

UNIVERSITE DE LIMOGES

Faculté des Sciences et Techniques

Ecole Doctorale : Science, Technologie, Santé
Sciences des Procédés Céramiques et Traitements de Surface

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES

Matériaux Céramiques et Traitements de Surface

Présentée et soutenue par

David RIGOT

Le 24 Novembre 2003

Contribution à l'étude de l'érosion des électrodes de torches à plasma d'arc pour la projection par suivi en ligne des signaux de tension et de son

Président :

Armelle VARDELLE Professeur, Université de Limoges, France

Rapporteurs :

Joachim HEBERLEIN Professeur, University of Minnesota, Minneapolis, USA

Serge VACQUIE Directeur de recherche émérite, CNRS, UPS Toulouse, France

Examineurs :

Pierre FAUCHAIS Professeur, Université de Limoges, France

Jean-François COUDERT Professeur, Université de Limoges, France

André LEFORT Professeur, LAEPT, UBP Clermont-Ferrand, France

Bernard PATEYRON Ingénieur de Recherche, CNRS, Université de Limoges, France

Per NYLEN Professeur, Université de Trollhättan, Suède

Clarisse DELALONDRE Ingénieur de recherche EDF, Chatou, France

Remerciements

Lorsqu'il faut tant de temps pour penser et pour écrire une thèse, les gens qui vous encouragent, vous tiennent la main, vous aident, etc., ces personnes irremplaçables et essentielles tendent à se fondre dans le décor de la vie quotidienne et sont parfois oubliées lorsque vient le moment d'exprimer officiellement sa reconnaissance. J'ai peur de commettre des impairs inexcusables. Dans l'éventualité où je me rendrais responsable d'un tel méfait, je prie par avance chacun de m'en excuser.

Dans cet esprit, je commencerai par avoir une pensée respectueuse pour Guy Delluc, qui nous a quitté prématurément, et grâce à qui un énorme travail a pu être accompli sur ce sujet de thèse avec, parmi de nombreuses autres réalisations, la mise au point du logiciel de traitement des signaux par transformées en ondelettes. *Je ne vous oublie pas M. Delluc.*

Je tiens à remercier Bernard Pateyron, directeur de thèse et membre du jury, pour l'accueil dans son laboratoire et pour sa disponibilité sans faille, que ce soit pour les expérimentations ou pour répondre à mes questions. Vivre ensemble le quotidien de ces trois années fut pour moi riche d'enseignements académiques mais surtout un plaisir de partager des sujets de discussions qui allaient au-delà de celui de la thèse.

J'exprime ma gratitude à Jean-François Coudert, directeur de thèse et membre du jury, pour la patience dont il a fait preuve en m'éclairant sur de nombreux points obscurs pour moi au début, tels que l'électronique ou le traitement du signal. Ses idées ont souvent jalonné le chemin de cette étude.

Que Pierre Fauchais trouve dans ses lignes, tous les remerciements que je lui adresse en tant que membre du jury mais surtout en tant que directeur de thèse. Merci de la confiance qu'il m'a témoignée en me proposant ce travail de thèse. Merci surtout pour les conseils dispensés pendant ces trois ans. Merci enfin pour les heures passées à lire les différentes versions de mes rapports et pour les corrections apportées. Travailler sous sa direction a été pour moi un honneur.

Je présente également ma profonde reconnaissance à Joachim Heberlein et Serge Vacquie qui ont accepté d'examiner mon travail en tant que rapporteurs, à André Lefort, en sa qualité de Président du jury, et à Per Nylén, Armelle Vardelle et Clarisse Delalondre pour l'intérêt qu'ils témoignent pour ces recherches en me faisant l'honneur de participer au jury.

Pour la confiance qu'il m'a accordé en me laissant conduire l'orientation de mon travail, pour la gentillesse de son accueil en Suède, pour la cordialité de nos relations et pour l'exemplarité de manager qu'il m'inspire, je tiens à exprimer de vifs remerciements à Jan Wigren, directeur du centre de projection thermique de Volvo Aero, dont l'initiative a permis à cette étude de voir le jour. Je remercie et je garde en mémoire aussi tout le personnel de

Volvo Aero, des responsables de services (Mats-Olov Hansson, Jimmy Anderson, etc.) aux formidables opérateurs (Håkan, Tobbe, etc.) qui ont fait de nombreux efforts pour m'aider dans mon travail à Trollhättan, et qui ont transformé mon séjour en Suède en une expérience inoubliable.

Que les membres permanents du SPCTS ou de l'Université de Limoges, soient remerciés pour leur aide, leur disponibilité et leur gentillesse: Alain Grimaud, Alain Denoirjean, Hélène Ageorges, Michel Vardelle, Pierre Martin, Gilles Rochette, etc. Je tiens aussi à exprimer une pensée chaleureuse à Nicole Coiffe, Hélène Mémy et Martine Ségear pour leur aide dans la gestion des méandres administratifs.

Mes remerciements vont aussi à Jean-Claude Vareille, Gaëlle Peyrat et Jacques Chisten de l'Ecole Doctorale "Science, Technologie, Santé" pour leur accueil, et leur volonté d'offrir à chaque doctorant les nombreuses formations annexes au sujet de thèse, mais tellement indispensables pour consolider notre "savoir-être" (communication, management, connaissance du monde de l'entreprise, etc.).

Je salue ici tous les doctorants qui ont contribué par leur sympathie à la réalisation de ce travail, avec une pensée particulière pour Gwenaëlle et Cyril, mes vieux compagnons de route, ainsi que Cédric, Aurélien, Sébastien et Jérôme, à qui j'exprime ma sincère amitié.

A Mickaël et sa famille, je veux offrir ma gratitude et plus encore, pour m'avoir permis par leur générosité de cœur, de garder l'équilibre dans les moments difficiles de ce parcours.

Et à mes parents et mes frères, ma plus profonde reconnaissance pour l'amour et les encouragements qu'ils m'ont toujours prodigués.

Liste des symboles

Par convention dans ce document, les vecteurs seront notés en gras.

Symboles Romains

A	Facteur d'amplitude pour le calcul des valeurs de mode (%)
<i>A</i>	Aire du pied d'arc en contact avec l'anode (m ²)
<i>a</i>	Pente de la rampe croissante d'un signal de tension (V.s ⁻¹)
<i>a</i>	rayon du pied d'arc (m)
<i>A_a</i>	Amplitude des ondes acoustiques (-)
<i>A_S^x</i>	Amplitude moyenne globale pour les spectres du <i>x</i> ^{ième} tir-test pour le son (-)
<i>A_{Sk}^x</i>	Amplitude maximale locale du <i>k</i> ^{ième} spectre du <i>x</i> ^{ième} tir-test pour le son (-)
<i>A_V^x</i>	Amplitude moyenne globale pour les spectres du <i>x</i> ^{ième} tir-test pour la tension (-)
<i>A_{Vk}^x</i>	Amplitude maximale locale du <i>k</i> ^{ième} spectre du <i>x</i> ^{ième} tir-test pour la tension (-)
B	Vecteur du champ magnétique auto induit par la colonne d'arc (-)
<i>c</i>	Vitesse du son (m.s ⁻¹)
<i>c_p</i>	Chaleur spécifique à pression constante (J.K ⁻¹ .kg ⁻¹)
<i>c_v</i>	Chaleur spécifique à volume constant (J.K ⁻¹ .kg ⁻¹)
C	Capacité du circuit RF (F)
<i>d</i>	Diamètre interne de l'anode (m)
<i>D_{arc}</i>	Diamètre de la colonne d'arc principale (m)
<i>e</i>	Charge de l'électron (<i>e</i> = 1.6 10 ⁻¹⁹ C)
<i>E</i>	Energie absorbée par le courant de dérive (W)
<i>e'</i>	Epaisseur de la couche limite froide (m)
<i>E</i>	Valeur du champ électrique dans l'arc (V.m ⁻¹)
E	Vecteur du champ électrique (-)
<i>E_{dis}</i>	Valeur du champ électrique disruptif dans la CLF (-)
<i>E_{colP}</i>	Champ électrique de la colonne d'arc principale (V.m ⁻¹)
<i>E_{colcnx}</i>	Champ électrique de la colonne de connexion (V)
F	Quantité perturbée de <i>F</i> ₀ (F = F _e + F _i) (m.kg.s ⁻²)
<i>F</i> ₀	Force appliquée sur une unité de volume de gaz (m.kg.s ⁻²)
F _e	Quantité perturbée de <i>F</i> ₀ relative aux électrons (m.kg.s ⁻²)
F _i	Quantité perturbée de <i>F</i> ₀ relative aux ions (m.kg.s ⁻²)
F_L	Vecteur unité de la force de Lorentz agissant sur la colonne de connexion (-)
<i>F_S^x</i>	Fréquence maximale globale du <i>x</i> ^{ième} tir-test pour le son (Hz)
<i>F_V^x</i>	Fréquence maximale globale du <i>x</i> ^{ième} tir-test pour la tension (Hz)
<i>f_{Sk}^x</i>	Fréquence maximale locale du <i>k</i> ^{ième} spectre du <i>x</i> ^{ième} tir-test pour le son (Hz)
<i>f_{Vk}^x</i>	Fréquence maximale locale du <i>k</i> ^{ième} spectre du <i>x</i> ^{ième} tir-test pour la tension (Hz)
G	Débit masse du gaz plasmagène (kg.s ⁻¹)

H	Perturbation de H_0 ($J.kg^{-1}$)
H_0	Enthalpie ($J.kg^{-1}$)
h_0	Enthalpie massique à T_0 ($J.kg^{-1}$)
I	Intensité du courant d'arc (A)
I_0	Intensité de consigne donnée au générateur de courant (A)
I_S	Pression acoustique (Pa)
I_S^0	Pression acoustique de référence ($I_S^0 = 20\mu Pa$)
j	Densité de courant ($j = j_e + j_i$) ($A.m^{-2}$)
j	Vecteur unité de densité de courant (-)
jd	Vecteur unité de densité du courant de fuite (-)
j_e	Densité du courant d'électrons ($A.m^{-2}$)
j_i	Densité du courant d'ions ($A.m^{-2}$)
k	Constante de Boltzmann ($k = 1.38 \cdot 10^{-23} J.K^{-1}$)
K	Constante (-)
l	inductance du circuit RF (H)
L	Longueur de l'arc (m)
L_{colP}	Longueur de la colonne d'arc principale (m)
L_{colcnx}	Longueur de la colonne de connexion (m)
L_{co}	Distance fixe entre la pointe de cathode et l'axe optique (m)
L_{cr}	Distance entre la pointe de cathode et l'endroit où l'arc reclaque (m)
L_{ro}	Distance entre l'endroit où l'arc reclaque et l'axe optique
m_p	Masse des particules chargées ($p = i$ pour les ions et $p=e$ pour les électrons) (kg)
N	Nombre de points de l'ensemble X (-)
n	Nombre total d'enregistrements (-)
n_p	Densité de particules (m^{-3})
n_e	Densité d'électrons (m^{-3})
P_v	Densité de puissance ($W.m^{-3}$)
p	Perturbation de p_0 (Pa)
p_e	Pression partiel des électrons (Pa)
p_0	Pression au repos de la chambre d'arc (Pa)
Q	Quantité perturbé de Q_0 (kg)
Q_0	Masse de particules neutres reçue dans un volume unité de gaz (kg)
q	Charge des particules (A.s)
q	flux de chaleur ($W.m^{-2}$)
R	Résistance du circuit RF (Ω)
Re_S	Nombre de Reynolds de la couche limite ($= \rho.v.s/\mu$) (-)
RMS^x	Ecart quadratique moyen global de tension du $x^{ième}$ tir-test (V)
RMS_k^x	Ecart quadratique moyen local de tension du $k^{ième}$ enregistrement du $x^{ième}$ tir-test (V)
S	Facteur de forme pour le calcul du mode de valeur (-)
Sf	Nombre adimensionnel relatif à la fréquence

Si	Nombre adimensionnel relatif à l'intensité du courant
s	Distance entre l'axe de la cathode et la surface interne de l'anode (m)
T	Température (K)
T ₀	Température du plasma pour laquelle on a 1% d'électrons (K)
T _b	Température de fusion (K)
T _e	Température des électrons (K)
t	Temps (s)
t _i	Instant d'acquisition de V _i (s)
t _k	Temps d'acquisition du k ^{ième} enregistrement (s)
t _x	Temps d'acquisition du x ^{ième} tir-test (s)
U	Tension aux bornes des électrodes (U = U _a + U _c + U _{col}) (V)
u	Vecteur de vitesse perturbée (-)
V _a	Chute anodique (V)
V _c	Chute cathodique (V)
V _{col}	Tension d'arc (V)
V	Tension d'arc moyenne (V)
V _{Dis}	Tension de disruption (V)
V _i	Tension instantanée acquise au temps t _i (V)
V _{k^x}	Tension moyenne locale du k ^{ième} enregistrement du x ^{ième} tir-test (V)
V _{Length}	Tension liée à l'allongement de la colonne de connexion (V)
V _{Min}	Tension minimale (V)
V _S ⁰	Valeur efficace de référence pour le son (V)
V ^x	Tension moyenne globale du x ^{ième} tir-test (V)
v	Vitesse du flux de gaz plasmagène (m.s ⁻¹)
v _D	Vitesse de dérive des particules chargées (m.s ⁻¹)
v _{Length}	Vitesse d'allongement de la colonne de connexion (m.s ⁻¹)
W	Energie électrique de l'arc (W)
X	Ensemble de N points (-)
X _i	Valeur du ième point de X (-)
x _{Max}	Plus grande valeur de l'ensemble X (-)
x _{Min}	Plus petite valeur de l'ensemble X (-)
\bar{x}	Moyenne des N points de l'ensemble X (-)

Symboles grecs

α	Coefficient de proportionnalité dans Équation 1-25 (-)
α	Diffusivité (m ² .s ⁻¹)
β	Puissance de la pression au repos pour Équation 1-18 (-)
γ	Coefficient adiabatique (γ = c _p /c _v) (-)
ΔV	Amplitude des fluctuations de tension d'arc (V)

δ	Perturbation de ρ (kg.m^{-3})
ε_{ASx}	Ecart type des amplitudes A_{Sk}^x (u.a.)
ε_{AVx}	Ecart type des amplitudes A_{Vk}^x (u.a.)
ε_{FSx}	Ecart type des fréquences f_{Sk}^x (Hz)
ε_{FVx}	Ecart type des fréquences f_{Vk}^x (Hz)
ε_{RMSx}	Ecart type des RMS k^x (V)
ε_{Vx}	Ecart type des V_k^x (V)
η	Effusivité ($\text{kg.s}^{-5/2}.\text{K}^{-1}$)
Θ	Retard du signal optique sur le signal de tension (s)
κ	Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
μ	Viscosité dynamique du gaz plasmagène ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$)
μ_0	Viscosité dynamique à T_0 ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$)
μ_p	Mobilité des porteurs de charges ($\mu_{p=i}$ pour les ions / $\mu_{p=e}$ pour les électrons) ($\text{m}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$)
μ_4	Quatrième moment
ν	Fréquence de claquage – réamorçage ($\text{Hz} = \text{s}^{-1}$)
ρ	Densité du gaz plasmagène (kg.m^{-3})
σ	Saut local de tension pendant un claquage (V)
σ_0	Conductivité électrique à T_0 ($\text{A.V}^{-1}.\text{m}^{-1}$)
σ_e	Conductivité électrique ($\text{A.V}^{-1}.\text{m}^{-1}$)
σ_{Mean}	Moyenne des sauts de tension (V)
τ	Durée de vie d'un pied d'arc à un endroit donné (s)
τ_{Mean}	Durée de vie moyenne d'un pied d'arc (s)
Φ_a	Potentiel d'extraction du matériau de l'anode (V)
Φ_c	Potentiel d'extraction du matériau de la cathode (V)
ϕ_{Tha}	Flux thermique au niveau de l'anode (W.m^{-2})
ϕ_{Thc}	Flux thermique au niveau de la cathode (W.m^{-2})
χ	Puissance de l'intensité du courant pour Équation 1-18
ψ	Coefficient de thermo diffusion ($\text{A.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$)

Indices

a	indice du premier <i>enregistrement</i> relatif aux conditions stables
b	indice du dernier <i>enregistrement</i> relatif aux conditions stables
k	indice d'un <i>enregistrement</i> ($1 < k < n$)
Upstream restrike	relatif à un claquage de l'arc vers l'amont de la tuyère ($\sigma, \tau, V_{\text{Min}}$)
Downstream restrike	relatif à un claquage de l'arc vers l'aval de la tuyère ($\sigma, \tau, V_{\text{Min}}$)

Abbréviations

CLF	<i>Couche Limite Froide</i>
CF	Facteur de crête (<i>Crest Factor</i>)

- d.c. Courant continu (*direct current*)
FFT Transformée Rapide de Fourier (*Fast Fourier Transform*)
KU Kurtosis
RMS Ecart quadratique moyen (*Root Mean Square*)

Sommaire

Introduction générale.....	1
1 Situation du sujet.....	5
1.1 La projection dans le milieu industriel.....	5
1.1.1 La projection thermique.....	5
1.1.2 Fiabilité et reproductibilité : un besoin.....	9
1.1.3 Le contrôle en ligne.....	10
1.1.4 L'usure des électrodes.....	14
1.2 La torche.....	15
1.2.1 Principe.....	15
1.2.2 Fonctionnement de la torche.....	16
1.2.2.1 Les injections de gaz.....	16
1.2.2.2 Le choix des gaz plasmagènes.....	17
1.2.2.3 Phénomènes aux électrodes.....	20
1.2.3 La torche PTF4.....	24
1.3 Les fluctuations du pied d'arc.....	25
1.3.1 Description.....	25
1.3.2 Caractérisation.....	27
1.3.3 Les relations entre les fluctuations et les paramètres de fonctionnement.....	29
1.3.3.1 Corrélations établies par Planche.....	30
1.3.3.2 Corrélations établies par Kaminska et al.....	33
1.3.3.3 Corrélations établies par Pauvit et al.....	33
1.3.3.4 Conclusion.....	34
1.4 Les autres paramètres liés aux fluctuations.....	34
1.4.1 Le son.....	34
1.4.1.1 Génération du son.....	34
1.4.1.2 Propagation.....	34
1.4.1.3 Relation entre le son et la tension.....	37
1.4.1.4 Le cône de silence.....	38
1.4.2 Les fluctuations de la lumière du jet plasma.....	39
1.5 L'érosion des électrodes.....	40
1.5.1 La cathode.....	40
1.5.1.1 Effet sur la vitesse.....	40
1.5.1.2 Diffusion de la thorine.....	41
1.5.2 L'anode.....	43
1.5.2.1 L'arrachement de particules de tungstène et la contamination du dépôt.....	43
1.5.2.2 Effet sur le signal de tension.....	44

1.5.2.3	Effet sur le spectre de tension	48
1.5.2.4	Effet sur le dépôt	50
1.6	La torche dans un circuit	51
1.6.1	Les différents types de source de courant	51
1.6.1.1	Caractéristiques électriques des torches à plasma linéaires.	51
1.6.1.2	Configuration de l'alimentation électrique	52
1.6.2	La régulation lente et la régulation rapide.....	54
1.6.2.1	Le régulateur	54
1.6.2.2	L'inductance	55
1.7	Conclusion.....	55
2	Dispositif Expérimental.....	57
2.1	Description du banc d'expérience.....	57
2.1.1	Les torches et leur support	57
2.1.2	Le circuit d'eau de refroidissement.....	60
2.1.3	Le banc de commandes	61
2.2	Instruments de mesures	62
2.2.1	La sonde différentielle.....	62
2.2.2	La sonde ampérométrique	63
2.2.3	Les microphones	63
2.2.4	Les oscilloscopes.....	65
2.2.5	L'ordinateur et le logiciel d'acquisition	66
2.2.6	La chaîne globale d'acquisition	67
2.3	Les outils d'évaluation de l'érosion	68
3	Traitements des signaux émis par la torche	71
3.1	Introduction	71
3.2	Le tir normalisé et le logiciel d'acquisition des signaux.....	72
3.3	Le traitement des signaux de tensions.....	74
3.4	Le traitement des spectres de son et de tension.....	79
3.5	Description des signaux du son émis par la torche	82
3.6	Influence de l'intensité du courant sur les résultats.....	83
3.6.1	Première campagne sur l'influence du courant.....	83
3.6.1.1	Présentation des expériences.....	83
3.6.1.2	Les résultats.....	87
3.6.2	Seconde campagne sur l'influence du courant	88
3.6.2.1	Présentation de l'expérience	88
3.6.2.2	Résultats	89
3.6.3	Analyse et conclusion sur l'influence du courant.....	93

4	Evolution des signaux avec l'usure	97
4.1	Influence des démarrages	97
4.2	Influence du temps de fonctionnement	100
4.2.1	Présentation de la campagne de tir	102
4.2.2	Résultats de l'analyse de la torche PT1	102
4.2.2.1	Les signaux temporels	102
4.2.2.2	Les spectres de tension	105
4.2.2.3	Les spectres du son	106
4.2.3	Résultats de l'analyse de la torche PT4	109
4.2.3.1	Les signaux temporels	110
4.2.3.2	Les spectres de tension	111
4.2.3.3	Les spectres du son	113
4.2.4	Synthèse de ces résultats	115
4.3	Intérêts et limitations des ondelettes	116
4.3.1	Une brève histoire de l'analyse des fréquences	116
4.3.2	Les mathématiques de la transformée de Fourier	116
4.3.3	Les mathématiques de la transformée en ondelettes	117
4.3.4	Comparaison entre transformées de Fourier et transformées en ondelettes ...	119
4.3.5	Evolution des diagrammes avec le temps de fonctionnement des torches.....	120
4.3.5.1	Présentation du logiciel de transformée en ondelettes	121
4.3.5.2	Présentation des campagnes d'essais	122
4.3.5.3	Résultats des deux campagnes	125
4.3.5.4	Analyse et conclusion	129
4.4	Choix des paramètres caractérisant l'usure	129
5	Conception d'un module industriel	133
5.1	Introduction et présentation du module	133
5.2	Les composants du module	135
5.2.1	La carte DSP	135
5.2.2	La connectique d'entrée	136
5.2.3	Les entrées/sorties FLAG	137
5.3	La programmation de la carte	138
5.4	Les tests et la validation du module	140
6	Approche thermique du phénomène d'usure	143
	Conclusion générale	153
	Bibliographie	155

Annexes	161
Le Groupe Volvo Aero.....	163
Stabilisation d'un arc par résistance série.....	169
Diagrammes de transformées en ondelettes	171
Le Programme principal du module.....	175
Liste des figures	183
Liste des tableaux	187
Liste des équations	189

Introduction générale

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un partenariat entre le Centre Nationale de la Recherche Scientifique (CNRS) et la société suédoise Volvo Aero Corporation. Les travaux, sous la direction de Pierre Fauchais, Bernard Pateyron et Jean-François Coudert, ont pris part à l'Université de Limoges, dans le laboratoire des Sciences des Procédés Céramiques et Traitement de Surfaces (SPCTS – UMR6638), dirigé par M. Jean-François Baumard et à Trollhättan, dans le centre de projection thermique de Volvo Aero, dirigé par Jan Wigren.

La projection thermique est le domaine des traitements de surface qui englobe les procédés à partir desquels des poudres fines sont fondues et accélérées pour former un dépôt sur un substrat dont on cherche à modifier les propriétés de surface. La torche à plasma d'arc soufflé à courant continu est un de ces procédés. Son principe de fonctionnement consiste à transférer l'énergie d'un arc électrique, créé entre la cathode et l'anode-tuyère de la torche, à un mélange de gaz plasmagène pour former un plasma dans lequel des particules sont ensuite introduites. La température des particules injectées s'élève alors entre 2500 et 4000K ce qui permet de fondre les matériaux les plus réfractaires et d'obtenir un bon étalement des particules à l'impact. Cet avantage explique pourquoi les torches à plasmas de retrouvent dans les domaines d'application tels que l'aéronautique, entre autres, où la projection de matériaux réfractaires est très répandue. Les industriels de ces secteurs sont soumis à de fortes contraintes de reproductibilité et de fiabilité des dépôts puisque les pièces à revêtir ont une forte valeur ajoutée. Les contrôles en lignes des dépôts ont naturellement pris une place importante depuis ces dernières années. En effet l'érosion des électrodes des torches à plasma induit une diminution de l'enthalpie du plasma qui par voie de conséquence diminue la vitesse et la température des particules projetées, ce qui modifie les propriétés finales du dépôt dans le meilleur des cas, et entraîne sa destruction notamment par incorporation de particules métalliques des électrodes dans le cas d'une usure trop importante de ces dernières. Les diverses techniques de contrôle en ligne qui existent actuellement, consistent principalement à suivre l'évolution de la température et de la vitesse des particules en vol ou des distributions de flux des particules chaudes. C'est une méthode indirecte pour estimer l'efficacité d'une torche et corriger les effets de l'érosion des électrodes sur le chauffage et l'accélération des particules. Mais il n'existe pas à ce jour de méthode pour diagnostiquer directement l'érosion des électrodes. De nombreuses études ont déjà montré que la tension aux bornes des

électrodes évolue en fonction de leur état d'usure, mais aucune théorie n'a encore été développée pour permettre de comprendre les phénomènes de l'érosion et aucun appareil de contrôle direct de l'état des électrodes n'est disponible à l'heure actuelle. C'est pour palier à cette carence que la société Volvo Aero a proposé au laboratoire SPCTS de réaliser ce travail de thèse dont les objectifs sont les suivants :

- ✚ Le premier objectif est de définir plusieurs paramètres qui puissent indiquer l'état d'une torche à un moment donné de son utilisation, puis de suivre l'évolution de ces différents paramètres en fonction de l'usure et de sélectionner ceux qui sont les plus pertinents pour contrôler l'érosion des électrodes.
- ✚ Le second objectif est de développer une solution technique à partir des résultats précédents qui puisse répondre aux contraintes industrielles (simple à interpréter, pratique à utiliser, fiable dans les résultats, rapide dans la mise en oeuvre).
- ✚ Le troisième objectif est d'échafauder un modèle théorique de l'érosion qui puisse poser les bases d'études futures qui conduiront à une meilleure compréhension des phénomènes d'érosion des électrodes des torches à plasmas.

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. Soumis à des forces magnétohydrodynamiques, 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 réamorçait 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 et contribuent fortement à l'émission du son par la torche. Ce sont ces deux phénomènes mesurables que nous avons étudié en réalisant un dispositif d'acquisition de ces deux signaux. La difficulté de ce travail a résidé dans 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). Une analyse statistique nous a permis de résoudre cette complexité multi-échelle en inventant des paramètres globaux caractéristiques de l'état d'une torche à l'aide seulement de quelques paramètres globaux. Des campagnes de

mesures ont permis d'appréhender l'influence des paramètres d'entrées tels que l'intensité du courant sur ces paramètres globaux. D'autres séries de mesures ont permis de suivre leur évolution en fonction du temps de fonctionnement d'une torche, c'est-à-dire en fonction de l'érosion de ses électrodes.

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique de la place des torches à plasma d'arc à courant continu dans le domaine de la projection thermique, puis du fonctionnement des torches plasmas, des fluctuations du pied d'arc et des relations déjà mises en évidence entre les paramètres liés à ces fluctuations (temps de séjour moyen du pied d'arc, fréquence des sauts, etc.) et les paramètres d'entrées de la torche (courant d'arc, débit de gaz plasmagènes, etc.) sont présentés. Un paragraphe est consacré au son et à l'intensité lumineuse émis par la torche et plus précisément à leur relation avec la tension aux bornes des électrodes. Nous poursuivrons par une description des conséquences de l'érosion des électrodes (changement de la vitesse du jet plasma, diffusion de dopant dans la cathode, effet d'une contamination de particule de tungstène sur le dépôt) et par l'influence de celle-ci en terme de modification des signaux et des spectres de tension. Enfin pour conclure ce chapitre, nous présenterons l'environnement électrique de la torche avec une présentation des différentes sources de courant.

Le deuxième chapitre est relatif à la description du dispositif expérimental où le banc d'expérience, les instruments de mesures et les outils d'évaluation de l'érosion sont présentés.

Le troisième chapitre est consacré d'une part à la présentation des traitements des signaux et des spectres de fréquence à partir desquels nous avons pu extraire des paramètres globaux représentatifs de l'état d'usure de la torche à un instant donné. D'autre part nous présentons l'influence du courant sur ces paramètres.

Le quatrième chapitre est dédié à l'influence des démarrages sur l'érosion, suivi par la présentation de l'évolution des paramètres globaux en fonction de l'usure des électrodes. Un paragraphe consacré aux transformées d'ondelettes sur le signal du son émis par la torche montre l'intérêt et les limitations de ce traitement. Enfin un choix des paramètres caractérisant au mieux l'usure est présenté en conclusion de ce chapitre.

Le cinquième chapitre est consacré à la présentation du premier prototype d'un module industriel dédié au contrôle de l'érosion des électrodes d'une torche plasma qui a pu être élaboré à partir des résultats obtenus précédemment.

Le sixième chapitre enfin présente un modèle thermique de l'érosion à partir duquel nous avons évalué la taille du pied d'arc.

1 Situation du sujet

1.1 La projection dans le milieu industriel

1.1.1 La projection thermique

Le domaine de la projection thermique rassemble des procédés à partir desquels des poudres fines (métaux, alliages, céramiques, cermets) sont déposés dans un état fondu ou semi fondu sur un substrat préparé. La source de chaleur peut être une flamme, un jet plasma ou un arc électrique maintenu entre deux fils consommables ou une décharge radiofréquence (RF). On retrouve principalement quatre méthodes de projection qui ont chacune leur spécificité et leur domaine d'applications industrielles : la projection par flamme, le procédé HVOF (High Velocity Oxyfuel Flame), le D-gun (ou canon à détonation), et la projection par plasma.

La projection par flamme est historiquement la plus ancienne [1], mais industriellement encore assez répandue puisqu'elle représente 25% du marché de la projection thermique [2]. Des mesures réalisées au DPV2000 [3] montrent que la température des particules ne suit pas celle de la flamme (cf. Figure 1-1). L'ordre de grandeur des températures de particules pour ce procédé est de 2000°C ce qui limite leur utilisation à la projection de matériaux à bas point de fusion.

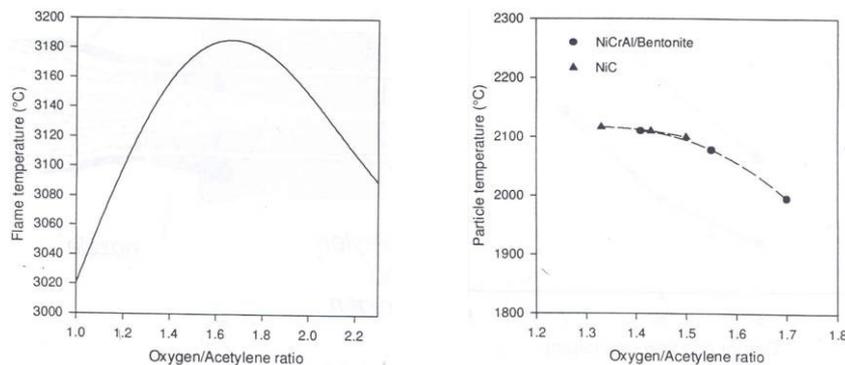


Figure 1-1 : Températures de flamme et des particules pour la projection par flamme

En ce qui concerne les vitesses des particules pour le procédé flamme, elles sont inférieures à $50\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Il est possible d'augmenter ces vitesses de particules en augmentant le débit de gaz porteur mais la dispersion du jet de particules projetées augmente corrélativement. Une augmentation de la quantité de poudre injectée favorise aussi la dispersion du jet et diminue la vitesse des particules. Les particules sont souvent à la limite de

fusion en frappant le substrat et comme leur vitesse est faible, les dépôts réalisés sont très poreux (jusqu'à 50% de porosité). L'utilisation d'alliages autofusibles (c'est-à-dire contenant du Si et du B) permet de réduire la porosité par refusion du dépôt après tir. Naturellement ce traitement est impossible sur des pièces en alliage d'aluminium. Les matériaux projetés sont relativement facile à fondre (Al et Cu, leurs alliages, Pb, Ag, Zn, Ni, Ni-Cr (20% en poids), acier, Mo) et les applications se retrouvent beaucoup dans le domaine automobile. Des aménagements des torches avec un gaz gainant (N_2) permettent également de projeter des polymères.

Le procédé HVOF, qui est une combustion sous pression ($<1\text{MPa}$), fonctionne avec un combustible qui peut être du propane, du propylène, du méthane, de l'hydrogène ou du kérosène. La température de flamme est comprise selon le combustible entre 2500 et 3200°C. Les températures des particules (comprises entre 1500 et 2500K) sont fonction de leur taille : les plus petites sont les plus chaudes. De même, la vitesse des particules est inversement proportionnelle à leur taille (plus elle sont petites, plus elles sont accélérées) dans un gamme généralement comprise entre 400 et 600 m.s^{-1} , mais pour les plus petites on peut dépasser 1000 m.s^{-1} (cf. Figure 1-2). Une augmentation de la pression de la chambre provoque une légère augmentation de la température des particules mais surtout une forte élévation de leur vitesse.

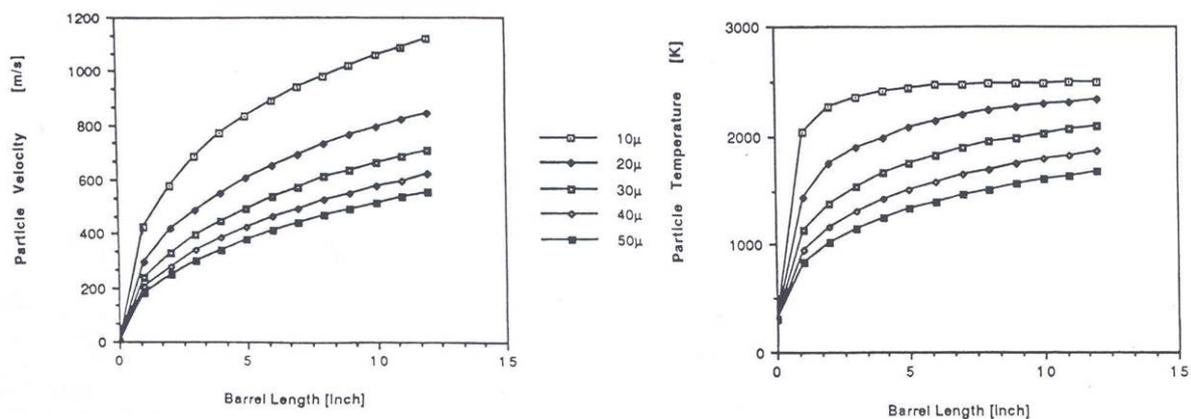


Figure 1-2 : Température et vitesse des particules pour le procédé HVOF

Par entraînement de l'air ambiant, les particules sont soumises à une forte oxydation si elles ont eu le temps de fondre ($\sim 10\%$ d'oxyde) et à une faible oxydation ($<1\%$) dans le cas contraire. En effet l'intérieur des particules fondues peut être le siège d'un phénomène convectif qui entraîne les oxydes formés en surface de la particule vers son cœur tout en amenant continûment du matériau non encore oxydé en surface. On retrouve ainsi dans les particules collectées en vol des îlots d'oxydes à l'intérieur. Par contre si elles ne sont pas

fondues à cœur, seule une coquille liquide d'oxyde se forme. Ainsi selon la taille de la particule elle sera soit entièrement fondue soit solide en état plastique. Dans ce dernier cas, il faut à cette particule une grande énergie cinétique pour s'écraser. Les matériaux que l'on peut projeter sont des métaux (inox, Cr, Mo, Inconel, MCrAlY, NiCr), des alliages autofusibles et des cermets. Pour cette dernière famille, le procédé HVOF est très avantageux. Par exemple, pour le WC-Co. Si la température de fusion est dépassée, il y a convection et oxydation du carbure de tungstène ($WC + O_2 \rightarrow W + CO_2$), alors qu'avec le procédé HVOF, la vitesse élevée de la particule (en comparaison avec le procédé par flamme) ne permet pas la dilution de l'oxygène et WC reste dans la matrice de cobalt. Les dépôts réalisés sont beaucoup plus denses qu'avec la projection par flamme. Les applications sont principalement les protections anti-corrosion et anti-usure.

Alors que la projection par flamme et le procédé HVOF utilisent le principe de la déflagration, le D-gun fonctionne selon le principe de la détonation (d'où le "D"), à raison de 10 explosions par seconde. La vitesse des particules, fonction de la position de l'injecteur de particules dans le canon à détonation, est dans une plage de 700-900 m.s⁻¹. Les matériaux projetés sont semblables à ceux du procédé HVOF mais le dépôt est plus dense dans le cas du D-gun. En comparaison avec le procédé plasma (voir plus loin), un dépôt d'alumine 30µm sera construit par des particules à 1000m.s⁻¹ pour le D-gun contre 250m.s⁻¹ pour un procédé plasma à courant continu. L'usure du premier dépôt sera quatre fois moins importante que dans le cas du dépôt réalisé par plasma. Les applications visent donc surtout les revêtements très denses anti-usure, par exemple pour des trépan de forage (WC-Co).

La projection par plasma regroupe plusieurs techniques parmi lesquelles la projection par arc soufflé à courant continu qui se fait à l'air (APS : *Air Plasma Spraying*) ou sous vide partiel (VPS : *Vacuum Plasma Spraying*) et la projection par décharges RF. L'enthalpie massique du plasma est donnée par la puissance électrique fournie, par le débit masse et la nature du gaz plasmagène et par la géométrie de la torche (diamètre interne et forme de l'anode, mode d'injection du gaz). L'utilisation d'une cathode en matériau réfractaire comme le tungstène thorié, ne permet pas l'utilisation de gaz à base de carbone ou de gaz oxydant. Par exemple pour des particules de zircon de 30µm, les vitesses atteintes sont de l'ordre de 250m.s⁻¹ ce qui permet de placer ces procédés plasmas d'arc entre le procédé par flamme et les procédés HVOF et D-gun. La température des particules se trouve dans une gamme plus élevée entre 2000 et 4500K ce qui permet de fondre tous les matériaux, même les plus réfractaires et d'obtenir un bon étalement des particules à l'impact. Le principal avantage de la projection par plasma est donc la possibilité de projeter des matériaux très réfractaires et

d'obtenir des dépôts de céramiques destinés à la protection contre l'usure ou la corrosion et à la protection thermique. Les secteurs dans lesquels peuvent être utilisés une torche à plasma sont variés. On les retrouve dans les domaines aéronautiques (civil et militaire) et aérospatiales, de l'énergie (pile à combustible, pétrochimie), des mines, de l'impression et de la pâte à papier, de l'industrie du verre, de l'automobile, dans le secteur médical et d'une manière plus générale de la protection contre l'usure, la corrosion, les chocs thermiques, comme barrières diélectriques, etc. Les torches à plasma permettent de déposer une large gamme de matériaux très spécifiques, des superalliages et composés intermétalliques réfractaires aux céramiques. Le nombre d'applications commerciales est en constante augmentation. Compte tenu des températures atteintes dans les jets de plasma (supérieures à 8000K dans le cœur du jet) il n'y a pas de limitations quant au point de fusion des matériaux pourvu qu'ils ne se subliment pas et que leur température de fusion soit séparée d'au moins 300K de leur température d'ébullition ou de décomposition [4]. Les inconvénients de la projection thermique par plasma sont le grand nombre de paramètres, souvent interdépendants, qui rendent le procédé difficile à optimiser ou même à contrôler. Il n'y a qu'une faible partie de l'énergie électrique qui est utilisé pour chauffer les particules (~3%) et les instabilités naturelles du jet plasma diminuent la reproductibilité des dépôts. Enfin à titre de comparaison entre les quatre techniques de projection thermique, les masses volumiques des gaz ou plasma sont caractéristiques de chacune (cf. Table 1-1 où l'on donne le rapport de la masse volumique du gaz à la température moyenne de travail sur celle du gaz à la température ambiante).

<i>Procédé</i>	plasma	Flamme	HVOF	D-gun
<i>Masse volumique</i>	$\rho < 1/30 \rho_{300}$	$\rho < 1/10 \rho_{300}$	$\rho \sim 1/3 \rho_{300}$	$\rho \sim 4 \rho_{300}$

Table 1-1 : Comparaison des masses volumiques relatives pour différents procédés de projection.

Parmi les secteurs d'activités où on trouve la projection par plasma, l'aéronautique représente une part importante du marché avec des revêtements qui sont réalisées sur des pièces à fortes valeurs ajoutées. Le nombre des composants d'un moteur d'avions qui nécessitent un dépôt est impressionnant. Une grande partie des dépôts tels que ceux présentés Figure 1-3 est par exemple réalisée au centre de projection thermique de Volvo Aero. Ce dernier est un centre de production à forte capacité qui réalise des dépôts sur de nombreuses pièces de moteurs d'avions à usage civil ou militaire. C'est aussi un centre de recherche où sont développés de nouveaux dépôts pour répondre aux normes de plus en plus strictes de l'aéronautique.

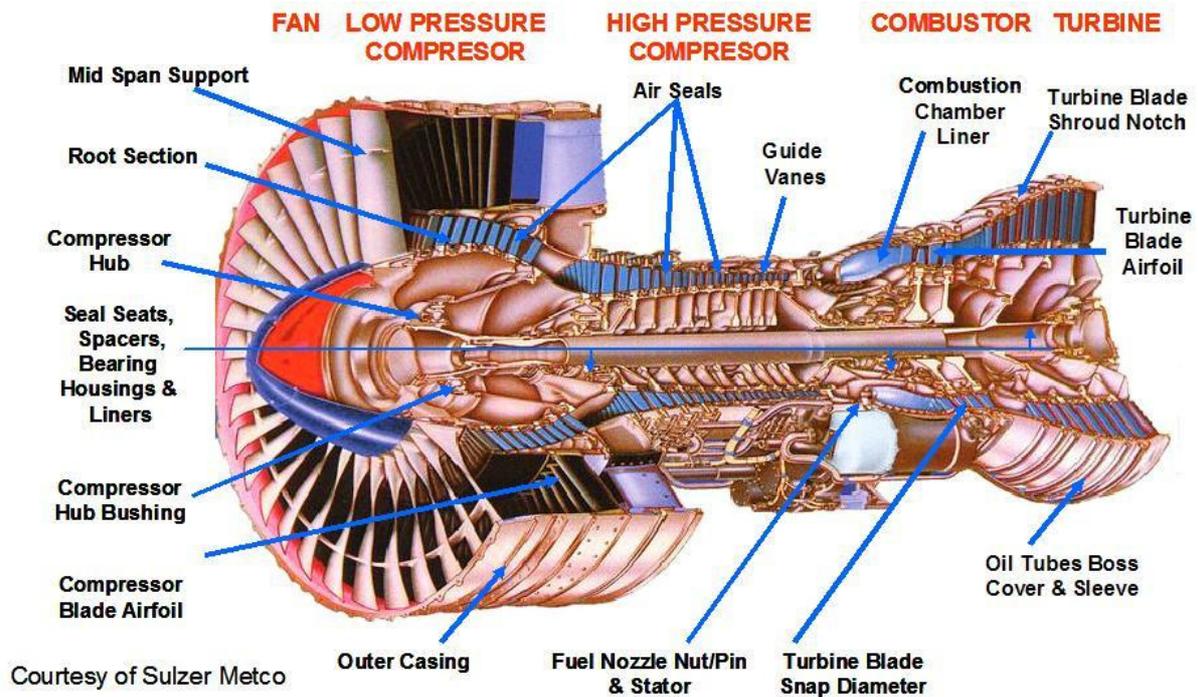


Figure 1-3 : Les éléments d'un moteur d'avion utilisant un dépôt par projection plasma.

1.1.2 Fiabilité et reproductibilité : un besoin

Les coûts de réalisation des dépôts par projection thermique prennent en compte les rejets engendrés par l'ensemble du procédé. La fiabilité et la reproductibilité des dépôts sont donc critiques pour réduire ces coûts. Parmi les causes de défaillance dans la réalisation d'un dépôt, on peut citer [6] :

- ✓ Les erreurs de conception des pièces à revêtir. Celles-ci pourraient être corrigées en améliorant la collaboration entre les centres de développement des pièces et les ateliers de projection [7].
- ✓ Les erreurs des opérateurs tout au long de la chaîne de traitements (sablage, masquage, choix de la procédure de dépôt, positionnement de la pièce à revêtir sur le support, initialisation du positionnement de la torche, conditionnement final, etc.). Seules l'expérience et la formation continue peuvent réduire le nombre de ces erreurs [7]. Les systèmes qualités (normes, 6σ , etc.) permettent aussi de minimiser ce facteur humain.
- ✓ Les instabilités inhérentes au fonctionnement de la torche. Le contrôle en ligne avec boucle de rétroaction sur les commandes des paramètres macroscopiques (débit masse du gaz plasmagène, débit masse du gaz secondaire, intensité du courant) est un moyen pour les compenser.

1.1.3 Le contrôle en ligne

Afin de maîtriser les instabilités naturelles liées au procédé plasma, de nombreuses techniques de diagnostics, avec des détecteurs capables de fonctionner dans l'atmosphère très agressive des cabines de projection (les capteurs doivent supporter par exemple la poussière tourbillonnante dans la cabine), sont disponibles actuellement [6]. Elles permettent soit de caractériser les particules en vol (vitesses et températures) et à l'impact, soit de surveiller les températures du dépôt ou du substrat ou bien encore de suivre l'évolution des contraintes résiduelles du dépôt en cours de réalisation. Ces différentes techniques reposent en majorité sur la technologie des caméras CCD et/ou sur la pyrométrie. On note deux principales classes de contrôle en ligne. Premièrement, les contrôles en ligne où la torche est positionnée devant le capteur du système de contrôle avant et après le tir de la pièce à revêtir. Il faut alors faire un tir "à vide" spécifiquement dédié au contrôle avant puis après le tir de la pièce. La seconde classe de système de contrôle en ligne est le contrôle en conditions réelles de fonctionnement, où la torche est réellement utilisée à des fins de production. Pour cela, le capteur est fixé sur la torche. Le point commun essentiel à tous ces outils de diagnostics est qu'ils doivent répondre aux conditions extrêmes des cabines de projection. Ces dernières sont insonorisées dans l'industrie, pour épargner aux opérateurs le bruit (une torche en fonctionnement à l'argon - hydrogène émet plus de 130dB). Ceci suppose donc que les capteurs soient autonomes et un nombre minimum de liaisons entre l'extérieur (où il y a l'analyseur) et l'intérieur (capteur) de la cabine.

Parmi les appareils de contrôle en ligne qui ne sont pas embarqués avec la torche, on recense (entre parenthèse sont inscrit les sociétés qui les ont développé) :

- ✓ Le DPV2000 (TECNAR) [8]. C'est le plus connu et le plus utilisé comme référence dans le milieu industriel. Il permet d'obtenir la vitesse des particules (par mesures de temps de vol entre deux capteurs), leur température (par pyrométrie deux couleurs $T > 1400^{\circ}\text{C}$) et d'évaluer grossièrement leur diamètre (estimé 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) [9]. Il contrôle la température et la vitesse des particules respectivement par pyrométrie deux couleurs ($T > 1000^{\circ}\text{C}$) et mesures du temps de vol.
- ✓ Plumespector (TECNAR) [10]. Il contrôle le jet de particules chaudes sur un plan de coupe avec une caméra CCD.

- ✓ IPP - *In-Flight Particle Pyrometer* – [11]. La température fournie est une moyenne de celles de toutes les particules qui traversent un volume assez important (5mm de diamètre et 50mm de long). Il s'agit d'une mesure dite d'"ensemble".
- ✓ Spray-Watch (OSEIR Ltd) [12]. 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 ($T > 1300$ °C).
- ✓ Ignatiev et al [13] 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).
- ✓ STRATONICS [14] propose un pyromètre deux couleurs qui utilise une caméra CDD et qui permet de mesurer les températures des particules comprise entre 1000 et 2700K avec une précision de l'ordre de 10%.

L'unique appareil qui permet un contrôle continu puisqu'il est fixé sur la torche est le SDC – *Spray Deposit Control* – développé par SNECMA et l'Université de Limoges [15]. Pour un poids de 0.8kg, 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 (le temps de réponse est de 0.1 μ s). 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.

Tous ces outils de contrôle doivent permettre d'obtenir des dépôts reproductibles et de bonnes qualités. La qualité des dépôts peut être évaluée par des propriétés du dépôt telles que la dureté, l'épaisseur, le pourcentage d'oxydes, ou bien d'autres selon les besoins des industriels. En mettant en relation les paramètres mesurés par les outils de contrôle en ligne (température et vitesses des particules, etc.) et les propriétés du dépôt, il est possible d'établir des "fenêtres" de bon fonctionnement. Ces fenêtres doivent indiquer l'occurrence d'un incident (fuite d'eau, colmatage de l'injecteur) ou si une dérive inhérente au système est trop importante pour obtenir des dépôts dont les propriétés sont dans la gamme acceptable par

l'industriel. Elles sont de plus en plus présentes dans les procédures de qualités des ateliers de projection par plasma et pour ceux qui les utilisent, elles ont permis de diminuer le taux de pièces rejetées de 60 à 80%

Enfin un contrôle abouti est un contrôle en ligne, c'est-à-dire un contrôle qui rétroagit automatiquement, sans passer par l'opérateur, sur les paramètres d'entrée de la torche (intensité du courant, débit masse d'un gaz et débit masse de gaz porteur). Malheureusement, à ce jour, les pupitres de commande ne sont pas conçus pour introduire un signal étranger (celui du détecteur) et provoquer une rétroaction. Cette étape n'est pas encore franchie. Seule une meilleure collaboration entre concepteur de torches et développeurs d'outils de contrôle permettra l'émergence de ce contrôle rétroactif.

Des sociétés et des universités ont déposés des brevets concernant plus spécifiquement le contrôle d'installations industrielles de différents procédés plasmas. Neuf d'entre eux sont présentés ci-dessous :

1. La société allemande VEB propose un diagnostic fondé sur le son pour son procédé de laquage [16]. Elle procède au contrôle de l'état de ses brûleurs plasma en enregistrant le son à l'intérieur de ces derniers. Le signal acoustique est traité pour fournir, en ligne, un spectre du son qui est comparé à un spectre normalisé correspondant à de bonnes conditions de travail. Des corrections sur les paramètres de travail sont produites pour minimiser la différence entre le spectre en ligne et le spectre de référence. Il n'y a pas dans ce moyen de contrôle, l'intervention humaine d'un opérateur. Aucune donnée numérique n'est fournie dans ce brevet, ce qui interdit toute connaissance de la plage fréquentielle traitée.

2. Un institut ukrainien a déposé un brevet sur l'analyse spectrale du son d'un plasmatron à arc transféré [17]. Le but de leur contrôle en ligne est clairement exprimé : "Utiliser chaque électrode jusqu'au maximum de sa durée de vie attendue". Ce brevet explique que l'unique paramètre retenu est la fréquence du son émis par l'arc plasma. Quand la fréquence atteint soudainement au moins une fois et demi la valeur nominale (correspondant à une valeur de référence où le procédé fonctionne bien), l'électrode est considéré comme étant inappropriée à un fonctionnement optimal. La valeur de 1,5 fois celle de référence semble spécifique au procédé par arc transféré et aucune extension aux procédés d'arc soufflé ne peut être faite.

3. La société japonaise Japan Science and Technology Corporation et la fondation Kumamoto Technopolis ont breveté l'utilisation de retards temporels entre plusieurs capteurs

à ultrasons, placés à différents endroits d'un réacteur à décharge plasma [18]. Il n'est pas mentionné l'utilisation de mesure de tension, ni de mesures sonores post traitées.

4. La société Nippon Steel Weld Prod & Eng Co Ltd protège un contrôle pour des installations de soudure et de découpe plasma [19]. L'objet de ce brevet est la protection du corps de la torche en réalisant le suivi de la tension d'arc. La valeur de cette tension est mesurée, puis filtrée et enfin intégrée. Le résultat est comparé avec une valeur de référence. Si cette valeur est supérieure à la référence, l'électrode est remplacée. Il semble donc, à la vue du schéma de la chaîne de traitement, que l'enveloppe du signal de tension soit utilisée pour suivre l'état d'érosion des électrodes.

5. Graham S. Hawkes propose un système de contrôle à distance et en temps réel d'une installation de soudage pour assister l'opérateur dans son travail lorsque ce dernier ne peut être à proximité de son équipement [20]. Le principe consiste à suivre la tension et l'intensité du courant de l'arc de soudage. Le signal de tension module en fréquence la tonalité d'un son, alors que l'intensité du courant est utilisée pour la moduler en amplitude. Le son ainsi généré est reçu par l'opérateur à l'aide d'écouteur et lui permet d'avoir des indications sur la qualité, la vitesse ou l'efficacité de la soudure qu'il réalise.

6. La société allemande VEB a déposé un autre brevet concernant les plasmatrans à arcs transféré utilisés dans des fours [21]. Dans l'espace entre la cathode et la tuyère, des détecteurs d'intensité lumineuse sont placés. Ils observent en continu si il y a la création d'un arc secondaire, auquel cas une boucle de rétroaction diminue la puissance de l'arc principal ce qui a pour effet d'annihiler le second en formation.

7. La lumière émise par un brûleur plasma utilisé à des fins de découpage, est le coeur du brevet déposé par la société suédoise Vancata [22]. L'appareil de contrôle, placé devant l'arc principal, est constitué d'un détecteur photosensible qui ne répond que dans une fine fenêtre spectrale centrée sur les longueurs d'ondes du matériau qui compose la tuyère. Si la réponse de l'appareil de contrôle augmente, cela signifie que du matériau de la tuyère du brûleur a été éjecté ce qui se traduit comme étant un défaut de fonctionnement du brûleur. La tuyère est donc remplacée.

8. Le contrôle des fuites d'eau de refroidissement des fours de la société VEB fait l'objet d'un brevet [23]. La méthode consiste à enregistrer l'émission acoustique de l'intérieur de leur réacteur puis de comparer le spectre sonore issu de cet enregistrement avec un spectre normal prédéterminé. Les différences entre les deux spectres permettent de corriger les

conditions de fonctionnement du brûleur. Quand une fuite est détectée, cela signifie que l'érosion du brûleur est déjà importante. Ce contrôle permet néanmoins le diagnostic des fuites dans ce genre d'installations où l'observation directe reste très difficile, voire impossible.

9. La société japonaise Koike Sanso Kogyo Co Ltd a déposé un brevet sur un système permettant la prédiction de la destruction de l'électrode d'une torche à arc transféré utilisée pour du découpage [24]. Ils proposent d'ajouter par brassage, un second matériau (un traceur) sur la pointe de l'électrode qui une fois consommé, changerait le comportement du plasma. Il n'y a ici ni mesures de tension, ni mesures sonores, mais une tentative de contrôle chimique de l'usure des électrodes d'un procédé plasma.

Le point commun de ces neuf brevets de contrôle réside dans l'utilisation de plasmas dans des procédés, et ce pour de nombreuses applications. Cependant si des brevets concernent les brûleurs plasma [16] [22] [23], les plasmatroneurs [17], les décharges plasma [18], la découpe plasma [19], le soudage par plasma [19] [20] ou encore les fours plasmas [21], aucun de ces brevets n'est explicitement destiné au contrôle de l'érosion des électrodes d'une torche plasma d'arc soufflé utilisée dans la projection thermique.

Certains brevets présentent l'utilisation d'un paramètre de contrôle unique alors que d'autres présentent des outils de contrôle fondés sur la mesure de deux paramètres. La plupart des contrôles sont réalisés grâce au son émis par les réacteurs ou les procédés [16] [17] [18] [23]. D'autres ont choisi l'intensité lumineuse émise [21] [22] et un seul brevet présente la tension comme un paramètre intéressant [19]. Seul un brevet présente une technique où le son, le courant et la tension sont utilisés comme moyens de diagnostic [20]. La dernière publication explique comment le changement de composition du matériau constituant la tuyère du procédé permet d'évaluer l'usure de celle-ci [24].

1.1.4 L'usure des électrodes

Le DVP2000 a été utilisé pour suivre l'effet de la chute de tension due à l'usure des électrodes sur les paramètres des particules à l'impact [25] [26]. Cependant ces études n'ont pas montré quels étaient les paramètres d'entrée qui pouvaient compenser au mieux cette usure parmi les trois possibilités suivantes: une augmentation du courant, une augmentation du débit masse du second gaz plasmagène ou une diminution du débit masse du premier gaz plasmagène. La chute de tension provoque une diminution de l'enthalpie du plasma qui a pour conséquence une chute de la vitesse moyenne ($-25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) et de la température moyenne (-200K) des particules pour un ΔV de 10 V sur une valeur de tension moyenne de 65 V initialement.

Les électrodes usées sont pour le moment remplacées par des neuves selon l'appréciation de l'opérateur qui prend en compte le nombre d'heure de fonctionnement de la torche, le nombre de démarrages et la valeur de la chute de tension moyenne. Cependant après observation des électrodes démontées, il s'avère que la majorité n'ont pas été utilisées à leur maximum de durée de vie potentielle, c'est-à-dire avant une usure préjudiciable pour le dépôt (éjection de particule du matériau de l'anode ou qualité du dépôts trop faibles due à des vitesses et températures des particules injectées trop faibles).

1.2 La torche

1.2.1 Principe

Une torche à plasma à courant continu (*direct current* – d.c. – en anglais) transforme l'énergie électrique fournie par un générateur de courant en énergie thermique développée par effet Joule au sein d'un gaz plasmagène en contact avec un arc électrique. Le démarrage de la torche est réalisé par une décharge radiofréquence haute tension, l'arc électrique est ensuite maintenu sous faible tension et fort courant entre l'anode et la cathode. Les différents éléments qui constituent une torche et son principe de fonctionnement sont représenté ci-dessous (cf. Figure 1-4) avec (1) la cathode à pointe conique, (2) l'anode cylindrique dont le diamètre doit être suffisamment faible pour assurer la stabilité géométrique de l'arc par striction thermique, (3) l'injecteur de gaz en matériau isolant. La colonne d'arc principale (4) peut être définie comme la zone conductrice de gaz ionisé contenant au moins 1% d'électrons libres. Cette colonne d'arc principale est connectée à la paroi de l'anode par la colonne de connexion (5) dont l'extrémité est appelée pied d'arc ou "spot" anodique. Entre la colonne d'arc principale et les parois de l'anode, il y a une couche de gaz froid (6) qui gaine la colonne d'arc principale. Cette zone, isolante électriquement, est appelée couche limite froide (CLF par la suite). On peut délimiter la frontière entre la CLF et la colonne d'arc principale. Le pied d'arc est soumis à deux types de forces hydrodynamiques et électromagnétiques qui le font se déplacer le long de la paroi anodique. La colonne de connexion glisse vers l'aval, le pied d'arc étant fixe, soufflée par les gaz et un claquage peut alors se reproduire lorsque la tension dans la colonne de connexion dépasse la tension de claquage (aussi appelée tension de disruption) dans la CLF. L'arc peut se réamorcer en amont (8u – *upstream* en anglais) ou en aval (8d – *downstream* en anglais). Le jet plasma sort de la tuyère et rencontre l'atmosphère ambiante. Dès la sortie du jet, on aura un début de vorticité qui va se traduire par un phénomène d'engouffrement (9) et un entraînement d'air (10) par la suite (si la projection est à l'air). Les bulles d'air incorporées dans le jet de plasma (11) se mélangent avec celui-ci lorsqu'elles ont

suffisamment chauffé et les particules injectées peuvent ainsi s'oxyder en vol avant qu'elles ne frappent le substrat. L'injecteur de particule est situé à quelques millimètres de la sortie de tuyère soit en amont soit en aval de cette sortie.

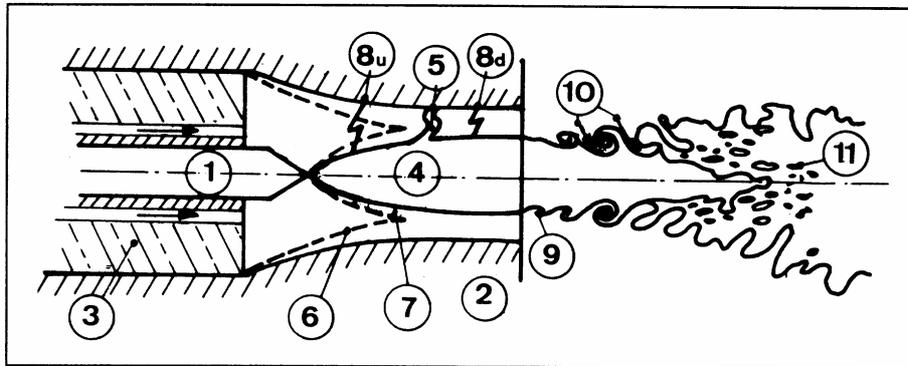


Figure 1-4 : Schéma de fonctionnement d'une torche à plasma d'arc soufflé.

1.2.2 Fonctionnement de la torche

1.2.2.1 Les injections de gaz

Il existe trois principaux moyens d'injecter le mélange plasmagène dans une torche à plasma à arc soufflé avec une cathode d'extrémité conique. On recense l'injection vortex, l'injection radiale et l'injection axiale (cf. Figure 1-5). L'injection vortex (la plus utilisée en milieu industriel) en créant une dépression sur l'axe du canal permet de stabiliser la colonne d'arc car le gaz ainsi envoyé, contracte celle-ci du fait de la couche de gaz froid centrifugée sur la paroi de l'anode tuyère. De plus le mouvement rotatif du gaz entraîne le pied d'arc qui s'accroche à l'anode, ce qui permet d'avoir, en moyenne, une meilleure répartition de la quantité de chaleur échangée entre l'arc et la paroi. Certains auteurs utilisent une injection mixte alliant un jet vortex et un jet axial. Cependant la plupart des cas d'études se rencontrent avec soit l'un soit l'autre.

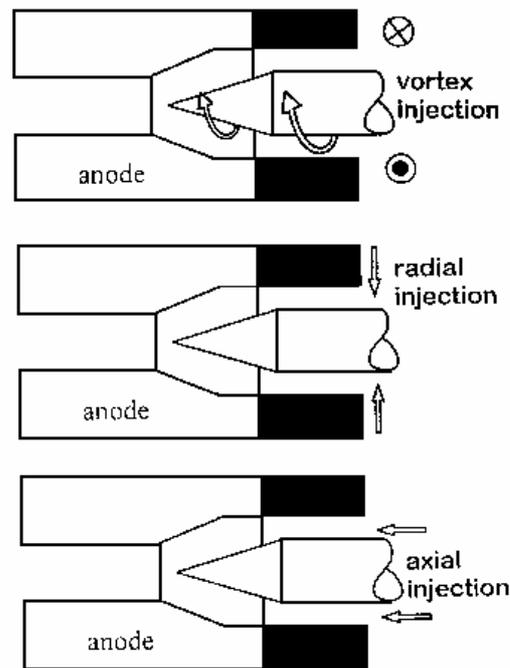


Figure 1-5: Les trois modes d'injection de gaz plasmagènes

1.2.2.2 Le choix des gaz plasmagènes

Les principaux gaz rencontrés en projection thermique sont l'argon (Ar), l'hydrogène (H₂), l'azote (N₂) et l'hélium (He). Ar et N₂ sont utilisés pour leur effet de masse. Ils possèdent des masses atomiques élevées (respectivement 40 et 14 g.mol⁻¹) et permettent d'une part le déplacement du pied d'arc et d'autre part ils confèrent au plasma en sortie de tuyère une quantité de mouvement suffisante pour la projection. H₂, N₂ et He améliorent le transfert thermique du plasma vers les particules. C'est pour ces deux besoins en transfert de quantité de mouvement et en transfert thermique que des mélanges plasmagènes sont utilisés : Ar-H₂ (75-25%_{vol} au maximum), N₂-H₂ (75-25%_{vol} au maximum), Ar-He (40-60%_{vol} au maximum) ou Ar-H₂-He (38-14-48%_{vol} par exemple).

Les propriétés thermodynamiques importantes des plasmas créés par ces mélanges sont la viscosité (en kg.m⁻¹.s⁻¹) en terme de transfert de quantité de mouvement vers les particules, la conductivité électrique (σ en A.V⁻¹.m⁻¹) et la conductivité thermique (κ en W.K⁻¹.m⁻¹) en terme de transfert thermique.

En effet, le simple modèle 1-D d'Ellenbaas-Heller permet d'estimer les pertes thermiques par conduction du plasma en fonction de κ et de σ , de déterminer le profil de température et de calculer le champ électrique. Pour cela, il faut résoudre un système de trois équations différentielles à partir de la loi de conservation de l'énergie, de la loi d'Ohm et de la

définition du flux thermique de conduction. La colonne d'arc principale est considérée comme un cylindre de rayon R ce qui permettra d'écrire les trois équations en coordonnées cylindriques.

La conservation de l'énergie permet de poser l'hypothèse que les pertes par conduction ($\text{div } \phi$) équilibrent le terme source d'énergie par effet Joule. Cela peut s'écrire :

$$\text{div } \phi - \sigma E^2 = 0$$

avec ϕ : le flux thermique de conduction (W.m^{-2})
 σ : la conductivité électrique du plasma ($\text{A.V}^{-1}.\text{m}^{-1}$)
 E : le champ électrique (supposé constant) (V.m^{-1})

Équation 1-1 : Équation de conservation de l'énergie.

Où par définition :

$$\phi = -\kappa \text{ grad } T$$

Équation 1-2 : Définition du flux thermique.

La loi d'Ohm pour la conservation du courant traversant la section d'arc étudié s'écrit :

$$I = 2\pi E \int_0^R \sigma.r.dr$$

Équation 1-3 : Loi d'Ohm pour le courant d'arc

Le système à résoudre est donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\phi}{dr} = -r.\sigma(T)E^2 \\ \frac{dT}{dr} = \frac{\phi}{r.\kappa(T)} \\ \frac{dI}{dr} = 2\pi.E.\sigma(T).r \end{array} \right.$$

Équation 1-4 : Système d'équations différentielles pour le modèle Ellenbaas-Heller

La résolution de ce système n'est pas simple car σ et κ n'ont pas d'évolutions linéaires en fonction de la température (cf. Figure 1-6, Figure 1-7, Figure 1-8 et Figure 1-9) [27]. Cependant si les profils de σ et de κ en fonctions de T, sont connus, les résultats de ce type de modèle 1-D de l'arc sont extrêmement importants, car ils mettent en évidence le rôle d'un nombre limité de phénomènes (ionisation, conduction thermique et rayonnement) sur le champ de température.

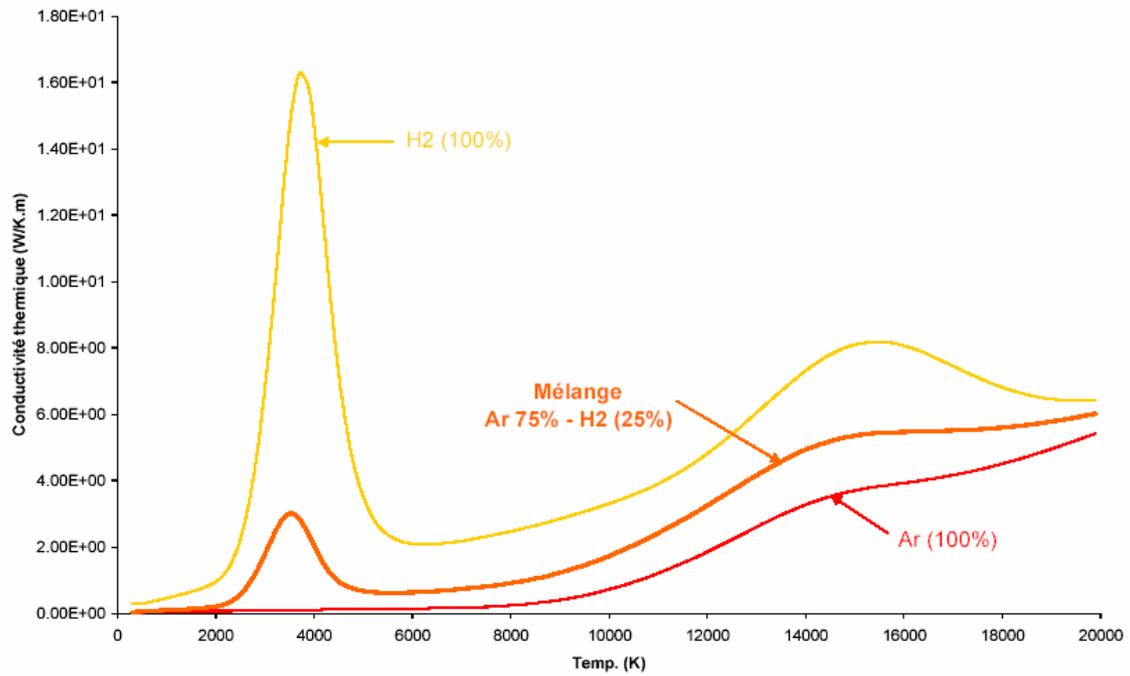


Figure 1-6 : Conductivité thermique (κ) du mélange Ar 75% - H₂ 25% avec la température.

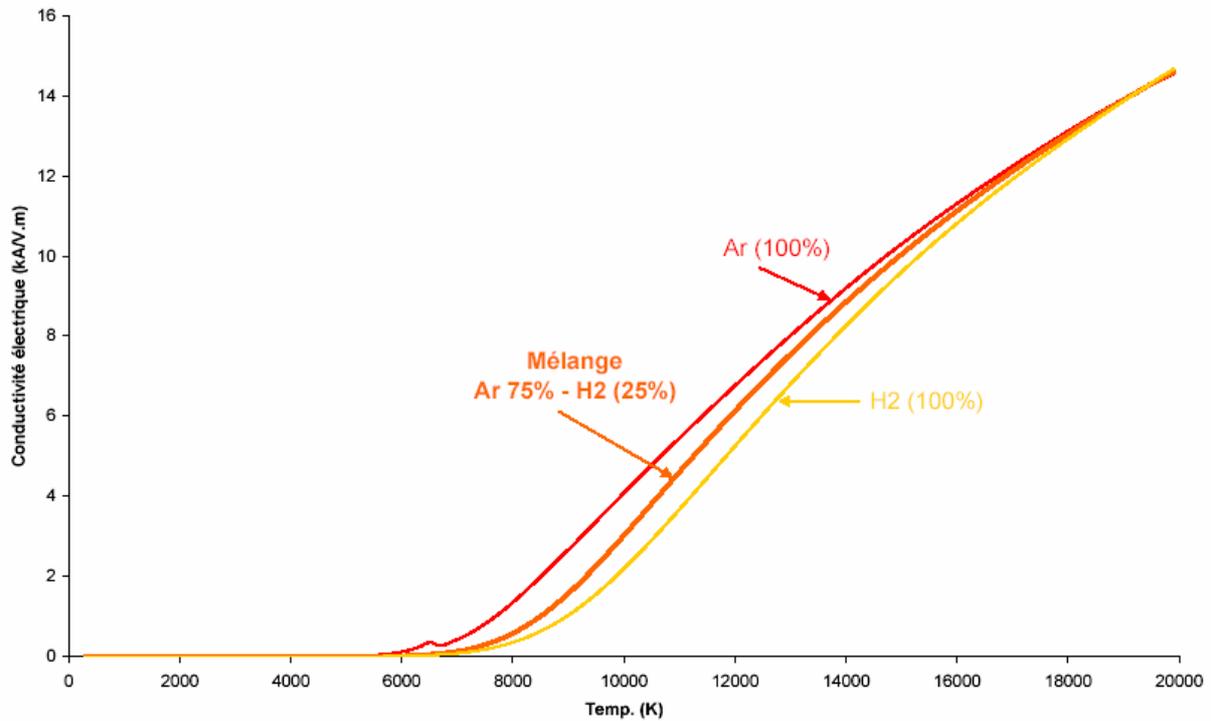


Figure 1-7 : Conductivité électrique (σ) du mélange Ar 75% - H₂ 25% avec la température

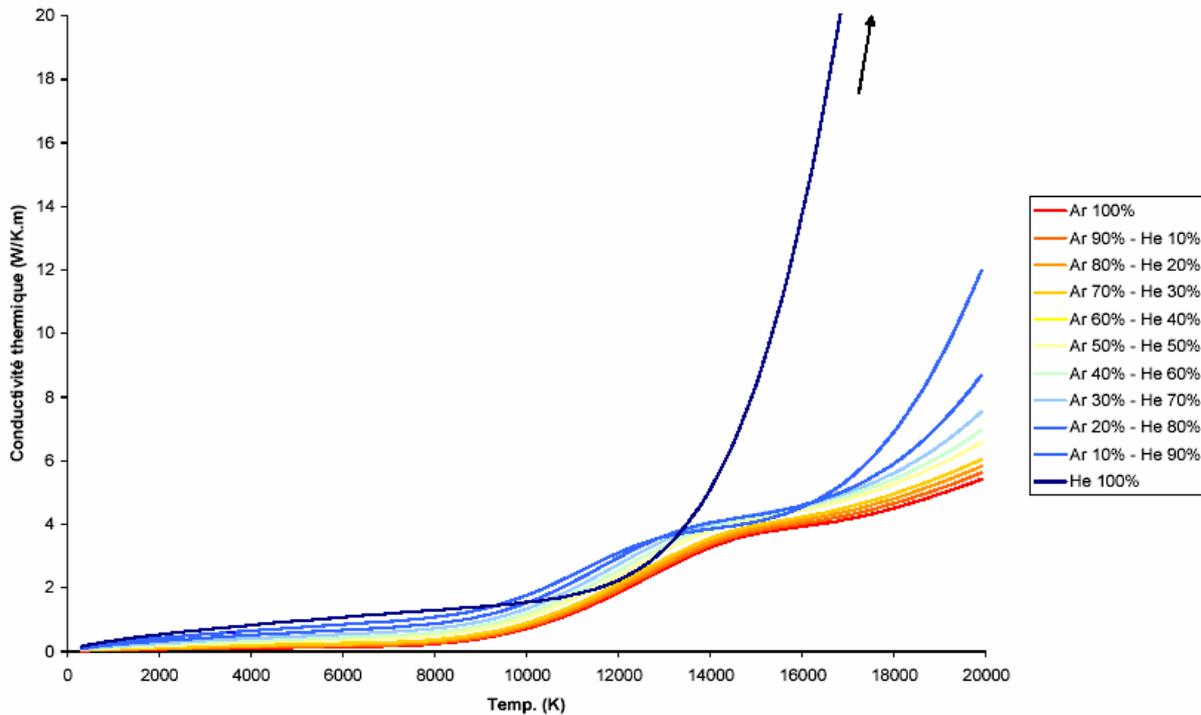


Figure 1-8 : Conductivité thermique (κ) pour des mélanges Ar - He avec la température.

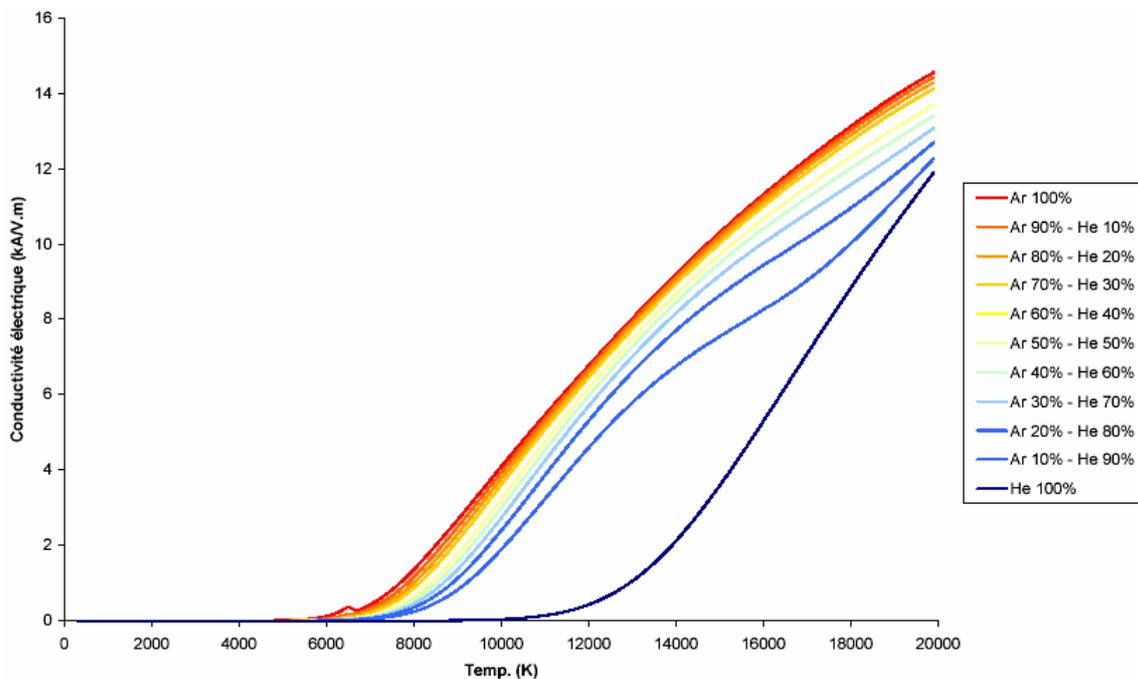


Figure 1-9 : Conductivité électrique (σ) pour des mélanges Ar - He avec la température

On retrouve en annexe les courbes sur la conductivité thermique et électrique ainsi que sur la viscosité et l'enthalpie des mélanges Ar-H₂, Ar-He, Ar-N₂-H₂, le mélange binaire Ar (75%) – H₂ (25%) et le mélange ternaire Ar (38%) – H₂ (14%) – He (48%).

1.2.2.3 Phénomènes aux électrodes

Le fonctionnement des torches plasma est conditionné par la géométrie et les

matériaux des électrodes. Le type d'application de la torche détermine la configuration des électrodes. On retrouve donc plusieurs catégories d'électrodes :

- Les cathodes "chaudes" qui fournissent les électrons par émission thermoioniques. Elles sont constituées de matériau réfractaire (tungstène, zirconium, zircone, carbone) à forte température d'ébullition (de 4300 à 6200K).
- Les cathodes dites "froides", constituées de cuivre ou de ses alliages. Elles émettent les électrons par émission de champs puisque leur température ne leur permet pas l'émission thermoionique. Ce type de cathode est très peu utilisé en projection plasma en comparaison des cathodes chaudes.

L'émission des électrons de type thermoionique est décrite par La loi de Richardson -

Dushman :

$$j = K.T^2.\exp\left(\frac{-e\Phi_c}{kT}\right)$$

Avec

j : densité de courant thermoionique ($A.m^{-2}$)

Φ_c : potentiel d'extraction du métal (V)

$e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C

k : constante de Boltzmann ($=1.38 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹)

K : constante ($K^2.A.m^{-2}$)

T : température (K)

Équation 1-5 : Loi de Richardson - Dushman pour l'émission thermoionique des électrons.

Les électrons émis sont ensuite accélérés dans la zone de la chute cathodique. Ils acquièrent une énergie cinétique importante qui leur permet, par collision, de dissocier et ioniser les molécules du mélange de gaz plasmagènes (cf. Figure 1-10). La chute cathodique est de quelques volts (de 5 à 8V), les électrons ne peuvent donc pas avoir plus de 5 à 8 eV d'énergie cinétique et ce n'est pas suffisant pour ioniser l'argon, par exemple, qui requiert 15,4V. En fait l'ionisation est thermique, c'est-à-dire que seuls quelques électrons, en queue de distribution de Maxwell, ont une énergie suffisante pour ioniser. Pour les cathodes en tungstène, on ajoute 2% en poids de thorine (ThO₂), ce qui a pour effet de diminuer le potentiel d'extraction de 4,5V à 2,6V. D'autres dopants sont possibles comme par exemple Y₂O₂, CeO₂, La₃O₃ ou LaB₆ [28]. Cette diminution permet d'obtenir une densité de courant disponible au point de fusion, augmentée d'un facteur 1000 pour une même température [29] [30] ou de diminuer la température de fonctionnement de quelques centaines de degrés par rapport au tungstène pur.

En ce qui concerne les échanges thermiques au voisinage de la cathode, les ions, issus de l'ionisation du gaz et attirés par la zone de la chute cathodique, apportent de la chaleur alors que l'émission des électrons est un phénomène qui refroidit la cathode. Cependant, si la densité de courant (j) peut être partagée entre la densité de courant issue des électrons (j_e) et celle issue des ions (j_i), Heberlein [30] explique qu'avec des courant d'arc supérieurs à 50A, la densité de courant électronique domine très nettement celle des ions : $j_e \gg j_i$. En conséquence, le mécanisme prédominant est le refroidissement de la cathode par émission électronique. Ce refroidissement évacue jusqu'à 95% de l'énergie dissipée à la cathode.

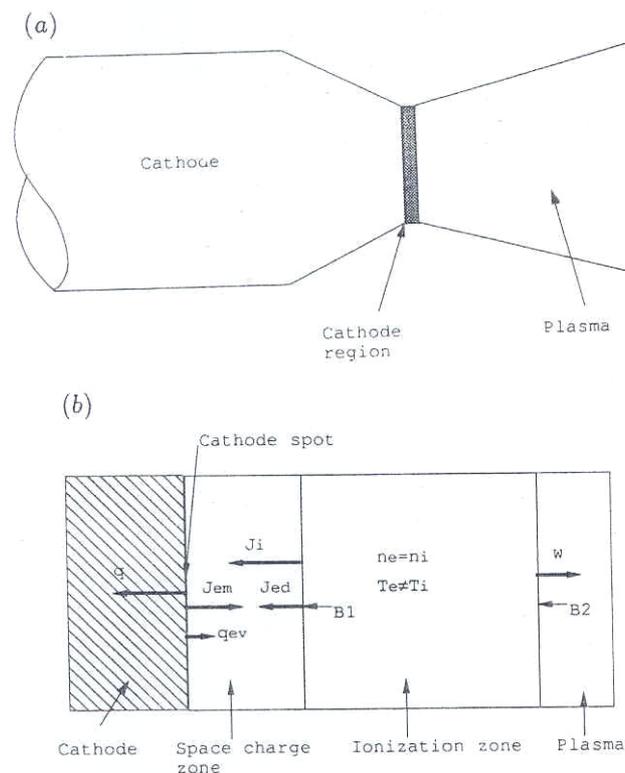


Figure 1-10 : Description de la zone cathodique [31]

L'anode a le rôle de collecteur d'électrons. Le pied d'arc (le lieu d'accrochage de l'arc sur l'anode) concentre un flux thermique important de l'ordre de 10^8 à 10^{10} W.m^{-2} sur une très petite surface (cf. paragraphe 6 pour son estimation) pendant de courts instants. Les flux thermiques sont donc assez difficiles à mesurer.

Heberlein [30] a montré que la majeure partie du flux thermique transféré à l'anode vient de l'énergie des électrons collectés. C'est la raison pour laquelle le matériau de l'anode est souvent du cuivre à cause de son fort coefficient de conductivité thermique ($\kappa_{\text{Cuivre}} = 401,96 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, à 300K et $\kappa_{\text{Cuivre}} = 345 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, à 900K, [32]) qui permet un bon transfert thermique. Cette propriété du cuivre permet aux anodes de satisfaire au temps de vie

requis dans l'industrie. En fait, le transfert de chaleur à l'anode repose sur l'énergie thermique et cinétique des électrons du courant d'arc qui traversent la surface de l'anode ainsi que sur le flux de chaleur issue de la condensation des électrons qui est proportionnel au potentiel d'extraction de l'anode (Φ_a) [33] [34].

$$\Phi_{\text{tha}} = j (5/2 * k T_e / e + U_a + \Phi_a)$$

Équation 1-6 : Transfert thermique à l'anode

Avec j , la densité de courant qui peut s'exprimer par la loi d'Ohm généralisée :

$$j = \sigma_e \cdot E - (\sigma_e / e \cdot n_e) \cdot \nabla p_e - \psi \cdot \text{grad}(T_e)$$

Où :

- σ_e : conductivité électrique ($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
- E : champ électrique ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)
- $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.
- n_e : densité électronique (m^{-3})
- p_e : pression partielle électronique (Pa)
- T_e : température électronique (K)
- ψ : coefficient de thermo – diffusion ($\text{A} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)

Équation 1-7 : Loi d'Ohm à l'anode

Selon Heberlein [30], dans la colonne d'arc, le terme $\sigma_e \cdot E$ prédomine, alors que sur les derniers millimètres avant la surface de l'anode, le gradient de densité électronique devient le terme le plus important.

Par ailleurs, la surface de l'anode en cuivre est souvent revêtue d'un matériau réfractaire (molybdène ou tungstène) grâce auquel la température de surface peut être plus élevée qu'avec du cuivre seul. Cela s'explique par leur plus faible conductivité thermique ($\kappa_{\text{Tungstène}} = 170,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, à 300K [32]). En contre partie, la surface du pied d'arc est plus large.

La forme de l'anode est le plus souvent cylindrique parce qu'elle n'est pas uniquement collectrice d'électrons mais elle joue aussi le rôle de constricteur de la colonne d'arc. Néanmoins, il existe des conceptions moins conventionnelles pour les formes d'anodes. Par exemple, dans ses torches à eau, Hrabrovsky [35] utilise une anode externe rotative.

1.2.3 La torche PTF4

La géométrie de l'anode et de la cathode est représentée par Figure 1-11.

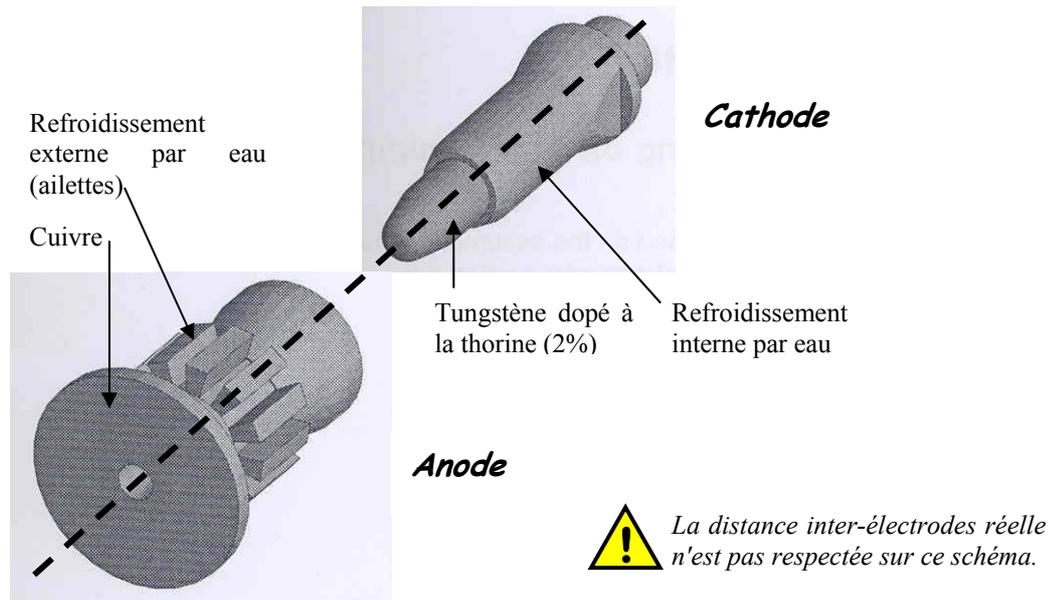
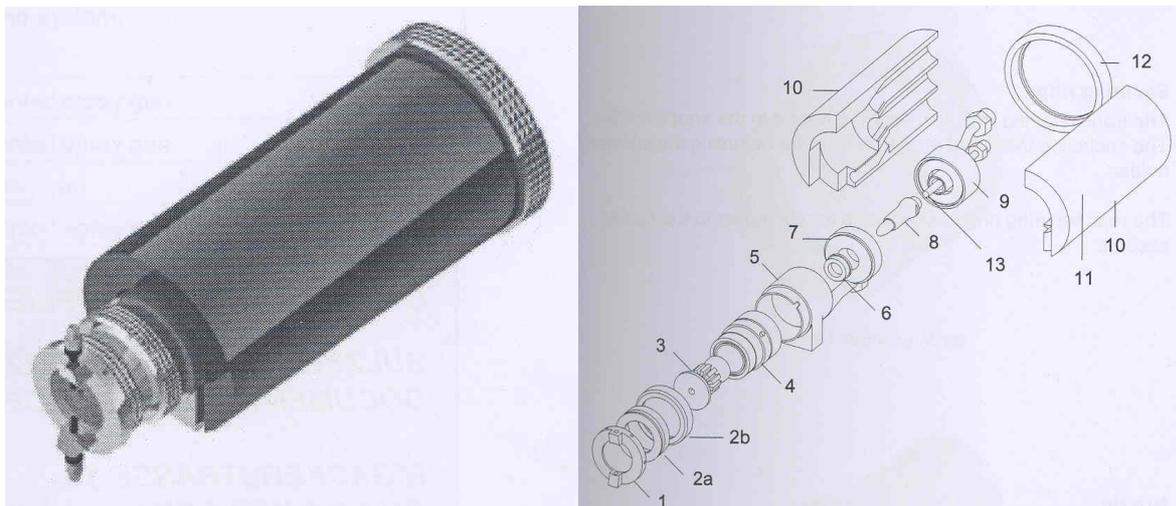


Figure 1-11 : Géométrie de l'anode et de la cathode (partiellement de [36])

Il y a autour de ces deux principaux éléments un ensemble de nombreuses pièces qui permettent d'unifier la torche en assurant une isolation entre la cathode et l'anode. Une vision d'ensemble et une vision éclatée d'une torche complète sont montrées sur la figure 2-2.



1 : anneau d'injecteur – 2a : vis de serrage avant – 2b : vis de serrage arrière – 3 : anode – 4 : Support de l'anode – 5 : Partie centrale – 6 : Anneau de distribution de gaz – 7 : Partie intermédiaire isolante – 8 : Cathode – 9 : Partie arrière – 10 : Coque – 11 : Vis – 12 : Anneau de sécurité – 13 : Canal pour l'eau de refroidissement.

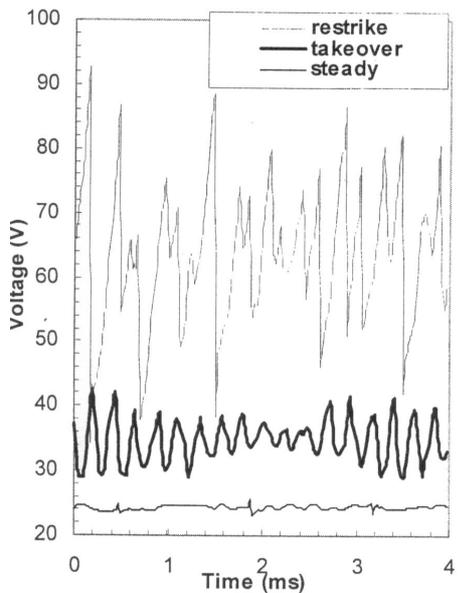
Figure 1-12: Vue globale et éclatée d'une torche plasma Sulzer Metco F4-MB (PTF4) [36]

1.3 Les fluctuations du pied d'arc

1.3.1 Description

Quand la couche limite froide (CLF) est assez chaude, les limites de la colonne d'arc principale deviennent instables et un passage pour le courant est alors possible. Cette création d'un nouveau chemin peut se produire selon n'importe quelle direction autour de l'axe de l'anode. De plus la colonne de connexion entre la colonne d'arc principale et l'anode est soumise à deux types de forces dont la résultante provoque son déplacement. Il y a une force dite hydrodynamique due à l'écoulement unidirectionnel du gaz dans la CLF, et une force électromagnétique en $\mathbf{j} \wedge \mathbf{B}$, due au lignes de courant parcourant la colonne de connexion qui agissent sur un champ induit par la géométrie courbe de la colonne de connexion. Ainsi les instabilités du plasma et les actions de ces forces sur l'arc provoquent un mouvement permanent du pied d'arc, décrit pour la première fois en 1967 par Wutzke et al [37]. Notons que dans ses expériences, Wutzke travaillait sous argon pur et utilisait une anode plane parallèle à l'axe de la cathode. Avec une anode neuve, le pied d'arc se déplace sous l'action des deux forces citées, mais dès que l'usure a rendue la surface anodique un peu rugueuse, le pied d'arc reste fixe et c'est la colonne de connexion qui s'allonge. L'épaisseur de la CLF (que l'on note e') joue un rôle majeur dans ces fluctuations. En général, avec un mélange plasmagène contenant des gaz diatomiques (H_2 , N_2), la CLF est épaisse, et le signal de tension évolue selon le mode "claquage – réamorçage" (*restrike mode* en anglais) [37][38][39]. Au contraire, avec des gaz monoatomiques (Ar, He), la CLF est plus fine que dans le cas précédent, et la tension aux bornes des électrodes suit le mode "intermédiaire" (*takeover mode* en anglais) qui se traduit par une variation aléatoire de la longueur de l'arc [30]. Il est bien entendu que tous les modes mixtes peuvent exister suivant la composition du mélange plasmagène. Il existe un troisième mode de fonctionnement appelé mode "stationnaire" (*steady mode* en anglais) où l'arc électrique ne fluctue pas. Ce mode ne se rencontre qu'avec des conditions d'utilisation extrêmes (une forte intensité du courant avec un très faible débit de gaz plasmagène monoatomique [40]). La colonne de connexion reste alors fixe sur un même point de la surface interne de l'anode, ce qui entraîne une érosion rapide et importante de la tuyère. La Figure 1-13 rapporte l'évolution des tensions selon les trois modes de fonctionnement d'une torche.

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 (cf. Figure 1-13) permettent d'avoir une estimation du mouvement et donc de la dynamique de l'arc électrique suivant les conditions opératoires.



Mode	Steady	Takeover	Restrike
Allure	plane	Triangulaire	"Dent de scie"
Valeur moyenne	25 V	35 V	65 V
Amplitude	Zéro	10 V	35-40V

Figure 1-13 : Les trois signaux de tension selon le mode de fonctionnement [41].

En effet, la tension mesurée entre les électrodes (V_{arc}) est la somme de la chute cathodique (V_c), de la tension d'arc (V_{col}) et de la chute anodique (V_a) (cf. Figure 1-14). Il est impossible, par une seule prise de tension sur une torche, de dissocier ces trois composantes et il est habituel de considérer que la somme $V_c + V_a$ reste constante. Sa valeur (10-15V) a pu être estimée à partir d'expériences spécifiques menées en arc transféré mais les résultats obtenus sont difficilement transposables. Ainsi seule la variation de la tension d'arc (V_{col}) est à l'origine de la variation de la tension globale aux bornes des électrodes (V_{arc}). Sachant que cette tension V_{col} peut être évaluée par $V_{col} = E_{colP} * L_{colP} + E_{colcnx} * L_{colcnx}$ avec E_{colP} , le champ électrique à l'intérieur de la colonne d'arc principale, L_{colP} sa longueur, et E_{colcnx} , le champ électrique à l'intérieur de la colonne de connexion et L_{colcnx} sa longueur, la variation de la tension d'arc peut être attribué à la variation d'un ou plusieurs de ces quatre paramètres. Il est généralement d'usage de considérer la colonne d'arc principale stable. E_{colP} et L_{colP} sont donc supposés constants. En supposant de plus que le champ à l'intérieur de la colonne de connexion ne varie pas, seul l'allongement de la colonne de connexion est responsable de la variation de tension globale aux bornes des électrodes.

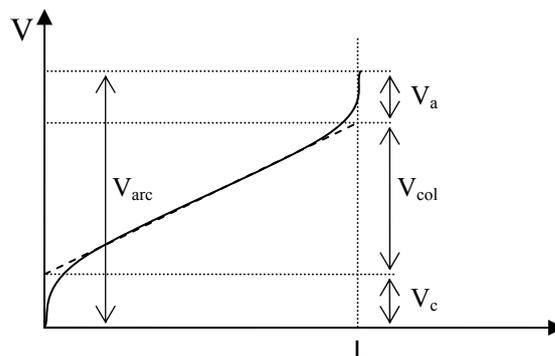


Figure 1-14 : Répartition de la tension aux bornes des électrodes d'une torche plasma.

Ce schéma correspond à un arc transféré où L est la distance qui sépare les deux points d'accroche de l'arc sur les deux électrodes (assimilable avec la longueur de l'arc).

1.3.2 Caractérisation

La transition entre le mode "steady" et les modes oscillants ("takeover" et "restrike") dépend de l'intensité du courant d'arc et du nombre de Reynolds dans la couche limite froide ($Re_s = \rho v s / \mu$) où μ est la viscosité dynamique (cf. Figure 1-15). Le nombre de Reynolds est lié à la géométrie de la torche (s est la distance entre l'axe de la cathode et la surface de l'anode) et au débit masse de gaz.

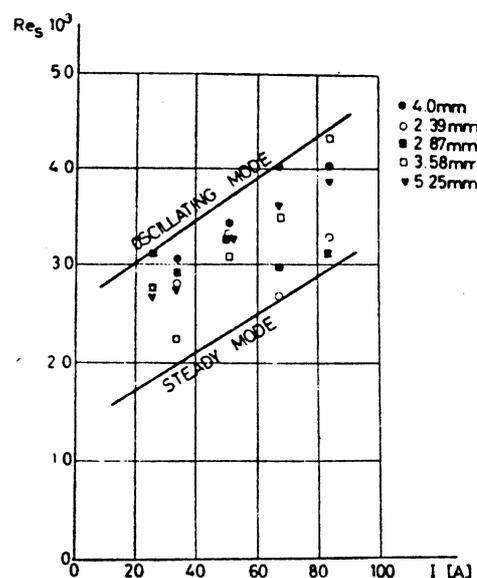


Figure 1-15 : Evolution du nombre de Reynolds (Re_s) pour la transition entre le mode "steady" et les modes oscillants ("Takeover" et "Restrike") [42]

En fait, l'existence d'un flux turbulent conduisant à une diffusion turbulente des porteurs de charges contribue à favoriser le claquage - réamorçage qui s'opère lors du mode "restrike". Russ et al. [43] ont proposé une relation entre l'épaisseur de la couche limite et le nombre de Reynolds (Équation 1-8) qui conduit à ce qu'à partir d'un fort débit masse de gaz entraînant un fort Re_s , on aboutisse à une couche limite de forte épaisseur. En conséquence, le mode "restrike" est peu probable tant que le flux est laminaire.

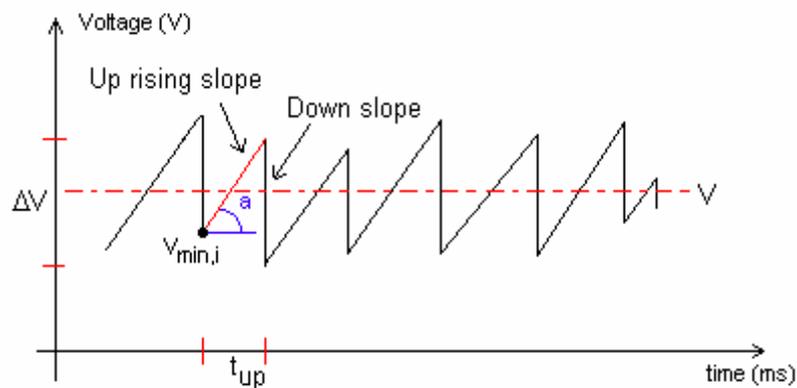
$$e' \# Re_s^{-1/2}$$

Équation 1-8 : Relation entre l'épaisseur de la couche limite (e') et le nombre de Reynolds

Un autre critère introduit par Duan et al. [44] permet de caractériser le mode de fonctionnement de la torche. Il est fondé sur l'analyse de la forme du signal de tension. Ce

paramètre appelé "valeur de mode" assigne un nombre aux instabilités de l'arc. Le mode "restrike" vaut 2, le mode "takeover" 1 et le mode "steady" vaut 0. Alors qu'un mode pur est assimilé à un nombre entier, un nombre décimal entre 0 et 2 est la signature d'un mode de fluctuation de la tension qui est mixte. Par exemple, la valeur de mode 1,2 représente un mode de fluctuation dont les caractéristiques sont à 80% celle du mode "takeover" et à 20% celle du mode "restrike".

Pour calculer la valeur de mode, la forme du signal de tension est utilisée pour distinguer le mode "takeover" du mode "restrike" et l'amplitude des fluctuations sert à distinguer le mode "takeover" du mode "steady". Un facteur de forme, S, et un facteur d'amplitude, A, sont calculés selon les formules ci-dessous (cf. Figure 1-16) :



$$S = \frac{t_{up}}{t_{down}} \quad \text{and} \quad A = \frac{\Delta V}{V} * 100\%$$

Avec t_{up} : la durée d'une rampe de tension (s)
 t_{down} : la durée d'une chute de tension (s)
 ΔV : l'amplitude des fluctuations de tension (V)
 V : la tension moyenne (V)

Figure 1-16 : Calcul des facteurs utilisés dans la détermination de la valeur de mode.

Duan et Heberlein ont proposé l'attribution des valeurs de mode selon ce qui suit :

- Si $A > 10\%$ et $S > 5$, l'arc est supposé être parfaitement en mode "restrike", la valeur de mode = 2.0.
- Si $A > 10\%$ et $S < 1.1$, l'arc est supposé en mode "takeover", la valeur de mode = 1.0.
- Si $A < 2\%$, l'arc est considéré comme fonctionnant selon le mode "steady", la

valeur de mode = 0.0.

- Si $A > 10\%$ et $S < 5$, l'arc est considéré comme fonctionnant selon un mélange de mode "restrike" et "takeover" et la valeur de mode = $1 + (S-1.1)/3.9$.
- Si $2\% < A < 10\%$, l'arc est supposé être en mode mixte "takeover-steady" et la valeur de mode = $(A-2\%)/8\%$.

Travailler directement le signal de tension n'est pas l'unique moyen de caractériser un mode de fonctionnement de la torche. Le domaine fréquentiel est aussi riche que le domaine temporel. C'est pourquoi l'utilisation de traitements du signal tels que les transformées de Fourier ou les transformées en ondelettes est largement répandue dans l'étude des diagnostics des torches à plasma. Nous reviendrons par la suite sur l'interprétation des spectres issus des signaux émis par la torche. Notons tout de suite, que dans ce document, un signal est un graphique dont l'abscisse est le temps alors qu'un spectre a des fréquences (Hz) sur l'axe des x.

1.3.3 Les relations entre les fluctuations et les paramètres de fonctionnement

Ce paragraphe présente l'importance de la durée de vie du pied d'arc, noté τ , et l'épaisseur de la couche limite froide (e'). Une relation existe entre ces deux paramètres. Une simple approche permet de poser qu'un claquage se produit quand la tension entre la colonne d'arc principale et la surface interne de l'anode (V) est égale ou plus grande que la tension de disruption (V_{Dis})

$$\text{Soit : } V_{Dis} = E_{Dis} \cdot e' \qquad \text{Avec : } e' = (d - D_{arc}) / 2$$

$$\text{Posons : } V = V_{Min} + V_{arc} = V_{Min} + E \cdot v_{arc} \cdot t$$

$$\text{Quand un claquage se produit au temps } t = \tau : \quad V_{Dis} = V_{Min} + E \cdot v_{arc} \cdot \tau$$

Finalement :

$$E_{Dis} \cdot e' = 2V_{Min} + 2E \cdot v_{arc} \cdot \tau$$

Équation 1-9 : Relation entre l'épaisseur de la CLF et la durée de vie du pied d'arc

Équation 1-9 permet de mettre en évidence l'importance de la durée de vie du pied d'arc sur les fluctuations de l'arc électrique. En fait la valeur de τ régit l'usure des électrodes puisqu'elle illustre le temps de stagnation du pied d'arc sur un même endroit de la tuyère. Plus la durée τ est élevée, plus l'érosion est rapide et grande. De plus ces équations simples

permettent de juger de l'influence du diamètre de la colonne d'arc (D_{arc}) sur le temps de stagnation du pied d'arc : plus le diamètre de la colonne d'arc principale est élevée, plus ce temps augmente. Les paramètres externes qui gouvernent l'augmentation du diamètre D_{arc} sont une augmentation de l'intensité du courant (I), une diminution de la conductivité thermique du mélange plasmagène (κ) et une diminution du débit masse de gaz (G). Mais une baisse du débit masse induit que l'arc s'allonge moins. En effet, les paramètres sont liés entre eux et seules des expériences peuvent orienter la compréhension de leurs influences sur les caractéristiques de l'arc. Le paragraphe suivant rapporte ce qui a déjà été accompli dans ce domaine.

1.3.3.1 Corrélations établies par Planche

En 1995, Planche [45] établit, pour une torche plasma fonctionnant en atmosphère d'air (APS), les relations paramétriques impliquant le débit masse de gaz plasmagène (G en $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$), l'intensité du courant (I en A) et le diamètre de la tuyère – anode (d en m).

La forme du signal de tension pour une torche fonctionnant dans le mode "restrike" est schématisée sur Figure 1-17 :

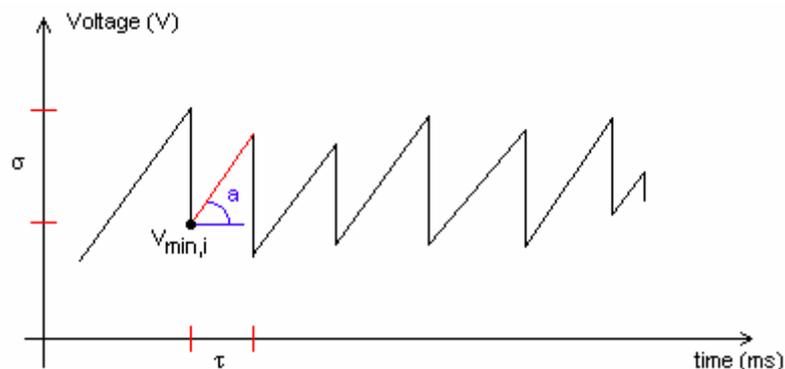


Figure 1-17 : Schématisation du signal de tension en mode "restrike"

Où σ représente l'amplitude de tension pendant l'allongement de la colonne d'arc. τ est la durée de stagnation du pied d'arc sur un endroit et a est la pente de la rampe de tension. Enfin, on appelle ν la fréquence caractéristique du mode "restrike" ($\nu = 1 / \tau$).

Lors des mesures effectuées par Planche, les pentes des rampes de tension sont plus ou moins bien parallèles, ce qui permet d'écrire alors : $\sigma_{\text{mean}} = a \cdot \tau_{\text{mean}}$

A partir de nombreuses expériences et à l'aide des travaux de Yas'ko [46], Planche a réussi à trouver trois relations liant σ , τ et a avec G , I et d .

$$(\sigma_{\text{upstream restrike}} + U_a) = K \cdot I^{-0.3} \cdot G^{0.31} \cdot d^{0.39}$$

avec $K = 1,18 \cdot 10^4$ pour Ar-H₂ (25%vol) ou $K = 1,24 \cdot 10^4$ pour N₂.

Équation 1-10

$$(\sigma_{\text{downstream restrike}} + U_a) = K \cdot I^{-0.38} \cdot G^{0.26} \cdot d^{0.54}$$

avec $K = 1,92 \cdot 10^4$ pour Ar-H₂ (25%vol) ou $K = 1,95 \cdot 10^4$ pour N₂.

Équation 1-11

On peut constater que pour chacune des deux équations (Équation 1-10 et Équation 1-11), l'augmentation de l'amplitude des sauts de tensions peut être associée à :

- Soit une augmentation du débit masse de gaz plasmagène (G)
- Soit une augmentation du diamètre de la tuyère (d)
- Ou une diminution de l'intensité du courant (I)

En fait, ces trois tendances contribuent à augmenter l'épaisseur de la couche limite froide (effet de I et d) ou favorisent la constriction de la colonne d'arc principale (effet de G).

$$a = K \cdot I^{-0.06} \cdot G^{0.72} \cdot d^{-0.68}$$

avec $K = 1,69 \cdot 10^6$ pour Ar-H₂ (25%vol.) et $K = 2,15 \cdot 10^6$ pour N₂.

Équation 1-12

Comme on peut le voir, les deux paramètres les plus influents sont le diamètre interne de la tuyère – anode et le débit de gaz plasmagène alors que l'intensité du courant n'a qu'une relativement faible conséquence sur a et σ . Ceci peut être expliqué par le fait qu'avec un fort débit de gaz, l'allongement de la colonne d'arc principale est plus rapide, ce qui a pour conséquence de rendre plus raides les pentes de rampes de tension. Mais quand le diamètre de la tuyère augmente, le volume où passe le gaz augmente, et à débit constant, le soufflage de la colonne de connexion est moins efficace, ce qui résulte en une pente plus faible.

$$\tau_{\text{upstream}} = K \cdot I^{-0.64} \cdot G^{-0.26} \cdot d^{2.21}$$

Avec $K = 49,7$ pour Ar-H₂ (25%vol.) ou $K = 38,5$ pour N₂.

Équation 1-13

$$\tau_{\text{downstream}} = K \cdot I^{-0.66} \cdot G^{-0.30} \cdot d^{2.35}$$

Avec $K = 60,1$ pour Ar-H₂ (25%vol.) ou $K = 48,9$ pour N₂.

Équation 1-14

En résumé, Planche a montré que la durée de vie d'un pied d'arc évolue avec les

paramètres d'entrées de la torche selon la formule approximative suivante :

$$\tau_{mean} \approx K \frac{d^2}{(GI^2)^{1/3}}$$

Équation 1-15 : la durée de vie du pied d'arc, fonction des paramètres d'entrée

τ est fortement influencé par le diamètre de la tuyère. Avec une importante valeur de d , la colonne d'arc principale est plus éloignée des parois de l'anode. En conséquence la tension de disruption nécessaire, doit être plus élevée. Ainsi le nombre de réamorçages est plus faible ce qui augmente la durée de vie du pied d'arc.

Au contraire, augmenter l'intensité du courant provoque un gonflement de la colonne d'arc principale. La distance colonne d'arc – paroi de l'anode est réduite et de plus petites fluctuations de l'épaisseur de la couche limite froide peuvent initier un claquage en amont.

Enfin, dans le cas d'une augmentation du débit de gaz plasmagène, la diminution de la durée de vie du pied d'arc peut s'expliquer par un allongement et un soufflage du point d'accrochage de l'arc qui sont plus rapides. Ceci conduit à des claquages plus fréquents.

$$V_{\min, \text{upstream restrike}} - U_a - U_c = K \cdot I^{0.28} \cdot G^{0.36} \cdot d^{-0.55}$$

Avec $K = 3,77$ pour Ar-H₂ (25%vol) et $K = 6,13$ pour N₂.

Équation 1-16

$$V_{\min, \text{downstream restrike}} - U_a - U_c = K \cdot I^{0.22} \cdot G^{0.34} \cdot d^{-0.45}$$

Avec $K = 10.31$ pour Ar-H₂ (25%vol) et $K = 16$ pour N₂.

Équation 1-17

Quel que soit le type de claquage (en amont – *upstream* en anglais ou en aval – *downstream* en anglais), il apparaît clairement (cf. Équation 1-16 et Équation 1-17) qu'augmenter l'intensité du courant conduit à augmenter la valeur de V_{\min} , c'est à dire la tension minimale de l'arc, qui indique la position la plus proche du point d'accrochage vis-à-vis de la pointe de cathode. Une augmentation du diamètre conduit quant à elle, à une diminution de V_{\min} . Il est à noter que l'influence du diamètre est plus importante que celle de l'intensité du courant. L'évolution de V_{\min} est liée aussi à l'épaisseur de la couche limite froide. En effet, quand cette dernière est faible, la tension de disruption nécessaire est plus faible ce qui rend plus aisé le phénomène de claquage – réamorçage près de la pointe de cathode. Ces études ont toujours été faites à la pression atmosphérique et l'influence des variations de pression n'a pas été abordée.

1.3.3.2 Corrélations établies par Kaminska et al.

Durant la même période en 1995, Kaminska et Dudeck [47] ont établi deux relations (Équation 1-19 et Équation 1-20) entre ν la fréquence des sauts, et σ et les trois paramètres p , la pression de la chambre d'arc, G , le débit de gaz plasmagène et I , l'intensité du courant à partir d'essais sur un plasmatron à anode segmentée. Il faut préciser que la géométrie est cependant différente et ne s'apparente pas à celle d'une torche de projection (cf. Figure 1-18)

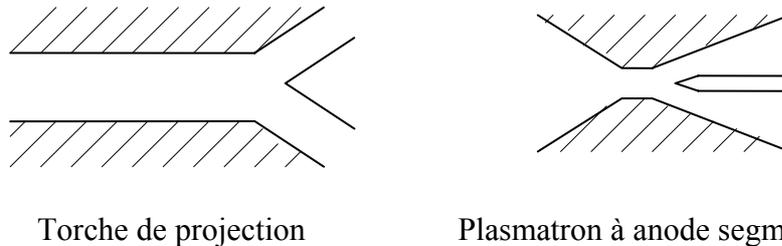


Figure 1-18 : schémas de la torche utilisée par Planche et du plasmatron utilisé par Kaminska

$$\nu = (1/\tau) = p^{-\beta} \cdot G \cdot I^{\chi}$$

Avec $\beta=0.81$ pour Ar et $\beta=1.04$ pour N_2 avec $\chi=0,4/0.46/1$ (pour $p=80/300/760$ Torr)

Équation 1-18

$$\sigma = \text{Cte. } p \cdot G^2 \cdot I^{0.9}$$

Équation 1-19

1.3.3.3 Corrélations établies par Pauvit et al.

La relation suivante est proposée [48] pour établir un lien entre les paramètres indépendants d'entrées de la torche que sont G , I et d et la fréquence principale du spectre de tension pour une torche plasma :

$$\nu \# I^{0.14} \cdot G^{0.83} \cdot d^{-2.97}$$

Équation 1-20

Cette équation peut être simplifiée en la mettant sous la forme suivante :

$$\nu \# G \cdot d^{-3}$$

Équation 1-21

Le temps caractéristique τ est ici interprété comme étant le temps nécessaire pour remplir un volume caractéristique (nommé volume anodique) avec le gaz chaud et l'expulser hors de la tuyère avant de le remplacer par un autre volume anodique de gaz froid.

1.3.3.4 Conclusion

Les exposants des différentes équations présentées dans ce chapitre diffèrent un peu les uns des autres. Ceci est dû aux conditions expérimentales qui furent différentes selon les auteurs en particulier les modes d'injection de gaz étaient différents). Cependant, les tendances générales qui se dégagent sont toutes équivalentes : l'épaisseur de la couche limite froide joue un rôle primordial sur l'amplitude des sauts de tensions (σ) et sur la durée de vie des pieds d'arc (τ). Cette épaisseur est déterminée par le diamètre de la tuyère – anode, et celui de la colonne d'arc principale, qui s'accroît avec l'intensité du courant et diminue avec le débit de gaz plasmagène.

1.4 Les autres paramètres liés aux fluctuations

1.4.1 Le son

1.4.1.1 Génération du son

Un arc électrique est un générateur d'ondes acoustiques de fortes amplitudes. Les premiers travaux théoriques sur le processus d'excitation et sur les conditions de propagation des ondes acoustiques liés à un environnement plasma sont attribuables à Ingard [49]. Ses travaux établissent une équation de propagation incluant un terme de génération d'ondes.

L'arc électrique transforme l'énergie électrique reçue en énergie thermique qui est transmise entre 20 et 60 % aux électrodes, entre 38 et 78% aux gaz plasmagènes et pour 2% à la couche limite froide. Dadgar [50] et Fitaire [51] expliquent pour leur part que chaque perturbation qui se produit lors du transfert d'énergie entre l'arc et le gaz tend à modifier l'équilibre de ce dernier, ce qui est la source des ondes acoustiques.

1.4.1.2 Propagation

Fondé sur la théorie de l'hydrodynamique, l'équation de propagation repose sur les hypothèses suivantes :

- Le gaz est parfait et sa température est uniforme.
- Le gaz est considéré comme un milieu continu. Cela signifie que les longueurs d'ondes et les pressions du gaz neutre sont telles que la fréquence des collisions entre particules neutres est plus élevée que la fréquence de l'onde.

Les deux équations utilisées pour obtenir l'équation de propagation sont :

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \rho \cdot \text{div}(\vec{u}) = Q$$

Équation 1-22

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\text{grad}(p) + \frac{4}{3} \mu \cdot \text{grad}(\text{div}(\vec{u})) - \mu \cdot \text{rot}(\text{rot}(\vec{u})) + \vec{F}$$

Équation 1-23

Où : δ est la perturbation de la densité ρ (m^{-3}) \mathbf{u} est le vecteur de la vitesse perturbée ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) p est la perturbation de la pression p_0 (Pa) μ est le coefficient de viscosité du gaz (Pa.s)

\mathbf{F} et \mathbf{Q} sont les quantités perturbées de F_0 et Q_0 , respectivement la force appliquée sur une unité de volume de gaz et la masse de ce volume.

Finalement, en appliquant les propriétés des gaz parfait, il découle de ces deux équations, une équation représentant la propagation d'un son émis par un plasma :

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{\gamma - 1}{c^2} \frac{\partial H}{\partial t} + \text{div} F - \frac{\partial Q}{\partial t}$$

Équation 1-24 : Equation de propagation d'un son généré par un plasma

H est la perturbation du premier ordre de l'enthalpie par unité de temps et par unité de volume H_0 , c est la vitesse du son et γ est le coefficient adiabatique. C'est une équation non – homogène où se retrouvent trois termes sources. Ils sont liés au transfert de quantité de mouvement, au transfert de masse et au transfert thermique.

✚ Simplification de l'équation de propagation

A partir de l'Équation 1-24, Dadgar et Fitaire expliquent que le transfert de quantité de mouvement et le transfert de masse peuvent être écartés du calcul, en soulignant l'importance du transfert d'énergie.

- *Transfert de quantité de mouvement* : Les particules chargées entrent en collision avec le gaz et appliquent globalement une force moyenne \mathbf{F} qui peut être divisée entre \mathbf{F}_e et \mathbf{F}_i , respectivement liées aux électrons et aux ions. Le point important à retenir est que ces deux forces tendent à se compenser l'une l'autre. L'effet de \mathbf{F} peut

donc être négligée. D'autant plus que c'est l'opérateur divergence qui lui est appliqué, minimisant encore son effet.

- *Transfert d'énergie* : Cet échange est effectué depuis les particules chargées de l'arc, jusqu'aux particules de gaz et aux électrodes. Dans un état stationnaire et à la pression atmosphérique, les électrons, les ions et les neutres ont la même plage de température et l'échange est équilibré. Mais les particules chargées ont un mouvement de dérive dont la vitesse est proportionnelle au champ électrique E dans l'arc

$$\mathbf{v}_D = \mu_p \cdot \mathbf{E}$$

μ_p est la mobilité de ces particules ($m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$). Il découle alors de ce mouvement un courant dont l'intensité \mathbf{j}_D est :

$$\mathbf{j}_D = q \cdot n \cdot \mathbf{v}_D = q \cdot n \cdot \mu_p \cdot \mathbf{E}$$

q et n sont la charge (C) et la densité (m^{-3}) des particules chargées. Ce courant soumis à un champ électrique E absorbe l'énergie \underline{E} :

$$\underline{E} = \mathbf{j}_D \cdot \mathbf{E} = q \cdot n \cdot \mu_p \cdot E^2$$

La part donnée à une unité de volume de gaz pendant une seconde (H_0) est proportionnelle à E^2 (valeur locale de l'arc électrique).

Il faut préciser que la mobilité des électrons est beaucoup plus élevée que celle des ions (dans un rapport $(m_i/m_e)^{1/2}$). En conséquence, l'énergie reçue par le gaz est pour sa plus grande partie issue de celle des électrons.

Ainsi pour toute variation de la tension enregistrée, il y a une relation de proportionnalité entre H (l'énergie reçue par le gaz neutre) et W (l'énergie électrique fournie par l'arc électrique).

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial W}{\partial t}$$

- *Transfert de masse* : Toutes les perturbations liées à l'équilibre entre ionisation et recombinaison correspondent à un gain ou une perte de particules neutres. Dadgar et Fitaire expliquent que ce phénomène peut être considéré comme mineur en

comparaison avec le transfert d'énergie.

✚ En résumé...

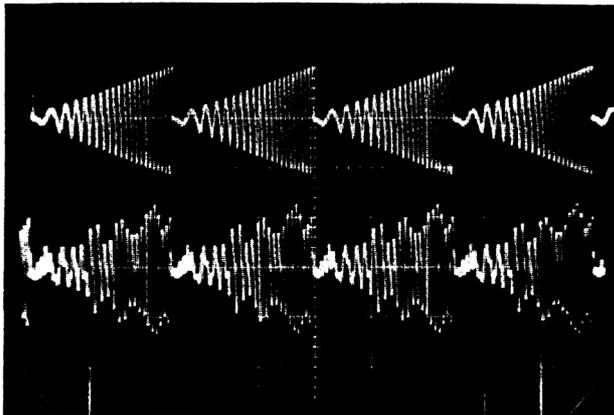
$$A_a = \alpha \cdot \frac{\gamma - 1}{c^2} \cdot \frac{\partial W}{\partial t}$$

Équation 1-25 : Relation de l'amplitude des ondes acoustiques avec la puissance instantanée.

Toute perturbation introduite dans un arc électrique est la source d'ondes acoustiques. Les fluctuations de la pression acoustique sont uniquement le résultat des transferts d'énergie. De plus, l'amplitude A_a de ces ondes acoustiques est proportionnelle à la dérivée par rapport au temps de la puissance, ce qui avec une intensité du courant constante (la plus part des cas avec des torches de projection plasma à courant continu), signifie la proportionnalité avec la dérivé de la tension

✚ Vérification expérimentale

Dadgar et Fitaire ont testé expérimentalement leur théorie. La Figure 1-19 montre la dérivée par rapport au temps de la puissance d'un arc mise en parallèle avec l'amplitude du signal acoustique correspondant. Il apparaît que la théorie est confirmée pour les conditions qui furent les leurs.



Dérivée de la puissance.

Amplitude acoustique du bruit.

Figure 1-19 : Vérification expérimentale de la relation entre le son et la puissance d'un arc électrique [51].

1.4.1.3 Relation entre le son et la tension

Le son émis par la torche est donc le résultat des fluctuations de la tension de l'arc électrique. Aussi des études ont montré que les fréquences de fluctuations des deux

phénomènes étaient fortement identiques (cf. Figure 1-20)

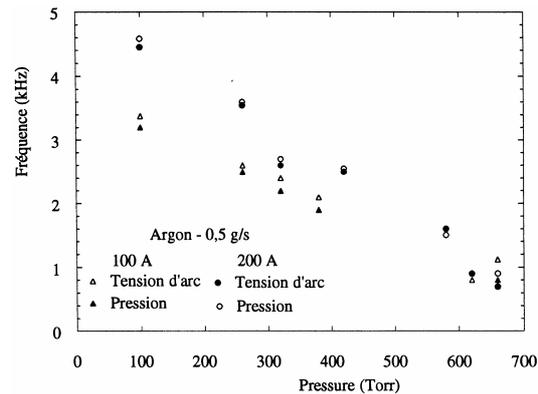


Figure 1-20 : Evolutions des fréquences de tension et son émis par une torche plasma en fonction de la pression [47].

Kaminska [47] a montré que quelle que soit l'intensité du courant d'arc et quelque soit la pression, les fluctuations enregistrées sur les signaux du son suivaient celles correspondant à la tension.

1.4.1.4 Le cône de silence

Pauvit [48] a souligné l'existence d'un cône de silence dans une zone conique autour de l'axe de sortie de la torche. Dans cette zone, le son est d'amplitude plus faible qu'ailleurs autour. Il a utilisé une torche munie d'une injection longitudinale de gaz plasmagène (de type CPM 200 conçue par SAF) et il a fonctionné à l'argon pur à la pression atmosphérique. Il est intéressant de souligner que cette découverte a été réalisée à partir d'analyse par des transformées en ondelettes. Ces travaux sont représentés ci-dessous (cf. Figure 1-21).

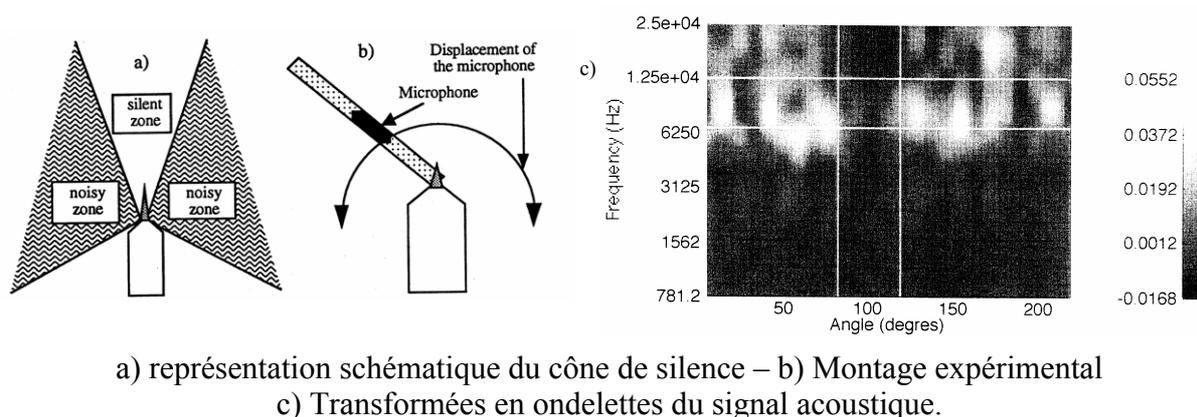


Figure 1-21 : L'expérience du cône de silence [48].

Cet effet est attribué à une réfraction des ondes sonores par le gradient de densité au sein du plasma lui-même engendré par le gradient de température.

1.4.2 Les fluctuations de la lumière du jet plasma

La tension est mesurée la plupart du temps aux bornes de la torche, c'est-à-dire directement sur les électrodes, alors que l'intensité lumineuse émise par le plasma est enregistrée grâce à un système optique en dehors de la torche. Pour un même phénomène, il y a donc un retard des signaux lumineux par rapport à ceux de tension. Ce retard est généralement noté Θ . Son expression fut donnée par Planche :

$$\Theta = \frac{L_{ro}}{v} = \frac{L_{co} - L_{cr}}{v}$$

Où : L_{ro} est la distance "nouveau point d'accrochage – axe optique" (m)
 v est la vitesse du flux (supposée constante)
 L_{co} est la distance fixe "pointe de cathode – axe optique" (m)
 L_{cr} est la distance "point de cathode – nouveau point d'accrochage" (m)

Équation 1-26 : Définition du retard tension-lumière (cf.

Figure 1-22)

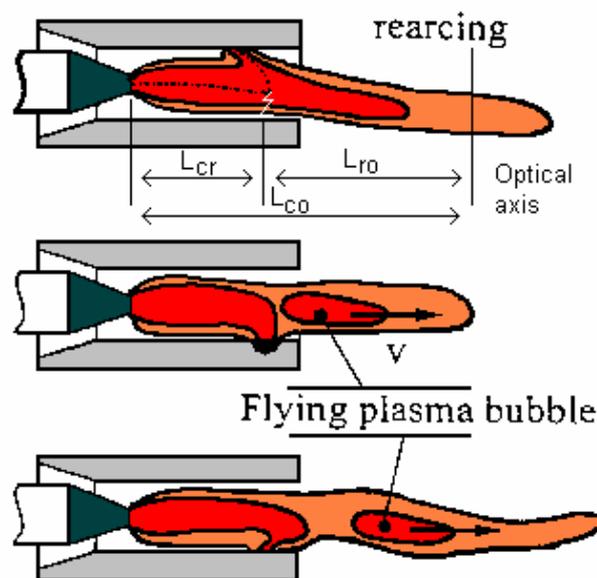


Figure 1-22 : Représentation des longueurs définissant le retard du signal optique

Sachant que la longueur de la nouvelle colonne d'arc (L_{cr}) peut être mise en relation avec la tension minimum (V_{Min}), la chute cathodique (U_c), la chute anodique (U_a) et le champ électrique moyen dans l'arc (E) selon :

$$V_{Min} = U_a + U_c + E.L_{cr}$$

On peut donc exprimer Θ comme une fonction linéaire de la tension minimale :

$$\Theta = \frac{L_{co}}{v} - \frac{V_{Min} - U_a - U_c}{E.v}$$

Équation 1-27 : Le retard lumineux en fonction de la tension minimale

1.5 L'érosion des électrodes

1.5.1 La cathode

1.5.1.1 Effet sur la vitesse

Quand une cathode est neuve, son extrémité (émettrice d'électrons) est généralement lisse et pointue. Cette géométrie permet d'exploiter de manière optimale l'effet Maecker qui permet de constricter cette partie de la colonne d'arc. Le profil de vitesse qui découle de l'utilisation d'une cathode neuve est alors caractéristique : il y a un fort gradient de vitesse avec un maximum sur l'axe relativement élevé (cf. Figure 1-23 "Sharp cathode"). Au fur et à mesure que le temps s'écoule, un arrondissement de la pointe de cathode est observé certainement dû à la fusion du matériau soumis au bilan énergétique à la cathode. La forme de la cathode devient alors quasi plane sur quelques millimètres carrés avec autour une couronne de gouttes resolidifiées. L'effet Maecker est donc moindre avec une cathode usée et l'arc est donc moins constricté à cette extrémité. Sur le profil de vitesses, cela se note par une atténuation des vitesses maximales et une répartition des vitesses plus homogènes (cf. Figure 1-23 "Rounded cathode"). Puisque la vitesse du jet plasma affecte celle des particules injectées, et sachant que les distributions de température et de vitesse sont les paramètres les plus importants sur l'évolution de la trajectoire, de la température et de la vitesse des particules injectées, il est clair que l'érosion de la cathode joue ici un rôle majeur au moins au début du fonctionnement (les premières heures) avec des électrodes neuves.

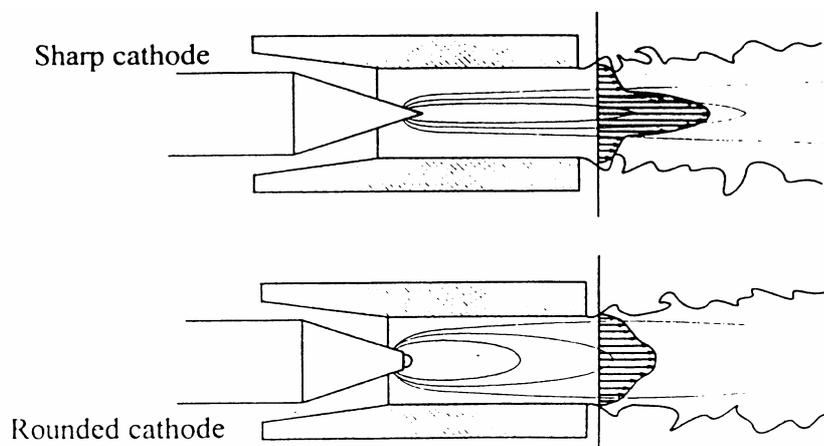
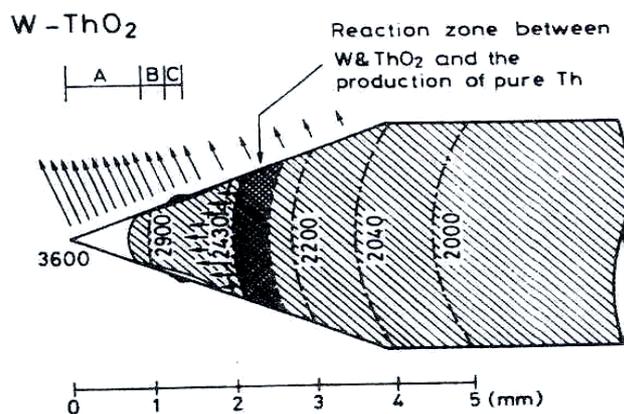


Figure 1-23 : Profil de vitesse, fonction de l'usure de la cathode

1.5.1.2 Diffusion de la thorine

De nombreuses expériences ont déjà été menées pour appréhender les phénomènes d'érosion aux électrodes [52] ainsi que des approches théoriques [31] validées expérimentalement [53]. Il en découle que l'érosion de la cathode augmente principalement à cause de la diffusion de la thorine vers la pointe de la cathode suivie de sa réduction par le tungstène puis de l'évaporation du thorium. En effet Ushio [28] a quantifié par EDX les éléments présents dans une cathode initialement en tungstène dopé de thorine à 2% en masse et ayant fonctionné 30 ou 60 minutes. Une érosion relativement rapide se met en place dès les premiers instants de fonctionnement de la torche [54]. La distribution spatiale de l'oxyde ainsi que le profil de température sur l'axe de la cathode sont représentés sur Figure 1-24.



Les zones hachurées marquent la présence de l'oxyde après l'utilisation de l'électrode. La température axiale de la cathode est comprise entre 2000 et 3600K. Les flèches représentent le

Figure 1-24 : Diffusion, décomposition et évaporation de la thorine dans la cathode [28].

Au regard des températures élevées de fusion (3323K) et de réduction par le tungstène (entre 2200 et 2430K), selon Ushio, la vitesse de diffusion de la thorine dans le matériau est plus faible que le taux d'évaporation. En conséquence, la pointe de la cathode perd la thorine et fonctionne au tungstène pur. Zhou confirme cette raréfaction du thorium en pointe de cathode par des analyses métallurgiques des cathodes après fonctionnement à différents intervalles de temps, [30] [55]. Il ajoute [55] que la forme initiale de la cathode n'a pas d'effet sur l'érosion en ce qui concerne les cathodes en tungstène car le principal mécanisme d'érosion est l'éjection de matériau cathodique fondu. Pour des cathodes en tungstène thorié à 2%, la géométrie a un faible effet sur la température de pointe de cathode mais joue un rôle important dans l'érosion. Le thorium disparaît au niveau du spot cathodique par évaporation, ce qui augmente le travail d'extraction de la cathode. Il y a un dépôt de thorium et de cristaux de tungstène sur la surface de la cathode en dehors de la zone du spot cathodique. Ces cristaux forment un anneau dont la localisation est déterminée principalement par la température de surface de la cathode plutôt que par la distance par rapport à la pointe de cathode. La

conclusion, en terme de conception de cathode, est qu'il faut éviter les forts gradients de température obtenus avec un refroidissement excessif de la cathode. Une amélioration des émetteurs thermoioniques passe par l'utilisation de dopants ayant à la fois un faible travail d'extraction et un faible taux de diffusion dans la matrice métallique. A ce propos des études sur différents oxydes de terres rares ont montré que la thorine pourrait être remplacé par des dopants plus stables comme LaB6 par exemple [28].

L'influence des gaz plasmagènes sur la vitesse d'érosion a aussi fait l'objet de recherches. Ainsi quelle que soit la géométrie de la cathode, avec une utilisation d'hélium en gaz plasmagène, on observe une forte évaporation due aux fortes températures de surfaces de la cathode, qui est compensée par une condensation. Le bilan conduit finalement à un faible taux d'érosion [54]. Par ailleurs, l'érosion de la cathode est en général liée à sa température et la température du spot cathodique est principalement déterminée par les caractéristiques de l'arc (c'est-à-dire la densité du courant) et par le matériau de la cathode [56] [57]. Les profils de température de la pointe de cathode obtenus avec deux gaz plasmagènes différents sont comparés pour de l'argon pur et un mélange argon - hydrogène (cf. Figure 1-25). 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.

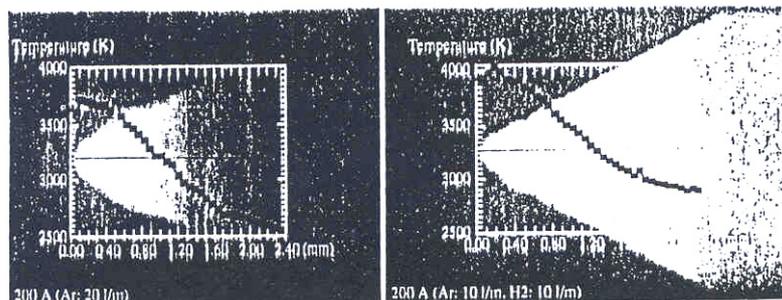


Figure 1-25 : Influence du gaz sur la température du spot cathodique. [30]

A propos de l'influence du courant sur l'érosion, il y a une forte dépendance de ce paramètre avec la nature du matériau. En effet, dans le cas d'une cathode en tungstène, il a été montré que la constriction de l'arc a un fort effet sur la densité de courant au niveau du spot cathodique mais peu d'influence sur la température de la cathode. Il a aussi été trouvé que la conduction de la chaleur à l'intérieur de la cathode ainsi que le rayonnement issu de la surface de la cathode contrôlent le transport d'énergie depuis le spot cathodique avec des courants

faibles. Par contre avec de forts courants, c'est la dissipation par émission thermoionique d'électrons qui domine. Les conclusions sont qu'avec de forts courants, l'érosion peut être minimisée en utilisant un matériau pour la cathode avec une faible pression de vapeur saturante et que pour ces conditions, la conception du refroidissement thermique joue un rôle secondaire. Par contre, pour de faibles courants, l'érosion sera déterminée par les caractéristiques thermiques du matériau de la cathode [57]. De plus, avec de faibles courants d'arc, jusqu'à 50% du courant est porté par les ions. La chaleur qui entre dans la cathode est équilibrée par les pertes de chaleur par conduction et par rayonnement. En conséquence, l'érosion de la cathode peut être contrôlée par la conception thermique de la cathode. Cependant, avec de forts courants, le refroidissement de la cathode est assuré principalement par l'émission thermoionique des électrons et le transport du courant est assuré en majorité par ces électrons.

1.5.2 L'anode

1.5.2.1 L'arrachement de particules de tungstène et la contamination du dépôt

Les inserts de tungstène sont fabriqués par frittage de particules de quelques dixièmes de mm de diamètre. Après un certain nombre d'heure de fonctionnement, étant donné les conditions thermiques sévères, de petites particules de tungstène peuvent être arrachées de la surface interne de l'anode et ainsi venir se déposer sur le dépôt en construction. Les travaux de Wigren [58] montrent les méfaits de ce genre de pollution par le tungstène sur des barrières thermiques de ZrO_2 . Le problème lié au tungstène réside dans le fait qu'il s'oxyde très vite à haute température (au-delà de 1300K). Moins de deux minutes sont nécessaires à 1273K dans l'air pour former deux importantes couches d'oxydes sur des particules de tungstène. Le gain massique est d'approximativement 25% de la masse initiale mais l'expansion volumique atteint trois fois le volume initial. Il n'y a pas d'évaporation à ces trop faibles températures (on note juste une perte de masse à 1273K et 1373K liée à la dissociation de WO_3 en WO_{3-x} et O_2). Ainsi quand des particules de tungstène sont éjectées de la torche et viennent s'inclure dans le dépôt en construction, leur accroissement volumique lié à leur oxydation provoque des fissures qui fragilisent la cohésion du dépôt. Le processus de fissuration du dépôt est représenté sur la Figure 1-26. Le déroulement de la fissuration est le suivant : (1) une petite particule de tungstène non encore oxydée s'insère dans le dépôt qui n'est pas beaucoup dérangé sinon par la différence d'adhérence entre la zircone partiellement stabilisée et le tungstène. (2) Le début de l'expansion volumique crée des fissures parallèles au plan du dépôt autour de la particule et de craquelures verticales font aussi leur apparition. Elles continuent à

grossir et à se propager (3). Finalement, une écaille dont la taille peut atteindre celle de la particule initiale (~1mm) se détache depuis la surface du dépôt.

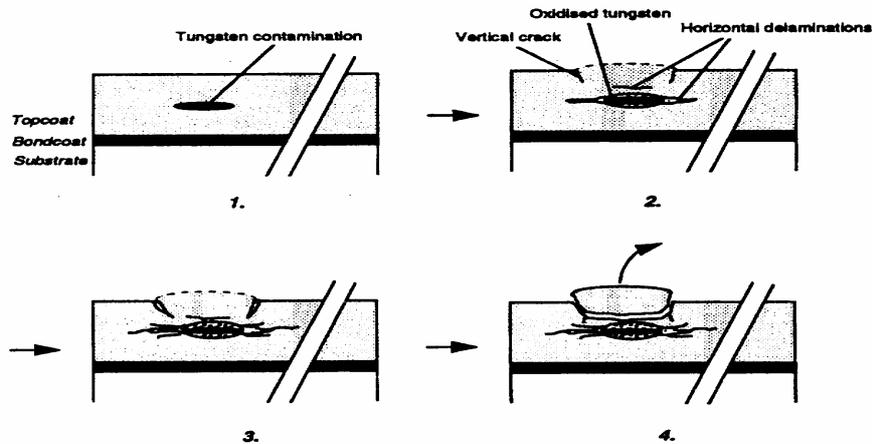


Figure 1-26 : la fissuration de dépôts par contamination par le tungstène.

Les conséquences de cette contamination sont donc désastreuses puisque le dépôt entier est à refaire avec les coûts que cela entraîne. Il faut absolument éviter que des particules de l'anode de la torche soient éjectées. Pour le moment les industriels ne prennent pas de risques et cherchent la sécurité en changeant systématiquement les électrodes au bout d'un certain nombre d'heures alors qu'elles sont à peine usées. Le but de cette thèse est donc de trouver quels paramètres mesurables émis par la torche en fonctionnement, pourraient donner une indication fiable concernant l'état d'usure des électrodes. Un gain financier significatif pourrait être réalisé en augmentant la durée de vie des électrodes (moins de remplacement, moins d'immobilisation des machines, etc.).

L'usure de l'anode en particulier est fortement liée à la durée de vie des pieds d'arc qui s'accroît avec le temps au fur et à mesure que l'anode se creuse. En effet si la surface interne de l'anode est lisse quand elle est neuve, on trouve des irrégularités de surface (cratères d'impact du pied d'arc, saignée, etc.). La surface n'est plus homogène vis-à-vis de l'arc et des points d'accrochage préférentiels se forment ce qui augmente encore la durée de vie des pieds d'arc, et accélère le phénomène d'érosion. Cet effet d'usure va donc se traduire sur le long terme (temps de l'ordre de l'heure) par une évolution sur le signal de tension.

1.5.2.2 Effet sur le signal de tension

L'étude de l'évolution de la tension au cours du temps fournit de nombreuses informations. L'approche de l'échelle temporelle, choisie pour le traitement de ces signaux, est importante car un signal développé sur quelques millisecondes n'a pas du tout la même allure

qu'un signal de tension développé sur des heures.

L'évolution de la tension en fonction du temps pendant 52 heures sans interruption [59], montre une diminution importante et significative de la tension moyenne aux bornes des électrodes alors que le courant a été maintenu constant (cf. Figure 1-27). C'est la méthode utilisée dans le milieu industriel pour connaître l'état d'érosion de leurs électrodes. Une chute de 5 volts est souvent le critère d'un remplacement. Le choix du mélange de gaz plasmagènes est aussi déterminant pour la valeur de la chute de tension.

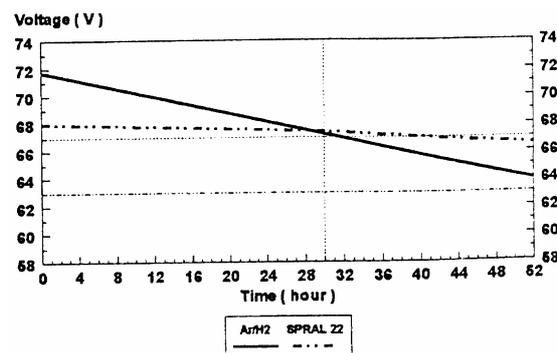


Figure 1-27 : Evolution avec le temps de la tension moyenne pour deux mélanges plasmagènes (ArH₂ et SPRAL 22) [59].

Il est à noter que l'examen de la pente de tension moyenne peut être aussi une source intéressante d'information comme le montre Leblanc [60]. Il trace en fonction du temps l'évolution de la tension aux bornes d'une torche qui fonctionne 55h. Il décrit trois parties sur ses courbes (cf. Figure 1-28).

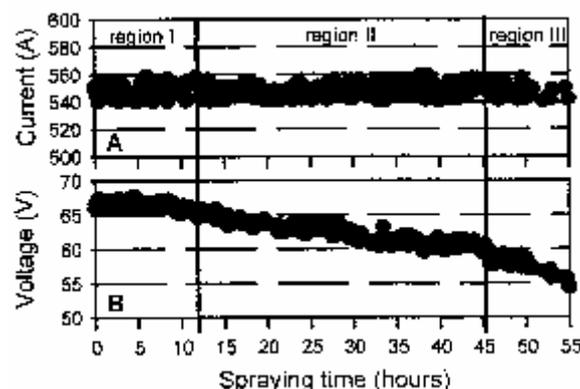


Figure 1-28 : Evolution de la tension d'une torche plasma utilisée à courant constant [60]

Dans la région 1, jusqu'à 12h de fonctionnement, les paramètres enregistrés restent constants. Dans la région 2 (entre 12 et 45h) la tension a diminué au rythme de 0.15V/h. A t = 45h, une chute de plus de 3V se produit et, dans la région 3, la tension continue à chuter à un

rythme plus important (0.5V/h).

Il est aussi possible d'étudier la tension en fonction du temps en considérant des temps plus petits, de l'ordre de la milliseconde, où les fluctuations dues au mouvement de l'arc peuvent être analysées en terme de moyenne, d'écart type, d'écart quadratique moyen ou autres.

L'écart quadratique moyen (*Root Mean Square* = *RMS* en anglais) est déterminé, après discrétisation de la courbe de tension, par la formule :

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

Équation 1-28 : Définition du RMS

C'est le calcul de l'écart par rapport à la valeur moyenne \bar{x} de l'ensemble des points de la courbe (X est l'ensemble de N points). Il indique les changements graduels dans les signaux mais il n'est pas efficace pour des changements brutaux [61]. Pour palier à cette limitation, on utilise le facteur de crête (CF) ou le kurtosis (KU). Ce sont deux nombres adimensionnels définis respectivement par :

$$CF = \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{RMS} \quad \text{et} \quad KU = \mu^4 / RMS^4$$

Équation 1-29 : Définition du facteur de crête et du kurtosis.

Xi [61] réalisa des expériences en enregistrant le RMS, le CF et le KU pour trois tuyères différentes (neuves, usée, et vieille) sous trois pressions de gaz différentes. Ses conclusions sont qu'il n'y a pas de changements brutaux et soudains pour les signaux de tension (mais aussi du son). Ceci implique que l'usure des électrodes est un phénomène lent qui prend place graduellement avec le temps.

Une autre équipe, conduite par Leblanc [62] apporte d'autres conclusions comme le montre la Figure 1-29, où sont reportés les valeurs de RMS de signaux de tension et de son (il y a trois graphiques pour trois positions angulaires du microphone). En fonction du temps de fonctionnement de la torche, ils montrent qu'il y a deux zones distinctes que l'on retrouve sur chaque graphes. La première zone s'étend de l'état neuf des électrodes à 15~19h de fonctionnement. La seconde région comprend les 20h suivantes. La frontière entre les deux zones est le lieu d'une augmentation soudaine et brutale de la valeur du RMS. Les auteurs

soulignent qu'après 19h de fonctionnement la torche devait être relancée plus fréquemment ce qui fut interprété comme un changement dans l'état d'érosion des électrodes. En mettant ces informations en parallèles avec d'autres (chutes des températures des particules de 100°C entre 11 et 21h puis de nouveau de 100°C entre 21 et 40h), Leblanc conclut que la valeur du RMS de la tension et du son semblent être de bons indicateurs d'évolution rapide dans l'état des électrodes mais sont peu fiables dans le cas des dérives lentes.

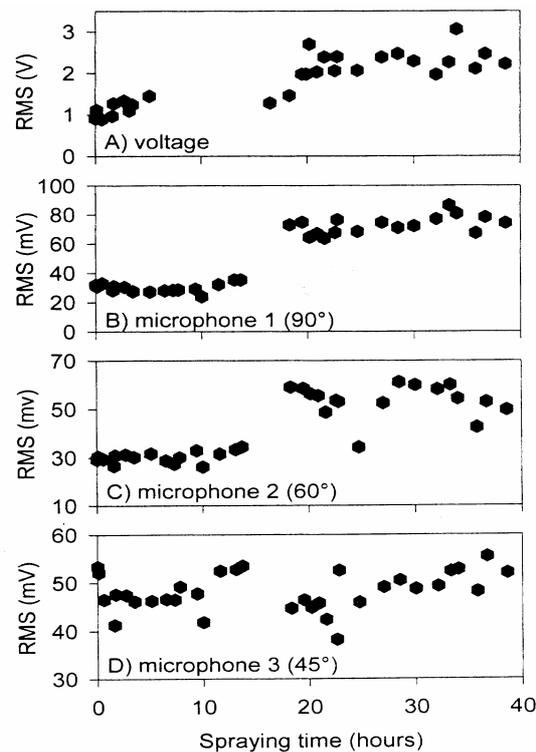


Figure 1-29 : Evolution du RMS pour la tension et le son (selon trois angles) [62]

Malheureusement, cette conclusion fut contredite par les résultats de nouveaux travaux [63] qui montrèrent, en dépit de l'utilisation d'une torche différente et dans des conditions d'utilisation différentes, que l'augmentation de la valeur de RMS n'est pas systématique et que ce paramètre ne pouvait être un indicateur fiable puisqu'il revenait à sa valeur initial au terme de la vie des électrodes (cf. Figure 1-30)

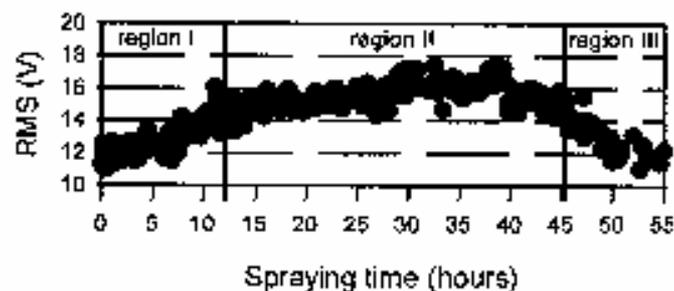


Figure 1-30 : Evolution d'un paramètre (RMS) sur 55h de fonctionnement [63]

1.5.2.3 Effet sur le spectre de tension

L'analyse temporelle n'est pas l'unique voie de traitement des paramètres émis par la torche et le domaine spectral permet d'obtenir des informations claires et significatives. L'outil le plus utilisé est la transformée de Fourier rapide (*Fast Fourier Transform – FFT* en anglais) car plusieurs algorithmes sont disponibles dans de nombreux langages informatiques. L'analyse par transformées en ondelettes a fait son apparition récemment et commence à émerger dans tous les domaines de la physique, notamment dans les techniques de diagnostics et d'instrumentation appliquées. Cependant cette méthode reste marginale. Pourtant elle promet une précision meilleure à la fois dans les domaines temporel et fréquentiel. Dans cette section, l'évolution des fréquences et des amplitudes en fonction du temps de fonctionnement de la torche (donc en fonction de l'usure des électrodes) est abordée.

La Figure 1-31 représente l'évolution de la fréquence du pic principal, qui correspond à la fréquence de claquage – réamorçage de l'arc, ainsi que l'amplitude de ce pic, tracé en fonction du temps de fonctionnement de la torche (de 0 à 55h). Ce graphe est issu de travaux réalisés par Leblanc [63]. La première observation à faire est que plusieurs zones peuvent être distinguées. La première zone (début de la région 1), qui s'étale sur les 5 premières heures, montre une invariance des deux paramètres (fréquence et amplitude). Sur la deuxième partie de la région 1, de 5 à 12h, on constate, une évolution de la fréquence de 4.7 vers 5.2 kHz et une légère augmentation de l'amplitude des pics. La région 2, de 12 à 45h, montre que la fréquence reste inchangée jusqu'à la 40^{ème} heure et grimpe à 5.5kHz alors que l'amplitude suit une courbe en cloche (le maximum est atteint vers 25h de fonctionnement avec une amplitude 6 fois supérieure à la valeur initiale). La région 3 (les dernières 10h) permet de voir une rapide chute de la fréquence de 5.5 à 5kHz et une diminution vers la valeur initiale (i.e. à $t = 0h$) de l'amplitude des pics du spectre de tension.

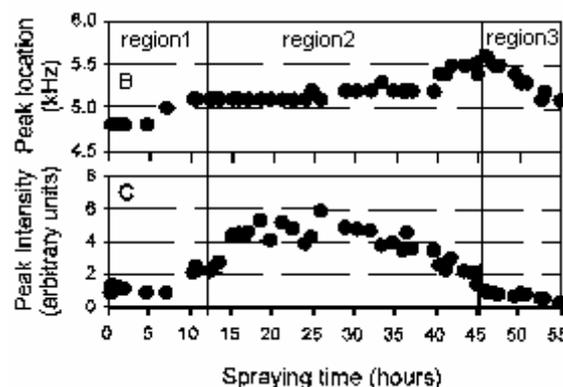


Figure 1-31 : Evolution de la fréquence et de l'amplitude des pics d'un spectre de tension [63]

Dorier [64] a confirmé ce comportement, expériences à l'appui, en soulignant que le spectre d'un signal de tension correspondant à des électrodes neuves est dominé par un pic à 4kHz et montre une faible contribution aux fréquences supérieures, alors que pour des électrodes usées, ce pic à 4kHz est réduit en faveur de ceux de la plage 5-12kHz. De plus il précise que changer les paramètres de fonctionnement, comme la géométrie de l'injection de gaz, la composition ou le débit du gaz plasmagène, conduit à un léger décalage de la fréquence à 4kHz. Ses spectres montrent qu'avec une injection vortex, seule la fréquence caractéristique de 4kHz est présente alors qu'avec une injection axiale, de multiples fréquences plus élevées sont visibles. L'influence de l'érosion et celles des paramètres fonctionnels sont si proches que Dorier a pu obtenir des spectres similaires pour deux cas. Le premier était une torche avec les électrodes usées et une injection vortex et le deuxième cas était une torche neuve pour une injection axiale.

Ces deux auteurs montrent donc que les fréquences se déplacent vers les hautes fréquences au fur et à mesure que l'érosion des électrodes s'installe. Mais d'autres [62] [65] montrent le contraire avec cette fois, un décalage vers les basses fréquences. Ainsi Duan [65], après avoir suivi à différents moments de la vie du jeu d'électrodes, l'évolution des spectres de tension d'une torche prise initialement à l'état neuf, propose le schéma d'évolution pour les spectres décrit Figure 1-32. Pour les anodes neuves, aucun pic ne ressort distinctement du spectre puisque la surface de la tuyère est lisse et qu'en conséquence le phénomène de claquage –réamorçage peut s'effectuer partout sans points préférentiels. Avec le temps des traces d'impacts de pieds d'arc se forment et se creusent. Ces points sont de plus en plus marqués et une fréquence de fluctuations de l'arc commence à apparaître. Non seulement le pic de fréquence de claquage – réamorçage se précise (plus fin, plus intense) mais il se décale vers les basses fréquences car le pied d'arc reste plus longtemps sur ces sites préférentiels.

Leblanc [62] confirme ce schéma en constatant que son pic principal se déplace vers les basses fréquences. Il apporte aussi la validation de l'hypothèse de similitudes des spectres de tension et de son.

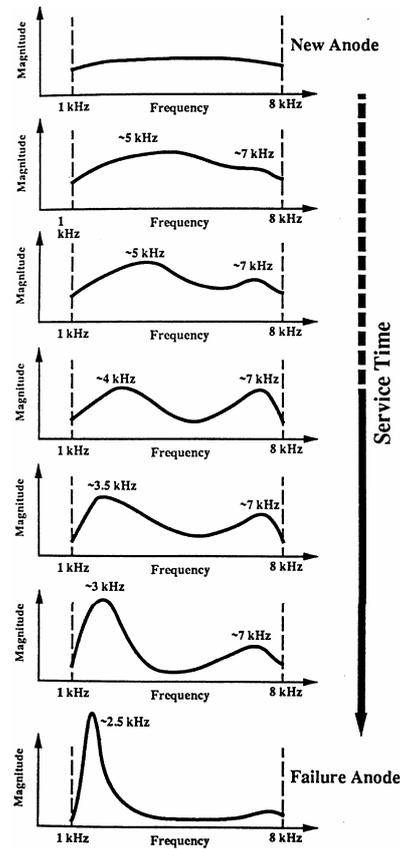


Figure 1-32 : Schéma d'évolution des spectres de tension [65]

1.5.2.4 Effet sur le dépôt

Figure 1-33 montre que l'état d'usure de l'anode (qui est quantifié par le taux de porosité du dépôt) influence l'efficacité de la déposition et accroît la porosité des dépôts.

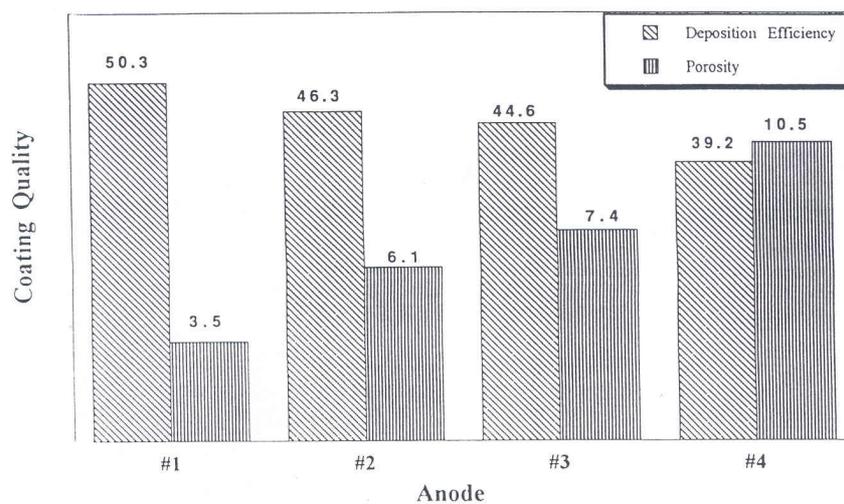


Figure 1-33 : Effet de l'érosion sur la qualité du dépôt

1.6 La torche dans un circuit

La famille des plasmas thermiques regroupe deux grandes catégories de plasmas, les plasmas d'arc et les plasmas inductifs, dont les modes de production diffèrent largement. Par conséquent, les alimentations électriques des plasmas d'arc et des plasmas inductifs répondent à des contraintes différentes et ont chacune leur spécificité. Seuls les alimentations des plasmas d'arc sont considérées par la suite.

1.6.1 Les différents types de source de courant

La conception optimisée de l'alimentation électrique d'une torche plasma nécessite, pour assurer la sécurité et la pérennité de l'installation, une bonne connaissance de la réaction qu'aura la torche plasma lorsqu'elle sera connectée à l'alimentation. Le comportement d'un arc est fortement influencé par de nombreux paramètres tels que la nature des électrodes et du gaz plasmagène ou les transferts avec l'écoulement environnant (transfert de masse, de quantité de mouvement, d'énergie), eux-mêmes conditionnés par la géométrie de la torche, le débit masse de gaz plasmagène, etc. Toutes ces variantes sont concrétisées par des générateurs d'arcs de types différents. Seules les torches à plasma de type linéaire à stabilisation d'arc par effet vortex sont présentés ci-dessous.

1.6.1.1 Caractéristiques électriques des torches à plasma linéaires.

Ce type de torche se caractérise par deux électrodes cylindriques, l'une creuse assurant la stabilité et le confinement de l'arc généralement par effet vortex, l'autre pouvant être creuse, de type bouton ou de type tige avec l'extrémité conique. Selon la géométrie de l'anode, la caractéristique tension-courant sera plus ou moins élevée. Cependant en général pour les arcs confinés comme dans les torches de projection, la caractéristique tension-courant a une pente négative.

- ✓ Pour une torche à anode cylindrique à section constante, tout le gaz est injecté dans l'espace interélectrode, la longueur de l'arc est auto-ajustable et la caractéristique tension-intensité est monotone décroissante.
- ✓ Pour une torche à anode avec changement brutal de section, lorsque la longueur de l'arc est inférieure à la longueur auto-ajustable, correspondant au premier diamètre de la torche, sa caractéristique tension-courant est fortement décroissante ce qui correspond aux faibles valeurs de courant, elle devient croissante lorsque le courant croît (l'accrochage se fait juste en aval du décrochement).

- ✓ Troisièmement, pour une torche à anode segmentée avec injection de gaz continue entre les segments, la longueur de l'arc est supérieure à la longueur auto-ajustable, sa caractéristique tension-courant est plus faiblement décroissante, voire croissante pour des valeurs élevées de courant.

La caractéristique tension-courant décroissante de l'arc est un problème pour les concepteurs d'alimentation électrique de torches à plasma d'arc. La pente négative de cette courbe traduit la décroissance de la résistance d'arc lorsque le courant augmente. Ainsi, lorsque le courant croît, à tension fixée, la diminution de la résistance amplifie la croissance du courant. L'arc a une tendance naturelle à se comporter en court-circuit, le courant d'arc croissant très rapidement tandis que la tension à ses bornes chute.

Il apparaît que la seule possibilité d'alimentation électrique pour un arc est une alimentation dont le courant est imposé à tout moment.

1.6.1.2 Configuration de l'alimentation électrique

Dans les torches à plasma d'arc industrielles, l'arc est généralement créé en appliquant un champ électrique entre les deux électrodes. L'utilisation d'un courant alternatif impose que les deux électrodes soient en cuivre et présente l'inconvénient d'accroître leur usure, celle-ci étant trois à quatre fois plus rapide qu'avec un courant continu. En outre, afin d'éviter l'extinction de l'arc à chaque demi-période, il est nécessaire de superposer une décharge haute tension haute fréquence, d'environ 15% de la puissance nominale, ou d'adopter une géométrie avec une faible distance interélectrode autorisant un auto amorçage de l'arc à chaque alternance. Cette dernière solution présente l'inconvénient de limiter la tension d'arc, ce qui, à intensité d'arc donnée, réduit la puissance de la torche. Pour ces raisons, la plupart des alimentations électriques de torches plasma utilisent actuellement du courant continu.

Ce courant continu est obtenu à partir du réseau de distribution de tension alternative (EDF en France, où la fréquence est de 50Hz). Par utilisation d'un redresseur commandé doté d'une régulation en courant appropriée. Une inductance en série à la sortie du redresseur participe à la stabilisation du système en s'opposant aux variations rapides (quelques milliers de Hz) du courant qui peuvent être causées par diverses perturbations (variations du débit masse de gaz plasmagène, fluctuations du pied d'arc). Un transformateur de tête adapte les caractéristiques du réseau de distribution à celles du générateur de plasma. Ces différents éléments sont présentés sur le schéma suivant (cf. Figure 1-34)

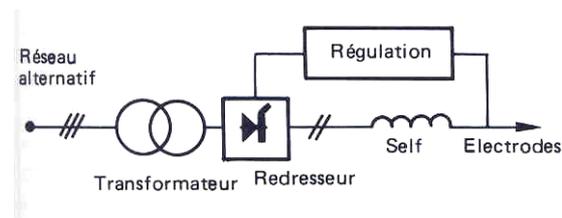


Figure 1-34 : Schéma de principe de l'alimentation électrique d'une torche plasma [66]

Les redresseurs utilisés dans les alimentations électriques de torches à plasma sont la diode et le thyristor au silicium.

La diode est capable de laisser passer le courant dans un seul sens entre deux bornes, de l'anode (A) vers la cathode (K). La caractéristique statique est présentée ci-après (cf. Figure 1-35) :

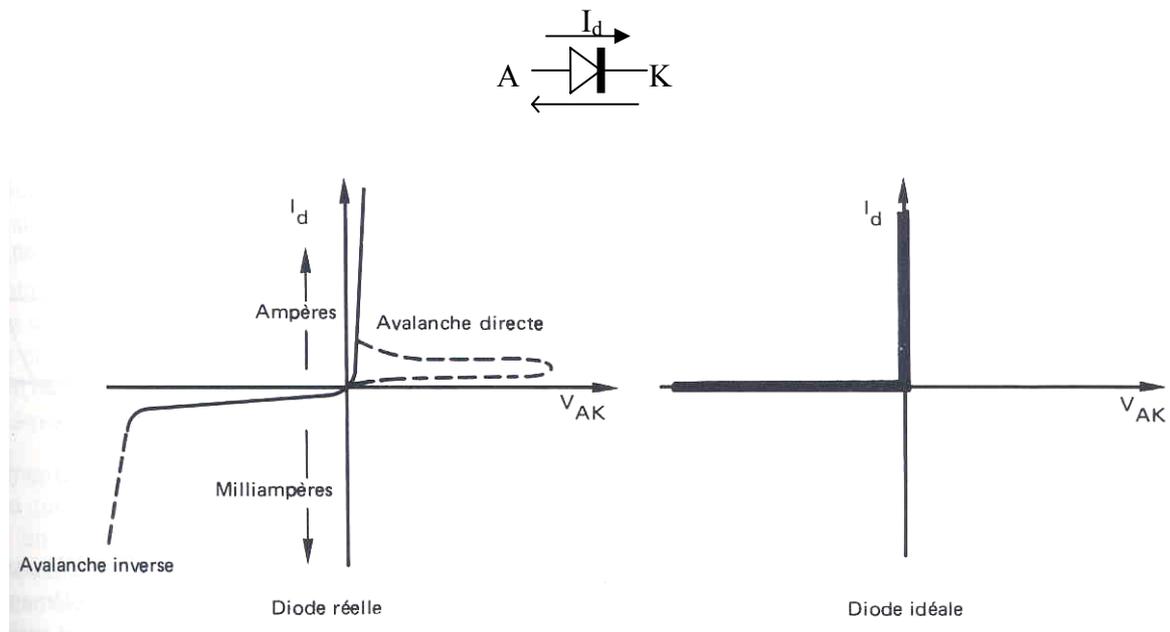
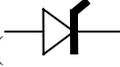


Figure 1-35 : Caractéristiques statiques de la diode [66]

Le thyristor () est un composant dans lequel le courant ne peut passer que de l'anode vers la cathode, à condition qu'une action d'amorçage soit exercée sur sa gâchette. Tant qu'il n'y a pas eu d'amorçage, le thyristor est bloqué et aucun courant important ne passe. Dès que le courant a commencé de s'établir par suite d'une ou plusieurs impulsions de courant sur la gâchette, l'arrêt de celles-ci n'a plus d'effet sur le courant direct et la caractéristique statique est alors celle d'une diode.

Selon le type de puissance utilisée pour la torche, le montage redresseur ne sera pas le

même. Le montage redresseur de base est le montage triphasé simple alternance où la tension redressée est fonction de α , l'angle d'amorçage, qui rend compte du temps entre l'instant où l'amorçage devient possible et l'instant où le composant est mis en conduction ($\alpha = 0$ pour une diode). Le montage triphasé double alternance (appelé généralement "pont de Graëtz") est équivalent à deux montages simples en série. En majorité, les montages utilisés associent plusieurs pont de Graëtz pour aboutir à des ponts dodécaphasés séries ou parallèles, les ponts à commandes décalées ou les ponts mixtes.

Ces générateurs de courant, à base de thyristors, génèrent un courant qui présente néanmoins une forte ondulation, surtout à basse puissance. Ces ondulations peuvent entraîner des instabilités de l'arc et donc aboutir à des dépôts de faible qualité. Il existe une autre technologie pour réduire ces ondulations : le générateur "renverseur de puissance" (*Inverter power supply* en anglais) dont le schéma de principe est représenté ci-dessous (cf. Figure 1-36 - b). Les ondulations du courant de sortie sont presque nulles même à faibles puissances, ce qui permet d'obtenir des dépôts de meilleures qualités [67].

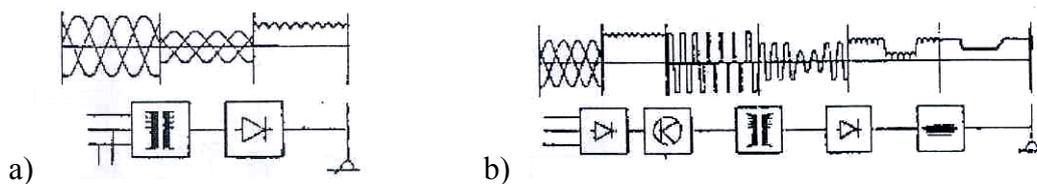


Figure 1-36 : Schémas de générateurs de courant: a) par thyristors, b) renverseur [67]

1.6.2 La régulation lente et la régulation rapide

Il faut que le courant soit régulé, pour pouvoir réagir aussi rapidement que l'arc, de telle sorte que le système reste stable. Un régulateur agissant sur la commande de redresseur associée à une inductance est donc nécessaire.

1.6.2.1 Le régulateur

Le régulateur généralement utilisé est de type proportionnel - intégral. La stabilité du système est assurée par le gain proportionnel, le rôle du gain intégral étant d'annuler l'erreur en régime permanent entre la valeur de la consigne I_0 et la valeur du courant d'arc. Le régulateur calcule à chaque instant la tension nécessaire en sortie de pont pour maintenir le courant égal à la valeur de la consigne I_0 . Elle peut être calculée par ailleurs (par un automate de surveillance par exemple) de manière à obtenir une puissance souhaitée, ou garantir un facteur de puissance minimum. Quoiqu'il en soit, c'est toujours le courant qui est régulé.

La tension en sortie de pont ne peut pas évoluer instantanément par suite du retard introduit par le redresseur. Ce retard dépend de la durée séparant deux commutations.

1.6.2.2 L'inductance

Le rôle de l'inductance est de réagir aux variations rapides de l'arc, le temps que la tension en sortie du pont soit affectée par l'action du régulateur (au maximum 600Hz pour un pont dodécaphasé). La valeur nécessaire de l'inductance est donc très dépendante du type de redresseur. Le dimensionnement du gain proportionnel et de l'inductance peut être effectué à l'aide d'un modèle pour l'arc et le redresseur, en cherchant les conditions de stabilité du système. Une self saturable est généralement choisie, car la valeur de l'inductance, nécessaire pour assurer la stabilité, diminue lorsque le courant augmente.

1.7 Conclusion

Au regard des nombreuses expériences qui ont déjà été menées sur l'évolution de paramètres généraux concernant la mesure de la tension d'arc (tension moyenne, RMS, spectres), il apparaît qu'il y a plusieurs tendances contradictoires. Par exemple, la fréquence du pic principal des spectres de tension évolue dans certains cas vers les basses fréquences pour plusieurs auteurs et vers les hautes fréquences pour d'autres. Il en est de même pour le RMS de la tension. Il nous faut donc déterminer de manière indiscutable quelle orientation prennent tous ces indicateurs potentiels de l'érosion afin de pouvoir choisir parmi ceux-ci lesquels seront le plus pertinents dans cette recherche. C'est ce que nous nous sommes proposé de faire et que nous présentons dans les chapitres suivants.

Par ailleurs, d'après la recherche d'antériorité menée auprès des instituts de brevets à travers le monde, il n'existe pas encore d'appareil entièrement dédié au contrôle de l'érosion des électrodes de torches à plasma. Grâce au prototype industriel que nous présenterons au chapitre 5, cette carence sera palliée.

2 Dispositif Expérimental

2.1 Description du banc d'expérience

2.1.1 Les torches et leur support

Deux torches ont été utilisées lors de la thèse. La première que l'on nommera par la suite "torche labo" est une torche dessinée et conçue au laboratoire SPCTS (Sciences des Procédés Céramiques et Traitements de Surface). La seconde torche est la F4-MB de Sulzer Metco, ou "PTF4", largement utilisée dans l'industrie. La première a permis de monter le banc d'expérience et de réaliser les premiers essais de programmes d'acquisitions de tension et de son. La seconde fut employée pour se rapprocher au mieux des conditions industrielles réelles qui sont celles de Volvo Aero puisque la société suédoise emploie plusieurs torches PTF4 dans son atelier de projection.

La "torche labo" a la particularité d'avoir une anode en cuivre uniquement avec une géométrie plus simple au niveau de la surface en contact avec l'eau de refroidissement. En effet, il n'y a pas d'ailettes de refroidissement comme on peut les retrouver sur les anodes – tuyères de la "PTF4". Ceci a l'avantage de permettre la réalisation en grand nombre et rapidement, de nombreuses tuyères dans l'atelier de mécanique de l'Université de Limoges. En contre partie, ceci nécessite un refroidissement sous pression plus élevée. Bien que l'anode de la "torche labo" soit en cuivre, il est possible d'ajouter un insert de tungstène à l'intérieur de son conduit cylindrique pour changer le comportement thermique du pied d'arc et se rapprocher ainsi du fonctionnement de la torche PTF4 dont les anodes – tuyères ne sont fournies par Sulzer Metco qu'avec l'insert de tungstène. On peut voir ci-dessous (cf. Figure 2-1) une photo et les plans qui permettent la comparaison entre les deux anodes – tuyères. L'intérieur (où passe le gaz plasmagène et où se crée le plasma) est le même du point de vue géométrique avec à partir de l'arrière de l'anode une section conique, puis un décrochement, une seconde section conique qui se termine par un conduit cylindrique conclu par la sortie de tuyère. L'extérieur se différencie par la partie arrière de l'anode PTF4 qui est bombée ainsi que par la présence de douze ailettes de refroidissement qui compense une plus faible épaisseur de cuivre au niveau du canal cylindrique.

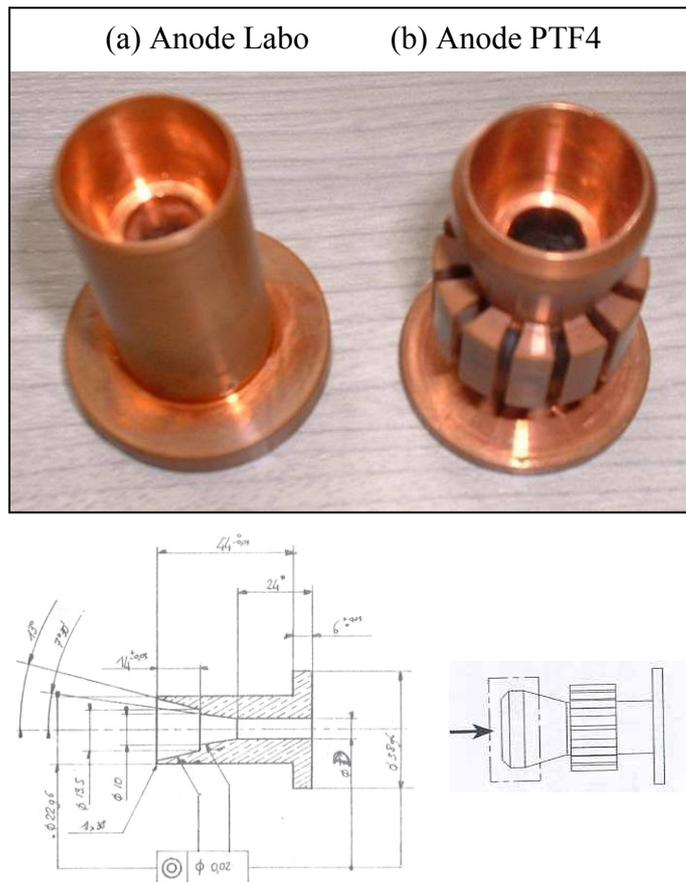


Figure 2-1 : Les différences entre l'anode labo (a) et l'anode PTF4 (b) – Photo et plans

Une seconde particularité, qui différencie les deux torches entre elles, est le mode d'injection des gaz plasmagènes. La "torche labo" utilise un distributeur de gaz en nitrure de bore, percé de huit trous cylindriques de 0,8 mm, qui permet un écoulement axial des gaz. La torche PTF4 possède un distributeur de gaz réalisé aussi en nitrure de bore mais muni de douze trous de 0,8 mm de diamètre et de forme hélicoïdale, ce qui confère un mouvement de rotation à l'ensemble du gaz injecté dans le canal de la tuyère (effet vortex). Cet écoulement vortex permet un gainage de l'arc électrique qui se traduit par une augmentation de la couche limite froide de gaz. Un test de mesure de la fréquence sonore émise par ces deux écoulements sur la torche PTF4 a été réalisé à vide, c'est-à-dire sans l'arc électrique, avec un débit masse constant pour les deux essais. La torche PTF4 munie d'un injecteur axial (huit trous cylindriques) émet un son relativement bruyant, dont la fréquence principale est de 7000Hz alors que la même torche munie d'un injecteur vortex (douze trous hélicoïdaux) émet un sifflement net à la fréquence de 6500Hz dont l'amplitude du pic principal est 600 fois plus importante que pour l'injection axiale (cf. Figure 2-2).

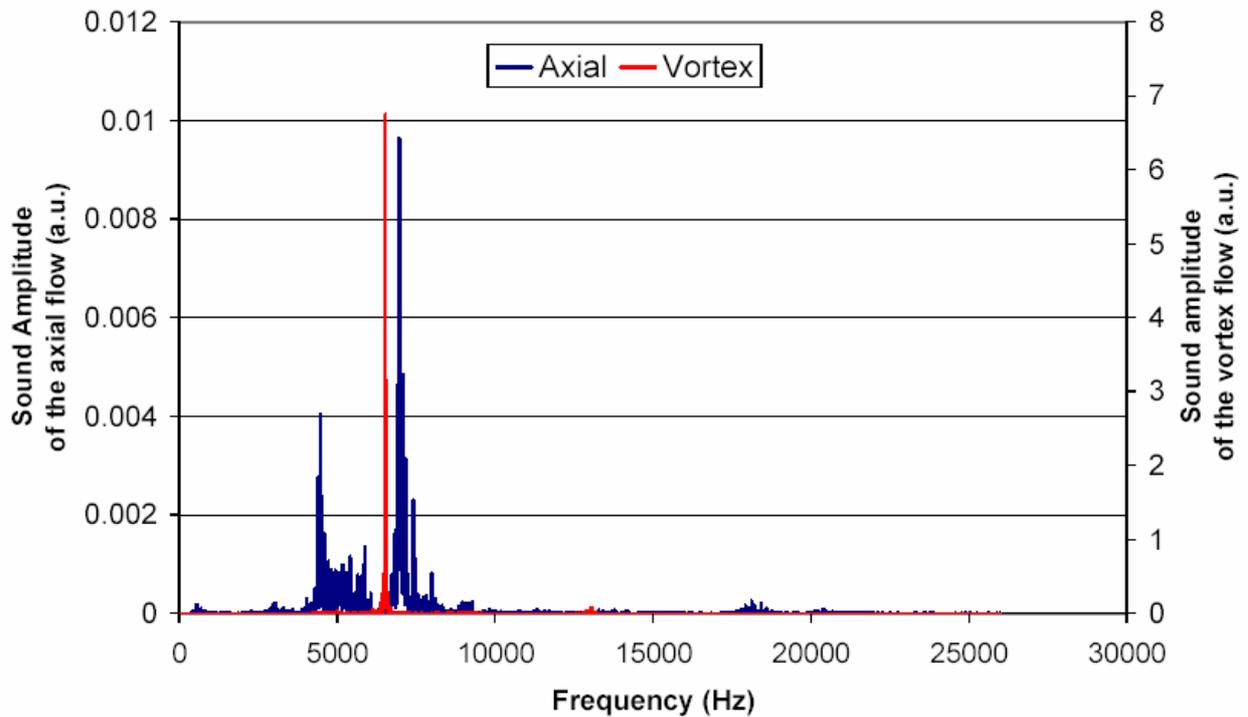


Figure 2-2 : Différence entre l'injection vortex et l'injection axiale pour les gaz plasmagènes

Du fait de sa géométrie, la "torche labo" est maintenue sur une potence, et les instruments de mesures sont posés sur une table réglable en hauteur. La torche "PTF4" est posée sur le support réglable et les instruments de mesures sont supportés par la potence. Dans les deux cas, la torche est en face d'un système d'aspiration des gaz, situé à un mètre environ de la sortie de tuyère (cf. Figure 2-3).

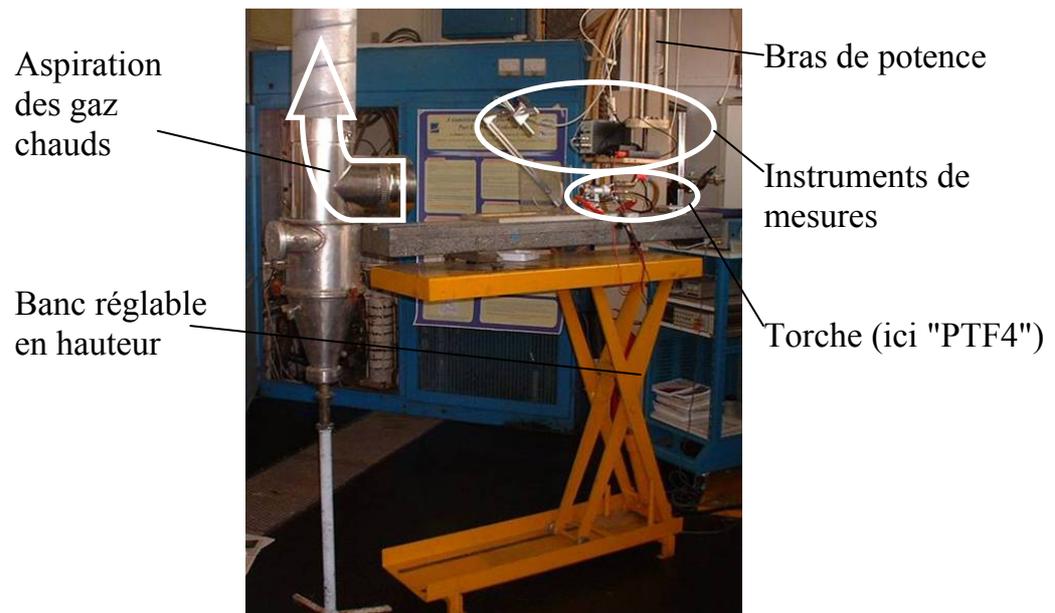


Figure 2-3 : L'environnement de la torche.

2.1.2 Le circuit d'eau de refroidissement

Les deux torches fonctionnent avec le même système de refroidissement qui se compose d'un circuit fermé en parallèle avec un système de renouvellement continu d'eau. Le circuit fermé (cf. Figure 2-4) se compose d'une pompe, d'un débitmètre, d'un connecteur eau/électricité, de la torche et d'une tour de refroidissement par cascade. Entre chaque élément, on retrouve des tuyaux, excepté entre le connecteur eau/courant et la torche où il y a des tresses noyées, c'est-à-dire des câbles électriques entourés d'eau dans une gaine. L'eau et le courant alimentent ainsi ensemble la torche par seulement deux câbles. Ceci permet aussi de refroidir les câbles d'alimentation en courant de la torche dans lesquels peuvent circuler plus de 600A pour une section de câble de 7mm de diamètre. Il faut noter que leur résistance électrique, non négligeable ($R_{\text{Câble}} \sim 8.10^{-2} \Omega$ entre 600 et 800A) et en série avec l'arc, participe à sa stabilisation, mais au prix d'une perte d'énergie dans l'eau de refroidissement. L'eau est sous pression ($> 1,6 \text{ MPa}$) et le débit d'eau maximal mesuré pour le fonctionnement, quelque soit la torche, est de $16,5 \text{ L.min}^{-1}$ ($= 2,75.10^{-4} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). 20 mètres de tresses noyées ont été réalisés et l'ensemble de ce circuit a été mis en place pour les expériences réalisées au laboratoire SPCTS.

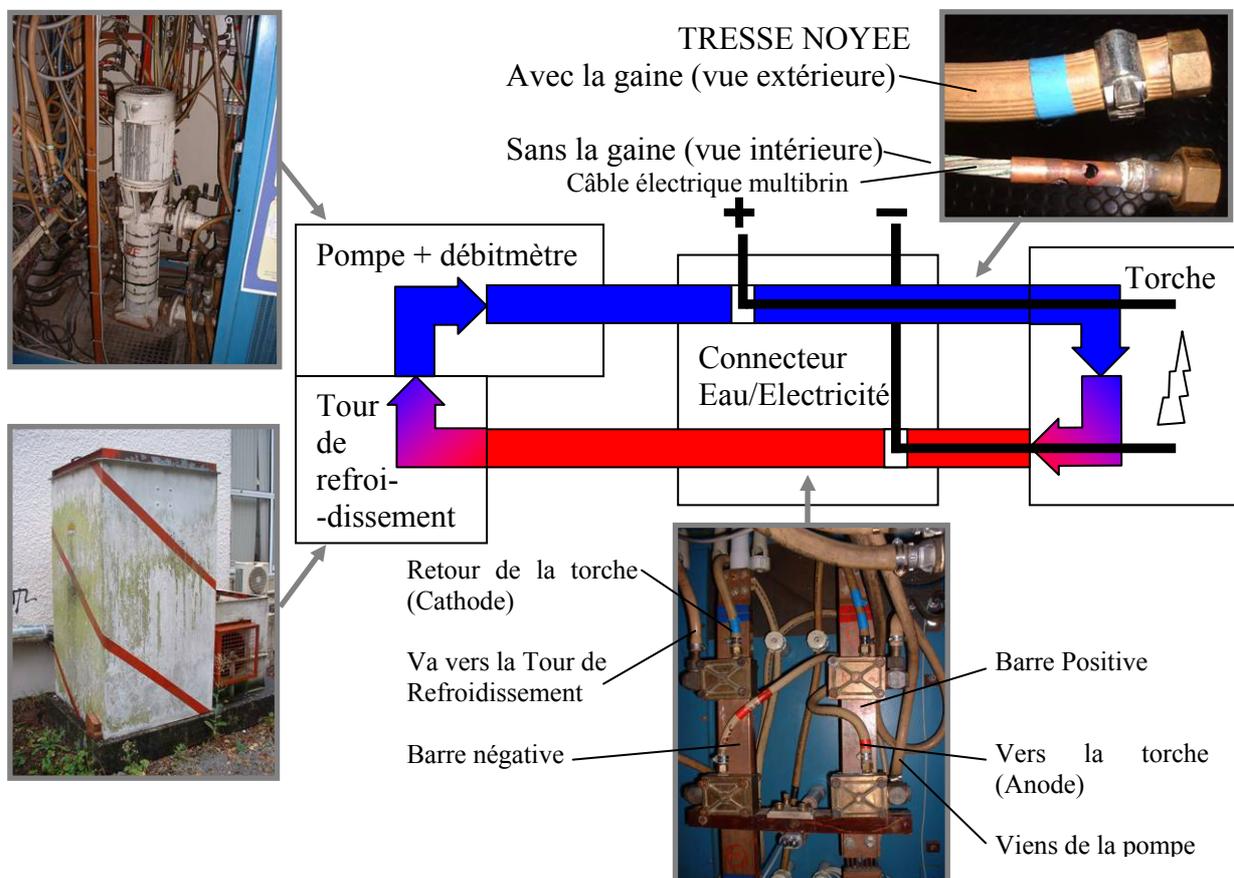
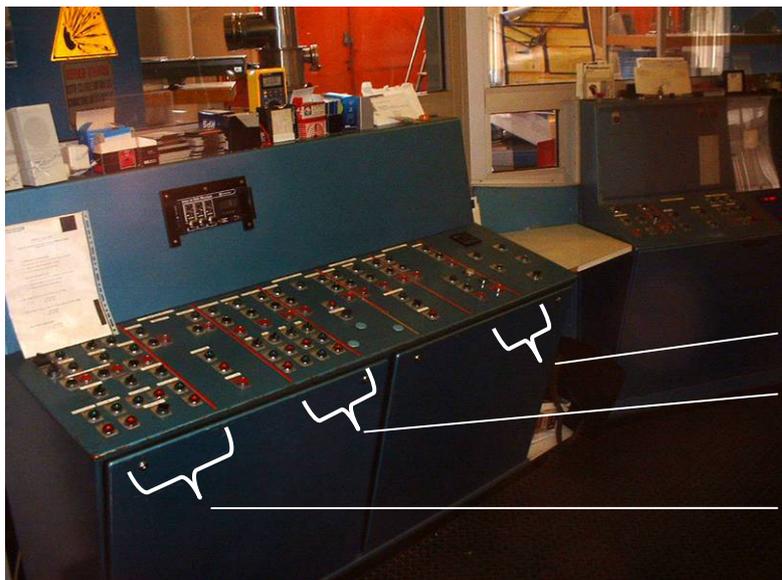


Figure 2-4 : Schéma et photos du circuit d'eau de refroidissement

2.1.3 Le banc de commandes

Le contrôle des paramètres d'entrée, que sont les débits des gaz plasmagènes, l'intensité du courant et le débit d'eau de refroidissement, se fait à partir d'un pupitre (cf. Figure 2-5). Ce pupitre est aussi un chaînage de circuits logiques activés par des capteurs qui doivent prévenir tous risques d'accident ou de défaillance. Ainsi l'absence de débit gazeux dans la torche, un débit d'eau inférieur à un seuil de consigne dans le circuit de refroidissement ou l'ouverture des portes des installations électriques inhibent la mise en route du générateur de puissance électrique. Afin de connaître les valeurs d'intensité du courant et de tension aux bornes de la torche, une sonde haute tension (rapport 2100:1) fut installée sur le connecteur eau/électricité et un shunt (rapport 25000:1 où 1500 A renvoient 60mV), placé aux bornes des deux barres du connecteur, est employé pour connaître l'intensité du courant. Ces deux valeurs sont en permanence indiquées sur deux afficheurs analogiques utilisés tous les deux en voltmètres.



Ventilations et aspirations

Ouverture des vannes d'arrivée des gaz plasmagènes

Contrôle de la pompe, de la tour, et des vannes d'arrivée d'eau.

- Voltmètre à aiguilles (indicateur lié au générateur de courant)
- Ampèremètre et Voltmètre branchés au niveau du connecteur Eau/Électricité.
- Commande d'alimentation électrique primaire (pour télécommander l'augmentation ou la diminution de l'intensité du courant)
- Commande d'ouverture du circuit secondaire (voir Chap. 4-3)
- Activation de décharges HF (démarrage)

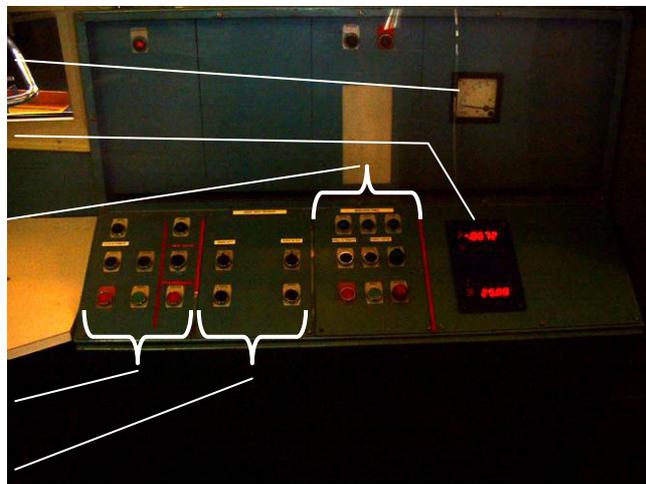


Figure 2-5 : Tableau de commande des circuits d'alimentation de la torche.

2.2 Instruments de mesures

2.2.1 La sonde différentielle

La mesure de la tension aux bornes de la torche a été dans un premier temps effectuée à l'aide de sonde placée sur les barres du connecteur eau/électricité. Il a vite été mis en évidence qu'une tension liée à la résistance des câbles d'alimentation des tresses noyées s'ajoutait à la tension aux bornes de la torche. Cette tension supplémentaire était de l'ordre de quelques Volts ce qui représentait par rapport à la tension d'arc une surévaluation d'environ 10% (La tension d'arc est en moyenne de 65V). C'est pourquoi une prise de tension aux bornes mêmes des électrodes de la torche a été préférée. Pour cela, dans un premier temps, un pont diviseur (construit à l'aide de résistances) d'un facteur 1/10 fut créé. Il est apparu qu'un "bruit" parasitait le signal de tension mesuré. La cause du parasite électrique fut identifiée comme étant liée à un problème de mise à la masse de la torche qui interférait sur les mesures. C'est pour éviter ce problème, lié à la masse, qu'une sonde différentielle (Metrix MX 9003) fut choisie pour acquérir la tension aux bornes de la torche. Cette sonde (présentée Figure 2-6) a un choix de deux facteurs de division : 1/20 et 1/200. Puisque que la tension à vide de la torche lors du démarrage peut dépasser 150V, dans tous les cas de mesures présentés par la suite, la sonde restera réglée sur le facteur de division 1/200 pour se prémunir de tout dommage au niveau des appareils d'acquisitions (oscilloscopes) en aval de la chaîne d'acquisition. La bande passante de cette sonde est de 40MHz ce qui permet aisément de mesurer toutes fluctuations de tensions liées au mouvement de l'arc dont les fréquences sont situées aux environs de 5000Hz.

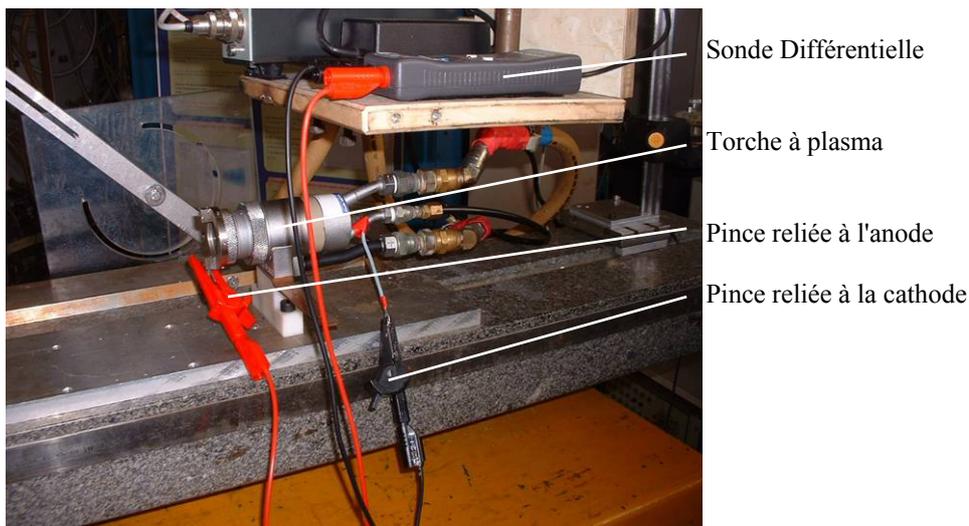


Figure 2-6 : La sonde différentielle.

2.2.2 La sonde ampérométrique

La mesure de l'intensité du courant qui traverse la torche (le courant d'arc) est importante pour plusieurs raisons. Le premier point est de savoir à quelle intensité correspond la tension mesurée à chaque instant. En effet, il sera vu par la suite que l'intensité du courant influence la valeur de la tension moyenne. Lors des premières expériences d'acquisition de signaux, l'intensité du courant était mesurée au niveau du connecteur eau/électricité à l'aide d'une sonde ampérométrique. Or le même parasite que celui décrit pour la mesure de tension venait perturber les valeurs acquises. Une sonde ampérométrique de type bobine de Rogowsky a donc été mise en place autour d'une tresse noyée au plus près de la torche. Cette sonde (cf. Figure 2-7) comprend une pince qui mesure le flux magnétique créé par le courant qui traverse la tresse et renvoie cette information vers un amplificateur dont le gain est réglable. Une tension proportionnelle au courant mesuré est alors disponible. Le rapport entre la tension renvoyée et le courant réel est de 200:1 (200A mesurés renvoient 1V).

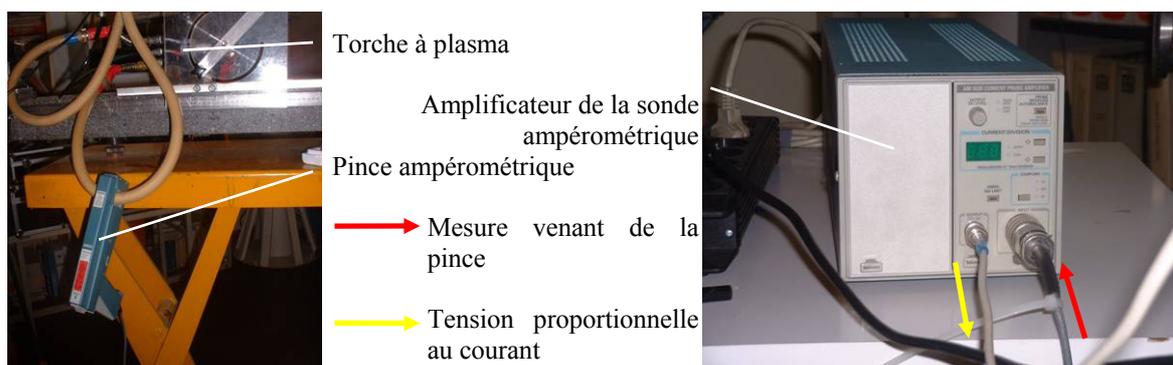


Figure 2-7 : la sonde ampérométrique

2.2.3 Les microphones

Trois ensembles de mesures du son ont été employés durant les diverses phases de mises au point du montage expérimental (cf. Figure 2-8) : Un microphone et un amplificateur réalisé au laboratoire ("ensemble I"), un ensemble composé d'un microphone et de son amplificateur propre ("ensemble II") et un enregistreur numérique muni d'un microphone ("ensemble III"). Les deux premiers systèmes (I et II) permettent l'acquisition du son en transformant l'onde sonore mesurée, en tension proportionnelle à l'intensité du son. Cette tension doit être acquise par d'autres appareils (oscilloscopes ou carte d'acquisitions d'ordinateur) capables de les enregistrer. L'enregistreur numérique (III) n'a pas besoin d'oscilloscope pour garder les données qu'il mesure puisqu'il a sa propre mémoire intégrée (16Mo).

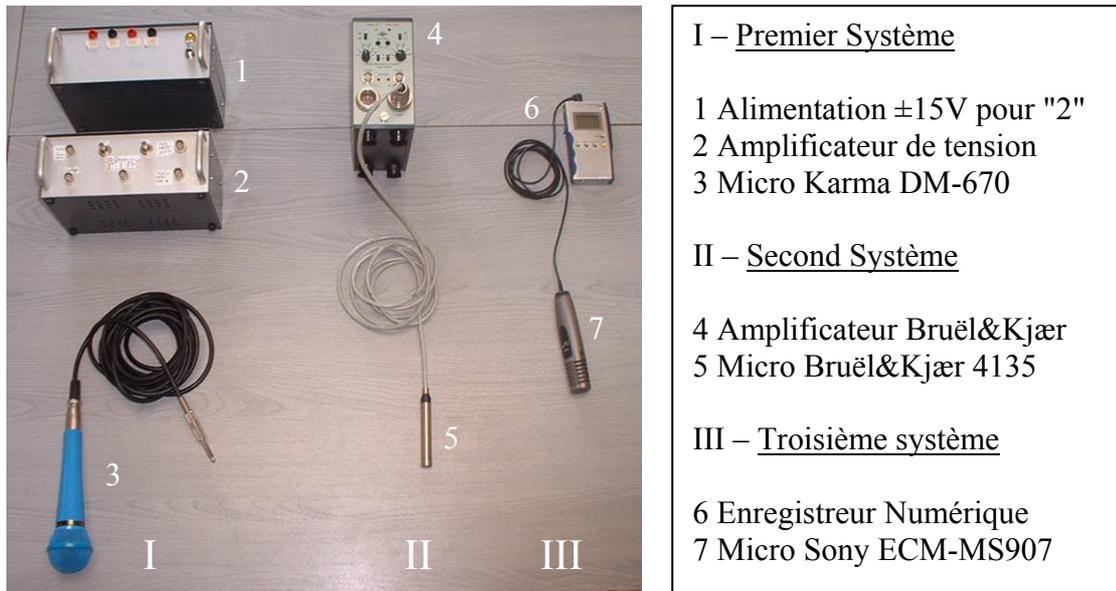


Figure 2-8 : Les trois systèmes d'acquisition du son émis par la torche plasma

Le premier microphone utilisé est un microphone dynamique "DM-670" de la société KARMA ("3"). Son Impédance est de 600Ω . Muni d'une prise "Jack", il a été connecté à un oscilloscope (voir plus loin pour ses caractéristiques) via un câble GPIB. Le signal reçu de ce microphone s'est avéré trop faible malgré l'intensité acoustique émise par la torche. Pour améliorer le gain de son signal, un montage électronique ("2") et son alimentation ("1") ont été réalisés et utilisés. Le schéma de ce montage est présenté sur la Figure 2-9.

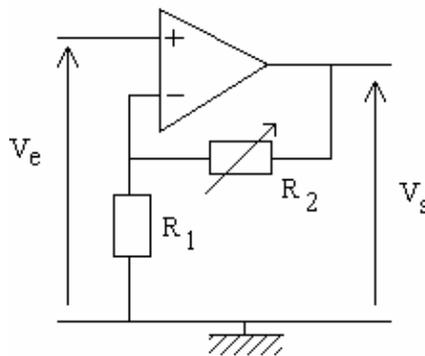


Figure 2-9 : Schéma du circuit d'amplification du signal reçu du microphone DM-670

V_e est la tension d'entrée, reçue du microphone, et V_s est la tension amplifiée et envoyée vers les oscilloscopes. La fonction de transfert de ce montage est : $V_s/V_e = (R_2 + R_1)/R_1$. La résistance R_1 a une valeur constante de $1k\Omega$ et R_2 est une résistance variable de 0 à $100k\Omega$, en conséquence de quoi le coefficient d'amplification est compris entre 1 et 101. Dans tous les cas (sauf mention contraire), toutes les expériences menées avec ce système (microphone et amplificateur), ont été effectuées avec un coefficient d'amplification de 100 pour le signal sonore.

Le second système (II) utilise un microphone Type4135 de Bruël&Kjær ("5") muni d'un préamplificateur et d'un amplificateur ("4") dont le gain est réglable entre 0 et 50dB. Ce gain sera précisé pour chaque expérience présentée, qui aura utilisé ce système. Une tension proportionnelle au niveau sonore est disponible en sortie de l'amplificateur avec un rapport de $3,59\text{mV.Pa}^{-1}$.

Le dernier système (III) est autonome du point de vue de l'enregistrement des données. Il se compose d'un microphone Sony ECM-MS907 ("7") et de l'enregistreur numérique Sanyo ICR-B100 ("6"). Les données recueillies par l'enregistreur numérique peuvent être ensuite transférées sur ordinateur pour être traitées en différé, c'est-à-dire après un tir de torche, contrairement aux données recueillies par les ensembles I et II qui peuvent subir une analyse en ligne. Les données acquises par cet ensemble III ont été analysées le plus souvent par transformées en ondelettes à l'aide des logiciels conçus à cet usage, car le format d'enregistrement de l'enregistreur numérique est en fichiers ".WAV", facilement utilisable par ces logiciels.

2.2.4 Les oscilloscopes

Les signaux émis par la torche en terme de tension, d'intensité du courant et de son, sont acquis avec le matériel présenté ci-dessus. La sonde différentielle, la sonde ampérométrique et les microphones (ensembles I et II) renvoient tous une tension proportionnelle à chacun de leur paramètre mesuré. Ces tensions sont récupérées par deux oscilloscopes LECROY 9304A et LECROY 9314M. L'intensité du courant est seulement acquise sur un oscilloscope alors que la tension d'arc et le son émis par la torche sont envoyés sur les deux oscilloscopes dont les bases de temps sont différentes, afin d'avoir à la fois une précision temporelle suffisante et une bonne précision fréquentielle pour les spectres. En effet un spectre calculé par transformée de Fourier rapide (FFT) est d'autant plus précis en fréquence (Δf petit) que la base de temps du signal d'origine est grande (δt grand) :

$$\Delta f = 1 / (N \cdot \delta t)$$

Avec Δf : la résolution fréquentielle (Hz)

N : le nombre de point pris en compte pour le calcul (-)

δt : la résolution temporelle (s)

Par exemple, pour un signal de $N = 5000$ échantillons, acquis avec une base de temps de $20\mu\text{s}/\text{point}$, la résolution spectrale est de $\Delta f = 10$ Hz.

Selon le critère de Nyquist, la fréquence maximale est donnée par : $f_{\text{max}} = 1/(2\delta t)$

Les oscilloscopes sont donc réglés de manière optimale dans le but d'acquérir des signaux qui varient sur plusieurs échelles de temps. La rapidité d'acquisition dépend du nombre de points sur chacune des voies. 5000 points est le nombre retenu car il permet d'avoir une fréquence d'acquisition relativement élevée (chaque seconde environ, toutes les voies des deux oscilloscopes sont rafraîchies). La résolution temporelle de l'oscilloscope LECROY 9304M est de $200\mu\text{s}/\text{point}$ ($\text{TDIV} = 100\text{ms}$) et le spectre, calculé par FFT, s'étend de 0 à ~ 2500 Hz avec $\Delta f = 1\text{Hz}$. Le second oscilloscope LECROY 9314A a une base de temps de $20\mu\text{s}/\text{point}$ (avec $\text{TDIV} = 10\text{ms}$) ce qui permet, après traitement des données, d'obtenir des spectres relatifs aux deux signaux reçus sur cet appareil (celui de tension aux bornes des électrodes et celui du son) dont la résolution est de 10Hz entre chaque point et qui s'étendent de 0 à 25000 Hz.

2.2.5 L'ordinateur et le logiciel d'acquisition

Les deux oscilloscopes sont reliés à un ordinateur PC où est exécuté un programme d'acquisition développé sous le logiciel LABVIEW de National Instrument. Dans les premiers temps, la connexion entre les oscilloscopes et l'ordinateur a été effectuée par le protocole RS232 (envoi des données et des ordres par série). Cette configuration s'est vite avérée obsolète à cause de son faible taux de transfert et du nombre important de données à récupérer. Le remplacement des connexions RS232 par des câbles GPIB (envoi des données par les ports parallèles) a permis une augmentation de la vitesse de transfert au moins d'un facteur huit et donc une augmentation de la vitesse d'acquisition des signaux c'est-à-dire une meilleure précision dans les résultats (Dans le même temps d'acquisition, on a au moins huit fois plus de signaux de chaque paramètre (tension, courant et son) avec des câbles GPIB à la place des câbles RS232).

De nombreux programmes sous Labview furent développés au cours de cette thèse. Au fur et à mesure les signaux ont pu être acquis ensemble, puis dans la même base de temps (ce qui par exemple rend possible la mise en relation des signaux de tension et de son). Ensuite les traitements (Calcul de moyenne, analyse par FFT, calcul du rendement thermique, etc.) et les procédures de stockage de données, sous des formats lisibles ultérieurement pour des post-traitements, ont été ajoutés aux programmes d'acquisition pour aboutir à d'importants programmes dont certains seront présentés plus loin.

Labview est un logiciel de programmation par flux de données, c'est-à-dire qu'aucune ligne de code n'est à rentrer. Ce sont l'utilisation d'icônes et de fils de liaisons entre ces

derniers qui permettent de tout programmer, depuis des opérations logiques simples jusqu'à la manipulation de tableaux bidimensionnels servant au stockage des données.

Un programme développé sous Labview (aussi appelé un *Instrument Virtuel* ou *VI* en anglais pour *Virtual Instrument*) se divise en deux éléments : la face avant et la face arrière. La face avant correspond à l'interface entre l'utilisateur et la face arrière. On retrouve les graphiques, les valeurs numériques, et les boutons de commandes sur la face avant alors que les opérateurs logiques, les sous-programmes (Un VI peut être utilisé en sous-VI en paramétrant ses entrées et/ou ses sorties) et tous les fils de liaisons entre icônes se situent dans la face arrière. Il est important de bien arranger les faces avant pour donner une vision claire de ce qu'un VI permet de faire.

2.2.6 La chaîne globale d'acquisition

Trois paramètres de la torche peuvent être acquis lors d'un tir : la tension électrique aux bornes des électrodes, l'intensité du courant traversant la torche et l'émission acoustique émise par la torche. La chaîne globale d'acquisition est schématisée sur la Figure 2-10. Ces trois derniers sont mesurées respectivement par une sonde différentielle, une pince ampérométrique et un, voire simultanément deux, système(s) de mesure sonore (ensemble I ou II avec quelque fois l'enregistrement du son par un enregistreur numérique). Trois tensions proportionnelles à l'intensité des paramètres mesurés sont ensuite envoyées sur deux oscilloscopes, qui sont finalement reliés ensemble par connexion rapide à un ordinateur, qui sous Labview gère l'acquisition, le traitement et le stockage des données.

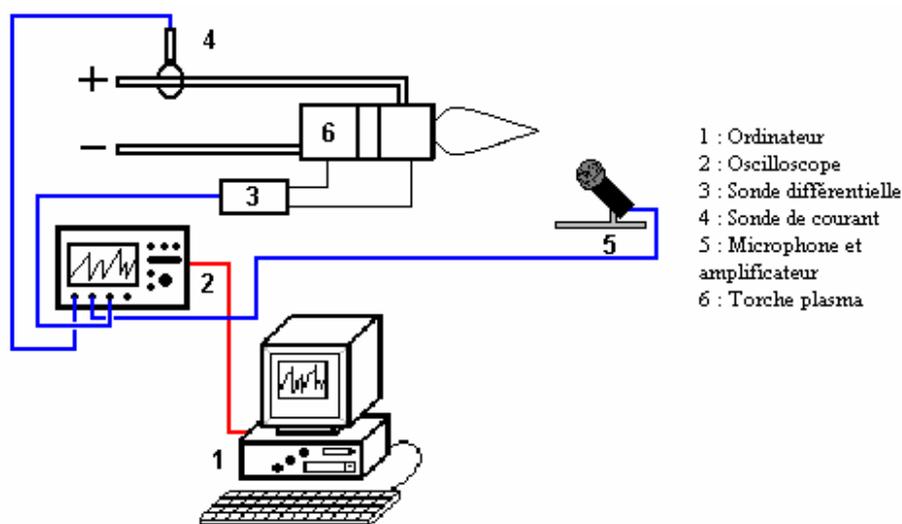


Figure 2-10 : Le montage expérimental dans sa globalité.

Tous ces instruments de mesures, les deux oscilloscopes et l'ordinateur permettent d'acquérir des signaux instantanés (cf. Chapitre 3.2) qui, après traitement (cf. Chapitre 3.3 et

3.4), doivent indirectement fournir des indications sur l'état d'érosion des électrodes. Cependant, cet état d'érosion doit être évalué par d'autres méthodes, pour permettre de relier tel signal avec tel état d'usure. Le chapitre 2.3 présente deux méthodes choisies pour donner une idée de l'état de surface des tuyères, non plus lorsque la torche est en fonctionnement, mais une fois que la torche est éteinte et démontée.

2.3 Les outils d'évaluation de l'érosion

L'érosion des anodes - tuyères est difficile à quantifier. En effet, comment rendre compte par des données numériques de l'état de surface d'un canal cylindrique de 6 ou 7 mm de diamètre interne? Toute analyse de rugosité est impossible car il n'existe pas d'indenteur capable de rentrer dans un espace aussi petit. La géométrie de la surface à quantifier est cylindrique ce qui complique l'approche. Une demande d'analyse de surface dans une société utilisant des analyseurs de surface par imagerie laser 3D a été faite mais leur technique n'avait pas la précision requise pour quantifier des imperfections de surfaces de la taille de celles rencontrées dans l'anode. Deux solutions ont donc été retenues pour, non pas quantifier, mais obtenir des informations comparatives entre anodes.

La première méthode consiste à obtenir l'image de l'intérieur de la tuyère grâce à un système de lentilles et un caméscope numérique pourvu d'un zoom optique. La complexité de la tâche vient de la difficulté à éclairer l'intérieur de la tuyère suffisamment pour obtenir une image claire mais pas trop non plus, pour ne pas saturer le caméscope. L'éclairage fut réalisé à l'aide d'une fibre optique dont l'intensité lumineuse était ajustable. Cette fibre est placée à une extrémité de la tuyère et l'ensemble lentille + caméscope de l'autre côté. Une légère inclinaison de la tuyère est nécessaire pour mettre en évidence avec la lumière ainsi rasante, les défauts tels que des fissures, des cratères d'impact d'arc ou des agglomérations de matières qui avaient fondues et s'étaient solidifiées ensuite. Des descriptions détaillées ont donc pu être faites à l'aide de ce système pour déterminer si une tuyère était faiblement, modérément ou extrêmement érodée.

La seconde méthode mise au point au laboratoire a été de réaliser l'empreinte de chaque anode. Il fallait trouver une matière facilement injectable dans le canal cylindrique de l'anode, durcissant rapidement, et enfin élastique et résistante pour être extraite sans être déformée et surtout sans perdre les traces laissées par l'érosion. La pâte devait aussi être suffisamment peu visqueuse pour s'introduire facilement dans les défauts de surface. La solution retenue a été l'utilisation de pâtes à base de silicone réticulant par condensation,

utilisées par les dentistes pour mouler les mâchoires de leurs patients. La société Denta Services Centre de Limoges a fourni les produits et les moyens d'application, l'un manuel et l'autre automatisé. Le premier ensemble comprend un tube de polysiloxane (Xantopren VL) et un tube d'activateur, dont les deux produits mélangés ensemble manuellement, forment un ensemble peu visqueux (qui peut donc facilement être introduit dans l'anode) et qui polymérise à une vitesse inversement proportionnelle à la viscosité du mélange. Plus le mélange est liquide plus le temps pour polymériser est long et inversement. Une pâte trop liquide rentre dans tous les défauts de la surface interne, mais ne polymérise quasiment pas alors qu'une pâte pas assez liquide, se solidifie avant d'avoir complètement rempli l'intérieur de la tuyère. Le second système résout ce problème de dosage à l'aide d'un pistolet injecteur de pâte (cf. Figure 2-11) dont la cartouche est composée de deux réservoirs, l'un rempli de Xantopren et l'autre d'activateur. Chaque pression sur la gâchette du pistolet envoie la dose idéale d'activateur (1 pression équivaut à 3,9 ml/4,4 g de Xantopren et à 8 gouttes d'activateur i.e. 0,17ml/0,18g) pour avoir la bonne viscosité de mélange et un temps de séchage acceptable (5 min). L'empreinte présente une déformation maximale sous compression (pour l'extraire de l'anode) de 8% et une déformation rémanente après compression de 98%. La rétraction, c'est-à-dire la variation dimensionnelle linéaire n'est que de 1,0%. Les empreintes ainsi réalisées ont permis de mieux appréhender l'ensemble de l'intérieur de la tuyère. Elles sont le complément de l'approche optique de la première méthode.

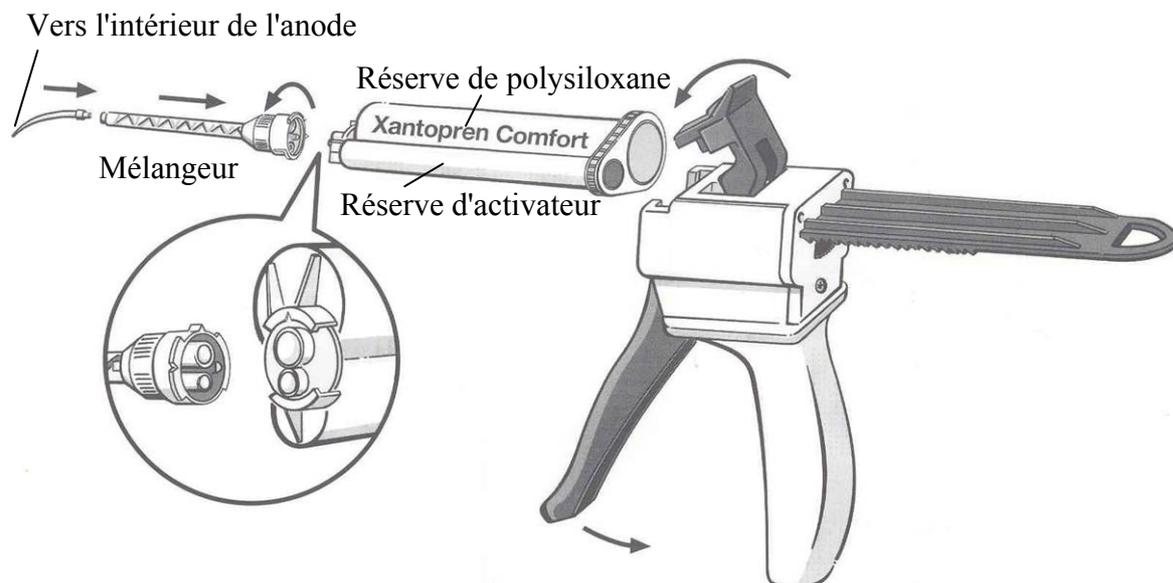


Figure 2-11 : Pistolet d'injection de pâte pour empreinte siliconée de l'intérieur des anodes

Le problème soulevé dans les deux cas d'évaluation de l'érosion (optique et par empreinte) est qu'il faut démonter la torche pour extraire la tuyère à chaque fois que l'on veut

connaître son état. La remise en place d'un couple d'électrodes usées est une opération très difficile, voire impossible, puisqu'il faut centrer les deux électrodes l'une par rapport à l'autre. Dans le cas contraire, le temps de vie du couple d'électrodes est diminué du fait de l'orientation préférentielle de l'érosion qui s'opère non plus sur toute la surface cylindrique de l'anode mais seulement sur une portion du canal cylindrique. Le centrage des électrodes lors de la mise en place d'un nouveau jeu est une opération indispensable et assez délicate. Des outils existent pour effectuer cette tâche mécaniquement mais les opérateurs préfèrent parfois vérifier le centrage en faisant claquer des décharges haute tension haute fréquence (identique à celles utilisées pour allumer une torche) et en regardant comment se répartit spatialement la décharge. Un mauvais centrage provoquera un arc à l'endroit où la distance entre la pointe de cathode et l'anode sera la plus faible. Le problème avec des électrodes usées est que la pointe de cathode ne permet pas l'usage de l'instrument de centrage puisque cette pointe, érodée, n'a plus une géométrie adéquate (la symétrie axiale n'est plus respectée). C'est donc qu'en fin de vie de chaque jeu d'électrodes étudié, que l'état d'usure de l'intérieur de l'anode a pu être établi bien qu'aucune de ces deux méthodes d'évaluation ne soit destructive.

La technique de la pesée a bien entendu été envisagée, mais elle n'est pas adaptée car elle requiert une précision permettant de distinguer des variations de quelques milligrammes sur un objet (la tuyère) qui pèse 160g.

3 Traitements des signaux émis par la torche

3.1 Introduction

Comme il a été dit précédemment (fin du chapitre 2.2.6), les signaux fournis par une torche à plasma en fonctionnement, que ce soit ceux de la tension ou bien ceux du son, doivent permettre d'avoir une indication de l'état d'érosion des électrodes et plus précisément de celle de l'anode. L'objectif de ce chapitre est de montrer quelles informations il est possible d'obtenir à partir d'un tir normalisé de torche, d'une durée de 5 minutes, "surveillé" par les instruments de mesures qui viennent d'être présentés. Notre but est de caractériser le plus simplement possible un tir de courte durée, avec quelques valeurs numériques. C'est ensuite, l'évolution de ces valeurs, au cours du fonctionnement de la torche (en heures) qui permettra de choisir parmi celles-ci, laquelle ou lesquelles sont les plus influencées par l'érosion des électrodes (cf. chapitre 4.2) et donc les plus efficaces pour assurer son suivi.

Deux questions sont à la base de tous les traitements des signaux qui sont présentés par la suite : Quel est le signal émis par la torche qui est le plus pertinent pour juger de l'érosion des électrodes : le son émis par la torche ou la tension aux bornes des électrodes? Quel paramètre dans un signal temporel est le meilleur indicateur de l'usure des anodes? Sa moyenne? Son écart type? Sa fréquence? L'allure de son enveloppe ou la fréquence de cette dernière?

De plus, les fluctuations du pied d'arc, d'une part, et l'érosion des électrodes, d'autre part, sont deux phénomènes qui n'interviennent pas du tout sur les mêmes échelles de temps. Le premier demande une observation de quelques millisecondes alors que le second s'étale sur des heures de fonctionnement de la torche. Comment ainsi rendre compte, à partir de signaux temporels très rapides, de la manifestation lente de l'usure?

Pour tenter de répondre à ces questions, le choix du ou des paramètres les plus indicatifs de l'érosion des électrodes se pose seulement entre la tension aux bornes des électrodes et/ou le son émis par la torche. En effet, l'intensité lumineuse émise par la torche aurait pu être aussi un candidat potentiel pour fournir les renseignements d'usure, mais la mise en place d'un système de mesure optique adéquat n'a pas pu aboutir.

Il y a des avantages et des inconvénients à suivre chacun de ces deux paramètres. En

effet, la tension aux bornes des électrodes est, d'après les premières expériences faites au laboratoire et d'après les travaux publiés par d'autres équipes de recherche, le paramètre le plus directement influencé par l'érosion puisque premièrement la tension reflète la longueur de l'arc électrique et deuxièmement, la dynamique de l'arc (ses fluctuations, son allongement, etc.), qui sont modifiées suivant l'état d'usure de la surface interne de l'anode. Au contraire, le son émis par la torche, est un phénomène qui découle de ces fluctuations d'arc, et donc les informations contenues dans le son ont été transmises (les fluctuations de l'arc provoquent les fluctuations de l'air ce qui est à l'origine du son). Ainsi la précision des informations, concernant l'érosion, contenues dans le son seront sûrement un peu altérées ou du moins d'intensité plus faible. Nous verrons par la suite qu'en effet les amplitudes maximales des spectres relatifs aux signaux du son, sont plus faibles que ceux relatifs à la tension. Néanmoins, l'acquisition du signal sonore d'une torche a l'avantage de ne pas nécessiter de contact physique avec la torche, contrairement à la mesure de la tension, qui demande à ce que soient posées des pinces de mesures (celles de la sonde différentielle) sur les électrodes. Cet inconvénient, lié à l'acquisition, peut sembler raisonnablement acceptable, mais en raison des procédures strictes de tir de Volvo Aero, conditionnées par l'exigence des normes de l'Aéronautique, il peut s'avérer plus contraignant qu'il n'y paraît au premier abord.

Le chapitre 3.2 définit ce qu'est un tir normalisé et présente le programme qui a été conçu et développé sous Labview (VI nommé "NPSL4.vi") pour permettre l'enregistrement d'un maximum de données possible (signaux et spectres) pendant un tir. Une série de traitements à la fois sur les signaux de tensions (chapitre 3.3) et sur les spectres de la tension et sur ceux du son (chapitre 3.4) est ensuite présentée.

3.2 Le tir normalisé et le logiciel d'acquisition des signaux.

Afin de réaliser une étude systématique de l'influence du temps de fonctionnement (donc de l'érosion) sur quelque signal que ce soit, il faut impérativement prévoir des tirs de torche dédié à ce contrôle, que nous nommerons "*tir-test*" (ou "*run*"). Ces tirs-tests sont effectués dans les mêmes conditions de fonctionnement de la torche, à intervalles réguliers (toutes les cinq heures de fonctionnement par exemple), sur toute la durée de vie des électrodes. Un tir-test est composé de trois phases dans le temps : le démarrage de la torche, le fonctionnement sous condition stable et l'arrêt de la torche. Le fonctionnement sous conditions stable (débit masse des gaz plasmagènes et intensité voulue du courant, atteints et maintenus fixes durant toute cette phase) permet d'obtenir, grâce au logiciel d'acquisition, un nombre suffisant de données pour effectuer des statistiques. Nous avons posé la limite

inférieure du nombre de valeurs nécessaires pour avoir un échantillonnage suffisant, à 50. Cela signifie que chaque moyenne ou chaque écart quadratique moyen présenté plus tard sera calculé à partir d'au moins 50 valeurs.

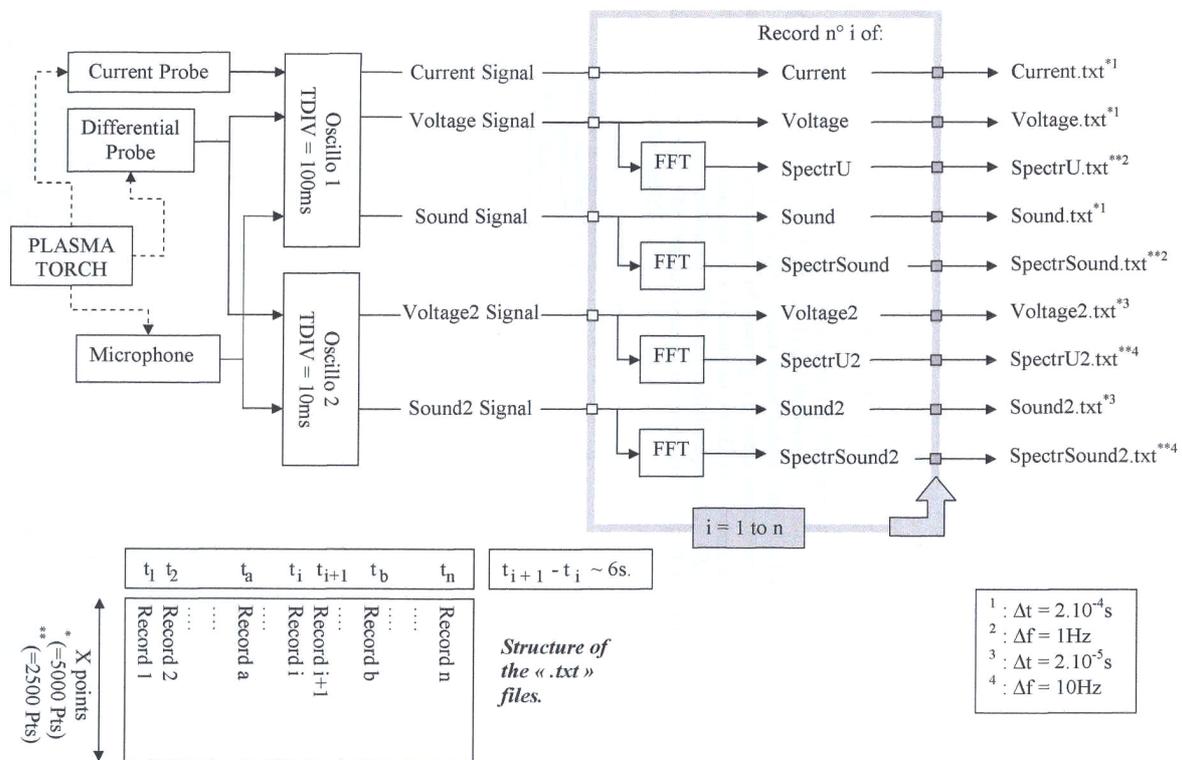


Figure 3-1 : Principe d'acquisition, de traitement et de stockage des données de "NPSL4.vi"

La Figure 3-1 représente le schéma d'acquisition, de traitement et de stockage du programme "NPSL4". La torche en fonctionnement est donc surveillée par la sonde différentielle pour la tension aux bornes des électrodes, l'ensemble II pour le son et la pince ampérométrique pour le courant. Un premier oscilloscope, recueille sur quatre voies, avec 5000 points par voie et sur une durée de 1s, le signal du courant (voie I1), celui de l'enveloppe de tension (voie I2), celui de la tension (voie I3) et celui du son (voie I4). Un second oscilloscope recueille, toujours avec 5000 points mais sur seulement 0,1s, les deux signaux de tension (voie II3) et du son (voie II4). Le programme "NPSL4", sous Labview, récupère toutes les 6s, ces six signaux. En effet le programme fonctionne en boucle jusqu'à ce que l'opérateur décide de l'interrompre (il y a un bouton d'arrêt), par exemple dès que la torche est éteinte. A chaque boucle on obtient un *enregistrement* (aussi appelé *record*). Les 6s sont nécessaires pour transférer les données depuis les oscilloscopes jusqu'à l'ordinateur, et effectuer les calculs de FFT pour les deux signaux de tension, les deux signaux de son et le signal de l'enveloppe de tension. A chaque *enregistrement*, les données des six signaux et des cinq spectres sont ajoutées dans des tableaux spécifiques à chacun des paramètres (un tableau

pour l'intensité, un tableau pour le signal de l'enveloppe, un pour le spectre du signal de l'enveloppe de la tension, etc.). L'instant où s'est fait l'acquisition (noté t_{Record}) est enregistré avec les données. Ces tableaux de données sont enregistrés en format texte (lisible sous Excel) dès que le bouton arrêt du programme est poussé. La structure de ces fichiers est schématisée sur la Figure 3-2.

La taille de ces fichiers est impressionnante puisque pour un tir de cinq minutes, on a 50 records ($=300\text{secondes} / (6\text{s}/\text{record})$), soit pour les signaux, 5000 points * 50 records = 250000 points ($\sim 3\text{Mo}$) et pour les spectres, 2500 points * 50 records = 125000 points ($\sim 1,5\text{Mo}$). Au total, un tir de cinq minutes demande une place mémoire dans l'ordinateur, uniquement pour le stockage des données, de 30Mo. Ces valeurs montrent qu'un traitement des données est indispensable pour synthétiser ces données en seulement quelques valeurs qui seront la signature d'un tir-test.

	Temps de chaque enregistrement (s)					Chaque colonne porte les données d'un signal				
	0	0.05	6.269	12.337	18.396	445.871	452.23001	458.61899	464.84799	471.35699
Instant d'acquisition (s)	0.00002	38.71089	95.5675	31.45259	29.03316	1.20972	1.20972	1.20972	0	1.20972
	0.00004	104.03551	108.87437	32.66231	27.82345	2.41943	1.20972	2.41943	0	1.20972
	0.00006	153.63383	118.55209	31.45259	30.24288	1.20972	1.20972	1.20972	2.41943	1.20972
	0.00008	153.63383	118.55209	29.03316	30.24288	1.20972	1.20972	1.20972	2.41943	0
	0.0001	153.63383	111.2938	30.24288	30.24288	0	1.20972	0	2.41943	0
	0.00012	145.16582	100.40636	31.45259	29.03316	0	0	1.20972	2.41943	0
	0.00013	107.66465	90.72864	29.03316	29.03316	1.20972	1.20972	1.20972	2.41943	1.20972
	0.00015	84.68006	87.09949	29.03316	29.03316	1.20972	0	1.20972	1.20972	1.20972
	0.00017	76.21206	89.51893	31.45259	29.03316	1.20972	0	0	1.20972	1.20972
	0.09597	1.20972	1.20972	30.24288	29.03316	2.41943	0	1.20972	1.20972	2.41943
	0.09599	1.20972	0	31.45259	29.03316	1.20972	1.20972	2.41943	1.20972	2.41943
	0.09601	1.20972	1.20972	29.03316	29.03316	2.41943	0	1.20972	1.20972	1.20972
	0.09603	2.41943	2.41943	30.24288	29.03316	1.20972	1.20972	0	2.41943	2.41943
	0.09605	2.41943	15.7263	31.45259	29.03316	1.20972	1.20972	1.20972	1.20972	1.20972
	0.09606	0	66.53433	30.24288	27.82345	1.20972	1.20972	1.20972	0	1.20972
	0.09608	1.20972	129.43953	31.45259	30.24288	1.20972	1.20972	1.20972	1.20972	1.20972
	0.0961	2.41943	153.63383	31.45259	29.03316	1.20972	1.20972	2.41943	1.20972	1.20972
	0.09612	1.20972	153.63383	31.45259	27.82345	2.41943	1.20972	1.20972	1.20972	1.20972
	0.09614	1.20972	153.63383	31.45259	27.82345	1.20972	2.41943	2.41943	2.41943	1.20972
	0.09616	1.20972	125.81038	31.45259	29.03316	0	1.20972	1.20972	2.41943	1.20972
	0.09618	0	94.35779	31.45259	29.03316	0	0	1.20972	2.41943	1.20972
	0.0962	1.20972	79.8412	31.45259	29.03316	0	1.20972	1.20972	2.41943	2.41943

Figure 3-2 : Structure des fichiers d'enregistrement. Exemple pour un fichier concernant les signaux de tension, récupérés sur l'oscilloscope à la plus haute résolution (voltage2.txt)

3.3 Le traitement des signaux de tensions

La tension aux bornes des électrodes est acquise sur deux bases de temps par signaux discrétisés constitués de 5000 couples (t_i, V_i) . L'indice i signifie *instantané*. Pour plus de clarté dans l'exposé, nous prendrons un exemple pour illustrer le traitement permettant d'aboutir à la synthèse des données. La Figure 3-3 sert de support visuel aux explications mathématiques qui vont suivre.

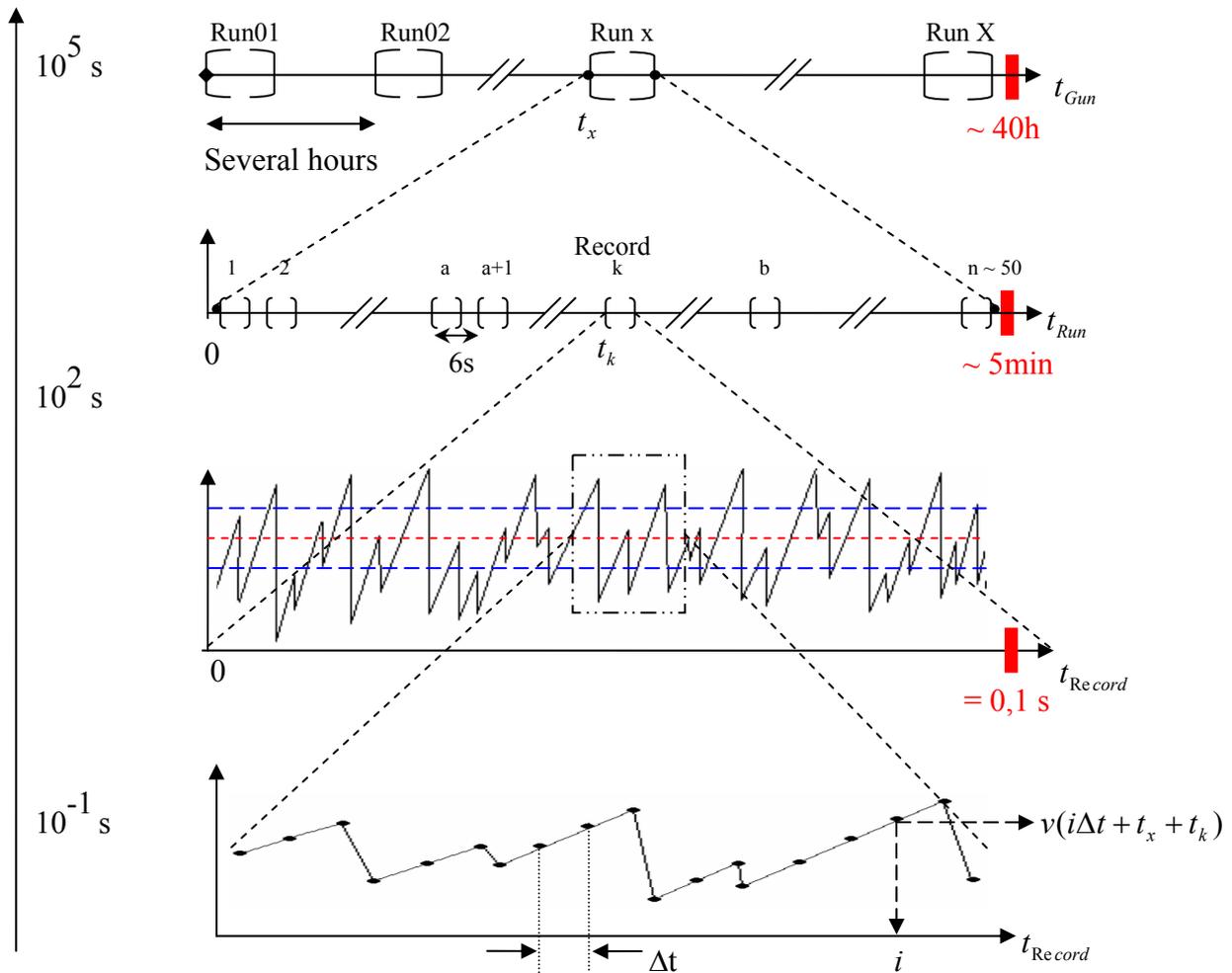


Figure 3-3 : Les différentes échelles de temps imbriquées dans un signal de tension

Considérons une torche à plasma équipée d'un jeu d'électrodes neuf. Faisons-la fonctionner sur une durée de 40h au bout desquelles les électrodes sont usées et donc doivent être remplacées. Durant ces 40h de fonctionnement, on réalise X tirs-tests à intervalle régulier. On verra dans le chapitre 4.2 que X est un entier compris entre 9 et 15. Soit x l'indice d'un tir-test (x est donc compris entre 01 et X), on note t_x le temps de fonctionnement de la torche avant ce tir-test (noté Run x). Supposons que la durée totale de Run x est de 5 minutes. Le programme d'acquisition aura réalisé 50 enregistrements (ou records), distant les uns des autres de 6s, que l'on note chacun par $Record_k$ (avec k compris entre 1 et 50). Soit t_k , le temps correspondant au $Record_k$. Pour chaque record, on a les six signaux et cinq spectres présentés précédemment. Intéressons-nous au fichier de tension qui a la résolution temporelle la plus précise (*voltage2.txt*). Ce fichier est constitué de 5000 couples (t_i, V_i) , avec i compris entre 1 et 5000. La résolution entre deux points consécutifs est Δt ($\Delta t = 2.10^{-5}$ s dans le cas le plus précis et $\Delta t = 2.10^{-4}$ s pour l'autre oscilloscope). On peut donc écrire le couple (t_i, V_i) sous la forme $(i, V(i\Delta t + t_k + t_x))$. L'évolution de la tension instantanée est représentée sur la Figure 3-4.

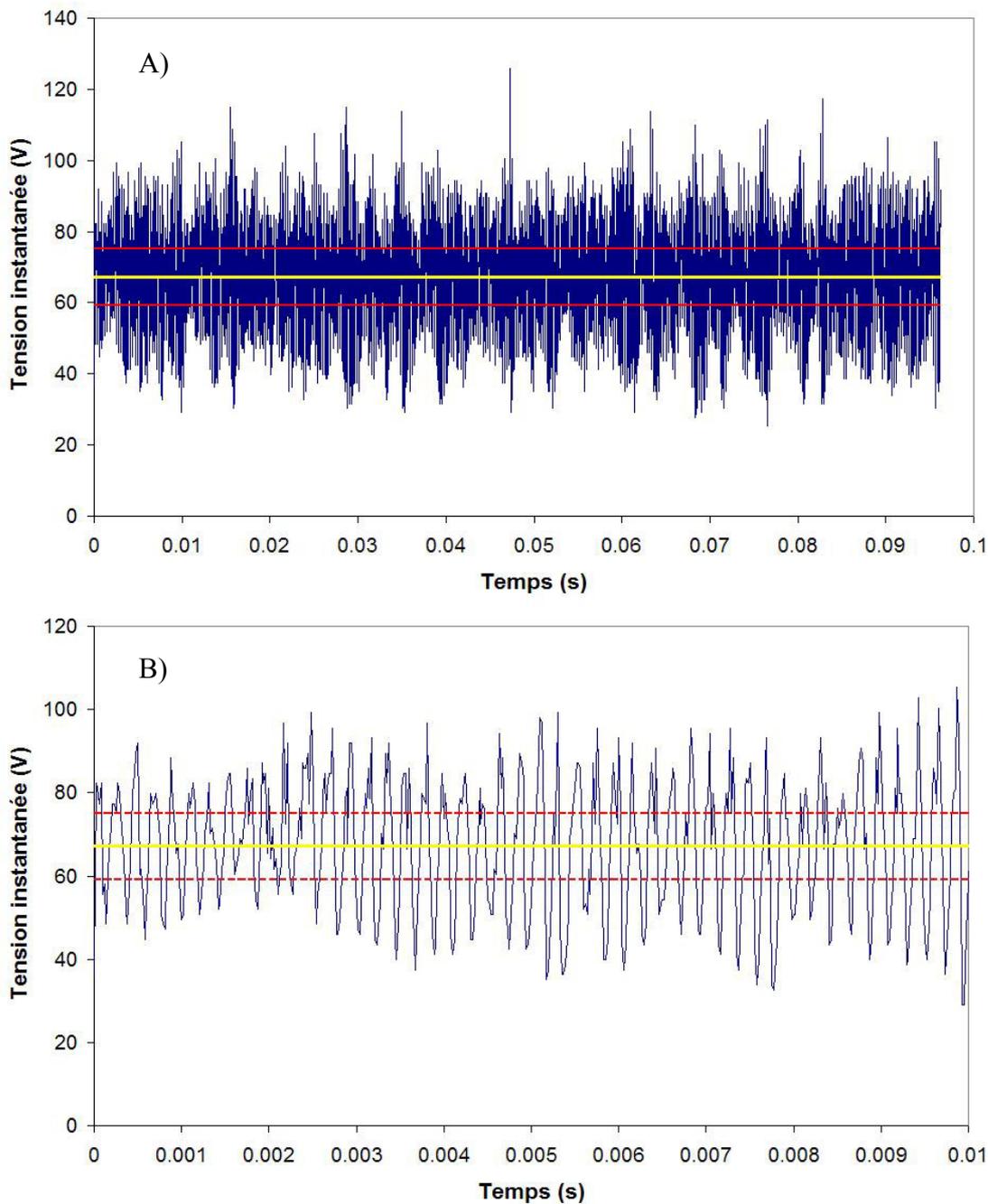


Figure 3-4 : Signal de tension instantanée. 5000 points : A) sur 0,1s – B) zoom sur 0,01s

On distingue clairement (B) l'évolution en dent de scie de la tension, relative aux fluctuations du pied d'arc. L'amplitude des extrema de tensions est aussi un élément caractéristique de ces signaux. En effet, on peut noter que l'enveloppe supérieure et l'enveloppe inférieure du signal (une première courbe qui relierait les maxima et une seconde pour les minima) évoluent selon une certaine fréquence. C'est à la suite de l'observation de l'allure des signaux de tension que l'étude de l'enveloppe a été lancée avec l'espoir que ces enveloppes montreraient une évolution avec le temps de fonctionnement de la torche.

Le premier traitement sur les signaux de tensions a consisté, pour chaque *enregistrement* (ou *record*), à calculer deux valeurs statistiques dites "locales": la tension moyenne locale (que l'on note V_k^x) et l'écart quadratique moyen local (que l'on note RMS_k^x). Ces deux grandeurs sont symbolisées sur la Figure 3-4, pour la première, par la ligne jaune, et pour la seconde, par la distance entre les deux droites discontinues rouges. C'est à partir des 5000 points que sont calculées ces deux grandeurs selon:

$$V_k^x = \frac{1}{5000} \sum_{i=1}^{5000} V(i\Delta t + t_x + t_k)$$

Équation 3-1 : Définition de la tension moyenne locale V_k^x

$$RMS_k^x = \sqrt{\frac{1}{5000} \sum_{i=1}^{5000} (V(i\Delta t + t_x + t_k) - V_k^x)^2}$$

Équation 3-2 : Définition de l'écart quadratique moyen local RMS_k^x

Ces deux valeurs locales permettent déjà de réduire de 5000 à seulement 2, le nombre de valeurs caractéristiques d'un signal de tension aux bornes des électrodes. L'évolution de cette tension moyenne locale (V_k^x) et de cet écart quadratique moyen local (RMS_k^x), en fonction de k , c'est-à-dire pour l'ensemble de tous les enregistrements du $x^{\text{ième}}$ tir-test est représenté sur la Figure 3-5.

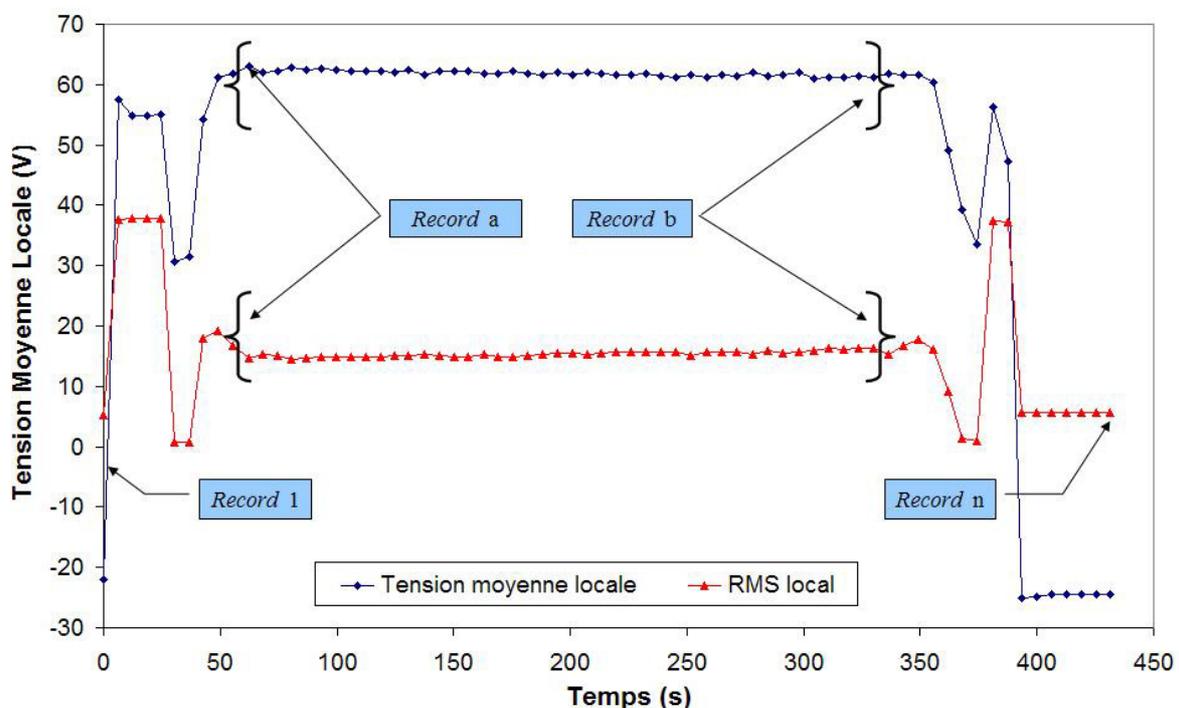


Figure 3-5 : Evolution de la tension moyenne locale et du RMS local au cours d'un tir-test.

Sur cette Figure 3-5, on visualise nettement les trois phases consécutives d'un tir-test. Entre le Record₁ et le Record_{a-1}, on retrouve toutes les étapes liées au démarrage de la torche :

Les premières valeurs, aux environs de 55V, correspondent à la tension à vide qui précède la décharge haute tension haute fréquence. Ensuite, la torche fonctionne à l'argon uniquement (60Nl.min^{-1}) avec une tension de 30V. Puis on rajoute progressivement l'hydrogène (de 0 à 15Nl.min^{-1}) tout en ramenant le débit volumique d'argon à 45Nl.min^{-1} . La tension remonte alors vers 60V. On ajuste l'intensité du courant pour atteindre les 600A. Entre le $Record_a$ et le $Record_b$, on est dans la zone dite "de fonctionnement stable" du tir-test, c'est-à-dire que l'on a atteint les débits voulus pour les gaz plasmagènes et l'intensité du courant est maintenue constante (ici à 600A). On laisse fonctionner la torche dans cette configuration jusqu'à obtenir une cinquantaine d'enregistrements, soit ~ 5 minutes. Ensuite du $Record_{b+1}$ jusqu'au $Record_n$ (le dernier) on procède à l'arrêt de la torche (diminution de l'intensité du courant jusqu'à 300A, coupure de l'hydrogène puis arrêt du générateur).

Il est intéressant de noter qu'entre le $Record_a$ et le $Record_b$, ni la tension moyenne locale ni le RMS local, malgré la constance de tous les paramètres de fonctionnement, ne montrent une évolution parfaitement constante. Leurs valeurs montrent en effet une légère fluctuation. Il est ainsi possible, à partir des valeurs correspondant uniquement aux conditions de fonctionnement "stables", d'établir quatre quantités, qui seront la signature du $x^{\text{ième}}$ tir-test :

- ✚ La tension moyenne globale : V^x
- ✚ L'écart type des fluctuations de la tension moyenne locale : ε_{Vx}
- ✚ Le RMS global : RMS^x
- ✚ L'écart type des fluctuations du RMS local : ε_{RMSx}

Ces quatre grandeurs statistiques sont définies selon les équations suivantes :

$$V^x = \frac{1}{b-a} \sum_{k=a}^b V_k^x \quad \text{et} \quad \varepsilon_{Vx} = \sqrt{\frac{1}{b-a-1} \sum_{k=1}^{b-a} (V_k^x - V^x)^2}$$

Équation 3-3 : Définition de la tension moyenne globale V^x et de son écart type ε_{Vx}

$$RMS^x = \frac{1}{b-a} \sum_{k=a}^b RMS_k^x \quad \text{et} \quad \varepsilon_{RMSx} = \sqrt{\frac{1}{b-a-1} \sum_{k=1}^{b-a} (RMS_k^x - RMS^x)^2}$$

Équation 3-4 : Définition du RMS global RMS^x et de son écart type ε_{RMSx}

3.4 Le traitement des spectres de son et de tension

L'analyse spectrale de la tension et celle du son a aussi été entreprise pour permettre de quantifier un tir-test de manière simple à partir des millions de points enregistrés. Pour comprendre le traitement effectué sur les spectres, nous prendrons les mêmes hypothèses que dans le chapitre précédent, c'est-à-dire un tir-test de cinq minutes (noté *Run x*) durant lequel ont été sauvegardés n (~ 50) *enregistrements*. Considérons les fichiers *SpectrU2.txt* ou *Spectrson2.txt* (ils ont tous les deux la même structure) sur lesquels le traitement présenté ci-dessous fut effectué.

Rappelons tous d'abord la structure des fichiers texte contenant les données brutes des spectres de tension et du son (cf. Figure 3-6). La principale différence avec les fichiers des signaux est que l'on retrouve non plus un temps instantané d'acquisition sur la première colonne mais les fréquences depuis 10Hz jusqu'à ~ 26 kHz. La résolution Δf est pour les spectres issus des signaux les plus précis de 10Hz (alors que le Δf pour les signaux les moins résolus en temps, est de 1Hz, mais avec une fréquence maximale de ~ 2500 Hz). Le nombre de points par spectre est de 2500.

	A	B	C	D	E	F	G	BX	BY	BZ	CA	CB	CC
1													
2		Temps de chaque enregistrement (s)					Chaque colonne porte les données d'un signal						
3													
4		0	0.05	6.269	12.337	18.396		445.871	452.23001	458.61899	464.84799	471.35699	
5													
6		10.39301	3018.78027	3032.94434	949.23657	857.32953		1.79	1.62733	1.67353	1.63849	1.52957	
7		20.78602	1510.06396	1516.10352	475.91699	428.8132		0.91929	0.8063	0.79118	0.82782	0.81515	
8		31.17904	0.0019	0.00185	0.00112	0.00003		0.00065	0.00028	0.00147	0.00006	0.00271	
9		41.57205	0.00197	0.00019	0.00091	0.00006		0.00079	0.0003	0.00005	0.00002	0.00066	
10		51.96506	0.01711	0.0193	0.00269	0.00245		0.00175	0.00173	0.00001	0.00172	0.00145	
11		62.35807	0.05653	0.07546	0.00153	0.00593		0.0022	0.00405	0.00022	0.00511	0.00369	
12		72.75108	0.00466	0.02882	0.00018	0.00147		0.00002	0.00399	0.00011	0.00224	0.00078	
13		83.1441	0.00613	0.00464	0.00147	0.00003		0.00029	0.00064	0.00013	0.00063	0.00002	
14		93.53711	0.00257	0.00095	0.00006	0.00008		0.00126	0.00144	0.00022	0.00028	0	
2494		25868.207	0.00013	0.00028	0.00005	0		0.00012	0.00008	0.00069	0.00002	0.00008	
2495		25878.5996	0.00003	0.00075	0.0001	0.00011		0.00021	0.0004	0.00012	0.00039	0.00002	
2496		25888.9941	0.00012	0.00048	0.00021	0.00011		0.00035	0.00054	0.00009	0.00062	0.00016	
2497		25899.3867	0.00043	0.00013	0.00006	0.00016		0.00024	0.00006	0.00004	0.00027	0.00019	
2498		25909.7793	0.00028	0.0003	0.00023	0.00006		0.00007	0.00012	0.00007	0.00005	0.0003	
2499		25920.1719	0.00017	0.00001	0.0001	0.00008		0.00016	0.00029	0.00019	0.00005	0.00081	
2500		25930.5664	0.00078	0.0002	0.00012	0.00006		0.00018	0.00002	0.00029	0.00027	0.00036	
2501		25940.959	0.00076	0.00036	0.0002	0.00002		0.00003	0.00049	0.00008	0.00048	0.00016	
2502		25951.3516	0.00066	0.00022	0.00035	0.00002		0.00001	0.00051	0.00009	0.00014	0.00003	
2503		25961.7441	0.00031	0.00012	0.00071	0.00007		0.00015	0	0.00017	0.00012	0.00007	
2504		25972.1367	0.00016	0.00008	0.00062	0.00041		0.0007	0.00023	0.00055	0.00018	0.00007	
2505		25982.5313	0.00002	0.00032	0.00041	0.0002		0.00036	0.00031	0.00151	0	0.00016	
2506		25992.9238	0.00046	0.00071	0.00012	0.00014		0.00004	0.00098	0.00103	0.00004	0.00004	
2507													
2508													

Figure 3-6 : Structure d'enregistrement des données pour les spectres de tension et du son

A partir de chaque colonne de chacun de ces fichiers ".txt", il est possible de tracer un spectre comme celui de la Figure 3-7. Sur cette figure, seul la plage des fréquences allant de 0 à 10kHz est importante, puisque aucun pic n'a jamais été remarqué au-delà.

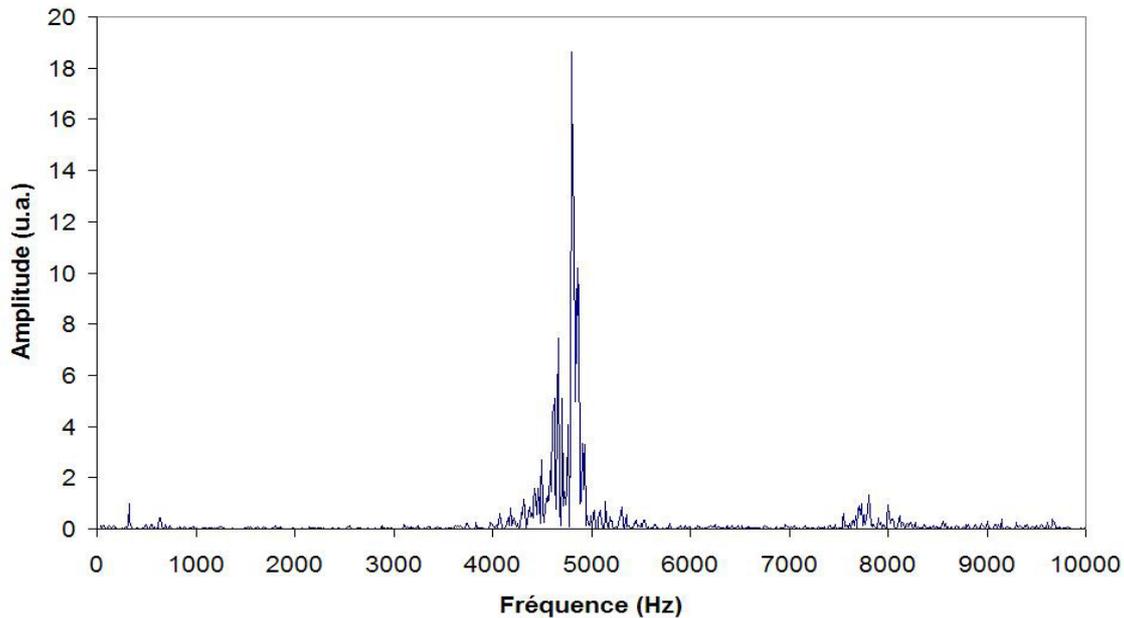


Figure 3-7 : Exemple de spectre de tension – PTF4 – 6mm – Ar-H₂ (45-15L/min) – Electrodes neuves – Résolution du signal d'origine 20 μ s – Résolution fréquentielle 10Hz.

On distingue sur ces spectres, un pic à 300Hz, relatif à l'ondulation du courant et une zone avec de nombreux pics entre 4000 et 5000 Hz. Pour caractériser simplement le $k^{\text{ième}}$ spectre de tension (resp. de son) du $x^{\text{ième}}$ tir-test, il a été choisi d'extraire la fréquence maximale locale, notée $f_{V_k^x}$ pour la tension (resp. $f_{S_k^x}$) et son amplitude maximale locale, notée $A_{V_k^x}$ pour la tension (resp. $A_{S_k^x}$), correspondant au pic le plus important. Ainsi à partir de 2500 points d'un spectre, on réduit le nombre de données à seulement 2. De manière analogue aux traitements des données pour les signaux de tension, on peut tracer l'évolution de $f_{V_k^x}$ et de $A_{V_k^x}$ en fonction de k , c'est-à-dire pendant le temps qu'a duré le tir-test Run x . C'est ce qui est représenté sur la Figure 3-8, où est tracée cette fréquence maximale locale et son amplitude maximale locale en fonction du temps.

Comme dans le cas similaire de l'évolution des signaux de tensions correspondant à une moyenne locale en fonction du temps du tir-test, on retrouve trois zones parmi lesquelles, le démarrage (entre le $Record_1$ et le $Record_{a-1}$), puis la zone dite de fonctionnement "stable" (entre le $Record_a$ et le $Record_b$), et enfin la zone correspondant à l'arrêt de la torche (à partir du $Record_{b+1}$).

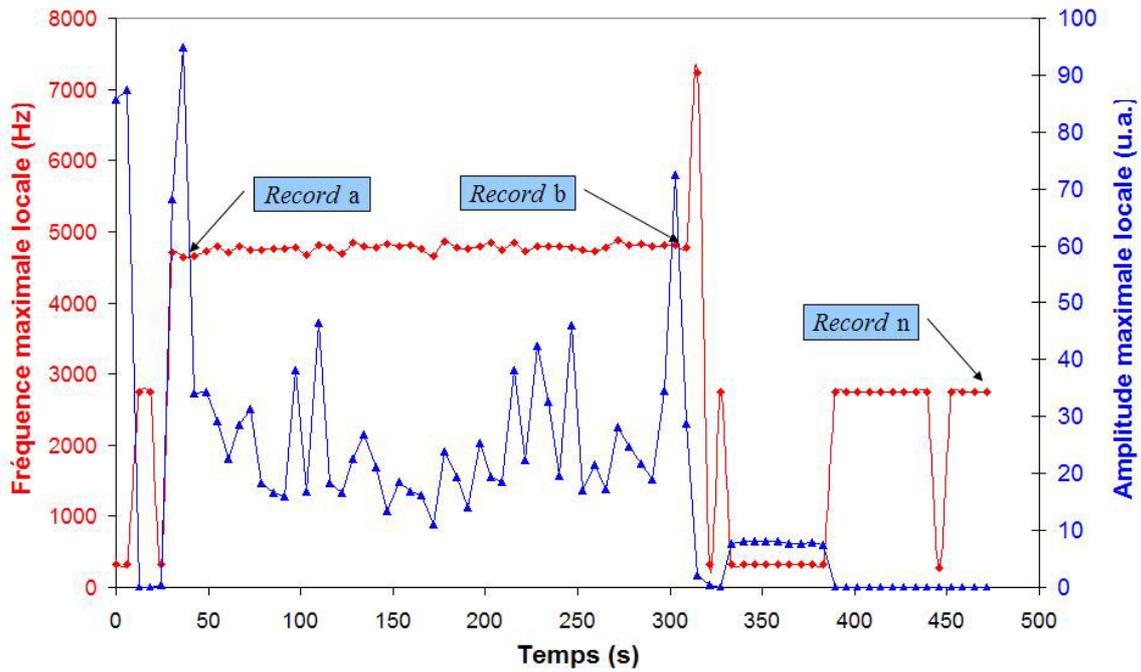


Figure 3-8 : Evolution de la fréquence maximale locale et de l'amplitude maximale locale

Ce sont uniquement les points qui appartiennent à la zone de fonctionnement stable qui vont permettre de caractériser le tir-test en effectuant des calculs de moyenne arithmétique et d'écart type sur, d'une part, les valeurs de la fréquence maximale locale et d'autre part sur celles de l'amplitude maximale locale. On obtient pour le tir-test Runx, quatre grandeurs caractéristiques qui sont la signature de tous les spectres de tension et de quatre autres valeurs similaires pour les spectres du son :

$$F_V^x = \frac{1}{b-a} \sum_{k=a}^b f_{V_k}^x \quad \text{et} \quad \varepsilon_{F_V^x} = \sqrt{\frac{1}{b-a-1} \sum_{k=1}^{b-a} (f_{V_k}^x - F_V^x)^2}$$

Équation 3-5 : Définition de la fréquence moyenne globale pour la tension et de son écart type

$$A_V^x = \frac{1}{b-a} \sum_{k=a}^b A_{V_k}^x \quad \text{et} \quad \varepsilon_{A_V^x} = \sqrt{\frac{1}{b-a-1} \sum_{k=1}^{b-a} (A_{V_k}^x - A_V^x)^2}$$

Équation 3-6 : Définition de l'amplitude moyenne globale pour les pics des spectres de tension et de son écart type

$$F_S^x = \frac{1}{b-a} \sum_{k=a}^b f_{S_k}^x \quad \text{et} \quad \varepsilon_{F_S^x} = \sqrt{\frac{1}{b-a-1} \sum_{k=1}^{b-a} (f_{S_k}^x - F_S^x)^2}$$

Équation 3-7 : Définition de la fréquence moyenne globale pour le son et de son écart type

$$A_S^x = \frac{1}{b-a} \sum_{k=a}^b A_{S_k}^x \quad \text{et} \quad \varepsilon_{A_S^x} = \sqrt{\frac{1}{b-a-1} \sum_{k=1}^{b-a} (A_{S_k}^x - A_S^x)^2}$$

Équation 3-8 : Définition de l'amplitude moyenne globale pour les pics des spectres de son et de son écart type

3.5 Description des signaux du son émis par la torche

En ce qui concerne le son, le signal moyen n'a pas de signification physique, contrairement à la tension. Par contre, on peut connaître le niveau sonore (exprimé en dB) en prenant le RMS du signal sonore. En effet le niveau sonore se calcule par l'Équation 3-9 .

$$dB = 10 \log \left(\frac{I_s}{I_s^0} \right)^2$$

Avec I_s : pression acoustique (Pa)
 I_s^0 : pression acoustique de référence (Pa)

Équation 3-9 : Définition du niveau sonore (dB)

En acoustique, la pression acoustique de référence est de 20µPa. Ainsi par exemple pour une pression I_s de 1Pa, on a $10 \cdot \log(1/20 \cdot 10^{-6})^2 = 93,97$ dB

Le microphone Bruël&Kjaer a une sensibilité de 3,59mV/Pa. On peut donc connaître le niveau sonore à partir du RMS (c'est-à-dire la valeur efficace) de n'importe quel signal temporel en prenant une nouvelle référence, que l'on note V_s^0 et qui s'exprime par $V_s^0 = 3,59 \cdot I_s^0$ soit :

$$V_s^0 = 3,59 \cdot 10^{-3} * 20 \cdot 10^{-6} = 7,18 \cdot 10^{-8} \text{ V}$$

Le niveau sonore (en dB) de tous les sons que l'on enregistre peut donc être déterminé à partir du calcul de l'écart quadratique moyen du signal de tension transcrit par le microphone.

D'une manière générale, si on augmente le gain, on amplifie l'amplitude du signal mais aussi celle du bruit, de sorte que le rapport signal / bruit ne change pas. C'est le rôle du pré-amplificateur (situé dans le microphone) d'augmenter ce rapport (effet de filtrage). L'amplificateur externe n° 5935 du microphone Bruël&Kjær, à gain variable (de 0 à 50 par palier de 10), permet d'augmenter l'amplitude du signal résultant. Si on ajoute ce gain au signal, il faut le soustraire du calcul du niveau sonore à partir du RMS du signal enregistré. Six expériences avec une source sonore calibrée émettant à 94dB, ont confirmé cela. Ces résultats de calculs de niveau sonore sont repris dans la Table 3-1.

Bien qu'il eut été possible de prendre le niveau sonore ou la moyenne de nombreuses valeurs acquises pendant un tir-test, comme indicateur éventuel de l'érosion du son, nous ne l'avons pas gardé au vu des observations de la grande variabilité des résultats obtenus lors des premières expériences réalisées. Les amplitudes des spectres du son devraient montrer la même évolution que le niveau sonore calculé à partir du signal.

Gain (à choisir sur l'amplificateur 5935)	RMS du signal (V)	Niveau sonore (dB) : $10 \log \left(\frac{RMS}{7,18 \cdot 10^{-8}} \right)^2 - Gain$
0	$3,60 \cdot 10^{-3}$	94
10	$1,12 \cdot 10^{-2}$	93,86
20	$3,52 \cdot 10^{-2}$	93,80
30	$1,11 \cdot 10^{-1}$	93,74
40	$3,52 \cdot 10^{-1}$	93,80
50	1,11	93,80

Table 3-1 : Données pour le calcul du niveau sonore avec le gain du microphone Bruël&Kjær

3.6 Influence de l'intensité du courant sur les résultats

Deux campagnes d'expérience ont été menées pour connaître l'influence de l'intensité du courant sur les valeurs des paramètres de suivi de la torche, c'est-à-dire principalement la tension moyenne aux bornes des électrodes, la fréquence principale de fluctuations de cette dernière et la fréquence des spectres relatifs au son émis par la torche. La première campagne d'expériences fut menée avec la torche labo durant les premiers mois d'études. La seconde campagne d'expérience a été menée avec la torche PTF4 munie d'électrodes neuves dans une première phase et équipée d'électrodes usées, envoyées par Volvo Aero dans une seconde phase.

3.6.1 Première campagne sur l'influence du courant

3.6.1.1 Présentation des expériences

Pour cette campagne, le paramètre caractéristique du fonctionnement de la torche qui est pris en compte est uniquement la fréquence principale du son émis. La torche utilisée pour cette campagne est la "torche labo" munie d'anodes d'un diamètre interne de 7mm. Deux couples d'électrodes sont utilisés pour comparer l'influence du courant en fonction de l'état d'usure des électrodes. La variation de l'intensité du courant est comprise entre 300 et 500A et est effectuée par paliers de 50A. Le mélange de gaz plasmagènes comprend $45 \text{Nl} \cdot \text{min}^{-1}$ d'argon et $15 \text{Nl} \cdot \text{min}^{-1}$ d'hydrogène. Le système d'acquisition du son est l'ensemble I (cf. chapitre 2.2.3), constitué du microphone Karma DM-670 équipé de son système d'amplification. La position relative du microphone et de la sortie de tuyère est maintenue constante pour les expériences relatives à cette campagne (cf. Figure 3-9).

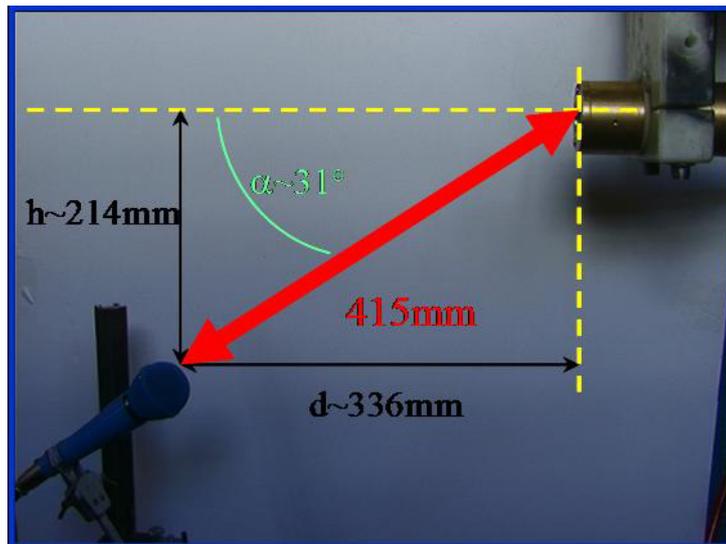


Figure 3-9 : Position du microphone par rapport à la sortie de tuyère de la "torche labo"

L'intensité du courant est mesurée par une sonde ampérométrique fixée sur la torche qui, avec le signal mesuré par l'ensemble I, est ensuite envoyée à l'oscilloscope LECROY 9304A. La face avant du programme d'acquisition, élaboré sous Labview, est présentée sur la Figure 3-10 et la face arrière sur la Figure 3-11.

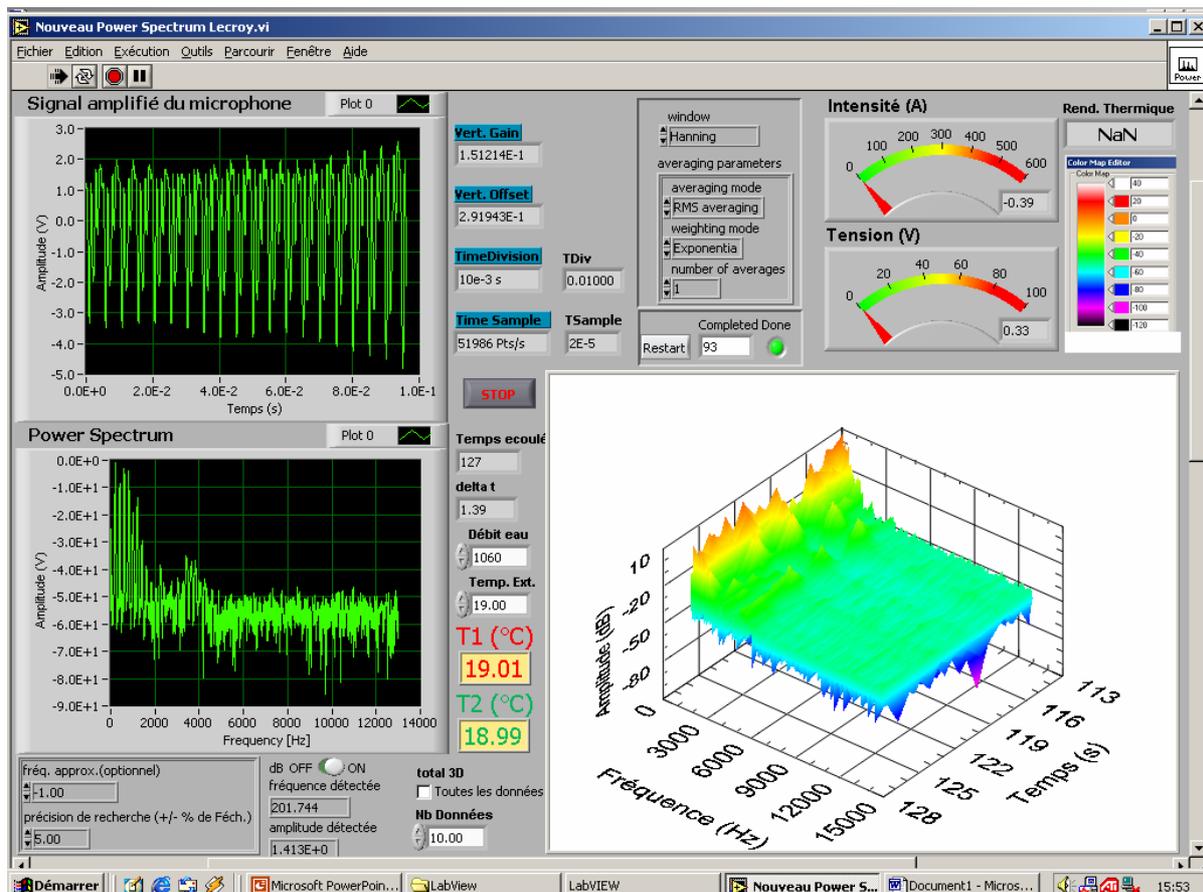


Figure 3-10 : Face avant du VI d'acquisition pour la campagne sur l'influence du courant

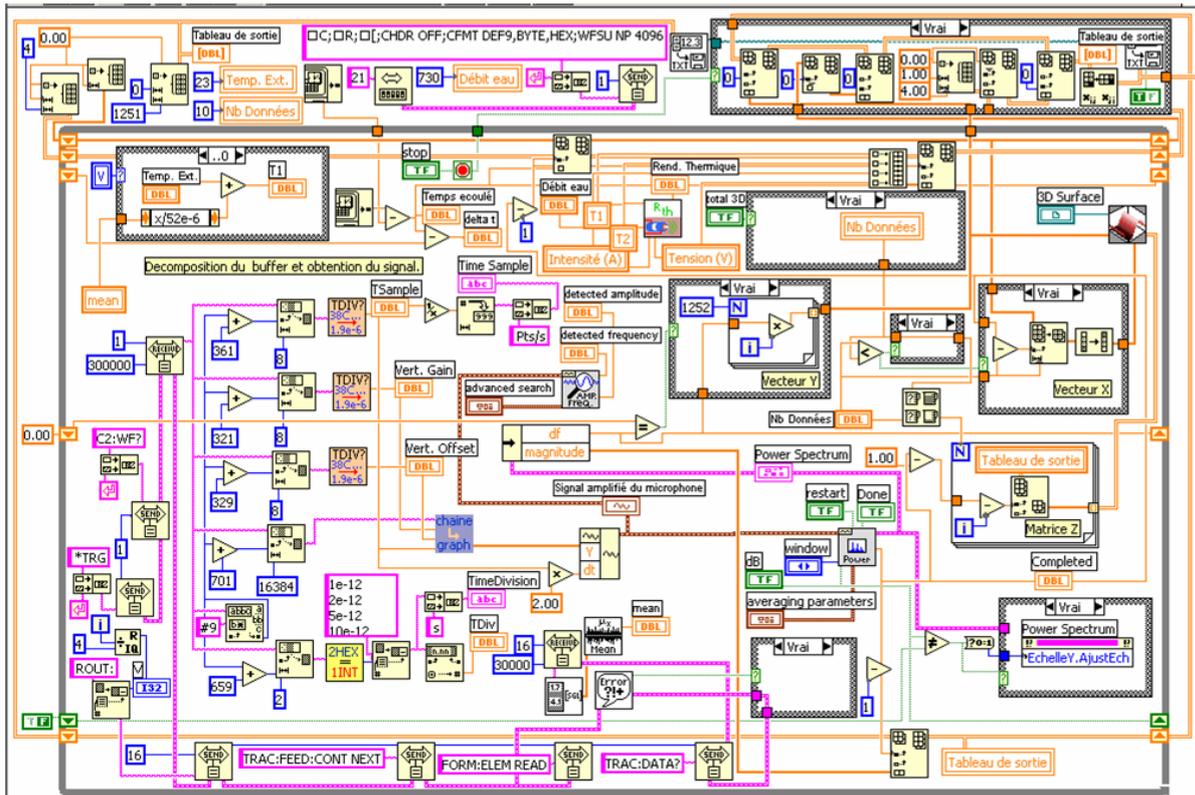


Figure 3-11 : Face arrière du VI d'acquisition pour la campagne sur l'influence du courant.

Ce programme permet, entre autres, la représentation en 3 dimensions de l'historique des spectres calculés à partir des signaux reçus. C'est-à-dire que dès qu'un nouveau signal du son est acquis (i.e. à chaque rafraîchissement de l'oscilloscope, soit toutes les six secondes environ pour ce VI), son spectre est calculé et est mis à la suite de tous ses précédents dans un diagramme en 3 dimensions constitué donc d'un axe relatif au temps où est acquis le signal (variable, de 0s pour le premier spectre, à la durée totale du tir), d'un axe de fréquence (fixe de 0 à 13000 Hz) et d'un axe d'amplitude des spectres. L'amplitude est représentée par une échelle de couleur, exprimée de -120dB à 40dB (cf. Figure 3-12). Les décibels (dB) dont il est question dans ce diagramme, n'ont aucune interprétation physique (ni sonore, ni d'amplification).

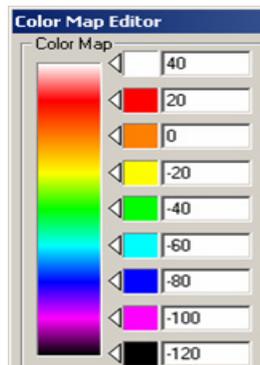


Figure 3-12 : Echelle des couleur pour le diagramme 3D de l'historique des spectres

Ces diagrammes TFA (temps – fréquence – amplitude) permettent de mettre en évidence, entre autres, les différences d'amplitudes sonores (en unités arbitraires) liées au fonctionnement de la torche selon le mélange plasmagène (cf. Figure 3-13).

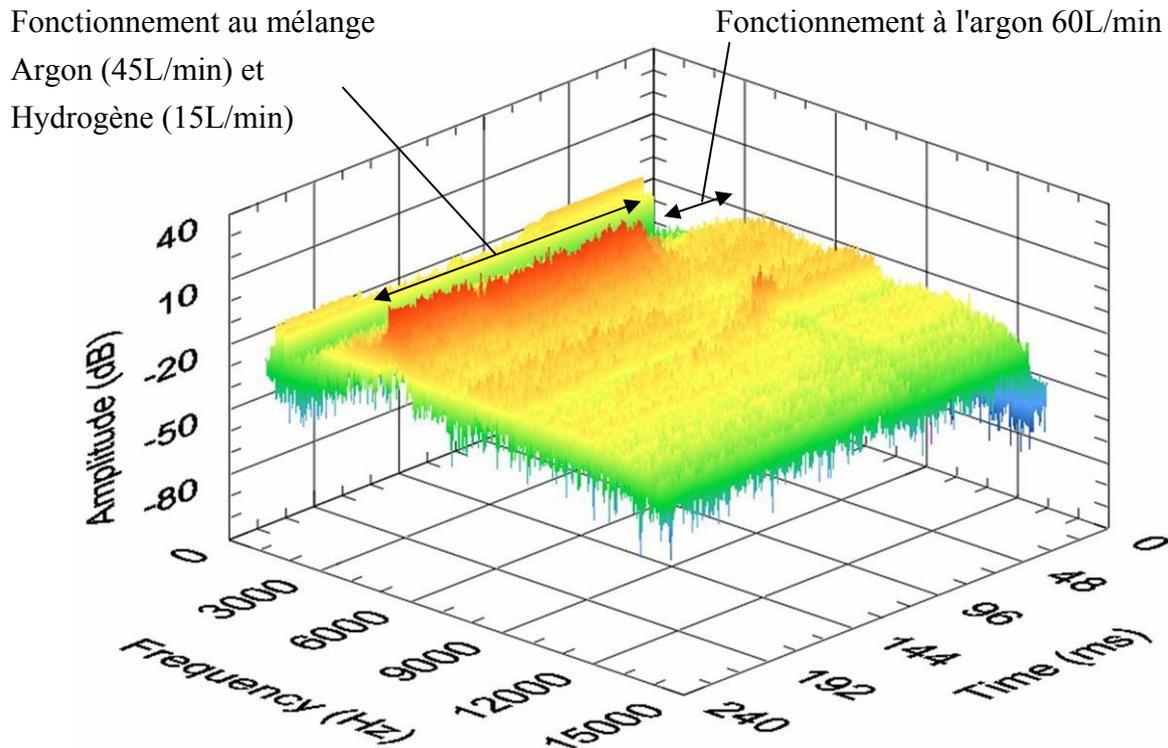


Figure 3-13 : Diagramme TFA pour le son – historique des spectres sur le temps d'un tir.

Avec de l'argon, le niveau sonore n'excède pas les 80dB sonores alors qu'avec un mélange argon – hydrogène le niveau sonore dépasse les 130dB sonores . Ces valeurs ont été mesurées avec un décibelmètre industriel (modèle Lutron SL-4001) situé à un mètre de la sortie de tuyère. Il avait été espéré que l'amplitude des pics les plus importants des spectres issus du calcul par FFT des signaux relatif au son émis par la torche devaient évoluer au cours du temps, pour un même fonctionnement de la torche (par exemple pour un mélange de gaz plasmagène fixe à une intensité de courant donnée) seulement à cause de l'évolution de l'état d'usure des électrodes. Les premiers résultats sur l'évolution de ces amplitudes spectrales montrèrent l'absence d'une tendance particulière (diminution par exemple). Néanmoins ces diagrammes TFA permettent de suivre en fonction du temps, le déplacement des fréquences caractéristiques (correspondant aux pics dont l'amplitude est la plus élevée). Il est ensuite facile d'extraire la fréquence principale et de l'associer à l'instant où son signal d'origine fut acquis. Des courbes d'évolution des fréquences caractéristiques sont donc disponibles à partir de ces diagrammes TFA.

3.6.1.2 Les résultats

A partir de l'enregistrement des spectres de tous les signaux du son, une seule fréquence caractéristique par spectre est extraite. Cette fréquence est mise en parallèle avec le temps correspondant à son acquisition. Les signaux du courant fournissent une valeur temporelle moyenne de l'intensité pour chaque temps d'acquisition. Ainsi il est possible de connaître la fréquence principale du son émis par la torche et de la faire correspondre à l'intensité du courant au même instant. C'est ce que représente la Figure 3-14.

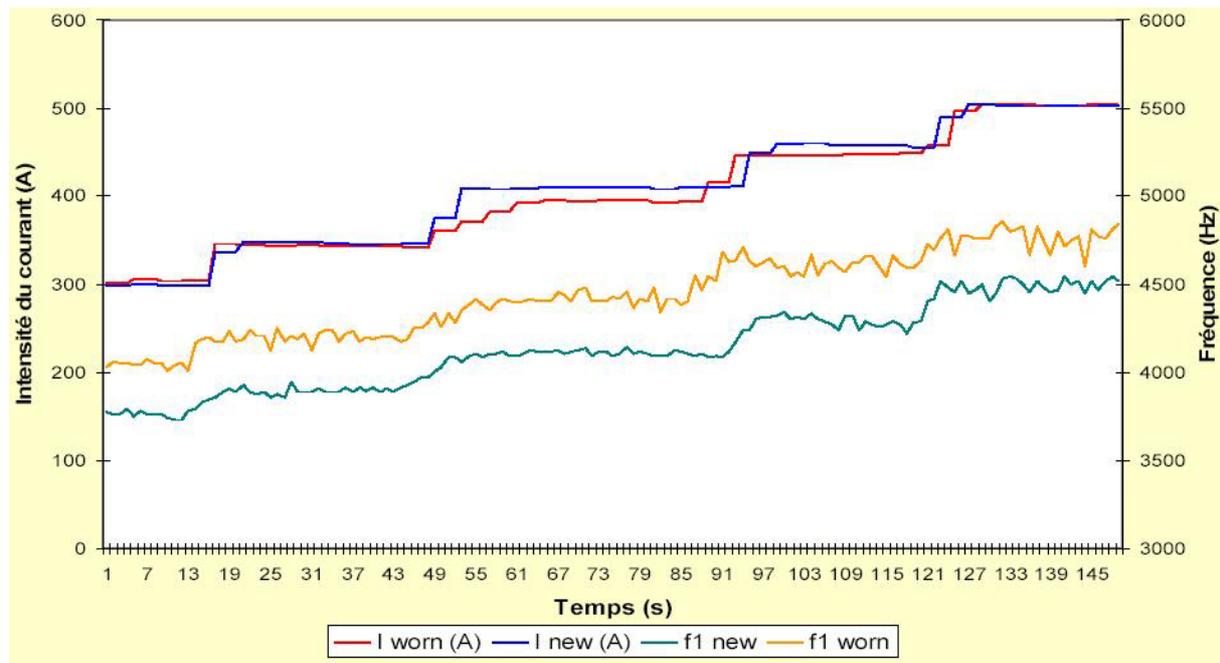


Figure 3-14 : Influence de l'intensité moyenne (I) sur les fréquences caractéristiques du son (f_1) pour deux états d'érosion (électrodes neuves (*new*) et électrodes usées (*worn*)).

Les deux courbes de l'intensité montrent clairement les plateaux d'intensité du courant qui ont eu lieu pendant chacun des deux tirs. Comme il était attendu, les fréquences sont plus élevées à mesure que le courant augmente. En effet, une forte intensité du courant provoque une augmentation du diamètre de la colonne d'arc principale, ce qui diminue l'épaisseur de la couche limite froide. La tension de disruption nécessaire pour réaliser un claquage est donc plus faible et ce phénomène de réamorçage du pied d'arc est plus probable, donc plus fréquent. De plus, il apparaît que les fréquences relatives au couple d'électrodes usées sont décalées vers les hautes fréquences par rapport aux fréquences relatives au couple d'électrodes neuves (d'environ 300Hz). Cela est vrai sur toute la plage de variation de l'intensité du courant. Cela signifie que le décalage fréquentiel imputable à l'état d'érosion des électrodes n'est pas fonction de l'intensité du courant.

3.6.2 Seconde campagne sur l'influence du courant

3.6.2.1 Présentation de l'expérience

En ce qui concerne ce paragraphe 3.6.2, les expériences de tirs de torches ont été réalisées dans une petite pièce fermée, ce qui représente un espace beaucoup plus petit que lors de toutes les autres campagnes de tirs. Un phénomène d'écho de l'onde sonore sur les murs de la pièce et donc une interférence sur les mesures du son était à craindre mais les premiers essais, qui ont permis de comparer à la fois la localisation des pics spectraux (i.e. les fréquences principales) et les amplitudes de ceux-ci, n'ont montré aucune incidence de l'espace "sans obstacle pour les ondes sonores" sur les mesures relatives au son.

La torche utilisée pour cette campagne d'essai est la torche PTF4, équipé d'un couple d'électrodes neuves avec une anode, avec insert de tungstène, d'un diamètre intérieur de 6mm. L'injection du mélange de gaz plasmagène (argon à 45Nl.min^{-1} et hydrogène à 15Nl.min^{-1}) est assurée par le distributeur de gaz à effet vortex. Les paramètres caractéristiques de la torche qui sont surveillés, sont la tension aux bornes des électrodes, l'intensité du courant et le son émis par la torche (avec l'ensemble II dont le gain d'amplification est réglé à 0dB et dont le microphone est situé à 30cm et 40° de la sortie de tuyère et l'ensemble III). Le signal de la tension mesuré est envoyé sur un circuit électronique qui fournit en sortie l'enveloppe du signal d'entrée. Les quatre signaux (tension, son enveloppe, le son et le courant) sont envoyés sur l'oscilloscope LECROY 9304M (résolution : 0,2ms/point). Les signaux de tension et du son sont aussi envoyés sur l'oscilloscope LECROY 9314A (résolution : 0,02ms/point). Les six signaux sont acquis, traités et enregistrés par un VI dont la description complète est présentée en annexe. L'intensité du courant est comprise dans cette étude entre 300 et 600A par paliers successifs de 50A.

Une étude préliminaire à cette campagne a montré que les spectres issus des signaux de tensions aux bornes des électrodes et ceux issus des signaux du son émis par la torche, présentaient deux zones de fréquences dominées chacune par un pic principal. La première zone concerne une plage de 0 à 2500 Hz avec un pic principal vers 600Hz à 600A (cf. Figure 3-15). La seconde zone montre un pic principal vers 5000Hz à 600A sur une plage comprise entre 0 et 10kHz (cf. Figure 3-16). Ces deux pics, l'un à 600Hz et l'autre à 5000Hz se déplacent suivant l'intensité du courant. L'évolution de ces deux pics fait l'objet de cette campagne de tirs.

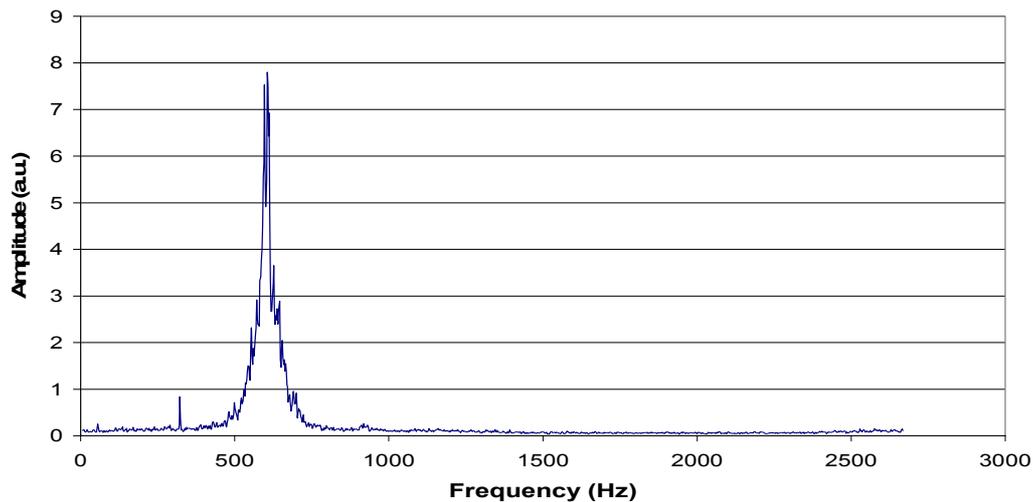


Figure 3-15 : spectre basse fréquence de tension – *PTF4 – 6mm – Ar-H₂ (45-15L/min) – 600A*
– *Electrodes neuves – Résolution du signal d'origine 20 μ s – Résolution spectrale 2,1Hz*

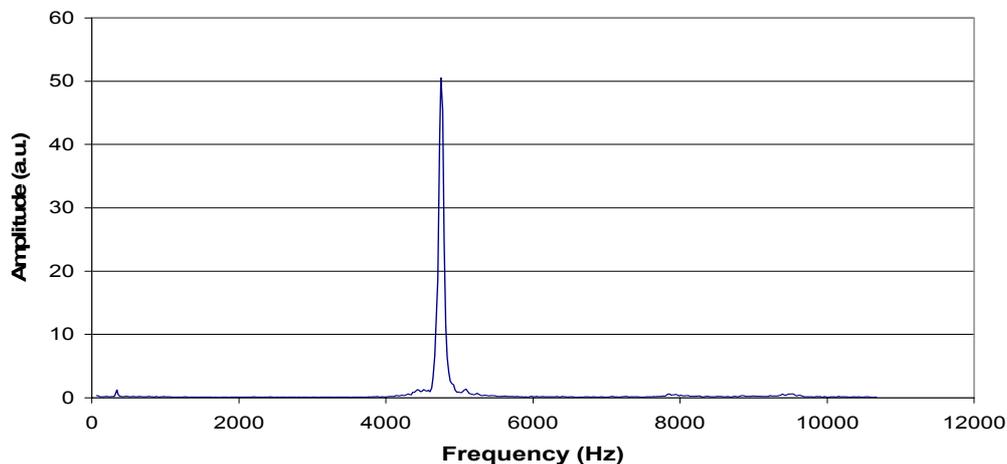


Figure 3-16 : Spectre haute fréquence de tension – *PTF4 – 6mm – Ar-H₂ (45-15L/min) – 600A*
– *Electrodes neuves – Résolution du signal d'origine 20 μ s – Résolution spectrale 2,1Hz*

3.6.2.2 Résultats

Il est à noter que les spectres présentés dans ce chapitre sont des spectres moyennés, c'est-à-dire que pour chaque palier d'intensité de courant, il y a plusieurs spectres enregistrés (un toutes les secondes) qui, malgré la constance du courant, n'avaient pas exactement la même fréquence caractéristique. L'analyse des données a demandé la programmation d'une procédure pour obtenir un spectre "moyen" unique pour chaque palier d'intensité du courant.

Dans un premier temps, la Figure 3-17 présente l'allure des signaux du courant en fonction du temps pour les deux valeurs extrêmes à 300A et 600A. La régulation de la source de courant est telle que l'écart type est le même quelque soit l'intensité du courant. Pour 600A, il est de 29,8A et à 300A, il est de 27,2A.

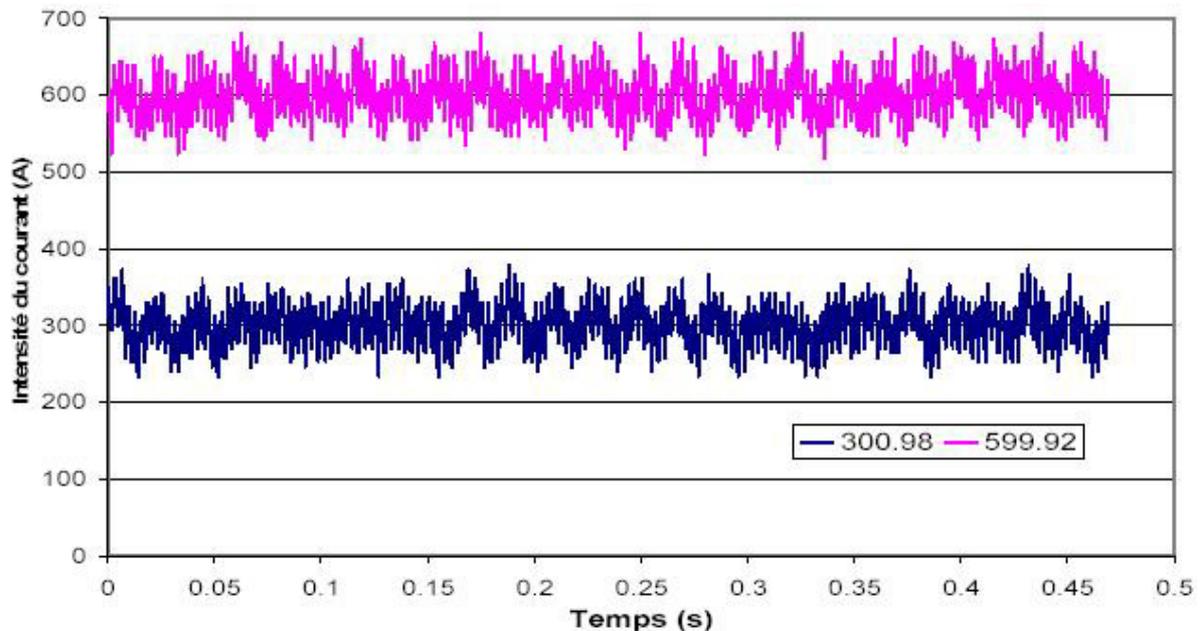


Figure 3-17 : Allure des signaux de courant à 600 et 300A – PTF4 – 6mm – Ar-H₂ (45-15L/min) – Electrodes neuves – Résolution du signal d'origine 200 μ s

En ce qui concerne la tension moyenne aux bornes des électrodes, l'influence du courant est représentée sur la Figure 3-18. Pour une intensité de 600A, on relève 70,6V avec un écart type de 15,1V alors qu'à 300A, cette moyenne est de 78,8V avec un écart type de 21,7V.

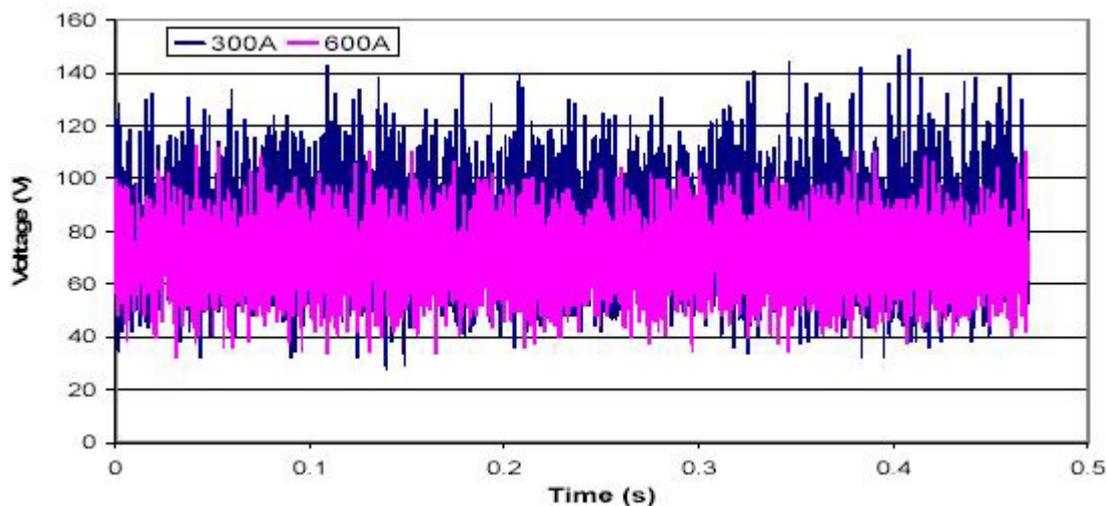


Figure 3-18 : Les signaux de tensions à 600 et 300A – PTF4 – 6mm – Ar-H₂ (45-15L/min) – Electrodes neuves – Résolution du signal d'origine 200 μ s

Seuls les spectres de l'enveloppe des signaux de la tension aux bornes des électrodes sont importants. En effet, les allures de ces enveloppes en fonction du temps ne montrent rien de particulier. Il faut noter que les enveloppes permettent de mettre en exergue les variations lentes des signaux de tension et que donc les spectres correspondant à ces enveloppes ne présentent des pics que dans le domaine des basses fréquences, c'est-à-dire entre 0 et 1000Hz.

Sur la Figure 3-19, il apparaît que l'intensité du courant n'a qu'une très faible incidence sur l'allure des spectres si ce n'est que le pic correspondant à l'ondulation due à la régulation hémiphasée de la source n'apparaît qu'avec de faibles intensités du courant.

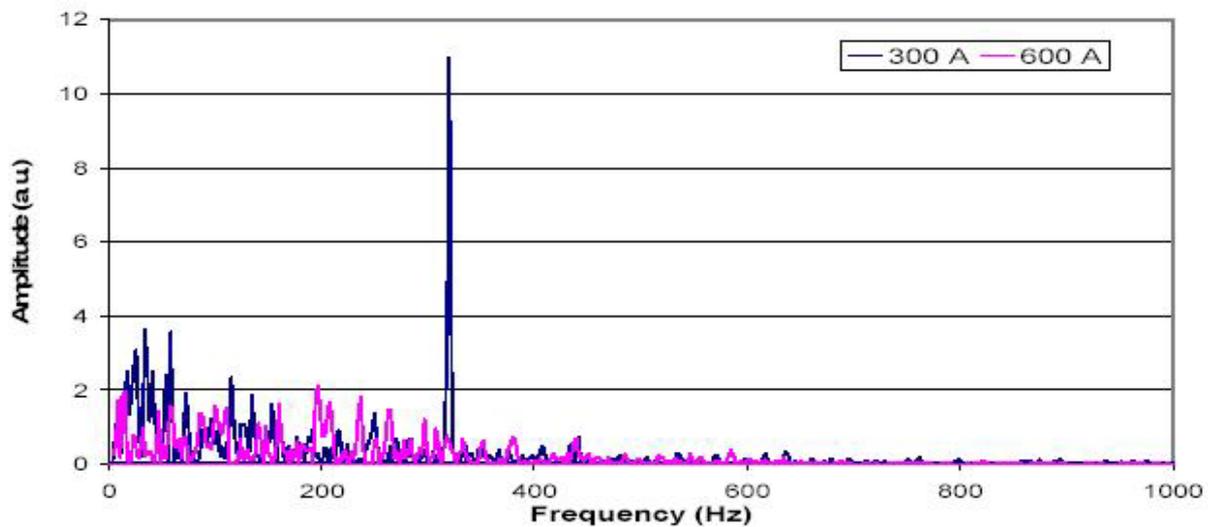


Figure 3-19 : Spectre des enveloppes de tensions à 600 et 300A – PTF4 – 6mm – Ar-H₂ (45-15L/min) – Electrodes neuves – Résolution du signal d'origine 100 μ s – Résolution spectrale 2,1Hz

L'évolution des spectres de tension dans les basses fréquences (entre 0 et 2500Hz) est représentée sur la Figure 3-20. Il est clairement visible que le pic principal dans cette zone se déplace vers des fréquences plus élevées au fur et à mesure que l'intensité du courant diminue. Ce pic ayant été observé pour la première fois à 600A avec une fréquence de 600Hz, nous avons pensé dans un premiers temps qu'il aurait pu s'agir d'un harmonique du pic de 300Hz, associé à la régulation hémiphasée de la source de courant. Or ce pic se déplace avec l'intensité du courant comme on peut le voir sur la Figure 3-20. Ainsi on peut dissocier de la source du courant l'existence du pic à 600Hz pour 600A et supposer qu'il est le résultat d'un phénomène physique associé au mouvement de l'arc dans la tuyère. L'explication de ce phénomène reste inconnue pour le moment.

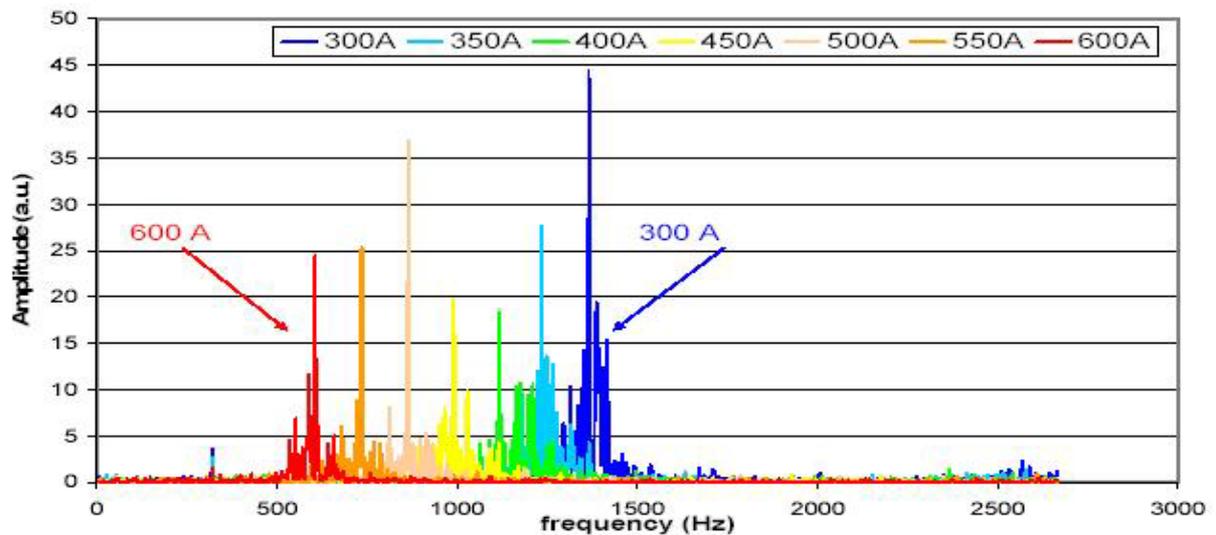


Figure 3-20 : Influence du courant sur les spectres de tension de basses fréquences – PTF4 – 6mm – Ar-H₂ (45-15L/min) – Electrodes neuves – Résolution du signal d'origine 100 μ s – Résolution spectrale 4,2Hz

Enfin, la Figure 3-21 représente l'évolution avec l'intensité du courant, des spectres de tensions aux hautes fréquences. Les amplitudes (en unités arbitraires mais néanmoins efficaces pour comparer deux spectres entre eux) montrent que les pics principaux dans ce domaine de fréquences sont d'un ordre de grandeur supérieur à ceux rencontrés sur les spectres de la Figure 3-20. Par ailleurs, il apparaît qu'une diminution de l'intensité du courant s'accompagne par un déplacement fréquentiel du pic principal vers les basses fréquences: de 4750Hz à 600A vers 3970Hz pour 300A, comme ce qui a déjà été constaté lors de la première campagne d'essais.

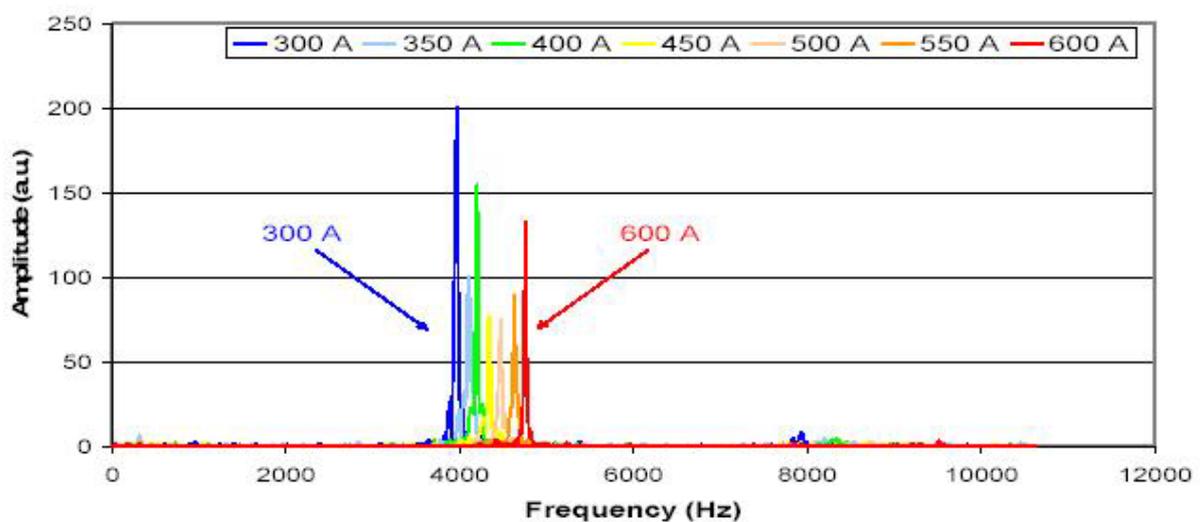


Figure 3-21 : Influence du courant sur les spectres de tension de hautes fréquences – PTF4 – 6mm – Ar-H₂ (45-15L/min) – Electrodes neuves – Résolution du signal d'origine 100 μ s – Résolution spectrale 42,6Hz

3.6.3 Analyse et conclusion sur l'influence du courant

Les dizaines de procédures de tirs de Volvo Aero se différencient entre elles, entre autres, par les paramètres d'entrée (débit masse et nature des gaz plasmagènes, diamètre de tuyère, composition et débit masse de la poudre à projeter, etc.), et par l'intensité du courant utilisé pour réaliser les tirs de torche plasma. L'influence de l'intensité du courant sur les paramètres de contrôle de la torche est observée principalement sur les spectres des signaux de tension et de son en terme de déplacement des pics principaux dans les plages fréquentielles comprises, d'une part entre 600 et 1500Hz et d'autre part entre 4000 et 5000Hz. La variation de l'amplitude des pics principaux dans ces deux zones, n'est pas significative, c'est-à-dire que les pics des spectres ne sont pas de plus en plus importants avec l'intensité du courant. Les résultats obtenus avec les deux campagnes de tests présentées dans ce paragraphe 3.6 sont en accord avec les phénomènes physiques supposés découler d'une variation de l'intensité de courant. On constate, en effet, une augmentation de la fréquence caractéristique liée au mouvement du pied d'arc (celle située aux environs de 5000Hz) quand l'intensité du courant augmente. L'augmentation de courant provoque un accroissement du diamètre de la colonne d'arc principale, ce qui peut se traduire par une diminution de l'épaisseur de la couche limite froide. La tension de disruption (nécessaire pour que l'arc claque en amont ou en aval) est donc plus faible. L'allongement de la colonne de connexion est donc moindre dans le cas d'un courant de forte intensité que dans le cas de courant de faible intensité. La tension globale aux bornes des électrodes étant proportionnelle à la longueur de l'arc, en dépit de l'augmentation du champ avec le grossissement de la colonne et l'accroissement des pertes à la paroi, un courant fort est caractérisé par une tension plus faible ce qui est vérifié sur la Figure 3-18 et sur la Figure 3-22.

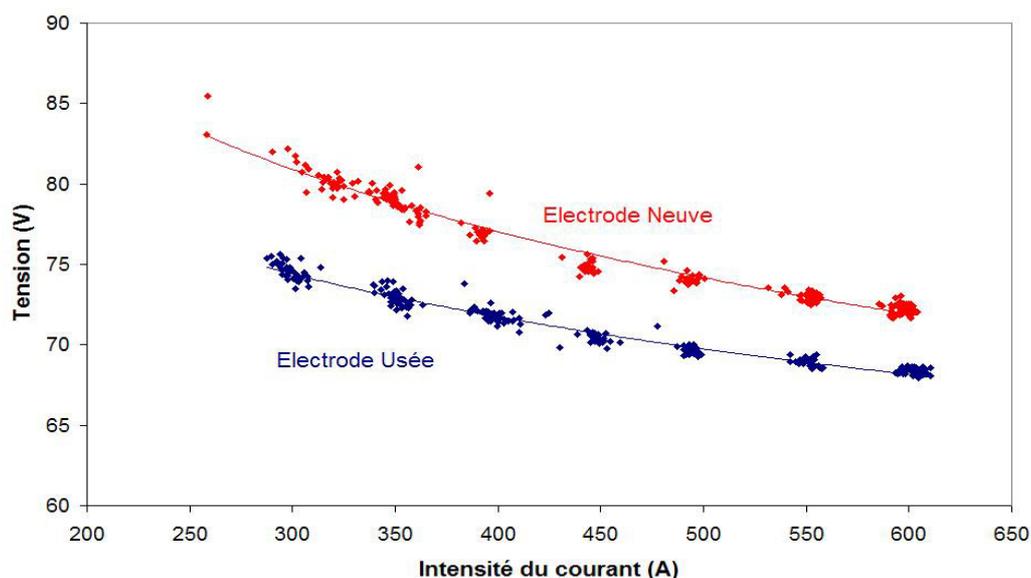


Figure 3-22 : Evolution de la tension moyenne en fonction du courant pour deux états d'usure

Il est possible de rendre compte du comportement des fréquences principales liées au mouvement du pied d'arc en utilisant les nombres adimensionnels Si et Sf définis ci-dessous :

$$Si = \frac{I^2}{\sigma_0 \cdot G \cdot h_0 \cdot d} \quad \text{et} \quad Sf = \frac{f \cdot d^2 \sqrt{\sigma_0 \cdot \mu_0}}{I}$$

Avec σ_0 : conductivité électrique (= 1676,8 A².s³.kg⁻¹.m⁻³ à T_0)
 μ_0 : viscosité dynamique (=2,38.10⁻⁴ kg.m⁻¹.s⁻¹ à T_0)
 h_0 : enthalpie massique (=1,16254.10⁶ J.kg⁻¹ à T_0)
 T_0 : température caractéristique (=9100K)
 G : débit masse total des gaz plasmagènes (kg.s⁻¹)
 d : diamètre interne de l'anode (m)
 f : fréquence du pic principal (Hz)
 I : Intensité du courant (A)

Équation 3-10: Définition des nombres adimensionnels Si et Sf

Les valeurs des constantes, σ_0 , μ_0 , et h_0 , qui interviennent dans le calcul des nombres adimensionnels sont calculés pour un mélange de gaz plasmagène unique (dans le cas étudié, c'est un mélange argon à 45L.min⁻¹ et hydrogène à 15L.min⁻¹). La température caractéristique T_0 , prise pour le calcul de ces constantes, est celle où le pourcentage d'électrons, présents dans le plasma des espèces ionisées issues du mélange de gaz, est de 1%. Le logiciel T&TWinner [<http://ttwinner.free.fr>], mis au point au laboratoire SPCTS, a permis d'obtenir cette température ($T_0 = 9100\text{K}$) et les valeurs des constantes.

Le nombre Si (appelé second nombre de Yas'ko) est un critère de similitude, c'est-à-dire qu'il provient d'une équation physique déjà connue qui a été réduite sous forme adimensionnelle. Il possède donc une signification physique et il représente le rapport entre l'énergie dissipée par effet Joule et l'enthalpie du gaz sortant de la tuyère. Au contraire le nombre Sf provient d'une relation aux dimensions obtenue par le théorème de Vaschi-Buckingham. Il n'a donc pas a priori de signification physique. Cependant si l'évolution d'un nombre adimensionnel en fonction d'un critère de similitude forme une droite, cela signifie qu'une loi physique existe entre eux témoignant d'une origine physique clairement identifiée.

Les nombres adimensionnels relatifs à l'intensité du courant (Si) et ceux relatifs à la fréquence (Sf) sont calculés à partir des couples (I, f) de points expérimentaux issus de la première campagne de test (cf. Figure 3-14) et sont ensuite placés sur un graphique à représentation logarithmique. Les points s'alignent entre eux dans le cas d'utilisation d'électrodes neuves comme dans celle d'électrodes usées. Le parallélisme presque parfait, de ces deux droites, montre que le décalage en fréquence observé ne dépend que de l'état d'usure des électrodes et pas de l'intensité du courant (cf. Figure 3-23). Ceci signifie que le contrôle de l'état d'usure des électrodes d'une torche pourrait se faire quelque soit l'intensité du courant.

Cette remarque prend son importance si on note que les torches industrielles sont utilisées, pendant toute la durée de vie d'un jeu d'électrodes, avec plusieurs procédures qui font appel le plus souvent des courants d'intensités différentes. Ce n'est donc pas tant la valeur absolue de la fréquence du pic principal d'un spectre (de tension ou de son) qui est caractéristique de l'érosion des électrodes, mais c'est bien le décalage observé (en pourcentage par exemple) par rapport à une valeur de référence, relative à un état neuf.

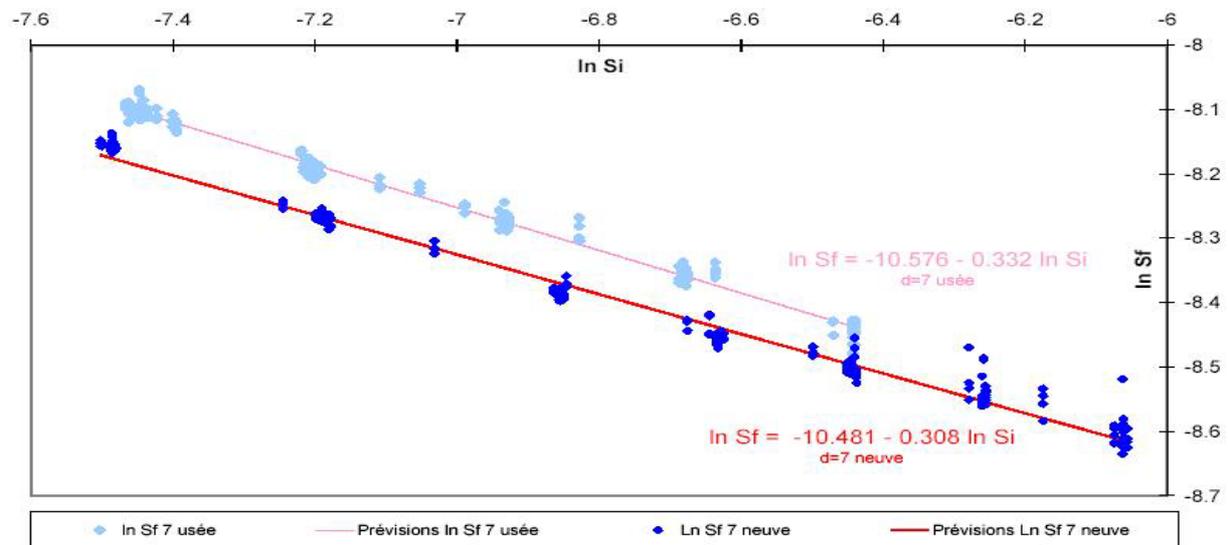


Figure 3-23 : Corrélation adimensionnelle de l'intensité et de la fréquence principale liée aux fluctuations du pied d'arc

4 Evolution des signaux avec l'usure

4.1 Influence des démarrages

L'amorçage de la torche s'effectue grâce à un circuit oscillant radio fréquence (RF) à éclateur (style bougie de moteur d'automobile) (interélectrode 10^{-4} m). Ce circuit possède une fréquence qui est voisine de 0,5 MHz avec une résistance $R = 10^6 \Omega$, et il oscille sur une capacité $C = 2200$ pF et une inductance l de quelque dizaine de μ H. La forte valeur de R pour la stabilisation de l'arc au démarrage est expliquée en annexe 2.

C'est à la suite de l'observation d'une usure extrême après un seul démarrage sur une torche dont les deux électrodes étaient neuves, que l'étude de l'évolution du courant lors du démarrage s'est imposée. Pour cela, un nouveau jeu d'électrodes a été installé sur la torche et l'enregistrement précis de l'évolution du courant pendant l'établissement jusqu'à la stabilité du courant a été effectué. L'intensité du courant est mesurée avec la pince ampérométrique reliée à un oscilloscope piloté avec Labview. L'amorçage de la torche est réalisé par contact entre les électrodes avec une mine de graphique ce qui permet ainsi de s'affranchir du problème éventuellement lié à la décharge haute tension haute fréquence. Ainsi, au moment du contact, le générateur libère le courant dans la torche suivant la courbe de la Figure 4-1. L'intensité de consigne que le système "générateur – torche" doit atteindre est aux environs de 200 A. Mais un pic de surintensité (plus de 850 A en 2,8 ms !) est présent. De plus, il faut près de deux secondes au système pour se stabiliser après une période transitoire.

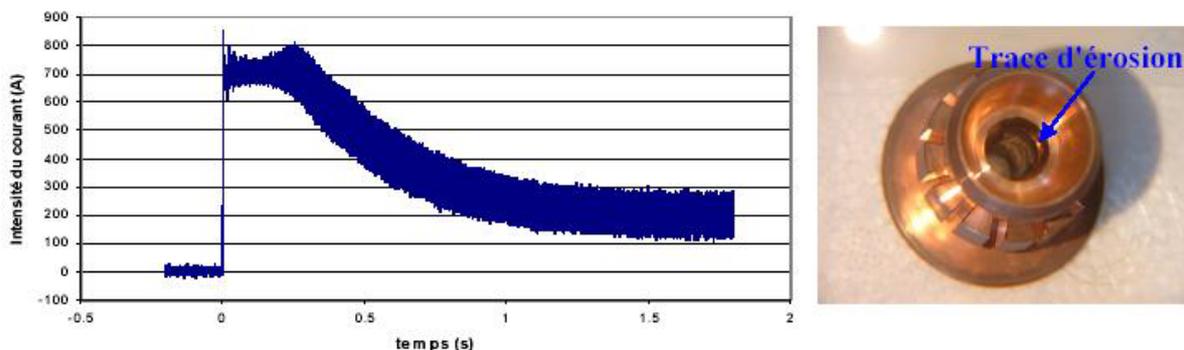


Figure 4-1 : Evolution du courant au démarrage et conséquence sur l'érosion de l'anode

Le graphique de la Figure 4-1 montre l'évolution du courant qui s'établit dans la torche alimentée en argon avec un débit de $60 \text{ Nl} \cdot \text{min}^{-1}$. La mesure comprend 10000 points avec une résolution de $200 \mu\text{s}$ entre chaque point. L'observation optique de la tuyère après le tir, dont la

durée a été de 30min sans discontinuer à 600A avec un mélange plasmagène d'argon (45Nl.min^{-1}) et d'hydrogène (15Nl.min^{-1}), a révélé un état d'érosion important caractérisé par la présence d'une large entaille sur la partie conique la plus proche de la cathode et par de nombreuses traces de défauts de surfaces (cratères et gouttelettes redéposées) sur une partie du canal cylindrique (cf. photo de la Figure 4-1). Cette forte érosion de l'anode a donc été imputée au pic de surintensité d'amorçage de la torche.

Pour s'affranchir du problème de la surintensité, nous avons rajouté au circuit dit primaire constitué du générateur et de la torche, un circuit comprenant un sectionneur et des tresses noyées dont la résistance totale est équivalente à la résistance électrique du circuit primaire. Le schéma de principe du nouveau circuit électrique est représenté sur la Figure 4-2.

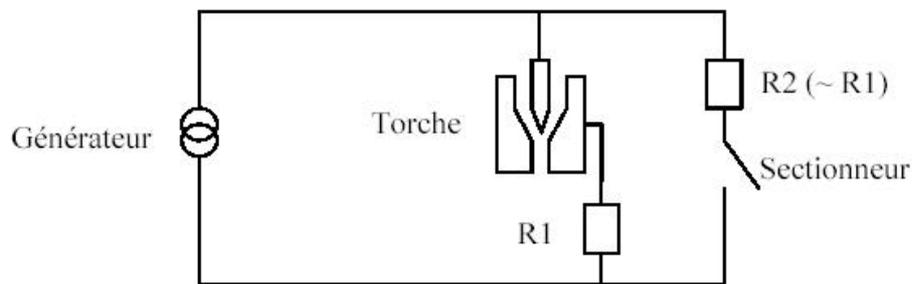


Figure 4-2 : Schéma de principe du circuit secondaire utilisé pour le démarrage

Un second essai avec un nouveau couple d'électrodes neuves, a donc été effectué dans les mêmes conditions de démarrage (amorçage à l'argon avec un débit de 60Nl.min^{-1} et contact par mine de graphite) et de tir (fonctionnement à 600A avec un mélange plasmagène d'argon hydrogène dont les débits sont respectivement de 45 et 15 Nl.min^{-1}). La séquence de démarrage est cependant différente dans la séquence des événements puisqu'au moment où la torche est amorcée (au temps $t=0\text{s}$ sur la Figure 4-3), le circuit secondaire est fermé. Au bout d'une seconde, le sectionneur est basculé en position ouverte. L'évolution du courant traversant la torche est représentée sur la Figure 4-3 où il est visible qu'aucun pic de surintensité n'apparaît ni au moment de l'amorçage (au temps $t=0\text{s}$) ni au moment où le circuit secondaire est ouvert (au temps $t=1\text{s}$).

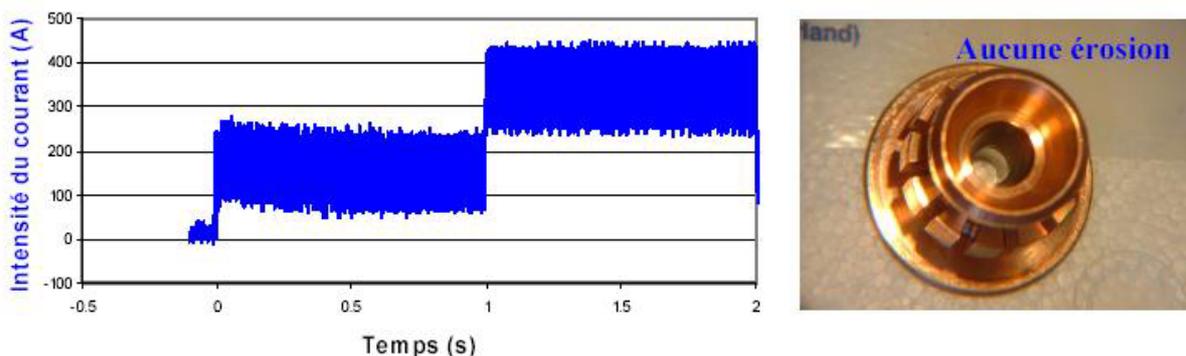


Figure 4-3 : Evolution du courant et conséquence sur l'érosion avec le circuit secondaire

Dès la fin des trente minutes de tir, l'observation optique de l'état de surface de l'intérieur de l'anode ne montre aucune trace d'érosion et dévoile une surface lisse et sans défaut visible. De plus la vitesse de transition et de stabilisation du courant n'est plus de l'ordre de la seconde comme dans le cas de l'essai précédent, mais il est du même ordre de grandeur que la fréquence d'ondulation du courant ($\sim 300\text{Hz}$) comme on peut le voir sur la Figure 4-4 qui est un agrandissement autour du moment de l'amorçage et sur la Figure 4-5 qui représente l'évolution du courant mesuré dans la torche lors de l'ouverture du circuit secondaire.

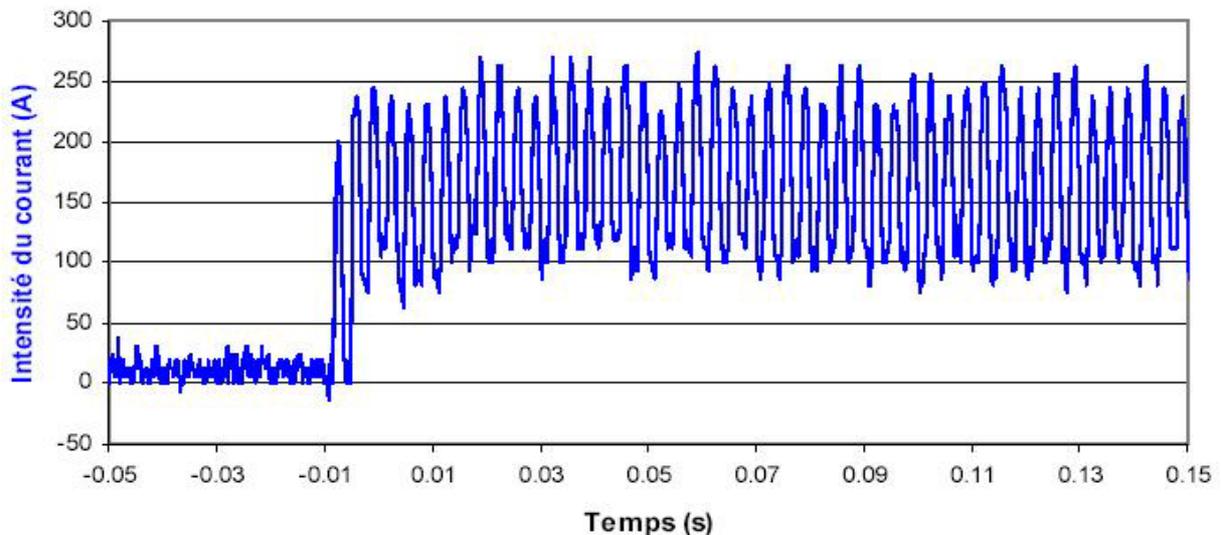


Figure 4-4 : Evolution transitoire du courant lors d'un démarrage avec le circuit secondaire

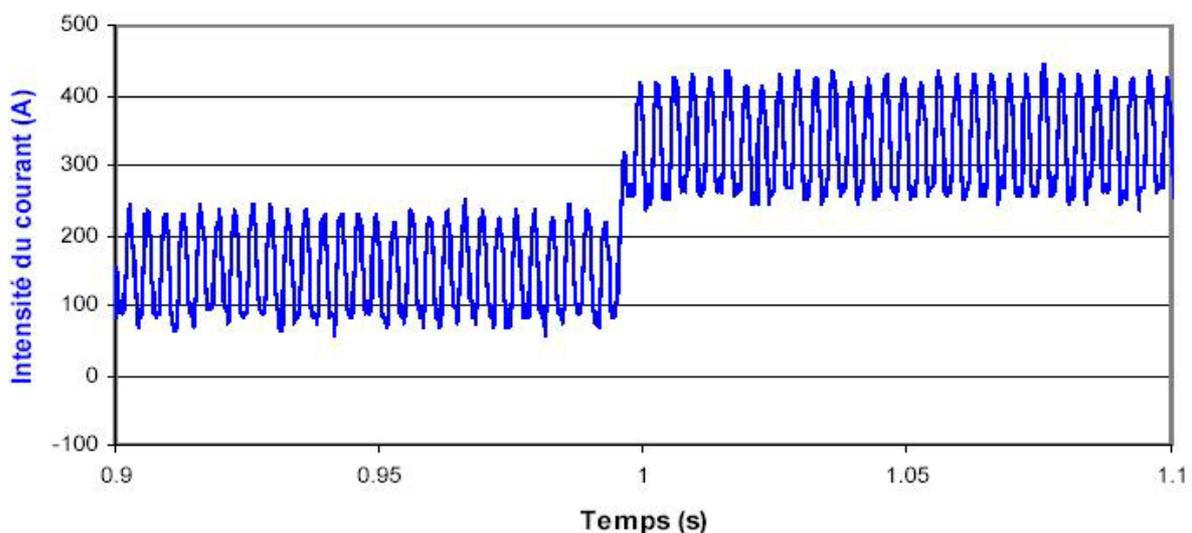


Figure 4-5 : Evolution transitoire du courant lors de l'ouverture du circuit secondaire

Il convient donc de penser que l'énergie libérée lors de l'amorçage de la torche peut être dissipée dans ce nouveau circuit en parallèle du circuit où se trouve la torche. Ce délestage permet d'épargner aux électrodes une usure trop rapide. Il est désormais possible d'effectuer une étude de l'effet du temps de fonctionnement sur l'état des électrodes sans avoir à tenir compte du démarrage, dont les effets sur l'érosion sont désormais minimisés.

4.2 Influence du temps de fonctionnement

Les outils d'acquisitions des signaux (tension et son) émis par une torche en fonctionnement ont été présentés ainsi que les traitements à effectuer sur ces signaux pour obtenir des informations pertinentes et représentatives de l'état de la torche à un temps donné de fonctionnement. Une torche dans l'industrie ne fonctionne pas sans interruption pendant des heures, sauf quelques cas rares comme par exemple l'application de dépôts sur d'énormes rouleaux d'imprimerie où la torche fonctionne une dizaine d'heure avec des électrodes neuves au début du tir qui sont systématiquement changées à la fin du tir pour éviter tout risque de contamination par éjection de matériau anodique. Les tirs de projection pour des applications aéronautiques, durent le plus souvent moins de vingt minutes. En effet, il y a beaucoup de pièces diverses à traiter mais relativement peu de volumes pour chaque type de pièces. Entre chaque pièce à traiter la torche est arrêtée et entre chaque type de pièce, les conditions de tir peuvent être différentes (durée du tir, poudre projeté, courant et gaz utilisés, etc.). Ce rappel sur les modes d'utilisation des torches en conditions réelles met en lumière la difficulté de reproduire l'utilisation "industrielle" d'une torche en laboratoire et, second point, permet de différencier le temps de fonctionnement effectif d'une torche (en heure) du temps d'activité (en jour) de la torche. Il est donc aussi important de connaître le nombre d'heures de fonctionnement effectif de la torche que son nombre de démarrages subis. Ces deux données sont donc notées avant chaque tir-test (noté t_x sur la Figure 3-3). En effet, chaque torche industrielle a un historique de fonctionnement différent. Cependant un contrôle de l'érosion ne peut pas être individualisé pour chaque torche. C'est pour cette raison que les tirs-tests doivent être réalisés dans des conditions de fonctionnement identiques entre deux créneaux de tir à usage de production. Nous avons choisi d'utiliser comme condition de fonctionnement "stable" une intensité du courant de 600A avec un mélange plasmagène d'argon à d'argon à $45\text{NL}\cdot\text{min}^{-1}$ et d'hydrogène à $15\text{NL}\cdot\text{min}^{-1}$. Une amélioration de cette procédure de contrôle, qui pour l'instant ampute du temps de production, est envisagée dans le chapitre 5.4.

Plusieurs tentatives de suivi de l'érosion ont donc été menées au laboratoire avec par exemple la campagne des 37 tirs où un jeu d'électrodes neuves a été mis en place sur la torche PTF4 (cf. paragraphe 4.3.5.2.2). Au bout de seulement 6 heures de fonctionnement effectif, à raison de 37 démarrages de la torche (soit une durée moyenne de 10 minutes par tir), on a constaté une érosion sévère (visible à l'œil) de la surface interne de l'anode. Les premiers résultats concernant les paramètres globaux (la tension moyenne globale, la fréquence moyenne globale pour la tension, celle pour le son, leur écart type, etc) montrèrent des tendances d'évolutions, confirmées par d'autres campagnes de suivi de l'érosion et infirmées

par d'autres. En particulier les fréquences moyennes globales (F_S^x et F_V^x situées autour de 5000Hz) évoluaient tantôt vers les basses fréquences, tantôt vers les hautes fréquences, avec une augmentation du nombre d'heure de fonctionnement (donc en fonction de l'érosion). Mais les conditions dans lesquelles ces expériences furent menées, étaient trop différentes, du point de vue de l'historique des tirs, de celles rencontrées chez Volvo Aero. En effet, un jeu d'électrodes chez Volvo, dure en moyenne une quarantaine d'heures de fonctionnement effectif, avec plus de 200 démarrages, en affichant une érosion visible uniquement aux instruments optiques (même la technique de l'empreinte siliconée ne distinguait aucun défaut de surface sur les anodes "usées" envoyés par Volvo). Malgré les efforts fournis pour réduire, voire supprimer, les pics de surintensité au démarrage et leur conséquences en terme d'usure, il n'était pas possible de reproduire en laboratoire les conditions de tirs industriels, C'est pourquoi une campagne de collectes de mesures de données fut réalisée dans l'atelier de projection de Volvo Aero, à Trollhättan en Suède. Nous ne présenterons dans ce rapport de thèse que l'évolution des paramètres globaux issus du traitement de ces données. La liste de tous ces paramètres globaux qui ont été suivi en fonction du nombre d'heures de fonctionnement et du nombre de démarrage des torches, est donnée dans la Table 4-1.

Type	Référence	Paramètre	Nom	Signification
Temporel	Signal de tension	V^x	Tension moyenne globale	Moyenne des V_k^x (V)
		ε_{Vx}	-	Ecart type des V_k^x (V)
		RMS^x	Ecart quadratique moyen global (ou RMS global)	Moyenne des RMS_k^x (V)
		ε_{RMSx}	-	Ecart type des RMS_k^x (V)
Spectral	Spectre de tension	F_V^x	Fréquence moyenne globale de tension	Moyenne des $f_{V_k}^x$ (Hz)
		ε_{FVx}	-	Ecart type des $f_{V_k}^x$ (Hz)
		A_V^x	Amplitude moyenne globale de tension	Moyenne des $A_{V_k}^x$ (u.a.)
		ε_{AVx}	-	Ecart type des $A_{V_k}^x$ (u.a.)
	Spectre du son	F_S^x	Fréquence moyenne globale du son	Moyenne des $f_{S_k}^x$ (Hz)
		ε_{FSx}	-	Ecart type des $f_{S_k}^x$ (Hz)
		A_S^x	Amplitude moyenne globale du son	Moyenne des $A_{S_k}^x$ (u.a.)
		ε_{ASx}	-	Ecart type des $A_{S_k}^x$ (u.a.)

Table 4-1 : Liste exhaustive des paramètres globaux suivis avec le temps de fonctionnement.

4.2.1 Présentation de la campagne de tir

Le centre de projection thermique de Trollhättan est un centre de recherche et développement mais les installations de projection thermique de l'atelier de Volvo Aero sont aussi utilisées en production. Deux équipes d'opérateurs (une de nuit et une de jour) font fonctionner quatre enceintes de projection (plasma et flamme). Trois de ces installations ont été allouées à la campagne de collecte de données. Elles portent les noms "PT1", "PT2" et "PT4". Sur chacune d'elles, une torche PTF4 est en service. C'est donc trois collectes de mesures, menées en parallèles, qui ont été effectuées, depuis la mise en place sur chacune des torches d'un jeu d'électrodes neuves, jusqu'à ce qu'ils soient tous remplacés (car l'usure était alors considérée comme trop risquée pour poursuivre les tirs). Malheureusement le suivi sur l'enceinte "PT2" n'a pas pu aboutir (les impératifs de production ont occupé l'enceinte avec du travail en projection par flamme) : Au bout d'un mois et deux semaines d'études en Suède, la torche à plasma de l'enceinte "PT2" n'a fonctionnée au total, effectivement, que 13 heures, temps insuffisant pour remplir les conditions de remplacement des électrodes. C'est pour cela que ne seront présentées que les résultats des mesures faites sur les torches des enceintes "PT1" et "PT4". Par simplification pour la suite, on parlera de la torche PT1 et de la torche PT4.

4.2.2 Résultats de l'analyse de la torche PT1

Les neuf tirs-tests réalisés sur la torche PT1, en terme d'heures de fonctionnement effectives de la torche et du nombre de démarrages sont référencés sur la Table 4-2. Les électrodes étaient neuves lors de RUN01 et ont été remplacées juste avant RUN09.

Référence des tirs-tests	Temps de fonctionnement effectif	Nombre de démarrages	Référence des tirs-tests	Temps de fonctionnement effectif	Nombre de démarrages
Run01	0 h	0	Run06	21.1 h	228
Run02	5.7 h	49	Run07	24.2 h	282
Run03	8.1 h	83	Run08	26.4 h	303
Run04	13.3 h	120	Run09	36.0 h	360
Run05	17.2 h	174			

Table 4-2: Récapitulatif de l'historique des tirs-tests pour la torche PT1

4.2.2.1 Les signaux temporels

L'évolution de la tension moyenne globale (V^x) peut être tracée soit en fonction du temps de fonctionnement de la torche soit en fonction du nombre de démarrages. Le choix est

arbitraire puisque tout le long de la vie des électrodes, on retrouve environ 10 démarrages par heure de tir. La Figure 4-6 représente donc cette évolution avec une valeur initiale de 65,9V (pour RUN01) qui diminue jusqu'à 60,85V (RUN08). Une légère reprise de V^x est observée pour le dernier tir-test (RUN09) qui s'explique par le fait que les électrodes ont été changées avant ce tir. Pour avoir des données relatives à la fin de vie de ce jeu d'électrodes, il a été décidé de le remettre en place le temps d'un dernier tir-test. Mais le centrage entre l'axe de la cathode et celui de l'anode est difficile, voire impossible, à obtenir avec une pointe de cathode usée. Malgré l'habileté des opérateurs, le centrage des électrodes n'a pas été le même que celui des huit tirs-tests ce qui pourrait expliquer cette discontinuité dans la tendance de chute de V^x .

Il est aussi important de remarquer l'évolution des barres de dispersion qui sont sur les points de la Figure 4-6. L'écart type de la tension moyenne globale (ϵ_{V^x}) évolue avec les heures de fonctionnement en passant de 0,25V pour les quatre premiers tirs-tests à plus du double pour les derniers (0,5V). Il faut traduire ces fluctuations par une instabilité de plus en plus grande du mouvement de l'arc. Alors qu'en début de vie, l'arc s'allonge loin dans le conduit cylindrique de l'anode avec une bonne régularité dans l'allongement, en fin de vie, on constate que premièrement l'arc va moins loin, globalement, mais aussi qu'il se disperse plus autour du point moyen d'ancrage, sur une plus grande surface (cf. Figure 4-7).

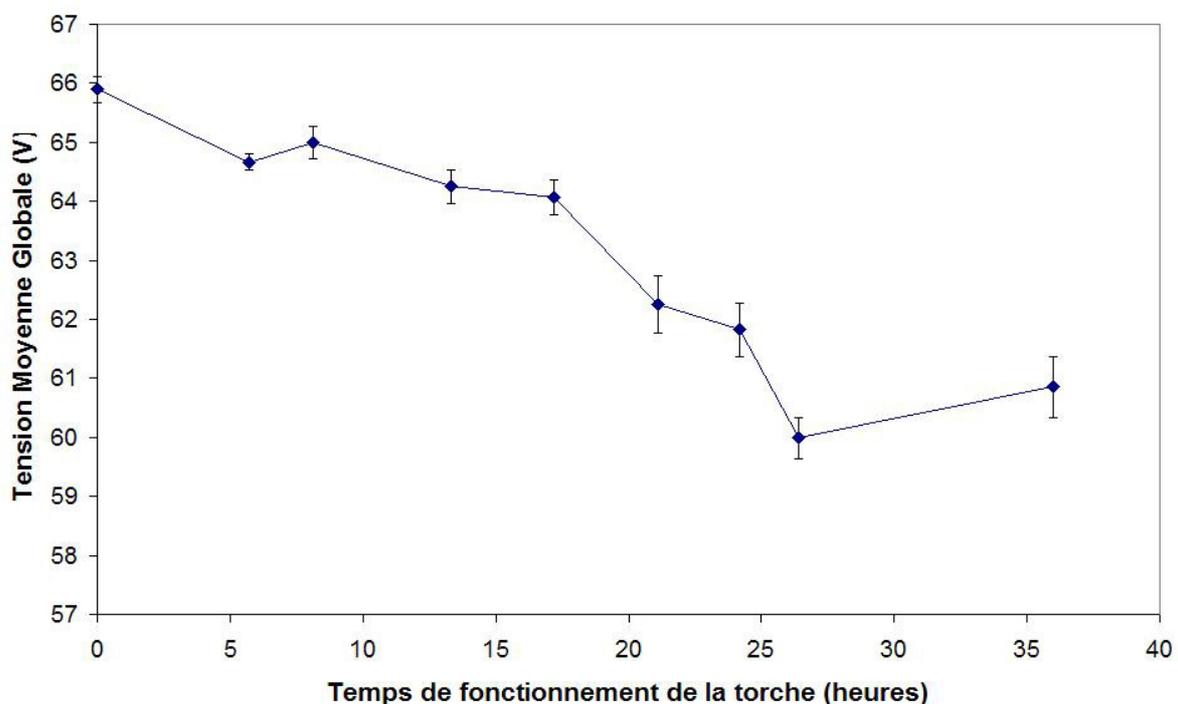


Figure 4-6 : Influence de l'érosion sur la tension moyenne globale (V^x pour PT1)

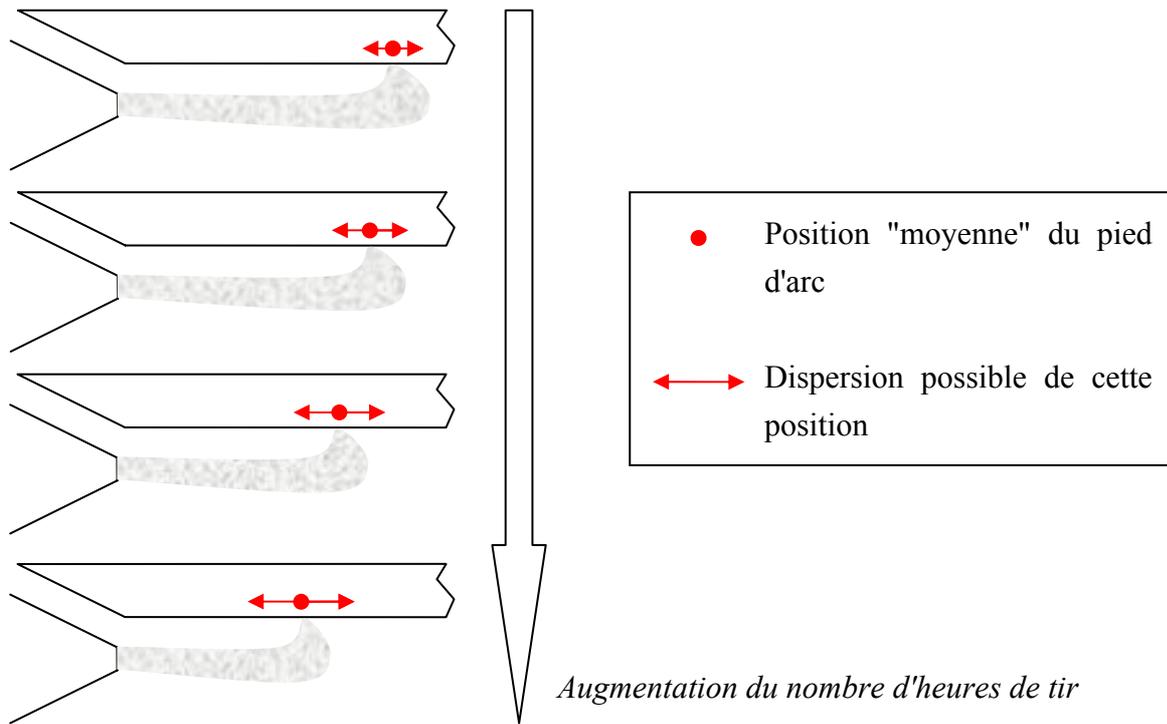


Figure 4-7 : Schéma de la dérive vers l'amont du pied d'arc avec le temps de fonctionnement

En ce qui concerne l'évolution avec le temps de fonctionnement de RMS^x , l'écart moyen quadratique global, qui traduit, sur un tir-test, la dispersion, autour de la moyenne, d'un signal de tension, elle est représenté sur la Figure 4-8. On peut y voir que la valeur de ce paramètre augmente avec le temps de fonctionnement effectif de la torche puisqu'elle est de 13,5V les dix premières heures et $\sim 16V$ à la fin de vie de la torche. L'augmentation représente 20% de la valeur initiale. Les barres de dispersion (écart type) présentes avec les points de mesures du paramètre, évoluent de 50% en commençant avec 0,3V (moyenne sur les 5,7 premières heures) pour finir à 0,43V (moyenne sur les 15 dernières heures).

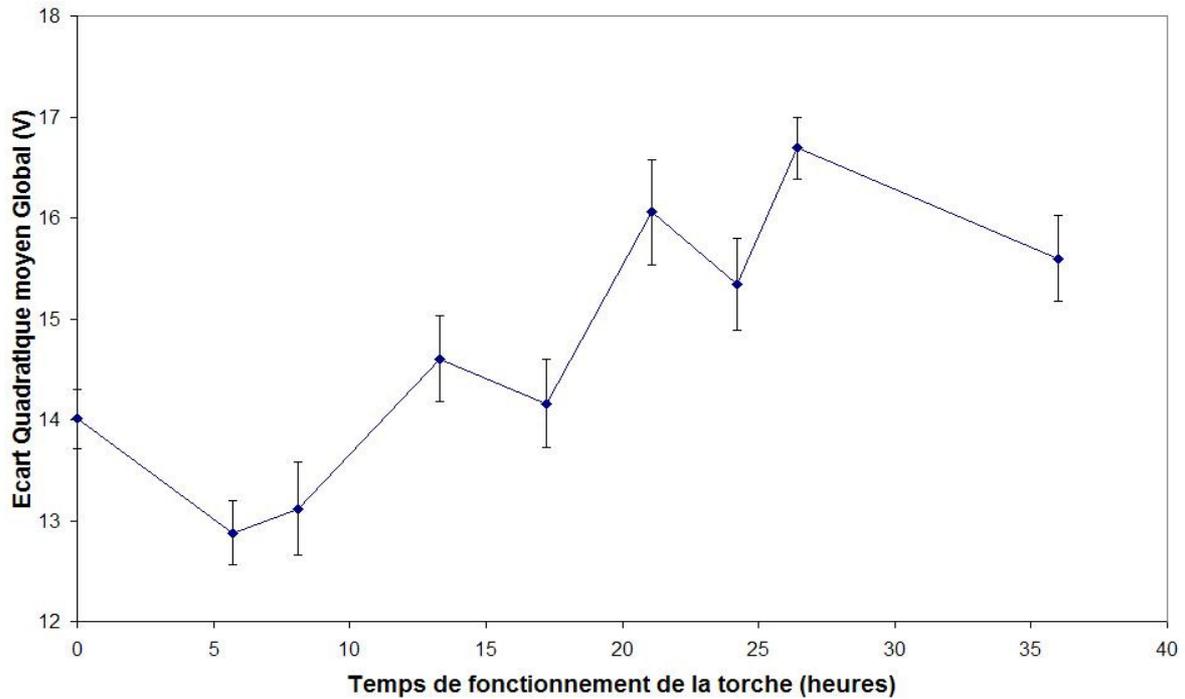


Figure 4-8 : Influence de l'érosion sur l'écart quadratique moyen global (RMS^x pour PT1)

4.2.2.2 Les spectres de tension

De la même manière que pour les signaux temporels, on peut tracer l'évolution des fréquences maximales globale pour les spectres de tension (F_V^x) en fonction du temps de fonctionnement de la torche donc de son érosion (cf. Figure 4-9).

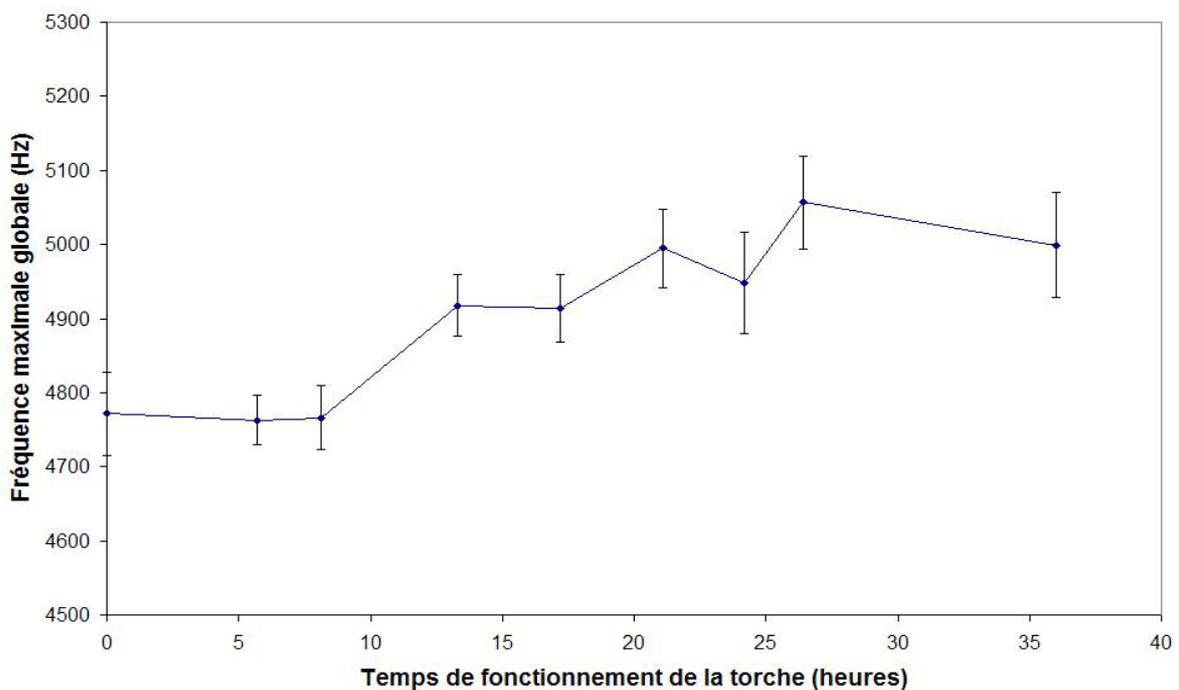


Figure 4-9 : Influence de l'érosion sur la fréquence maximale globale de tension (F_V^x pour PT1)

On peut voir sur cette figure que le pic principal des spectres de tension se déplace vers les hautes fréquences depuis une valeur initiale de 4770Hz jusqu'à atteindre 5025Hz (moyenne sur les 10 dernières heures). Cette évolution représente 5,3% de la valeur initiale, c'est-à-dire un décalage de 255Hz. Il est important aussi de noter que l'écart type de F_V^x (ϵ_{FVx}) augmente au fil du temps de près de 40%, depuis une valeur initiale de 44Hz (moyenne sur les 8 premières heures) jusqu'à 63Hz (moyenne sur les 15 dernières heures).

En ce qui concerne l'évolution, avec le temps de fonctionnement, de l'amplitude des pics principaux des spectres de tension (A_V^x), elle est représentée sur la Figure 4-10.

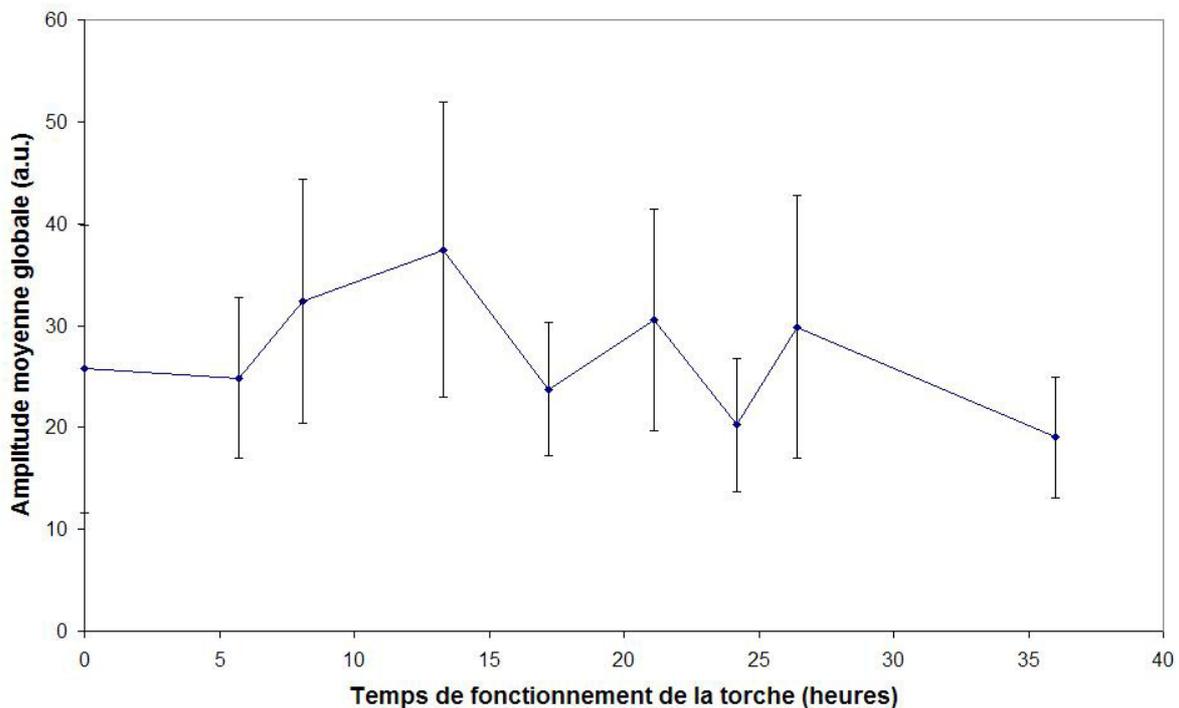


Figure 4-10 : Influence de l'érosion sur l'amplitude moyenne globale des spectres de tension (A_V^x pour PT1).

Aucune tendance d'évolution n'apparaît en ce qui concerne les valeurs de A_V^x puisque la courbe oscille dans une petite plage de valeur entre 20 et 40 unités. Les valeurs de l'écart type de ces amplitudes moyenne locales (notés ϵ_{AVx} et représentés par les barres de dispersion sur la Figure 4-10) sont très importantes d'une part, ce qui traduit une forte variabilité de l'amplitude du pic principal d'un spectre à l'autre, mais d'autre part, elles ne montrent pas non plus d'évolution en fonction du nombre d'heures de fonctionnement de la torche.

4.2.2.3 Les spectres du son

A l'instar des spectres de tension, l'évolution des fréquences moyennes globales et

celle de l'amplitude moyenne globale des pics principaux des spectres du son émis par la torche sont présentées dans ce paragraphe. La Figure 4-11 montre F_S^x en fonction du temps de fonctionnement de la torche. La similitude avec la courbe de la Figure 4-9 n'est pas inattendue et confirme le lien qui existe entre le son émis par la torche et la tension aux bornes des électrodes. Les valeurs de F_S^x sont au début de l'utilisation des électrodes de 4800Hz et grimpent à 5025Hz en fin de vie, ce qui représente une évolution de 225Hz, c'est-à-dire de 4,7% de la valeur initiale. La faible différence entre la valeur initiale de F_V^x (4770Hz) et celle de F_S^x (4800Hz) n'est pas significative et peut s'expliquer par le traitement statistique dont sont issues ces valeurs. En ce qui concerne l'écart type des fréquences moyenne globale (noté ϵ_{FSx} et représenté par les barres de dispersion sur la Figure 4-11), on rencontre à la fois la plus grande valeur (67Hz pour RUN02) et la plus petite valeur (25Hz pour RUN01) dans les premières heures de fonctionnement. De plus il n'y a pas de tendance bien marquée si ce n'est une légère augmentation de 13% entre les huit premières heures ($\epsilon_{FSx} = 44\text{Hz}$) et les quinze dernières ($\epsilon_{FSx} = 50\text{Hz}$).

Quant à l'évolution de A_S^x , représentée sur la Figure 4-12, elle montre deux différences principales en comparaison de celle de A_V^x (cf. Figure 4-10). Premièrement on peut constater une augmentation franche dès la 13^{ème} heure, à la fois de l'amplitude moyenne globale (A_S^x) et de son écart type (ϵ_{AS^x}), représenté par les barres de dispersion. Les valeurs initiales, avant le RUN04, à la 13^{ème} heure, sont de 0,2 unité pour atteindre 0,8 unité après ce 4^{ème} tir-test ce qui est 4 fois plus grand. L'augmentation de la valeur de ϵ_{AS^x} est du même ordre de grandeur puisqu'on passe de 0,09 unité à 0,4 unités, soit 4,5 fois plus. La chute de la dernière valeur, à la 36^{ème} heure de fonctionnement, trouve sûrement son explication dans la remise en place des électrodes avant ce tir-test. Outre cette présence de tendance, la seconde différence, est que le contraste des valeurs des amplitudes rencontrées pour les spectres de tension est 100 fois plus important que pour celles pour le son. Il est cependant utile de préciser que le gain de l'amplificateur n°5935 du microphone Bruël&Kjaer est positionné sur 0dB, ce qui explique les si faibles amplitudes rencontrées.

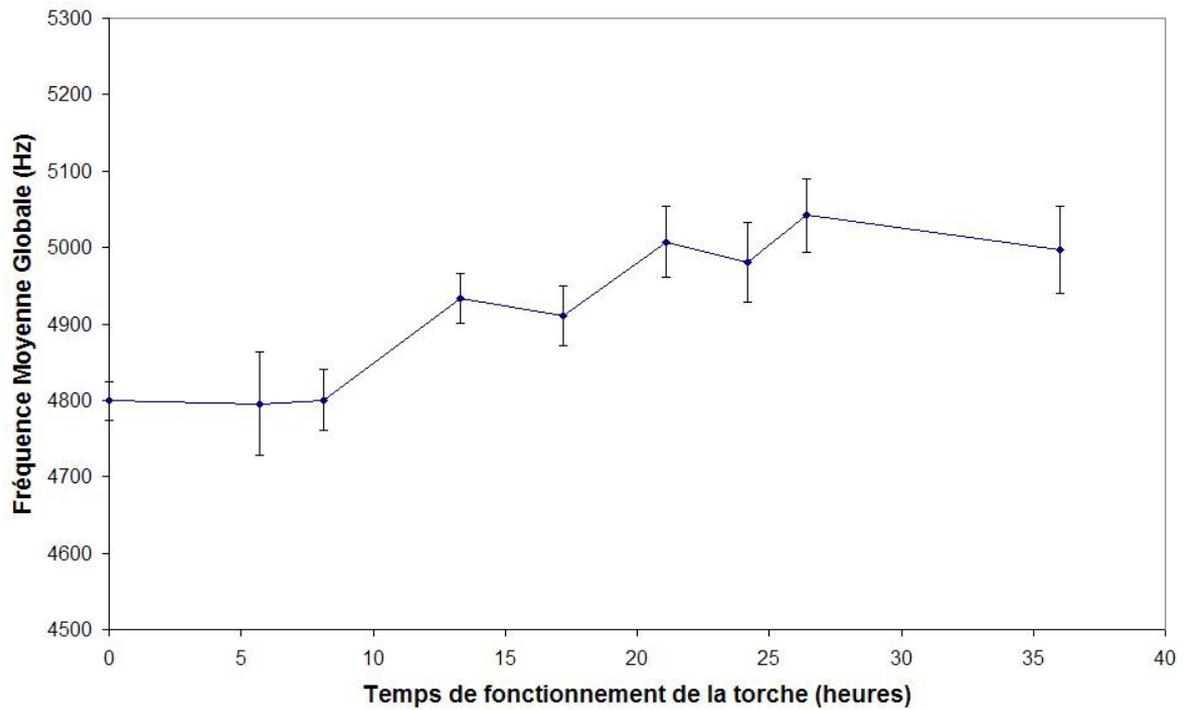


Figure 4-11 : Influence de l'érosion sur la fréquence moyenne globale des spectres du son (F_s^x pour PT1)

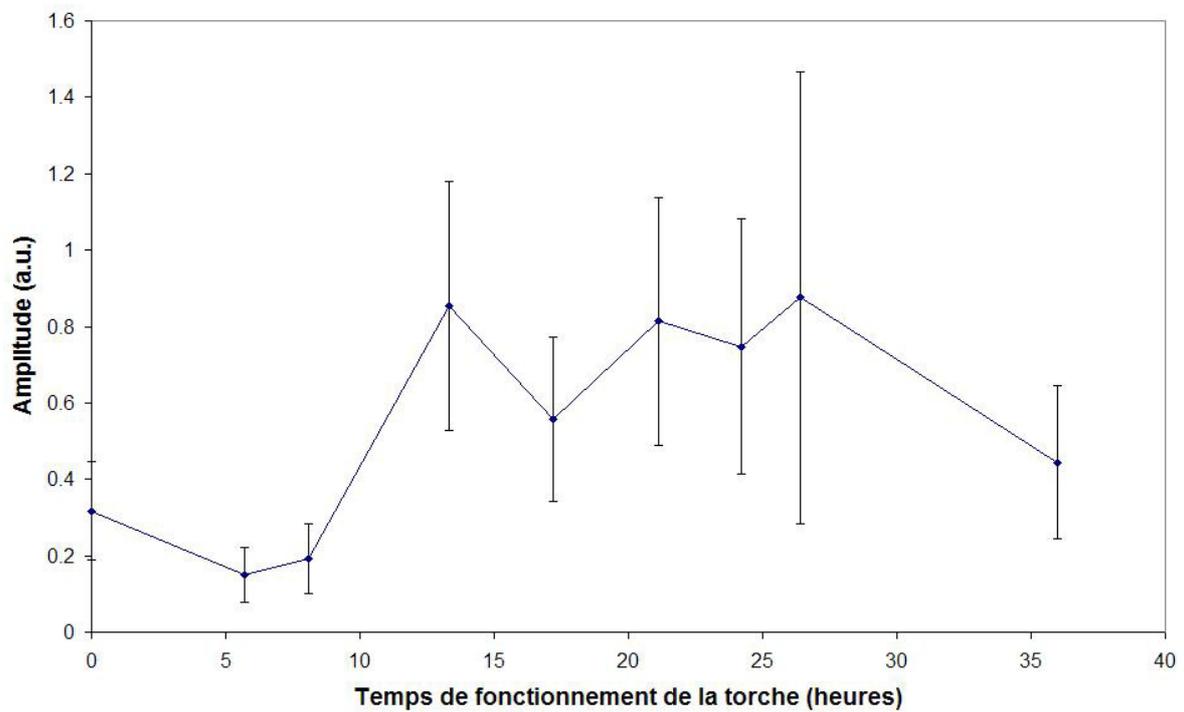


Figure 4-12 : Influence de l'érosion sur l'amplitude moyenne globale des spectres du son (A_s^x pour PT1)

4.2.3 Résultats de l'analyse de la torche PT4

La longévité des électrodes de la torche PT4 a été, d'après les opérateurs, au dessus de la moyenne habituellement constatée. En effet, ce n'est qu'au bout de 47,7 heures et après 456 démarrages que les électrodes ont été jugées suffisamment érodées pour devoir être remplacées. C'est pour cela que 13 tirs-tests ont été réalisés sur la torche PT4. Ils sont répertoriés dans la Table 4-3 avec les heures de fonctionnement et le nombre de démarrages subis par la torche avant chaque tir-test. A titre exceptionnelle pour ce jeu d'électrodes, un étude du suivi des paramètres, après le choix des opérateurs suédois de les remplacer, a été menée d'une part dans l'atelier de Volvo Aero, d'autre part au laboratoire du SPCTS, en France. Il faut préciser que, chez Volvo Aero, la prolongation de cette campagne de collecte de données a été réalisée sans que les électrodes soient retirées puis remises en place dans la torche. Le protocole de cette étude "Après – Vie" est le suivant, que ce soit à Trollhättan ou à Limoges. La torche est démarrée et fonctionne pendant 30 minutes sans interruption. Les dix premières minutes sont consacrées à l'acquisition et au traitement des données et les 20 dernières servent à augmenter le temps de fonctionnement effectif de la torche. 5 tirs "Après-Vie" ont été réalisés à Volvo, et sont référencés "After01" jusqu'à "After05". Il y a eu 4 tirs effectués au SPCTS, nommés "Limog01" à "Limog04".

Référence des tirs-tests	Temps de fonctionnement effectif	Nombre de démarrages	Référence des tirs-tests	Temps de fonctionnement effectif	Nombre de démarrages
Run 01	0 h	0	Run 12	43.8 h	396
Run 02	7.3 h	59	Run 13	47.7 h	456
Run 03	11.4 h	81	After01	48.1 h	462
Run 04	14.5 h	113	After02	48.7 h	463
Run 05	17.7 h	150	After03	49.1 h	464
Run 06	22.3 h	196	After04	49.6 h	465
Run 07	31 h	265	After05	50.1 h	466
Run 08	31.9 h	272	Limog01	50.5 h	467
Run 09	33.6 h	287	Limog02	51.1 h	468
Run 10	37.6 h	338	Limog03	51.6 h	469
Run 11	40.3 h	369	Limog04	52.1 h	470

Table 4-3 : Récapitulatif de l'historique des tirs-tests pour la torche PT4

Nous continuons à tracer les évolutions des nombreux paramètres de suivi en fonction du nombre d'heure de fonctionnement effectif de la torche (et pas en fonction du nombre de démarrage), en dépit du fait que la fréquence du nombre de démarrage par heure de tir ne soit

pas aussi constante, du début à la fin de vie (et au-delà) des électrodes, que dans le cas de la torche PT1.

4.2.3.1 Les signaux temporels

La Figure 4-13 montre l'évolution de la tension moyenne globale (V^x) en fonction du nombre d'heure de fonctionnement effective de la torche. Cette figure montre clairement une chute de la tension moyenne globale depuis la valeur initiale de 68.6V jusqu'à 60,2V (c'est-à-dire -12,2%), dernière valeur avant le remplacement des électrodes, 47,7 heures plus tard. Les valeurs suivantes confirment cette tendance de chute de tension avec une accélération de celle-ci puisque l'on a, en moyenne sur les 22 premières heures, une "vitesse de chute de tension" de 0,01V par heure de fonctionnement, contre 0,3V/h, en moyenne sur les 26h suivantes, avec pour finir, une perte de 1V/h une fois atteintes les 48 heures de fonctionnement effectif de la torche. On peut donc dire que l'érosion est un phénomène auto – aggravant.

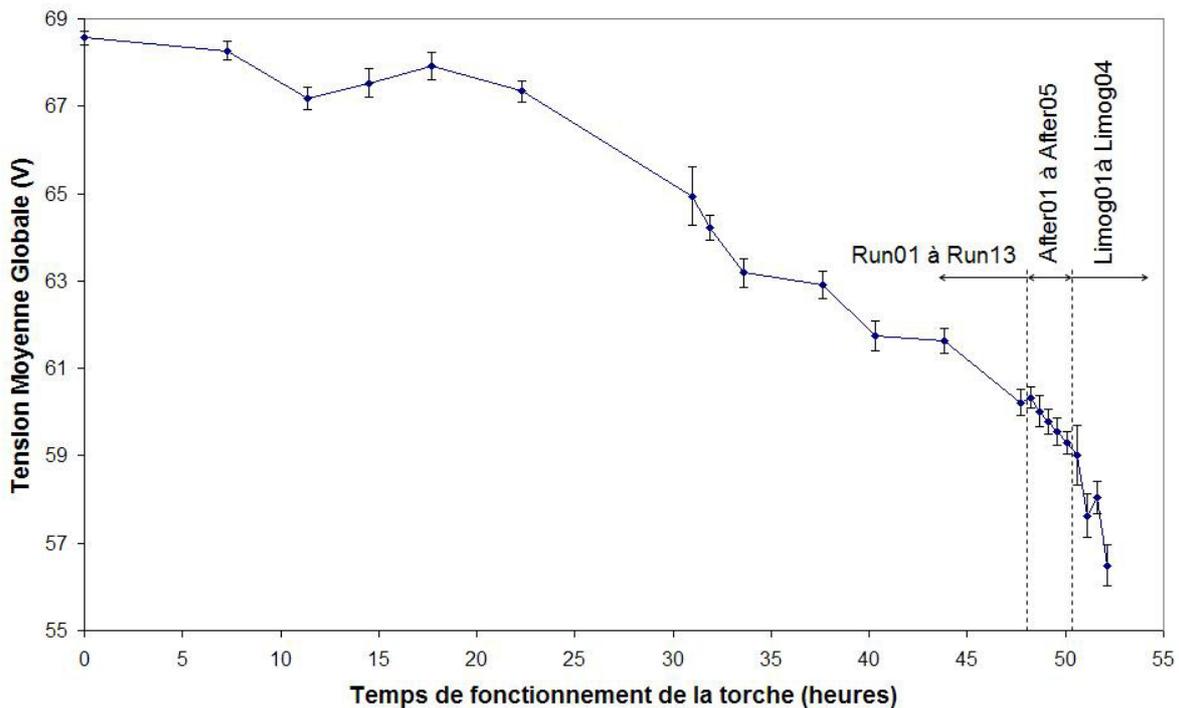


Figure 4-13 : Influence de l'érosion sur la tension moyenne globale (V^x pour PT4)

En ce qui concerne les écarts types liés aux tensions moyennes globales (ϵ_{V^x}), on constate sur la Figure 4-13, que leurs valeurs augmentent avec le temps de fonctionnement de la torche en commençant à 0,14V pour finir entre 0,27V et 0,34V, c'est-à-dire le double. Cela implique que la tension moyenne locale est de plus en plus fluctuante.

L'évolution de RMS^x avec le temps est présentée sur la Figure 4-14. Malgré l'allure brisée de la courbe, les points issus de la prolongation de l'étude au-delà de la vie des électrodes, font ressortir l'augmentation des valeurs de l'écart quadratique moyen global avec le temps de fonctionnement. Avec initialement 13,6V (moyenne sur les 7,3 premières heures) et à la fin du temps d'usage des électrodes (RUN13), une valeur de 17,2V, on observe une augmentation de 25% par rapport à la valeur initiale. Quant aux écarts types liés à RMS^x (ϵ_{RMS^x}), représentées par les barres de dispersion sur la Figure 4-14, il n'y a pas de tendance marquée ni vers une diminution, ni vers une augmentation des valeurs de ce paramètre.

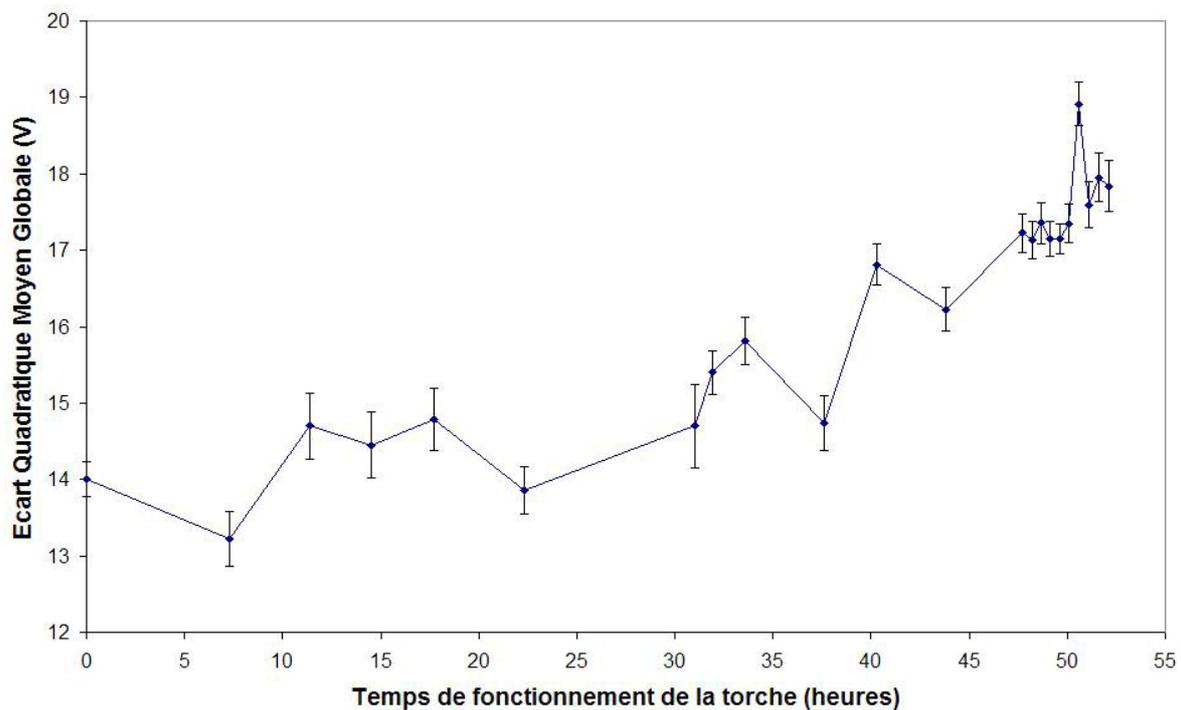


Figure 4-14 : Influence de l'érosion sur l'écart quadratique moyen global (RMS^x pour PT4)

4.2.3.2 Les spectres de tension

La Figure 4-15 montre l'évolution des fréquences des pics principaux des spectres de tension avec le temps de fonctionnement de la torche PT4.

La valeur initiale, correspondant à un jeu d'électrodes neuves, est de 4810 Hz, et celle en fin de vie, est de 5160 Hz. Les points qui suivent celui de RUN13, confirment la dérive de plus en plus importante vers les fréquences plus élevées, mais elles ne seront pas prises en compte dans les calculs des pourcentages des variations. Ainsi, l'évolution est marquée par une allure de la courbe en cloche, pendant les 30 premières heures, puis on observe un mouvement presque monotone d'augmentation du paramètre F_v^x . Sur la totalité de l'utilisation des électrodes par Volvo Aero, une augmentation de 350 Hz, soit 7,2% de la valeur initiale,

est observée. En ce qui concerne ε_{FV_x} , il n'y a pas de significative évolution puisque, pour RUN01, on relève 50 Hz et pour RUN13, on a 60 Hz avec une faible variation pour les valeurs intermédiaires et celles au-delà de RUN13.

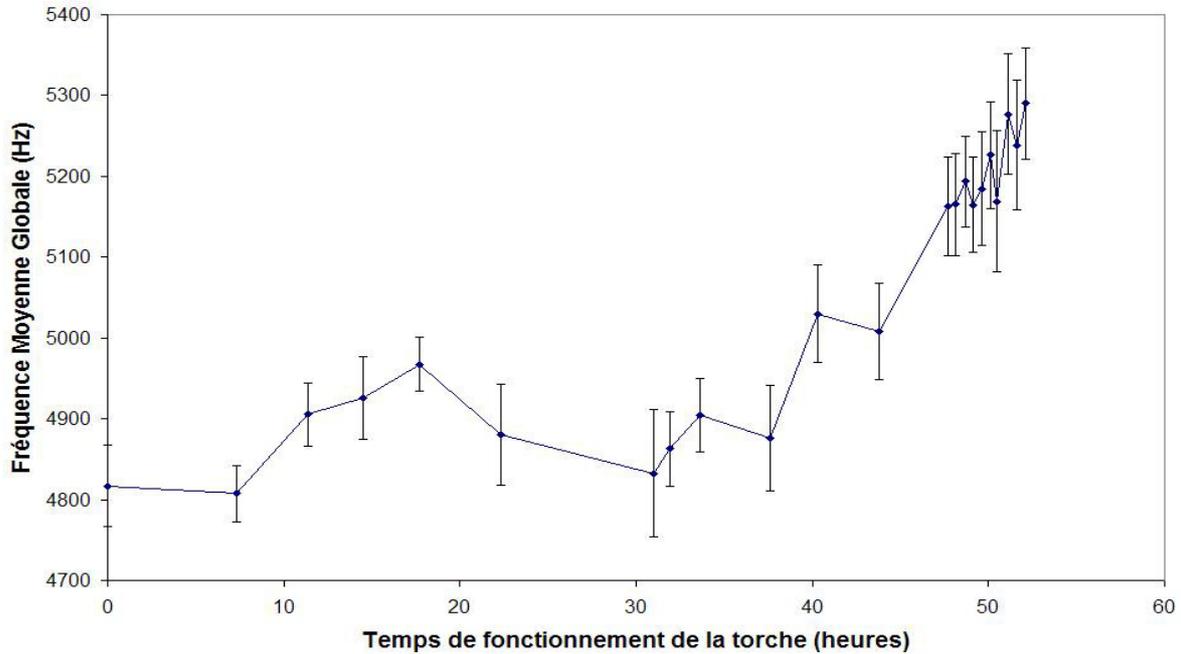


Figure 4-15 : Influence de l'érosion sur la fréquence moyenne globale de tension (F_V^x pour PT4)

L'évolution des amplitudes moyennes globales des pics principaux des spectres de tension en fonction du temps de fonctionnement de la torche (cf. Figure 4-16) ne montre pas une tendance nette pour ce paramètre malgré une diminution globale confirmée par les essais d'"après vie", qui donne une valeur initiale (calculée en moyennant les 5 premières valeurs, c'est-à-dire les 17,7 premières heures) de 27.3V et une valeur finale (calculée sur les 10 dernières heures avant remplacement) de 21.7V, soit une baisse de 20%. La même conclusion (légère diminution) peut s'appliquer pour l'écart type qui lui est associé (ε_{AV_x}) avec une diminution de 26% (calculée sur les mêmes périodes de temps).

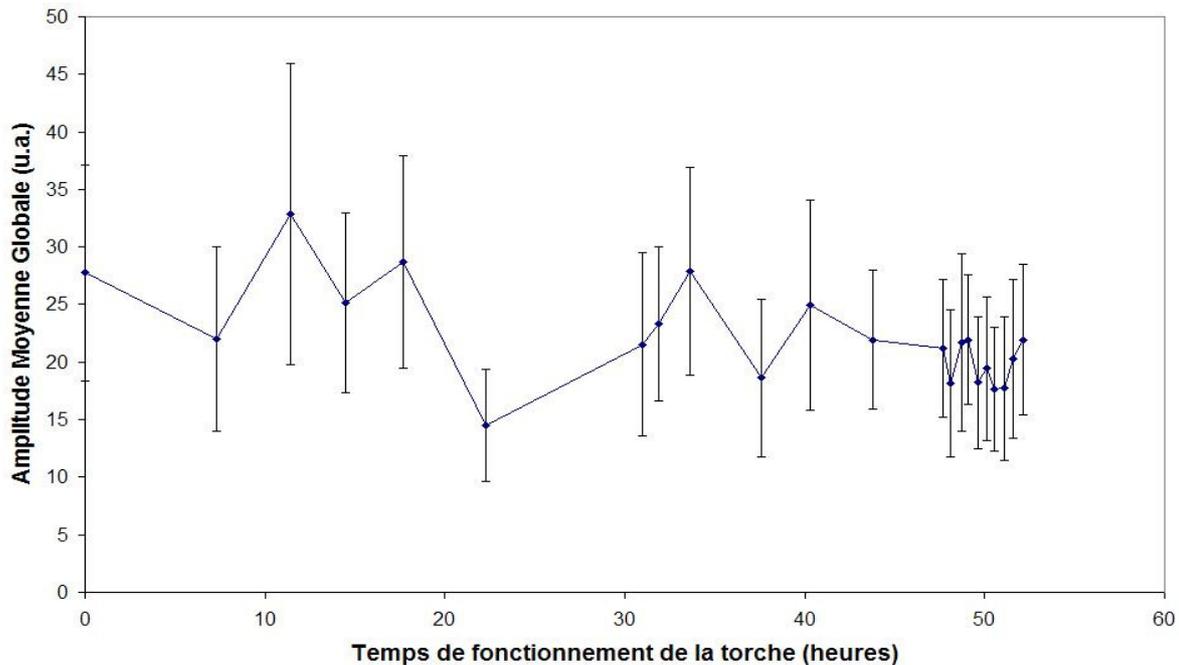


Figure 4-16 : Influence de l'érosion sur l'amplitude moyenne globale des spectres de tension (A_v^x pour PT4).

4.2.3.3 Les spectres du son

La courbe de la Figure 4-17 est relative à l'évolution avec le temps des fréquences moyennes globales calculées à partir des spectres du son. Cette courbe est analogue à celle de la Figure 4-15 (pour la tension), puisqu'on retrouve l'allure de cloche pour les 30 premières heures, suivie par une augmentation des valeurs de F_s^x jusqu'au remplacement des électrodes (qui a eu lieu après 47,7h de fonctionnement). Ce déplacement de fréquence, confirmé par les valeurs au-delà du moment choisi pour changer d'électrodes, représente 7,9% de la valeur initiale de F_s^x (4820Hz), c'est-à-dire 380Hz, pour atteindre 5200 Hz au RUN13. Sur l'ensemble des tir-tests référencés de RUN01 à RUN13, on ne note pas d'évolution significative des barres de dispersion avec une constance des valeurs vers ~50 Hz, sauf pour RUN13 qui affiche un écart type de 112Hz. Cette forte valeur est conservée pour les tirs – tests d'"Après – Vie" qui en moyenne affiche un écart type de 80 Hz.

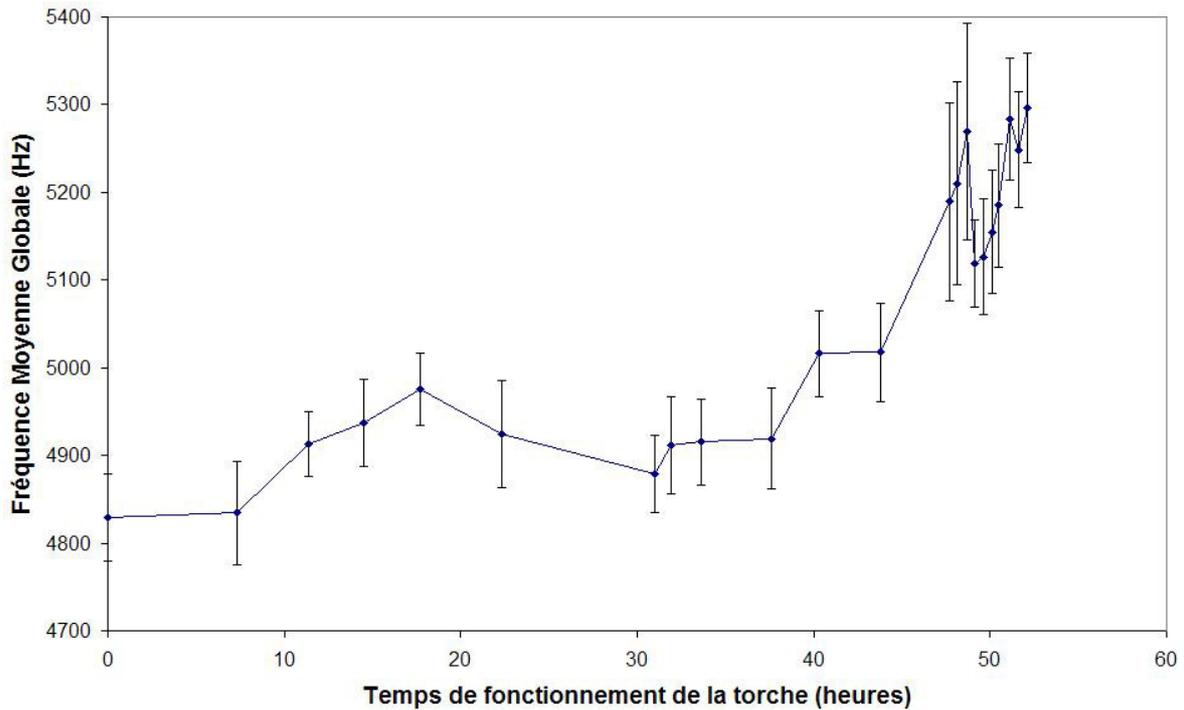


Figure 4-17 : Influence de l'érosion sur la fréquence moyenne globale des spectres de son (F_s^x pour PT4).

Pour conclure cette liste des paramètres suivis avec le temps de fonctionnement de la torche, voici la Figure 4-18 qui représente l'amplitude des pics principaux des spectres du son (A_S^x). Contrairement à la tension, il n'y a ni augmentation, ni diminution de ce paramètre. La même conclusion (pas de tendance) s'impose au regard de l'évolution de l'écart type (les barres de dispersion sur la figure) lié à ce paramètre. Une information intéressante peut néanmoins être extraite de cet écart type. Les valeurs de $\varepsilon_{A_S^x}$ sont très proches de celles liées à A_S^x , ce qui signifie que d'un spectre à un autre, le pic principal aura une amplitude totalement différente. Cela confirme la nécessité du traitement statistique qui a été entrepris. Par ailleurs, ce graphique montre que les valeurs des amplitudes lues sur les spectres du son sont encore 100 fois inférieures à celles lues sur les spectres de tension comme l'a déjà montré la comparaison de la Figure 4-10 avec la Figure 4-12, pour la torche PT1.

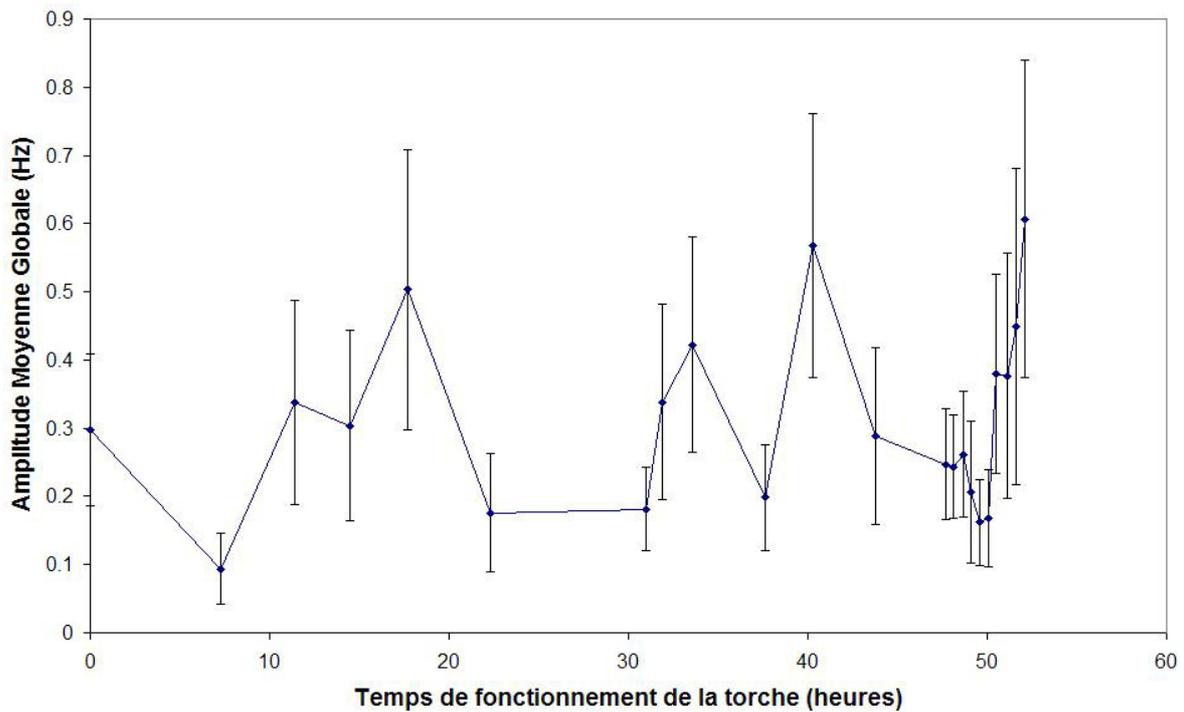


Figure 4-18 : Influence de l'érosion sur l'amplitude moyenne globale des spectres de son (A_s^x pour PT4).

4.2.4 Synthèse de ces résultats

Il apparaît déjà que certains paramètres ne montrent pas d'évolution avec le temps de fonctionnement, donc au fur et à mesure que l'érosion des électrodes et en particulier celle de l'anode, s'installe. Par exemple, l'amplitude moyenne globale de tension (A_V^x) ou celle du son (A_s^x) ne sont pas de bons candidats pour assurer le suivi de l'érosion puisque, bien qu'ils fluctuent, ils ne montrent aucune tendance explicite. Au contraire, les évolutions des paramètres tels que la tension moyenne globale, le RMS global de la tension et les fréquences moyennes globales de tension ou du son reflètent la mise en place de l'usure des électrodes.

Le choix des trois paramètres considérés comme les plus significatifs en terme de suivi de l'érosion est présenté dans le dernier paragraphe (4.4) de ce chapitre sur l'évolution des signaux. Mais auparavant, nous consacrons un paragraphe à l'étude qui a été menée avec les transformées en ondelettes sur les signaux du son. Cette étude a été entreprise afin d'établir si ce traitement du signal, relativement nouveau, pouvait apporter des informations complémentaires par rapport aux FFT.

4.3 Intérêts et limitations des ondelettes

L'analyse des données avec un traitement par transformées en ondelettes est une méthode complémentaire de celle effectuée par transformées de Fourier. Les bases mathématiques ainsi que les principales différences entre ces deux méthodes d'analyse des données sont présentées dans ce paragraphe. Plusieurs séries de tirs de torches plasma ont été réalisées et d'importants fichiers de signaux ont été enregistrés. Leur analyse, présentée dans ce paragraphe, montre les points forts et les limitations de cette technique de traitement du signal.

4.3.1 Une brève histoire de l'analyse des fréquences

Au début du XIX^{ème} siècle, J. Fourier a démontré que toute fonction 2π – périodique $f(t)$ est la somme de fonctions trigonométriques, c'est-à-dire à base des fonctions élémentaires sinus et cosinus. Il ouvrait ainsi la voie du traitement du signal par analyse spectrale que de nombreux mathématiciens ont par la suite consolidée. Un siècle plus tard, A. Haar, en 1909, fit la première mention des ondelettes dans ses travaux de thèse. Dans les années 1930, plusieurs groupes de travail ont cherché à représenter des fonctions mathématiques en utilisant des bases de fonctions élémentaires à échelles variables. La compréhension de ce concept de bases de fonctions à échelles variables est la clé des transformées en ondelettes. Par exemple, P. Levy, en 1930, a trouvé que la base de fonctions de Haar était plus adéquate que la base des fonctions de Fourier (sinus et cosinus) dans l'étude du mouvement brownien. En 1980, Grossmann et Morlet, respectivement physicien et mathématicien, ont largement défini les ondelettes dans le domaine de la physique quantique et ils ont présenté un nouvel outil de traitements de données : les transformées en ondelettes. En 1985, S. Mallat a donné un nouvel élan à la recherche fondamentale sur les ondelettes avec ses travaux sur les signaux digitaux. Inspiré par ce dernier, Y. Meyer a construit les premières ondelettes non triviales : contrairement à celles de Haar, les ondelettes de Meyer sont continûment différentiables. Un peu plus tard, I. Daubechies a poursuivi les travaux de Mallat pour aboutir à un ensemble de fonctions mathématiques constituant la première base d'ondelettes orthonormale. Ces travaux constituent désormais le socle des outils actuels relatifs aux ondelettes.

4.3.2 Les mathématiques de la transformée de Fourier

Analyser un signal uniquement à partir de son évolution temporelle ne permet pas d'examiner toutes les informations qu'il recèle. Il est souvent nécessaire de transformer ce signal pour lui donner une autre représentation dans un nouvel espace, celui des fréquences.

Fourier proposa que toute fonction T – périodique $f(t)$, peut être décomposé par une série de sinus et de cosinus :

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(2\pi / T)kt + b_k \sin(2\pi / T)kt)$$

Les nombres a_0 , a_k et b_k , sont les coefficients de Fourier définis par :

$$a_k = \frac{1}{T} \int f(t) \cos\left(\frac{2k\pi t}{T}\right) dt \quad \text{et} \quad b_k = \frac{1}{T} \int f(t) \sin\left(\frac{2k\pi t}{T}\right) dt$$

Le calcul de transformée de Fourier fut l'un des premiers calculs programmés lors des premiers pas de l'informatique dans les années 1960 avec la découverte par Cooley & Tukey de la Transformée de Fourier Rapide (ou FFT en anglais pour Fast Fourier Transform). Pour un signal représenté par un ensemble n de points, l'évaluation de la transformation de Fourier correspondante nécessite n^2 opérations. Toutefois si les points sont uniformément séparés entre eux, alors seulement $n \cdot \log_2(n)$ opérations sont requises. Il existe au moins quatre algorithmes différents pour réaliser ce calcul : la plus conventionnelle est la méthode des puissances de deux. On peut citer aussi la méthode des facteurs premiers [69], celles du radical mixte de Singleton [70] ou la méthode Chirp-Z [71].

4.3.3 Les mathématiques de la transformée en ondelettes

Les ondelettes sont des fonctions mathématiques qui décomposent les données d'un signal en différents composants spectraux et qui donnent chacun de ces composants avec une résolution adaptée à son échelle. Les ondelettes ont l'avantage sur les méthodes de Fourier de permettre d'appréhender des phénomènes qui contiennent des discontinuités et des changements brusques. Le champ d'application des ondelettes est vaste puisqu'il recouvre les mathématiques, la physique quantique, les ingénieries électriques et électroniques mais aussi le domaine de la géologie sismique.

L'analyse par transformée en ondelettes consiste à diviser le signal sur une base d'ondelettes en commençant par la fonction $\psi(t)$, appelée "ondelette mère", qui doit être localisée en temps et oscillante. La localisation implique que $\psi(t)$ décroît rapidement quand la valeur absolue du temps t tend vers l'infini. La condition d'oscillation se traduit par la nullité de l'intégrale de ψ ainsi que de celle de ses m premiers moments.

$$0 = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} t^{m-1} \psi(t) dt$$

L'ondelette mère génère les autres ondelettes, dites filles, $\psi_{a,b}(t)$ (avec a un nombre réel positif et b un nombre réel) en effectuant un changement d'échelle et une translation dans le temps. L'échelle de $\psi(t)$ est par convention 1 alors que celle de $\psi_{a,b}(t)$ est a . De plus quand $\psi(t)$ est centrée en 0, $\psi_{a,b}(t)$ est centré en b . L'indice d'échelle, a , indique la largeur de l'ondelette et l'indice de position, b , informe sur la localisation de l'ondelette :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

Grossmann et Morlet ont montré que si $\psi(t)$ est une fonction de valeurs réelles, l'ensemble de $\psi_{a,b}(t)$ peut être considéré comme une base orthonormale dans l'espace des fonctions. Ainsi, chaque fonction $f(t)$ d'énergie finie peut être exprimée comme la combinaison linéaire d'ondelettes $\psi_{a,b}(t)$ dont les poids respectifs sont données par les coefficients suivants :

$$C_f(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{a,b}(t) dt = \langle \psi_{a,b}, f \rangle$$

Ces coefficients $C_f(a,b)$ évaluent les fluctuations de $f(t)$ au voisinage du point $t = b$, à l'échelle a . Finalement, tout signal $f(t)$ peut s'écrire, avec K une constante uniquement dépendante de $\psi(t)$, comme la superposition d'ondelettes :

$$f(t) = K \int_{-\infty}^{+\infty} C_f(a,b) \psi_{a,b}(t) \frac{da}{a} db$$

Par analogie avec le principe d'incertitude d'Heisenberg en physique quantique, la résolution temporelle et la résolution fréquentielle d'une transformée en ondelettes d'un signal $x(t)$, sont liées par la relation suivante :

$$\Delta t \cdot \Delta \nu \geq \frac{1}{4\pi}$$

L'incertitude en temps, Δt , et l'incertitude en fréquence, $\Delta \nu$, ont été définies par Gabor, en fonction de l'énergie du signal, notée E_x :

$$\Delta t^2 = \frac{1}{E_x} \int_{-\infty}^{+\infty} t^2 |x(t)|^2 dt \quad \text{et} \quad \Delta \nu^2 = \frac{1}{E_x} \int_{-\infty}^{+\infty} \nu^2 |\hat{x}(\nu)|^2 d\nu$$

Il y a une infinité de base de fonctions pour les transformées en ondelettes d'un même

signal. Les différentes familles d'ondelettes se distinguent par la compacité spatiale des éléments de la base de fonctions et par leur structure. Par exemple, certaines familles d'ondelettes ont une structure fractale dont fait partie la famille d'ondelettes de Daubechies représentée sur la Figure 4-19.

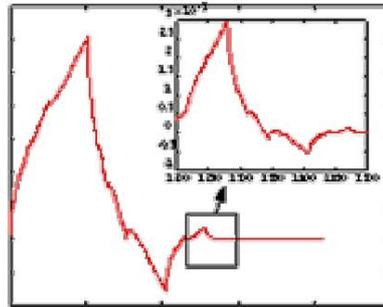


Figure 4-19 : La structure fractale de l'ondelette mère de Daubechies

Dans chacune des familles d'ondelettes, on peut retrouver des sous-classes qui se différencient entre elles, le plus généralement, par leur nombre de moments nuls. Ce nombre renvoie à un ensemble de relations supplémentaires que les coefficients $C_i(a,b)$ doivent satisfaire.

A l'instar de la FFT, il existe un algorithme, développé par Mallat et par Daubechies, qui ne requiert qu'un nombre limité d'opérations pour calculer la transformée en ondelettes d'un signal discrétisé. On parle alors de FWT (*Fast Wavelet Transforms* en anglais).

4.3.4 Comparaison entre transformées de Fourier et transformées en ondelettes

Les deux méthodes de traitement du signal que sont les transformées de Fourier et les transformées en ondelettes sont deux opérations linéaires qui génèrent, à partir d'un signal discret de n éléments, une structure de données contenant $n \cdot \log_2(n)$ segments de différentes longueurs. Les propriétés mathématiques des deux méthodes sont semblables puisque la matrice de transformée inverse, dans les deux cas, est la transposée de l'original. Ainsi, les deux traitements peuvent être considérés comme une rotation dans l'espace des fonctions vers un domaine différent. En ce qui concerne les FFT, ce nouveau domaine a pour base le couple de fonctions sinus et cosinus. Pour les transformées en ondelettes, le nouveau domaine a un ensemble de fonctions (une ondelette mère et ses ondelettes filles) qui forme aussi une base orthonormale. Enfin pour les deux types de transformées, la base de fonctions est localisée en fréquence, ce qui permet d'extraire des fréquences caractéristiques avec des outils de visualisation tels que les spectres de puissance (pour les transformées de Fourier) et les diagrammes temps – fréquence – amplitude (pour les transformées en ondelettes).

La principale différence entre les deux types de transformées est que les fonctions d'ondelettes sont individuellement localisées dans l'espace alors que les fonctions sinus et cosinus ne le sont pas. Cette particularité de localisation rend le résultat d'une transformée en ondelette d'un signal plus explicite que celui issue d'une transformée de Fourier.

La couverture de la base de fonctions, représentée dans le plan temps – fréquence permet de constater la différence entre la résolution d'une transformées de Fourier et celle d'une transformées en ondelette. Le fenêtrage d'une transformée de Fourier (cf. Figure 4-20) est assuré par des structures carrées, qui tronquent les fonctions sinus et cosinus pour s'adapter à une largeur particulière. Ainsi, l'utilisation d'une seule fenêtre pour toutes les fréquences, lors d'une transformée de Fourier, conduit à une résolution unique dans tous le plan temps – fréquence.

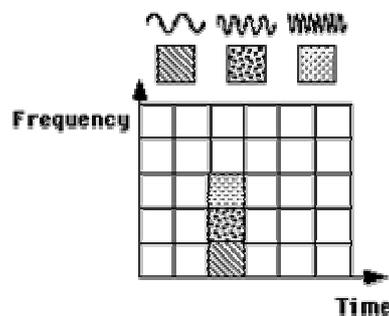


Figure 4-20 : Couverture dans le plan temps – fréquence de la base de fonctions d'une transformées de Fourier

Au contraire, la transformée en ondelette utilise un fenêtrage variable. Ainsi les basses fréquences seront analysées à partir d'une fenêtre dont la base de temps est large et inversement, les hautes fréquences seront issues d'une fenêtre à plus petite base de temps (cf. Figure 4-21).

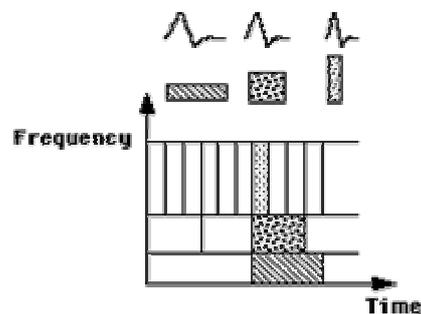


Figure 4-21 : Couverture dans le plan temps – fréquence de la base de fonctions d'une transformées en ondelettes de Daubechies

4.3.5 Evolution des diagrammes avec le temps de fonctionnement des torches.

Pour suivre l'évolution du signal sonore émis par la torche à partir de résultats acquis par traitement du signal par transformées en ondelettes, une série de 37 tirs de torche à plasma

équipée d'un jeu d'électrodes neuf pour le premier tir, a été réalisé. Il a fallu de plus un logiciel qui puisse réaliser le post traitement d'analyse à partir des sons recueillis sur l'enregistreur analogique. Les autres paramètres, tels que la tension d'arc et l'intensité du courant, ont aussi été mesurés et stockés.

4.3.5.1 Présentation du logiciel de transformée en ondelettes

Un logiciel, écrit sous C, a été traduit et aménagé sous Visual Basic par Guy Delluc et Bernard Pateyron. Il est désormais en libre accès sur Internet à l'adresse :

http://ttwinner.free.fr/index_fichiers/ondelettes.exe

Ce logiciel permet d'ouvrir un fichier .TXT ou un fichier .WAV (format d'enregistrement des fichiers sons acquis avec l'enregistreur numérique). Une sélection d'une partie du fichier est possible graphiquement ainsi que le fenêtrage de la sélection et le filtrage de fréquences (sélection par bande ou locale). Les transformées en ondelettes utilisées ne sont pas orthogonales. En conséquence, les paramètres de la transformées en ondelettes permettent au besoin d'accroître la précision mais au détriment du temps de calcul. En outre, il est possible d'accéder à la phase et à la fréquence de la transformée en ondelettes et celles-ci ont le même sens qu'en FFT. L'importance du nombre de points du signal (c'est-à-dire la taille en octets du fichier son) entraîne que le temps de calcul moyen pour obtenir le résultat d'une transformée en ondelettes est de l'ordre de 15 à 20 secondes. Une présentation de l'espace de travail du logiciel est donnée sur la Figure 4-22.

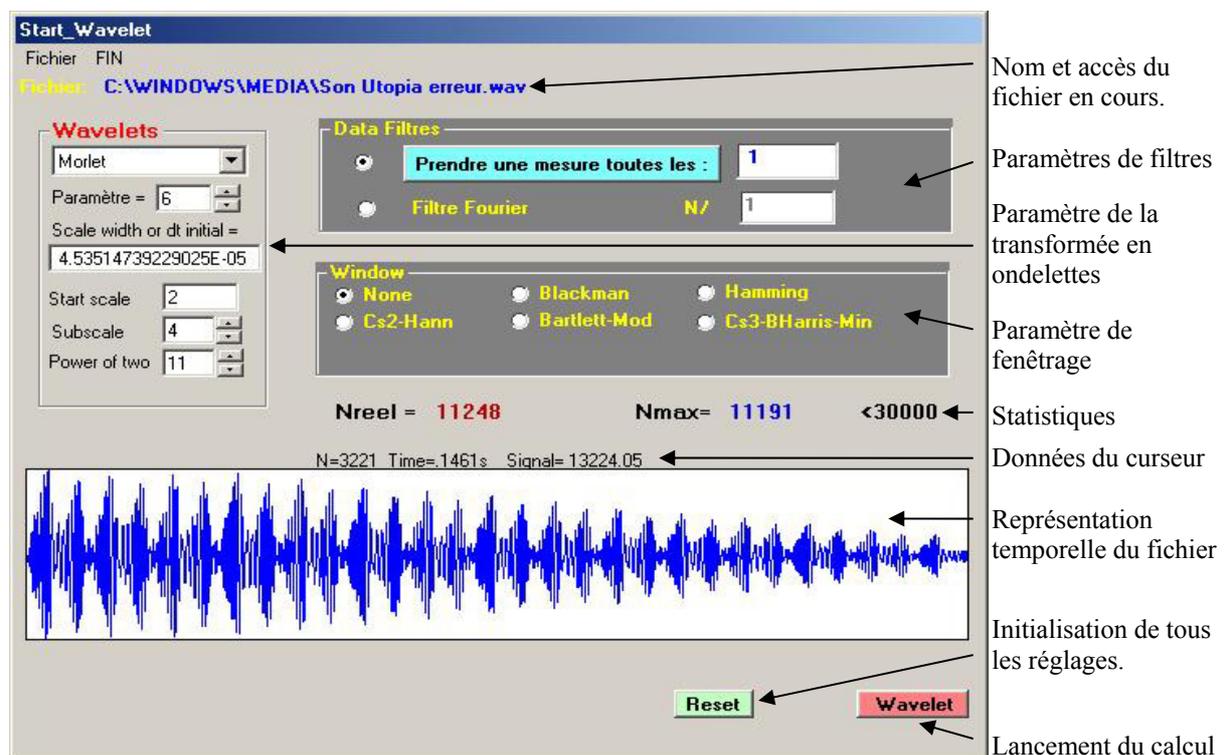


Figure 4-22 : Interface utilisateur du programme de transformées en ondelettes

Dès que tous les réglages sur le signal à analyser sont effectués, une nouvelle fenêtre apparaît représentant le diagramme TFA pour "Temps (s) – Fréquence (Hz) – Amplitude (u.a.)", caractéristique de la transformée en ondelettes (cf. Figure 4-23).

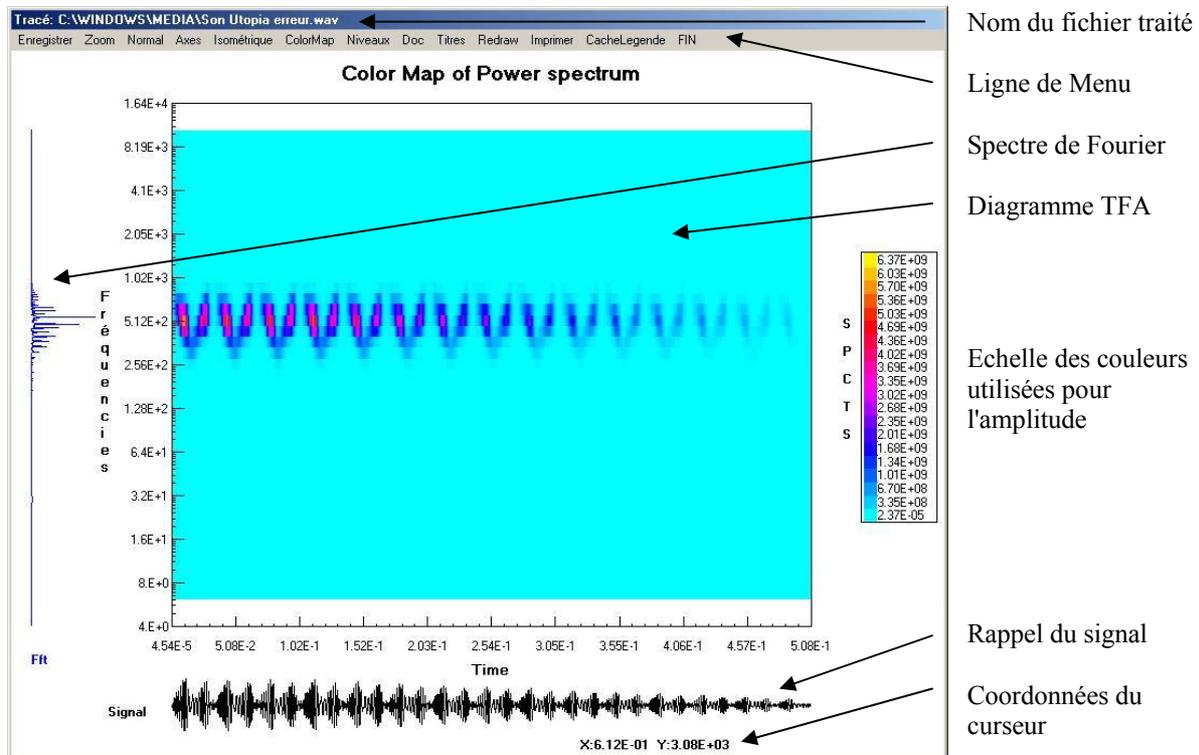


Figure 4-23 : Fenêtre de résultat du calcul du logiciel pour les transformées en ondelettes :
Diagramme temps - fréquence – amplitude

Les diagrammes temps – fréquence – amplitude, issus du résultat du calcul de la transformée en ondelettes via le logiciel développé au laboratoire, permettent de mettre en évidence à la fois les fréquences principales à chaque instant et les différences d'amplitude au cours du temps. La transformée de Fourier du même signal, calculée sur le même temps, globalise les résultats mais ne permet pas de voir l'évolution en fonction du temps des fréquences caractéristiques.

4.3.5.2 Présentation des campagnes d'essais.

Deux campagnes d'investigation ont été effectuées où une analyse du son émis par la torche, enregistré par l'ensemble III (l'enregistreur numérique), a été réalisée par transformées en ondelettes. La première campagne concerne cinq électrodes usées, envoyées par Volvo Aero sans aucune indication sur le nombre d'heures de fonctionnement ni le nombre de redémarrages subis pour chacun des couples anode - cathode. Cette campagne de tirs est nommée "campagne V" (*V pour cinq en latin et pour Vieilles électrodes*). La seconde campagne concerne l'étude d'un jeu d'électrodes neuves sur lequel on a fait 37 démarrages,

nombre nécessaire pour obtenir une érosion importante. Cette campagne est nommée par la suite "Campagne des 37 tirs".

4.3.5.2.1 Description de la "campagne V"

Cinq électrodes, référencés V1, V2, V3, V4 et V5, ont été successivement placées sur la torche PTF4 et testées pendant quelques minutes avec un courant d'intensité 600A et un mélange de gaz plasmagène d'argon à 45Nl.min⁻¹ et d'hydrogène à 15Nl.min⁻¹. Ni l'observation optique, ni les empreintes en polysiloxane n'ont permis de trier selon leur état d'usure les électrodes, exception faite de V5 qui présentait quelques traces d'érosion sous forme de petits cratères. Un jeu d'électrode neuve, qui a subi également un tir de la même durée et dans les mêmes conditions de fonctionnement, servira de référence dans cette étude comparative des diagrammes TFA issu de l'enregistrement sonore fait avec l'ensemble III.

4.3.5.2.2 Description de la "campagne des 37 tirs"

Cette série de tirs de torche plasma, a commencé avec un jeu d'électrodes neuves et s'est terminé au bout de seulement 6 heures de temps de fonctionnement cumulé pour la torche et 37 démarrages. La procédure pour chacun des tirs a été rigoureusement la même tout au long de l'expérience :

- ✚ Introduction du gaz primaire (argon à 45Nl.min⁻¹ d'argon)
- ✚ Mise sous tension à vide de la torche (~80-100V) avec le circuit secondaire fermé
- ✚ Démarrage de la torche par contact à la mise de graphite entre les électrodes.
- ✚ Ouverture du circuit secondaire (le courant passe de 200 à 400A dans la torche)
- ✚ Augmentation de l'intensité du courant jusqu'à 600A
- ✚ Introduction du gaz secondaire (hydrogène à 15Nl.min⁻¹)
- ✚ Ajustement du courant de 580 à 600A (chute observée lors de l'introduction de H₂)
- ✚ Tir dans ces conditions (600A et Ar-H₂/45-15Nl.min⁻¹) pendant 5 à 10 minutes.
- ✚ Arrêt brutal de la torche dans les conditions précédentes
- ✚ Fermeture des arrivées de gaz et d'eau de refroidissement

Les conditions de démarrage et d'arrêt de la torche sont sciemment choisies pour provoquer une érosion rapide. En effet, un jeu d'électrodes peut effectuer entre deux et trois

centaines de démarrages et plusieurs dizaines d'heures de fonctionnement avant de montrer les premiers signes visibles d'érosion (présence de cratères avec une forte rugosité de l'intérieur de l'anode, etc.).

Dans le temps où la torche fonctionne sous les conditions dites "stables", c'est-à-dire à 600A et avec le mélange plasmagène d'argon et d'hydrogène, une minute d'enregistrement du son par l'ensemble III est effectuée avec bien entendu, la position de microphone par rapport à la sortie de tuyère, maintenue constante pour toutes les expériences. Cette condition devait permettre d'imputer les changements d'amplitude sonore sur les signaux et sur les diagrammes TFA, uniquement à la variation de comportement de la torche occasionné par l'érosion des électrodes. L'obtention des 36 diagrammes TFA (il y a eu un problème d'enregistrement du son avec le 9^{ème} tir) a été effectué pour chacun de la même manière:

- ✚ Sélection de 20000 points (entre le 50000^{ème} et le 70000^{ème}) du signal (soit un temps équivalent à 2,5s d'enregistrement)
- ✚ Calcul de la transformée de Fourier de la sélection des 20000 points
- ✚ Dans le cas d'une prédominance des pics à 300, 600 et 1200Hz (liés à la source de courant) par rapport au reste du spectre, un filtrage est réalisé pour les supprimer.
- ✚ Calcul de la transformée de Fourier Inverse pour obtenir un signal sans les composantes à 300, 600 ou 1200Hz
- ✚ Calcul de la transformée en ondelettes de ce signal avec les options suivantes :
 - Wavelets : Morlet
 - Parameter : 6
 - Scale Width or dt initial : 0,000125
 - Start Scale : 2
 - Subscale : 4
 - Power of two : 11
 - Windows : none
 - Fourier Filter : N/1
- ✚ Calibration de l'échelle de couleur du diagramme TFA obtenus entre 0 et 40000 (unités arbitraires) (cette échelle a été déterminée après observation des 36 diagrammes TFA non calibrés)

4.3.5.3 Résultats des deux campagnes

Pour ne pas surcharger ce rapport, les 6 diagrammes TFA de la "campagne V" sont reportés en annexes 2. Par contre ceux de la "campagne des 37 tirs", ne sont inclus dans ce mémoire.

4.3.5.3.1 Résultats pour la "campagne V"

Sur le diagramme TFA du signal relatif aux électrodes neuves, on peut distinguer préférentiellement de grosses zones de faibles amplitudes (bleu foncé) qui sont localisées entre 16 et 70 Hz. Sur le diagramme relatifs aux tirs réalisés avec les électrodes V2, V3 et V4, on note une augmentation de l'amplitude et du nombre des pics situés entre 16 et 70 Hz (les "taches" sur les diagrammes TFA sont plus jaunes). Avec le jeu d'électrode V1, on recense deux zones intéressantes : Entre 16 et 130Hz, il y a comme pour V2, V3 et V4, des pics de fortes intensité (jaunes) et entre 130 et 300Hz environ, seul ce cas présente de nombreux pics aussi intense que ceux de la zone précédente. En ce qui concerne V5, il n'y a presque aucun pic entre 16 et 30 Hz mais on en compte de nombreux entre 50 et 300Hz.

Tout d'abord il ressort que les zones fréquentielles qui émergent de ces diagrammes TFA, sont inférieures à 1000Hz. La différence entre les diagrammes TFA de cinq jeux d'électrodes usées et celui d'un couple neuf est marquée par l'intensité des pics principaux. Est-ce que l'érosion des électrodes a une influence réelle sur les fluctuations à très basse fréquence du son émis par la torche? D'autres expériences ont été nécessaires pour répondre à cette question.

4.3.5.3.2 Résultats pour la "campagne des 37 tirs"

Premièrement, il apparaît qu'il n'y a pas une évolution monotone de l'allure générale des diagrammes TFA, du premier (correspondant à un état neuf) au dernier (où les électrodes sont très abîmées). On peut voir néanmoins sur l'ensemble de ces 36 diagrammes, plusieurs augmentations de l'amplitude maximale des diagrammes sur 5 ou 6 diagrammes aussitôt suivie par un diagramme dont l'amplitude est minimale (cf. Figure 4-24). Sur cette figure, les flèches noires marquent une évolution de l'amplitude sur plusieurs tirs et les flèches rouges mettent en évidence les chutes brutales d'amplitude qui succèdent à ces augmentations. Une forme globale d'évolution en dents de scie est ainsi observée. Quelle signification peut-on donner à cette tendance? Plusieurs hypothèses sont envisageables comme le choix des 20000 points du signal d'origine ou le fait de filtrer ou non les fréquences "parasites" à 300, 600 et 1200Hz. Les deux analyses comparatives qui suivent, montrent que ce choix des points et le

filtrage n'ont pas d'influence sur le résultat du calcul d'un transformée en ondelettes.

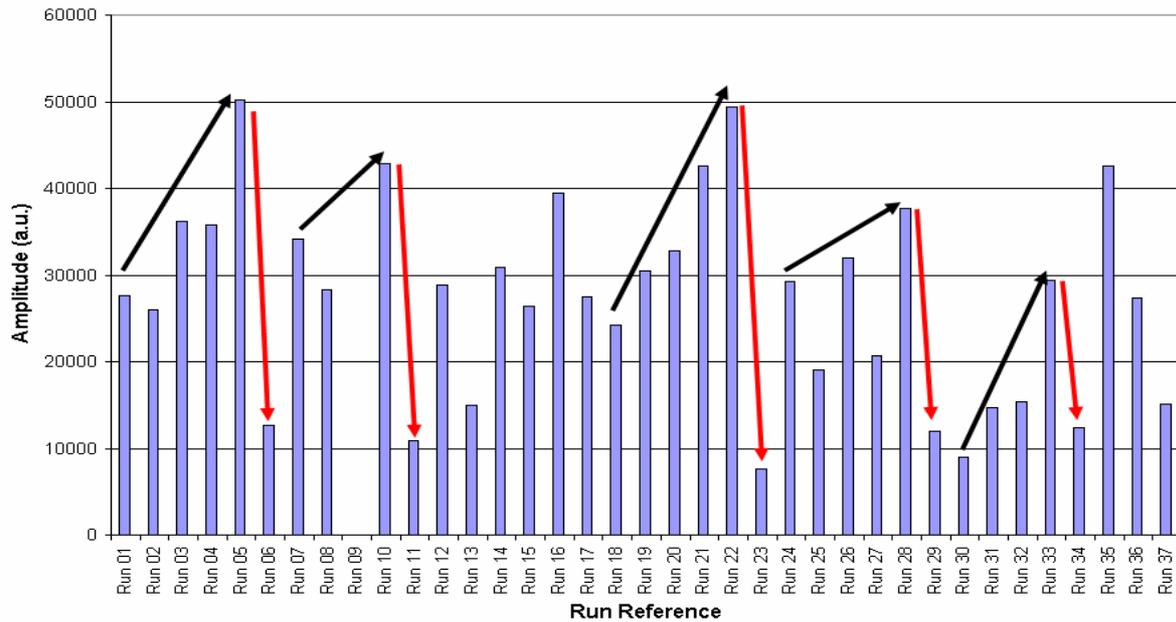


Figure 4-24 : Evolution des amplitudes maximales des diagrammes TFA pour la "campagne des 37 tirs"

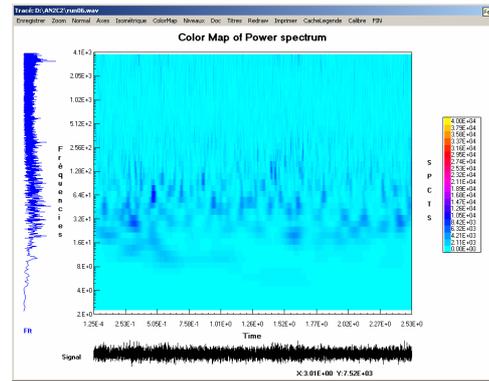
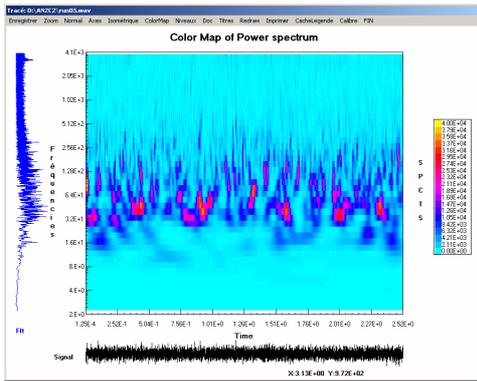
Effet du choix des points d'un signal sur le diagramme TFA résultant.

Le logiciel qui sert au calcul de la transformée en ondelettes n'autorise pas l'utilisation de plus de 30000 points consécutifs d'un signal discret. Pour des raisons de rapidité de calcul et de précision suffisante, le nombre de 20000 a été choisi. Rappelons qu'un signal d'une minute acquis avec l'enregistreur numérique (résolution de 8000Hz) comporte $8000 \times 60 = 480000$ points. L'hypothèse que le choix des 20000 points parmi les 480000 possibles n'a pas d'importance, est vérifié maintenant. Pour cela, deux signaux (le 5^{ème}, RUN05, et le 6^{ème}, RUN06, sélectionnés pour avoir des diagrammes TFA très distinct en amplitude) font l'objet de quatre transformées en ondelettes avec une sélection de 20000 points prise à partir de différents endroits du signal. On référence ces quatre zones dans la Table 4-4.

Nom de la zone	"à 50k"	"à 150k"	"à 250k"	"à 350k"
Premier point sélectionné	50000 ^{ème}	150000 ^{ème}	250000 ^{ème}	350000 ^{ème}
Dernier point sélectionné	70000 ^{ème}	170000 ^{ème}	270000 ^{ème}	370000 ^{ème}

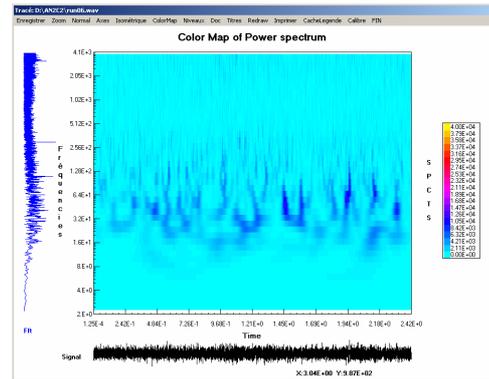
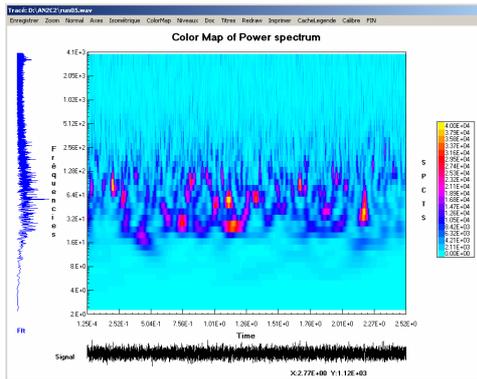
Table 4-4 : Référence des zones de sélection des points pour le calcul d'un diagramme TFA

Les quatre diagrammes TFA des deux signaux sont représentés sur la Figure 4-25



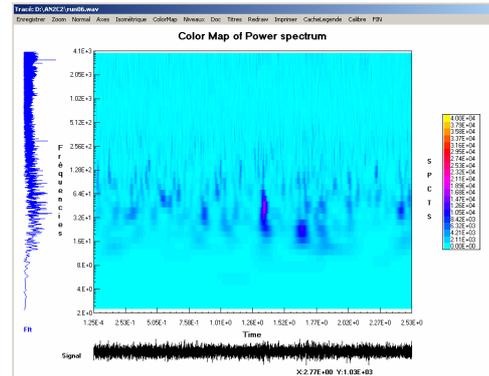
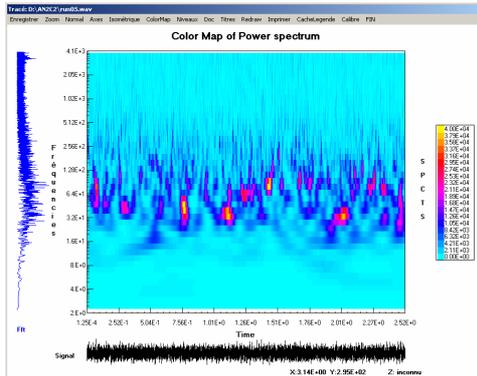
Run 05 à 50k

Run 06 à 50k



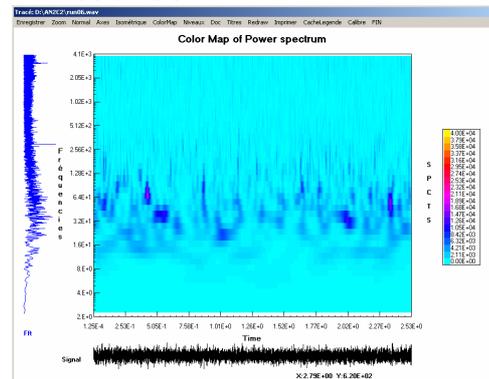
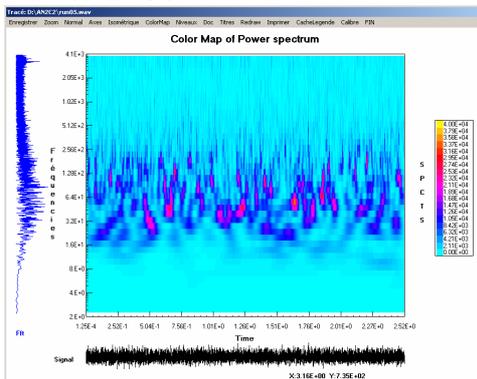
Run 05 à 150k

Run 06 à 150k



Run 05 à 250k

Run 06 à 250k



Run 05 à 350k

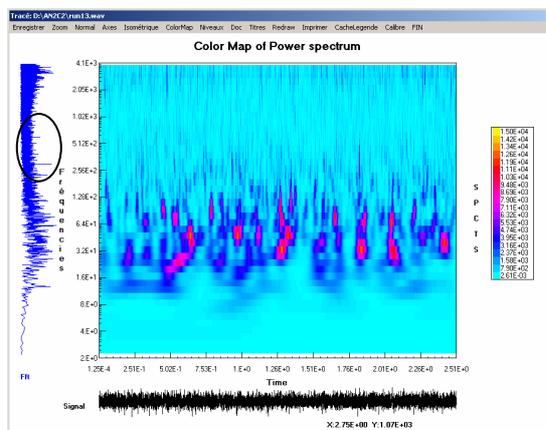
Run 06 à 350k

Figure 4-25 : Effet de la sélection de points sur les diagrammes TFA pour deux signaux

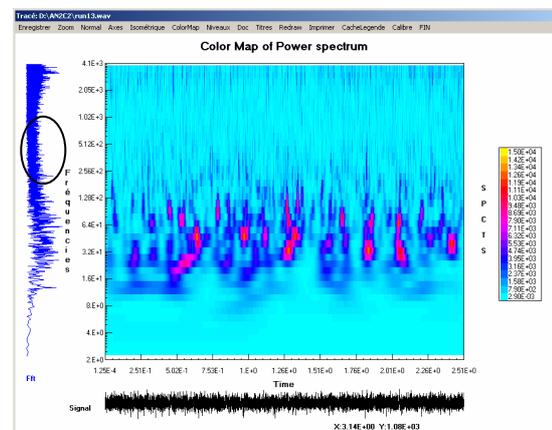
Il apparaît clairement qu'aucune différence n'est à remarquer sur chacune des deux séries de quatre diagrammes TFA. Cela signifie que le choix des points sélectionnés pour un

signal n'a pas d'influence sur les amplitudes des pics présents sur le diagramme TFA, dans la mesure où pendant la durée totale d'enregistrement du signal, aucune modification dans les conditions de fonctionnement de la torche n'a été apportée.

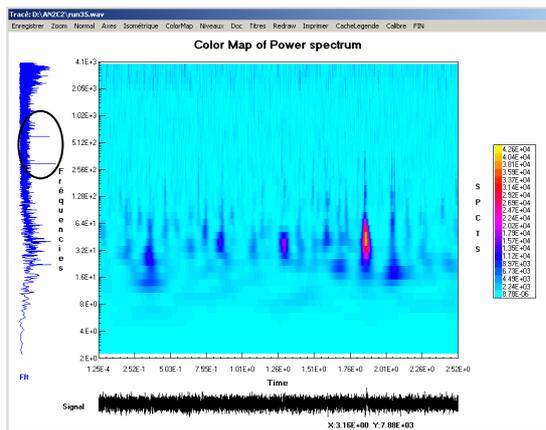
Pour connaître l'influence du filtrage des pics de 300, 600 et 1200Hz (liés à l'ondulation de la source), deux signaux ont été sélectionnés, le premier dans son spectre de Fourier est dominé par le pic à 300 et le pic à 600Hz (RUN35) et le second présente ces pics mais ils ne sont pas ceux qui ont l'amplitude maximale (RUN13). Deux transformées en ondelette, l'une avec et l'autre sans suppression de ces deux fréquences. Les quatre diagrammes TFA résultant sont donnés sur la Figure 4-26.



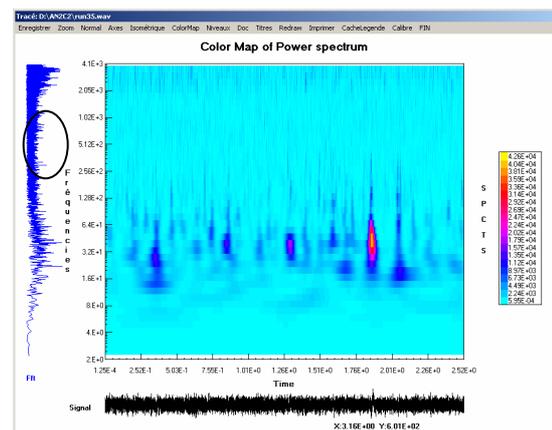
Run13 sans le filtre à 300 et 600 Hz (Echelle des couleurs: 0 à 15010 u.a.)



Run13 avec le filtre à 300 et 600 Hz (Echelle des couleurs: 0 à 15010 u.a.)



Run35 sans le filtre à 300 et 600 Hz (Echelle des couleurs: 0 à 42620 u.a.)



Run35 avec le filtre à 300 et 600 Hz (Echelle des couleurs: 0 à 42620 u.a.)

Figure 4-26 : Effet du filtrage de pics sur les diagrammes TFA pour deux signaux

La même conclusion que précédemment s'impose, c'est-à-dire, que l'effet du filtrage de pics de 300, 600 et 1200Hz est nul en terme d'amplitude maximale des diagrammes TFA. Ainsi l'hypothèse d'une mauvaise utilisation du logiciel, pour expliquer les différences

d'amplitudes maximales observées sur 36 diagrammes TFA, n'est pas valide. Cela implique que cette évolution des diagrammes est inhérente à la torche. Seul l'état d'érosion a varié lors de l'enregistrement des signaux du son utilisés pour calculer ces diagrammes TFA. On ne peut pour l'instant émettre que l'hypothèse d'un lien de cause à effet.

4.3.5.4 Analyse et conclusion

Les transformées en ondelettes présentent un intérêt théorique par rapport aux transformées de Fourier. Cependant, l'expérimentation montre que l'interprétation des diagrammes "Temps-Fréquence-Amplitude" est difficile. Nous avons choisi de récupérer l'amplitude maximale observée sur un diagramme pour le caractériser mais ce n'est sûrement pas la seule manière de comparer deux diagrammes entre eux.

Le choix de l'enregistreur numérique a peut-être été mauvais car dans le meilleur des cas, la fréquence maximale d'un diagramme TFA calculé à partir d'un signal enregistré avec cet appareil ne peut dépasser 4200Hz. Or les pics les plus intéressants sont situés dans une gamme de fréquence légèrement supérieure (entre 4000 et 5500 Hz). Néanmoins, il apparaissait des différences notables sur les diagrammes TFA, dans les basses fréquences (inférieures à 1000Hz), voire très basses fréquences (entre 2 et 30Hz), entre une torche avec des électrodes neuves et une avec des électrodes usées. Mais au vu d'une étude de suivi systématique d'un jeu unique d'électrodes, cette évolution des basses fréquences peut-elle être utile à la détermination de leur état d'érosion?

La phase préparatoire du signal (sélection des points, filtrage, calcul de la transformée de Fourier et de son inverse) et le temps de calcul de la transformée en ondelettes sont assez longs (il faut plusieurs minutes pour traiter un signal) ce qui rend ce mode de traitement du signal un peu fastidieux. De plus, celui-ci est inadapté à un mode de contrôle en ligne (à ma connaissance, il est impossible pour le moment, suivant les informations émises en continu par un microphone par exemple, d'obtenir en ligne un diagramme TFA en constante évolution).

La transformée en ondelettes est donc un outil puissant dans l'absolu, mais inadaptée aux contraintes de notre étude.

4.4 Choix des paramètres caractérisant l'usure

Ce paragraphe est une synthèse des évolutions des paramètres suivis sur les torches PT1 et PT4 (présenté au chapitre 4.2) et explique le choix de ceux retenus pour servir d'indicateur

de l'usure des électrodes. La Table 4-5 englobe, pour tous les paramètres temporels et spectraux suivis pour la torche PT1 et PT4, les valeurs dites "Initiales", qui correspondent aux premières heures d'utilisation des électrodes, voire au moment de leur mise en place, les valeurs "Finales", qui sont enregistrés en fin de vie des électrodes et les évolutions exprimées en pourcentage par rapport à la valeur "Initiale". Les paramètres qui n'ont pas montré de tendance suffisamment significative sont notés "s.o." (*sans objet*).

Enceinte de projection (temps de fonctionnement ; nombre de démarrage)		PT1 (36h ; 360)	PT4 (47.7h ; 456)	
Analyse Temporelle	Tension	V ^x Initiale	65.9 V	68.6 V
		V ^x Finale	60.85 V	60.2 V
		Evolution (%)	-7.6%	-12.2%
		ε_{V_x} Initial	0.25 V	0.14 V
		ε_{V_x} Final	0.5 V	~0.3 V
		Evolution (%)	+100 %	+100 %
		RMS ^x Initial	13.5 V	13.6 V
		RMS ^x Final	16 V	17.2 V
		Evolution (%)	+20%	+25%
		ε_{RMS_x} Initial	0.3 V	s.o.
ε_{RMS_x} Final	0.43 V	s.o.		
Evolution (%)	+50%	s.o.		
Analyse Spectrale	Tension	F _V ^x Initiale	4770 Hz	4810 Hz
		F _V ^x Finale	5025 Hz	5160 Hz
		Evolution (%)	+5.3%	+7.2%
		ε_{FV_x} Initial	44 Hz	50 Hz
		ε_{FV_x} Final	63 Hz	60 Hz
		Evolution (%)	+40%	+20%
		A _V ^x Initiale	s.o.	27.3
		A _V ^x Finale	s.o.	21.7
		Evolution (%)	s.o.	-20%
	ε_{AV_x} Initial	s.o.	9.5	
	ε_{AV_x} Final	s.o.	7	
	Evolution (%)	s.o.	-26%	
	Son	F _S ^x Initiale	4800 Hz	4820 Hz
		F _S ^x Finale	5025 Hz	5200 Hz
		Evolution (%)	+4.7%	+7.9%
		ε_{FS_x} Initial	44 Hz	s.o.
		ε_{FS_x} Final	50 Hz	s.o.
		Evolution (%)	+13%	s.o.
A _S ^x Initiale		0.2	s.o.	
A _S ^x Finale		0.8	s.o.	
Evolution (%)		+300%	s.o.	
ε_{AS_x} Initial	0.09	s.o.		
ε_{AS_x} Final	0.4	s.o.		
Evolution (%)	+344%	s.o.		

Table 4-5 : Récapitulatif de toutes les évolutions des paramètres suivis sur PT1 et PT4

A partir de ce tableau, il apparaît ici que l'analyse spectrale du son fournit les mêmes informations que celles de la tension mais sans en apporter de plus efficaces. Par exemple, le cas de F_S^x et de F_V^x est remarquable dans la similitude de leurs évolutions. Le choix de l'un ou l'autre est donc arbitraire. Par contre, l'analyse temporelle de la tension fournit de bons résultats, reproduit au moins sur deux torches d'historiques différents. Nous avons donc fait le choix de ne garder que trois paramètres globaux comme indicateur de l'érosion :

- ✚ La tension moyenne globale, V^x
- ✚ Le RMS global, RMS^x
- ✚ La Fréquence moyenne globale du son F_S^x

Duan et al [72] peuvent ainsi voir, dans le choix de la fréquence moyenne globale issue de spectres du signal acoustique émis par la torche, la confirmation que ce paramètre est un des plus appropriés comme indicateur de l'état d'usure de l'anode. Néanmoins, l'option retenue de trois paramètres renforce l'indication d'usure recherchée. Ce choix s'explique par la différence entre les évolutions (en pourcentage) de la torche PT1 et celles de la torche PT4. Il faut se rappeler que les opérateurs suédois ont jugés la longévité de la torche PT1 "habituelle" et celle de la torche PT4 "supérieure à la normale". Les limites atteintes par les trois paramètres sélectionnés de la torche PT4 seraient donc pour une torche "normale" (à durée de vie des électrodes similaire à celle de PT1) un seuil critique atteint. Ainsi, à partir de l'expérience des opérateurs de l'atelier suédois et avec les données de la Table 4-5, on peut introduire la notion de seuil qui sera la base du contrôle de l'érosion que nous proposons. Deux seuils, délimitant trois zones, peuvent être définis pour chacun des trois paramètres sélectionnés. La première zone est dite "de Sûreté", séparée de la seconde zone ("zone Intermédiaire") par le "seuil intermédiaire", elle-même séparée de la troisième zone ("zone Critique") par le "seuil critique". La Figure 4-27 illustre ces définitions.



Figure 4-27 : Schéma de définitions des seuils et des zones pour le contrôle de l'érosion

Ainsi lors d'un contrôle de l'érosion, qui doit être réalisé comme un tir-test, c'est-à-dire avec les mêmes conditions de fonctionnement (600A et un mélange de gaz plasmagène composé d'argon à 45Nl.min^{-1} et d'hydrogène à 15Nl.min^{-1}) et pendant cinq minutes (voire moins), chacun des trois paramètres fournit une nouvelle valeur qui, après comparaison avec

les seuils, permet de le situer dans une des trois zones. S'il est dans la zone de sûreté, cela signifie que selon ce paramètre, la torche peut continuer à être utilisée sans risque liée à l'érosion (projection de gouttelettes, rendement plus faible, transfert de masse ou de chaleur moins efficace, etc.). S'il est dans la zone intermédiaire, il y a un risque d'avoir les conséquences d'une érosion naissante et s'il est dans la zone critique, ce risque devient majeur et les électrodes doivent être remplacées.

Nous avons donc choisi d'exprimer les seuils en pourcentage de valeur initiales et d'attribuer, dans un premier temps, pour les seuils intermédiaires, les valeurs correspondantes à la torche PT1 (dont les électrodes ont eu une durée de vie jugée normale) et pour les seuils critiques les valeurs correspondantes à la torche PT4.

Pour tester ce type de contrôle de l'érosion il aurait fallu apporter des modifications au programme déjà existant sous Labview ("NPSL4.vi") en incluant premièrement le traitement statistique à faire sur les signaux bruts de tension et du son (ceux de 5000 points reçus de l'oscilloscope à la plus petite base de temps) et en affichant les zones correspondantes aux valeurs des trois paramètres sélectionnés. Deuxièmement, il aurait fallu garder en mémoire, dans le programme Labview, les valeurs des seuils, exprimés en pourcentage et les valeurs initiales des trois paramètres, par exemple, en réalisant un tir-test dès la mise en place d'un jeu d'électrodes neuves. Cela aurait été possible. Mais nous avons choisi, pour réaliser ces opérations d'acquisition, de traitements des données et d'affichage de zones, de remplacer les deux oscilloscopes ainsi que l'ordinateur par un module électronique basé sur la technologie DSP. C'est la conception, la réalisation et la validation de ce module qui sont présentées dans le chapitre suivant.

5 Conception d'un module industriel

5.1 Introduction et présentation du module

Le projet de module industriel consiste à concevoir un prototype qui permette d'indiquer l'état d'usure de l'anode d'une torche plasma, en avertissant l'opérateur de l'évolution des trois paramètres choisis précédemment comme étant les plus appropriés pour le contrôle de l'érosion. L'opérateur prendra seul la décision d'arrêter ou non la torche d'après les indications qui lui seront fournies.

Cet appareil fonctionnera dans un premier temps pour une seule des nombreuses procédures de tir existantes. Mais il faut garder à l'esprit que ce prototype pourra évoluer pour pouvoir prendre en compte l'ensemble des procédures grâce à l'addition d'un module de mémoire qui fournira les valeurs respectives des seuils pour chacune des conditions de tirs utilisée par Volvo Aero.

Les deux signaux (tension et signal acoustique) entrent dans le module par des câbles coaxiaux. Lors de la première utilisation de la torche, et une fois que celle-ci est stabilisée (après quelques minutes de tir), l'opérateur appuie sur un bouton "Initialisation" pour établir les valeurs initiales des trois paramètres à surveiller et pour calculer, à partir des valeurs en pourcentage enregistrées dans la mémoire du module, les valeurs absolues des limites basses de trois zones de fonctionnement préétablies : une zone de bon fonctionnement (vert), une zone intermédiaire (orange) et une zone à risque (rouge).

L'affichage du dépassement des seuils par un tableau de diodes est l'option retenue car elle semble la plus efficace. La Figure 5-1 représente le schéma fonctionnel du module :

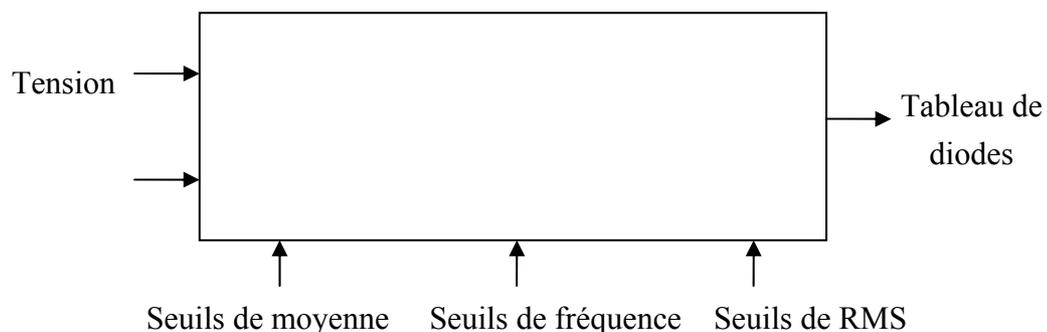


Figure 5-1 : Schéma fonctionnel du module

Comme nous l'avons déjà expliqué précédemment, l'affichage optimal des informations désirées est un tableau de neuf diodes. Chacun des états des trois paramètres à surveiller est donc indiqué par trois diodes de couleur (cf. Figure 5-2)

	La valeur mesurée est :		
	Inférieure au seuil intermédiaire	Entre le seuil intermédiaire et le seuil critique	Supérieure au seuil critique
Moyenne de la tension	●	●	●
RMS de la tension	●	●	●
Fréquence du son	●	●	●

Figure 5-2 : Les couleurs des diodes en fonction de la valeur mesurée des trois paramètres

La Figure 5-3 montre l'extérieur du module électronique avec les trois série de diodes, les deux entrées des signaux de tension et du son et le bouton RESET, de mise en mémoire de nouvelles valeurs initiales.



Figure 5-3 : Le module de contrôle de l'érosion des électrodes.

5.2 Les composants du module

L'objet de ce chapitre est de présenter la carte électronique utilisée pour le module ainsi que la connectique permettant l'entrée des signaux de tension et de son.

5.2.1 La carte DSP

La carte EZ-Lite référencée ADSP-21065L SHARC DSP est une carte d'évaluation complète, construite autour du DSP ADSP-21065L. Elle s'appuie sur les outils de développement VisualDSP++, évoluant dans un environnement de développement utilisant un compilateur C/C++, assembleur et linker. Le schéma bloc de la carte et la répartition des composants sont représentés respectivement Figure 5-4 et Figure 5-5.

Un D.S.P. (Digital Signal Processing) est un microcontrôleur dédié au traitement du signal. L'ADSP-21065L est un DSP utilisé dans des applications très diverses comme les communications, le son, l'automobile, le médical et l'instrumentation. C'est un D.S.P. programmable 32 bits à virgule flottante.

Il peut effectuer 198 millions d'opérations par seconde. Il a deux ports série de transmission/réception sur un support TDM 32 voies. Douze entrées/sorties sont programmables et il y a 10 canaux DMA. De technologie CMOS 0,5 μm faible puissance, l'ADSP-21065L est un membre de la famille SHARC (Super Harvard Architecture).

Les éléments suivants constituent la carte DSP :

- Une interface RS232
- Un Codec AD1819a full duplex, 16-bit stereo audio
- Deux alimentations (5V et 3,3V) déjà connectées aux différents éléments
- Des mémoires extérieures de type SDRAM et un EPROM
- 4 FLAG IN (de 0 à 3), connectés à des boutons
- 3 FLAG IRQ (de 0 à 2)
- 6 FLAG OUT (de 4 à 9) connectées à des DELS
- 1 FLAG (10) réservé à l'interface EMAFE et 1 FLAG (11) utilisé par le codec
- 1 CPLD déjà configuré

la torche avec l'entrée de la carte DSP. En effet, il n'y a qu'une seule entrée stéréo sur ce type de carte DSP. Il faut donc que le signal de tension rentre sur une voie et que le signal du son soit sur la seconde. Un doubleur adaptateur 2 voies mono – 1 voie stéréo, type C, est donc branché sur l'entrée principale de la carte. Sur chacune des deux entrées du précédent adaptateur, on trouve un second adaptateur RCA BNC qui permet la connexion des câbles coaxiaux servant à transmettre les signaux vers le module depuis la torche. Les tensions maximales qui peuvent entrer sur la carte sans la détériorer sont pour la tension de 3V dc et pour la tension relative au son émis par la torche de 10V pic à pic.

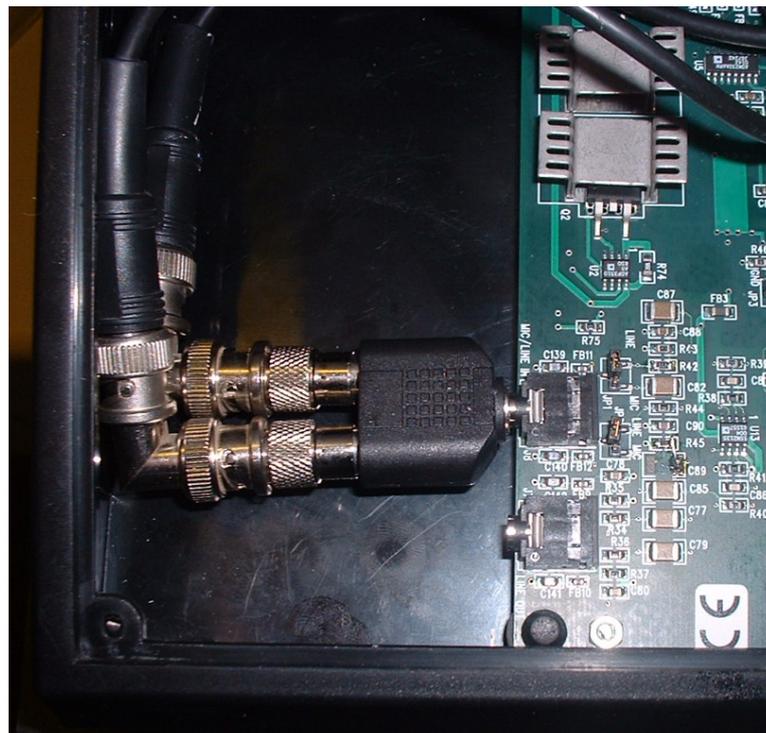


Figure 5-6 : La connectique d'entrée de la carte DSP

5.2.3 Les entrées/sorties FLAG

Les FLAG sont des entrées/sorties programmes. Les 3 FLAG IRQ (0-2) sont des interruptions externes. Chacune de ces interruptions intervient à des registres différents (MODE1, MODE2, IMASK). Les 6 FLAG OUT (4-9) sont connectés à des diodes électroluminescentes (DELs) vertes internes à la carte. Pour réaliser notre projet, nous avons besoin de 3 FLAG supplémentaires. Les 4 FLAG IN (0-3) peuvent appeler des programmes lorsque nous appuyons sur les boutons poussoirs correspondants. Ces FLAG sont définis par le registre MODE2. Une fois configurés, ils peuvent être lus comme des registres ASTAT. Trois des FLAG IN ont été dessoudés et configurés comme des FLAG OUT. Le dernier FLAG IN sert de bouton « Initialisation ». Le FLAG 10 est réservé à l'interface EMAFE, il n'est donc pas possible de modifier sa fonction. Il est configuré par le registre IOCTL et est lu

et écrit par le registre IOSTAT. Le FLAG 11, utilisé par le codec AD1819, ne doit pas être reconfiguré car dans le cas contraire, le codec ne serait plus utilisable.

Neuf DELs (3 rouges, 3 jaunes et 3 vertes) en sortie et un bouton poussoir en entrée sont nécessaires. Voici les modifications qui ont été apporté à la carte. Les DELs additionnelles sont en fait mises en parallèle avec les DELs vertes déjà en place (les retirer aurait pu endommager les différentes couches de la carte) :

	Avant modification	Après
FLAG OUT 4	LED verte	LED verte
FLAG OUT 5	LED verte	LED jaune
FLAG OUT 6	LED verte	LED rouge
FLAG OUT 7	LED verte	LED verte
FLAG OUT 8	LED verte	LED jaune
FLAG OUT 9	LED verte	LED rouge
FLAG IN 0	Bouton poussoir	LED verte
FLAG IN 1	Bouton poussoir	LED jaune
FLAG IN 2	Bouton poussoir	LED rouge
FLAG IN 3	Bouton poussoir	pas de changement

Table 5-1 : Table de correspondance des FLAG de la carte DSP avec les diodes du boîtier.

Les neuf diodes, incluses sur le boîtier qui constitue l'extérieur du module, sont raccordées à la carte électronique par microsoudure. Ce méticuleux travail a été réalisé par M. Bernard Casteignau de l'IRCOM (Institut de Recherche en Communications Optiques et Micro-ondes) que je tiens à remercier pour son aide. Pour augmenter la luminosité des diodes, il a été choisi de ne pas toucher aux résistances de la carte d'évaluation, mais d'utiliser une carte annexe contenant un buffer qui sert à amplifier le courant passant par les LEDs.

5.3 La programmation de la carte

La programmation de la carte a été sous-traitée à la société ARBOS, spécialiste français en développement informatique et conception de carte DSP et partiellement financé par l'ANVAR du Limousin. La difficulté majeure de cette tâche a résidé dans plusieurs points. Tout d'abord, certains registres de la carte ne peuvent pas être utilisés par un programme extérieur mais seulement pas le processeur de la carte. Deuxièmement, la carte est équipée d'un encodeur situé entre l'entrée stéréo et le convertisseur analogique numérique (CAN), qui a la caractéristique de supprimer les composantes continues des signaux qui entrent. Cette particularité a posé évidemment un problème pour le calcul de la tension moyenne du signal

de tension aux bornes des électrodes de la torche. La société ARBOS a résolu ce problème en court-circuitant le condensateur C89 pour laisser passer la composante continue et en même temps, le condensateur C113 est remplacé par une résistance de $68k\Omega$. Ainsi la voie droite de l'entrée de la carte est connectée à la tension entre les électrodes et la voie gauche au signal acoustique.

L'algorithme du programme est le suivant :

Le DMA s'exécute et remplit les deux buffers correspondant aux signaux droit et gauche. Un FLAG indique au programme principal la fin de remplissage des buffers. La taille de ces derniers est un paramètre de programme dont la valeur par défaut est fixée à 4096. Le programme principale commence par une boucle d'attente. Dès que le FLAG confirme que les buffers sont pleins, le traitement commence :

- ✓ Calcul de la fréquence dominante de l'entrée acoustique.
- ✓ Calcul de la valeur moyenne et de l'écart type de la tension entre les électrodes;
- ✓ Répéter un certain nombre de fois (un paramètre dont la valeur par défaut est 20) l'acquisition et faire un moyennage sur ces trois mesures. Ce sont ces moyennes qui seront comparées avec les seuils pour choisir quelle LED allumer.
- ✓ Vérifier si le bouton "RESET" correspondant à la mise en place de nouvelles électrodes est actif. Dans ce cas, on sauvegarde les résultats de traitement dans la mémoire Flash et on recalcule les seuils. Pour signaler la prise en compte de ces nouvelles valeurs, toutes les diodes clignotent par balayage du rouge vers le vert, trois fois.
- ✓ En comparant les valeurs moyennes obtenues et les seuils, on allume les LEDs correspondantes.
- ✓ Réactiver le DMA avant de se mettre en attente pour une nouvelle série de mesures.

Le listing du programme principal est donné en Annexes 3

5.4 Les tests et la validation du module

Quand la réalisation du module DSP a été finie, un test de validation a été entrepris. Pour cela, nous avons simulé sur la torche PTF4 les variations des paramètres émis par cette dernière (tension et son) en faisant varier l'intensité du courant. Deux tirs ont été réalisés. Le premier tir, suivi par le logiciel "NPSL4.vi" a permis d'enregistrer et, après traitement des données, d'obtenir les variations (en pourcentage) des trois paramètres globaux en fonction de l'intensité. L'intensité du courant, qui a été variée de 300A à 600A par paliers de 50A, et les valeurs des trois paramètres correspondants, sont rassemblées dans la Table 5-2. Les pourcentages que l'on peut lire dans cette table dépendent de la valeur initiale que l'on considère. Prenons la tension moyenne pour exemple. Si on considère que la valeur initiale est celle pour laquelle l'intensité du courant est de ~300A, la tension "initiale" est de 79,97V. Ainsi la tension moyenne obtenue pour ~400A (c'est-à-dire 76,26V) représente une évolution de -8,25% par rapport à cette tension "initiale" (colonne rouge). Par contre si on considère la tension "initiale" comme celle acquise à ~350A (colonne rose), la tension obtenue à 400A ne représente plus qu'une évolution de -3,79%. Cette table permet ainsi de choisir la valeur initiale de courant qu'il faut prendre pour avoir une évolution la plus proche de celle que l'on aurait si l'érosion (c'est-à-dire le temps de fonctionnement) était à l'origine de la variation des trois paramètres. Explicitement, il fallait trouver des évolutions correspondant aux seuils que l'on a fixé dans le chapitre 4.4, à savoir :

$$\text{Pour la fréquence du son : } \begin{array}{l} \text{VERT} \xrightarrow{+4,7\%} \text{ORANGE} \\ \text{---} \xrightarrow{+7,9\%} \text{ROUGE} \end{array}$$

$$\text{Pour la tension moyenne : } \begin{array}{l} \text{VERT} \xrightarrow{-7,6\%} \text{ORANGE} \\ \text{---} \xrightarrow{-12,2\%} \text{ROUGE} \end{array}$$

$$\text{Pour le RMS global : } \begin{array}{l} \text{VERT} \xrightarrow{+20\%} \text{ORANGE} \\ \text{---} \xrightarrow{+25\%} \text{ROUGE} \end{array}$$

On ne s'attendait pas à obtenir les pourcentages exacts, décrits ci-dessus, mais les valeurs des pourcentages d'évolution les plus proches sont ceux que l'on a en prenant comme valeur initiale les valeurs obtenues à 300A (noté par les cadres noirs sur la Table 5-2). On peut remarquer que le RMS global ne pourra pas être validé puisque l'érosion provoque une augmentation de ses valeurs alors qu'une augmentation de l'intensité du courant entraîne leur diminution.

Courant (A)		Fréquence du son (Hz)					
303.403846	4303.1525						
350.872678	4292.74713	-0.24%					
400.9675	4640.78564	7.85%	8.11%				
451.659301	5015.97568	16.57%	16.85%	8.08%			
498.552919	5059.83801	17.58%	17.87%	9.03%	0.87%		
553.137247	5177.2048	20.31%	20.60%	11.56%	3.21%	2.32%	
598.082685	5144.54102	19.55%	19.84%	10.85%	2.56%	1.67%	
Courant (A)		Tension Moyenne (V)					
303.403846	79.979606						
350.872678	76.2692556	-4.64%					
400.9675	73.3796988	-8.25%	-3.79%				
451.659301	70.6573678	-11.66%	-7.36%	-3.71%			
498.552919	68.7356258	-14.06%	-9.88%	-6.33%	-2.72%		
553.137247	67.4167447	-15.71%	-11.61%	-8.13%	-4.59%	-1.92%	
598.082685	66.4087927	-16.97%	-12.93%	-9.50%	-6.01%	-3.39%	
Courant (A)		RMS de la tension (V)					
303.403846	20.4140586						
350.872678	19.9125299	-2.46%					
400.9675	19.830571	-2.86%	-0.41%				
451.659301	19.9955983	-2.05%	0.42%	0.83%			
498.552919	19.7945986	-3.03%	-0.59%	-0.18%	-1.01%		
553.137247	19.4405365	-4.77%	-2.37%	-1.97%	-2.78%	-1.79%	
598.082685	19.0192711	-6.83%	-4.49%	-4.09%	-4.88%	-3.92%	

Table 5-2 : Valeurs des trois paramètres en fonction du courant et les pourcentages d'évolutions en fonction de la valeur initiale (code de couleur)

Le second tir de validation a donc été réalisé avec le module DSP, dans les mêmes conditionnement de fonctionnement de la torche (mêmes électrodes, même débit masse des gaz plasmagènes), en prenant comme références les valeurs acquises à 300A. Avec ce courant, les LEDs vertes des trois paramètres étaient donc allumées. La Table 5-3 montre l'évolution de l'allumage des diodes en fonction du courant.

Intensité du courant	Etat des diodes pour la tension moyenne		Etat des diodes pour la fréquence du son	
	Attendu	Observé	Attendu	Observé
300A-350A	Vert allumé	Vert allumé	Vert allumé	Vert allumé
350A-370A	Intermittence du Vert et de l'Orange		Intermittence du Vert et de l'Orange	Orange allumé
370A - 400A		Orange allumé		
400A - 450A	Orange Allumé	Orange allumé	Rouge allumé	Intermittence du Orange et du Rouge
450A - 500A	Intermittence du Orange et du Rouge			Rouge allumé
500A - 550A	Rouge Allumé	Intermittence du Orange et du Rouge		
550A - 570A		Rouge allumé		
570A - 600A		Rouge allumé		

Table 5-3 : Etat des diodes de la tension moyenne et de la fréquence du son en fonction de l'intensité du courant.

D'après la table précédente, les diodes se sont éclairées quasiment au moment attendu. Seule la diode rouge de la tension moyenne a eu un peu de retard. Ceci est sûrement imputable à la forte fluctuation de la tension à des valeurs aussi basses d'intensité de courant, qui a fait que la mesure de la valeur initiale, enregistrée quand le bouton RESET fut pressé, a été plus élevée que celle qui nous avait servi de référence lors du tir précédent (on avait eu alors $\sim 80V$).

Quoiqu'il en soit, le module DSP, premier prototype d'un contrôleur d'érosion, a bien répondu au cahier des charges puisqu'il a enregistré les valeurs initiales, les garde en mémoire, réalise l'acquisition de deux signaux, réalise des traitement du signal (FFT) et des calculs statistiques, compare avec des valeurs seuils et allume les diodes correspondantes. Cet ensemble d'action peut paraître "trivial", mais il est loin d'être immédiat. Si ce prototype est un grand pas dans l'achèvement de ce travail de thèse, il n'en demeure pas moins vrai qu'il ouvre la voie sur de multiples améliorations à apporter pour le rendre optimal.

6 Approche thermique du phénomène d'usure

Dans ce chapitre, nous allons décrire comment estimer le temps nécessaire pour atteindre la fusion du matériau d'une surface à partir d'un flux de chaleur (noté q) répartie sur une surface afin de simuler l'impact du pied d'arc sur la surface de l'anode.

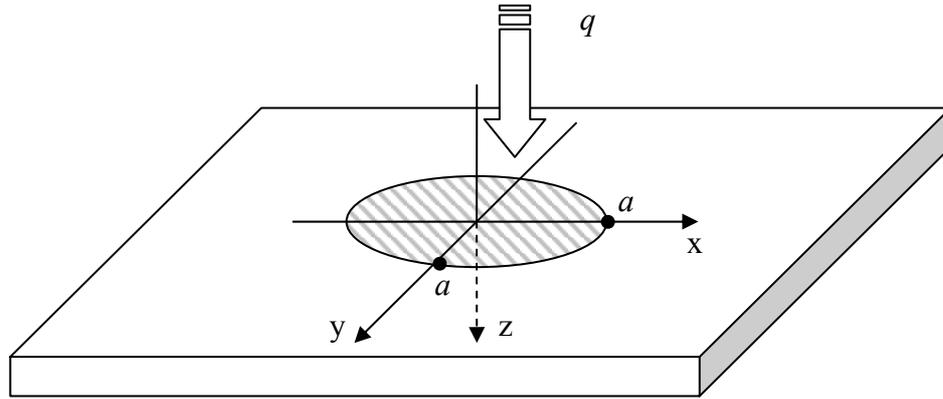


Figure 6-1 : Schématisation de la paroi de l'anode frappée par le pied d'arc.

Les hypothèses de ce calcul sont les suivantes : La densité de flux de chaleur, q (en $W.m^2$) est constante en intensité et ne se déplace pas. Bien que la surface de l'intérieur de l'anode soit cylindrique, le calcul prendra en compte un plan droit, d'épaisseur infinie. La justification de l'épaisseur infinie est que le temps de diffusion de la chaleur sur toute l'épaisseur du matériau de l'anode est beaucoup plus long que le temps mis pour chauffer jusqu'à fusion le point central de la surface de contact entre le pied d'arc et l'anode.

D'après [73], l'équation qui régit la température au centre de l'aire du flux est :

$$T_{Axe}(z,t) = T(\vec{r},t) \Big|_{x=y=0} = \frac{2q}{\kappa} \sqrt{\alpha t} \left\{ ierfc\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha t}}\right) - ierfc\left(\frac{\sqrt{z^2 + a^2}}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \right\}$$

avec

T : Température (K)

q : densité de flux ($W.m^{-2}$)

κ : conductivité thermique du matériau ($W.m^{-1}.K^{-1}$)

t : temps (s)

a : rayon du pied d'arc (m)

α : diffusivité thermique du matériau ($m^2.s^{-1}$) ($\alpha = \frac{\kappa}{\rho.C_p}$)

et où :

$$ierfc(x') = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-x'^2} - x'.erfc(x')$$

Équation 6-1 : profil généralisé de température de surface.

En $z=0$ (équivalent à $x' = 0$), on a : $ierfc(0) = \frac{1}{\sqrt{\pi}}$

Notons $\delta T_{spot}(t)$, la température du point situé en surface de l'anode et au centre du pied d'arc, on a donc d'après Équation 6-1 :

$$\delta T_{spot}(t) = T_{Axe}(0,t) = \frac{2.q}{\kappa} \sqrt{\alpha.t} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} - ierfc\left(\frac{a}{2\sqrt{\alpha.t}}\right) \right\}$$

Équation 6-2 : profil de la température de surface au centre du pied d'arc.

On développe cette dernière équation avec la définition de la primitive de la fonction complémentaire de erf , ce qui donne l'Équation 6-3 :

$$\delta T_{spot}(t) = \frac{2.q}{\kappa} \sqrt{\alpha.t} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{a^2}{4\alpha.t}} + \frac{a}{2\sqrt{\alpha.t}} erf c\left(\frac{a}{2\sqrt{\alpha.t}}\right) \right\}$$

Équation 6-3

On effectue un changement de variable, en posant $u = \frac{a}{2\sqrt{\alpha.t}}$ et on obtient :

$$\delta T_{spot}(t) = \frac{2.q}{\kappa} \sqrt{\frac{\alpha.t}{\pi}} \left\{ 1 - e^{-u^2} + \sqrt{\pi}.u.erfc(u) \right\}$$

Équation 6-4

Pour u tendant vers l'infini, c'est-à-dire pour t tendant vers 0, le développement asymptotique suivant est proposé :

$$erfc(u) \approx \frac{e^{-u^2}}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{u} - \frac{1}{2u^3} + \frac{3}{4u^5} + \dots \right)$$

Équation 6-5 : Développement asymptotique de la fonction $erfc$

On estime donc que $\sqrt{\pi}.u.erfc \approx e^{-u^2} \left(1 - \frac{1}{2u^2} + \dots \right)$. On l'introduit dans l'Équation 6-4 :

$$\delta T_{spot}(t) \approx \frac{2.q}{\kappa} \sqrt{\frac{\alpha.t}{\pi}} \left\{ 1 - \frac{e^{-u^2}}{2u^2} + \dots \right\}$$

En remplaçant la variable u par sa définition on obtient l'Équation 6-6 :

$$\delta T_{spot}(t) \approx \frac{2.q}{\kappa} \sqrt{\frac{\alpha.t}{\pi}} \left\{ 1 - \frac{2\alpha.t}{a^2} e^{-\frac{a^2}{4\alpha.t}} + \dots \right\}$$

Équation 6-6

En se limitant au premier terme du développement, on peut écrire que :

$$\delta T_{spot}(t) > \frac{2.q}{\kappa} \sqrt{\frac{\alpha.t}{\pi}}$$

Équation 6-7 : Estimation de la température de surface au cœur du pied d'arc

Soit $\delta T_f = (T_f - T_{init})$ où T_f est la température de fusion du matériau et T_{init} est la température initiale de paroi. Soit t_f , le temps mis pour atteindre δT_f , à partir de l'instant d'impact. D'après l'Équation 6-7, on a : $\delta T_f^2 = \frac{4.q^2}{\kappa^2} \cdot \frac{\alpha.t_f}{\pi}$, d'où on peut extraire t_f :

$$t_f = \frac{\kappa^2 . \pi . \delta T_f^2}{4q^2 . \alpha}$$

Équation 6-8 : Estimation du temps nécessaire pour atteindre la température de fusion.

Si η est l'effusivité du métal, telle que $\eta = \sqrt{\kappa . \rho . C_p}$, alors, à partir de l'Équation 6-8 :

$$t_f = \frac{\eta^2 . \pi . \delta T_f^2}{4q^2}$$

Équation 6-9 : Estimation de t_f avec l'effusivité η

La puissance thermique par unité de surface due à l'entrée des électrons dans le métal, q , est estimé à partir de l'Équation 6-10 :

$$q \approx j \left(\frac{5}{2} k \frac{T_e}{e} + \Phi_a + V_a \right) = j . V_{el}$$

avec

k : constante de Boltzmann ($k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$)

T_e : Température des électrons dans la colonne d'arc (K).

e : charge de l'électron ($e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)

Φ_a : le travail de sortie des électrons à l'anode (V)

V_a : tension de chute anodique (V)

j : densité de courant (A.m^{-2})

V_{el} : tension équivalente (V) ($V_{el} = \frac{5}{2} k \frac{T_e}{e} + \Phi_a + V_a$)

Équation 6-10 : Estimation de la densité de flux q

Enfin en remplaçant la densité de courant par sa définition ($j = \frac{I}{A}$), où A est l'aire du spot et I est l'intensité du courant), on obtient l'Équation 6-11 :

$$t_f = \frac{\eta^2 . \pi . \delta T_f^2}{(V_{el} . I)^2} . A^2$$

Équation 6-11 : Estimation du temps nécessaire pour atteindre la température de fusion.

Nous allons maintenant présenter deux applications numériques pour les deux cas de surface possible pour l'intérieur de la tuyère, du cuivre ou du tungstène. Ensuite nous verrons comment on peut à partir de cette formule estimer la taille du pied d'arc.

Application Numérique :

1^{er} cas : le matériau de l'anode est du cuivre :

$$\delta T_f \sim 1043\text{K} \quad (T_{f/\text{Cuivre}} = 1356\text{K} \text{ et } T_{\text{init}} \sim 313\text{K}^*)$$

$$V_{\text{el}} \sim 10\text{V}$$

$$I \sim 600\text{A}$$

$$\kappa_{\text{Cu}} = 401 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\rho_{\text{Cu}} = 8960 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$c_{p\text{Cu}} = 385 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\left. \begin{array}{l} \kappa_{\text{Cu}} = 401 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1} \\ \rho_{\text{Cu}} = 8960 \text{ kg.m}^{-3} \\ c_{p\text{Cu}} = 385 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1} \end{array} \right\} \eta^2 \sim 401 * 8960 * 385 \sim 1,4.10^9 \text{ kg}^2.\text{s}^{-5}.\text{K}^{-2}$$

$$\text{donc on obtient : } t_f \approx \frac{\pi * 1,4.10^9 * 1,1.10^6}{6000^2} A^2 \approx 1,31.10^8 A^2 \text{ avec } A^2 \text{ en m}^2$$

Ou si on exprime l'aire de contact du pied d'arc avec l'anode en mm² :

$$t_f \text{ (en s)} \sim 1.3.10^{-4} A^2 \text{ (A en mm}^2\text{)}$$

Équation 6-12 : Relation entre t_f pour le cuivre et l'aire du pied d'arc avec I=600A

En posant arbitrairement $A=1\text{mm}^2$, on aboutit à : $t_f \approx 130\mu\text{s}$

2^{ème} cas : le matériau de l'anode est du tungstène :

$$\delta T_f \sim 3370\text{K} \quad (T_{f/\text{Tungstène}} = 3683\text{K} \text{ et } T_{\text{init}} \sim 313\text{K}^*)$$

$$V_{\text{el}} \sim 10\text{V}$$

$$I \sim 600\text{A}$$

$$\kappa_{\text{W}} = 173 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\rho_{\text{W}} = 19300 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$c_{p\text{W}} = 133 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\left. \begin{array}{l} \kappa_{\text{W}} = 173 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1} \\ \rho_{\text{W}} = 19300 \text{ kg.m}^{-3} \\ c_{p\text{W}} = 133 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1} \end{array} \right\} \eta^2 \sim 173 * 19300 * 133 \sim 4,4.10^8 \text{ kg}^2.\text{s}^{-5}.\text{K}^{-2}$$

$$\text{donc on obtient : } t_f \approx \frac{\pi * 4,4.10^8 * 1,14.10^7}{6000^2} A^2 \approx 4,4.10^8 A^2 \quad \text{avec } A^2 \text{ en m}^2$$

Ou si on exprime l'aire de contact du pied d'arc avec l'anode en mm² :

$$t_f \text{ (en s)} \sim 4,4.10^{-4} A^2 \quad (A \text{ en mm}^2)$$

Équation 6-13 : Relation entre t_f pour le tungstène et l'aire du pied d'arc avec I=600A

En posant arbitrairement $A=1\text{mm}^2$, on obtient : $t_f \approx 440\mu\text{s}$

* : on prend la température initiale de paroi égale à celle de l'eau de refroidissement, c'est-à-dire 40°C au passage de l'anode.

Il faut préciser à cet instant, deux points essentiels sur les valeurs considérées pour cette application numérique. Le premier point concerne la valeur de $173 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour la conductivité thermique du tungstène. Elle correspond à un matériau idéal, qui serait constitué d'un monocristal de tungstène. Or, l'insert d'une anode de torche à plasma est réalisé par frittage. Ainsi la conductivité thermique du matériau réel est sûrement plus faible à cause des défauts tels que les joints de grains qui perturbent les transferts thermiques. On peut donc supposer que le temps de stagnation suffisant pour qu'un pied d'arc parvienne à fondre la surface de l'anode est plus faible que celui précédemment calculée.

Le deuxième point est que ces temps de stagnation du pied d'arc que l'on obtient sont raisonnablement réalistes avec cette hypothèse d'une surface du pied d'arc étant en contact avec la surface de l'anode d'une valeur d' 1mm^2 . En effet, pour une intensité de 600A , et une section conductrice de 1mm^2 , la densité de courant est de 6.10^8 A/m^2 , ce qui est en accord avec les travaux de B. Pateyron qui a écrit que "*L'attachement de l'arc sur l'anode peut être aussi bien diffus que constricté sur une tache, ce qui correspond à des densités de courant de 10^6 à 10^9 A/m^2*" [68].

Nous proposons maintenant de vérifier cette hypothèse de surface du pied d'arc de l'ordre du millimètre carré en comparant la répartition statistique, par classes, des temps de stagnation du pied d'arc d'une torche équipé d'électrodes neuves avec celle de la même torche mais dont les électrodes sont usées. Nous avons réalisé cette étude à partir des fichiers de données des signaux de tensions nommées "*Voltage2.txt*" pour le tir-test RUN01, effectué juste après la mise en place d'électrodes neuves et le tir-test RUN13 où ces mêmes électrodes montraient des signes d'usure. Ces signes d'érosion sont la preuve qu'il y a eu fusion du matériau. Notre postulat de départ pour cette étude est donc que le temps de fusion (t_f) n'a pas été atteint lors du tir-test RUN01 mais qu'au contraire il l'était pour RUN13.

Pour obtenir les temps de stagnation du pied d'arc, nous avons tout d'abord extrait de chaque signal de tension (c'est-à-dire de chaque colonne de chacun des deux fichiers "*Voltage2.txt*") les extrema locaux selon le critère suivant :

On garde $(t_i; V_i)$ ($1 < i < 5000$) SI $\{V_{i-1} < V_i \text{ ET } V_{i+1} < V_i\}$ OU $\{V_{i-1} > V_i \text{ ET } V_{i+1} > V_i\}$

La première condition signifie que l'arc a claqué vers l'amont et la seconde rend compte du début de la phase d'allongement. Nous avons supposé que la condition $\{V_{i-1} < V_i < V_{i+1}\}$ illustre l'allongement de la colonne d'arc avec un pied d'arc fixe en un point donné.

La seconde phase du traitement consiste, à partir des couples $(t_i; V_i)$, à calculer la différence entre deux t_i et de répartir par classes ces différences. Les valeurs de répartition sont exprimées en pourcentage, sur un nombre total de couples $(t_i; V_i)$ d'environ 1600. La Table 6-1 recense les valeurs mesurées pour deux signaux choisis pour leur temps d'acquisition qui ne prêtait pas à confusion sur les conditions de fonctionnement de la torche lors de l'acquisition de ce signal de tension (600A et un mélange argon $45\text{NL}\cdot\text{min}^{-1}$ hydrogène $15\text{NL}\cdot\text{min}^{-1}$). Il faut préciser que si seulement deux signaux sont volontairement retenus, plutôt qu'une moyenne des valeurs de répartition sur l'ensemble des tirs-tests répondant aux conditions stables, c'est parce qu'une automatisation de la procédure de calcul de répartition par classes n'a pas pu être programmée à temps. Cependant, la comparaison de dix répartitions pour chaque état d'usure des électrodes montre une seule et même tendance. Celle-ci est illustrée par les valeurs de la Table 6-1 et la Figure 6-2 montre graphiquement cette répartition.

Classes (μs)	Répartition pour électrodes neuves (PT4 - RUN01)	Répartition pour électrodes usées (PT4 – RUN13)
20	37.0%	37.5%
40	19.9%	21.0%
60	17.9%	15.8%
80	13.9%	12.2%
100	7.6%	7.0%
120	2.7%	3.6%
140	1.0%	2.0%
160	0.1%	0.4%
180	0.0%	0.4%
200	0.0%	0.1%
220	0.0%	0.0%
240	0.0%	0.0%
260	0.0%	0.0%
280	0.0%	0.0%
300	0.0%	0.0%

Table 6-1 : Répartition des temps de stagnation du pied d'arc pour deux états d'usure des électrodes

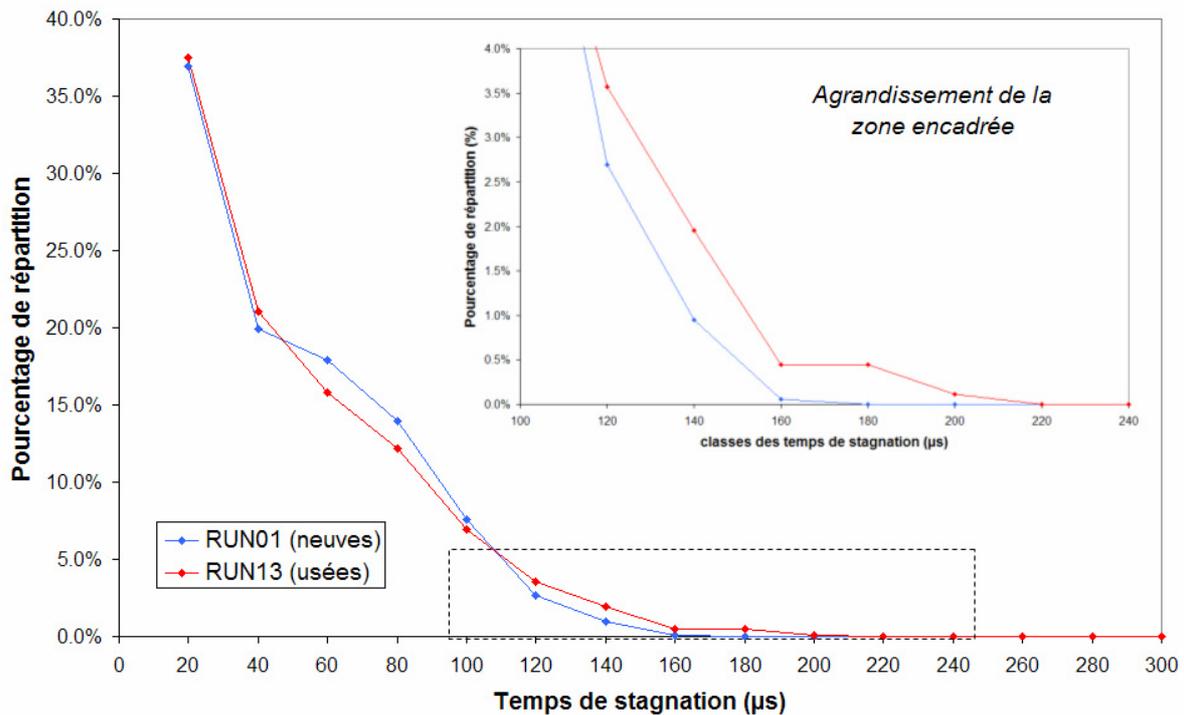


Figure 6-2 : Graphique de répartition des temps de stagnation du pied d'arc pour deux états d'usure des électrodes.

On remarque à partir de ce tableau ou de ce graphique que la répartition des temps de stagnation des pieds d'arc est plus aplatie pour une torche usée que pour une torche neuve. Il n'existe pas de temps de stagnation supérieur à $160\mu\text{s}$ pour la torche munie des électrodes neuves alors que pour celle équipée des électrodes usées, on note que, d'une part, les temps longs sont plus nombreux (la courbe rouge de la Figure 6-2 est toujours au-dessus de la courbe bleue) et d'autre part, il apparaît des temps de stagnation qui n'existaient pas pour les électrodes neuves. Nous pouvons donc supposer que le temps nécessaire à la fusion de la surface de l'anode en contact avec le pied d'arc (t_f) a été atteint et qu'il est compris entre 160 et $200\mu\text{s}$. Une remarque doit être apportée sur la précision des signaux sur lesquels ce traitement a été effectué. La résolution entre deux points est de $20\mu\text{s}$, ce qui implique que la précision sur la Figure 6-2 est d'autant meilleure que le temps de stagnation est grand. Par ailleurs, les valeurs des pourcentages pour les temps supérieurs à $160\mu\text{s}$ sont faibles (moins d'un pourcent), ce qui était attendu. L'érosion est un phénomène lent et on pouvait attendre en effet qu'il y ait peu de stagnation du pied d'arc qui entraîne la fusion de la surface de l'anode.

Cette fourchette permet avec l'Équation 6-13 d'obtenir une plage de valeur pour estimer l'aire du pied d'arc :

$$160 \cdot 10^{-6} < t_f < 200 \cdot 10^{-6} \quad \Leftrightarrow \quad 0,60 \text{ mm}^2 < A < 0,67 \text{ mm}^2 \quad (\text{pour } I=600\text{A})$$

Les valeurs des extrémités de cette fourchette concernant l'aire du pied d'arc ne doivent pas être considérées comme un résultat quantitatif sinon comme un résultat qualitatif. L'ordre de grandeur d' 1mm^2 semble donc être plausible pour la surface occupée par le pied d'arc sur la surface de l'anode.

En allant plus loin dans l'analyse des temps de stagnation minimale, on peut s'intéresser à ceux liés aux valeurs minimales atteintes par la tension. Précisément, il serait intéressant de connaître le comportement de l'arc avec l'érosion en terme de position dans la surface. Pour cela, nous associons la distance entre la cathode et le pied d'arc après un claquage en amont de la tuyère avec la tension minimale repérée sur les signaux de tension en considérant que plus la valeur de la tension minimale est faible, plus le pied d'arc se sera raccroché près de la pointe de cathode. Nous cherchons ici à savoir quelle est l'influence de l'érosion des électrodes sur le comportement du pied d'arc en fonction de la position initiale qu'il a avant la phase d'allongement. Pour répondre à ce problème, nous avons extrait, à partir des signaux de tensions "*voltage2.txt*" et pour tous les enregistrements (ou *record*) de RUN01 et RUN13, les couples (t_i, V_i) qui répondaient au critère suivant :

$$\text{On garde } (t_i; V_i) \text{ (} 1 < i < 5000 \text{) SI } \{V_{i-1} > V_i \text{ ET } V_{i+1} > V_i\} \text{ ET } \{V_i < V_k^x\}$$

En supposant que la différence des temps entre deux minima correspondant à une phase d'allongement de l'arc sans que le pied ne quitte son emplacement, nous obtenons les couples $(\tau \text{ de } V_{\min}, V_{\min})$ où $\tau \text{ de } V_{\min} = t_{i+1} - t_i$. La Figure 6-3 est la représentation de ces couples sur un graphique avec V_{\min} en abscisses et $\tau \text{ de } V_{\min}$ en ordonnées. On observe tout d'abord que l'usure des électrodes conduit à avoir de plus en plus de tensions minimales de faibles valeurs. Ensuite on peut voir que la tension moyenne a diminué avec l'érosion par l'observation de la limite de droite (aux fortes valeurs de V_{\min}) des deux nuages de point. Enfin, alors que pour les signaux correspondant aux électrodes neuves il n'y a pas de tendance du temps de stagnation en fonction de la tension minimale, le triangle marquant l'absence de points rouge (liés à des électrodes usées) dans la zone comprise entre 20 et 40 V pour V_{\min} et 50 et $50\mu\text{s}$ pour $\tau \text{ de } V_{\min}$, montre que plus la tension est minimale, plus le temps de stagnation du pied d'arc sera élevé, ceci étant vrai pour une torche dont les électrodes sont déjà usées. Les trois conclusions que l'on peut déduire de la lecture de ce graphique de la Figure 6-3 sont :

- ✚ On confirme encore ici que la tension moyenne diminue avec l'érosion.
- ✚ Le pied d'arc s'accroche de plus en plus près de la cathode au fur et à mesure que l'érosion s'installe
- ✚ Pour des électrodes usées, le temps de stagnation du pied d'arc sera d'autant plus grand que l'accrochage a eu lieu près de la cathode.

La seconde conclusion est confirmée par des photographies de l'état de surface d'électrodes usées où l'on voit que les traces d'usures sont concentrées sur les surfaces de l'anode les plus proches de la cathode.

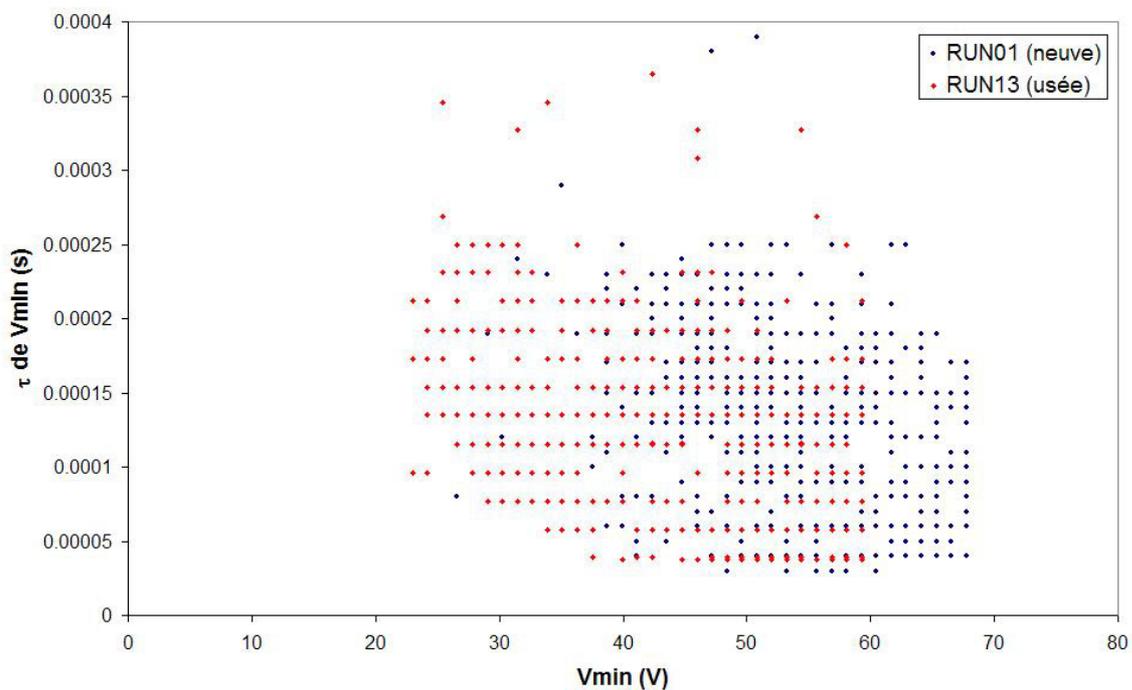


Figure 6-3 : Durée des temps de stagnation des pieds d'arc (τ de V_{Min}) en fonction de la tension minimale (V_{Min}).

Conclusion générale

Les trois objectifs de ce travail étaient la détermination des paramètres les plus significatifs de l'érosion des électrodes de torches à plasma, la proposition d'une solution technique du contrôle en ligne de l'érosion sous la forme d'un prototype et une contribution à l'approche théorique du phénomène de l'érosion.

Nous avons atteint tout d'abord le premier objectif en concevant un système d'acquisition des données qui a permis la mesure des fluctuations électriques et acoustiques. Des méthodes de traitements des signaux ont été développées afin de caractériser simplement l'état d'une torche en fonction de son nombre d'heure de fonctionnement (donc, indirectement, de son érosion). La mise en place de campagnes d'acquisitions systématiques des signaux tout au long de la vie de plusieurs torches a permis d'appréhender l'influence du courant d'arc sur les paramètres de suivi d'érosion ainsi que la forte relation existant entre la tension aux bornes des électrodes et le son émis par la torche. A partir d'autres campagnes de mesures, nous avons surtout déterminé que l'évolution de la tension moyenne globale, celle de son écart quadratique moyen et celle de la fréquence principale du spectre du son peuvent rendre compte conjointement de l'évolution de l'usure des électrodes.

C'est à partir des évolutions de ces trois paramètres collectés en milieu industriel qu'un prototype électronique simple, pratique, fiable et rapide a pu être développé. La validation de ce module industriel a été simulée mais le temps imparti à ce travail n'a pas permis de le tester réellement en atelier. Des modifications sont envisageables comme par exemple étendre les valeurs des seuils, fixes pour le moment et uniquement valable dans le cas d'un tir de référence avec un courant de 600A, un mélange plasmagène d'argon à 45 Nl.min⁻¹ et hydrogène 15Nl.min⁻¹ et un diamètre de tuyère de 6mm (ce sont les conditions d'un tir dit "normalisé"). Pour cela une étude paramétrique de l'influence de ces trois variables principales devrait être entreprise. Pourquoi ne pas imaginer un boîtier complémentaire au module existant qui sélectionnerait les seuils limitant les trois zones d'état de la torche des trois paramètres en fonction des trois variables? Ceci permettrait de maintenir en permanence le contrôle opérationnel alors que la méthode actuelle impose que le contrôle se déroule sous les conditions d'un tir normalisé entre les temps de production. Une seconde évolution de l'appareil de contrôle en ligne de l'érosion consisterait à choisir un autre paramètre plus significatif encore que ceux que nous avons sélectionné. Par exemple, le plus long temps de

stagnation du pied d'arc qui, nous l'avons vu dans le dernier chapitre, augmente avec l'usure (cf Figure 6-2).

En ce qui concerne le modèle thermique proposé, il donne des pistes pour une meilleure compréhension du phénomène complexe qu'est l'érosion. En effet, il ne prend pas en compte les conséquences de l'érosion à savoir, la vaporisation, l'éjection de gouttellettes ou des microexplosions de la surface. Mais la prise en charge de ces phénomènes interconnectés demanderait la mise en œuvre d'une théorie adaptée, qui à l'heure actuelle reste à élaborer. Cependant des études sur les propriétés de viscosité, de mouillage du métal liquide sur le même métal à l'état solide (si tant est que cela soit possible), sur les tensions de surface pourraient être mis en place pour une approche plus précise de la manière dont l'érosion prend place sur la surface des électrodes des torches plasma.

Bibliographie

- 1 C.C. Berndt, "The origins of thermal spray literature" in Thermal Spray 2001 : New surfaces for a new Millennium, (Ed.) C.C. Berndt, K.A. Khor, and E.F. Lugscheider, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2001) 1351-1360.
- 2 M. Thorpe, "Process Market Segmentation", conférence invitée présentée à la 8^{ème} National Thermal Spray Conference, Boston (1995).
- 3 J. Wigren, M.O. Hansson, P. Gougeon and C. Moreau, "On-line diagnostics of traditional flame spraying as a tool to increase reproductibility" in Thermal Spray: Practical solutions for engineering problems, (Ed.) C.C. Berndt (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1996) 675-681.
- 4 P. Fauchais, A. Vardelle, B. Dussoubs, "Quo Vadis Thermal Spraying ?", in Thermal Spray : New Surfaces for a New Millennium, (Ed.) C.C. Berndt, K.A. Khor and E.F. Lugscheider, (Pub.) ASM Int. Materials Park, OH, USA, (2001) 1-32.
- 5 M.L. Thorpe, H.J. Richter, "A Pragmatic Analysis and Comparison of HVOF Processes" in Journal of Thermal Spray Technology 1(2) (1992) 161-170
- 6 P. Fauchais, M. Vardelle, "How to improve the reliability and reproducibility of plasma sprayed coatings" in Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology, (Ed.) C. Moreau and B. Marple, (Pub.) ASM Int. Materials Park, Ohio, USA (2003) 1165-1173
- 7 L. Pejryd, J. Wigren, N. Hanner, "The Ultimate Spray Booth" in Thermal Spray: A United Forum for Scientific Technological Advances, (Ed.) C.C. Berndt (Pub.) ASM Int. Materials Park, Ohio, USA (1997) 445-450
- 8 C. Moreau, P. Gougeon, M. Lamontagne, V. Lacasee, G. Vaudreuil and P. Cielo, "On-Line Control of the Plasma Spraying Process by Monitoring the Temperature, Velocity and Trajectory of the In-Flight Particles" in Thermal Spray : Industrial applications, (Ed.) C.C. Berndt, (Pub.) ASM International Materials Park, Ohio, USA (1994) 431-437
- 9 J.F. Bisson, M. Lamontagne, C. Moreau, L. Pouliot, J. Blain and F. Nadeau, "Ensemble In-Flight Particle Diagnostics Under Thermal Spray Conditions" in Thermal Spray 2001: New surfaces for a New Millenium, (Ed.) C.C. Berndt, K.A. Khor and E.F.Lugscheider, (Pub.) ASM International Materials Park, Ohio, USA (2001) 705-714.
- 10 Tecnar Automation, 1321 Hocquart Street, St-Bruno, QC, Canada J3V 6B5
- 11 W.D. Swank, J.R. Fincke and D.C. Haggard, "A Particle Temperature Sensor for Monitoring and Control of the Plasma Spray Process" in Advances in Thermal Spray Science and Technology, (Ed.) C.C. Berndt and S. Sampath, (Pub.) ASM International Materials Park-OH, USA (1995) 111-116.
- 12 J. Vuttulainen, E. Hämäläinen, R. Hernberg, P. Vuoristo and T. Mäntylä, "Novel method for in-flight particle temperature and velocity measurements in plasma spraying using a single CCD camera" in J. of Thermal Spray Technology **10** (1) (2001) 94-104.

- 13 M. Ignatiev, V. Senchenko, V. Dozhnikov, I. Smurov and Ph. Bertrand, "Digital diagnostic system based on advanced CCD image sensor for thermal spraying monitoring" in Tagungsband Conference Proceedings, (Ed.) E. Lugscheider, (Pub.) DVS Deutscher Verband für Schweißen, Germany (2002) 1001-1006.
- 14 J.E. Craig, R.A. Parker and D.Y. Lee, in Thermal Spray: Surface Engineering via Applied Research, (Ed.) C.C. Berndt, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2000) 51-66.
- 15 T. Renault, M. Vardelle, P. Fauchais, H. Hoffmann and F. Braillard, "On-line monitoring (SDC) through coating surface temperature of residual stresses in APS WC-Co17wt% coatings on Hastelloy X" in Thermal Spray 2001: New surfaces for a New Millennium, (Ed.) C.C. Berndt, K.A. Khor and E.F. Lugscheider, (Pub.) ASM International Materials Park, OH, USA (2001) 743.
- 16 "Verfahren zur Kontrolle des Betriebszustandes von Plasmabrennern"; Patent N°271 605 A1 (DD)
- 17 Method and device for checking working capacity of plasmatron electrode; Patent N°2 230 993A (GB)
- 18 Apparatus for detecting plasma anomalous discharge and method of detecting the same; Patent N° EP 1 189 491 A1 (European Patent Office)
- 19 Method and apparatus for detecting electrode breakdown in plasma cutting and welding; Patent N° 61269975 A (Japanese Patent Office)
- 20 Apparatus and method for providing useful audio feedback to users of arc welding equipment; Patent N° 4,471,207 (United States Patent)
- 21 High power plasmatron; Patent N°2 047 509 A (GB)
- 22 Optical monitoring device for determining faults in a plasma burner; Patent N° 4,621,184 (United States Patent)
- 23 Monitoring working condition of plasma burner; Patent N° 1990-045563 (DD)
- 24 Electrode for plasma torch; Patent N° 2001232475 A (Japanese Patent Office)
- 25 J.F. Bisson, B. Gauthier and C. Moreau, "Effect of plasma fluctuations on in-flight particle parameters" in Thermal Spray: New surfaces for a New Millennium, (Ed.) C.C. Berndt, K.A. Khor and E.F. Lugscheider, (Pub.) ASM International Materials Park, Ohio, USA (2001) 715-721
- 26 L. Leblanc and C. Moreau, "The Long-Term Stability of Plasma Spraying" in J. of Thermal Spray Technology **11**(3), (2002) 380-386
- 27 B. Pateyron, G. Delluc : logiciel TTWinner, ADEP – Banque de données de l'Université et du CNRS Ed. Direction des Bibliothèques des Musées et de l'Information Scientifique et Technique (1986). Le logiciel réactualisé en 2003 est disponible sur le site <http://www.ttwinner.free.fr>
- 28 M. Ushio, K. Tanaka, M. Tanaka. "Electrode heat transfer and behaviour of tungsten cathode in arc discharge" in Heat and Mass Transfer under plasma conditions (Ed.) P.

- Fauchais (Pub.) Begell House, New York, NY (1995) 265-272
- 29 J.F. Brillac, "Contribution à l'étude statique et dynamique de torches plasma stabilisées par vortex", thèse 60 de l'Université de Limoges (1993)
- 30 J. Heberlein. "Electrode phenomena in plasma torches" in Heat and Mass Transfer under Plasma Conditions, (Ed.) P. Fauchais, J. Amouroux, J. Heberlein, Annals of the New York Academy of Sciences, vol.891, (1999) 14-27
- 31 X. Zhou, J. Heberlein, "Analysis of the arc-cathode interaction of free-burning arcs", Plasma sources Sci Technol. **3** (1994) 564-574
- 32 C.L. Yaws, "Chemical Properties Handbook: physical, thermodynamic, environmental, transport, safety, and health related properties for organic and inorganic chemicals", (Pub.) McGraw-Hill Handbooks (1999) 553-556
- 33 E. Pfender, "Thermal plasma-wall boundary layers" in Heat and mass transfer under plasma conditions: proceedings of the 1st international symposium on heat and mass transfer under plasma conditions in Çesme, Turkey (1994) 223-235
- 34 S. Vacquié, "Equilibre énergétique à l'anode", L'arc électrique, (Ed.) Eyrolles, "Sciences et techniques de l'ingénieur", CNRS éditions, (2000) 52-53
- 35 M. Hrabovsky, M. Konrad, V. Kopecky, J. Hlina, J. Benes, E. Vesely, "Motion of anode attachment and fluctuations of plasma jet in dc arc plasma torch." HTMP 1, (1997) 167-178
- 36 Component Manual 958001-22 spray gun F4 Plasma coating, Sulzer Metco AG Documentations services, Rigackerstrasse 16 – CH 5610 Wohlen
- 37 S.A Wutzke, E. Pfender and E.R.G. Eckert, "Study of electric-arc behaviour with superimposed flow" in AIAAJ 5(4) (1967) 707-714
- 38 J.F. Coudert, M.P. Planche and P. Fauchais, "Velocity measurement of DC plasma jets based on arc root fluctuations" in High Temperature Chemical Processes 3 (6) (1994) 639-652
- 39 J.F. Coudert, M.P. Planche and P. Fauchais, "Characterisation of DC Plasma Torch Voltage Fluctuations" in Plasma Chemistry Plasma Processing 16 (1) (1996) 211S-227S
- 40 Z. Duan, K. Wittman, J. F. Coudert, P. Fauchais, J. Heberlein, "Effects of the cold gas boundary layer on arc fluctuations" in the 14th Int. Spray Proc. Conf., Prague, Czech Republic, Vol.1 (1999), 233-238
- 41 Z. Duan, J. Heberlein, S. Janisson, K. Wittman, J. F. Coudert, P. Fauchais, "Effects of nozzle fluid dynamics on the dynamic characteristics of a plasma spray torch" in Tagungsband Conference Proceedings, (Ed.) E. Lugscheider, P.A. Kammer (Pub.) DVS Deutscher Verband für Schweißen, Germany (1999) 247-252
- 42 W. Fischer-Schlemm & P. A. Schoeck, "Oscillations of electric arcs with superimposed gas flow", P.A., Proc. 7 ICPIG, Belgrade Vol.1, (1965) 720
- 43 S. Russ, E. Pfender & P. J. Strykowski, "Unsteadiness and mixing in thermal plasma jets" in Plasma Chem. Plasma Process. (USA) **14** (1994) 425-436

- 44 Z. Duan & J. Heberlein, "Anode boundary layer effects in plasma spray torches" in *Thermal Spray: Surface Engineering via Applied Research*, (Ed.) C.C. Berndt, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2000) 1-7
- 45 M.P. Planche, "Contributions à l'étude des fluctuations d'une torche plasma", Thèse n°37 de l'Université de Limoges (1995)
- 46 O.I. Yas'ko "Correlation of the characteristics of electric arcs" – *Brit. J. Appl. Phys.*, Vol. 2, n°2 (1969) 733
- 47 A. Kaminska, M. Dudeck, "Fluctuations d'arc et du jet de plasma liées au mouvement du pied d'arc dans des plasmatrons" in *Journal de Physique III France* **5** (1995) 2043-2047
- 48 R. Pauvit, Ch. De Izarra & O. Vallée, "Spectral and acoustic diagnostic of a plasma torch", *JHTMP* **1**, (1997) 219-237
- 49 U. Ingard, "Acoustic wave generation and amplification in a plasma", *Physical Review* **145**, (1966) 41-46
- 50 H. Dadgar, "Emission d'ondes acoustiques dans un arc électrique". Thèse de l'université de Paris Sud, France (1977)
- 51 M. Fitaire, "Bruit acoustique des arcs électriques" *L'arc électrique et ses applications*, tome 1, (Pub.) CNRS chap.8, (1984) 229-253
- 52 R.N. Szente, "Erosion of plasma torch electrodes", Ph. D. Thesis, Department of Chemical Engineering, McGill University, Montreal, Québec, 1989.
- 53 X. Zhou, J. Heberlein. "Characterization of the arc cathode attachment by emission spectroscopy and comparison to theoretical predictions", *Plasma Chem. Plasma Process.* **16**, **1** (1996) 229S – 244S
- 54 P. Tsantrizos, W.H. Gauvin, "Cathode erosion phenomena in a transferred-arc plasma reactor" in *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. **12**, **1** (1992) 17-33
- 55 X. Zhou, B. Ding, J. Heberlein. "Temperature measurement and metallurgical study of cathodes in DC arcs", *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol. A* **19**, **3** (1996) 320 – 328
- 56 X. Zhou, J. Heberlein. "An experimental investigation of factors affecting arc cathode erosion" in *J. Phys. D : Appl. Phys.* **31**(19), (1998) 2577-2590
- 57 X. Zhou, J. Heberlein, E. Pfender. "Theoretical study of factors influencing arc erosion of cathode", *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol. A* **17**, **1** (1994) 107 – 112
- 58 J. Wigren, L. Pejryd & H. Karisson, "The effect of tungsten contamination from the spray gun on the performance of a thermal barrier coating" in *Thermal Spray: A United Forum for Scientific and Technological Advances*, (Ed.) C.C. Berndt, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1997) 243-249
- 59 V. Gourlaouen, F. Remy, J. M. Leger & J. Sattonet, "Influence of plasma gas (SPRAL 22, Ar/H₂) and impurities (O₂,H₂O) on the electrode lifetime during spraying" in *Thermal Spray : Meeting the Challenges of the 21st Century*, (Ed.) C. Coddet, (Pub.)

- ASM International Materials Park, OH, USA (1998) 797-801
- 60 Leblanc, L. & C. Moreau, "Study on the long-term stability on plasma spraying" in *Thermal Spray: Surface Engineering via Applied Research*, (Ed.) C.C. Berndt, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2000) 1233-1239
- 61 J. Xi, G. Krishnappa & C. Moreau, "Monitoring of nozzle wear during plasma spray" in *Thermal Spray: A United Forum for Scientific and Technological Advances*, (Ed.) C.C. Berndt, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1997) 413-418
- 62 L. Leblanc, C. Moreau, P. Gougeon and J. Xi, "Long-term stability of plasma spraying: study on the evolution of the in-flight particle state, coating microstructure, voltage and acoustic signatures" in *Proceedings of the UTSC, Düsseldorf (Germany)*, (1999) 306-311
- 63 L. Leblanc & C. Moreau, "Study on the long-term stability on plasma spraying" in *Thermal Spray: Surface Engineering via Applied Research*, (Ed.) C.C. Berndt, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2000) 1233-1239
- 64 J.L. Dorier, C. Hollenstein, M. Loch, A. Salito & G. Barbezat, "Influence of external parameters on arcs fluctuations in a F4 dc plasma torch used for thermal spraying" in *Thermal Spray: Surface Engineering via Applied Research*, (Ed.) C.C. Berndt, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2000) 37-43
- 65 Z. Duan, L. Beall, M. P. Planche, J. Heberlein, E. Pfender & M. Stachowicz, "Arc voltage fluctuations as an indication of spray torch anode condition" in *Thermal Spray: A United Forum for Scientific and Technological Advances*, (Ed.) C.C. Berndt, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1997) 407-411
- 66 F. Dubois, J. Courault, C. Lajoie-Mazenc and L. Jestin "Alimentation électrique des torches à plasma d'arc" dans *Les plasmas dans l'industrie*, (Ed.) Gilles Laroche, Collection Electra, (Pub.) DOPEE diffusion (1991) 83-90
- 67 SprayTech Bulletin 02.00.0175 about the M-APS 45 Plasma system, folio available at Flame Spray Technologies, Simon Stevinweg 27 – NL-6827BS Arnhem, The Netherlands.
- 68 B. Pateyron, "Contribution à la réalisation et à la modélisation de réacteurs plasmas soufflés ou transférés appliqués à la production de poudres ultrafines métalliques ou céramiques", Thèse N°21-1987 de l'Université de Limoges (1987), 268
- 69 C. Temperton, "Implementation of a self-sorting in-place prime factor FFT algorithm" in *Journal of Computational Physics*, vol. 58, (1985) 283
- 70 R. C. Singleton, "An algorithm for computing the mixed radix FFT" in *IEEE Trans. Audio Electroacoust.*, vol. AU-17, (1969) 93
- 71 L. R. Rabiner and al., "The chirp z-Transform algorithm and its application" in *BSTJ*, 48, (1969) 1249
- 72 Z. Duan, L. Beall, J. Schein, J. Heberlein and M. Stachowicz "Diagnostics and Modeling of an Argon/Helium Plasma Spray Process" in *J. of Thermal Spray Technology* 9(2), (2000) 225-234

-
- 73 H.S. Carslaw & J.C. Jaeger "The use of sources and sinks in cases of variable temperature – Application to surface heating of a semi-infinite region" in *Conduction of Heat in Solids – Second Edition*, (Pub.) Oxford University Press, Amen House, London, E.C.4 (1959) 263-265

Annexes

Dans les pages suivantes, on trouvera :

 Une présentation du groupe Volvo Aero	163
 La stabilisation d'un arc par résistance série	169
 Les diagrammes TFA de la "campagne V"	171
 Le listing du programme principal du module DSP	175
 La liste des figures	181
 La liste des tableaux	187
 La liste des équations	189

Le Groupe Volvo Aero



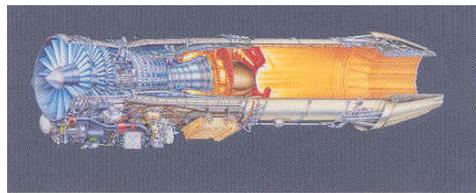
est considéré par de nombreux constructeurs aéronautiques comme étant un partenaire essentiel et naturel. En effet, Volvo Aero a acquis depuis 70 ans une renommée considérable qui permet de retrouver aujourd'hui ses réalisations dans plus de 80% des principaux avions de ligne du monde. Sa stratégie est la spécialisation dans les composants spécifiques, à haute technologie, pour des moteurs d'avions. Volvo Aero adapte dans cinq domaines d'affaires les solutions techniques et économiques pour ses clients. Bien que l'entreprise soit de taille moyenne, les quelques 7 milliards d'Euros de chiffre d'affaires annuel font de Volvo Aero un des leaders dans les niches économiques où l'entreprise est installée.

La politique de réduction des coûts a conduit les compagnies aériennes à se focaliser sur le cœur de leur travail. En conséquence, beaucoup d'entre elles ont abandonné leurs moyens de maintenance donnant des opportunités aux principaux constructeurs de moteurs d'avions pour s'impliquer dans ce créneau. Volvo Aero est devenu un acteur de premier plan dans les services pour l'aviation. Aujourd'hui, le service et la maintenance constituent près de 60% de ses activités. L'effondrement du bloc de l'est a détendu les relations internationales avec des répercussions sur le marché militaire aéronautique. En dépit de ces nouvelles conditions, la compagnie suédoise a su proposer des solutions innovantes et à bas prix (Ex: l'avion de chasse "Gripen" qui ne possède qu'un seul moteur, ce qui réduit les coûts d'utilisation). Enfin les clients de l'industrie aérospatiale paient par kilogramme de charge mis en orbite. La concurrence entre Volvo Aero et les autres compagnies du secteur spatial fait baisser le prix au kilo, contribuant à l'essor de ce secteur tout en assurant une grande qualité.

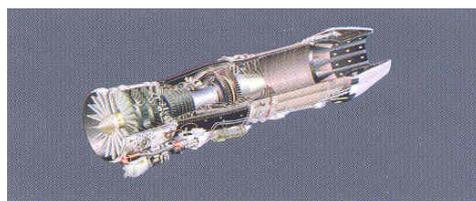




Volvo Aero fut fondé dans les années 1930 à Trollhättan (Suède) pour fournir les moteurs de la Swedish Air Force. Longtemps l'Air Force a été le seul client de la compagnie et encore aujourd'hui le Swedish Defence Material Administration reste le plus important client. Cependant, une expansion croissante dans le domaine commercial a vu le jour ces dix dernières années, avec l'arrivée de nouveaux clients, de nouveaux produits et de nouveaux services. Le chiffre d'affaire est passé de 418 millions d'Euros en 1995 à 1,117 milliard d'Euros en 2000 (estimations sur la base 1 SEK = 0,11€). Durant ces dernières années, Volvo Aero a fait des acquisitions stratégiques dans l'industrie aéronautique civile. La compagnie est très fortement implantée dans les programmes de fabrication de moteurs d'avions de Pratt & Whitney et General Electric. Au travers de l'acquisition de Norsk JetMotor, rebaptisé Volvo Aero Norge, Volvo Aero participe au programme de Snecma/GE, CFM56-5 et 56-7, qui sont aujourd'hui les programmes de moteurs d'avions ayant le plus de réussite. Développer les moteurs de demain est une lutte constante pour pousser les limites du possible. Le défi consiste à



Moteur RM12



Moteur F414

développer et produire des pièces plus légères dans un délai plus court à moindre prix et bien sûr sans compromettre la tradition de qualité et de sécurité de Volvo Aero. Ceci implique que la recherche et Développement emploie plus de 500 personnes, dont 250 ingénieurs et une trentaine de docteurs. De plus Volvo Aero participe à deux projets de démonstration dans le but de développer des moteurs plus efficace et respectueux de l'environnement. Volvo Aero étend aussi son assise dans la sphère militaire. En 2000, le rôle de la compagnie, en tant que principal fournisseur pour le système moteur Volvo RM12 destiné à l'avion de chasse Gripen, a permis un partenariat avec GE Aircraft Engines pour le programme de moteurs F414 destiné aux chasseurs américains Super Hornet F/A-18E/F. Le suivi client est essentiel pour Volvo Aero puisqu'il représente plus de la moitié des revenus de la compagnie. C'est aussi le secteur qui a la plus forte expansion Les programmes de maintenance personnalisée ont montré leur forte compétitivité. Par exemple, la maintenance demandée par Continental Airlines constitue l'une des plus importante commande d'une compagnie américaine hors du marché des Etats-Unis.



Volvo Aero a cinq domaines de compétences, tous fortement reliés entre eux. **Aerospace Components** développe et construit des pièces pour les moteurs d'avions de lignes et des lanceurs. Dans ce segment du marché d'avions, Volvo Aero est spécialiste dans les structures les plus complexes et les pièces rotatives. Le but est d'être le premier sur de nombreuses technologies de pointe, comme par exemple l'usinage à grande vitesse, la réalisation de dépôts par projection thermique ou les outils d'analyses pour le calcul de contraintes et d'écoulement de fluides. En 2000, Volvo Aero prend part activement au programme de développement du plus puissant moteur d'avion au monde, le GE90-115B, qui est dédié à la famille des avions Boeing 777. En Mai 2001, Volvo Aero devient le partenaire financier et industriel de deux programmes de moteurs Rolls-Royce, le Trent 500 pour l'Airbus A340-500/-600 et le Trent 900 pour le nouvel Airbus A380. Ariane 4 est le plus important programme mondial de lanceurs spatiaux en englobant près de 50% de ce marché. Volvo Aero fournit les chambres de combustion et les turbines du moteur Viking pour Ariane 4. La compagnie est aussi responsable pour la tuyère d'éjection refroidie par liquide et des turbines des pompes de carburant du moteur Vulcain, mis en place sur le nouveau lanceur Ariane 5. La technologie dédiée aux tuyères développée par Volvo Aero utilise une nouvelle technique d'assemblage qui non seulement réduira les coûts mais augmentera aussi la flexibilité et la performance des futures générations de lanceurs. L'industrie aérospatiale considère cette nouvelle technologie tellement viable que plusieurs producteurs de moteurs de fusées dans le monde sont en pour-parlers avec Volvo Aero.



Viking (Ariane 4)



Vulcain (Ariane 5)



Volvo Aero est, au niveau mondial, un des plus grands spécialistes indépendants en maintenance de moteurs. Le concept de **Engine Services** est de développer des programmes personnalisés avec les clients dans le seul but d'aboutir à un exceptionnel haut degré de qualité au plus bas coût par heure de vol. Alors qu'avant le client était simplement informé du prix du service, Volvo Aero et la compagnie aérienne discutent désormais pour savoir comment allonger les intervalles des services et réduire les coûts. L'offre de Volvo Aero "La Puissance par l'heure" est un exemple de l'approche sophistiquée où le client devient Partenaire du processus

d'affaire. La compagnie paie un certain prix à Volvo Aero pour toute heure de vol. Pour tous les clients de l'industrie aéronautique, minimiser les heures au sol est essentiel. Si un problème survient, un responsable se déplace dans les 24 heures quel que soit l'endroit sur Terre où se trouve l'avion. Le personnel technique de Volvo Aero et son service réparation et maintenance 24h/24 participent à la bonne réputation sur le marché des réparations.

Military Engines est un des cinq champs d'affaires de Volvo Aero. Il comporte le développement, la production, les essais, la maintenance et le support technique de moteurs à finalité militaire. La longue expérience de Volvo Aero



en tant que fournisseur de classe mondiale de solutions mono-réacteur pour l'armée lui donne une expertise unique. La maintenance de moteurs d'appareils militaires s'effectue sur le site de Trollhättan. Volvo Aero porte aussi la responsabilité du prochain développement du moteur RM12 du Gripen et doit assurer qu'il fonctionnera jusqu'à la fin du temps d'utilisation prévu, c'est-à-dire jusqu'en 2025. En 2001, Volvo Aero présente un accrocheur de flammes radial de sa propre conception. Ce nouveau produit doit permettre d'économiser plus de 0,7 milliard d'Euros au programme Gripen et dans le même temps d'offrir des diminutions de coûts dans le programme américain de développement du moteur F404 destiné aux chasseurs F18. En 2000 Volvo Aero entame un rôle actif dans l'élaboration du programme Maintenix Tracker, un système développé par son partenaire canadien Mxl Technologies, dédié au suivi opérationnel et à la maintenance prévu dans l'industrie de l'aviation.



Au fil de ses acquisitions, Volvo Aero présente aujourd'hui un catalogue multiservices auprès des principaux acteurs de la scène aéronautique via **Volvo Aero Services** qui est la branche qui propose de nombreuses pièces détachées, des remplacements de moteurs avec des solutions financières à courts et longs termes. Avec ses clients – partenaires Volvo Aero Services repousse les frontières de l'assistance après vente. L'innovation et la créativité sont les maîtres mots de cet effort. Volvo Aero qui est un des plus grand distributeurs de pièces détachées pour moteurs d'avions, travaille via un réseau de 15 points de ventes et de 5 centrales de pièces partout dans le monde. Toutes les commandes sont livrées au client dans les 24 heures. Volvo Aero Services recense plus de 20 millions de pièces dans ces ateliers de stockage. Un nombre croissant de transactions est opéré via le commerce électronique par le biais d'Internet. La compagnie entreprend aussi d'assumer la responsabilité pour la gestion des besoins en matériels de ses clients, leur permettant de se

focaliser sur le cœur de leur métier et d'économiser l'argent de stockage de pièces détachées.

Pour un meilleur résultat, les compagnies aériennes optent désormais pour le leasing de moteurs plutôt que leur achat. Volvo Aero Services est un leader mondial en matière de leasing à court terme et offre, en partenariat avec la Bank of Tokyo Mitsubishi, des contrats à long terme. Ce qui permet à Volvo Aero de consolider sa position de partenaire financier.

Le concept de **Land & Marine Gas Turbine** (LMGT) réside dans l'idée que les turbines à gaz utilisées dans les moteurs d'avions peuvent être employées pour d'autres applications. LMGT développe, produit, et vend des turbines à gaz de type industriel dans une gamme de puissance de 0,6 – 5 MW. Les turbines à gaz optimisées pour un meilleur respect environnemental, développées et conçues par LMGT, sont les organes principaux des centrales de cogénération d'électricité et de chaleur par combustion de gaz naturel. Ces installations sont techniquement très développées et sont parmi les sources d'énergie qui offrent les meilleurs rendements. Enfin en partenariat avec ABB, sous le nom de Turbec AB, Volvo Aero développe une micro turbine destiné à fournir, à petite échelle, de l'électricité et de la chaleur.

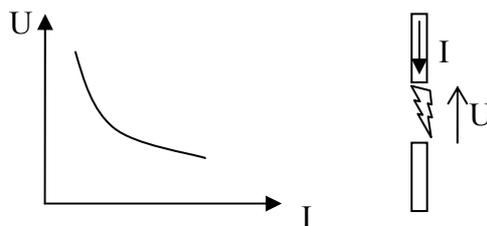
Les bureaux centraux de Volvo Aero sont basés à Trollhättan. Les produits sont développés et produits à Trollhättan et Kongsberg en Norvège. L'ensemble des moteurs pour l'aviation militaire est aussi produit à Trollhättan. La branche réparation et maintenance est réparti entre Trollhättan et Bromma près de Stockholm. Les turbines à gaz sont produites et maintenues à Trollhättan et Malmö. Volvo Aero Services tient ses bureaux à Boca Raton et Seattle aux USA. Volvo Aero Services possède des succursales sur les cinq continents.

Stabilisation d'un arc par résistance série

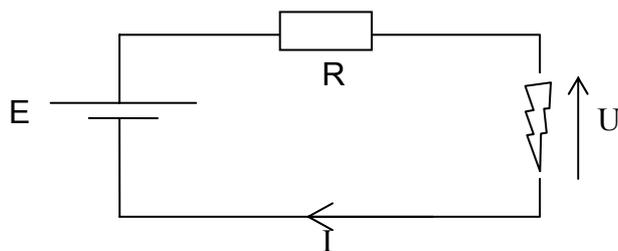
Ce paragraphe est consacré au critère de Kaufmann qui permet de comprendre comment un arc électrique ne peut être stable dans un circuit résistif qu'en un seul point.

Un arc électrique se caractérise par une relation entre sa tension U (ddp) et le courant

I. Généralement cette relation est à pente négative. $U = f(I)$ avec $\frac{df(I)}{dI} < 0$

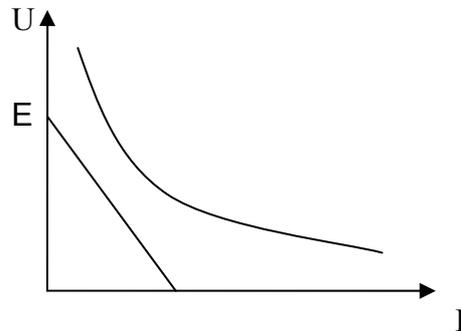


L'arc dans un circuit est alimenté par une source de tension E , par l'intermédiaire d'une résistance série R .

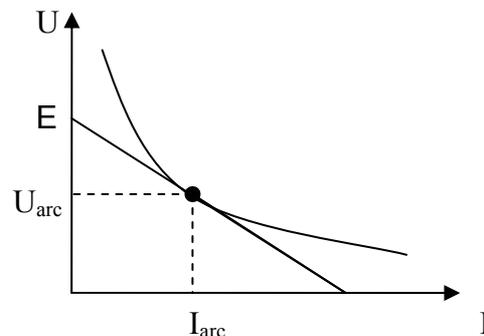


On a toujours $U = f(I)$ et on a en plus : $U = E - RI$. Puisqu'il ne peut y avoir qu'une seule tension pour un courant donné, le couple (U, I) doit satisfaire aux deux relations. Le critère de Kaufmann exprime que l'arc sera stable si $R + \frac{dU}{dI} > 0$. Trois cas sont possibles :

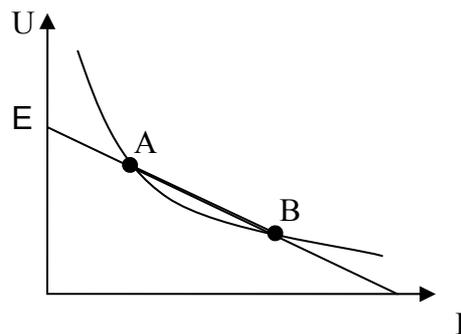
1^{er} cas : R est trop fort ou E est trop faible. Cette situation est représentée ci-dessous par le diagramme où la droite "E-RI" ne coupe pas la caractéristique descendante de l'arc. La conséquence, l'arc n'est pas entretenu et disparaît.



2^{ème} cas : la valeur de R est critique de telle sorte qu'un seul point de la droite touche la courbe. C'est le point de fonctionnement noté $(U_{\text{arc}}, I_{\text{arc}})$ sur la figure ci-dessous :



3^{ème} cas : La valeur de R est supérieure à celle du deuxième cas et la droite coupe la courbe en deux points noté A et B sur la figure ci-dessous :



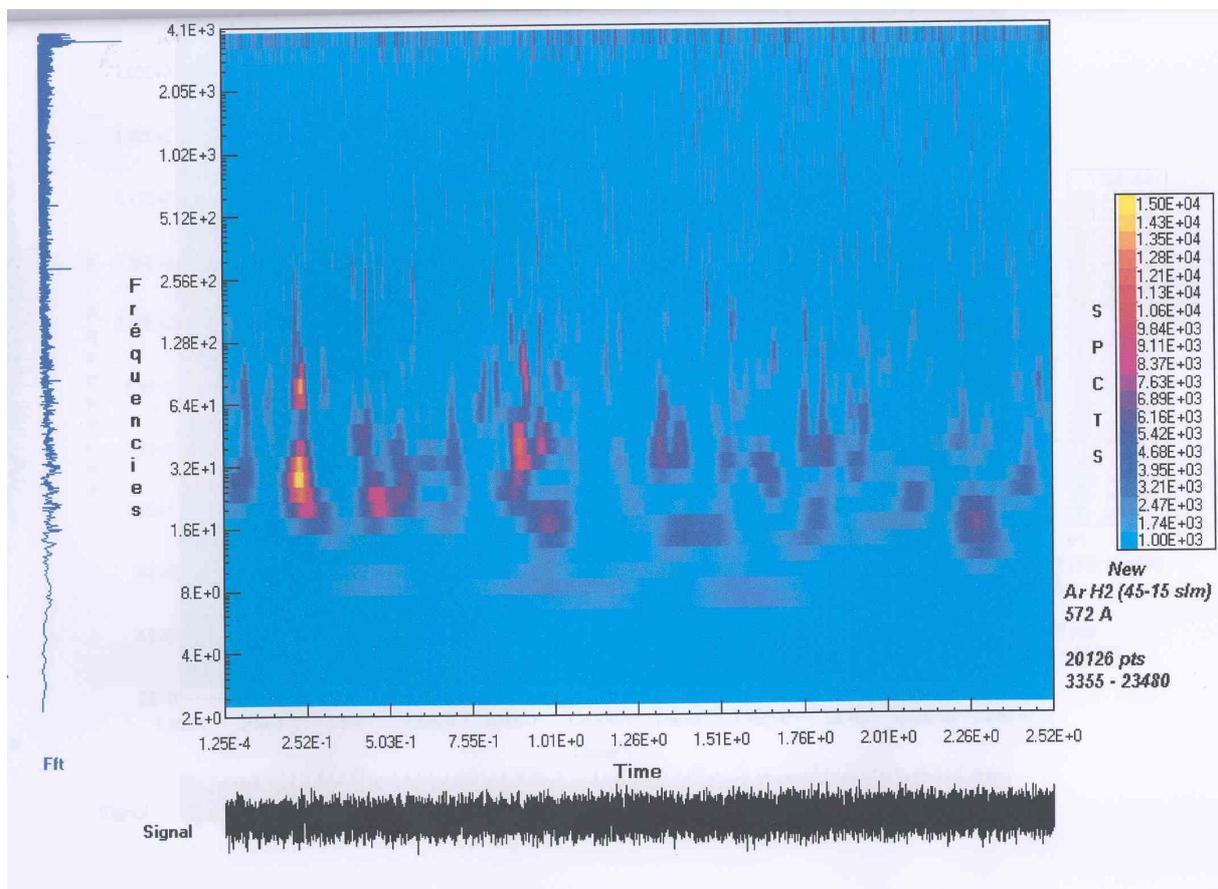
Stabilité au point A : Si une perturbation apparaît avec par exemple $dU < 0$, le circuit réagit avec $dI > 0$ ce qui impose un nouveau courant entraînant une tension encore plus faible, etc. *Le point A est instable.*

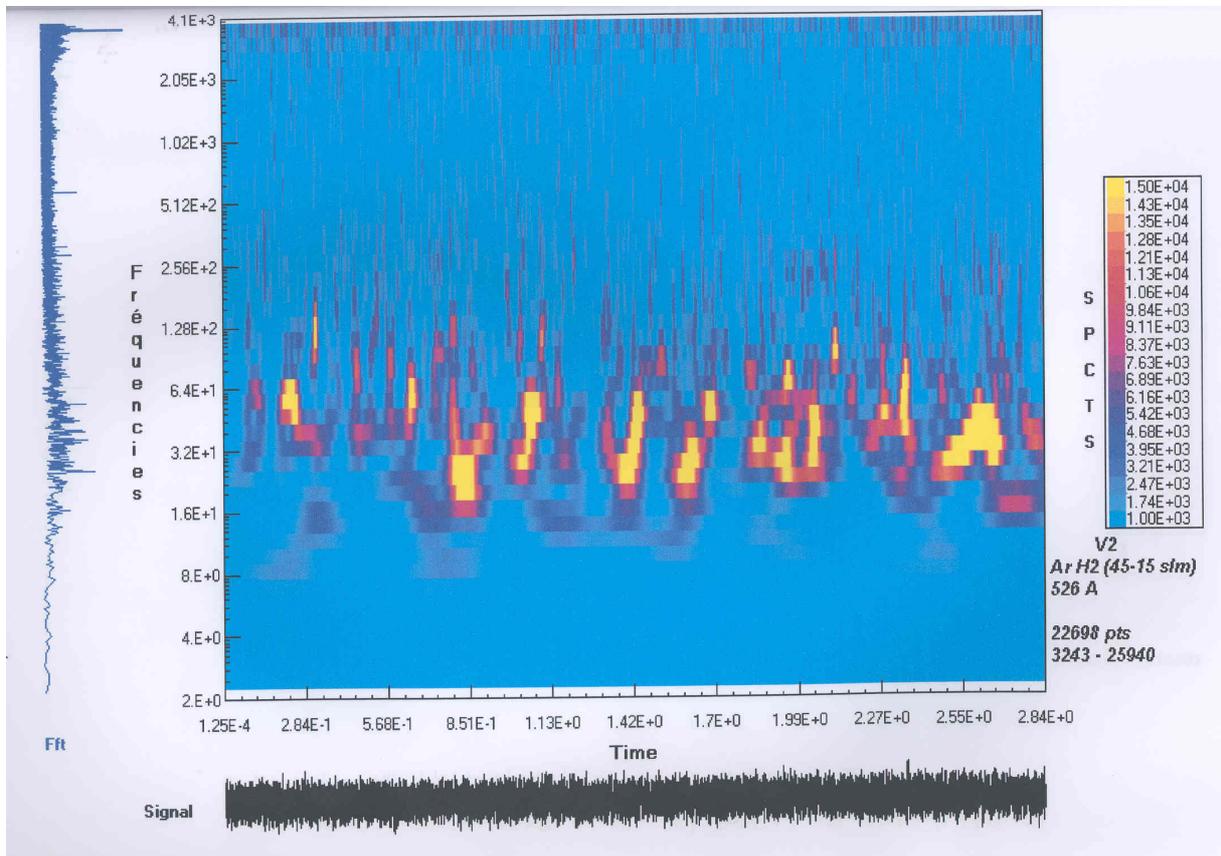
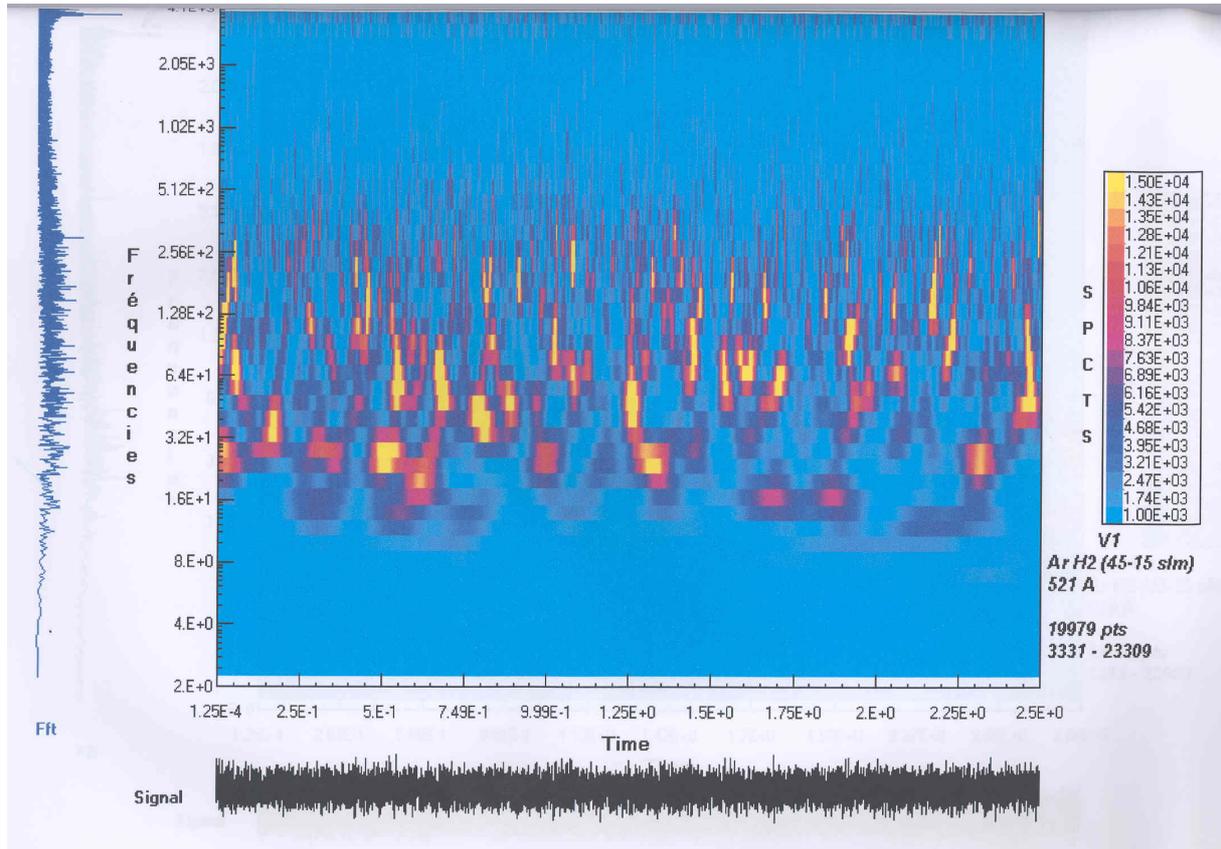
Stabilité au point B : La même perturbation de U au point B entraîne une augmentation du courant. C'est un processus stabilisant donc *B est un point stable.*

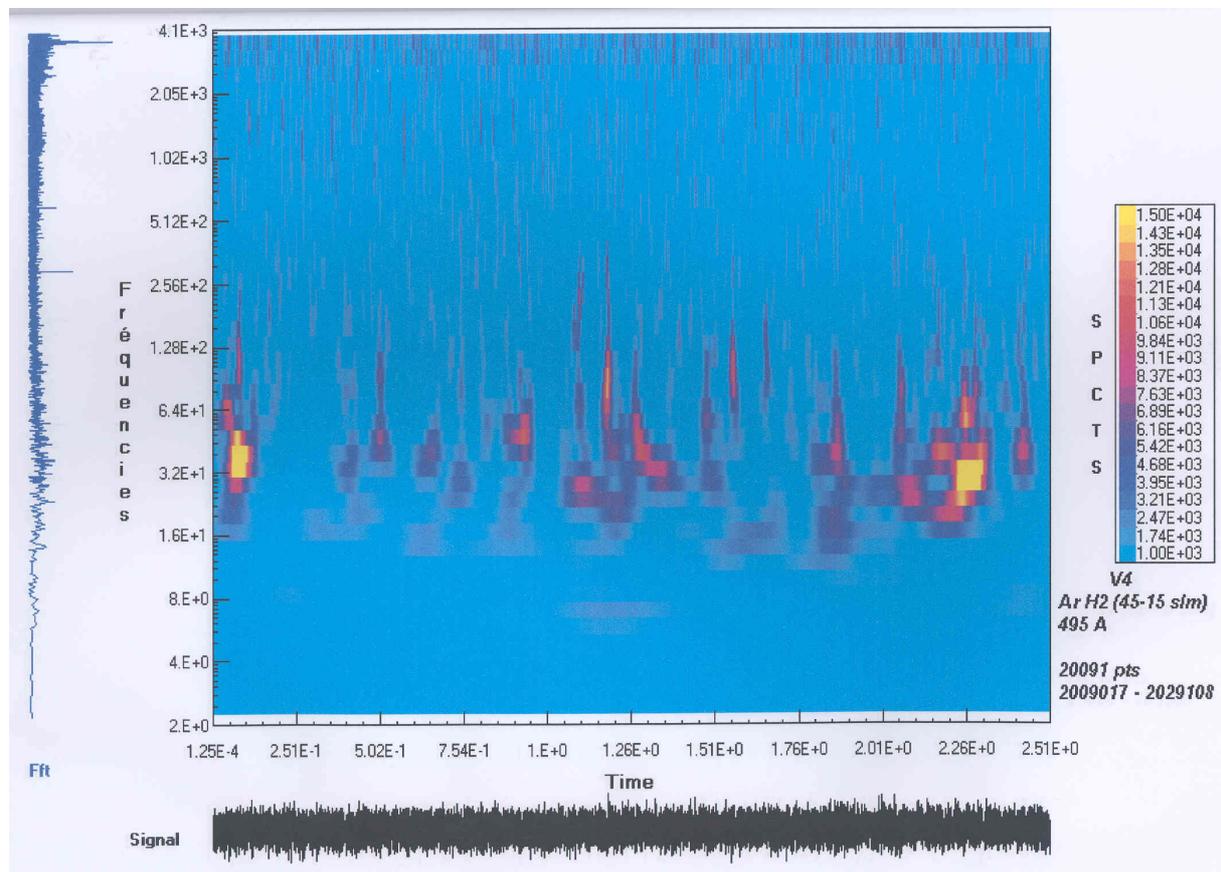
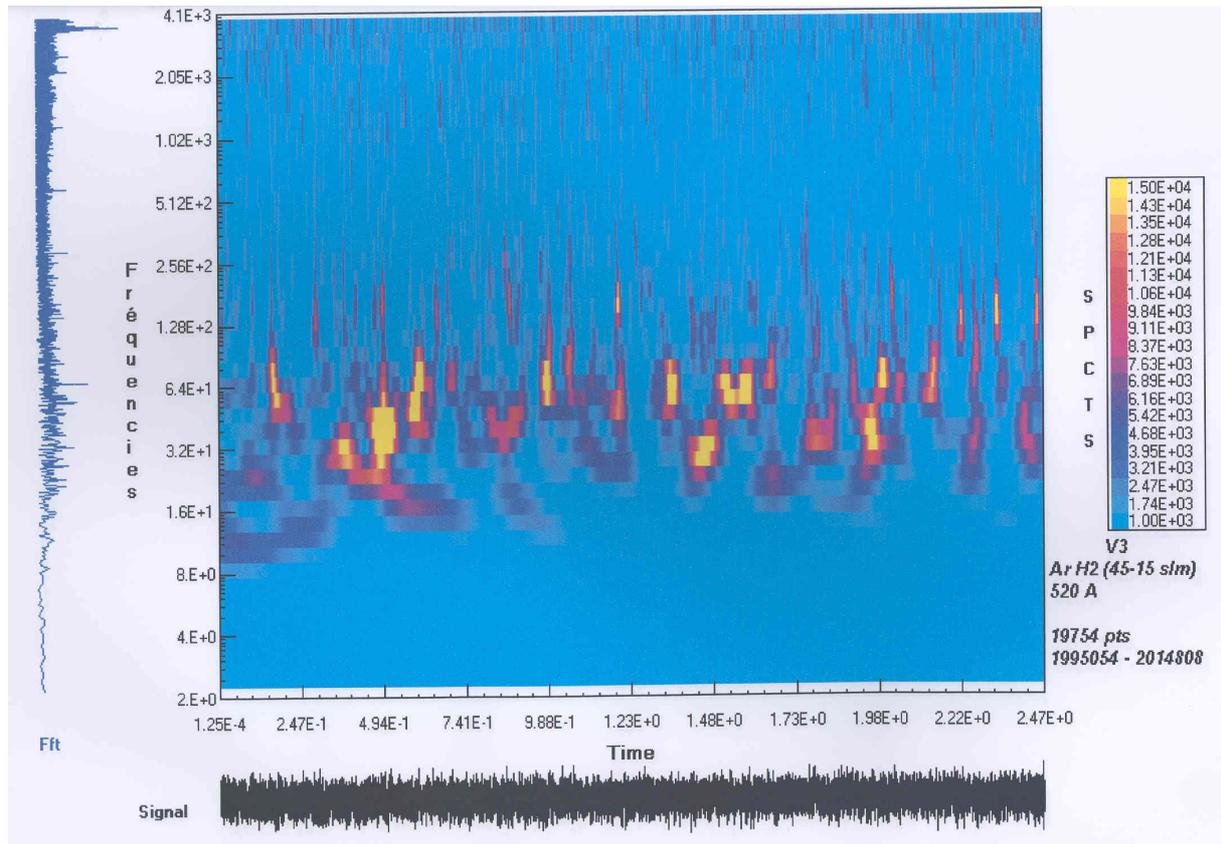
Diagrammes de transformées en ondelettes

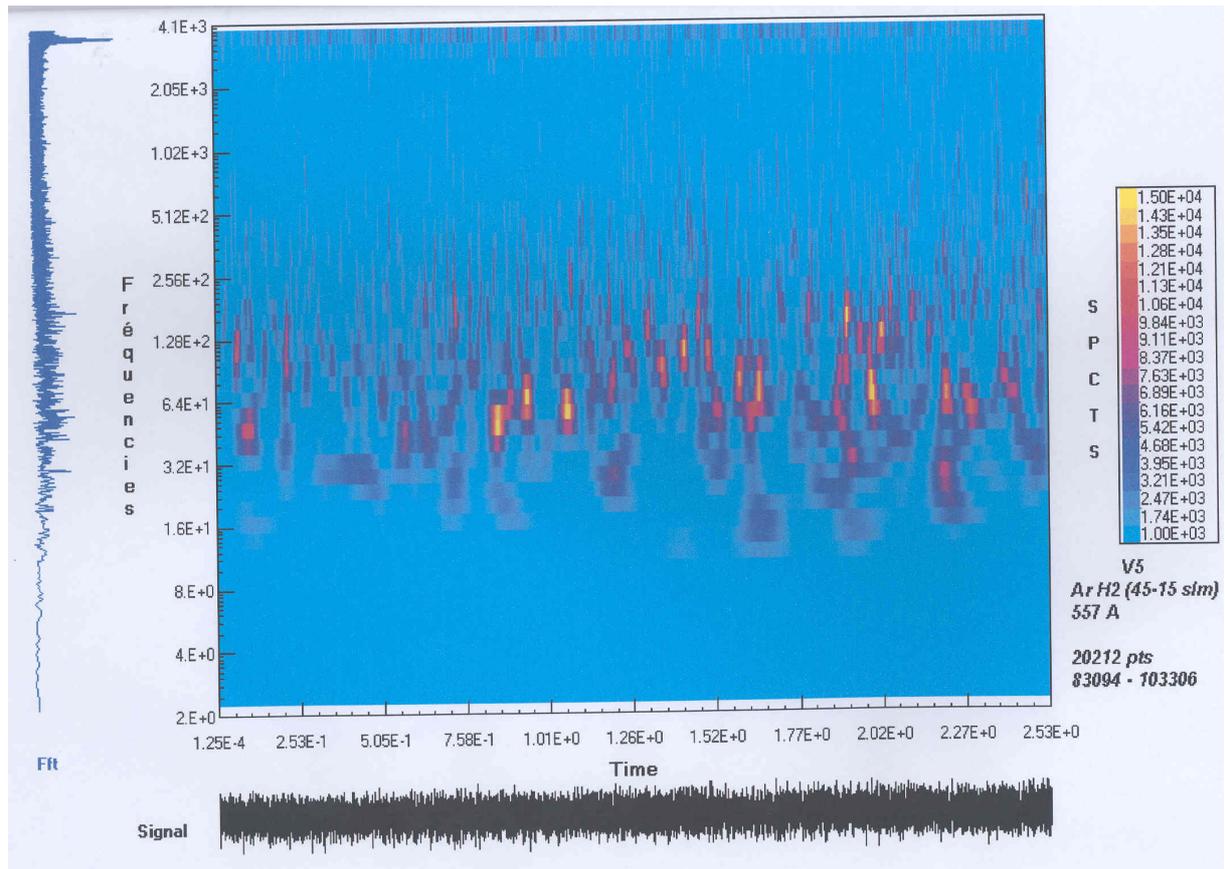
Cette annexe regroupe les six diagrammes temps – fréquence - amplitude (TFA) issus du calcul de transformées en ondelettes de signaux du son relatifs à la "campagne V" (cf. chapitre 4.3.54.3.5.3 : Evolution des diagrammes avec le temps de fonctionnement des torches. p. 120)

On retrouve les références des tirs ("New" puis "V1" à "V5") sous l'échelle de couleurs de chaque diagramme, ainsi que l'intensité du courant à laquelle le tir-test a été réalisé, le nombre de points du signal d'origine qui a servi au calcul et la zone du signal repérée par le premier point et le dernier point.









Le Programme principal du module

Le projet est partitionné en plusieurs fichiers écrits en assembleur. Le programme principal est écrit en "C" et appelle des fonctions écrites en assembleur.

Ci-dessous on retrouve le listing du programme principal :

```
#include "210651_flags.h"
#include "ctrl_protocols.h"
#include <math.h>
#define SWAP(a,b)  tempr=(a); (a)=(b); (b)=tempr

// ----- VISIBILITY SECTION -----
extern void init_kernel_sub(void); // Initialize hw & kernel.
// ----- DATA SECTION -----
// buffer data LEFT
section("seg_bnk3") float buffer_L_A[TAILLE_BUFFER];
section("seg_bnk3") float buffer_L_B[TAILLE_BUFFER];
// buffer data RIGHT
section("seg_bnk3") float buffer_R_A[TAILLE_BUFFER];
section("seg_bnk3") float buffer_R_B[TAILLE_BUFFER];
// Flag pour acquisition
int statut_acquisition_buffer_L = BUFFER_B;
int statut_acquisition_buffer_R = BUFFER_B;
section("seg_dmda") float FFT_table[PERIODE_MOYENNE];
section("seg_dmda") float mean_table[PERIODE_MOYENNE];
section("seg_dmda") float RMS_table[PERIODE_MOYENNE];

// ----- prototypes -----

void realfft(float data[], unsigned long n);
void mdelay(unsigned delay);
void process_buffer(float *p_data_L, float *p_data_R);
float moyen_centre(float *p_data);

// ----- variables globales -----

unsigned buf_counter;
unsigned EMAFE_REG_image;
unsigned init_torche;
int i;
unsigned N_moy;
int data_flash;
float f_max,ecart_type,tension_moyenne;
float f_max_acc,ecart_type_acc,tension_moyenne_acc;
float freq_estimee,tension_estimee,ecart_type_estime;
float ecart_type_seuil_1,ecart_type_seuil_2;
float freq_seuil_1,freq_seuil_2;
float tension_seuil_1,tension_seuil_2;

// ----- CODE SECTION -----

void main(void)
{
```

```

init_kernel_sub();      // Initialize hw & kernel.
buf_counter=0;
// config les broches de flags en sortie
FLAG4_output; // LED variance verte -> FLAG 4
FLAG5_output; // LED variance rouge -> FLAG 5
FLAG6_output; // LED variance orange -> FLAG 6
FLAG7_output; // LED variance verte -> FLAG 7
FLAG3_input; // Reset pour mémoriser l'état d'une torche neuve

#ifdef FLASH_MODE
//attention
// ici, lire les valeur de la memoire FLASH dans les variables seuil
asm("imask=0x0;");
BSO_read(&freq_seuil_1, ADRESS_BASE_FLASH);
BSO_read(&freq_seuil_2, ADRESS_BASE_FLASH+6);

BSO_read(&ecart_type_seuil_1, ADRESS_BASE_FLASH+12);
BSO_read(&ecart_type_seuil_2, ADRESS_BASE_FLASH+18);
BSO_read(&tension_seuil_1, ADRESS_BASE_FLASH+24);
BSO_read(&tension_seuil_2, ADRESS_BASE_FLASH+30);
*(unsigned*)SYSCON=0x20; // BSO=0
asm("nop;");
asm("nop;");
asm("nop;");
asm("nop;");
asm("nop;");
asm("nop;");
asm("BIT SET IMASK 0x802000;"); /* Enable EP0 interrupt
*/
asm("bit set MODE1 IRPTEN; "); // enable interrupts
#endif
for(;;)
{
f_max_acc=0;
tension_moyenne_acc=0;
ecart_type_acc=0;
N_moy=0;
while( N_moy < PERIODE_MOYENNE)
{
//le traitement
// D'abord le calcul de FFT sur le buffer voix
// attendre le remplissage du buffer A
while(statut_acquisition_buffer_L != BUFFER_A)
{
}
statut_acquisition_buffer_L = BUFFER_B;
asm(" bit clr MODE1 IRPTEN; "); // Disable interrupts
//procedure retourne: fmax, moyenne et ecart type
process_buffer(buffer_L_A,buffer_R_A);

FFT_table[N_moy]=f_max;
mean_table[N_moy]=tension_moyenne;
RMS_table[N_moy]=ecart_type;

N_moy++;
asm(" bit set MODE1 IRPTEN; "); // enable interrupts
}
asm(" bit clr MODE1 IRPTEN; "); // Disable interrupts
freq_estimee = moyen_centre(FFT_table);
tension_estimee = moyen_centre(mean_table);
ecart_type_estimee = moyen_centre(RMS_table);

// test du flag 3

```

```

// si le bouton est appuyé, on réactualise les seuils

    test_FLAG3(init_torche);
    if (init_torche!=0){ //le bouton de reset est appuyé
        mdelay(3000); // attendre 3 secondes
        test_FLAG3(init_torche);
        if (init_torche!=0) // reset est confirmé
        {
#ifdef FLASH_MODE
            asm("imask=0x0;");
            SECTOR_Erase(ADDRESS_BASE_FLASH); //sector_address
            *(unsigned*)SYSCON=0x20; // BSO=0
            asm("nop;");
            asm("nop;");
            asm("nop;");
            asm("nop;");
            asm("nop;");
            mdelay(1000); // attendre 1 secondes
#endif

            for (i=0;i<10;i++){
                LED_FFT_ROUGE_ON;
                LED_VAR_ROUGE_ON;
                LED_MOY_ROUGE_ON;
                mdelay(300); //attendre 0.2 sec
                LED_FFT_ORANG_ON;
                LED_VAR_ORANG_ON;
                LED_MOY_ORANG_ON;
                mdelay(300); //attendre 0.2 sec
                LED_FFT_VERTE_ON;
                LED_VAR_VERTE_ON;
                LED_MOY_VERTE_ON;
                mdelay(300); //attendre 0.2 sec
            }
            freq_seuil_1=freq_estimee*(1+FREQ_SEUIL_1);
            freq_seuil_2=freq_estimee*(1+FREQ_SEUIL_2);

            ecart_type_seuil_1=ecart_type_estime*(1+ECART_TYPE_SEUIL_1);
            ecart_type_seuil_2=ecart_type_estime*(1+ECART_TYPE_SEUIL_2);
            tension_seuil_1=tension_estimee*(1+TENSION_SEUIL_1);
            tension_seuil_2=tension_estimee*(1+TENSION_SEUIL_2);

#ifdef FLASH_MODE
            // attention :
            // ecrire des valeurs des seuils en mémoire FLASH
            // efface le secteur
                FLASH_Write_float(freq_seuil_1,ADDRESS_BASE_FLASH);
            FLASH_Write_float(freq_seuil_2,ADDRESS_BASE_FLASH+6);
            FLASH_Write_float(ecart_type_seuil_1,ADDRESS_BASE_FLASH+12);
            FLASH_Write_float(ecart_type_seuil_2,ADDRESS_BASE_FLASH+18);
            FLASH_Write_float(tension_seuil_1,ADDRESS_BASE_FLASH+24);
            FLASH_Write_float(tension_seuil_2,ADDRESS_BASE_FLASH+30);
                *(unsigned*)SYSCON=0x20; // BSO=0
                asm("nop;");
                asm("nop;");
                asm("nop;");
                asm("nop;");
                asm("nop;");
                asm("BIT SET IMASK 0x802000;"); /* Enable EPO
interrupt          */
                asm("bit set MODE1 IRPTEN; "); // enable interrupts
#endif
        }
    }
}

```

```

//allumages des LEDs

    if (freq_estimee<freq_seuil_1){
        LED_FFT_VERTE_ON;
    }
    else{
        if (freq_estimee<freq_seuil_2){
            LED_FFT_ORANG_ON;
        }
        else{
            LED_FFT_ROUGE_ON;
        }
    }

    if (tension_estimee>tension_seuil_1){
        LED_MOY_VERTE_ON;
    }
    else{
        if (tension_estimee>tension_seuil_2){
            LED_MOY_ORANG_ON;
        }
        else{
            LED_MOY_ROUGE_ON;
        }
    }

    if (ecart_type_estime<ecart_type_seuil_1){
        LED_VAR_VERTE_ON;
    }
    else{
        if (ecart_type_estime<ecart_type_seuil_2){
            LED_VAR_ORANG_ON;
        }
        else{
            LED_VAR_ROUGE_ON;
        }
    }
    asm(" bit set MODE1 IRPTEN; "); // Disable interrupts
}

float moyen_centre(float *p_data)
{
//    trier le tableau
    int i,k;
    float acc,temp;
    for(k=PERIODE_MOYENNE-1;k>0;k--){
        for (i=0;i<k;i++){
            if (p_data[i]>p_data[i+1]){
                SWAP(p_data[i],p_data[i+1]);
            }
        }
    }
//calcul de la moyenne
    acc=0;
    for (i=3 ; i<PERIODE_MOYENNE-3 ; i++)
    {
        acc += p_data[i];
    }
    acc=acc/(PERIODE_MOYENNE-6);
    return acc;
}

```

```

void process_buffer(float *p_data_L, float *p_data_R)
{
    int i, ind_max;
    float max, sum;

    realfft(p_data_L, TAILLE_BUFFER);
    for (i=200; i<TAILLE_BUFFER; i+=2)

        p_data_L[i]=p_data_L[i]*p_data_L[i]+p_data_L[i+1]*p_data_L[i+1];
//calcul de la valeur maximale
    max=0;
    for (i=200; i<TAILLE_BUFFER; i+=2) {
        if (p_data_L[i]>max) {
            max =p_data_L[i];
            ind_max=i;
        }
    }

    f_max=(float)FREQ_ECH/TAILLE_BUFFER*ind_max/2.0;

//calcul de la valeur moyenne de la tension
    sum=0;
    for (i=0; i<TAILLE_BUFFER; i++)
        sum += p_data_R[i];
    tension_moyenne = sum/TAILLE_BUFFER;

// calcul et l'écart type de la tension
    sum=0;
    for (i=0; i<TAILLE_BUFFER; i++)
        sum += p_data_R[i]*p_data_R[i];
    ecart_type = sqrt(sum/TAILLE_BUFFER -
tension_moyenne*tension_moyenne);
}

void realfft(float data[], unsigned long n)
{
    void fourl(float data[], unsigned long nn);
    unsigned long i, i1, i2, i3, i4, np3;
    float c1=0.5, c2, h1r, h1i, h2r, h2i;
    float wr, wi, wpr, wpi, wtemp, theta; //Double precision for the
trigonometric recurrences.
    theta=3.141592653589793/(float) (n>>1); // Initialize the recurrence.
    c2 = -0.5;
    fourl(data, n>>1);
    wtemp=sin(0.5*theta);
    wpr = -2.0*wtemp*wtemp;
    wpi=sin(theta);
    wr=1.0+wpr;
    wi=wpi;
    np3=n+3;
    for (i=2; i<=(n>>2); i++) { //Case i=1 done separately below.
        i4=1+(i3=np3-(i2=1+(i1=i+i-1)));
        h1r=c1*(data[i1]+data[i3]); //The two separate transforms are
separated out of data.
        h1i=c1*(data[i2]-data[i4]);
        h2r = -c2*(data[i2]+data[i4]);
        h2i=c2*(data[i1]-data[i3]);
        data[i1]=h1r+wr*h2r-wi*h2i; //Here they are recombined to form
the true transform of the original real data.
        data[i2]=h1i+wr*h2i+wi*h2r;
        data[i3]=h1r-wr*h2r+wi*h2i;
    }
}

```

```

        data[i4] = -h1i+wr*h2i+wi*h2r;
        wr=(wtemp=wr)*wpr-wi*wpi+wr; //The recurrence.
        wi=wi*wpr+wtemp*wpi+wi;
    }
    data[1] = (h1r=data[1])+data[2]; //Squeeze the first and last data
    together to get them all within the original array.
    data[2] = h1r-data[2];
}

/*Replaces data[1..2*nn] by its discrete Fourier transform, if isign is
input as 1; or replaces
data[1..2*nn] by nn times its inverse discrete Fourier transform, if isign
is input as -1.
data is a complex array of length nn or, equivalently, a real array of
length 2*nn. nn MUST
be an integer power of 2 (this is not checked for!).*/

void four1(float data[], unsigned long nn)
{
    unsigned long n,mmax,m,j,istep,i;
    float wtemp,wr,wpr,wpi,wi,theta; //Double precision for the
trigonometric recurrences.
    float tempr,tempi;
    n=nn << 1;
    j=1;
    for (i=1;i<n;i+=2) { //This is the bit-reversal section of the
routine.
        if (j > i) {
            SWAP(data[j],data[i]); //Exchange the two complex
numbers.
            SWAP(data[j+1],data[i+1]);
        }
        m=nn;
        while (m >= 2 && j > m) {
            j -= m;
            m >>= 1;
        }
        j += m;
    }
//Here begins the Danielson-Lanczos section of the routine.
    mmax=2;
    while (n > mmax) { //Outer loop executed log2 nn times.
        istep=mmax << 1;
        theta=6.28318530717959/mmax; //Initialize the trigonometric
recurrence.
        wtemp=sin(0.5*theta);
        wpr = -2.0*wtemp*wtemp;
        wpi=sin(theta);
        wr=1.0;
        wi=0.0;
        for (m=1;m<mmax;m+=2) { //Here are the two nested inner loops.
            for (i=m;i<=n;i+=istep) {
                j=i+mmax; //This is the Danielson-Lanczos formula:
                tempr=wr*data[j]-wi*data[j+1];
                tempi=wr*data[j+1]+wi*data[j];
                data[j]=data[i]-tempr;
                data[j+1]=data[i+1]-tempi;
                data[i] += tempr;
                data[i+1] += tempi;
            }
            wr=(wtemp=wr)*wpr-wi*wpi+wr; //Trigonometric recurrence.
            wi=wi*wpr+wtemp*wpi+wi;
        }
    }
}

```

```
        }
        mmax=istep;
    }
}
```

Les constantes qui sont stockées dans la mémoire flash sont les suivantes :

```
#define TAILLE_BUFFER 4096
#define PERIODE_MOYENNE 8
#define FREQ_ECH 48000

//pourcentage des seuils par rapport aux valeurs de la torche neuve
#define FREQ_SEUIL_1 0.047
#define FREQ_SEUIL_2 0.079
#define ECART_TYPE_SEUIL_1 0.2
#define ECART_TYPE_SEUIL_2 0.25
#define TENSION_SEUIL_1 -0.076
#define TENSION_SEUIL_2 -0.122
```


Liste des figures

Figure 1-1 : Températures de flamme et des particules pour la projection par flamme	5
Figure 1-2 : Température et vitesse des particules pour le procédé HVOF	6
Figure 1-3 : Les éléments d'un moteur d'avion utilisant un dépôt par projection plasma.....	9
Figure 1-4 : Schéma de fonctionnement d'une torche à plasma d'arc soufflé.....	16
Figure 1-5: Les trois modes d'injection de gaz plasmagènes	17
Figure 1-6 : Conductivité thermique (κ) du mélange Ar 75% - H ₂ 25% avec la température. 19	
Figure 1-7 : Conductivité électrique (σ) du mélange Ar 75% - H ₂ 25% avec la température . 19	
Figure 1-8 : Conductivité thermique (κ) pour des mélanges Ar - He avec la température.....	20
Figure 1-9 : Conductivité électrique (σ) pour des mélanges Ar - He avec la température	20
Figure 1-10 : Description de la zone cathodique [31].....	22
Figure 1-11 : Géométrie de l'anode et de la cathode (<i>partiellement de</i> [36]).....	24
Figure 1-12: Vue globale et éclatée d'une torche plasma Sulzer Metco F4-MB (PTF4) [36].	24
Figure 1-13 : Les trois signaux de tension selon le mode de fonctionnement [41].....	26
Figure 1-14 : Répartition de la tension aux bornes des électrodes d'une torche plasma.....	26
Figure 1-15 : Evolution du nombre de Reynolds (Re_s) pour la transition entre le mode "steady" et les modes oscillants ("Takeover" et "Restrike") [42]	27
Figure 1-16 : Calcul des facteurs utilisés dans la détermination de la valeur de mode.	28
Figure 1-17 : Schématisation du signal de tension en mode "restrike"	30
Figure 1-18 : schémas de la torche utilisée par Planche et du plasmatron utilisé par Kaminska	33
Figure 1-19 : Vérification expérimentale de la relation entre le son et la puissance d'un arc électrique [51].	37
Figure 1-20 : Evolutions des fréquences de tension et son émis par une torche plasma en fonction de la pression [47].	38
Figure 1-21 : L'expérience du cône de silence [48].	38
Figure 1-22 : Représentation des longueurs définissant le retard du signal optique.....	39
Figure 1-23 : Profil de vitesse, fonction de l'usure de la cathode.....	40
Figure 1-24 : Diffusion, décomposition et évaporation de la thorine dans la cathode [28].	41
Figure 1-25 : Influence du gaz sur la température du spot cathodique. [30].....	42
Figure 1-26 : la fissuration de dépôts par contamination par le tungstène.....	44
Figure 1-27 : Evolution avec le temps de la tension moyenne pour deux mélanges plasmagènes (ArH ₂ et SPRAL 22) [59].	45
Figure 1-28 : Evolution de la tension d'une torche plasma utilisée à courant constant [60]....	45
Figure 1-29 : Evolution du RMS pour la tension et le son (selon trois angles) [62].....	47
Figure 1-30 : Evolution d'un paramètre (RMS) sur 55h de fonctionnement [63].....	47
Figure 1-31 : Evolution de la fréquence et de l'amplitude des pics d'un spectre de tension [63]	48

Figure 1-32 : Schéma d'évolution des spectres de tension [65]	50
Figure 1-33 : Effet de l'érosion sur la qualité du dépôt	50
Figure 1-34 : Schéma de principe de l'alimentation électrique d'une torche plasma [66].....	53
Figure 1-35 : Caractéristiques statiques de la diode [66]	53
Figure 1-36 : Schémas de générateurs de courant: a) par thyristors, b) renverseur [67]	54
Figure 2-1 : Les différences entre l'anode labo (a) et l'anode PTF4 (b) – Photo et plans	58
Figure 2-2 : Différence entre l'injection vortex et l'injection axiale pour les gaz plasmagènes	59
Figure 2-3 : L'environnement de la torche.	59
Figure 2-4 : Schéma et photos du circuit d'eau de refroidissement.....	60
Figure 2-5 : Tableau de commande des circuits d'alimentation de la torche.	61
Figure 2-6 : La sonde différentielle.....	62
Figure 2-7 : la sonde ampérométrique.....	63
Figure 2-8 : Les trois systèmes d'acquisition du son émis par la torche plasma	64
Figure 2-9 : Schéma du circuit d'amplification du signal reçu du microphone DM-670.....	64
Figure 2-10 : Le montage expérimental dans sa globalité.	67
Figure 2-11 : Pistolet d'injection de pâte pour empreinte siliconée de l'intérieur des anodes..	69
Figure 3-1 : Principe d'acquisition, de traitement et de stockage des données de "NPSL4.vi" 73	
Figure 3-2 : Structure des fichiers d'enregistrement. <i>Exemple pour un fichier concernant les signaux de tension, récupérés sur l'oscilloscope à la plus haute résolution (voltage2.txt)</i>	74
Figure 3-3 : Les différentes échelles de temps imbriquées dans un signal de tension.....	75
Figure 3-4 : Signal de tension instantanée. 5000 points : A) sur 0,1s – B) zoom sur 0,01s.....	76
Figure 3-5 : Evolution de la tension moyenne locale et du RMS local au cours d'un tir-test. .	77
Figure 3-6 : Structure d'enregistrement des données pour les spectres de tension et du son ...	79
Figure 3-7 : Exemple de spectre de tension – <i>PTF4 – 6mm – Ar-H₂ (45-15L/min) – Electrodes neuves – Résolution du signal d'origine 20μs – Résolution fréquentielle 10Hz.</i>	80
Figure 3-8 : Evolution de la fréquence maximale locale et de l'amplitude maximale locale... 81	
Figure 3-9 : Position du microphone par rapport à la sortie de tuyère de la "torche labo"	84
Figure 3-10 : Face avant du VI d'acquisition pour la campagne sur l'influence du courant	84
Figure 3-11 : Face arrière du VI d'acquisition pour la campagne sur l'influence du courant. .	85
Figure 3-12 : Echelle des couleur pour le diagramme 3D de l'historique des spectres.....	85
Figure 3-13 : Diagramme TFA pour le son – historique des spectres sur le temps d'un tir.	86
Figure 3-14 : Influence de l'intensité moyenne (I) sur les fréquences caractéristiques du son (f _l) pour deux états d'érosion (électrodes neuves (<i>new</i>) et électrodes usées (<i>worn</i>)).	87
Figure 3-15 : spectre basse fréquence de tension – <i>PTF4 – 6mm – Ar-H₂ (45-15L/min) – 600A – Electrodes neuves – Résolution du signal d'origine 20μs – Résolution spectrale 2,1Hz</i>	89
Figure 3-16 : Spectre haute fréquence de tension – <i>PTF4 – 6mm – Ar-H₂ (45-15L/min) – 600A – Electrodes neuves – Résolution du signal d'origine 20μs – Résolution spectrale 2,1Hz</i>	89

Figure 3-17 : Allure des signaux de courant à 600 et 300A – PTF4 – 6mm – Ar-H ₂ (45-15L/min) – Electrodes neuves – Résolution du signal d'origine 200μs	90
Figure 3-18 : Les signaux de tensions à 600 et 300A – PTF4 – 6mm – Ar-H ₂ (45-15L/min) – Electrodes neuves – Résolution du signal d'origine 200μs.....	90
Figure 3-19 : Spectre des enveloppes de tensions à 600 et 300A – PTF4 – 6mm – Ar-H ₂ (45-15L/min) – Electrodes neuves – Résolution du signal d'origine 100μs – Résolution spectrale 2,1Hz.....	91
Figure 3-20 : Influence du courant sur les spectres de tension de basses fréquences – PTF4 – 6mm – Ar-H ₂ (45-15L/min) – Electrodes neuves – Résolution du signal d'origine 100μs – Résolution spectrale 4,2Hz.....	92
Figure 3-21 : Influence du courant sur les spectres de tension de hautes fréquences – PTF4 – 6mm – Ar-H ₂ (45-15L/min) – Electrodes neuves – Résolution du signal d'origine 100μs – Résolution spectrale 42,6Hz.....	92
Figure 3-22 : Evolution de la tension moyenne en fonction du courant pour deux états d'usure	93
Figure 3-23 : Corrélation adimensionnelle de l'intensité et de la fréquence principale liée aux fluctuations du pied d'arc	95
Figure 4-1 : Evolution du courant au démarrage et conséquence sur l'érosion de l'anode.....	97
Figure 4-2 : Schéma de principe du circuit secondaire utilisé pour le démarrage	98
Figure 4-3 : Evolution du courant et conséquence sur l'érosion avec le circuit secondaire.....	98
Figure 4-4 : Evolution transitoire du courant lors d'un démarrage avec le circuit secondaire.	99
Figure 4-5 : Evolution transitoire du courant lors de l'ouverture du circuit secondaire.....	99
Figure 4-6 : Influence de l'érosion sur la tension moyenne globale (V ^x pour PT1).....	103
Figure 4-7 : Schéma de la dérive vers l'amont du pied d'arc avec le temps de fonctionnement	104
Figure 4-8 : Influence de l'érosion sur l'écart quadratique moyen global (RMS ^x pour PT1).	105
Figure 4-9 : Influence de l'érosion sur la fréquence maximale globale de tension (F _V ^x pour PT1).....	105
Figure 4-10 : Influence de l'érosion sur l'amplitude moyenne globale des spectres de tension (A _V ^x pour PT1).	106
Figure 4-11 : Influence de l'érosion sur la fréquence moyenne globale des spectres du son (F _S ^x pour PT1).....	108
Figure 4-12 : Influence de l'érosion sur l'amplitude moyenne globale des spectres du son (A _S ^x pour PT1).....	108
Figure 4-13 : Influence de l'érosion sur la tension moyenne globale (V ^x pour PT4).....	110
Figure 4-14 : Influence de l'érosion sur l'écart quadratique moyen global (RMS ^x pour PT4)	111
Figure 4-15 : Influence de l'érosion sur la fréquence moyenne globale de tension (F _V ^x pour PT4).....	112
Figure 4-16 : Influence de l'érosion sur l'amplitude moyenne globale des spectres de tension (A _V ^x pour PT4).	113

Figure 4-17 : Influence de l'érosion sur la fréquence moyenne globale des spectres de son (F_S^x pour PT4).....	114
Figure 4-18 : Influence de l'érosion sur l'amplitude moyenne globale des spectres de son (A_S^x pour PT4).....	115
Figure 4-19 : La structure fractale de l'ondelette mère de Daubechies	119
Figure 4-20 : Couverture dans le plan temps – fréquence de la base de fonctions d'une transformées de Fourier.....	120
Figure 4-21 : Couverture dans le plan temps – fréquence de la base de fonctions d'une transformées en ondelettes de Daubechies.....	120
Figure 4-22 : Interface utilisateur du programme de transformées en ondelettes.....	121
Figure 4-23 : Fenêtre de résultat du calcul du logiciel pour les transformées en ondelettes : Diagramme temps - fréquence – amplitude	122
Figure 4-24 : Evolution des amplitudes maximales des diagrammes TFA pour la "campagne des 37 tirs".....	126
Figure 4-25 : Effet de la sélection de points sur les diagrammes TFA pour deux signaux....	127
Figure 4-26 : Effet du filtrage de pics sur les diagrammes TFA pour deux signaux	128
Figure 4-27 : Schéma de définitions des seuils et des zones pour le contrôle de l'érosion	131
Figure 5-1 : Schéma fonctionnel du module	133
Figure 5-2 : Les couleurs des diodes en fonction de la valeur mesurée des trois paramètres	134
Figure 5-3 : Le module de contrôle de l'érosion des électrodes.....	134
Figure 5-4 : Schéma bloc de l'EZ-Kit Lite.....	136
Figure 5-5 : Répartition des composants sur la carte EZ-Kit Lite	136
Figure 5-6 : La connectique d'entrée de la carte DSP	137
Figure 6-1 : Schématisation de la paroi de l'anode frappée par le pied d'arc.....	143
Figure 6-2 : Graphique de répartition des temps de stagnation du pied d'arc pour deux états d'usure des électrodes.....	149
Figure 6-3 : Durée des temps de stagnation des pieds d'arc (τ de V_{Min}) en fonction de la tension minimale (V_{Min}).	151

Liste des tableaux

Table 1-1 : Comparaison des masses volumiques relatives pour différents procédés de projection.....	8
Table 3-1 : Données pour le calcul du niveau sonore avec le gain du microphone Bruël&Kjær	83
Table 4-1 : Liste exhaustive des paramètres globaux suivis avec le temps de fonctionnement.	101
Table 4-2: Récapitulatif de l'historique des tirs-tests pour la torche PT1	102
Table 4-3 : Récapitulatif de l'historique des tirs-tests pour la torche PT4	109
Table 4-4 : Référence des zones de sélection des points pour le calcul d'un diagramme TFA	126
Table 4-5 : Récapitulatif de toutes les évolutions des paramètres suivis sur PT1 et PT4.....	130
Table 5-1 : Table de correspondance des FLAG de la carte DSP avec les diodes du boîtier.	138
Table 5-2 : Valeurs des trois paramètres en fonction du courant et les pourcentages d'évolutions en fonction de la valeur initiale (code de couleur).....	141
Table 5-3 : Etat des diodes de la tension moyenne et de la fréquence du son en fonction de l'intensité du courant.	141
Table 6-1 : Répartition des temps de stagnation du pied d'arc pour deux états d'usure des électrodes.....	148

Liste des équations

Équation 1-1 : Equation de conservation de l'énergie.....	18
Équation 1-2 : Définition du flux thermique.....	18
Équation 1-3 : Loi d'Ohm pour le courant d'arc.....	18
Équation 1-4 : Système d'équations différentielles pour le modèle Ellenbaas-Heller	18
Équation 1-5 : Loi de Richardson - Dushman pour l'émission thermoionique des électrons.....	21
Équation 1-6 : Transfert thermique à l'anode.....	23
Équation 1-7 : Loi d'Ohm à l'anode.....	23
Équation 1-8 : Relation entre l'épaisseur de la couche limite (e') et le nombre de Reynolds ..	27
Équation 1-9 : Relation entre l'épaisseur de la CLF et la durée de vie du pied d'arc.....	29
Équation 1-10.....	31
Équation 1-11.....	31
Équation 1-12.....	31
Équation 1-13.....	31
Équation 1-14.....	31
Équation 1-15 : la durée de vie du pied d'arc, fonction des paramètres d'entrée	32
Équation 1-16.....	32
Équation 1-17.....	32
Équation 1-18.....	33
Équation 1-19.....	33
Équation 1-20.....	33
Équation 1-21.....	33
Équation 1-22.....	35
Équation 1-23.....	35
Équation 1-24 : Equation de propagation d'un son généré par un plasma	35
Équation 1-25 : Relation de l'amplitude des ondes acoustiques avec la puissance instantanée.	37
Équation 1-26 : Définition du retard tension-lumière (cf.....	39
Équation 1-27 : Le retard lumineux en fonction de la tension minimale.....	40
Équation 1-28 : Définition du RMS	46
Équation 1-29 : Définition du facteur de crête et du kurtosis.	46
Équation 3-1 : Définition de la tension moyenne locale V_k^x	77
Équation 3-2 : Définition de l'écart quadratique moyen local RMS_k^x	77
Équation 3-3 : Définition de la tension moyenne globale V^x et de son écart type ε_{V^x}	78
Équation 3-4 : Définition du RMS global RMS^x et de son écart type ε_{RMS^x}	78
Équation 3-5 : Définition de la fréquence moyenne globale pour la tension et de son écart type	81
Équation 3-6 : Définition de l'amplitude moyenne globale pour les pics des spectres de tension	

et de son écart type	81
Équation 3-7 : Définition de la fréquence moyenne globale pour le son et de son écart type .	81
Équation 3-8 : Définition de l'amplitude moyenne globale pour les pics des spectres de son et de son écart type	81
Équation 3-9 : Définition du niveau sonore (dB).....	82
Équation 3-10: Définition des nombres adimensionnels S_i et S_f	94
Équation 6-1 : profil généralisé de température de surface.....	143
Équation 6-2 : profil de la température de surface au centre du pied d'arc.	144
Équation 6-3	144
Équation 6-4	144
Équation 6-5 : Développement asymptotique de la fonction <i>erfc</i>	144
Équation 6-6	144
Équation 6-7 : Estimation de la température de surface au cœur du pied d'arc	144
Équation 6-8 : Estimation du temps nécessaire pour atteindre la température de fusion.....	145
Équation 6-9 : Estimation de t_f avec l'effusivité η	145
Équation 6-10 : Estimation de la densité de flux q	145
Équation 6-11 : Estimation du temps nécessaire pour atteindre la température de fusion.....	145
Équation 6-12 : Relation entre t_f pour le cuivre et l'aire du pied d'arc avec $I=600A$	146
Équation 6-13 : Relation entre t_f pour le tungstène et l'aire du pied d'arc avec $I=600A$	146

David RIGOT

Contribution à l'étude de l'érosion des électrodes de torches à plasma d'arc pour la projection par suivi en ligne des signaux de tension et de son

Thèse :

Doctorat de l'Université de Limoges – Matériaux Céramiques et Traitements de Surface, Limoges 2003

Résumé :

En projection thermique, les conséquences de l'érosion des électrodes d'une torche plasma peuvent être dommageables pour un dépôt en cours de réalisation (écaillage, mauvaise qualité, etc.). Ce travail de thèse a consisté à suivre dans le temps de fonctionnement de la torche, depuis la mise en place d'électrodes neuves, jusqu'à leur remplacement, l'évolution de nombreux paramètres liés aux signaux émis par la torche (tension aux bornes des électrodes et signal acoustique) et à choisir ceux qui étaient les plus pertinents pour rendre compte de l'érosion. Les trois paramètres retenus sont la tension moyenne et l'écart quadratique moyen du signal de tension ainsi que la fréquence du pic principal du spectre du signal acoustique. Cette étude a été menée avec un logiciel d'acquisition et de traitement des données que nous avons développé sous Labview, dont l'algorithme est désormais intégré dans un module autonome construit autour d'un DSP (Digital Signal Processor) qui affiche suivant la comparaison avec deux seuils, l'état des trois paramètres. Un modèle thermique de l'érosion est également proposé.

Mots clés :

Projection thermique, torche à plasma d'arc soufflé, érosion des électrodes, contrôle en ligne, traitement du signal, FFT, transformées en ondelettes, prototype industriel, technologie DSP.

Abstract :

In plasma spraying, the consequences of the wear of the electrodes of d.c. plasma torches may be catastrophic for a coating (bad quality, peeling, etc.). This paper presents a new method that has consisted in monitoring along the working hours of the torch, starting with brand new electrodes ("initial time"), till they are replaced, the evolution of many parameters in relation with the signals emitted by the torch (voltage at the edges of the electrodes and sound). This study has allowed choosing those parameters that were the more relevant for giving an account of the erosion. They are the mean voltage, the root mean square value of the voltage, and the frequency of the main peak in the spectrum of the sound and especially the evolution of theirs ratio relatively to the values obtained at the initial time. This study was performed with a software, developed with Labview on a PC, now replaced by an electronic device. The latter, designed with the DSP (Digital Signal Processor) technology, displays, on light indicators, the state of the three parameters according to their comparison with two thresholds. A thermal simulation of the erosion is also proposed.

Key words :

Thermal spraying, blown arc plasma torch, electrodes wear, on-line control, signal treatment, FFT, wavelet transforms, industrial prototype, DSP technology