applied to membrane characterization, Thin Solid Film, Vol.348, 1999, pp. 22-29.

[101] S. Guessasma, G. Montavon, C. Coddet, Modeling of the APS plasma spray process using artificial neural networks: basis, requirements and an example, Computational Materials Science, Vol. 29 (N°. 3), 2004, pp. 315-333.

[102] S. Guessasma, Z. Sahli, G. Montavon, P. Gougeon, C. Coddet, Artificial intelligence implementation in the APS process diagnostic, Materials Sciences and Engineering B, Vol. 110 (N°. 3), 2004, pp. 285-295.

[103] S. Guessasma, G. Montavon, P.Gougeon, C. Coddet, On the neural network concept to describe the thermal spray deposition process: correlation between in-flight particles characteristics and processing parameters, International Thermal Spray Conference, Ed. E. Lugscheider, March 4-6, 2002, Essen, Germany, C.C. Berndt, DVS Deutscher Verband für Schweißen, 2002, pp. 453-458, 2002.

[104] S.L. Chen, P. Sitonen, P. Kettunen, Experimental design and parameter optimization for plasma spraying of alumina coatings, Thermal Spray: Advances in Coatings Technology, May 25 - June 5, 1992, Orlando, USA, Ed. C.C. Berndt, ASM International, Materials Park, OH., USA, 1992, pp. 51,.

[105] J. Fazilleau, Contribution à la compréhension des phénomènes impliqués dans la réalisation de dépôts finement structurés d'oxydes par projection de suspensions par plasma, thèse de doctorat, N°. 56, Université de Limoges, 2003.

[106] J. Jenista, Water-vortex Stabilized Electric Arc : I. Numerical Model, J Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 32 (N°. 21), 1999, pp. 2763-2776.

[107] E. Pfender, Fundamental studies associated with the plasma spray process, Surface and Coatings Technology, Vol. 34 (N°. 1), 1988, pp. 1-14.

- [108] P. Fauchais, J.F. Coudert, A. Vardelle, M. Vardelle, A. Grimaud, P. Roumilhac, State of the art for the understanding of the physical phenomena involved in plasma spraying at atmospheric pressure, Thermal Spray 1987: Advances in Coatings Technology, Sept 14-17, 1987, Orlando, USA, Ed. D.L. Houck, ASM International, Materials Park, OH, USA, 1988, pp. 11-19.
- [109] E. Lugscheider, A. Fischer, D. Koch, N. Papenfub, Diagnostic of in flight particle properties and resulting coating qualities on atmospheric plasma spray process, Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millennium, May 28-30, 2001, Singapore, Ed. C. C. Berndt, K. A. Khor, E. F. lugscheider, ASM International, Materials Park, OH, USA, 2001, pp. 751-758.
- [110] G. Montavon, C. Coddet, C.C. Berndt, S.H. Leigh, Microstructural index to quantify thermal spray deposit microstructures using image analysis, Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 7 (N°. 2), 1998, pp. 229-241.
- [111] M. Prystay, P. Gougeon, C. Moreau, Structure of plasma sprayed zircona coatings tailored by controlling the temperature and velocity of the sprayed particles, Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 10 (N°. 1), 2001, pp. 67-75.
- [112] D.R. Marsh, N.E. Weare, D.L. Walker, Process variables in plasma-jet spraying, Journal of Metals, Vol. 2, 1961, pp. 473-478.
- [113] A. F. Kanta, G. Montavon, M. P. Planche, C. Coddet, Artificial intelligence computation to establish relationships between APS process parameters and alumina-titania coating properties, Plasma Chemistry and Plasma Processing, accepté.
- [114] T.J. Steeper, D.J. Varacalle, G.C. Wilson, W.L. Riggs, A.J. Rotolico, J.E. Nerz, A design of experimental study of plasma sprayed alumina-Titania Coatings, Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 2, 1993, pp. 251-256.
- [115] C. Escure, M. Vardelle, A. Vardelle, P. Fauchais, Visualization of the impact of drops on substrate in plasma spraying: Deposition and splashing mode, Thermal Spray 2001: New surfaces for new millennium, May 28-30, 2001, Singapore, Ed. C.C. Brendt, K. A. Khor, E. F. Lugscheider, ASM International, Materials Park, OH, USA, 2001, pp 805-812.
- [116] H. Fukanuma, Mathematical modeling of flattening process on rough surfaces in tehrmal spray, Thermal Spray: Practical Solutions for Engineering Problems, Ed. C.C. Berndt., October 7-11, 1996, Cincinnati, USA,, ASM International, Materials Park, OH, USA, 1996, pp. 647-656.

- [117] A. F. Kanta, G. Montavon, M. Vardelle, M. P. Planche, C. C. Berndt, C. Coddet Artificial Neural Networks Vs. Fuzzy Logic: Simple Tools to Predict and Control Complex Processes - Application to Plasma Spray Processes, *Journal of Thermal Spray Technology*, submitted.
- [118] B. Glorieux, J.C. Rifflet, C. Pulvin, F. Miloot, J.P. Coutures, Technical Note NT1-PhC-ASSM6 CRPHT/CNRS, France, 1997.
- [119] A. F. Kanta, G. Montavon, C. Coddet, Predicting spray processing parameters from required coating structural attributes by artificial intelligence, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 8 (N° 7), 2006, pp. 628-635.
- [120] H. Zhang, H. B. Xiong, L. L. Zheng, A. Vaidya, L. Li, Partially melted particle and its splat morphology, *Thermal Spray 2003: Advancing the science and Applying the technology*, May 5-8, 2003, Orlando, Ed. C. Moreau, B. Marple, ASM International, Materials Park, OH, USA, 2003, pp. 905-911.
- [121] S. Sampath, X. Y. Jiang, J. Matejicek, L. Prchlik, A. Kulkarni, A. Vaidya, Role of thermal spray processing method on the microstructure, residual stress and properties of coatings: an integrated study for Ni-5 wt.%Al bond coats, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 364 (N° 1-2), 2004, pp. 216-231.
- [122] A. F. Kanta, M. P. Planche, G. Montavon, C. Coddet, Modeling of the in-flight particles characteristics using neural networks and analytical model, *Thermal Spray 2007*, Ed. B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.-C. Lau, C.-J. Li, R.S. Lima and G. Montavon, May 14-16, 2007 (Beijing, China), ASM International, 2007, pp. 173-178.
- [123] A. F. Kanta, G. Montavon, M. P. Planche, C. Coddet, Plasma Spray Process On-Line Control by Artificial Intelligence Methodology, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 9 (N° 1-2), 2007, pp. 105-113.
- [124] M. Hassoun, Contrôle d'exécution des mouvements d'un robot mobile : application à l'assistance à la conduite automobile, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Décembre 1994.

Résumé

La projection thermique à la torche à plasma est un procédé dans lequel les propriétés en service du dépôt sont indirectement couplées aux paramètres opératoires sélectionnés (paramètres de puissance, paramètres d'injection, paramètres cinématiques et paramètres environnementaux). Ce procédé se caractérise par des phénomènes de fluctuations et des dérives paramétriques à différents temps caractéristiques (100 à 500 μ s). Ces phénomènes ont pour origine l'usure des électrodes (en dizaines d'heures) et les fluctuations intrinsèques de l'arc électrique.

L'objectif des travaux de cette thèse est de développer un système expert qui permette d'ajuster en temps réel les paramètres opératoires du procédé en fonction, dans un premier temps, des valeurs mesurées sur les caractéristiques en vol des particules (température de surface et vitesse) pour réaliser le dépôt.

Considérant l'amplitude de ces dérives et fluctuations, la stratégie à adopter pour développer ce système expert dépend des corrections requises à appliquer aux caractéristiques en vol des particules. L'intelligence artificielle basée sur le réseau de neurones et le contrôleur flou s'avèrent être des outils pertinents pour atteindre cet objectif. En effet, la logique floue permet de définir les règles de correction paramétrique et le réseau de neurones permet de prédire les caractéristiques en vol des particules et celles du dépôt. Coupler le protocole neuronal à la logique floue permet alors de développer un contrôleur indépendant.

Ce système offre la possibilité d'ajuster les paramètres opératoires dans le but d'assurer la reproductibilité du procédé et également, d'optimiser les conditions de la réalisation du dépôt en tenant compte des effets de l'usure de l'électrode en particulier.

Ce système est flexible pour permettre un contrôle total basé sur des règles prédéfinies qui permettent de maintenir à valeurs constantes les caractéristiques en vol des particules en ajustant en temps réel l'intensité du courant d'arc, le débit total des gaz plasmagènes et la fraction d'hydrogène.

Mots clés : intelligence artificielle, APS, alumine-rutile, propriétés mécaniques, caractéristiques microstructurales, diagnostique, contrôle.

Abstract

Atmospheric plasma spraying (APS) is a process in which the in-service coating properties are indirectly linked to the selected of the operating parameters (power, injection, kinematic and environmental parameters). This process is characterized by several parametric drifts and fluctuations at different characteristic times (100 to 500 μ s). These phenomena originate especially from the electrode wear (in tens of hours) and intrinsic plasma jet instabilities.

The objective of this thesis is to develop an expert system which can adjust in real time the operating process parameters as a function, in a first time, of the measured in-flight particle characteristics to elaborate a coating.

Due to the large amplitudes of these drifts and fluctuations, the strategy to adopt will depend on the required corrections to apply to the in-flight particle characteristics. Artificial intelligence based on artificial neural networks and fuzzy logic controller appeared as pertinent tools to reach this objective. Indeed fuzzy logic permits to define parametric correction rules and the artificial neural networks permits to predict in-flight particle and coating characteristics. Coupling neural protocol to fuzzy logic permits to develop an independent controller.

The system offers the possibility to adjust the process parameters in order to improve the reproducibility of the process and also, to optimize the coating elaboration conditions by taking into account the effects of the electrode wear.

This system is flexible in order to permit a full control based on pre-defined rules aiming at maintaining at constant values the in-flight particle characteristics (surface temperature and velocity) by adjusting in real time the arc current intensity, the plasma gas flow and the hydrogen ratio whatever the fluctuations.

Keywords: Artificial intelligence, APS, alumina-titania, mechanical properties, microstructure characteristics, diagnostic, control.