

JOURNAL INTERNATIONAL DE TECHNOLOGIE, DE
L'INNOVATION, DE LA PHYSIQUE, DE L'ENERGIE ET DE
L'ENVIRONNEMENT

**Usure de l'électrode dans une torche de
découpe par plasma d'air :
Comparaison de deux tensions et de deux
diamètres d'insert en hafnium
- Topologie et mécanismes de destruction -**

S. Chabert, J.-J. Gonzalez, P. Freton



ISSN : 2428-8500

DOI : 10.52497/jitipee.v8i1.345



Le texte seul est utilisable sous licence [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Les autres éléments (illustrations, fichiers annexes importés) sont « Tous droits réservés », sauf mention contraire.

Usure de l'électrode dans une torche de découpe par plasma d'air Comparaison de deux tensions et de deux diamètres d'insert en hafnium - Topologie et mécanismes de destruction -

Sébastien Chabert ⁽¹⁾⁽²⁾, Jean-Jacques Gonzalez⁽¹⁾, Pierre Freton⁽¹⁾

(1)Laplace, UMR 5213 CNRS-UPS-INP, Université Paul Sabatier, 118 route de Narbonne, 31062
Toulouse Cedex, France.

(2) Gys SAS, 1 Rue de la Croix des Landes, 53940 Saint-Berthevin, France.

chabert@laplace.univ-tlse.fr

Résumé : Pour deux configurations d'électrode utilisées sur une torche de découpe par plasma d'air, une étude expérimentale est menée. Elle s'intéresse à l'effet de la tension d'arc sur leur usure. Ces deux configurations d'électrodes du commerce présentent des compositions chimiques ainsi que des inserts en hafnium de diamètres différents. Des campagnes expérimentales sont menées afin d'étudier la profondeur des cratères à l'aide d'un comparateur à aiguille. Ces mesures sont complétées par des observations au microscope électronique.

Mots clés : découpe plasma, usure de cathode, insert en hafnium, étude expérimentale

Abstract: An experimental study was carried out on two electrode configurations used on an air plasma cutting torch. It focuses on the effect of arc voltage on electrode wear. These two commercial electrode configurations have different chemical compositions and hafnium inserts with different diameters. Experimental campaigns were carried out to study the depth of the craters using a needle comparator. These measurements are supplemented by electron microscope observations.

Keywords : plasma cutting, cathode wear, hafnium insert, experimental study

Mots clés : découpe plasma, usure de cathode, insert en hafnium, étude expérimentale

DOI : 10.52497/jitipee.v8i1.345

Introduction

La découpe par plasma d'arc consiste à établir un arc électrique entre l'électrode de la torche (la cathode) et le matériau à découper (l'anode). L'interaction de l'arc avec le matériau conduit à sa fusion. Le gaz plasmagène injecté à fort débit permet d'éjecter le métal en fusion par la force vive du jet. Ce procédé s'utilise sur n'importe quel matériau conducteur et permet d'atteindre des qualités de coupe satisfaisantes (norme ISO-9013) avec des vitesses d'environ 700 mm/min sur de l'acier doux de 25 mm d'épaisseur (plasma d'air à 125 A). En revanche, un des points faibles de cette technologie est l'usure de la cathode, ce qui nécessite de la remplacer régulièrement et entraîne des arrêts de production. Afin de donner à la cathode en cuivre (qu'on désignera par la suite comme "électrode" comme c'est l'usage dans l'industrie) une plus grande durée de vie, celle-ci est pourvue d'un insert en hafnium, matériau réfractaire plus résistant à l'érosion qui survient lors du fonctionnement.

Cette érosion provoque le creusement d'un cratère dans la tête de l'électrode. Lorsque celui-ci devient trop profond (typiquement 1mm sur la torche étudiée), l'électrode est détruite.

Nous présentons dans un premier temps la torche utilisée ainsi que les configurations des électrodes. Nous illustrons ensuite l'usure des électrodes. Le protocole expérimental est exposé avec les principaux résultats.

1. Présentation de la torche

1.1. La torche

La torche Toparc AT-125, utilisée dans cette étude, est démontable et constituée de plusieurs éléments qui assurent la circulation de l'air dans différents circuits (Figure 1).

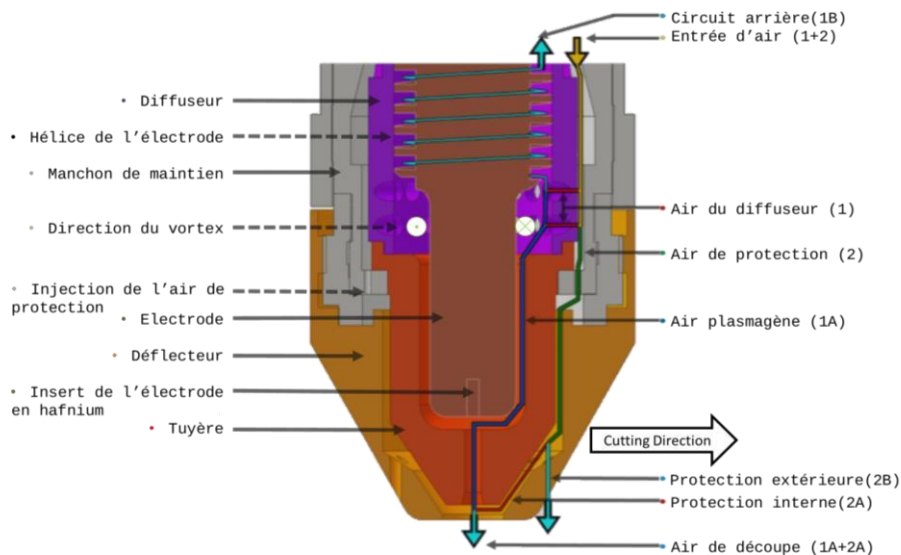


Figure 1: Schéma de la torche AT-125 et désignation des trajets de l'air.

L'air de protection (2) vient entourer le jet de plasma et protège la torche contre les projections de métal en fusion, en plus de contribuer au refroidissement des pièces.

L'air du circuit arrière (1B) contribue au refroidissement et permet la séparation de l'électrode et de la tuyère pour l'amorçage lift : initialement, elles sont maintenues en contact par un ressort qui pousse l'électrode. Un faible courant les traverse. L'air comprimé est ensuite injecté, séparant ces deux pièces. Un pont fondu s'établit et le courant transite par un arc dit pilote, non transféré qui est émis par l'électrode (cathode) et reboucle dans la tuyère (anode). Une partie du courant de cet arc pilote peut également transiter par la pièce à découper (également anode) et lorsque ce courant est suffisamment important, la tuyère est déconnectée. Tout le courant transite alors par l'arc (alors dit transféré) et la pièce à découper et la découpe peut commencer.

L'air plasmagène (1A) est injecté en vortex le long de l'électrode par les trous du diffuseur, qui présentent une composante tangentielle. Cela crée, en aval de l'électrode, un effet de centrifugation qui repousse l'air le plus lourd (donc le plus froid et le moins conducteur) en périphérie. Le vortex permet donc, in fine, de concentrer le courant sur le centre de l'électrode, donc sur l'insert en hafnium.

1.2. Les électrodes

Le Tableau 1 présente les deux configurations d'électrode étudiées. Quelle que soit la configuration considérée, l'électrode est pourvue d'un insert en hafnium au centre de sa tête (Figure 1). Contrairement au cuivre, ce matériau réfractaire possède une forte résistance à l'érosion (fusion à 2233°C, ébullition à 4603 °C). Lorsque les torche fonctionnent, l'insert en hafnium forme en surface un bain de fusion qui tient en place grâce à sa tension de surface. Le cuivre, qui fond à 1085°C et bout à 2562 °C, s'il constituait l'entièreté de l'électrode, serait vaporisé très vite. Ainsi, centrer le jet de plasma sur l'insert en hafnium contribue à augmenter la durée de vie de l'électrode. En revanche le hafnium est un matériau très onéreux (2000€/kg en 2023), difficile à usiner et sa conductivité électrique est de deux ordres de grandeurs plus basse que celle du cuivre. Le hafnium est également vingt fois moins bon conducteur thermique que le cuivre. Il est donc exclu d'utiliser des électrodes en hafnium massif qui subiraient de gros échauffements engendrant une fusion destructrice, et qui de surcroît coûteraient une centaine d'€/pièce contre quelques € avec le design actuel. L'insert en Hafnium doit être tel que sa dimension permette l'accrochage de l'arc mais d'un diamètre pas trop grand afin que sa périphérie soit refroidie par le cuivre dans lequel il est inséré.

	Configuration A	Configuration B
Fraction massique du corps	0.996 Cuivre 0.004 Soufre	0.996 Cuivre 0.004 Tellure
Fraction massique de l'insert	0.98 Hafnium 0.02 Zirconium	0.97 Hafnium 0.03 Zirconium
Diamètre de l'insert (mm)	1.16	1.33
Constructeur	Tecmo	Hypertherm

Tableau 1: Caractéristiques des électrodes étudiées



Figure 2. : Configuration des électrodes A (en haut) et B (en bas).

Les électrodes A et B présentent quelques différences (Tableau 1 et Figure 2). Au niveau des alliages, elles sont minimales et sont dues à l'approvisionnement des matériaux. En revanche la configuration B présente une surface de hafnium (31 % plus grande).

A l'origine l'électrode B s'utilise dans une torche quasi identique à celle de notre étude, mais ne comportant pas de ressort (pour l'amorçage lift) puisqu'il est intégré à l'électrode. Pour utiliser l'électrode B dans la torche *AT-125*, il suffit d'en retirer le ressort et elle est alors parfaitement compatible puisqu'elle a les mêmes dimensions que la A.

1.3. Usure et fin de vie des électrodes

Au fur et à mesure de l'utilisation de l'électrode, de la matière est ablatée. Au début cette usure ne concerne que l'insert en hafnium, dont une partie peut être fondue et déplacée en périphérie, recouvrant du cuivre. Après quelques minutes de coupe (entre 6 et 12 minutes dans nos expériences) le cuivre commence également à être érodé. La profondeur de cratère est un indicateur d'usure reconnu, utilisé dans l'industrie [1] ainsi que dans cette étude. Deux phénomènes ont été identifiés :

- L'usure par évaporation qui se produit continuellement durant la coupe [2] : le bain de fusion du hafnium subit une évaporation continue. Seule une faible proportion du métal vaporisé quitte effectivement l'électrode et contribue à l'usure par évaporation. Sous l'effet des forces en présence (électriques, hydrauliques) une grande partie des vapeurs métalliques retourne en effet dans le bain de fusion. Cette usure est donc dépendante de la durée de coupe cumulée, indépendamment des cycles.
- L'usure due aux démarrages et arrêts, expliquée par Nemchinsky [3] et observée par Peters *et al.* [4]. Elle tient au fait qu'à chaque arrêt, le hafnium liquide crée une couche d'oxyde d'hafnium en se solidifiant qui est expulsé à chaque nouvel amorçage. Cette usure est donc dépendante des cycles de coupe, indépendamment de la durée de coupe.

Quant à l'usure cyclique, lorsque l'électrode arrive en fin de vie, elle est détruite très brutalement dans une série de claquements secs. Un panache de lumière verte apparaît dû à la grande quantité de cuivre ablaté (Figure 3) qui ensemence alors le plasma. Ce phénomène dure quelques secondes puis le plasma s'éteint et l'électrode est définitivement hors d'usage. Cette fin brutale achève l'usure progressive qu'on observe pendant la vie de l'électrode.

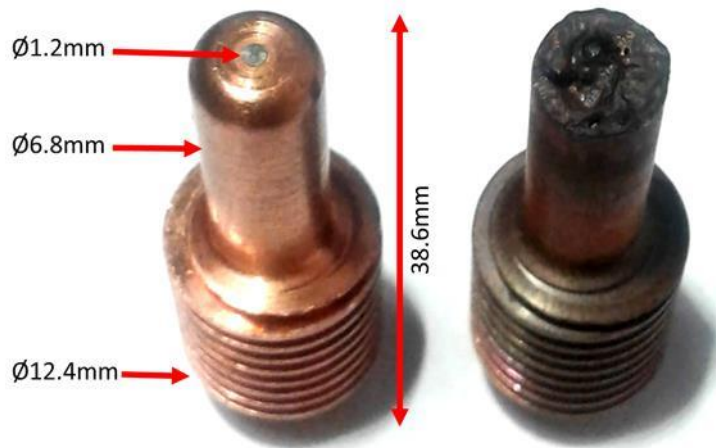


Figure 3: Electrodes neuve (à gauche) et détruite (à droite).

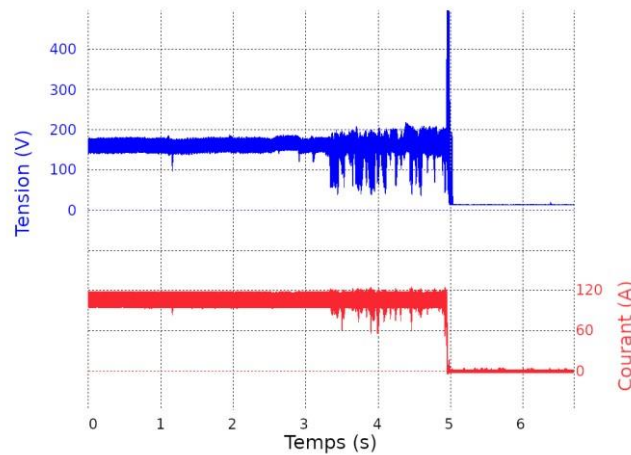


Figure 4 : Exemple de mesures de la tension et du courant lors de la destruction de l'électrode.

2. Expérience

Nous avons mené des études permettant d'établir des comparaisons et de discuter de l'effet de la valeur de la tension sur l'usure de l'électrode pour les deux configurations.

2.1. Protocole expérimental

Nous utilisons un générateur à plasma *Neocut105* de la société Gys, monté avec une torche *TopArc AT-125* (équipée d'un jeu de consommables calibrés pour la coupe à 105A) (Figure 3) sur une table de coupe XYZ référence Tecmo *Autotec*. La coupe s'effectue sur des tôles d'acier S355 d'épaisseur 4mm avec les paramètres renseignés dans le Tableau 2.

Paramètres	Valeurs	
<i>Tension</i>	160 V	220V
<i>Trajet</i>	Zigzag avec interligne de 3 mm	Zigzag avec interligne de 8 mm
<i>Vitesse</i>	1000 mm/min	300 mm/min
<i>Courant</i>	105 A	

Pression en sortie de poste	5 bar
-----------------------------	-------

Tableau 2 : Paramètres de coupe.

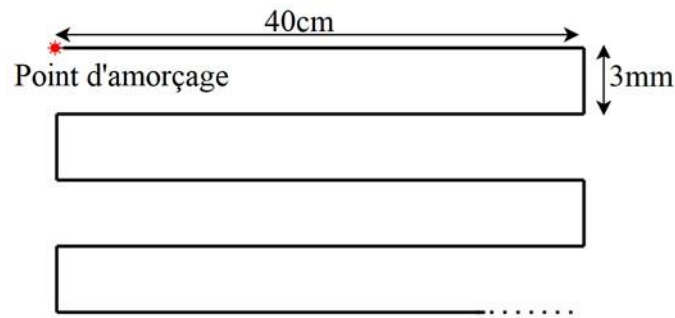


Figure 5 : Schéma du parcours de coupe avec un interligne de 3mm.

La vitesse et la taille de l'interligne (Figure 5) sont choisies pour permettre la régulation de la tension à la valeur demandée tout en minimisant la consommation de tôles et leur manutention. En effet, à tension plus importante, les saignées sont plus larges, il faut donc les espacer davantage pour que, à chaque passage, l'arc puisse s'accrocher facilement sans quoi il risque de s'éteindre ou sa tension de varier fortement.

160 V est une valeur de tension usuelle pour cette torche. Les tensions maximales, préconisées pour les plus grandes épaisseurs de tôle, 40 mm et plus, plafonnent à 190 V. Nous avons donc choisi 220 V comme seconde tension pour voir l'impact d'une tension élevée par rapport aux situations pratiques rencontrées par cette torche, afin d'amplifier l'éventuel effet de cette tension.

2.2. Essais en tension avec électrode A

Nous effectuons des cycles de coupe de 6 minutes. Il y a un amorçage pour chacun des cycles.

2.2.1. Mesures

Pour quantifier l'usure des électrodes, nous avons utilisé un comparateur à aiguille Mitutoyo 2046S pour mesurer la profondeur du cratère maximale creusé dans l'insert en hafnium après chacun des cycles de 6 minutes de coupe. Il permet une mesure maximale de 10 mm avec une précision de $\pm 12\mu\text{m}$. Entre deux cycles, il a fallu démonter la tête de torche, effectuer la mesure et remonter la torche. Le temps de coupe jusqu'à la destruction, a été cumulé, il définit la durée de vie de l'électrode.

Enfin, nous avons réalisé des cartographies 3D avec un microscope Keyence VHX-6000. Cela a permis d'obtenir des clichés au fur et à mesure des cycles, afin d'observer l'érosion de la tête de l'électrode. Des précautions ont été prises afin de toujours placer l'électrode dans la même position d'un cliché au suivant pour pouvoir les comparer dans le temps. Ces clichés sont présentés dans la section 2.3.2.

2.2.2. Résultats

Les durées de vie et les profondeurs maximales de cratère sont rapportées dans le Tableau 3. Parfois, d'un essai au suivant, la profondeur maximale peut diminuer. Nous avons confirmé ce

phénomène par des observations au microscope. Il est dû à la réorganisation du métal fondu avant sa solidification. En revanche, le volume des cratères (mesuré sur les cartographies 3D) augmente bel et bien entre chaque essai successif.

Essais (tension et numéro)	Profondeur maximale de cratère (µm)						
	160 V_1	160 V_2	160 V_3	160 V_4	220 V_1	220 V_2	220V_3
Temps de coupe cumulé (min)							
6	320	360	350	150	350	340	340
12	600	590	450	200	410	320	390
18	1000	non mesuré	640	320	400	390	500
24	1000	900	700	420	500	590	520
30	950	1000	760	520	750	630	510
36	1070	-	940	650	-	900	980
42	1260	-	1250	890	-	-	780
48	800	-	-	1070	-	-	650
54	880	-	-	1200	-	-	700
60	-	-	-	1230	-	-	900
66	-	-	-	980	-	-	1010
72	-	-	-	1100	-	-	800
80	-	-	-	-	-	-	non mesuré
Durée de vie	57 min40 s	36 min	45 min 55 s	72 min	35 min	46 min 35 s	88 min

Tableau 3 : Résultats des essais en tension avec l'électrode A.

Ces résultats sont représentés sur la Figure 6. Notons que la profondeur réelle du cratère entre le dernier point de mesure et la destruction n'est pas connue alors nous l'avons représentée par

un trait rouge horizontal jusqu'au moment de la destruction symbolisé par une icône d'explosion rouge.

Nous constatons une grande dispersion dans les durées de vie des électrodes sans corrélation avec les taux de creusement du cratère. Par exemple l'essai 160V_1 montre une érosion très rapide au début mais présente une durée de vie intermédiaire. Ces essais ne permettent donc pas de statuer quant à l'impact de la tension sur l'usure.

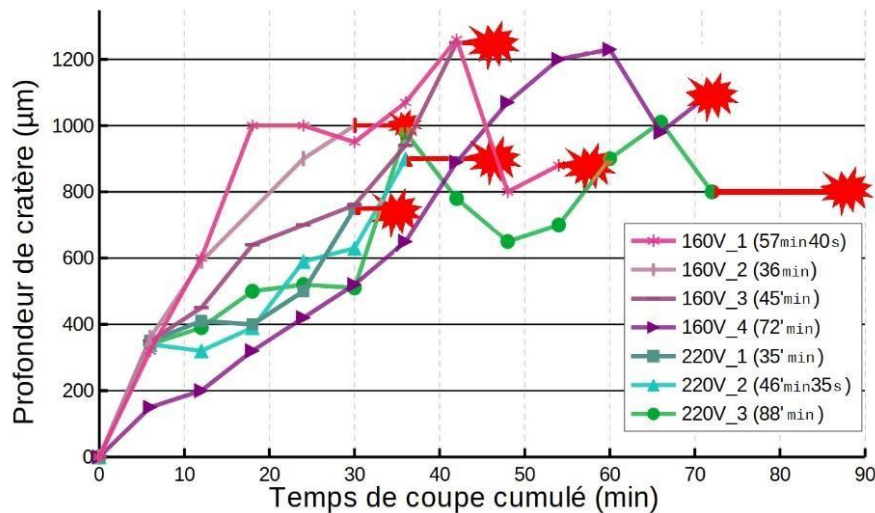


Figure 6: Résultats des essais d'usure avec électrode A.

2.3. Essais en tension avec électrode B

Cette fois, nous avons effectué des cycles de coupes ininterrompus. De précédentes mesures ont pu montrer que les amorçages n'ont un impact significatif sur l'usure que lorsqu'ils sont suffisamment nombreux (plus d'une centaine), ce qui n'est pas le cas ni dans ces essais ni dans ceux décrits dans la section 2.2.

2.3.1. Mesures

Pour réduire le temps d'expérimentation, nous avons seulement chronométré la durée de vie des électrodes, soit le temps de coupe cumulé depuis l'amorçage jusqu'à la destruction.

Sur une série supplémentaire, nous avons également observé la tête d'une électrode après des cycles de 6 minutes (ou multiple de 6 minutes). Nous avons réalisé des cartographies 3D suivant le même protocole que celui détaillé dans la section 2.2.1

2.3.2. Résultats

Les durées de vie observées et des informations statistiques sont données dans le Tableau 4 pour comparer les résultats des deux campagnes.

Ces résultats confirment que les électrodes B présentent beaucoup moins de dispersion de durée de vie lors de ces coupes longues. Par ailleurs, en comparant leurs performances sous 160 et

220 V, on pourrait penser à première vue qu'une tension plus élevée augmente la durée de vie des électrodes, or pour la configuration A, la très grande dispersion dans les durées de vie rend difficile toute conclusion. Pour la configuration B, la dispersion est bien moindre. L'écart entre les durées de vie moyennes à 49.3 et 52.5 minutes n'est pas statistiquement significatif.

Cela signifie que, pour l'électrode B et les tensions considérées, réalistes par rapport à la pratique (pour la torche AT-125), la durée de vie de l'électrode n'est pas fortement dépendante des valeurs de tensions.

Durées de vie (min)	Configuration A		Configuration B	
	160 V	220 V	160 V	220 V
Essai				
1	57.6	35	50.5	50.3
2	36	46.5	53	49.5
3	45.55	88	41	43.5
4	72	-	57	54
5	-	-	45	65
Moyenne (min)	52.8	56.5	49.3	52.5
Moyenne sur les deux tensions (min)	54.4		50.9	
Ecart-type (min)	15.6	27.9	6.8	4.4
Ecart-type sur les deux tensions (min)	19.6		7	
Amplitude (min)	88-36 = 52		41 - 65 = 24	

Tableau 4: Résultats comparatifs *sur l'influence de la valeur de la tension pour les deux configurations A&B de l'électrode*

2.4. Creusement des cratères

2.4.1. Creusement au cours du temps pour trois cas

Les Figures 7, 8 et 9 montrent des cartographies 3D prises après chaque cycle de 6 minutes de coupe lors des essais à 220V en configuration A :

- Figure 7 : Tous les clichés de 220V_1.
- Figure 8 : Tous les clichés de 220V_2.
- Figure 9 : Les 7 clichés de 220V_2 (les cycles postérieurs de cette série n'ont pas donné suite à une cartographie 3D car le temps de manipulation était limité).

Ces figures permettent d'observer l'évolution de la tête de l'électrode. Les durées de vie des électrodes sont indiquées entre parenthèses dans les légendes. Le chiffre en noir encadré de blanc est la profondeur maximale en μm . Le cercle magenta indique la position de l'insert en hafnium.

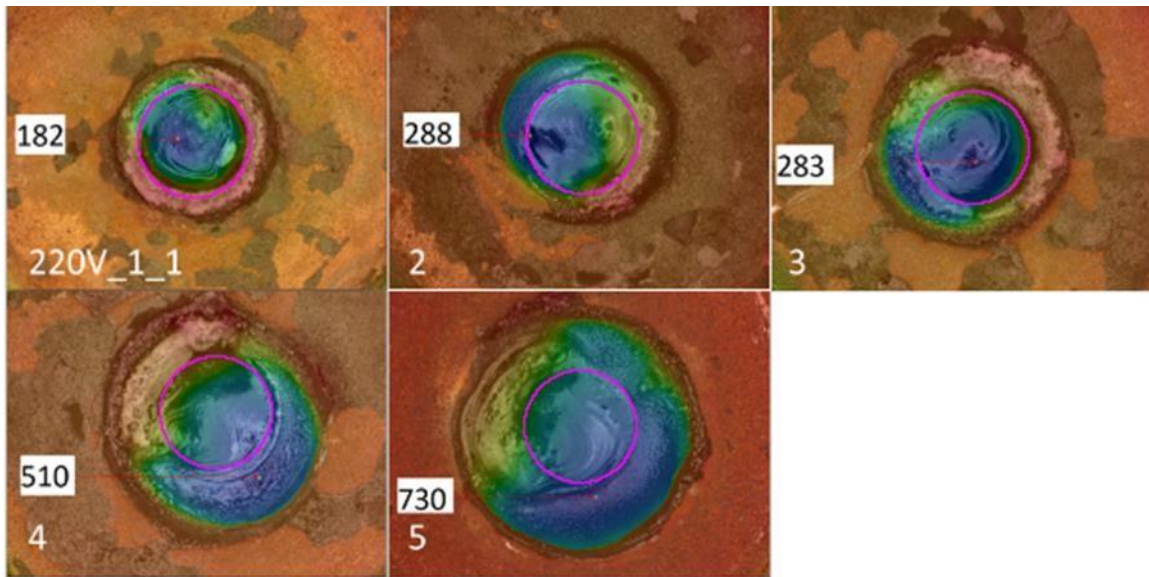


Figure 7 : Evolution de la profondeur sur la tête de l'électrode essai Configuration A 220V_1 (35 min).

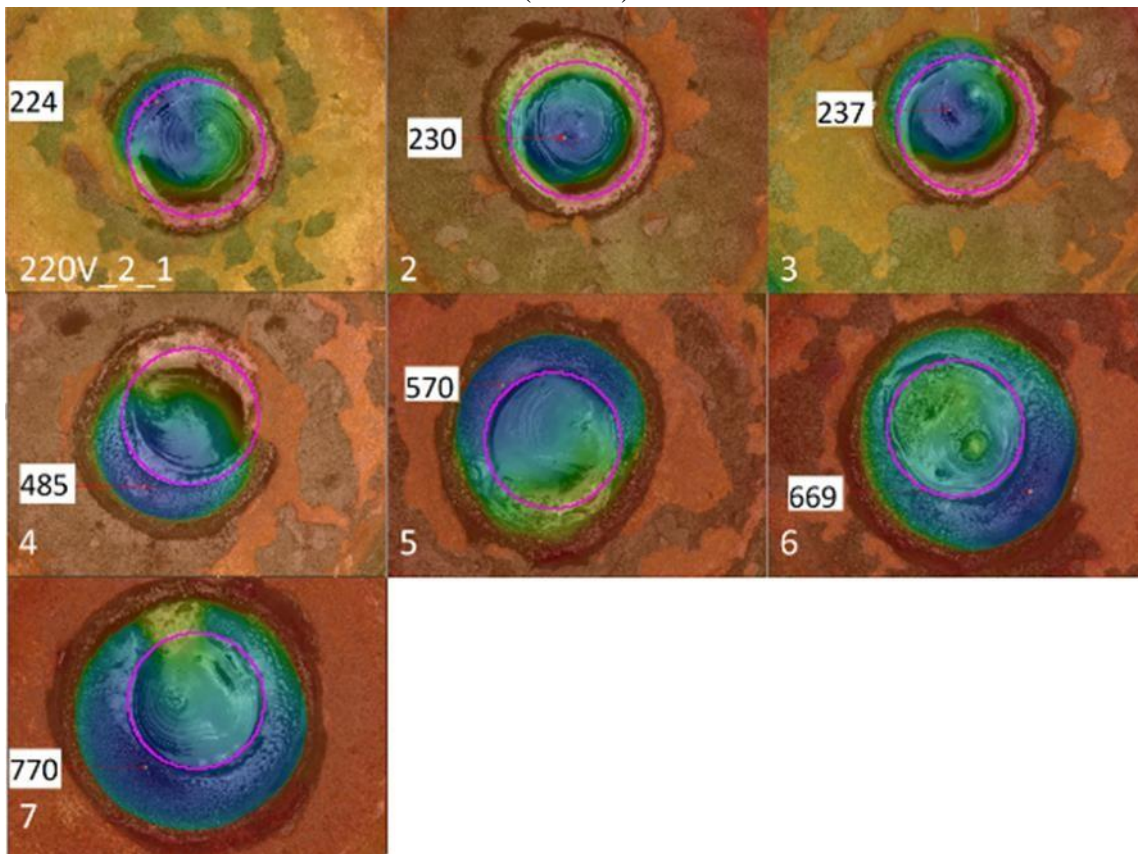


Figure 8 : Evolution de la profondeur sur la tête de l'électrode essai Configuration A 220V_2 (46 min)

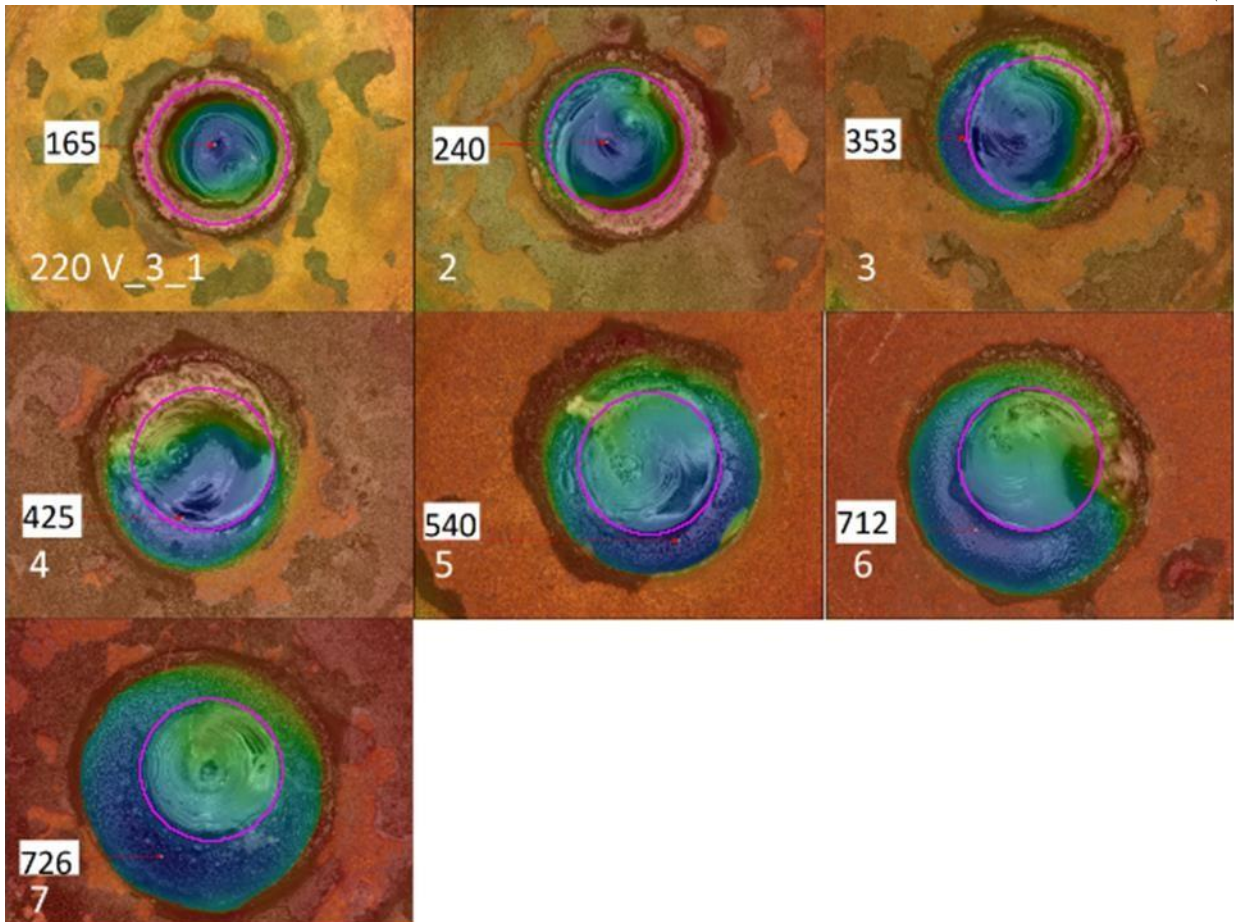


Figure 9 : Évolution de la profondeur sur la tête de l'électrode essai Configuration A 220V_3 (88 min)

Il s'agit d'images aux couleurs modifiées. Une partie de la couleur reflète le véritable aspect (Figure 10) et une autre est une échelle en arc-en-ciel relative à la profondeur. La couleur rouge correspond aux éléments en surface et la bleue correspond aux plus grandes profondeurs.



Figure 10 : Tête d'électrode en couleurs réelles, insert magenta.

La matière brillante au centre est le hafnium. Il arrive parfois qu'elle déborde sur le cuivre (on parle de bourrelet). Ceci est notamment visible sur le cas 220V_3, cliché 2 (Figure 8), dans les parties basses et droites du cratère.

Le cuivre peut noircir du fait des fortes températures qu'il subit, mais il garde un aspect granuleux et mat qui permet de le distinguer du hafnium. Par exemple sur la Figure 10, on distingue à la fois du cuivre intact et du cuivre noirci sur la surface, et, dans le cratère, du cuivre

noirci. Il est intéressant de noter que les cratères s'étendent à la fois sur la partie cuivre et sur l'insert.

Analysons maintenant les résultats présentés sur les Figures 7, 8 et 9.

Dans le premier cas, le cratère devient fortement asymétrique et son fond revêt une pente marquée (voir Figure 11), ce qui semble être propice à une destruction prématurée (35 min) (Figure 7).

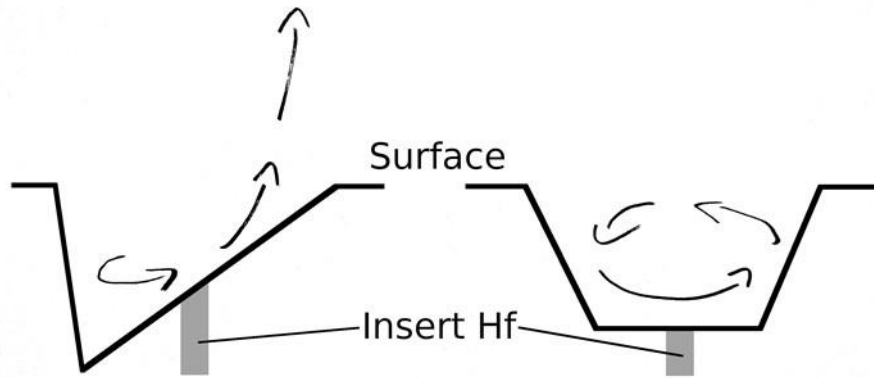


Figure 11 : Vue schématique de tête d'électrodes avec cratère à fond pentu (à gauche) et à fond plat (à droite) et représentation hypothétique du flux d'air.

À l'inverse, sur la Figure 9, le fond du cratère prend une forme plus plate (passage des étapes 4 à 7) et présente une durée de vie élevée (88 min). La Figure 8 est un intermédiaire : le cratère est plutôt plat à l'étape 5 et encore davantage en 6, mais une asymétrie ressurgit à l'étape 7. Cet essai a conduit à une durée de vie moyenne (46 min).

On peut donc suggérer que des cratères à fonds plus plats sont propices à une durée de vie plus longue, alors que des cratères avec une pente marquée entraînent des destructions prématurées. L'hypothèse est que, lorsque le fond de cratère présente une pente, l'injection d'air en vortex provoque une importante asymétrie dans la densité de flux de masse du plasma comme représenté sur la Figure 11. La partie présentant le moins de flux de masse, et dépourvue de la centrifugation du vortex (voir section 3), verrait alors sa densité de courant augmenter anormalement sur le rayon extérieur, proche du cuivre. Ces fortes densités de courant appliquées au cuivre provoqueraient une évaporation rapide. Les soubresauts observés lors de la destruction de l'électrode trouveraient alors leur origine dans les sauts de pieds d'arc dus à l'évaporation de la cathode. Une fois que trop de cuivre a été ablaté, le pied d'arc saute à une autre position sur l'électrode, mais toujours avec une densité de courant très élevée, menant à la destruction en quelques secondes. Ces sauts de pied d'arc expliqueraient les fortes variations de tension précédant la destruction (Figure 4) : la forte densité de courant au pied d'arc chauffe fortement le plasma et l'ensemence en vapeurs de cuivre, la conductivité locale s'élève plus rapidement (comparativement à la boucle de régulation de courant du générateur) et la tension diminue. En revanche, le cuivre s'érode intensément et le site d'accrochage devient moins

favorable jusqu'à saut du pied d'arc, où la conductivité locale est initialement moins élevée et la tension remonte.

À l'inverse, dans les cratères à fonds plats, le vortex peut circuler et concentrer le courant plus longtemps sur le hafnium.

Notons que, dans tous les cas, les bords des cratères présentent une pente raide sauf lorsqu'un bourrelet de hafnium est présent. Ces bords pentus ne réduisent donc pas la durée de vie de l'électrode. Ce sont davantage les configurations anisotropiques qui accompagnent les destructions précoces.

2.4.2. Creusement au cours du temps avec la Configuration B

Nous avons également observé l'évolution d'une électrode B à intervalles de 6 ou 12 minutes de coupe (nous n'avons pas pris d'image aux étapes 4 et 6). Les résultats sont donnés sur la Figure 12.

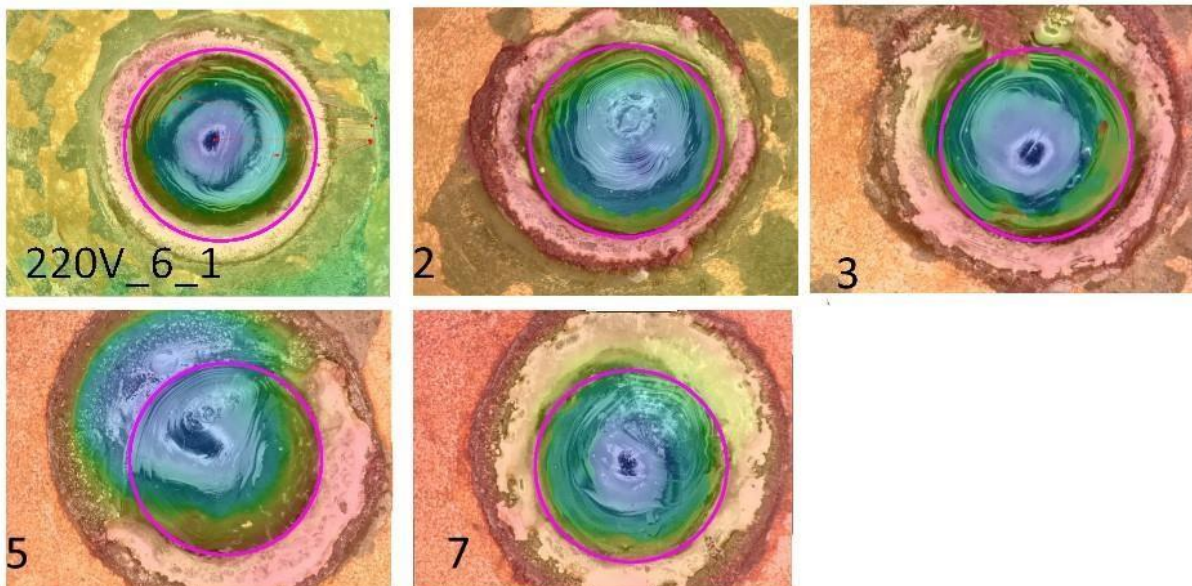


Figure 12 : Évolution de la profondeur sur la tête de l'électrode - essai Configuration B 220V_6

Contrairement aux résultats sur les électrodes A, un bourrelet circulaire occupant toute la circonférence du cratère est créé. L'aire recouverte par le hafnium devient supérieure au rayon initial de l'insert grâce à ces épanchements. Le cuivre est donc protégé et on constate que même à l'étape 7, il a noirci car il a été chauffé mais il ne s'est pas creusé.

3. Discussion et conclusion

3.1. Interaction tension-usure

Les règles de l'art en usage dans l'industrie indiquent qu'il faut veiller à maintenir une tension régulière dans le procédé de découpe. Cette tension est une image notamment de la distance entre la torche et l'ouvrage, et elle doit être suffisante pour ne pas endommager la torche [1].

Ces dommages proviennent principalement des projections métalliques qui peuvent survenir et impacter la torche en cas de distance torche-pièce trop faible. En revanche, les résultats de nos expériences ne montrent pas de corrélation entre la tension d'arc et l'usure de l'électrode.

Notons toutefois qu'une électrode usée peut engendrer l'endommagement du reste de la torche. En effet de nombreuses CNC (*computer numerical control*) assurent la régulation de tension via la hauteur de torche. Ainsi, une électrode creusée impliquera un allongement de l'arc qui sera compensé par la CNC en rapprochant la torche de l'ouvrage, augmentant les risques dus aux projections.

3.2. Effet de l'électrode

Rappelons que les électrodes étudiées présentent des différences de composition et de dimension de leur insert (Tableau 1). Des différences de caractéristiques thermiques du matériau pourraient expliquer une différence d'endurance, car une électrode plus froide subit moins d'érosion. D'après Zhou *et al.* [5], à bas courant (jusqu'à 100A environ), ce sont principalement les caractéristiques thermiques du matériau qui permettent le refroidissement de l'électrode. En revanche, compte tenu de la très faible concentration en soufre (Configuration A) ou en tellure (Configuration B) dans les électrodes étudiées, cette piste semble improbable pour expliquer les différences entre ces deux configurations. La différence dans les compositions des inserts en hafnium-zirconium semble tout aussi anecdotique.

L'écart de diamètres des inserts, en revanche, est plus significatif. Comme expliqué par Long *et al.* qui utilise une configuration de découpe sous oxygène similaire à la nôtre, un diamètre d'insert supérieur induit des taux d'érosion plus importants [6]. L'érosion augmente, pour un diamètre supérieur, de par un effet Joule accentué car l'insert est moins bien refroidi par le cuivre environnant. Cependant ceci ne peut être généralisé, Nemchinsky [7] rapporte par exemple un taux d'érosion non monotone en fonction du diamètre de l'insert pour un plasma d'hydrogène sans que cela soit toutefois vérifié pour un plasma d'argon. Dans tous les cas, il faut tout de même une taille minimale pour que la sortie du courant puisse s'effectuer majoritairement depuis l'insert et non depuis le corps en cuivre qui autrement est rapidement vaporisé. Notre étude ne permet pas de statuer sur la modification de la durée de vie due au diamètre de l'insert, mais nous avons constaté moins de dispersion dans la configuration B (inserts plus gros que A). Nous proposons une explication dans la section 3.4.

3.3. Mécanisme de la destruction

Nous supposons que la destruction survient lorsque le cratère, trop profond ou trop asymétrique, ne permet pas de conserver une répartition axisymétrique du flux de masse à l'interface métal-plasma. Il en résulterait une concentration de la densité de courant qui engendrerait une vaporisation importante de cuivre et/ou de hafnium. Ce phénomène créerait une succession de forts ensemencements en cuivre qui conduiraient à des sauts d'arc et aboutiraient à la destruction de l'électrode en quelques secondes.

Une campagne d'usure supplémentaire, avec des paramètres identiques, a été faite avec une électrode de configuration A. Au bout de 40 minutes de coupe, cette électrode a été limée de sorte qu'elle était plus courte mais que l'insert était de nouveau plat et à fleur de la surface. Au bout de 40 minutes supplémentaires de coupe, l'opération a été renouvelée une seconde fois. L'électrode a été détruite après environ 35 minutes de coupe après ce deuxième limage, ce qui représente au total une endurance de 115 minutes, largement au-dessus de tous les autres résultats. Cela va donc dans le sens de l'hypothèse du paragraphe précédent selon laquelle c'est la profondeur du cratère qui entrave le vortex et provoque la destruction en favorisant l'émission de fortes densités de courant par le cuivre, qui ne peut y résister.

3.4. Le paradoxe des électrodes A à grande longévité

Nous concluons dans l'analyse des résultats de la configuration A que des cratères plats accompagnaient les longévités les plus importantes. De plus, les électrodes à insert plus large semblent plus propices à créer un bourrelet de hafnium qui recouvre et protège le cuivre. Alors pourquoi certaines électrodes de la configuration A présentent-elles des longévités si dispersées et parfois bien supérieures à celles de la configuration B ?

Notre hypothèse est la suivante. Tout d'abord, lorsque le cratère, même à fond plat, devient trop profond, la circulation d'air (en vortex) ne peut plus s'y effectuer correctement et cela engendre la destruction car les densités de courant deviennent ponctuellement très élevées et consomment l'électrode.

Ensuite, nous avons constaté que des configurations asymétriques peuvent se créer et disparaître (Figures 8 et 9) au cours de la vie de l'électrode à « petit insert ». Dès lors, on peut supposer que les électrodes à grande durée de vie sont celles qui ont connu des cycles de changement de forme favorables et que dans leur cas, ils ont permis d'user davantage la partie en cuivre, abaissant le niveau de la surface autour du cratère, et reproduisant d'une certaine façon l'effet de limage bénéfique à la longévité évoqué dans la section précédente.

À l'inverse, avec l'électrode à plus gros diamètre d'insert (Configuration B), le bourrelet de hafnium protège la périphérie du cratère qui ne s'érode pas et donc le creusement se fait principalement au centre du cratère, jusqu'à atteindre une profondeur critique. Cela lui épargne des durées de vie très courtes mais rend également impossibles les très grandes durées de vie que nous avons pu constater en configuration A.

Remerciements :

Nous remercions les services techniques de Gys pour leur aide dans la conduite des campagnes expérimentales.

Références

[1]Hypertherm Powermax 105 Operator's manual Revision 3
<https://www.hypertherm.com/en-US/hypertherm/powermax/powermax105>

- [2]V. Nemchinsky (2013) « Cathode Erosion due to Evaporation in Plasma Arc Cutting Systems » *Plasma Chem Plasma Process*, 33, pp 517–26 **DOI:** <https://doi.org/10.1007/s11090-013-9440-1>
- [3]V. Nemchinsky (2003) « Cyclic erosion of a cathode in high-pressure arcs » *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 36, pp 1573–6
DOI : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/36/13/322>
- [4]J. Peters, F. Yin, C. F. M. Borges, J. Heberlein and C. Hackett (2005) « Erosion mechanisms of hafnium cathodes at high current » *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 38, pp 1781– 94 **DOI:** <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/38/11/019>
- [5]X. Zhou, J. Heberlein and E. Pfender (1994) « Theoretical study of factors influencing arc erosion of cathode » *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A*, 17, pp 107–12
<https://ieeexplore.ieee.org/document/296375>
- [6]N. P. Long, Y. Katada, Y. Tanaka, Y. Uesugi and Y. Yamaguchi (2012) « Cathode diameter and operating parameter effects on hafnium cathode evaporation for oxygen plasma cutting arc » *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 45, p 435203
DOI : <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/43/435203>
- [7]V. Nemchinsky (2014) « Erosion of Thermionic Cathodes in Welding and Plasma Arc Cutting Systems » *IEEE Transactions on Plasma Science*, 42, pp 199–215
DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2287794>