



Rapport de fin de projet A.A.E.

Etude expérimentale de l'apparition des taches cathodiques et anodiques lors de la création d'un arc électrique

Laboratoire Arc Electrique et Plasmas Thermiques
24, avenue des Landais
Bâtiment Physique 5
BP 80026
63171 AUBIERE CEDEX

ABBAOUI M'hammed (mhammed.abbaoui@univ-bpclermont.fr)
PERISSE Frédéric (frederic.perisse@univ-bpclermont.fr)
LEFORT André (andre.lefort@univ-bpclermont.fr)

2011 - 2013

Table des matières

Introduction	5
1 Etat du sujet au niveau national et international.....	5
2 Objectifs scientifiques et technologiques.....	7
2.1 Objectifs	7
2.2 Dispositif expérimental	7
2.2.1 Description générale	7
2.2.2 Conception du dispositif	8
2.2.2.1 Réalisation de la partie mécanique	9
2.2.3 Partie électrique	11
2.2.3.1 Partie instrumentation	12
2.2.3.2 Mise en place du matériel	13
3 Protocole d'expérimentation.....	14
3.1 Matériaux testés.....	14
3.2 Allure générale des signaux courant-tension	16
3.3 Etapes de création et développement d'un arc électrique de coupure.....	17
3.4 Etude préliminaire - Résultats qualitatifs	18
4 Résultats quantitatifs de mesures	20
4.1 Durée et longueur d'arc	20
4.1.1 Durée d'arc.....	20
4.1.2 Longueur d'arc.....	21
4.2 Méthode de détermination des grandeurs.....	23
4.2.1 Méthode de détermination des chutes de tension anodiques et cathodiques ..	23
.....	23
4.2.2 Méthode de détermination des champs électriques et des épaisseurs des	24
différentes zones.....	24
4.3 Résultats et analyse de la valeur des chutes de tension anodiques et cathodiques	26
et du temps d'arc	26
4.3.1 Matériaux purs	26
4.3.2 Alliages et pseudo-alliages	30
4.4 Influence des adjuvants sur les caractéristiques de l'argent.....	32
4.4.1 Chute de tension cathodique	32
4.4.2 Temps et longueur d'arc	36

4.5	Comparaison des résultats de tous les matériaux étudiés.....	38
4.6	Données pratiques pour la modélisation	41
4.7	Corrélation des résultats de mesure avec les propriétés intrinsèques du matériaux	43
4.8	Champs électriques et épaisseurs des différentes zones.....	45
5	Observation des dégradations des électrodes	46
6	Discussion et conclusion.....	53
	Bibliographie	54
	Annexes.....	55
	Index des illustrations.	64
	Index des tableaux	65

Introduction

La mise au point de modèles au niveau des pieds d'arc manque actuellement de données précises comme par exemple les chutes de tension à la cathode et à l'anode pour la plupart des matériaux utilisés dans les appareillages de coupure. Un autre point est aussi très insuffisant sur ce thème, il s'agit de la création de l'arc électrique lors de la séparation de deux contacts électriques parcourus par un courant ou lors de la fermeture de ces deux contacts reliés à une source de tension.

L'objectif du projet présenté ici est de pallier au manque d'informations précises liées à ces deux thèmes. Son aboutissement serait donc l'obtention de valeurs fiables pour les chutes cathodique et anodique et l'analyse précise des phases successives conduisant à l'établissement des taches anodiques et cathodiques. La mise en œuvre est purement expérimentale, elle est essentiellement constituée de mesures courant-tension lors de l'ouverture (et de la fermeture) contrôlées des contacts avec une résolution temporelle de l'ordre de la nanoseconde. Les paramètres à prendre en compte sont relatifs à la nature des électrodes, leur géométrie, leur vitesse d'ouverture (et de fermeture) et la nature du gaz environnant.

1 Etat du sujet au niveau national et international

Les études expérimentales et les analyses théoriques menées au niveau national ont des objectifs divers et souvent liés à une application industrielle plus ou moins directe. Nous donnons ici quelques exemples révélateurs de la diversité des travaux de recherche dans ce domaine.

L'étude des contacts électriques bas niveau utilisés dans des circuits à courant continu conduit à des applications directes essentiellement dans le domaine de l'automobile. Le but recherché est l'amélioration de la fiabilité sur un très grand nombre de manœuvres pour des courants et des différences de potentiel très variables. Les moyens mis en œuvre sont essentiellement expérimentaux et les dispositifs ont été réalisés afin de répondre au cahier des charges expérimental qui fixe par exemple la vitesse d'ouverture des contacts, le niveau et la durée du courant électrique, l'atmosphère environnante ainsi que le nombre de manœuvres. Les métaux utilisés sont essentiellement de l'argent et ses alliages et pseudo-alliages les plus courants ou des alliages définis pour l'étude. Les résultats obtenus montrent par exemple le changement de la nature de l'érosion (anodique, cathodique, puis les deux) en fonction de la durée de passage du courant lorsque l'arc électrique apparaît ; leur interprétation théorique est cependant plus délicate et montre les lacunes existantes au niveau des paramètres ou des grandeurs physiques gérant les tous premiers instants de la séparation des électrodes. Une autre difficulté apparaît aussi très nettement [1] lorsque la tension aux bornes des deux contacts est portée à une valeur nettement supérieure à la somme des chutes cathodique et anodique de l'argent ou de ses alliages, dans ce cas il apparaît une grande difficulté pour interrompre le courant et éviter une érosion trop importante des électrodes.

Des études à la fois théoriques et expérimentales ont été effectuées sur des anodes en cuivre pour des courants allant jusqu'à 200 A dans une atmosphère d'argon [2]. Ces travaux sont relatifs à un arc établi ne présentant pas de changement de régime. Les résultats, obtenus à l'aide d'un modèle 2D puis d'un modèle 3D, décrivent l'interaction entre le plasma de la

colonne et l'électrode. Les flux d'énergie reçus par l'électrode ainsi que les températures de surface sont donnés radialement par rapport à la tache anodique. L'action d'un champ magnétique sur ce type d'arc est aussi décrite montrant le déplacement des isothermes dans le plasma et dans l'électrode. La comparaison avec les données expérimentales obtenues par d'autres auteurs est satisfaisante. Cette analyse présente aussi une approche de l'arc électrique évoluant librement. Dans des travaux plus récents [3], ces mêmes auteurs présentent une étude expérimentale du transfert d'énergie vers l'anode. Le courant est de 90 A, l'anode est en cuivre et l'atmosphère environnante est constituée par de l'argon. La mesure de la température dans le plasma au voisinage de l'anode conduit à des valeurs de 11000 K. L'utilisation de thermocouples implantés dans l'anode montre que la température de l'électrode diminue radialement entre des valeurs supérieures à 550 K et inférieures à 520 K. La mesure du flux d'énergie reçu par l'anode conduit aux valeurs du flux d'énergie échangé entre la colonne d'arc et la surface de l'anode, soit 10^7 Wm^{-2} .

La non connaissance de la densité d'énergie arrivant sur l'électrode, qu'elle soit anode ou cathode, ainsi que sa répartition radiale, reste un lourd handicap pour décrire les phénomènes physiques des zones où le courant électrique va passer du métal vers le plasma de la colonne et réciproquement. Une approche expérimentale de ce problème [4] pour des électrodes en cuivre pur, dans l'air à la pression atmosphérique, pour des courants allant jusqu'à 2500 A a contribué à donner quelques valeurs possibles sur les énergies mises en jeu à ce niveau-là. La mesure des dimensions des traces laissées par l'arc sur le métal conduit aux densités de courant aussi bien au niveau de l'anode que celui de la cathode. Les résultats obtenus conduisent à des valeurs moyennées dans le temps et dans l'espace : $6,5 \times 10^9 \text{ Wm}^{-2}$ à la cathode et $6 \times 10^9 \text{ Wm}^{-2}$ à l'anode. Les résultats obtenus pour le cuivre, l'argent ou le nickel cantonnent les valeurs des flux d'énergie dans des intervalles de valeurs allant de 10^9 Wm^{-2} à 10^{12} Wm^{-2} . La comparaison avec d'autres résultats, en particulier au niveau de l'érosion s'avère satisfaisante, mais n'est pas suffisamment précise pour déterminer les paramètres manquants, une analyse expérimentale s'avère nécessaire.

Pour des arcs courts à faibles courants ($< 5 \text{ A}$), les valeurs des flux d'énergie obtenus à la cathode et à l'anode [7, 8] sont $3,7 \times 10^{11} \text{ Wm}^{-2}$ et $6,4 \times 10^{11} \text{ Wm}^{-2}$ respectivement. Ces valeurs sont légèrement au-dessus dans le cas de l'argent et légèrement en dessous dans le cas du tungstène.

Les années 90 sont assez riches en travaux relatifs aux phénomènes aux électrodes pour les appareillages de coupure dans le vide [9, 10]. Par des analyses théoriques et expérimentales, la structure et l'organisation de zones différentes apparaissent dans un volume allant de la surface de l'électrode jusqu'à la colonne de plasma aussi bien à l'anode qu'à la cathode. La description des composants constituant ces zones est en général assez bien décrite, mais deux facteurs n'apparaissent pas très nettement, ou avec suffisamment de précision, il s'agit de la création des spots (anodique, cathodique) et de l'évolution avec le temps de ces zones. La même insuffisance apparaît aussi dans des articles plus récents [11,12] qui décrivent soit la totalité des phénomènes soit une mesure de paramètres physiques. Toutefois il existe des travaux qui sont dans l'esprit de notre projet [13] où l'auteur analyse à l'aide de résultats expérimentaux et d'hypothèses théoriques les tous premiers instants de la création des spots cathodiques.

2 Objectifs scientifiques et technologiques

2.1 Objectifs

L'analyse des données disponibles dans la littérature montre que les résultats issus de modèles et d'expérimentations pour la création des taches cathodiques et anodiques présentent d'importantes lacunes. Pour les matériaux couramment utilisés dans l'industrie de l'appareillage électrique (argent, cuivre, nickel, tungstène...), les mesures en fonction du temps de l'évolution de la tension aux bornes des électrodes pour les conditions énoncées précédemment conduisent, aux valeurs des chutes de tension à la cathode et à l'anode. En effet les valeurs actuellement disponibles dans la littérature remontent pour les plus fiables aux années 1970-80, (récapitulées par exemple dans la référence [14]). Il s'avère fondamental de connaître l'évolution des chutes cathodique et anodique avec l'intensité du courant d'arc et pour différentes atmosphères environnant les contacts. Le rôle des divers composants des alliages et surtout des pseudo-alliages n'est pas actuellement clairement établi. Le projet présenté doit permettre de pallier à ce manque de précision dans les données. Il comporte deux objectifs :

- déterminer avec une grande résolution temporelle (nanoseconde) l'évolution de la tension et du courant d'arc, corrélée à la cinématique des électrodes afin de mettre en évidence les différentes phases liées à la création du spot,
- mesurer avec précision les valeurs des chutes de tension anodiques et cathodiques, pour différents types de matériaux, et différentes conditions expérimentales.

Le dispositif expérimental nécessaire pour atteindre ces deux objectifs est détaillé ci-après. Il devra répondre aux critères suivants :

- mise en place d'électrodes constituées de différents matériaux ;
- maîtrise de la cinétique de séparation ou de fermeture des contacts ;
- contrôle de l'atmosphère ambiante ;
- indépendance des caractéristiques de l'arc avec la source d'énergie.

L'ensemble de ce travail alimentera une base de données accessible à la communauté scientifique. De plus les résultats attendus devraient conduire à une interprétation des phénomènes physiques liés aux propriétés intrinsèques des différents matériaux utilisés dans les contacts électriques.

2.2 Dispositif expérimental

2.2.1 Description générale

L'objectif est de réaliser un montage expérimental permettant l'ouverture et la séparation des contacts à vitesse et environnement contrôlés. Les mesures permettant d'obtenir des paramètres pertinents pour la communauté scientifique devront être précises notamment dans leur aspect temporel. Le montage dont le schéma de principe est représenté sur la figure 1 se décompose en trois parties principales détaillées ci-dessous :

- a) Partie mécanique : elle est composée des électrodes de test qui constituent la partie active à expérimenter. Les électrodes doivent être mobiles l'une par rapport à l'autre et la vitesse de déplacement de celles-ci doit être connue et contrôlable. Un actionneur linéaire électrique est utilisé, il permet un déplacement maîtrisé jusqu'à une vitesse d'environ 10 m/s, la commande et le contrôle de cet actionneur sont effectués par la partie contrôle commande. La partie active des électrodes (zone de création de l'arc) est amovible permettant de tester différents matériaux tels que l'argent, le nickel, le cuivre, le tungstène, ...
- b) Partie électrique : l'arc électrique est alimenté par une batterie d'accumulateurs, cette solution permet de s'affranchir des contraintes liées aux différents types d'alimentations disponibles qui influencent le comportement de l'arc en fonction de leurs caractéristiques. La tension d'alimentation est d'environ 48 V, le courant maximum des essais est d'environ 30 A. Une tension de 48 V autorise des distances inter électrodes suffisantes pour l'ensemble des expériences prévues. Ce courant est limité à l'ouverture par une résistance de puissance et à la fermeture par un système électronique de coupure de l'arc. La sécurité du dispositif est assurée par un ensemble disjoncteur, fusible et relais statique.
- c) Partie acquisition, contrôle commande : la structure de contrôle commande permet l'automatisation des expérimentations, elle est conçue pour répondre aux diverses conditions imposées par le protocole de mesure, ceci répond au souci d'améliorer la répétabilité des expériences, toujours difficile à obtenir avec un arc électrique d'ouverture ou de fermeture.

Les acquisitions en courant et tension nécessitent un soin tout particulier. En effet, c'est la précision de ces données qui intéresse la communauté scientifique, afin de garantir la précision des résultats, le laboratoire s'est doté d'un oscilloscope et des sondes associées permettant d'obtenir une résolution temporelle de l'ordre de la nanoseconde.

2.2.2 Conception du dispositif

Le cahier des charges défini précédemment spécifie que les essais réalisés avec le banc expérimental, devront permettre de mesurer l'évolution de la tension et de l'intensité inter électrodes avec une résolution de l'ordre de la nanoseconde, en fonction des paramètres suivants :

- la vitesse de déplacement des contacts (jusqu'à 10 m/s) ;
- la nature du matériau des contacts ;
- le mode de création de l'arc (ouverture / fermeture des contacts) ;
- le courant de l'arc électrique.

Afin d'atteindre les objectifs décrits précédemment, un système complet a été mis en place. Le système expérimental se décompose en deux parties principales :

- la première concerne la réalisation mécanique du banc de test (conception, choix de composants, montage), ainsi que la partie commande pour le déplacement des contacts ;
- la seconde concerne la mise en place d'un circuit d'alimentation pour les électrodes et la mise en place de matériels de mesure.

2.2.2.1 Réalisation de la partie mécanique

Pour réaliser le chariot mobile transportant l'électrode, un axe de 3 mètres de course a été choisi. La vitesse maximale admise par cet ensemble est de 10 m/s et l'accélération maximale est de 40 m/s². Il nous permet donc de couvrir largement nos besoins. Cet axe est entraîné par un moteur synchrone permettant d'atteindre la vitesse et l'accélération maximales admises par l'axe. Un variateur SEW Movidrive permet la commande de ce moteur. Il est associé à un boîtier de contrôle permettant la commande de l'axe une fois le programme lancé.

Première version de la partie mécanique

Le schéma sur la figure 1 représente le dispositif mécanique initialement conçu. Il est composé d'une anode fixe et d'une cathode mobile fixée sur un chariot. Le chariot porte-cathode se déplace sur un axe à l'aide d'un moteur synchrone à des vitesses programmées sur un variateur. La valeur de l'accélération du système d'entraînement est fixée, toutefois cette grandeur n'est pas instantanée comme le montre la figure 2-1. Une telle contrainte impose une montée en vitesse comme le montre la figure 2-4, dans le cas d'une vitesse finale de 1 m/s, par exemple. Dans les gammes de vitesses et courants testés, la durée d'arc est de l'ordre de quelques millisecondes et nous ne pouvons donc pas garantir une vitesse (d'ouverture) et/ou une accélération constantes lors de l'ouverture.

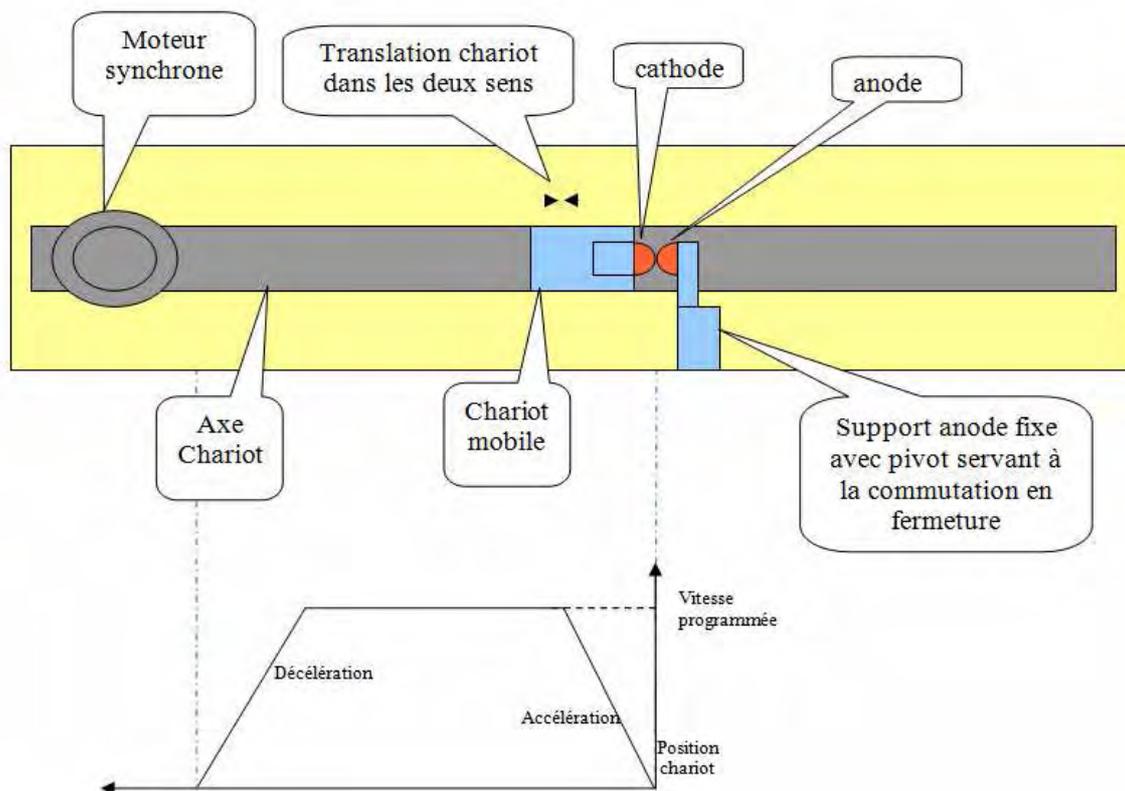


Figure 1 : Synoptique du système expérimental.

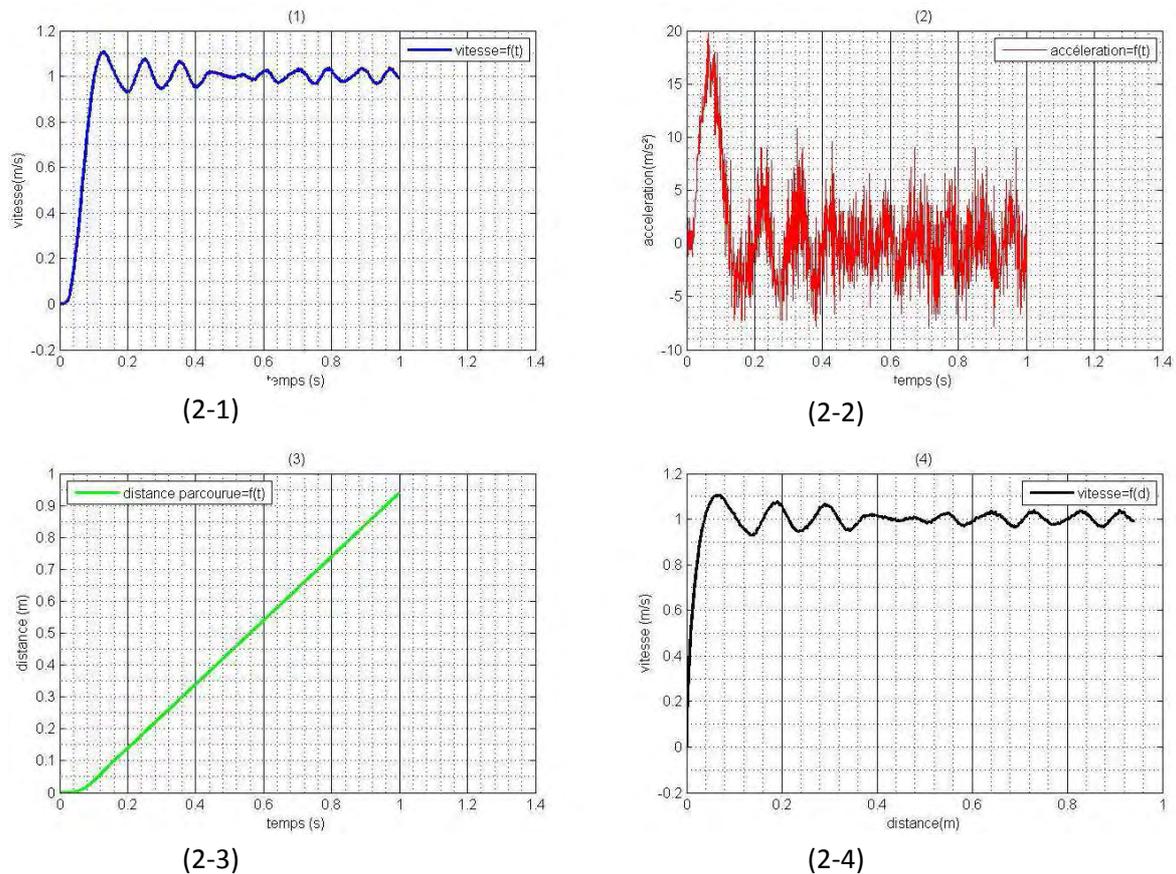


Figure 2 : Courbes relatives au déplacement du chariot.

Version définitive de la partie mécanique

Pour s'affranchir de ce problème d'accélération au moment de l'ouverture, nous avons modifié le système d'ouverture comme le montre la figure 3. Compte tenu de ce nouveau dispositif, l'étude se focalisera sur l'ouverture seulement qui est celle qui génère les arcs les plus destructeurs. Le mode de fonctionnement du dispositif est comme suit :

- L'anode est fixée sur un support équipé d'un rallongement servant de butée pour le chariot avec une rotation sur un axe vertical. La cathode est installée sur un support rigide.
- Initialement les deux électrodes sont en contact. Pour bien assurer le maintien, les deux supports sont munis d'aimants en attraction.
- Le chariot démarre à une distance d'environ 1 m des électrodes, après avoir atteint la vitesse programmée, il vient buter sur le support de l'anode. Ce dernier s'ouvre à la même vitesse est opérée la séparation des électrodes.
- L'ouverture s'effectue ainsi au-delà des phases d'accélération (et décélération) à la vitesse programmée.

L'instant de commutation est représenté sur la figure 4.

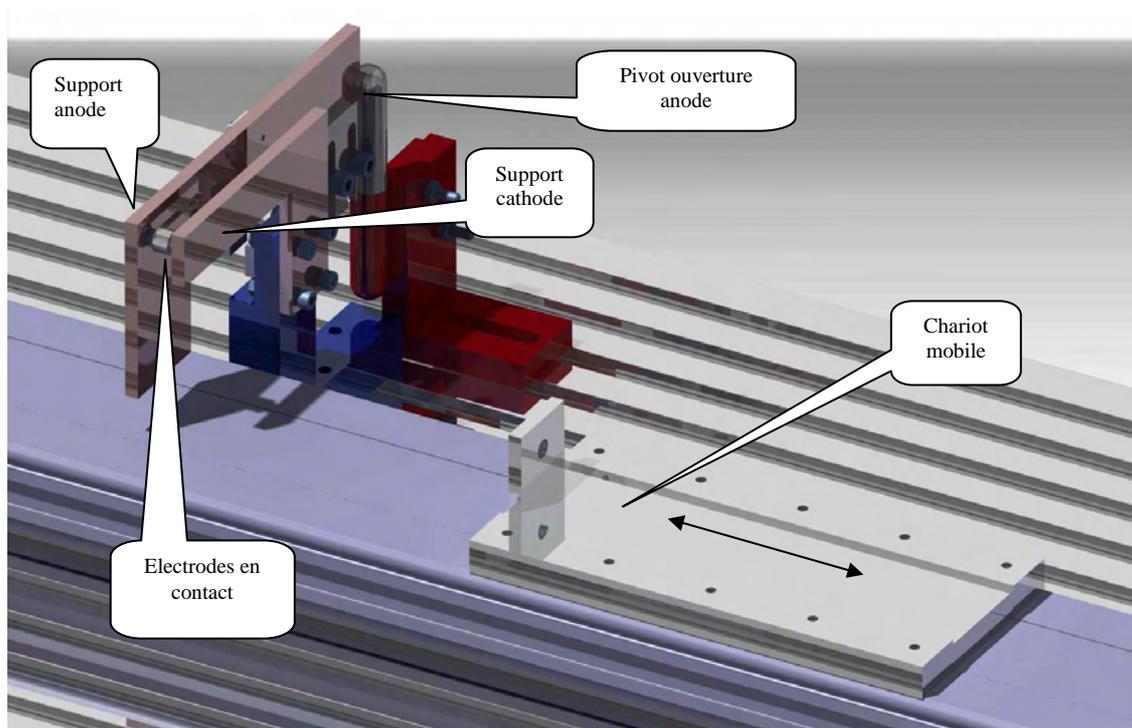


Figure 3 : Modification du système d'ouverture des électrodes.

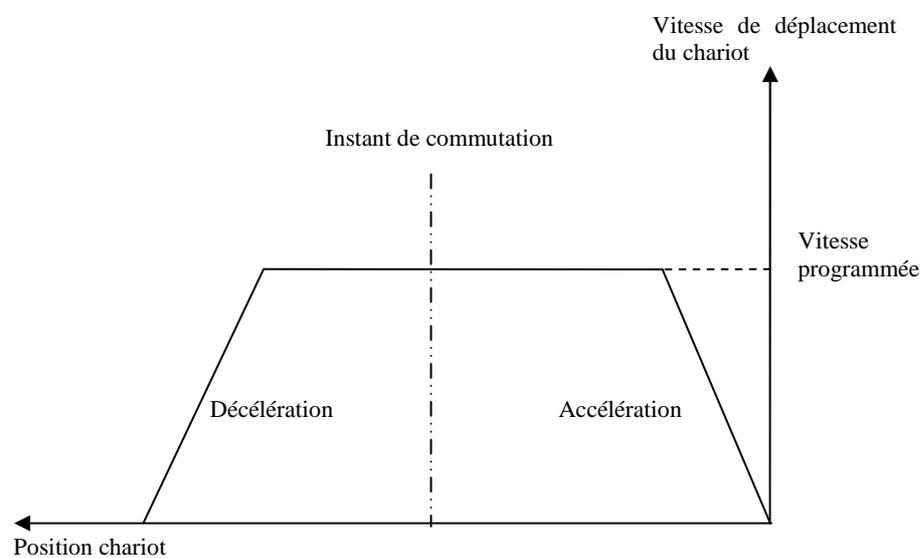


Figure 4 : Profil de vitesse du chariot.

2.2.3 Partie électrique

La partie électrique comme le montre la figure 5 est constituée d'une alimentation avec une série de batteries qui font au totale 48 V continu (DC), d'une résistance variable qui permet de faire varier l'intensité du courant électrique dans une gamme allant de 1,2 A à 30 A ; la protection est assurée par un coupe circuit, un disjoncteur et un fusible. Une attention particulière a été portée au blindage de la partie commande de l'axe linéaire afin de

minimiser les perturbations liées aux signaux hautes fréquences permettant la variation de vitesse.

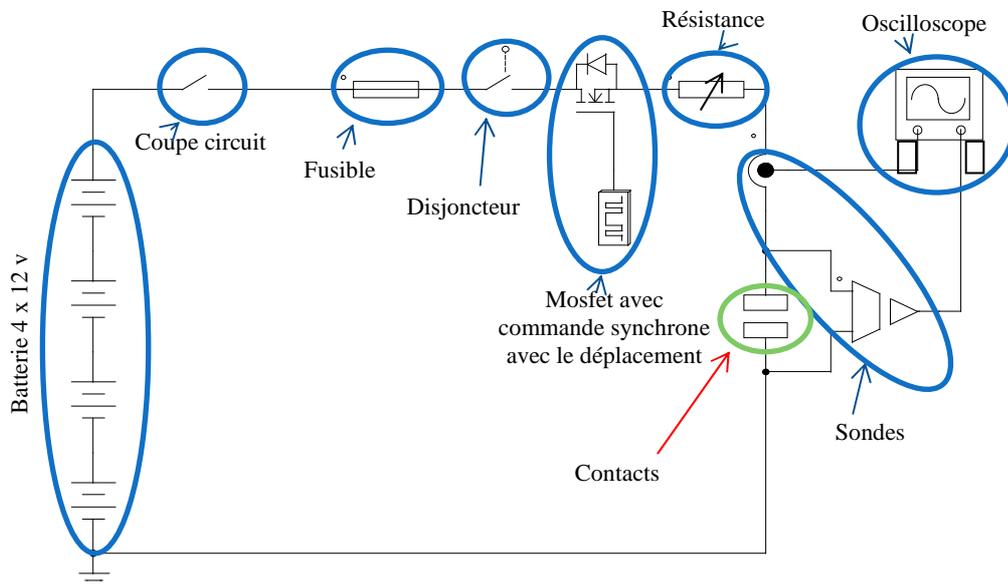


Figure 5 : Synoptique du circuit électrique.

2.2.3.1 Partie instrumentation

L'instrument de mesure principal est l'oscilloscope numérique 1 GHz, 10 GS/s permettant une acquisition à la nanoseconde, ce qui permet d'enregistrer avec précision les signaux relatifs à l'arc électrique (tension et courant).

L'aspect parasites et perturbations électromagnétiques a également été l'un des problèmes de cette étude. Pour la précision des mesures effectuées, nous avons appliqué les règles de bases pour atténuer les perturbations sur le signal, ce qui a amené à des actions sur les principales causes des perturbations :

- Séparation entre les différents circuits (commande, puissance et mesure) ;
- Réduction de la longueur des câbles pour un circuit le moins inductif possible ;
- Blindage du moteur, cause d'une perturbation parasite rayonnée considérable sur le signal ;
- Minimisation (réduction) de boucles de courant ;
- Utilisation d'une résistance la moins inductive possible ;
- Alimentation sur batteries au lieu du réseau + redresseurs, générateurs de parasites.

La partie instrumentation est composée des éléments ci-dessous :

Oscilloscope 4 voies : Lecroy 104Xi-A

- Acquisition : 12.5 Mpts
- Bande passante : 1 GHz
- Temps de montée : 300 ps
- Sensibilité mini : 2 mV/div
- Résolution 0.2 mV

Sonde de courant : CPO31

- Bande passante : 100 MHz
- 30 Arms , 50 Amax

Sonde de tension : PPE4kV

- 4 kV (AC + DC) jusqu'à 2 MHz
- 6 kV (en impulsionnel) jusqu'à 5 MHz
- 300 V (en impulsionnel) à 1 GHz

2.2.3.2 Mise en place du matériel

Les différents éléments constituant le dispositif expérimental apparaissent sur les figures 6 et 7.

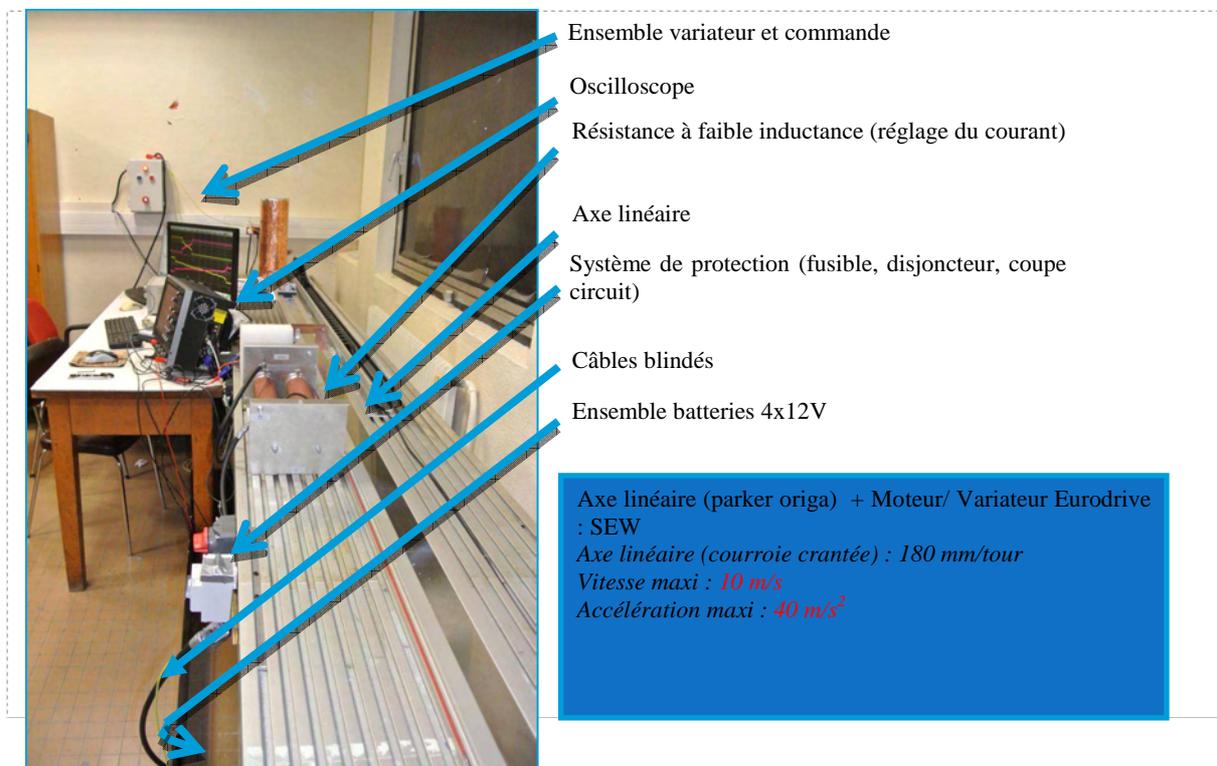


Figure 6 : Vue de côté de la mise en place du matériel.

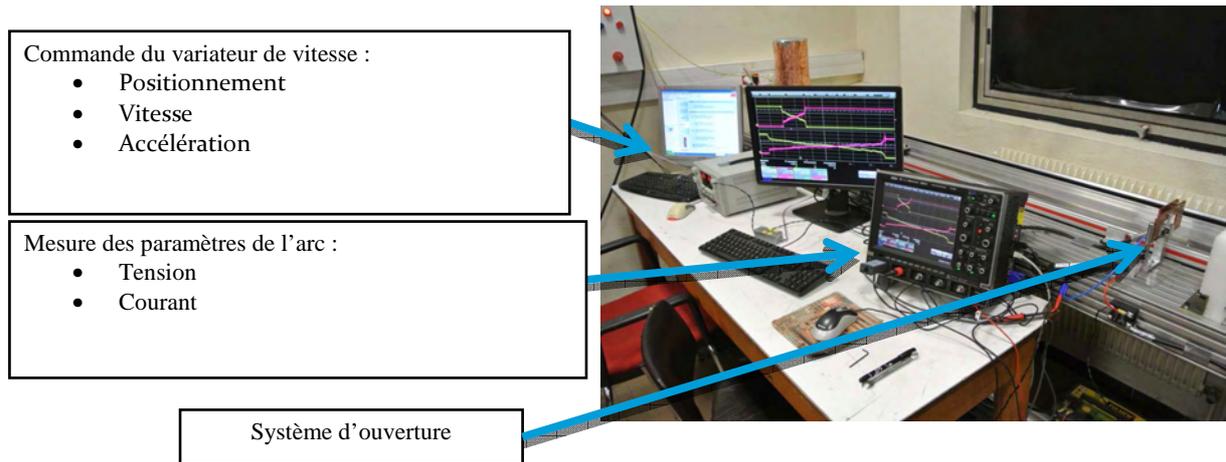


Figure 7 : Vue de face de la mise en place du matériel.

3 Protocole d'expérimentation

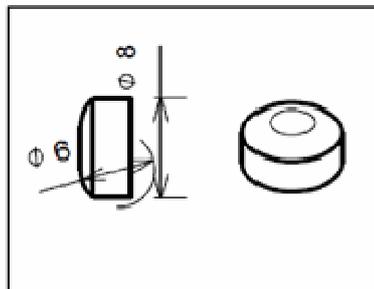
3.1 Matériaux testés

La commutation d'un circuit est définie comme le passage, d'un circuit de l'état fermé à l'état ouvert.

- **Etat 1** : Les contacts sont fermés, le circuit est parcouru par un courant d'intensité fixée à l'aide d'une résistance, la tension aux bornes des électrodes est considérée nulle.
- **Etat 2** : Séparation des contacts, le courant passe à zéro et la tension est établie à la valeur de l'alimentation 48 V DC (Figure 9, § 3.2).

Les matériaux étudiés, répertoriés dans le tableau 1, sont des « métaux » purs, des alliages et pseudo alliages à base d'argent. La plupart de ceux-ci sont utilisés comme matériaux de contacts électriques, d'autres ont été tout simplement choisis en raison de leurs caractéristiques intrinsèques. La forme géométrique des contacts utilisés durant les essais est indiquée sur la figure 8.

Matériaux	Composition
Argent (Ag)	Ag pur 99,99%
Aluminium (Al)	Al pur 99,99%
Cadmium (Cd)	Cd pur 99,99+%
Carbone (C)	C pur 99,99%
Cuivre (Cu)	Cu pur 99,99%
Etain (Sn)	Sn pur 99,75%
Nickel (Ni)	Ni pur 99,99+%
Tungstène (W)	W pur 99,95%
Zinc (Zn)	Zn pur 99,99+%
AgNi	Ag 60 ; Ni 40%
AgW	Ag 50% ; W 50%
AgCdO	Ag 88% ; CdO 12%
AgZnO	Ag 90% ; ZnO 10%
AgSnO ₂	Ag 88% ; SnO ₂ 8%

Tableau 1 : Matériaux de contact testés.**Figure 8** : Pastille de contact.

Nous avons effectué les tests pour les différents matériaux de contacts que ce soit purs ou alliages dans une gamme de courant allant de 1,2 A à 30 A pour une même vitesse (1 m/s) d'ouverture des contacts. Dans cette gamme de courant, on a effectué dix essais pour chaque

intensité du courant, c'est-à-dire 110 manœuvres pour chaque matériau. Les électrodes sont poncées et rincées à l'eau déminéralisée pour une nouvelle série d'essais.

3.2 Allure générale des signaux courant-tension

Dans le cas réel étudié, l'arc de coupure évolue avec la séparation des électrodes initialement mises en contact, sa structure est différente de celle de l'arc stationnaire. La figure 9 montre l'évolution du courant et de la tension d'un arc d'ouverture entre deux contacts en argent, pour une vitesse de séparation de 1 m/s et un courant de 10 A.

Les signaux présentent des instabilités causées par le rayonnement du moteur et l'arc lui-même. Sur l'aspect général de la tension d'arc, on voit que son évolution est continue dans le temps, sauf au début (rupture du pond fondu) ; l'effet selfique se manifeste à la fin de l'arc.

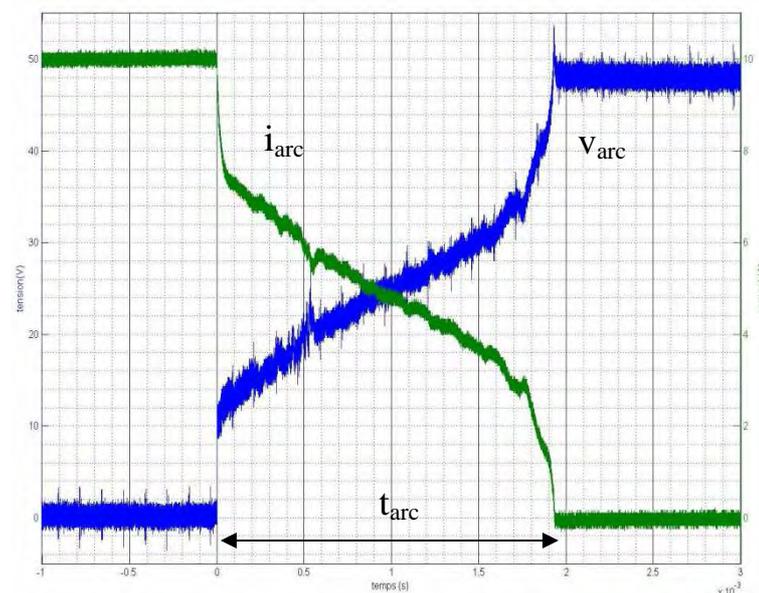


Figure 9 : Evolution temporelle du courant et de la tension d'arc entre deux électrodes en argent pour un courant de 10 A et une vitesse de 1m/s.

Une autre remarque à faire lorsque l'on analyse l'allure générale de la tension d'arc sur la figure 9 est la continuité de son évolution temporelle. En effet, de précédentes études ([15] inspiré du modèle de Höfl [16]), menées dans des conditions similaires mais à des niveaux de courant différents ($V \leq 50$ V, $I \leq 2$ A, vitesse $0,2$ ms⁻¹) avaient montré que la tension d'arc est constituée de paliers bien distincts correspondant à des processus de conduction de courant dans l'arc gouvernés par des espèces chimiques d'énergie d'ionisation différentes (une phase métallique suivie de deux phases gazeuses, la première riche en vapeurs métalliques et la dernière correspondant au milieu ambiant). Or à des niveaux de courant supérieurs comme c'est le cas dans notre étude, ces paliers sont inexistantes (ou difficiles à distinguer) d'où l'impossibilité d'identifier formellement un quelconque changement de mécanisme dans la conduction.

3.3 Etapes de création et développement d'un arc électrique de coupure

La figure 10 illustre l'évolution temporelle de la tension d'arc depuis sa création jusqu'à son extinction.

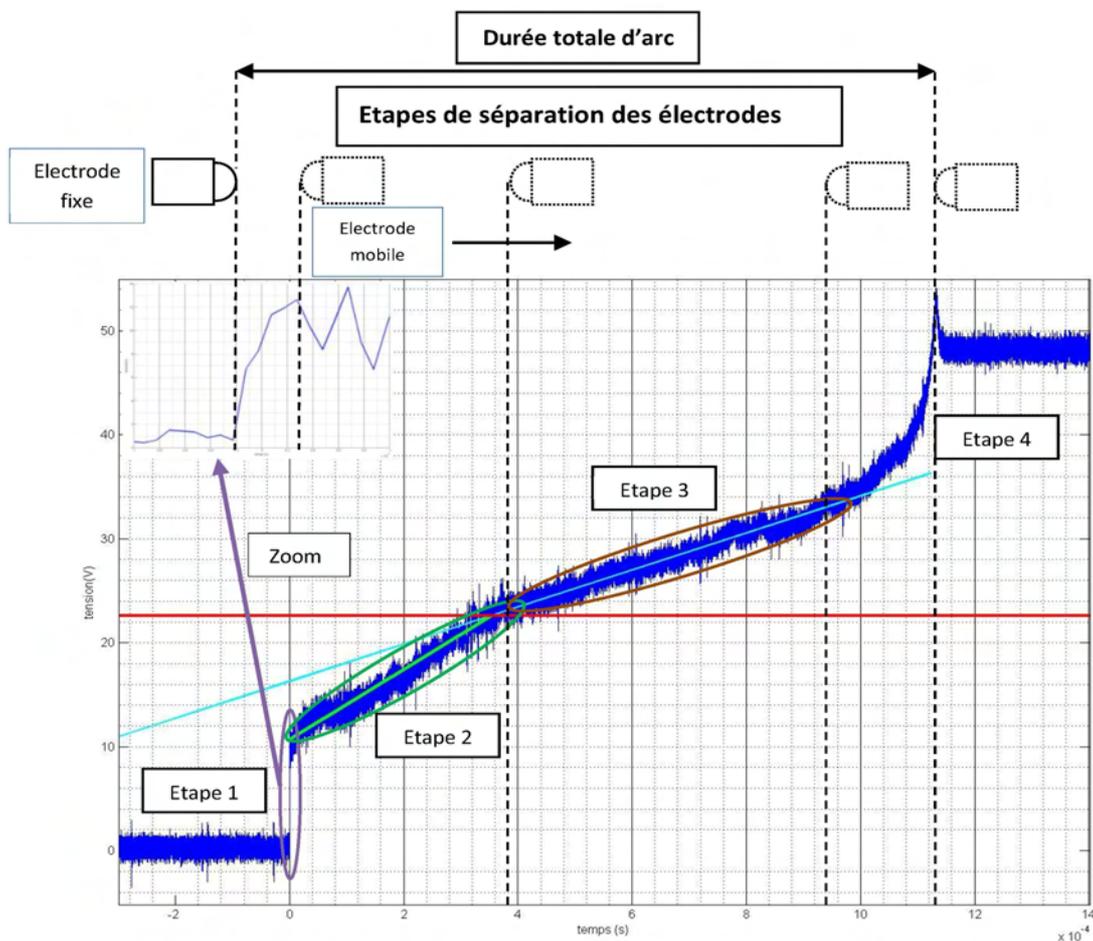


Figure 10 : Etapes du développement de l'arc de coupure.

L'allure de la courbe est caractéristique de la distance inter électrodes et de l'évolution de l'arc. L'apparition de l'arc débute dès l'absence de contact entre les deux électrodes marquée par la croissance abrupte de la tension (étape 1) correspondant à la rupture du pont fondu. Ensuite on retrouve la zone d'expansion (étape 2), puis la colonne (étape 3) et enfin l'extinction de l'arc. Il faut noter que durant la phase d'extinction le courant chute d'une manière brusque mais la présence de l'inductance du circuit s'oppose à son annulation, cette self emmagasinant une énergie électromagnétique ($\frac{1}{2} LI^2$) prolonge un peu dans le temps l'arc, ce qui se traduit au niveau de la tension par cette courbure (en fin de colonne) avec un pic pour revenir à la valeur de la force électromotrice de l'alimentation.

Cette courbe permet de déterminer les valeurs des chutes de tension cathodiques et anodiques ainsi que la durée et la longueur d'arc (§ 4.3).

3.4 Etude préliminaire - Résultats qualitatifs

Il s'agit, dans un premier temps, de faire une étude permettant de montrer l'influence des valeurs de l'intensité du courant et de la vitesse sur l'allure de la courbe de tension d'arc dans le cas des contacts en argent. La coupure est réalisée dans un circuit résistif à 48 V DC.

Les résultats qualitatifs des premiers essais sont illustrés sur les figures 11 et 12 qui représentent l'évolution temporelle de la tension d'arc pour trois valeurs de l'intensité du courant et 4 valeurs de la vitesse d'ouverture des électrodes.

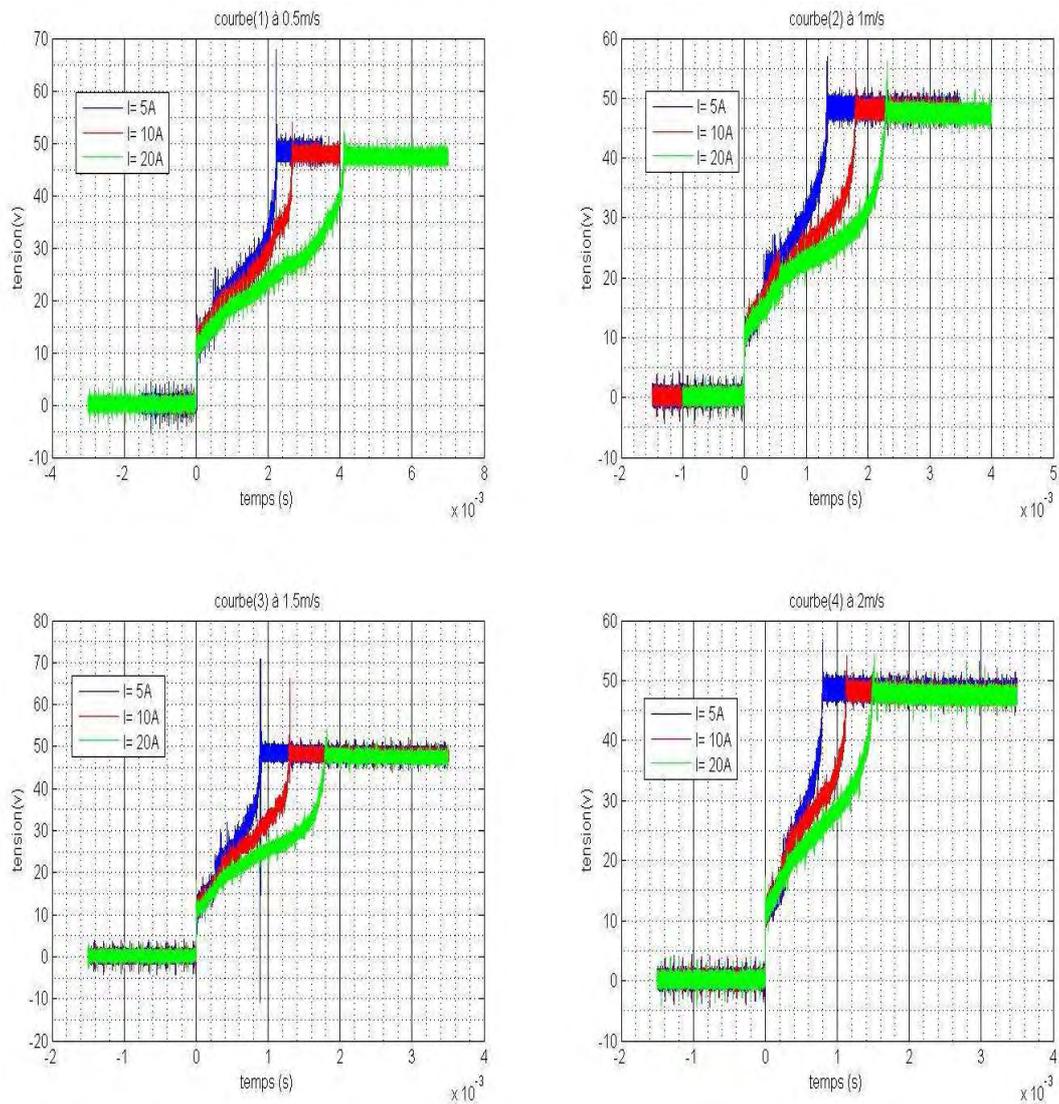


Figure 11 : Evolution temporelle de la tension d'arc pour différentes vitesses et intensités du courant pour des électrodes en argent.

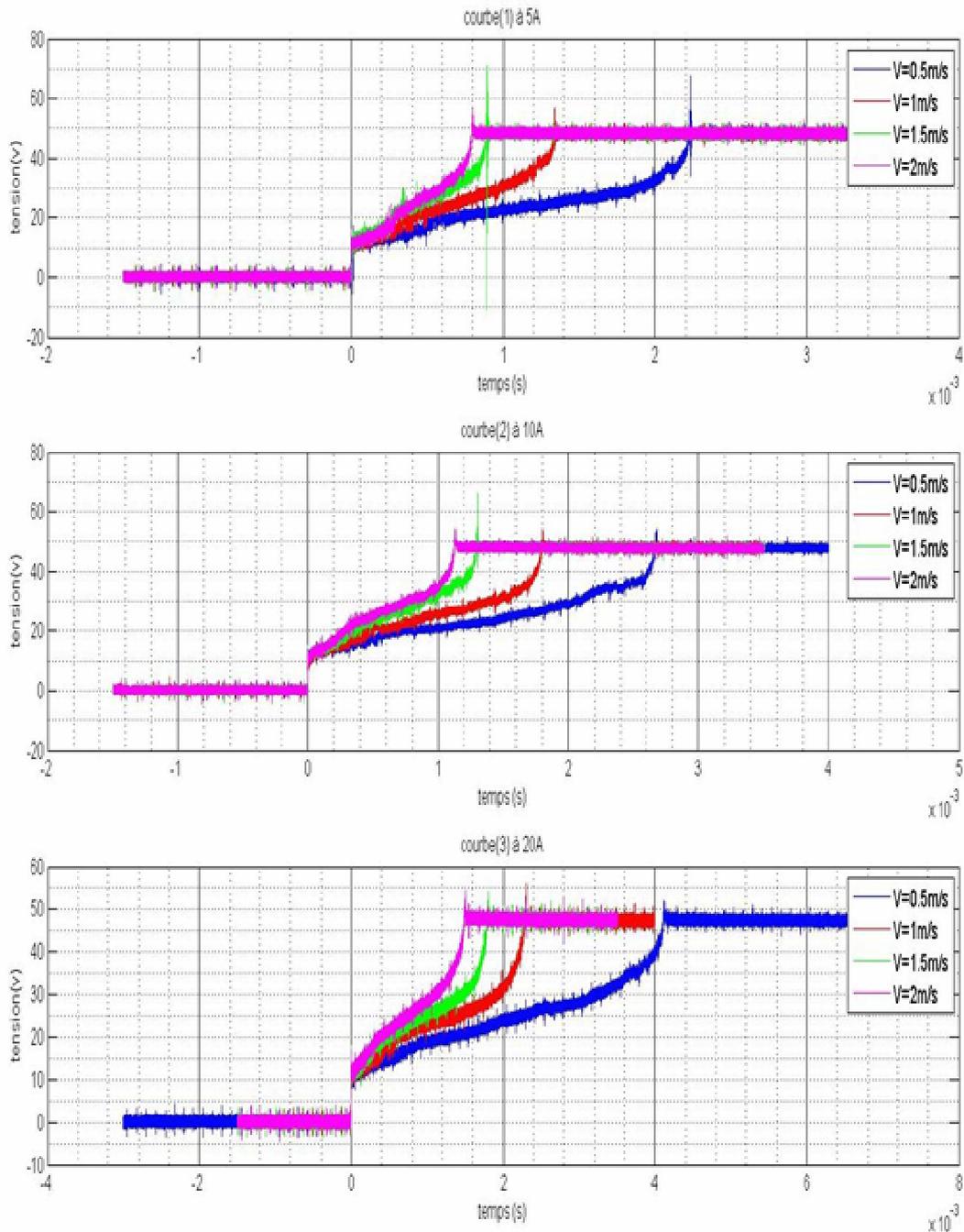


Figure 12 : Evolution temporelle de la tension d'arc pour différentes vitesses et intensités du courant dans le cas des électrodes en argent.

L'allure de ces courbes de tension d'arc montre que la durée d'arc :

- croît avec l'intensité du courant, pour une vitesse donnée ;
- décroît avec la vitesse d'ouverture des contacts, pour une intensité de courant fixée.

Quant à la valeur du gap de tension (passage de 0 V à 10 V environ) qui correspondrait à la chute de tension cathodique, elle est quasiment invariable. Ainsi, l'analyse de ces résultats indique que :

- pour une vitesse fixée, l'augmentation de l'intensité du courant entraîne celle du temps d'arc ce qui favorise l'érosion des contacts ;
- pour une intensité de courant donnée, l'accroissement de la vitesse d'ouverture entraîne une diminution du temps d'arc, donc une diminution de l'érosion ;
- pour une intensité de courant donnée, la variation de la vitesse n'a pas d'influence sur les chutes de tension.

4 Résultats quantitatifs de mesures

D'autres mesures réalisées dans l'air ont consisté à étudier l'évolution de certaines grandeurs telles que la durée d'arc, la longueur d'arc et les chutes de tension cathodiques et anodiques en fonctions de trois paramètres : intensité du courant, vitesse d'ouverture des contacts et nature du matériau. Ces mesures sont effectuées dans des conditions expérimentales répertoriées dans le tableau 2.

Courant	Vitesse	Matériau
5 A à 20 A par pas de 5 A	0,5 m/s à 2 m/s par pas de 0,5 m/s	Ag, AgCdO, AgZnO, AgSnO ₂

Tableau 2 : Conditions d'essais en courant, vitesse et nature du matériau.

4.1 Durée et longueur d'arc

4.1.1 Durée d'arc

A partir du tracé de la tension, on mesure la durée d'arc, 5 essais en ouverture sont effectués pour chaque valeur de courant et de vitesse ; la durée d'arc retenue est la moyenne des 5 opérations. Compte tenu de la multitude des résultats (différentes vitesses et intensités de courant), l'ensemble des mesures n'est pas répertorié dans ce rapport. Cependant, nous avons présenté dans cette partie (Figure 13) la durée d'arc :

- en fonction de la vitesse ($t_{\text{arc}} = f(v)$) pour trois valeurs de l'intensité du courant dans le cas de l'argent (Figure 13-1);
- en fonction de la vitesse ($t_{\text{arc}} = f(v)$) pour une intensité de courant de 10 A dans le cas de trois matériaux (Figure 13-2);
- en fonction de l'intensité du courant ($t_{\text{arc}} = f(I)$) pour une vitesse de 1 m/s dans le cas de trois matériaux (Figure 13-3).

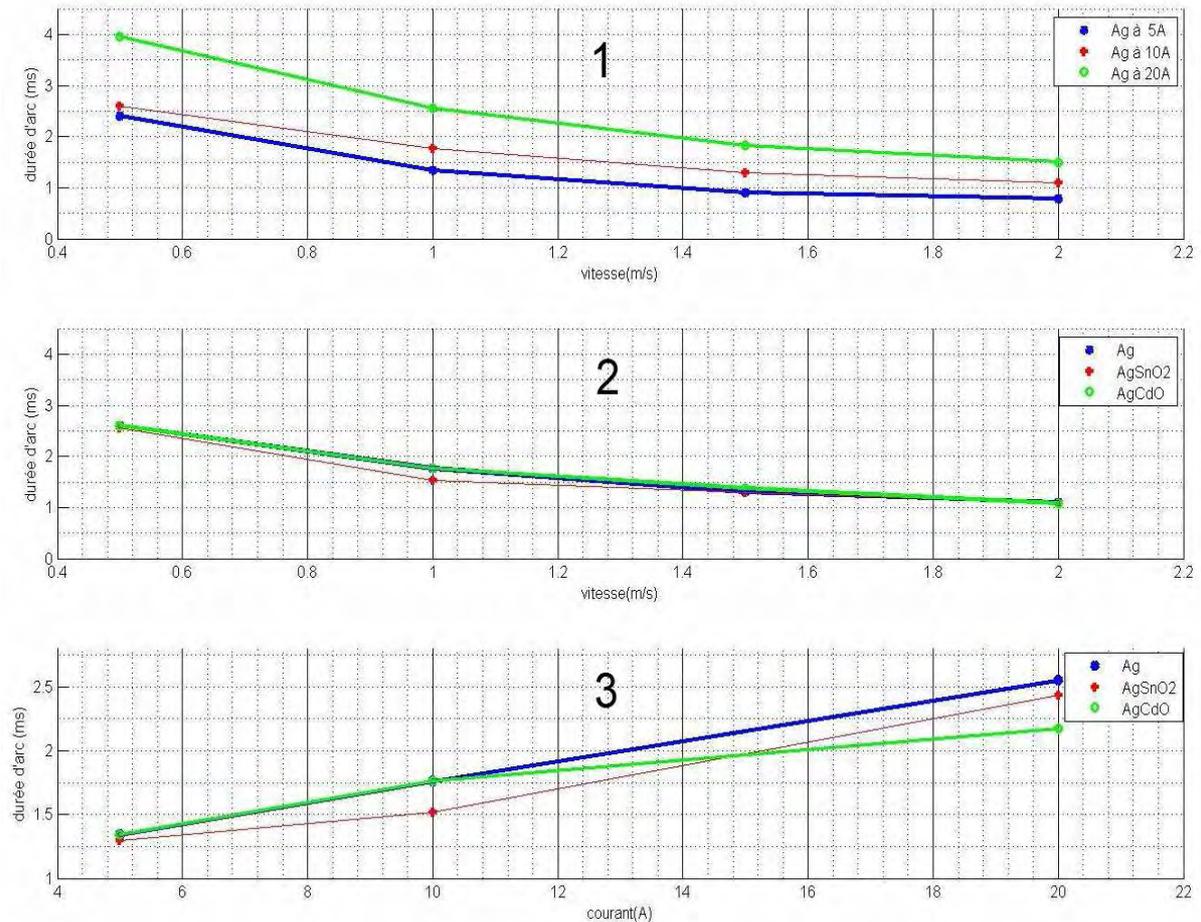


Figure 13 : Durée d'arc en fonction :

- (1) de la vitesse pour l'Ag à différentes intensités du courant
- (2) de la vitesse pour 3 matériaux à 10 A
- (3) de l'intensité du courant pour 3 matériaux à 1m/s

Ces résultats montrent que pour tous les matériaux, la durée d'arc est une fonction décroissante de la vitesse d'ouverture des contacts (Figure 13-1 et Figure 13-2). Pour une vitesse donnée, cette durée est d'autant plus importante que l'intensité du courant est élevée (Figure 13-1 et Figure 13-3) et ceci quelle que soit la nature du matériau.

4.1.2 Longueur d'arc

La longueur d'arc est directement liée à la durée de celui-ci, elle est déterminée à partir de la mesure du temps d'arc par l'expression :

$$l_{arc} = v.t_{arc}$$

Avec, l_{arc} la longueur d'arc, v la vitesse de séparation des électrodes et t_{arc} la durée d'arc.

Les résultats relatifs à la longueur d'arc sont donnés :

- en fonction de la vitesse ($l_{arc} = f(v)$) pour trois valeurs de l'intensité du courant dans le cas de l'argent (Figure 14-1) ;

- en fonction de la vitesse ($l_{arc} = f(v)$) pour une intensité de courant de 10 A dans le cas de trois matériaux (Figure 14-2) ;
- en fonction de l'intensité du courant ($l_{arc} = f(I)$) pour une vitesse de 1 m/s dans le cas de trois matériaux (Figure 14-3).

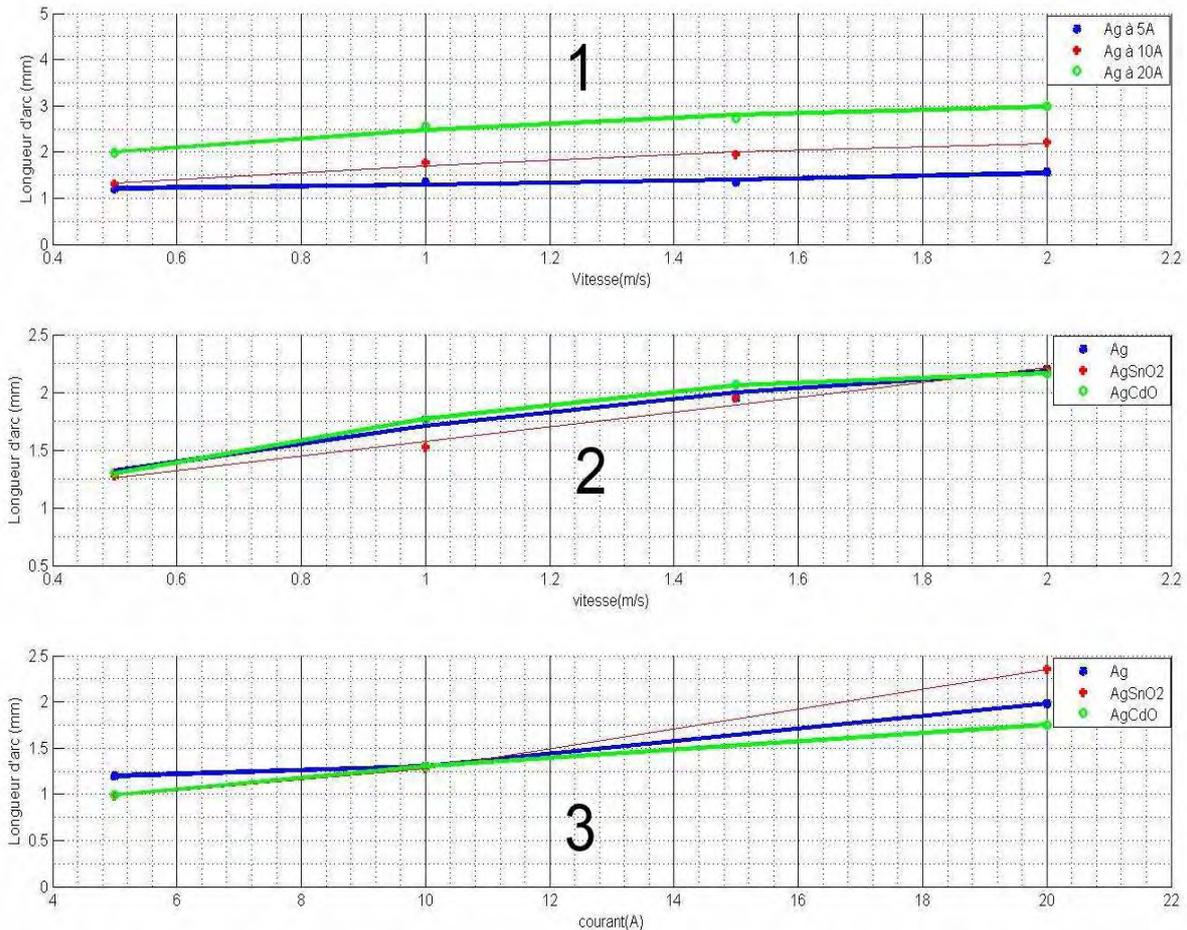


Figure 14 : Longueur d'arc en fonction :

- (1) de la vitesse pour l'Ag à différentes intensités du courant
- (2) de la vitesse pour différents matériaux à 10 A
- (3) de l'intensité du courant pour 3 matériaux à 1m/s

Les courbes de la figure 14 indiquent que la longueur d'arc est une fonction croissante de l'intensité du courant et de la vitesse de séparation des contacts. Un tel accroissement est dépendant de la nature du matériau.

En conclusion, sur la figure 13 on constate que le fait d'augmenter l'intensité de courant conduit à une durée d'arc plus importante à vitesse de séparation équivalente, cette influence du courant peut s'expliquer par l'allongement du pont fondu lors de la séparation des électrodes. Après la rupture du pont, le milieu est aussi dense en vapeurs métalliques, ce qui facilite la conduction dans le plasma. En augmentant l'intensité du courant, on monte en puissance, favorisant ainsi l'extraction des électrons de la cathode et le maintien de l'arc.

Quant à la longueur d'arc (Figure 14), elle est directement liée à la vitesse

d'ouverture des contacts et à la durée d'arc. On constate que plus en monte en vitesse, plus la durée d'arc est raccourcie, ce qui paraît évident contrairement à la longueur de l'arc dont l'évolution (en fonction de la vitesse) est inverse à celle de la durée ; la montée en vitesse permet l'allongement de l'arc.

L'influence de la nature du matériau dans ce cas est difficile à mettre en évidence, vue la précision des mesures, la différence en qualité de géométrie et état de surface des électrodes. Ce point de vue (nature du matériau) sera discuté dans les parties 4.3 et 4.4.

4.2 Méthode de détermination des grandeurs

4.2.1 Méthode de détermination des chutes de tension anodiques et cathodiques

L'allure de la courbe de la figure 15 représentant l'évolution temporelle de la tension et du courant d'arc dans le cas des électrodes en nickel (Ni), pour une vitesse d'ouverture des contacts de 1 m/s et un courant d'arc de 10 A est valable aussi pour les autres matériaux. La courbe caractéristique de la tension d'arc permet de déterminer les valeurs des chutes de tension aux niveaux des électrodes. La méthode de détermination de ces valeurs est indiquée sur cette figure. Les chutes V_c (chute cathodique) et V_a (chute anodique) sont évaluées en utilisant les pentes relatives à la colonne d'arc et à la zone d'expansion.

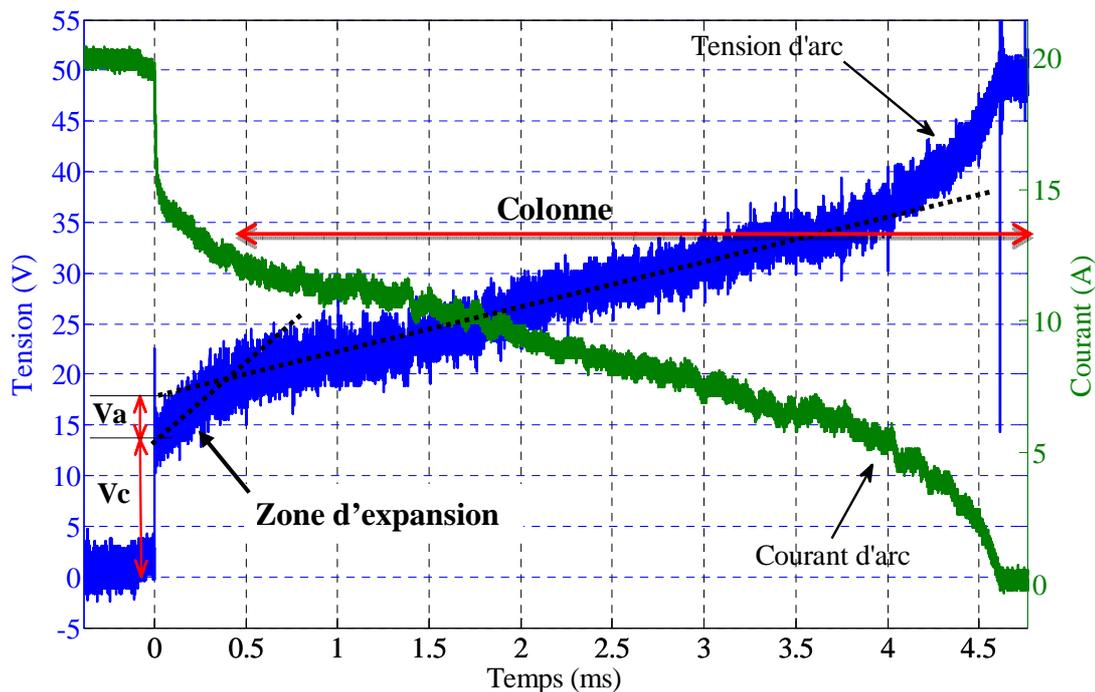


Figure 15 : Tension et courant d'arc en fonction du temps pour une vitesse d'ouverture de 1m/s et un courant de 20 A dans le cas des électrodes en nickel (Ni).

Interprétation :

Lors de la coupure, l'arc créé évolue rapidement dans le temps, de son ignition jusqu'à son extinction avec une structure complètement différente de l'arc stationnaire. La structure de l'arc de coupure est imposée par l'espace inter électrodes qui évolue dans le temps.

On a vu précédemment que la création de l'arc se fait quelques dizaine de nanosecondes après la rupture du pont fondu, les premiers électrons extraits de la cathode ionisent les espèces présentes et la conduction au sein du plasma se met en place par un processus d'avalanche qui conduit à une densité électronique assez élevée pour permettre le passage du courant dans le gaz. Au fur et à mesure de la séparation, les différentes zones cathodiques (zone balistique, zones de relaxation des particules lourdes et des électrons, zone d'expansion) se mettent en place, ce qui est indispensable au fonctionnement de la décharge. La création des autres zones constituant la tâche anodique et la colonne est fonction de la distance inter électrodes. Tant que l'espace inter électrodes ne fait que la somme des différentes zones cathodiques et anodiques, la colonne est encore inexistante. Après avoir dépassé cette longueur qui constitue les deux taches (cathode et anode), on voit apparaître la colonne qui est proche de l'ETL, tandis que les zones cathodiques et anodiques sont hors équilibre thermodynamique.

Pendant la phase d'ouverture des contacts l'arc continue de s'allonger jusqu'au moment où les conditions nécessaires pour son maintien ne sont plus réunies et durant cette phase le courant chute brusquement. La composante inductive du circuit s'oppose à l'annulation de ce dernier, d'où la forme incurvée de la courbe de tension, suivie d'une surtension (pic) avant de revenir à la valeur de la tension d'alimentation.

Au final, l'évolution de la tension d'arc peut être écrite sous la forme :

$$V_{totale} = V_{cathode} + V_{anode} + V_{colonne}$$

Avec :

- V_{totale} : chute de tension totale dans l'arc
- $V_{cathode}$: chute de tension cathodique
- V_{anode} : chute de tension anodique
- $V_{colonne}$: chute de tension dans la colonne

4.2.2 Méthode de détermination des champs électriques et des épaisseurs des différentes zones

A partir de la courbe de tension (Figure 16) on peut évaluer la valeur du champ électrique dans les trois zones. Pour cela il faut connaître l'épaisseur Δl de chaque zone ($E = \Delta V / \Delta l$), ce qui nécessite une dilatation des zones correspondant aux champs E_{cat} (cathode) et E_{exp} (expansion) comme le montrent les courbes des figures 17 et 18.

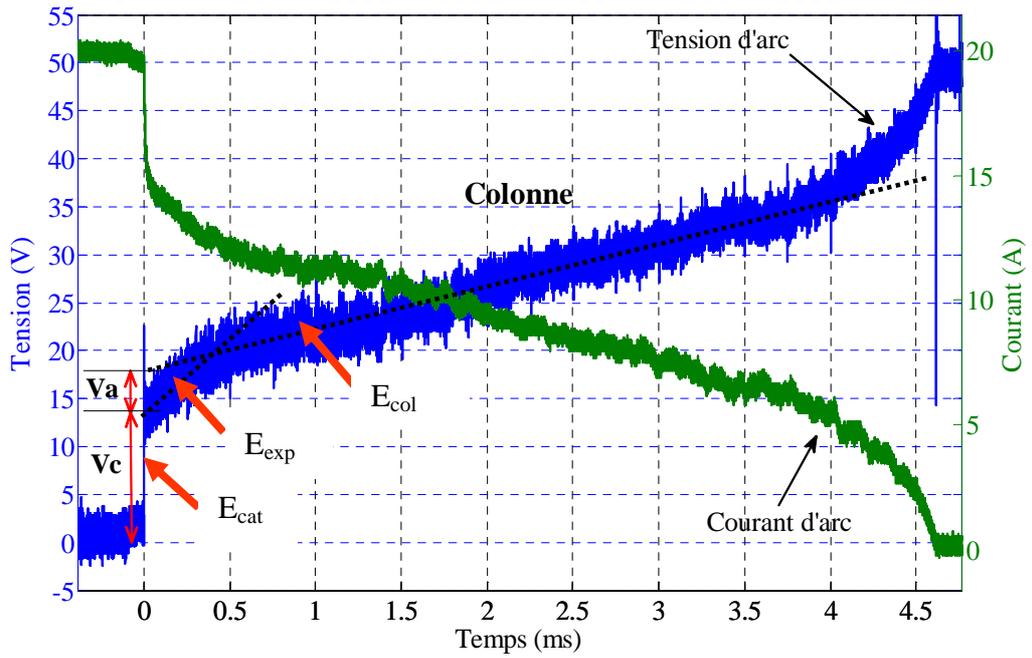


Figure 16 : Tension et courant d'arc en fonction du temps pour une vitesse d'ouverture de 1m/s et un courant de 20 A dans le cas des électrodes en nickel (Ni).

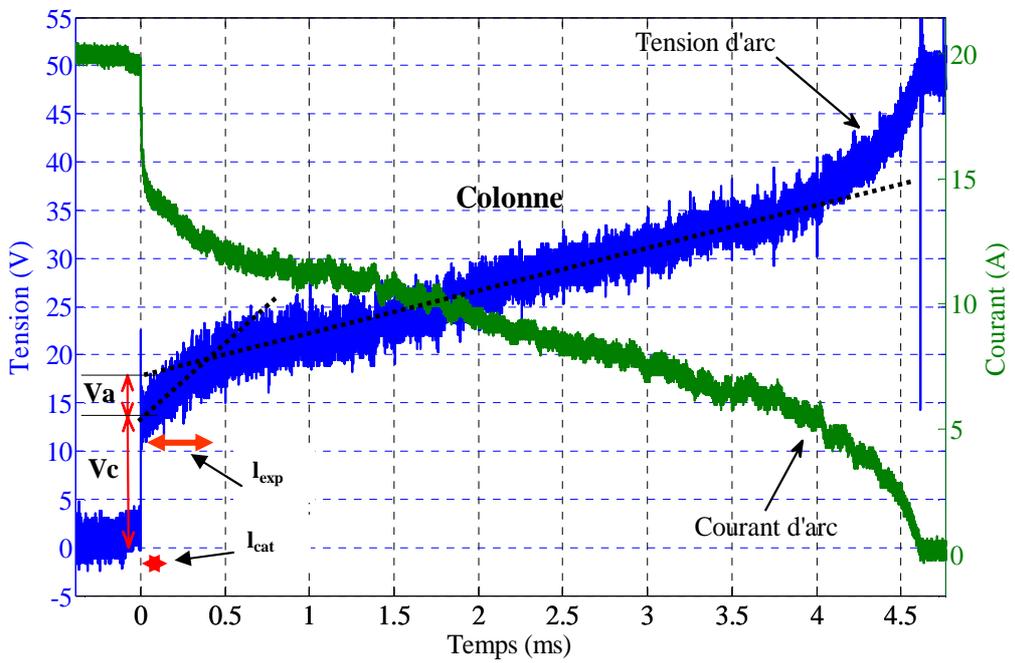


Figure 17 : Tension et courant d'arc en fonction du temps ; identification des zones

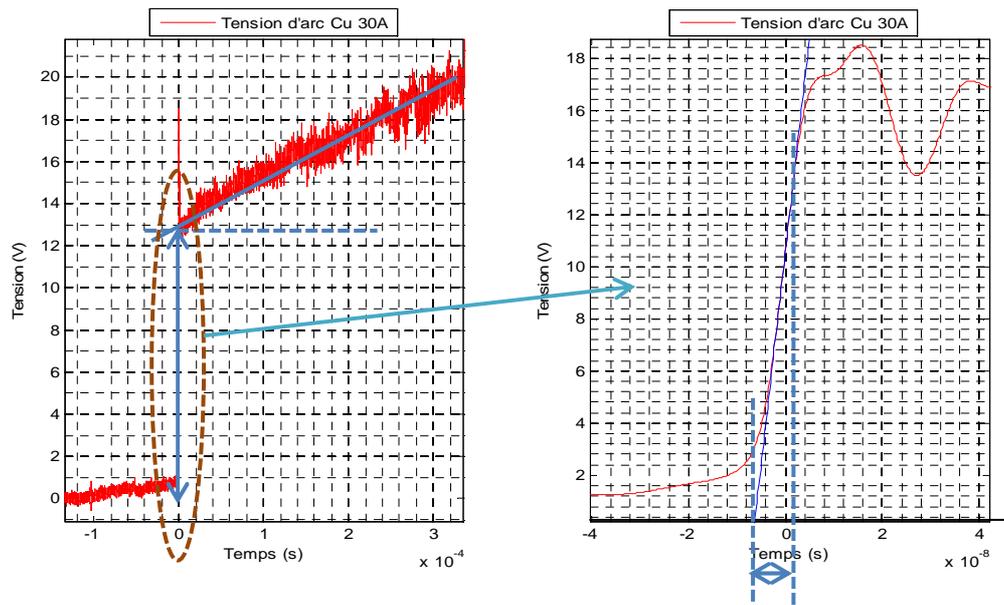


Figure 18 : Tension et courant d'arc en fonction du temps ; dilatation de la courbe de tension dans la zone cathodique.

4.3 Résultats et analyse de la valeur des chutes de tension anodiques et cathodiques et du temps d'arc

Des essais ont été effectués sur des électrodes des matériaux cités dans le tableau 1 pour une vitesse d'ouverture de 1m/s et une gamme de courant allant de 1,2 A à 30 A ; soit : **1,2 A, 2 A, 3 A, 4 A, 5 A, 7,5 A, 10 A, 15 A, 20 A, 25 A et 30 A.**

Pour chaque valeur de l'intensité du courant, dix essais ont été effectués par matériau. Les valeurs moyennes des chutes de tension à la cathode et à l'anode sont reportées sur les graphes ci-après.

4.3.1 Matériaux purs

Les figures ci-dessous, illustrent l'évolution des chutes de tension cathodiques (Figure 19) et anodiques (Figure 20) en fonction de l'intensité du courant dans le cas des matériaux purs.

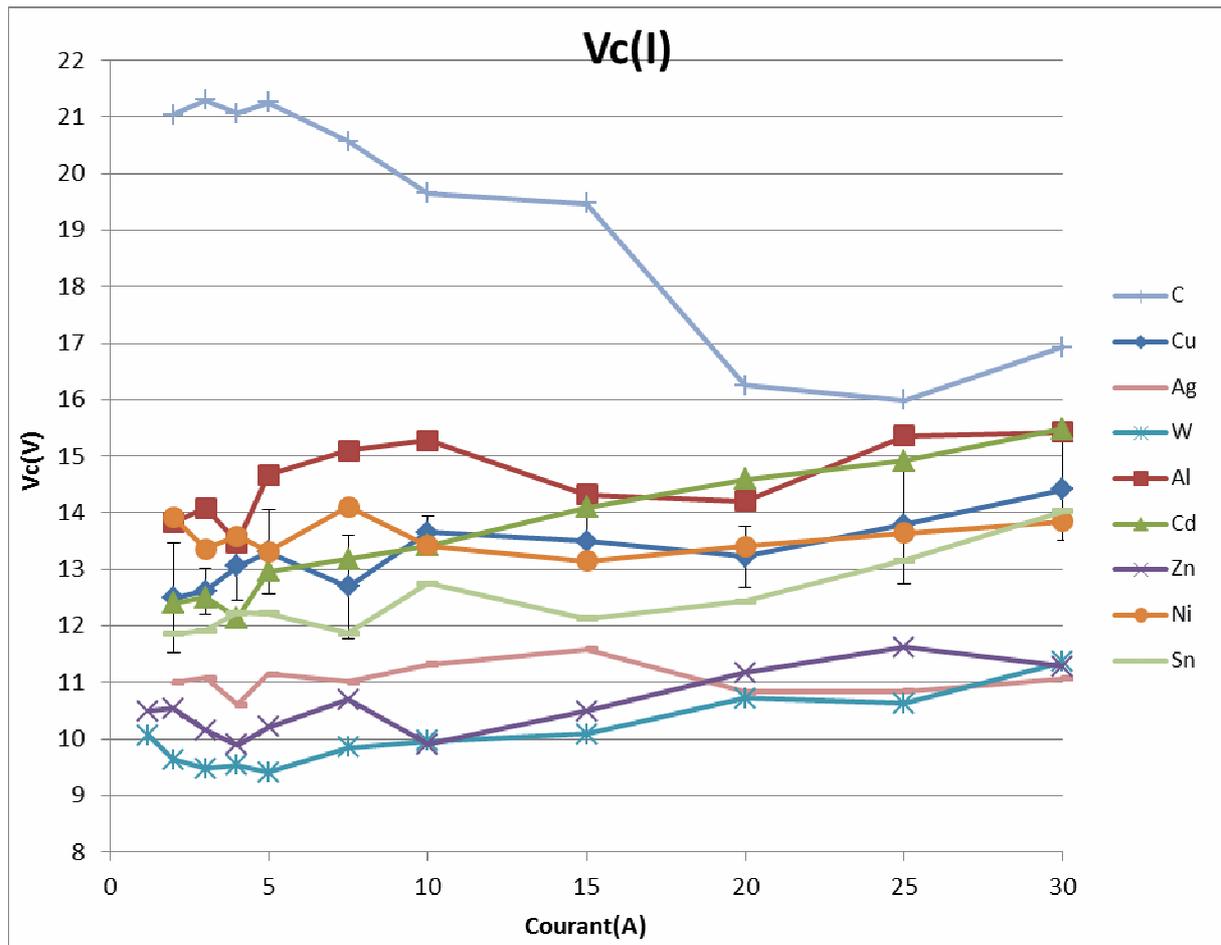


Figure 19 : Evolution de la chute de tension cathodique en fonction de l'intensité du courant pour les matériaux purs.

L'analyse des courbes de la Figure 19, dans la gamme de courant utilisée, permet de relever quelques remarques :

- Vue la précision sur l'évaluation de la valeur de la chute de tension cathodique V_c (voir annexe), on ne peut pas affirmer l'influence de l'intensité du courant I sur la valeur de V_c .
- Si on admet que la valeur de V_c est indépendante de I , on peut distinguer trois groupes de matériaux, pour des valeurs du courant supérieures à 5 A :
 - Groupe 1 (constitué de Ag, W et Zn) dont la valeur de V_c est comprise entre 9,5 et 11,5 V ;
 - Groupe 2 (constitué de Cu, Ni, Al et Cd dans la moindre mesure) dont la valeur de V_c est comprise entre 13 et 15 V ;
 - Groupe 3 (auquel appartient Sn) dont la valeur de V_c est autour de 13 V ;
 - Groupe 4 (auquel appartient C) dont la valeur de V_c fluctue autour de 18 V.

Le carbone est un cas à part, c'est un matériau friable et difficile à travailler. Les valeurs des chutes de tension V_c et V_a sont difficiles à extraire des courbes de la tension u_{arc} ce qui entraîne, avec la méthode employée, des valeurs négatives de V_a .

Contrairement aux chutes cathodiques (Figure 19) qui semblent stables vis à vis de l'intensité du courant, les chutes anodiques quant à elles fluctuent beaucoup (Figure 20) ce qui ne permet pas de dégager des tendances, sauf pour le nickel dont la valeur de V_a semble stable (autour de 2,5 V). Celle du cuivre est probablement proche de 4 V au delà de 5 A.

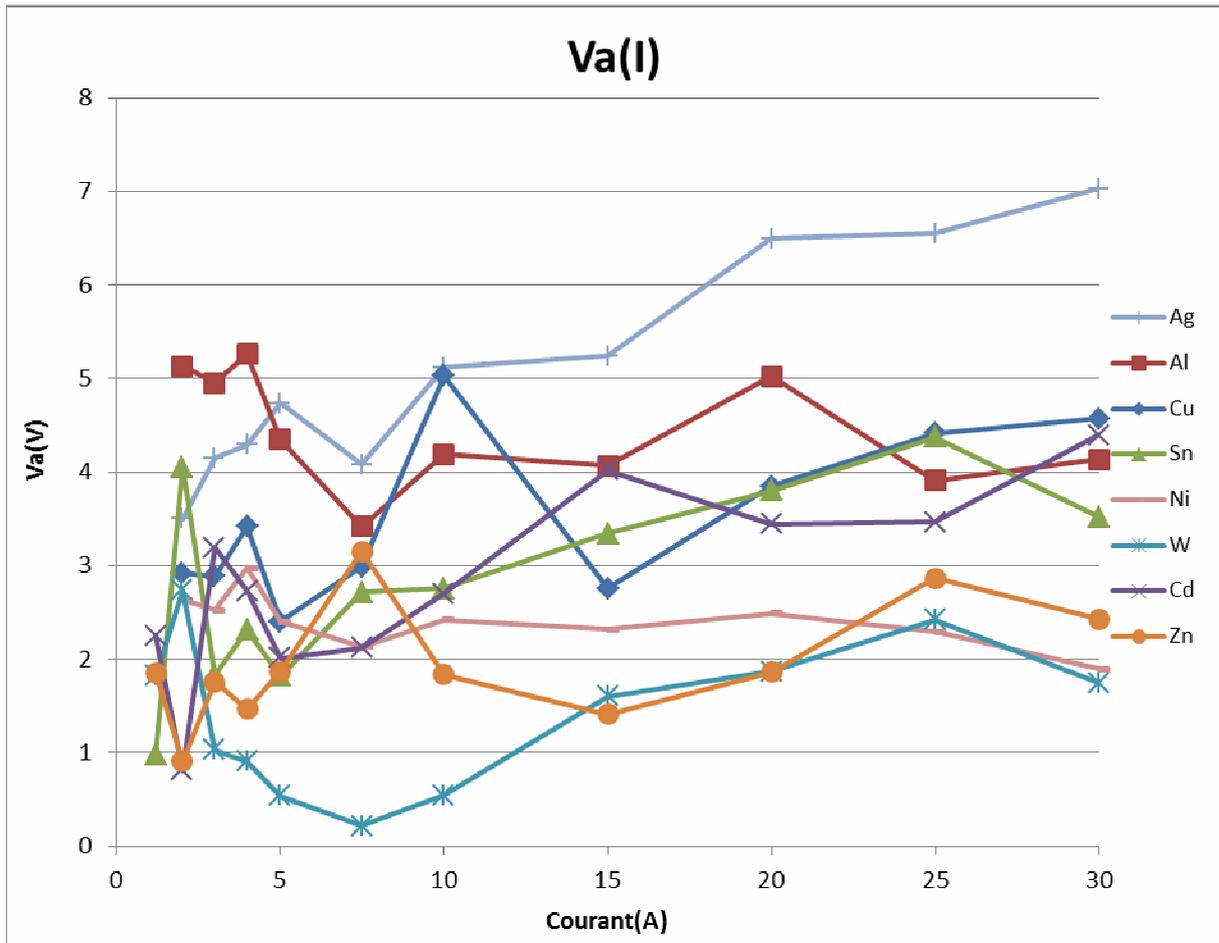


Figure 20 : Evolution de la chute de tension anodique en fonction de l'intensité du courant pour les matériaux purs, excepté le carbone.

Le temps d'arc t_{arc} (Figure 21), dépend de la nature du matériau et de l'intensité du courant I . Comme on pouvait s'y attendre, il croît d'une manière significative avec I , cet accroissement est plus ou moins important selon la nature du matériau. A titre d'exemple, lorsque la valeur de I passe de 1,2 A à 30 A la durée d'arc est multipliée par 40 dans le cas de l'étain. Ce facteur multiplicatif est de 26, 11 et 9 respectivement dans le cas du nickel, de l'argent et du cuivre.

On peut remarquer aussi (Figure 21) que le temps d'arc relatif aux contacts en carbone est le plus faible, comparé au temps d'arc des autres matériaux purs. Il est même situé en dessous de celui des électrodes en cuivre et en argent (matériaux classiques).

Il faut rappeler que la durée d'arc nous renseigne sur la longueur de celui-ci, ces deux grandeurs sont directement liées. Pour une vitesse d'ouverture des contacts de 1 m/s (Figure 21), l'allure des courbes de la longueur d'arc est quasiment identique à celle du temps d'arc.

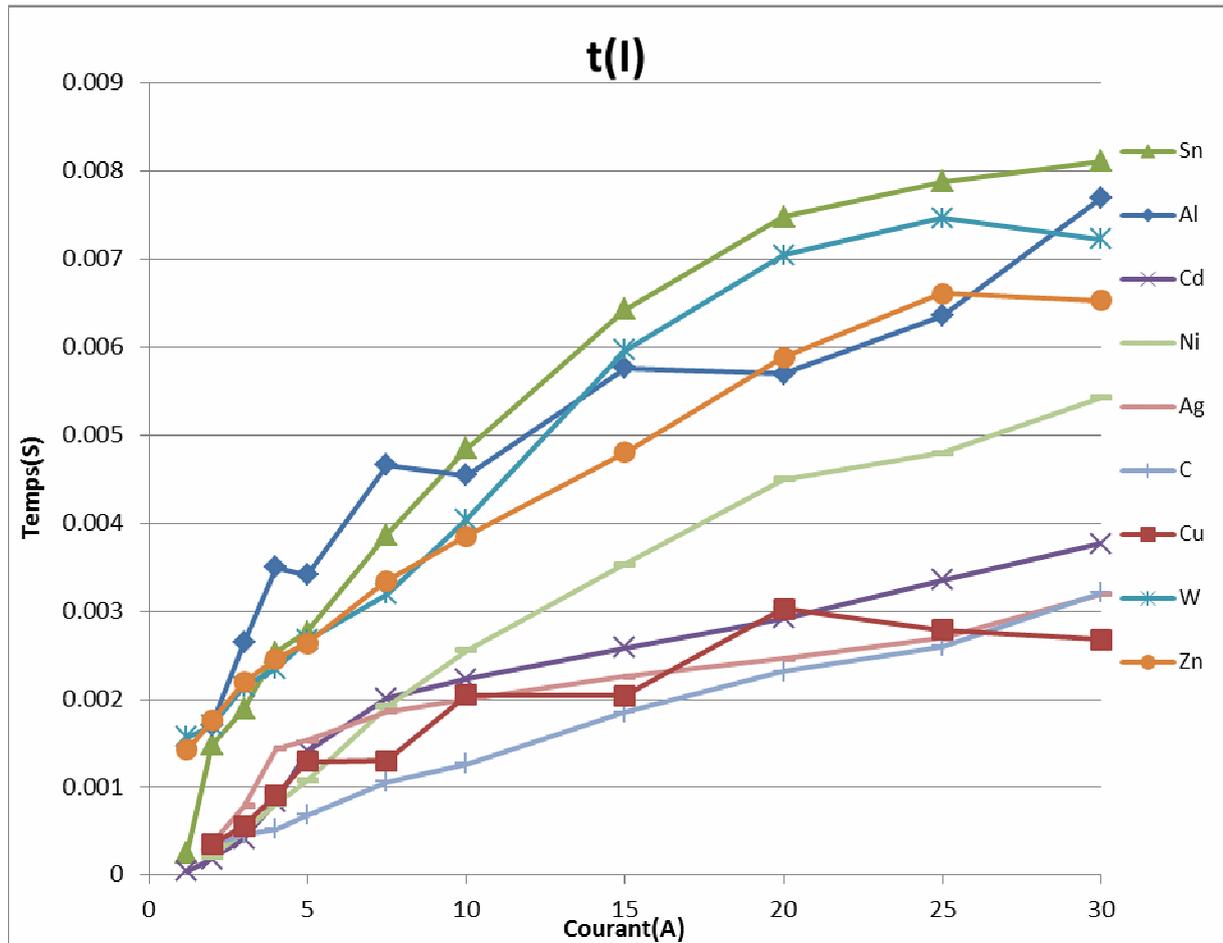


Figure 21 : Variation du temps d'arc en fonction de l'intensité du courant pour les matériaux purs pour une vitesse d'ouverture de 1 m/s.

4.3.2 Alliages et pseudo-alliages

Les courbes des figures ci-dessous illustrent le comportement des différents alliages.

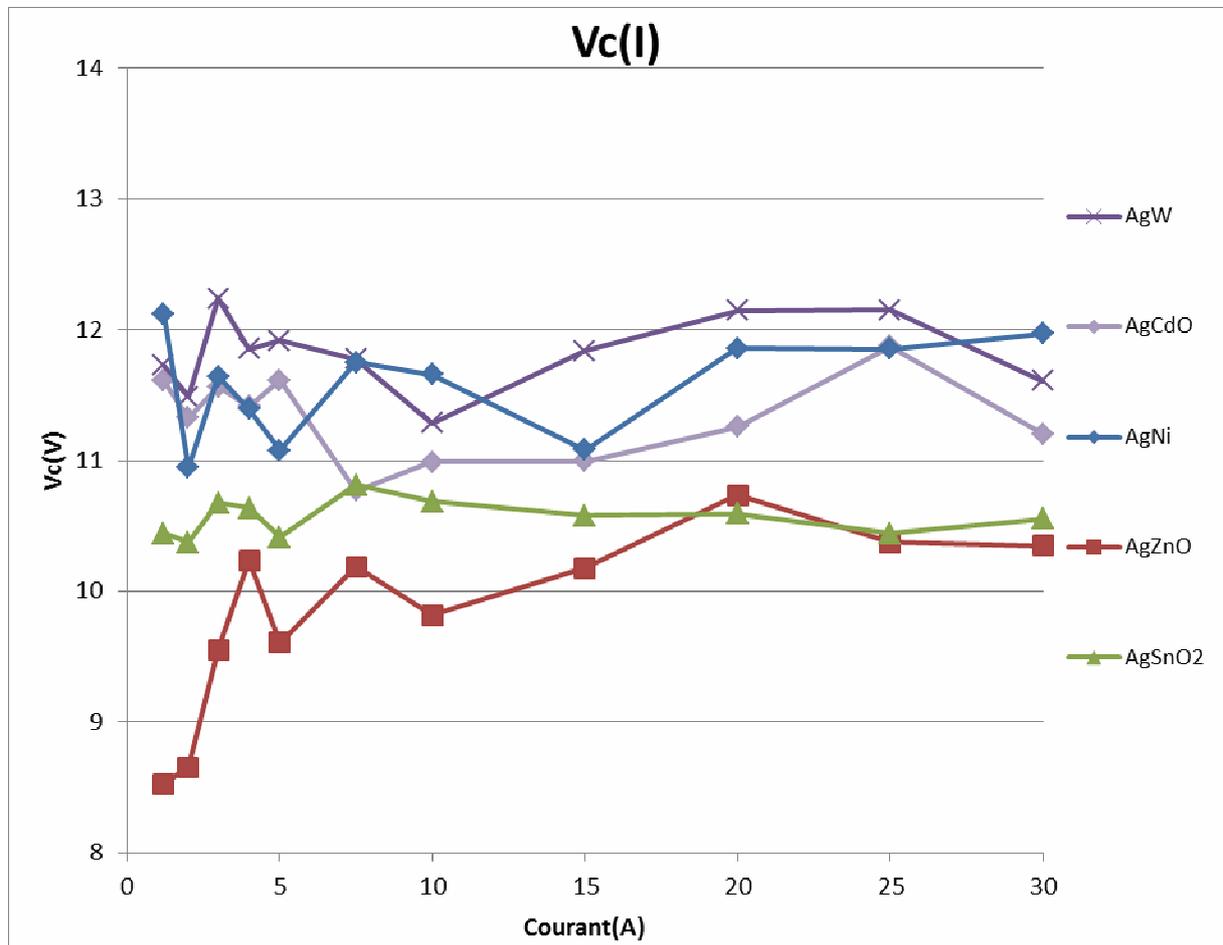


Figure 22 : Variation de la chute de tension cathodique en fonction de l'intensité du courant pour les alliages et pseudo alliages.

Les courbes de la Figure 22 montrent que seule la chute de tension cathodique V_c de l'AgZnO semble dépendre de l'intensité à faible courant d'arc (< 5 A). En effet, la valeur de V_c varie d'environ 8,5 V à 10,5 V dans la gamme de courant choisie. Celle de l'AgSnO₂ est de l'ordre de 10,5 V tandis que celles de l'AgCdO, l'AgNi et l'AgW fluctuent autour de 11,5 V. En ce qui concerne la chute de tension anodique V_a (Figure 23), les résultats sont très disparates, ce qui exclut toute analyse. Néanmoins, on peut estimer une variation de V_a entre 1 et 1,5 V dans le cas de l'AgW et de l'AgZnO pour des intensités de courant supérieures à 5 A.

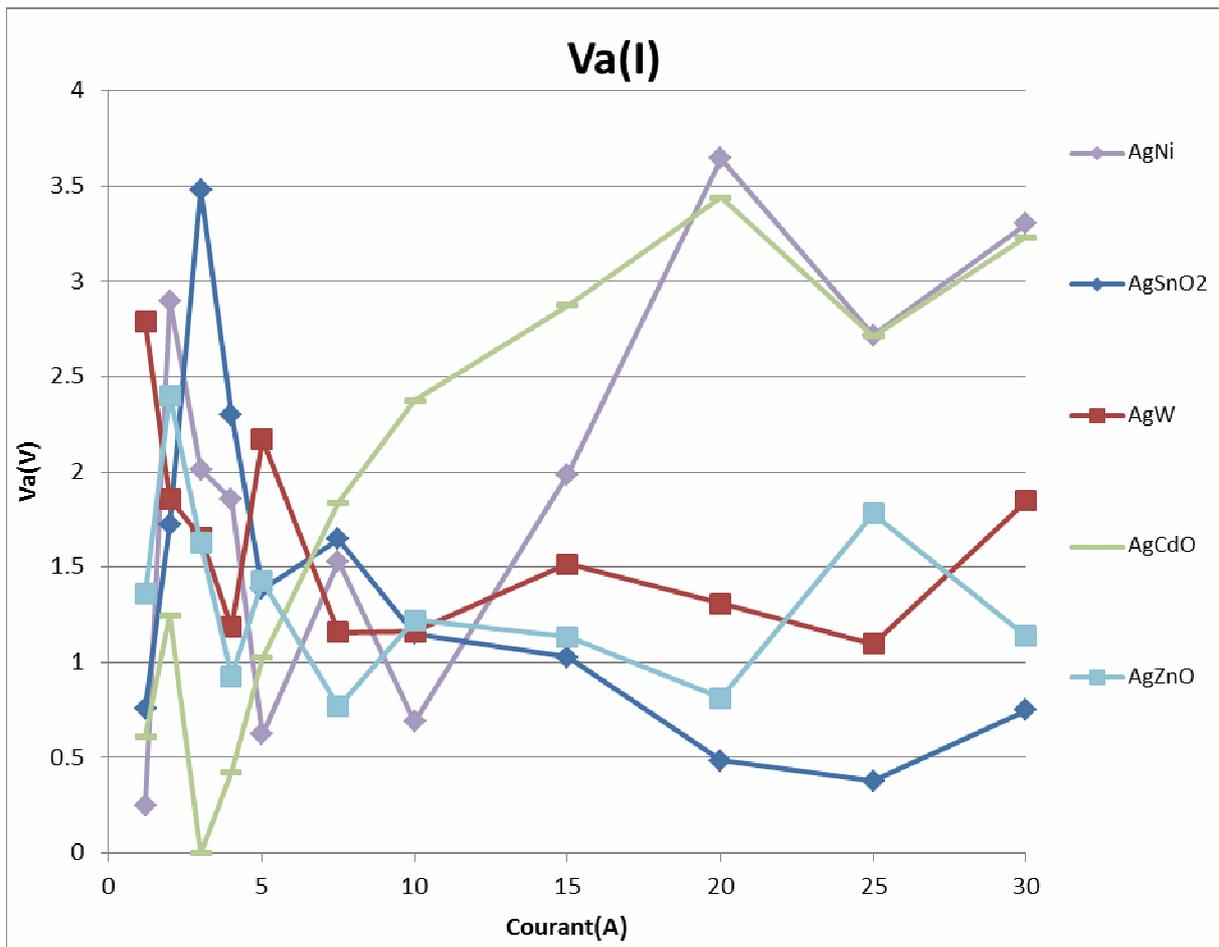


Figure 23 : Variation de la chute de tension anodique en fonction de l'intensité du courant pour les alliages et pseudo alliages.

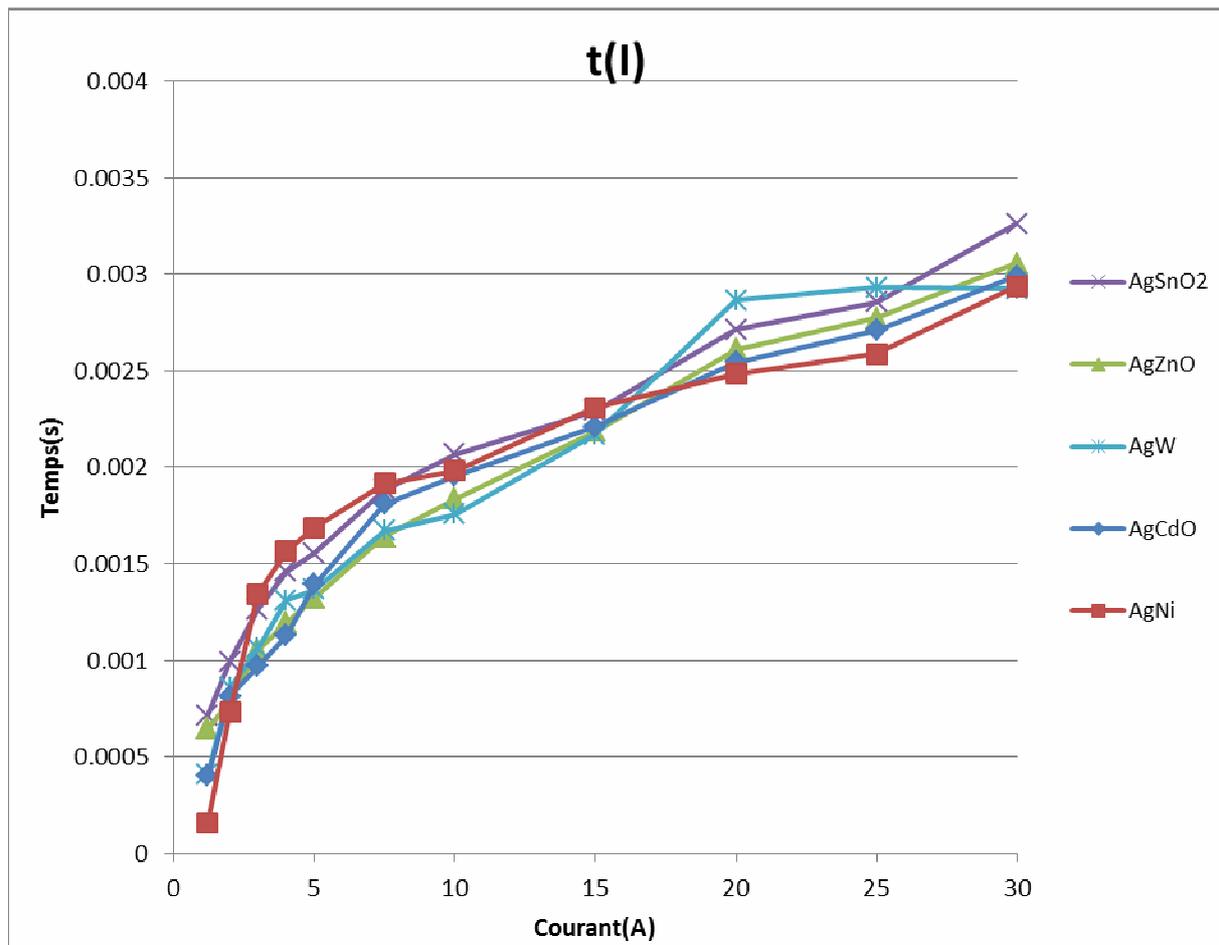


Figure 24 : Evolution du temps d'arc en fonction de l'intensité du courant pour une vitesse d'ouverture des contacts de 1 m/s, dans le cas des alliages et pseudo alliages.

Comme pour les matériaux purs, la durée d'arc croît avec l'intensité du courant (Figure 24) et il en est de même pour la longueur d'arc. Par ailleurs pour une intensité de courant donnée, l'écart, en terme de durée d'arc, entre ces alliages et pseudo alliages n'est pas très significatif.

4.4 Influence des adjuvants sur les caractéristiques de l'argent

Le but de cette étude est de voir l'influence des adjuvants tels que les métaux purs (Ni, Cd, Zn, Sn, W) et les oxydes (CdO, ZnO, SnO₂) sur les résultats relatifs à l'argent pur.

4.4.1 Chute de tension cathodique

On pourrait penser que pour un alliage AB constitué de deux métaux purs A et B, la valeur de la chute de tension cathodique de cet alliage serait comprise entre celle de A et celle de B et quelle serait plus proche de celle du métal dont le pourcentage est majoritaire. Cette hypothèse n'est vérifiée qu'à moitié comme le montrent les courbes des figures 25 (AgNi entre Ag et Ni mais près de Ag) et 26 (AgW au dessus de W et Ag).

Dans le cas d'un pseudo alliage, la présence d'oxygène (oxyde) rend encore plus difficile l'interprétation des résultats, cependant on peut noter que dans la plupart des cas, les

valeurs de V_c des pseudo alliages sont proches de celle de l'argent qui constitue 88 % du matériau (Figures 27 à 29).

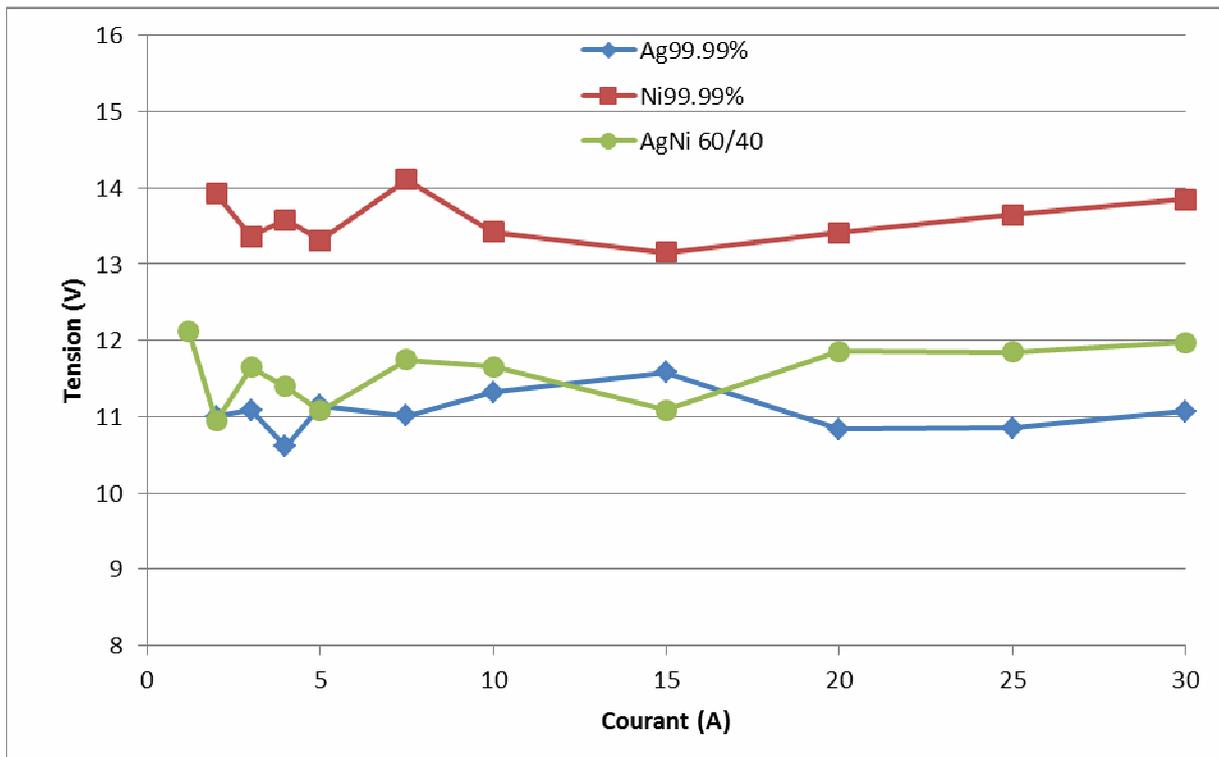


Figure 25 : Comparaison des chutes de tension à la cathode de l'AgNi et de ses matériaux purs le constituant.

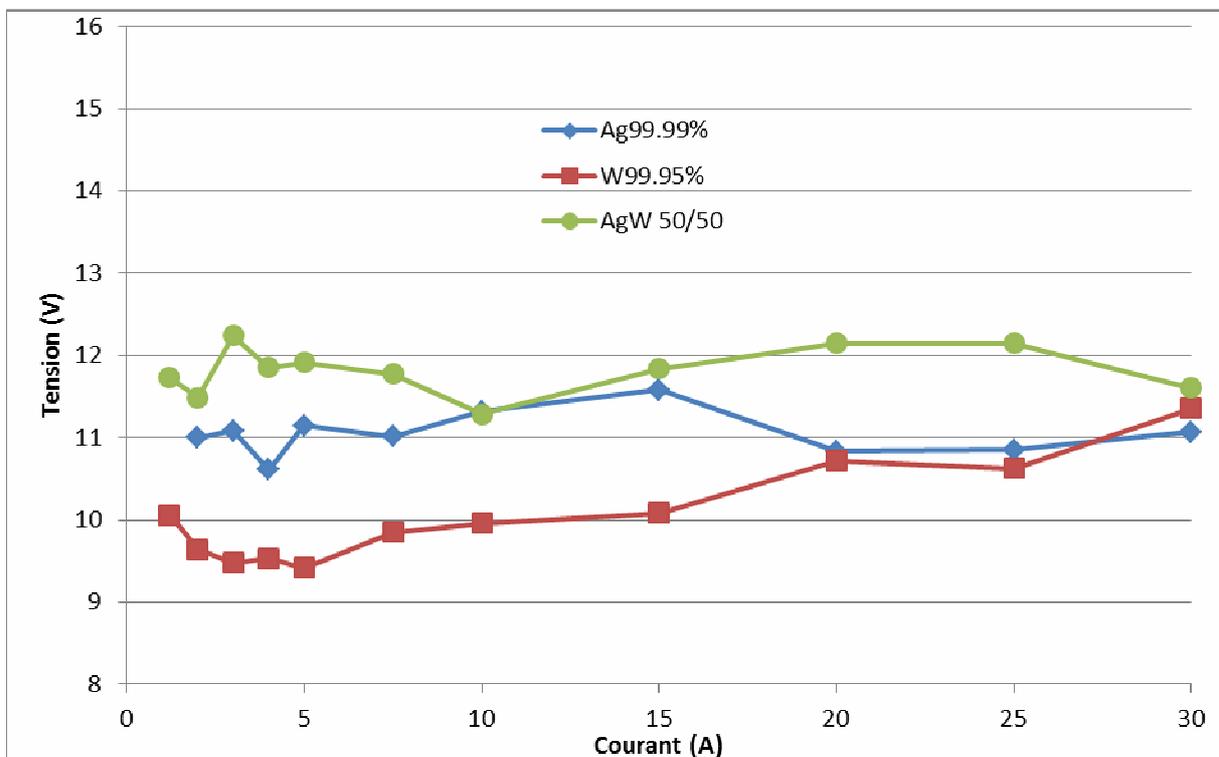


Figure 26 : Comparaison des chutes de tension à la cathode de l'AgW et de ses matériaux purs le constituant.

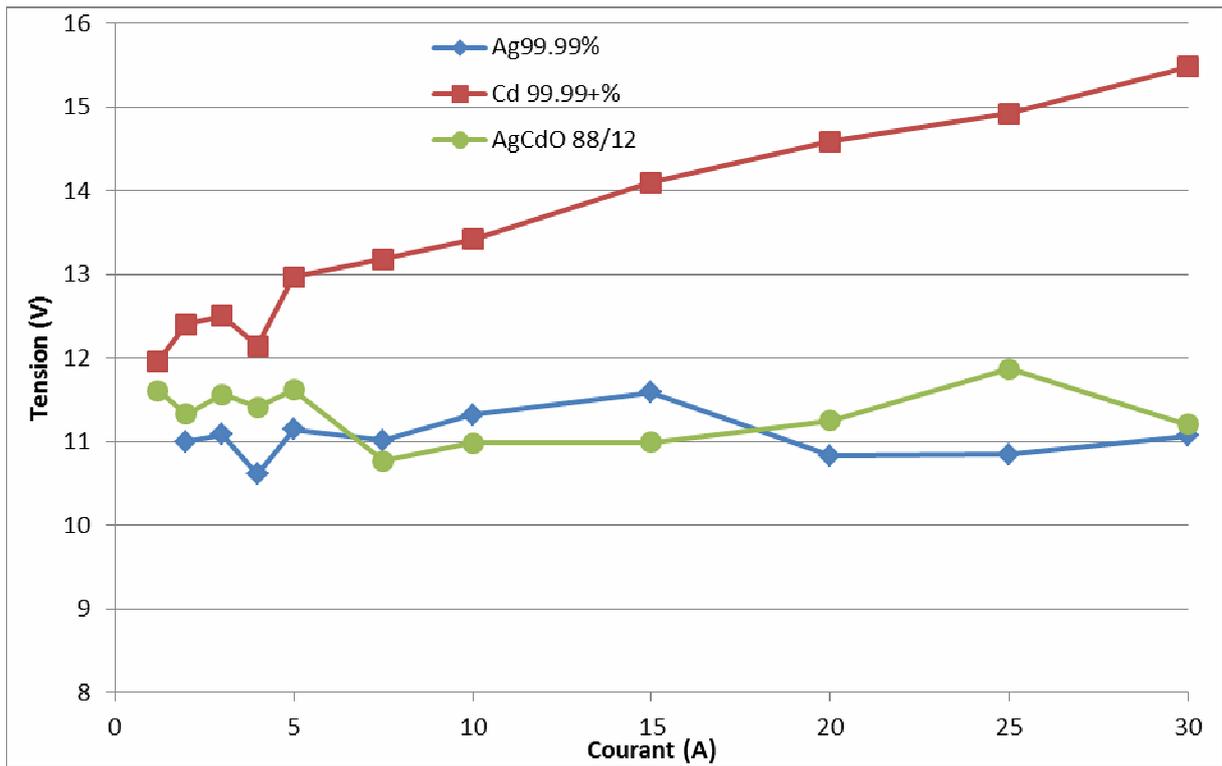


Figure 27 : Comparaison des chutes de tension à la cathode de l'AgCdO et de ses matériaux purs le constituant.

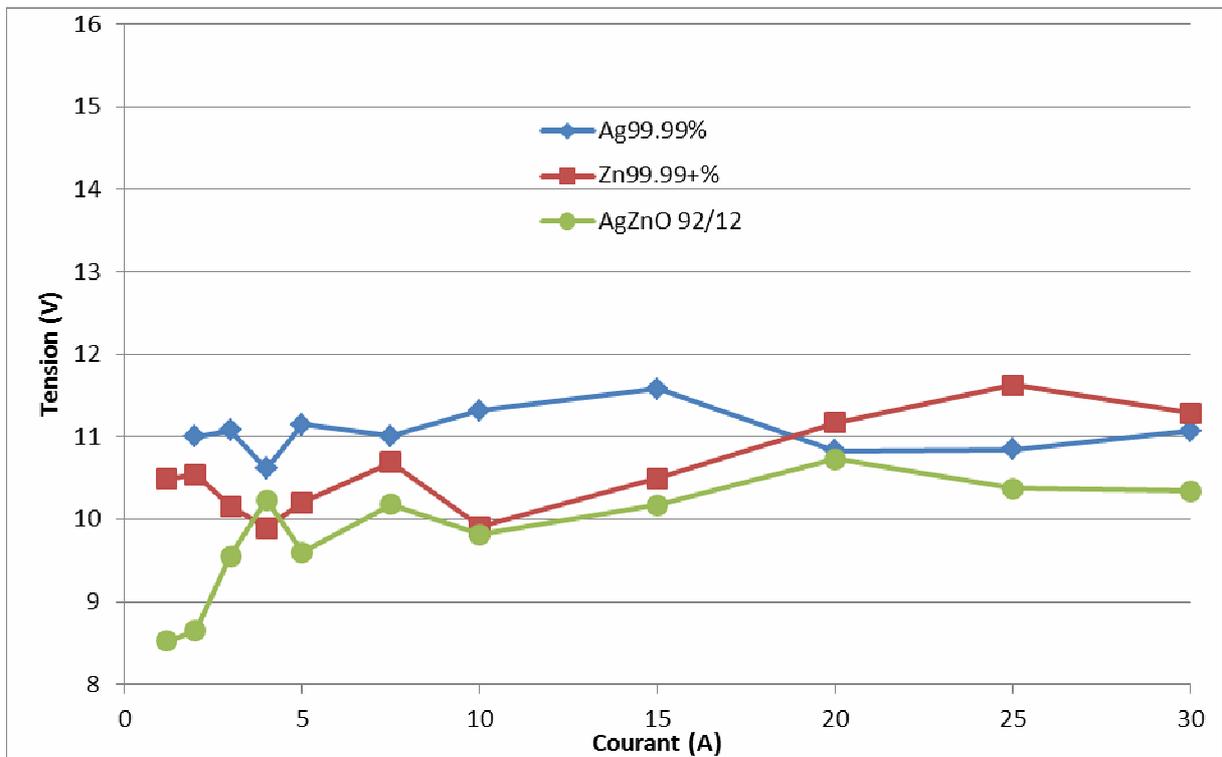


Figure 28 : Comparaison des chutes de tension à la cathode de l'AgZnO et de ses matériaux purs le constituant.

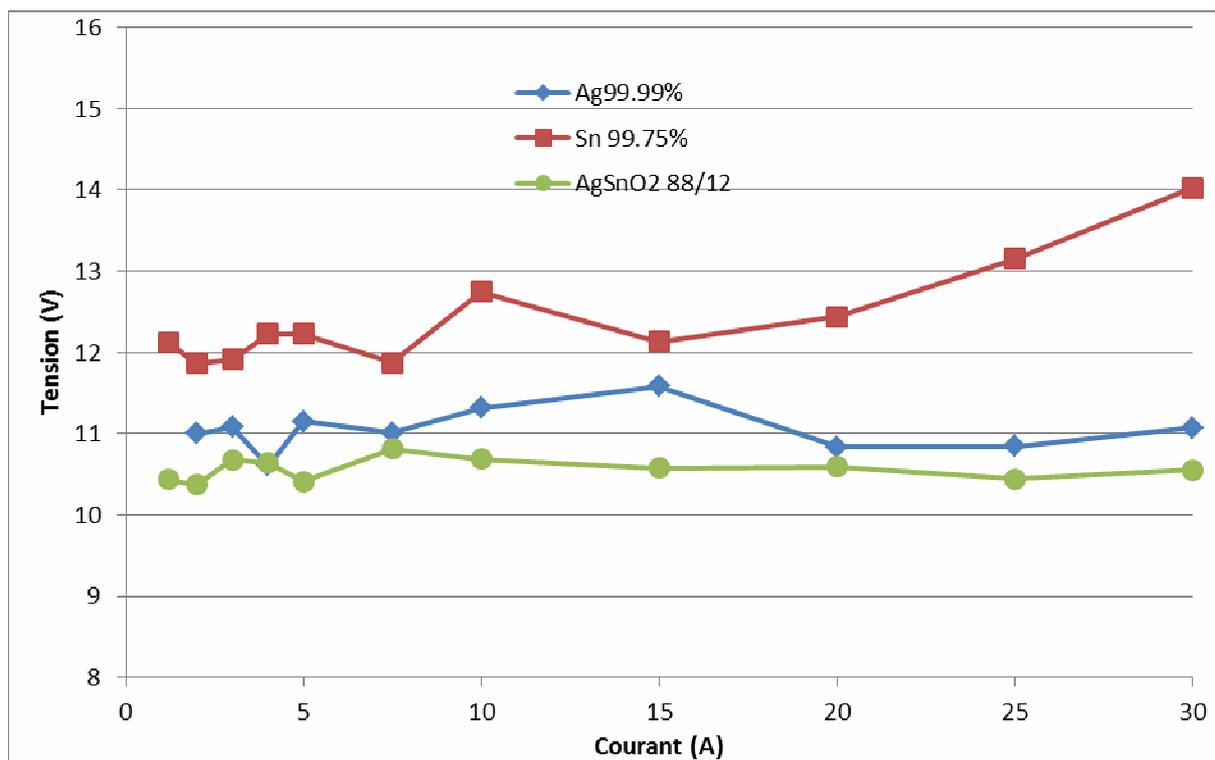


Figure 29 : Comparaison des chutes de tension à la cathode de l'AgSnO₂ et de ses matériaux purs le constituant.

4.4.2 Temps et longueur d'arc

L'analyse des courbes des figures 30 à 34 révèle que la durée d'arc dans le cas des électrodes en alliage ou pseudo alliage à base d'argent est proche de celle de l'argent et ceci quel que soit l'adjuvant (et son pourcentage) dans la matrice d'argent.

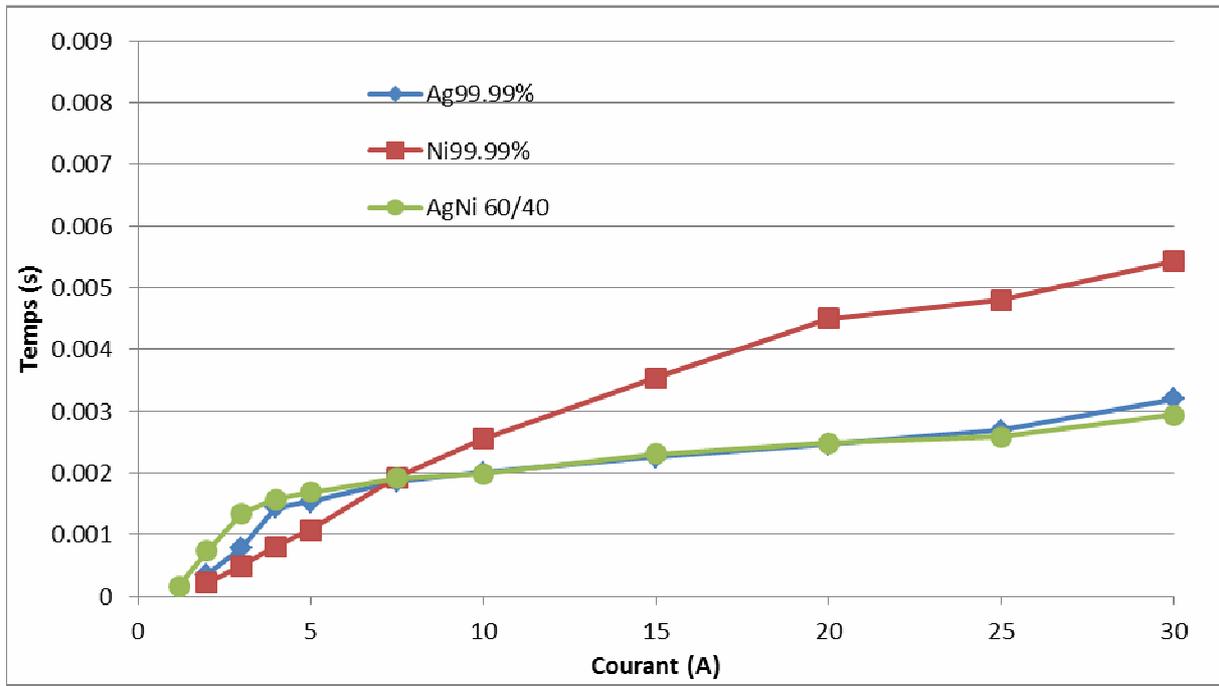


Figure 30 : Comparaison des temps d'arc de l'AgNi et de ses matériaux purs le constituant.

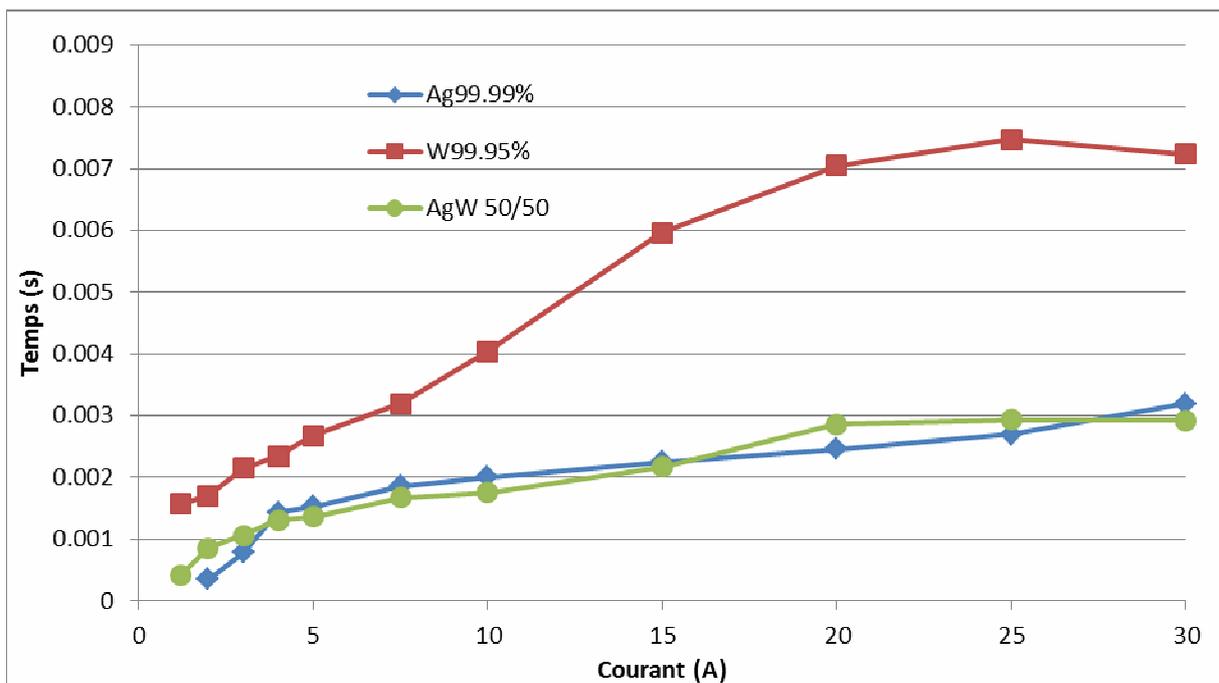


Figure 31 : Comparaison des temps d'arc de l'AgW et de ses matériaux purs le constituant.

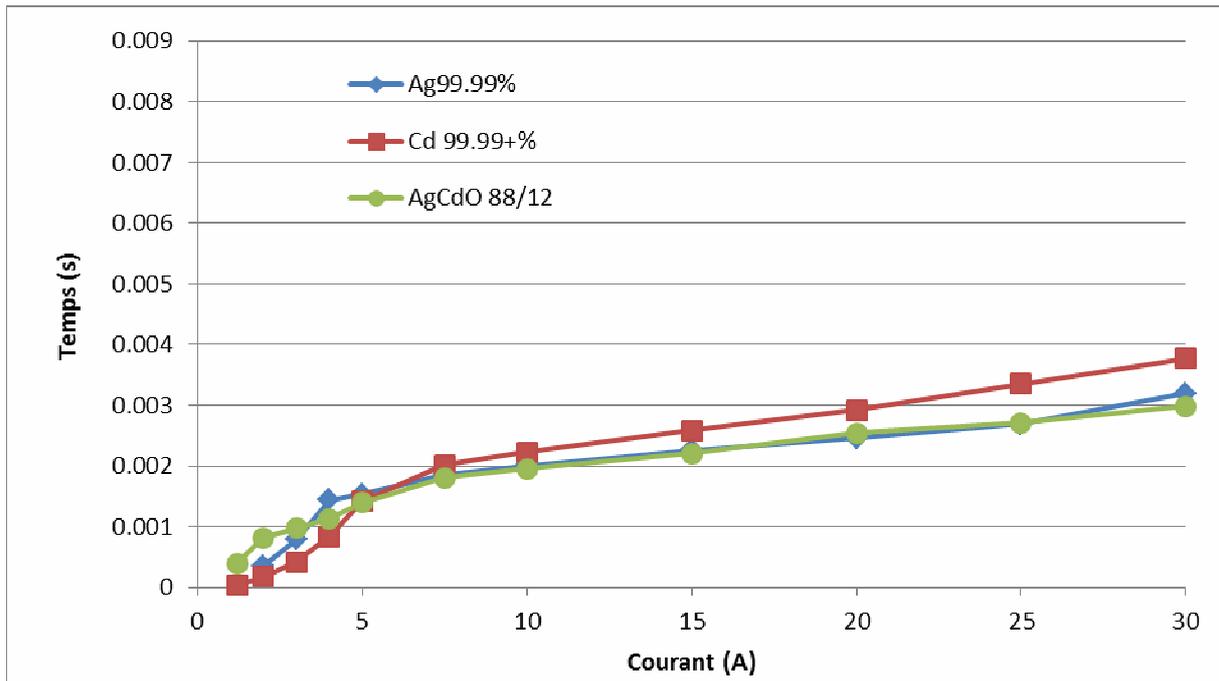


Figure 32 : Comparaison des temps d'arc de l'AgCdO et de ses matériaux purs le constituant.

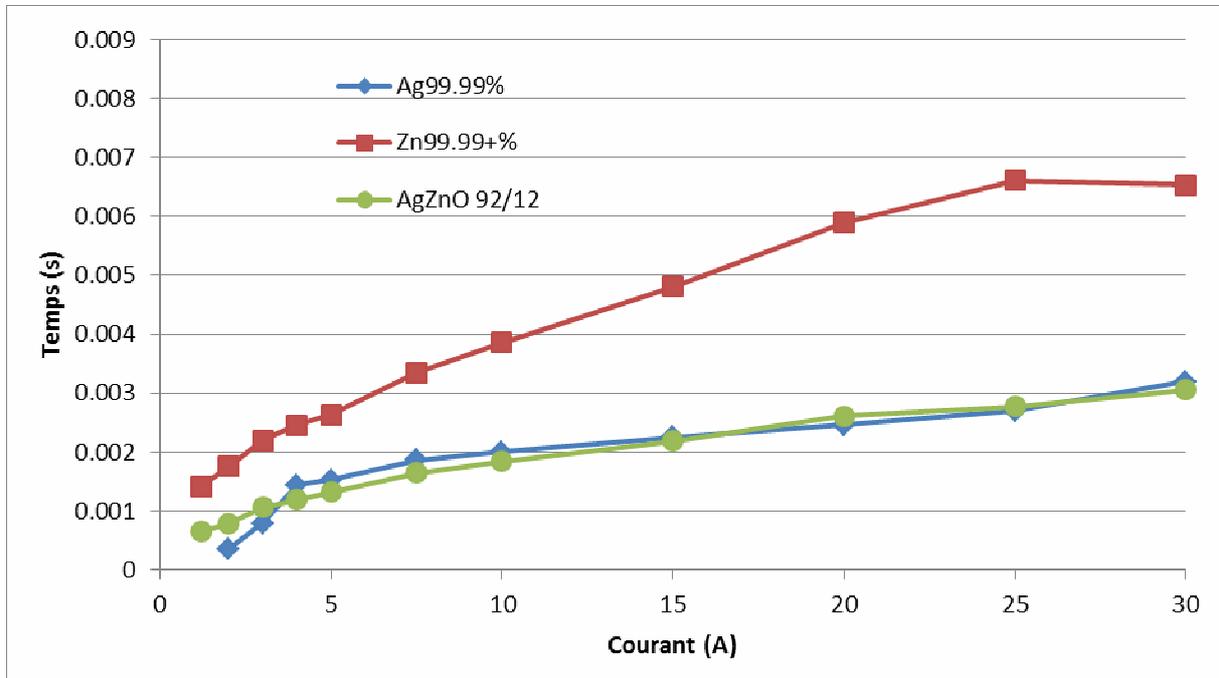


Figure 33 : Comparaison des temps d'arc de l'AgZnO et de ses matériaux purs le constituant.

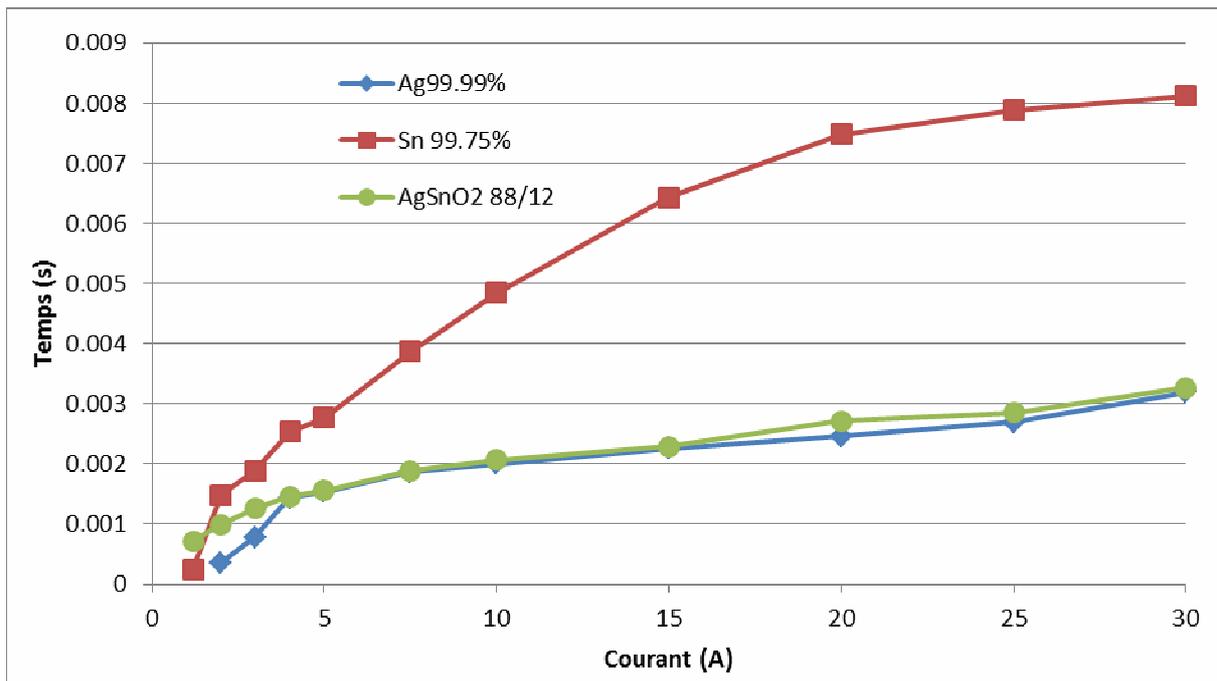


Figure 34 : Comparaison des temps d'arc de l'AgSnO₂ et de ses matériaux purs le constituant.

4.5 Comparaison des résultats de tous les matériaux étudiés

Dans cette dernière partie, nous allons comparer tous les matériaux étudiés afin de tirer une conclusion générale. En s'appuyant sur la figure 35, on peut aborder le problème d'une manière synthétique en annoçant :

- qu'en raison des incertitudes de mesure (voir annexe), la chute de tension cathodique ne dépend pas de l'intensité du courant ;
- que la valeur de V_c du carbone est la plus élevée, elle est proche de 18 V ;
- que celle du groupe Cu, Ni, Cd et Al est comprise entre 13 et 15 V ;
- que celle du groupe Ag (et ses alliages et pseudo alliages), W et Zn est comprise entre 10 et 12 V. Celle de de l'étain (Sn) est de l'ordre de 12 à 14 V.

Concernant la chute anodique (Figure 36) l'allure des courbes ne nous permet pas de conclure, hormis peut être pour le nickel Ni et l'AgW au delà de 5 A où V_a est de l'ordre de 2,5 V et 1,5 V respectivement. Il faut, par ailleurs, remarquer que V_a de l'argent croît nettement avec l'intensité du courant I, contrairement aux autres matériaux dont V_a fluctue avec I.

Le temps d'arc (Figure 37) est une fonction croissante de l'intensité du courant. Un tel accroissement est nettement dépendant de la nature du matériau ; il est plus élevé, par exemple, dans le cas de l'étain que du cuivre.

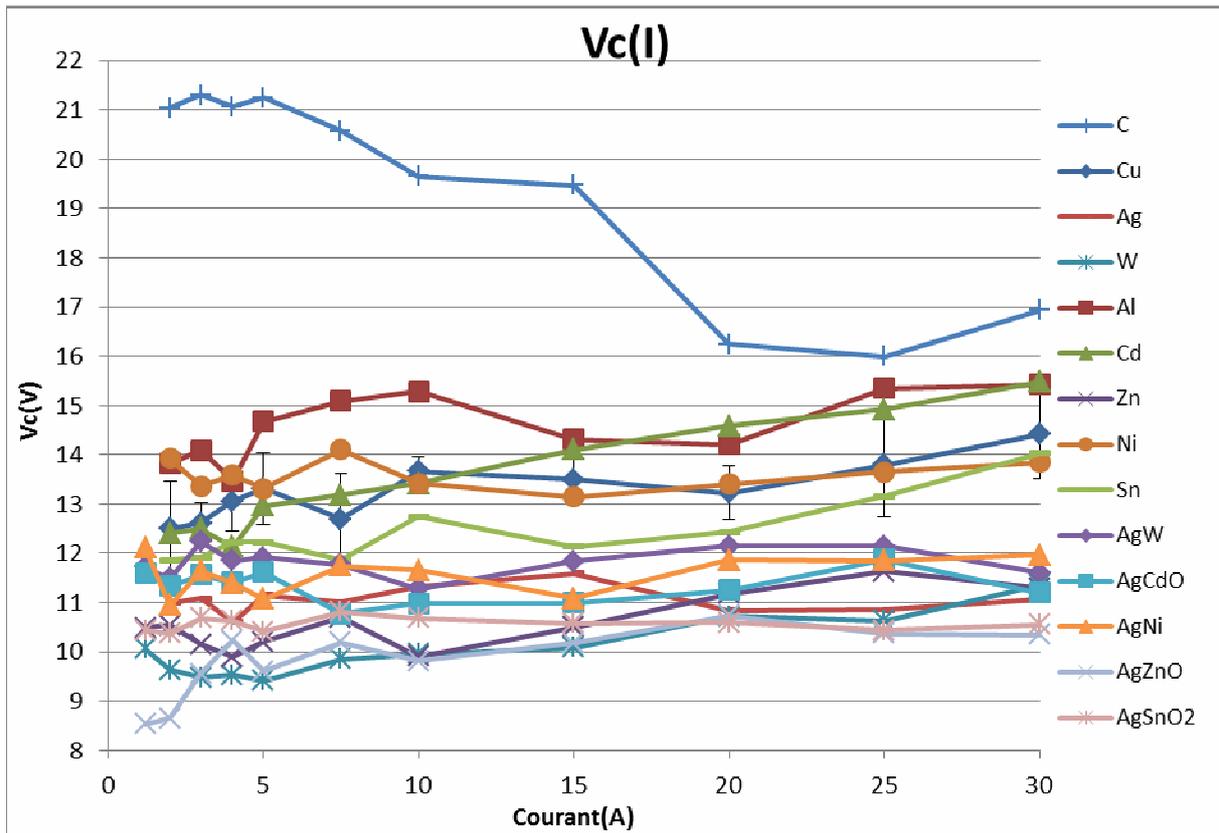


Figure 35 : Courbes de chutes de tension à la cathode pour tous les matériaux.

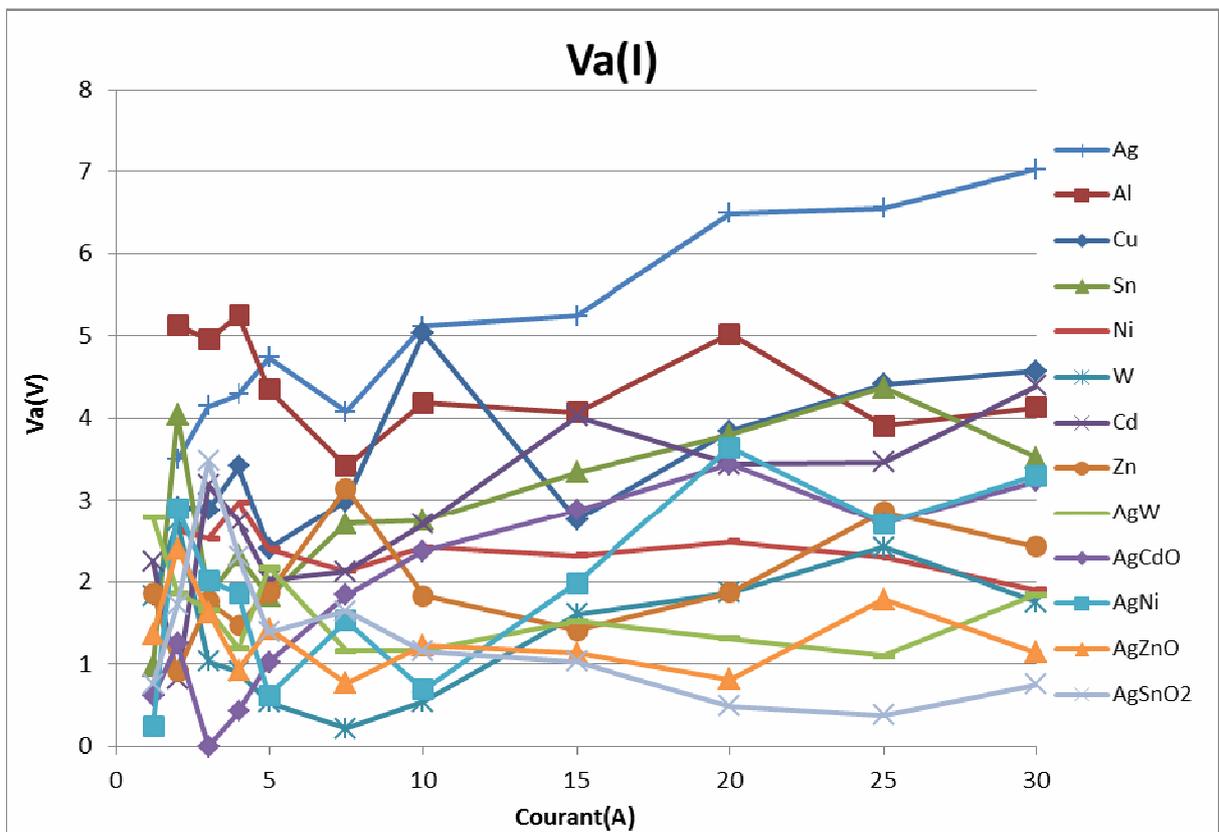


Figure 36 : Courbes de chutes de tension à l'anode pour tous les matériaux.

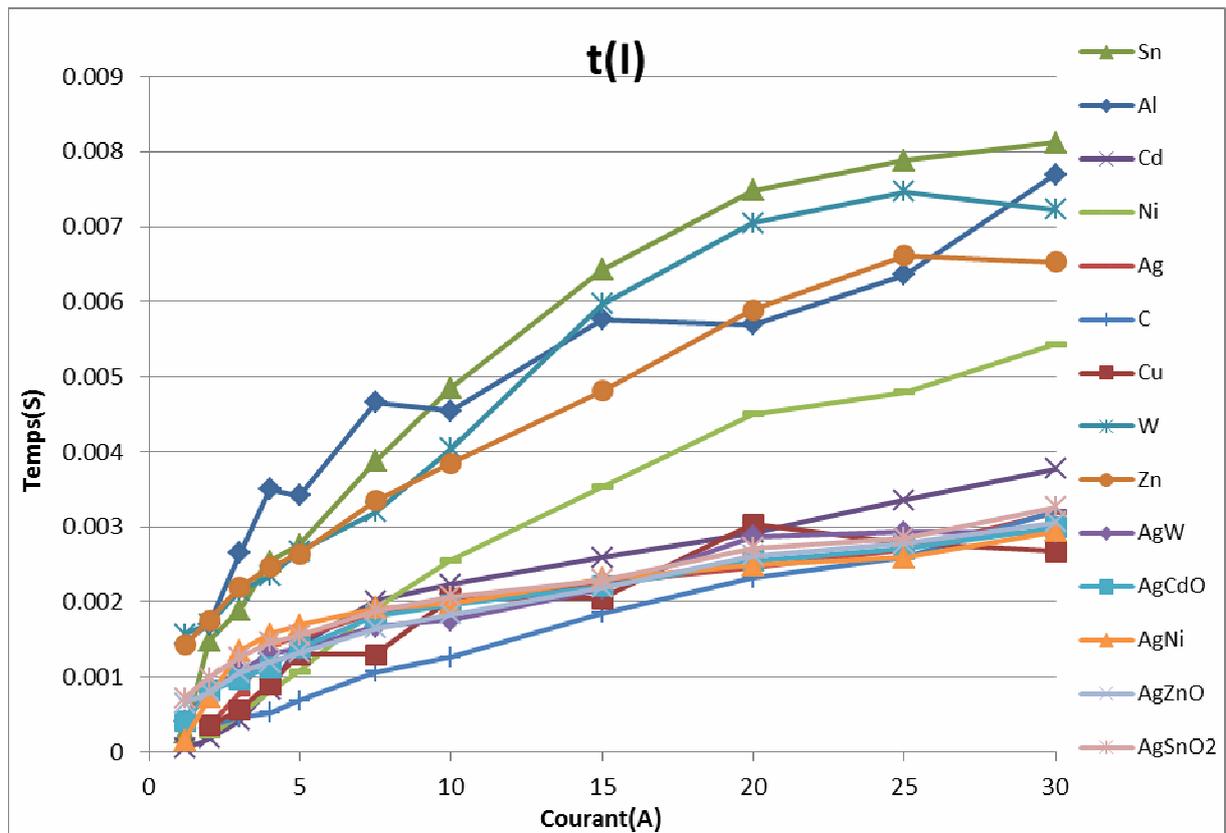


Figure 37 : Courbes de temps d'arc pour tous les matériaux.

L'ensemble des résultats nous renseigne que le fait d'augmenter l'intensité du courant n'a pas de conséquences sur la valeur de la chute de tension cathodique, mais l'arc se stabilise rapidement à fort courant. Pour la majorité des matériaux, on constate quelques fluctuations dans les résultats de V_c , comparés à ceux de l'argent pur. En effet, dans le cas de l'argent la valeur de la chute de tension cathodique est autour de 11 V et ceci quel que soit le nombre d'essais. On remarque également que la chute de tension cathodique est comprise entre 10 et 11 V pour l'AgZnO et l'AgSnO₂ tandis que pour l'AgCdO et l'AgNi, elle est comprise entre 11 V et 12 V.

A vitesse constante et à courant croissant, le temps d'arc (et longueur) devient plus important pour tous les matériaux et cela va avoir une répercussion directe sur l'érosion des contacts (la perte de matière).

Pour la chute anodique, elle reste faible environ 1 à 3 V pour les alliages alors que pour l'argent elle est comprise entre 4 et 7 V. La chute de tension des alliages à base d'argent est un peu plus élevée par rapport à celle du matériau en argent pur. Cette différence vient, entre autres, du travail de sortie propre à chaque matériau.

4.6 Données pratiques pour la modélisation

La modélisation des pieds d'arc cathodique et anodique nécessite la connaissance des valeurs des chutes de tension cathodiques et anodiques relatives aux matériaux des électrodes (anode, cathode). Pour ce faire, nous avons répertorié dans le tableau 3 les valeurs **moyennes** de V_a et V_c pour des intensités de courant allant de 5 A à 30 A.

	$V_{c\text{-moyen}}$ (V)	$\Delta V_{c\text{-moyen}}$ (V)	$\frac{\Delta V_{c\text{-moyen}}}{V_{c\text{-moyen}}}$ (%)	$V_{a\text{-moyen}}$ (V)	$\Delta V_{a\text{-moyen}}$ (V)	$\frac{\Delta V_{a\text{-moyen}}}{V_{a\text{-moyen}}}$ (%)
Ag	11,11	0,53	4,77	5,61	1,08	19,25
Al	14,91	0,92	6,17	4,16	1,52	36,54
Cd	14,09	0,75	5,32	3,17	0,67	21,13
C	18,59	1,27	6,83	*	*	*
Cu	13,51	0,57	4,22	3,72	1,20	32,26
Sn	12,66	0,77	6,08	3,19	0,91	28,53
Ni	13,56	0,62	4,57	2,28	0,50	21,93
W	10,29	0,56	5,44	1,28	0,58	45,31
Zn	10,77	0,92	8,54	2,20	0,99	45,00
AgNi	11,61	0,66	5,68	2,07	1,18	57,00
AgW	11,82	0,54	4,57	1,47	1,06	72,11
AgCdO	11,24	0,87	7,74	2,50	1,19	47,60
AgZnO	10,18	0,61	6,00	1,18	0,88	74,56
AgSnO₂	10,58	0,37	3,50	0,97	0,88	90,72

Tableau 3 : Valeurs moyennes de V_a et V_c pour $5 \text{ A} \leq I \leq 30 \text{ A}$

ΔV_{moyen} : correspond à l'écart type moyen

* : La méthode d'exploitation de la courbe v_{arc} entraîne des valeurs négatives de V_a

En s'intéressant aux écarts (en %), on remarque sur ce tableau :

- que les valeurs des chutes de tension cathodiques pourraient être estimées à environ 10 % près pour tous les matériaux ;
- que celles des chutes anodiques sont difficiles à estimer dans le cas des matériaux purs (< 50 %). Quant aux alliages et pseudo alliages la méthode de détermination

de V_a semble inapplicable (ou difficile), les écarts dépassent les 50 %, voire même 100 % dans certains cas.

La comparaison de nos résultats avec ceux publiés dans la littérature semble difficile car les méthodes employées et surtout les conditions expérimentales sont différentes (courant, tension, milieu, arc de fermeture, arc d'ouverture...) sans perdre de vue l'ancienneté de certains résultats obtenus avec des moyens techniques anciens. A titre de comparaison, quelques résultats relatifs aux chutes de tension cathodiques et anodiques sont consignés dans le tableau 4.

Auteur	Matériau	Milieu	V_c (V)	V_a (V)
Dickson [17]	Cu	Argon	12	5
Dickson [17]		Azote	16	10
Hemmi [12]		Air	16,5	
Laept			$13,5 \pm < 10\%$	$3,7 \pm \geq 30\%$
Rakhovskii [14]		Vide	9 – 21	
Grakov [18]			14,7 – 15,4	
Hemmi [12]		Ag	Air	14
Laept	$11,1 \pm < 10\%$			$5,6 \pm \leq 20\%$
Rakhovskii [14]	Vide		8 – 16	
Grakov [18]			12,1 – 13,6	
Rakhovskii [14]	Ni	Vide	8 – 17,3	
Grakov [18]			16,3 – 17,3	
Laept		Air	$13,6 \pm < 10\%$	$2,3 \pm \geq 20\%$
Grakov [18]		Al	Vide	17,2 – 18,6
Laept	Air		$14,9 \pm < 10\%$	$4,2 \pm > 30\%$

Tableau 4 : Comparaison des résultats des matériaux purs

Rakhovskii [14] : Les valeurs répertoriées par l'auteur correspondent aux résultats de différents auteurs et différentes intensités de courant.

4.7 Corrélation des résultats de mesure avec les propriétés intrinsèques du matériau

Dans la littérature relative à l'arc électrique, certains auteurs indiquent que la valeur de la chute de tension cathodique V_c est directement liée à la valeur du travail de sortie des électrons du métal. Notre but est de confirmer ou d'infirmer l'existence d'une corrélation « **simple** et **directe** » entre la valeur de V_c et les propriétés intrinsèques du matériau pur, telles que le travail de sortie (figure 38), l'énergie de première ionisation (Figure 39), l'enthalpie de vaporisation (figure 40) et la conductivité thermique. Ces courbes nous révèlent que, même si V_c dépend intrinsèquement des propriétés thermophysiques du matériau, la relation n'est pas simple et directe.

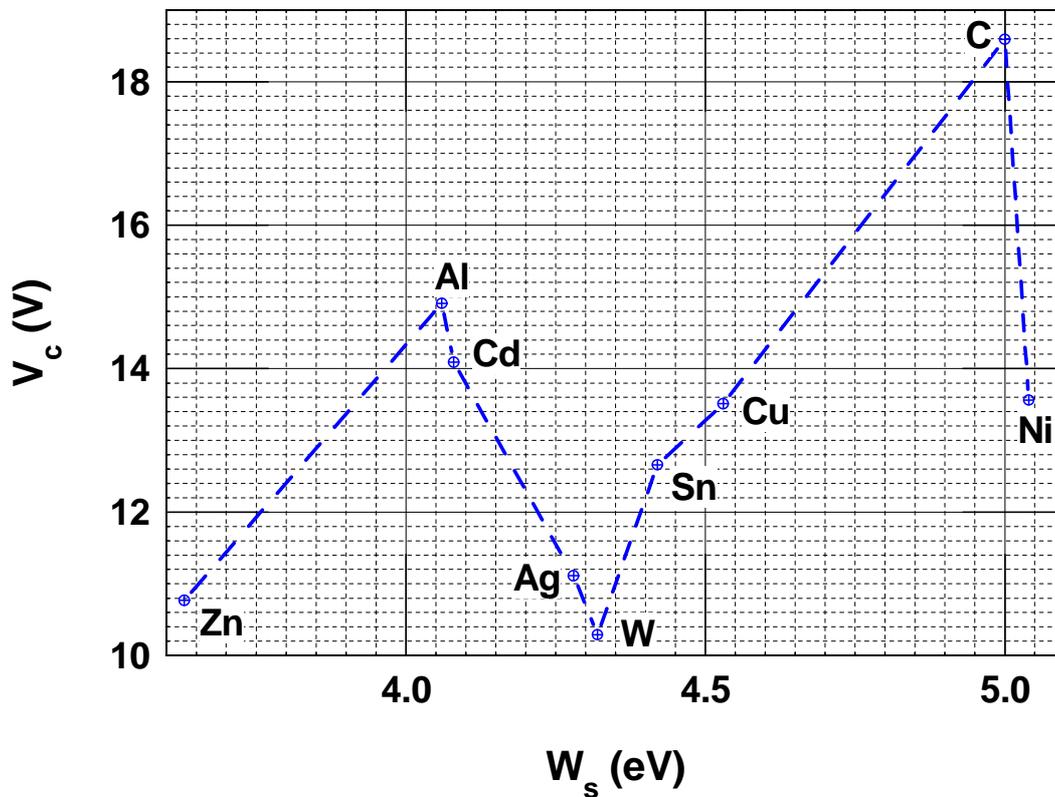


Figure 38 : Variation de $V_{c\text{-moyen}}$ en fonction du travail de sortie.

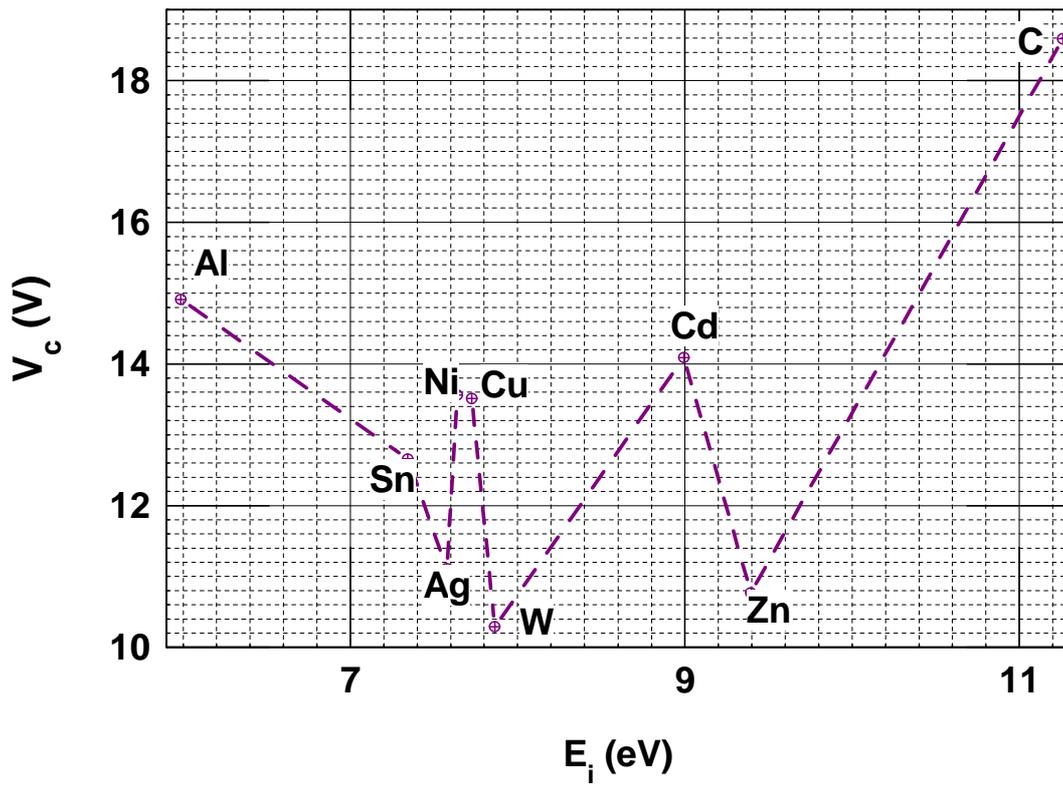


Figure 39 : Variation de $V_{c-moyen}$ en fonction de l'énergie de 1^{ère} ionisation du matériau.

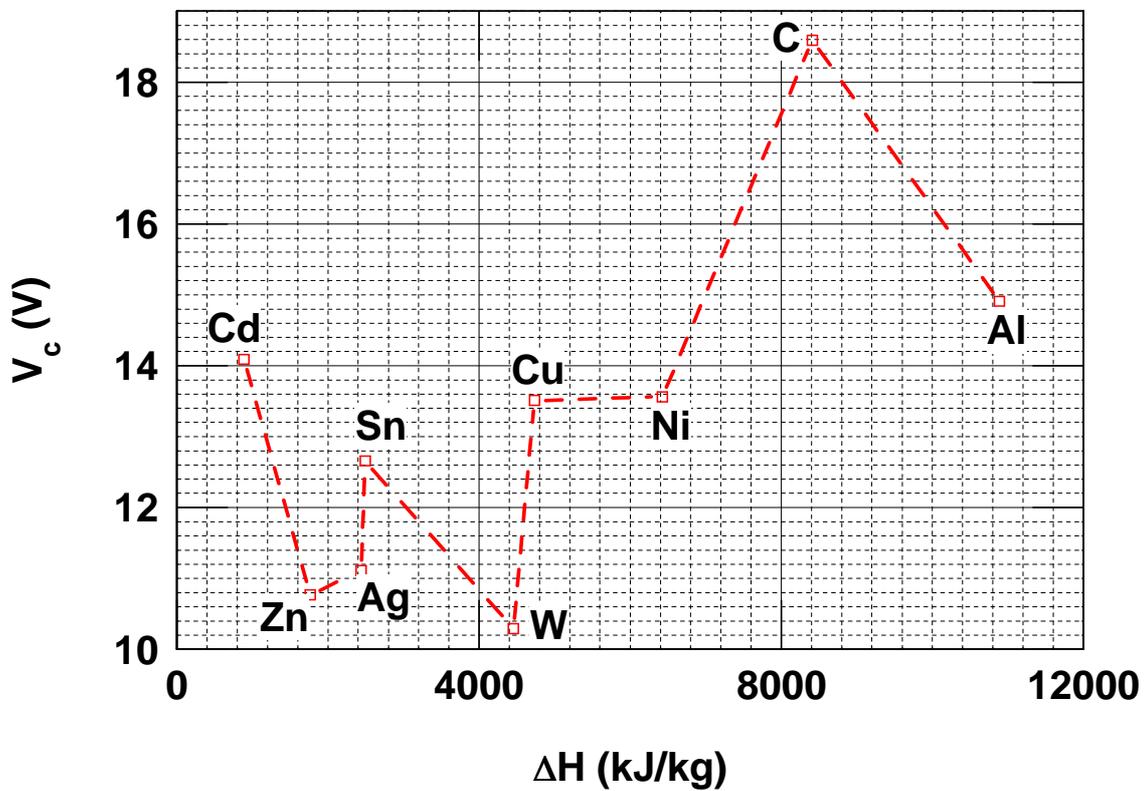


Figure 40 : Variation de $V_{c-moyen}$ en fonction de l'enthalpie de vaporisation.

4.8 Champs électriques et épaisseurs des différentes zones

Dans cette étude très restreinte, nous avons essayé d'obtenir un ordre de grandeur des champs électriques dans différentes zones de l'arc ainsi que des épaisseurs de ces zones. La méthode employée est citée au paragraphe 4.2.2.

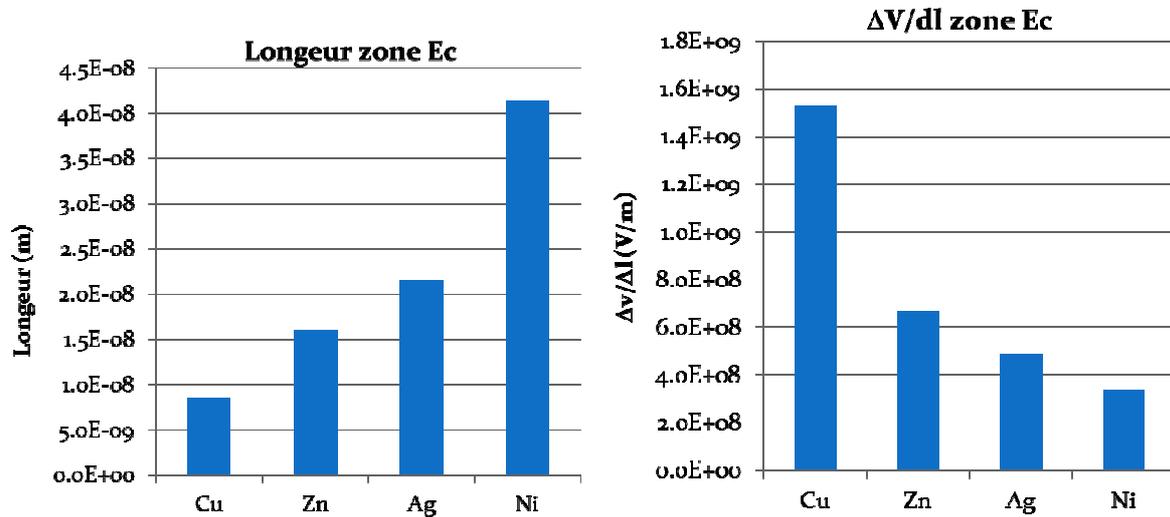


Figure 41 : Epaisseur E_c et champ électrique ($E_c = \Delta V/\Delta l$) dans la zone de charge d'espace pour $I = 30$ A.

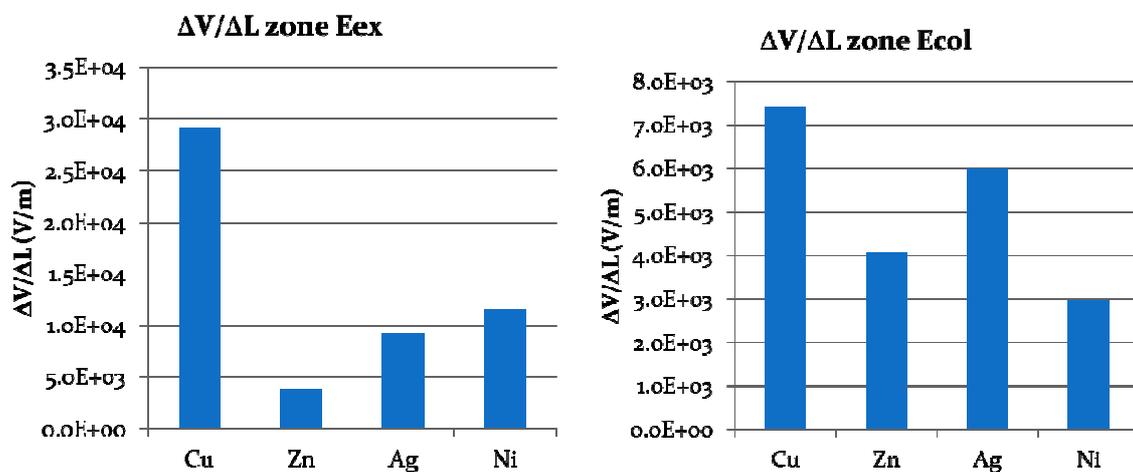


Figure 42 : Champ électrique dans la zone d'expansion E_{ex} et dans la colonne E_{col} pour $I = 30$ A.

A première vue ces graphiques révèlent que les caractéristiques de l'arc dépendent de la nature du matériau, ceci reste à confirmer dans l'avenir en procédant à plusieurs essais par matériau. Cependant on peut noter quelques similitudes avec les ordres de grandeurs connus et publiés dans la littérature (champ électrique dans l'air $10^3 - 10^4$ V/m dans la colonne, champ électrique dans la zone de charge d'espace $10^8 - 10^9$ V/m, épaisseur de la zone de charge d'espace $\sim 10^{-8}$ m).

	Dickson [17] <i>Mesures</i> (Argon)	Beilis [19] <i>Modèle du pied d'arc</i> (vide)	Laept <i>Mesures</i> (air)
E_{cathode} (10^9 Vm^{-1})		1 – 7	0,2 – 1,5
$l_{\text{zone-cathodique}}$ (10^{-8} m)	≤ 40	Zone balistique = 0,1 Zone de relaxation des lourds = 1 Zone de relaxation des électrons = 100	0,5 - 4

Tableau 5 : Comparaison des ordres de grandeur dans la zone cathodique.

5 Observation des dégradations des électrodes

La tendance actuelle orientée vers un accroissement du nombre de manœuvres en service pour les contacts électriques conduit à accorder aujourd'hui une plus grande importance aux problèmes de dégradation des électrodes. Ces problèmes proviennent essentiellement de l'apport d'énergie thermique due à l'arc électrique sur les contacts. Ceci conduit à une modification des propriétés de la surface de la matière utilisée. Nous allons donc analyser l'impact de l'arc sur la surface des électrodes.

Michal et Saeger [20] ont montré qu'il n'existe actuellement aucun matériau à base d'argent capable de satisfaire toutes les applications électrotechniques. Il existe donc une large gamme de matériaux utilisés pour permettre de répondre aux différentes exigences. C'est pourquoi dans notre cas, nous avons utilisé les matériaux purs et les alliages afin de constater les conséquences de l'arc électrique sur ces derniers. Nous allons analyser à l'aide d'un microscope métallographique l'état de surface des électrodes en argent pur et en alliages et pseudo alliages à base d'argent.

L'état de surface des contacts avant et après 10 arcs est montré sur les figures :

- 43 et 44 pour l'argent pur ;
- 45 et 46 pour l'alliage AgW ;
- 47 et 48 pour l'alliage AgNi ;
- 49 et 50 pour le pseudo alliage AgCdO ;
- 51 et 52 pour le pseudo alliage AgZnO ;
- 53 et 54 pour le pseudo alliage AgSnO₂.

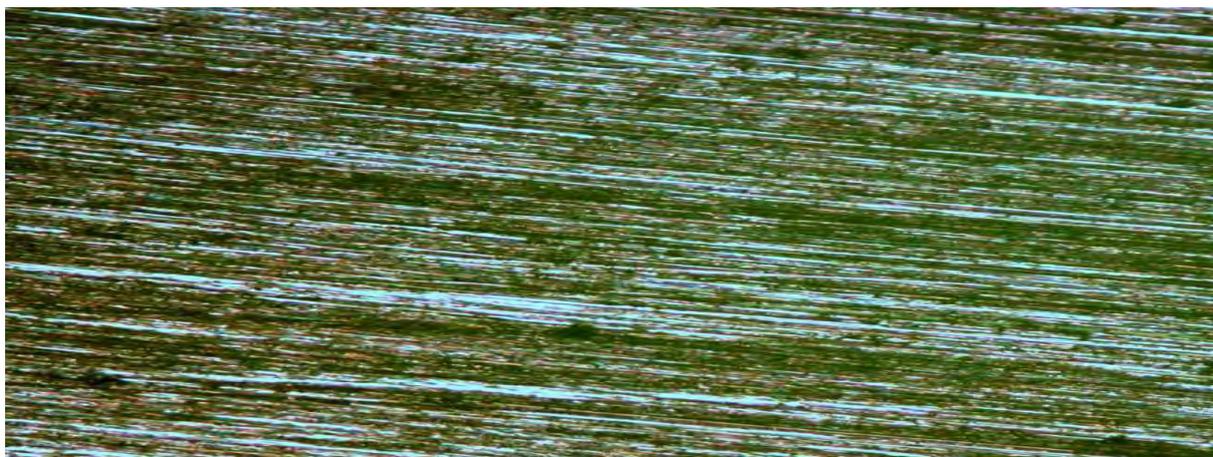
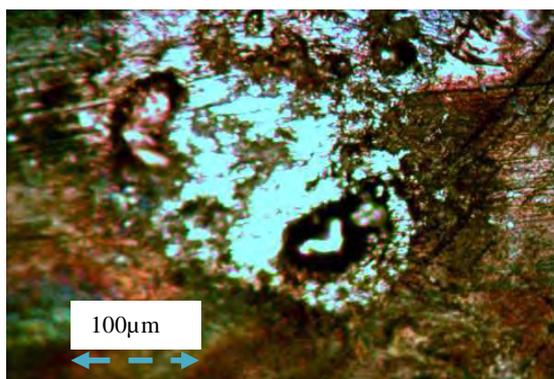
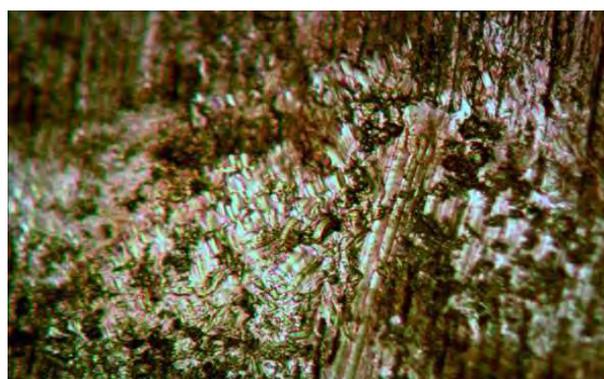


Figure 43 : Micrographie d'électrode en argent avant essais.



Anode (x40)



cathode (x40)

Figure 44 : Micrographie d'électrodes en argent après 10 essais pour un courant de 30 A.

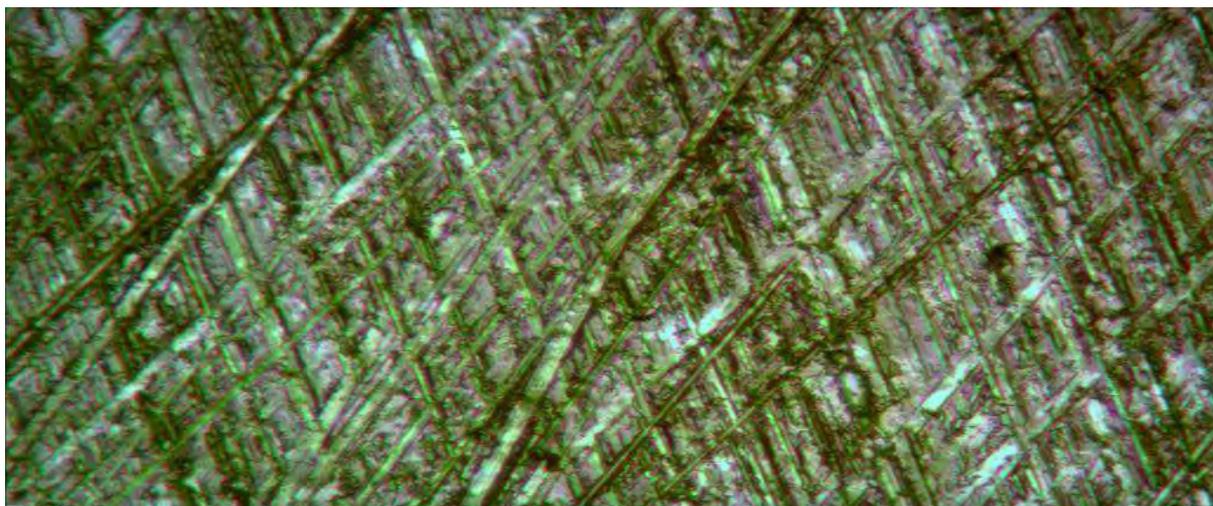
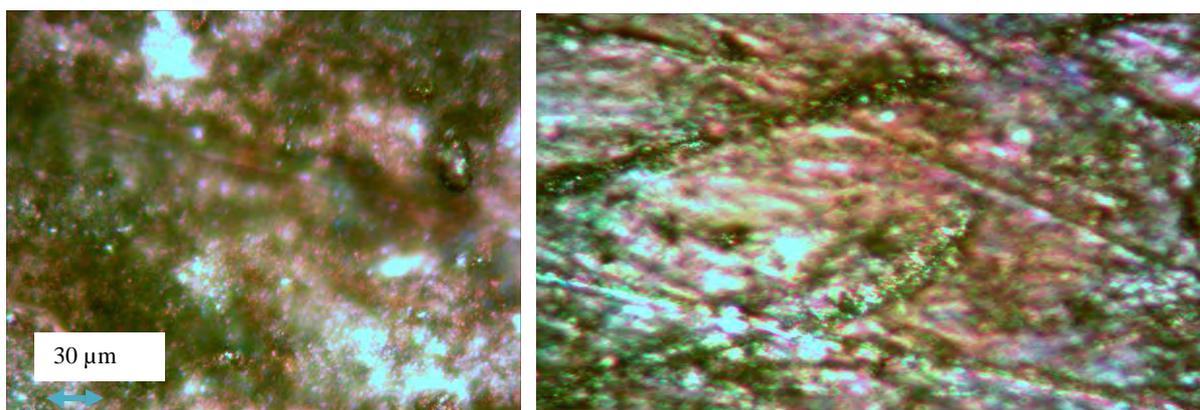


Figure 45 : Micrographie d'électrode en AgW avant essais.



Anode (x40)

Cathode (x40)

Figure 46 : Micrographie d'électrodes en AgW après 10 essais pour un courant de 30 A.

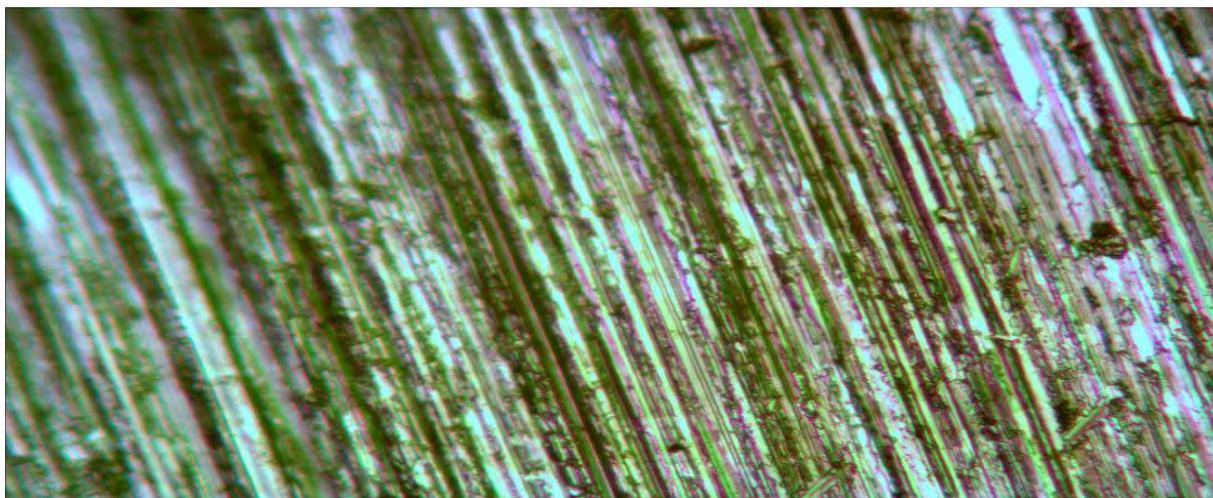


Figure 47 : Micrographie d'électrode en AgNi avant essais.

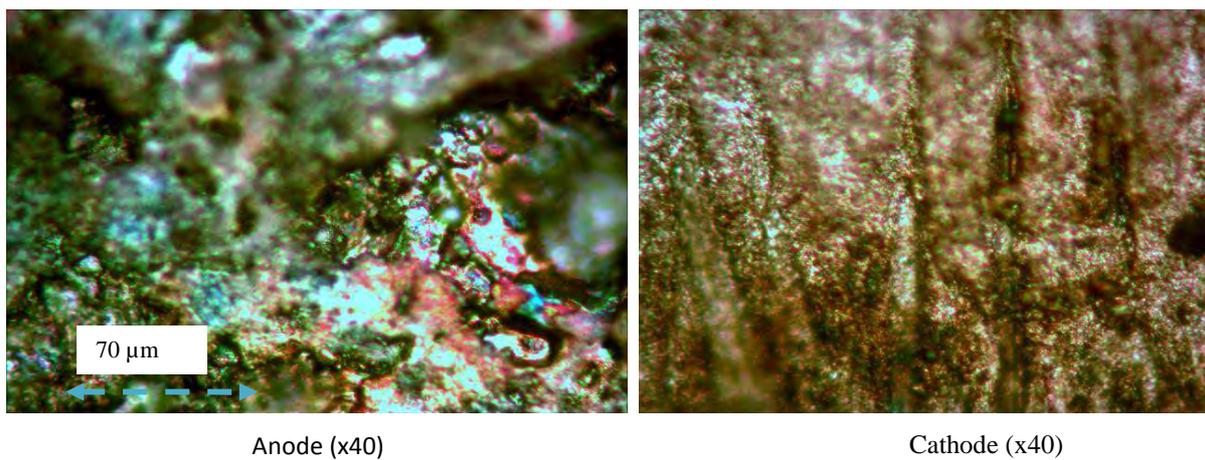


Figure 48 : Micrographie d'électrodes en AgNi après 10 essais pour un courant de 30 A.

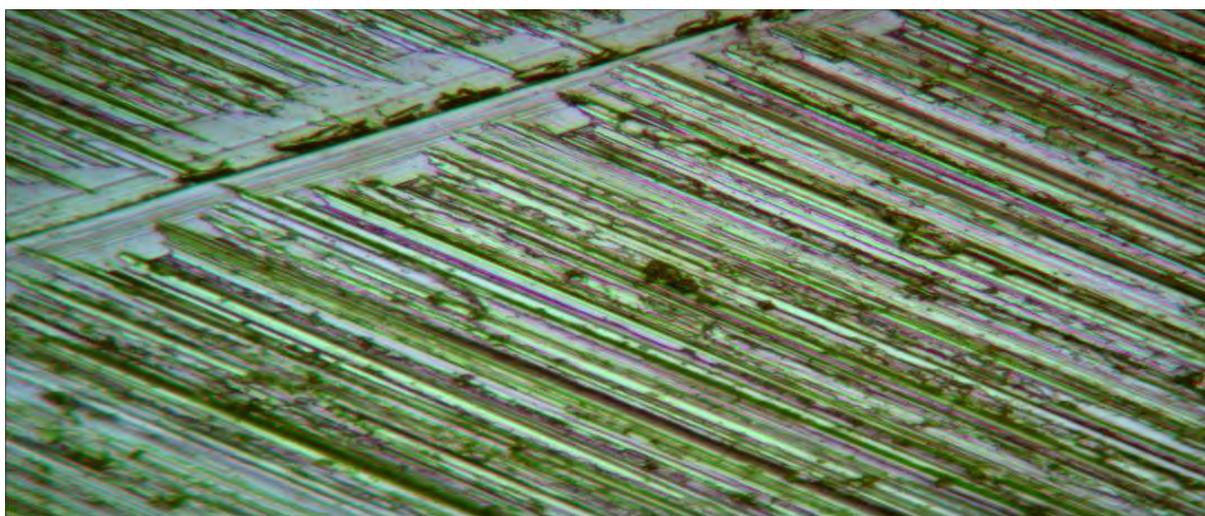


Figure 49 : Micrographie d'électrode en AgCdO avant essais

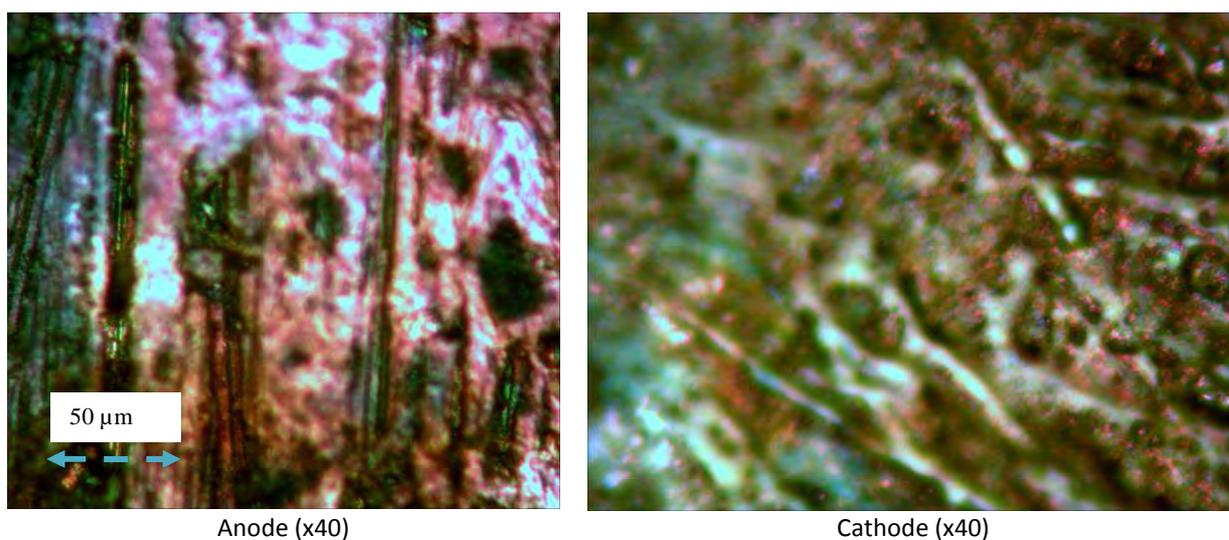


Figure 50 : Micrographie d'électrodes en AgCdO après 10 essais pour un courant de 30 A.

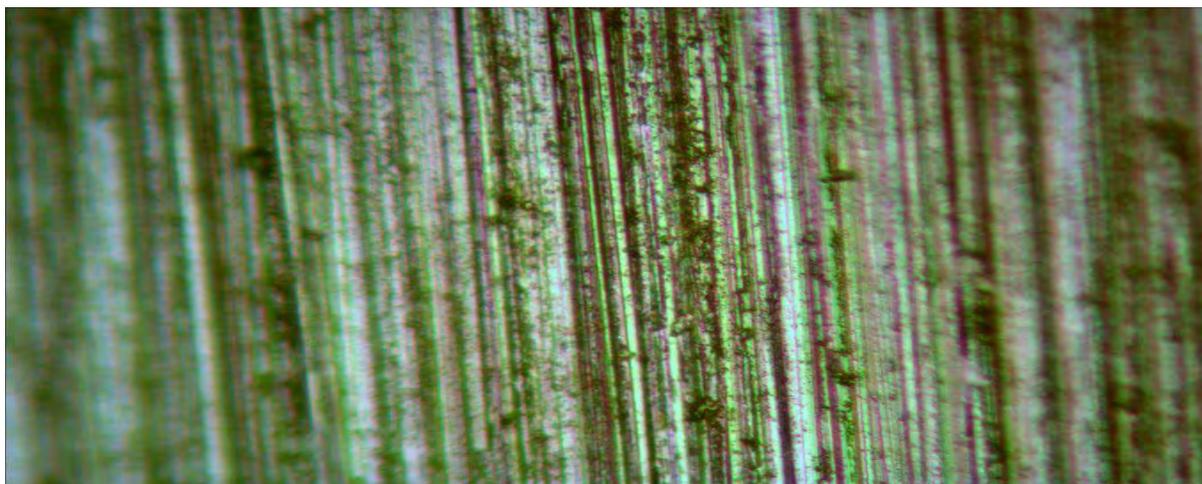
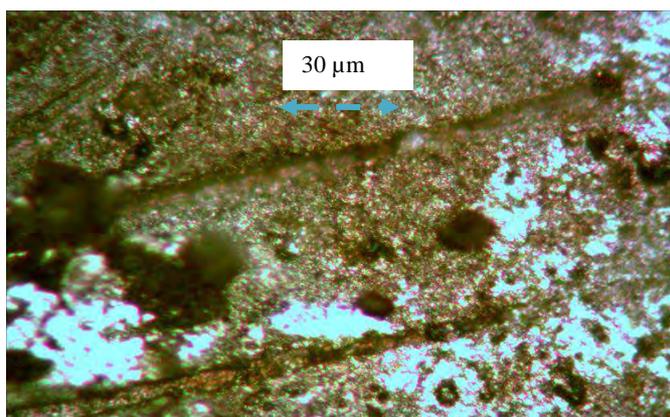
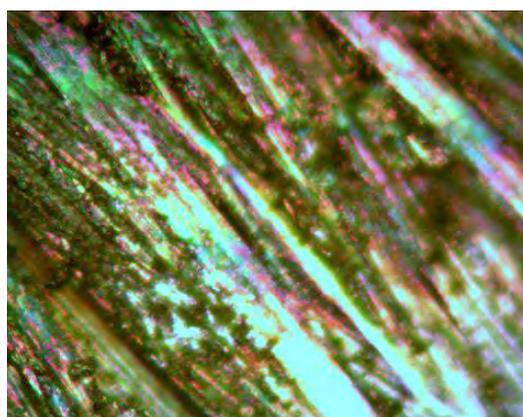


Figure 51 : Micrographie de l'électrode en AgZnO avant essais.



Anode (x40)



Cathode (x40)

Figure 52 : Micrographie des électrodes en AgZnO après 10 essais pour un courant de 30 A.

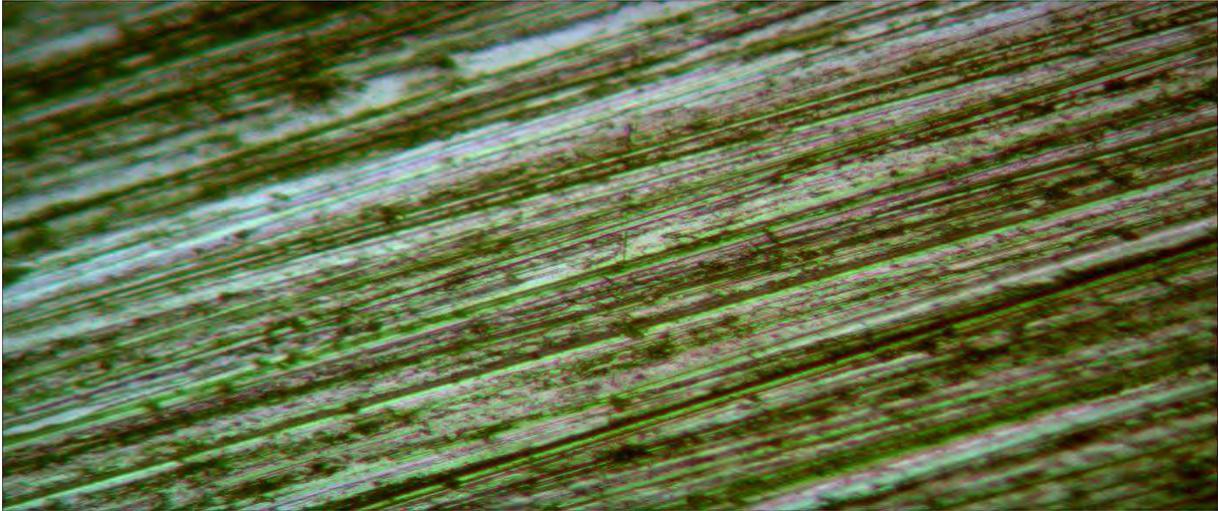


Figure 53 : Micrographie de l'électrode en AgSnO₂ avant essais.

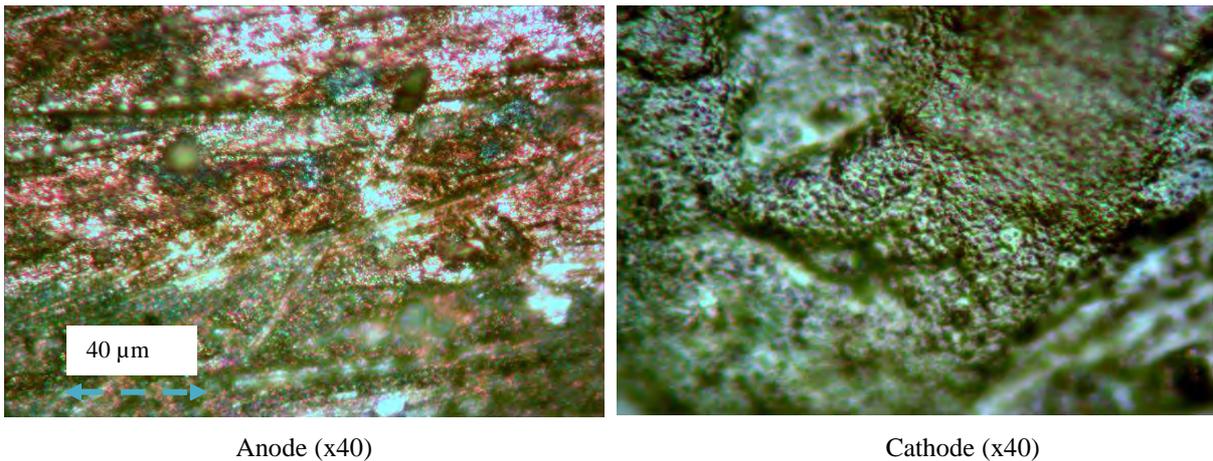


Figure 54 : Micrographie des électrodes en AgSnO₂ après 10 essais pour un courant de 30 A.

En comparant l'aspect des surfaces des électrodes avant et après 10 arcs (Figures 43 à 54) on voit l'apparition des gouttelettes de métal fondu à la surface du contact. La fusion du métal est provoquée par l'apparition de l'arc électrique. Dans la majorité des cas la surface de la cathode semble moins endommagée par l'arc électrique que celle de l'anode.

Si on peut établir un classement qualitatif selon la dégradation de surface anodique due à l'impact de l'arc, on commencerait par l'argent pur (Ag) suivi de l'AgNi, l'AgCdO et dans la moindre mesure l'AgSnO₂. Les électrodes en AgW et AgZnO semblent moins affectées par l'arc électrique que les autres matériaux.

En définitif, on constate que dans la majorité des cas les alliages et pseudo alliages supportent mieux l'impact de l'arc que le matériau en argent pur. Il est donc judicieux d'utiliser les électrodes en alliages (et pseudo alliages) à base d'argent que l'argent seul.

6 Discussion et conclusion

Plusieurs auteurs ont essayé de déterminer les valeurs des chutes cathodiques et anodiques. Citons à titre d'exemple les travaux de Dickson [17] relatifs à un arc de fermeture. Les valeurs obtenues de V_c et V_a dans le cas de deux électrodes en cuivre à 10 A sous atmosphère d'argon à pression atmosphérique sont respectivement de 12 V et 5 V environ. Dans la même situation mais sous atmosphère d'azote (60 à 150 mm Hg), ces valeurs sont de 16 V et 10 V. Grakov [18] propose des valeurs des chutes cathodiques pour les métaux purs (Cu : 14,7 V – 15,4 V à 64 A, Ag : 12,1 V – 13,6 V à 108 A, Al : 17,2 V – 18,6 V à 27 A, Ni : 16,3 V – 17,3 V à 59 A). Les résultats, relatifs aux métaux purs, des différents auteurs d'avant 1976 sont consignés dans l'article de Rakhovskii [14]. Selon les auteurs les valeurs des chutes cathodiques varient entre 9 et 21 V dans le cas du cuivre, entre 8 et 16,5 V dans le cas de l'argent et entre 8 et 17,3 V dans le cas du nickel. Des travaux récents [12, 21] basés sur d'autres méthodes de détermination des chutes cathodiques et anodiques donnent pour un arc créé dans l'air une valeur de V_c de 16,5 V pour le cuivre [21] et 14 V pour l'argent [12]. La valeur de V_a étant de 4,5 V pour l'argent [12].

La majorité des auteurs s'accordent à dire que les valeurs des chutes V_c et V_a sont directement liées au travail de sortie du matériau et à l'énergie d'ionisation des vapeurs métalliques. Kesaev [22] suggère une relation simple pour la chute de tension cathodique, soit $V_c = \alpha V_i + W_s$ où V_i est le potentiel d'ionisation (tension correspondante) des atomes constituant l'électrode et W_s le travail de sortie (tension correspondante) ; α est un facteur tenant compte de la perte d'énergie des électrons. Kesaev indique que ce facteur compris entre 1,1 et 2,6 diminue avec l'augmentation de la masse atomique de la vapeur de l'électrode. Cependant la valeur de α n'a jamais été déterminée d'une manière certaine. Grakov [18] suggère un lien direct entre V_c et l'énergie d'excitation des états métastables des atomes. Dans la présente étude, nous n'avons pas remarqué de corrélation nette entre les valeurs des chutes de tension cathodiques et les caractéristiques intrinsèques des matériaux purs. Cependant on peut noter une faible corrélation limitée à quelques éléments dans la gamme 4,3 – 5 eV (Figure 38).

En conclusion, les résultats obtenus par les différents auteurs semblent beaucoup dépendre des conditions expérimentales (vide, atmosphère contrôlée, arc d'ouverture, de fermeture ...) et des méthodes employées. Cependant au vu de l'ensemble des résultats de nos mesures on pourrait confirmer des tendances. Ainsi en extrapolant, on pourrait indiquer :

- que pour les matériaux purs, les valeurs des chutes cathodiques sont généralement comprises entre 10 et 15 V (10 V pour le tungstène et 15 V pour l'aluminium, par exemple) hormis le carbone dont la valeur de V_c est autour de 18 V. Les chutes de tension anodiques sont à elles comprises entre 1 V et 6 V.
- que pour les alliages et pseudo alliages à base d'argent, les valeurs de V_c sont comprises entre 10 V et 12 V (10 V pour l'AgZnO et 12 V pour l'AgW, par exemple) alors que celles de V_a fluctuent entre 0,5 V – 3,5 V.

Bibliographie

- [1] Sallais D., Ben Jemaa N. & Carvou E. (2007). IEEE TRANS.CMPT, 30, 3, 540.
- [2] Gonzalez J.J, Lago F., Freton P., Masquère M., & Franceries X. (2004). J. Phys. D: Appl. Phys. 38, 306.
- [3] Gonzalez J.J, Freton P.& Masquère M. (2007). J. Phys. D: Appl. Phys. 40 , 5602.
- [4] Teste Ph., Leblanc T., Rossignol J. & Andlauer R. (2008). Plasma Source Sci. Technol. 17, 035001(12pp).
- [5] Lefort A., Abbaoui M. & Clain S. (2010). J. of High Temp. Mat. Proc. (An International Quarterly of High Technology Plasma Processes) 14, 2, 257.
- [6] Abbaoui M. & Lefort A. (2009). Eur. Phys. J. Appl. Phys. 48, 11001(9pp).
- [7] Salihou H., Guillot J.P., Abbaoui M., Lefort A. 1996. J. Phys. D: Appl. Phys. 29, 2915.
- [8] Salihou H., Abbaoui M., Lefort A., Auby R. (1995). J. Phys. D: Appl. Phys. 28, 1883.
- [9] Boxman R.L., Sanders D.M. & Martin P.J. (1995). Handbook of vacuum arc science and technology Noyes Publications (USA).
- [10] Beilis I., Djakov B.E., Jüttner B. & Pursch H. (1997). J. Phys. D: Appl. Phys. 30, 119.
- [11] Benilov M.S. (2008). J. Phys. D: Appl. Phys. 41, 144001(30pp).
- [12] Hemmi R., Yokomizu Y., Matsumura T., (2003). J. Phys. D: Appl. Phys. 36, 1097.
- [13] Mesyats G.A. (2000). The breakdown, the spark and the arc Nauka publisher Moscow.
- [14] Rakhovskii V.I. (1976). IEEE Trans. On Plas. Sci., vol. PS-4, 2, 81.
- [15] Ben Jemaa N., Queffelec J.L., Travers D. (1986). 13th Inter. Conf. on Electric Contacts, Lausanne.
- [16] Höfl H. (1982). Proc. of the 11th Inter. Conf. on Electric. Contact Phenomena, pp383, Berlin West
- [17] Dickson D. J., Von Engel A. (1967). Proc. Roy. Soc. A., 300, 316.
- [18] Grakov V. E. (1967). Soviet Phys.- Tech.- Phys., 12, 2, 286.
- [19] Beilis I. (1995). Handbook of Vacuum arc Science and Technology, ed Boxman & al. Noyes Publication, 209.
- [20] Michal R., Saeger K.E. (1988). Electrical contacts, proceedings of the 34th IEEE Holm conference on electrical contacts, 121.
- [21] Yokomizu Y., Matsumura T., Henmi R., Kito Y. (1998). ETEP, 8, 2, 111.
- [22] Kesaev I. G. (1965). Soviet Phys.- Tech.- Phys., 9, 8, 1146.

Annexes

Erreurs et incertitudes

Les tableaux ci-dessous présentent les valeurs des chutes de tension cathodiques et anodiques pour tous les matériaux étudiés (purs, alliages, pseudo alliages). Ces valeurs sont associées à l'écart type et à l'incertitude élargie avec un intervalle de confiance de 99%.

A titre d'exemple et afin de donner un aperçu sur la précision des valeurs obtenues, les courbes de V_c , V_a et t_{arc} sont tracées avec des barres d'erreurs associées à l'écart type dans le cas de deux matériaux : argent (Ag) et argent nickel (AgNi).

A. Matériaux purs

a) Chute de tension cathodique

Courant (A)	1.2	2	3	4	5	7.5	10	15	20	25	30
Vc pour le Cu (V)		12.49	12.62	13.05	13.31	12.7	13.66	13.5	13.22	13.79	14.41
Incertitude Cu (V)		0.969	0.407	0.594	0.735	0.913	0.295	0.423	0.541	1.054	0.9
Ecart type Cu (V)		0.783	0.396	0.531	0.357	0.816	0.287	0.412	0.438	0.852	0.805
Vc pour le Al (V)		13.82	14.09	13.47	14.67	15.09	15.28	14.32	14.21	15.35	15.43
Incertitude Al (V)		1.199	0.828	0.745	1.664	1.333	1.675	0.609	0.358	1.333	0.892
Ecart type Al (V)		0.856	0.67	0.532	1.188	0.951	1.498	0.544	0.32	1.077	0.868
Vc pour le Sn (V)	12.13	11.86	11.91	12.23	12.23	11.87	12.75	12.13	12.44	13.15	14.02
Incertitude Sn	0.448	1.312	1.808	0.556	1.009	0.735	0.809	0.742	0.76	0.966	1.005
Ecart type Sn (V)	0.401	1.173	1.617	0.338	0.72	0.715	0.723	0.722	0.68	0.864	0.978
Vc pour le Cd (V)		12.4	12.5	12.14	12.97	13.18	13.42	14.1	14.59	14.92	15.48
Incertitude Cd (V)		0.852	0.872	0.419	0.504	0.715	1.772	0.943	0.915	0.835	0.669
Ecart type Cd (V)		0.829	0.849	0.408	0.45	0.696	0.861	0.918	0.891	0.813	0.651
Vc pour le W (V)	10.06	9.639	9.48	9.533	9.412	9.853	9.959	10.08	10.72	10.63	11.36
Incertitude W (V)	0.948	0.47	0.356	0.712	0.106	2.708	0.449	0.551	0.733	0.782	1.103
Ecart type W (V)	0.767	0.42	0.173	0.508	0.019	0.473	0.321	0.536	0.713	0.761	1.074
Vc pour le C (V)		21.04	21.3	21.06	21.25	20.57	19.65	19.47	16.25	15.99	16.92
Incertitude C (V)		1.136	1.565	2.383	2.949	3.325	7.273	4.881	2.462	2.28	2.829
Ecart type C (V)		0.918	1.265	1.448	1.01	2.02	1.269	1.671	0.843	1.107	0.969
Vc pour le Zn (V)	10.49	10.54	10.16	9.896	10.21	10.69	9.91	10.5	11.18	11.63	11.29
Incertitude Zn (V)	1.129	1.032	0.808	0.496	0.967	1.46	0.704	0.801	1.144	1.087	0.854
Ecart type Zn (V)	0.806	1.004	0.786	0.444	0.941	1.042	0.685	0.779	1.114	1.057	0.831
Vc pour le Ni (V)		13.93	13.36	13.58	13.31	14.11	13.42	13.15	13.41	13.65	13.85
Incertitude Ni (V)		2.931	1.066	0.785	2.816	0.873	0.755	1.324	1.074	0.413	0.501
Ecart type Ni (V)		1.003	0.647	0.477	1.368	0.531	0.459	0.453	0.766	0.251	0.488
Vc pour l'Ag (V)		11	11.08	10.61	11.15	11.01	11.32	11.58	10.83	10.85	11.07
Incertitude Ag (V)		0.937	0.852	0.529	1.269	0.483	1.075	0.278	0.981	0.499	0.648
Ecart type Ag (V)		0.757	0.414	0.321	0.771	0.345	0.767	0.225	0.7	0.403	0.523

Tableau 6 : Valeurs des chutes de tension cathodiques associées à l'écart type et à l'incertitude avec un intervalle de confiance à 99%.

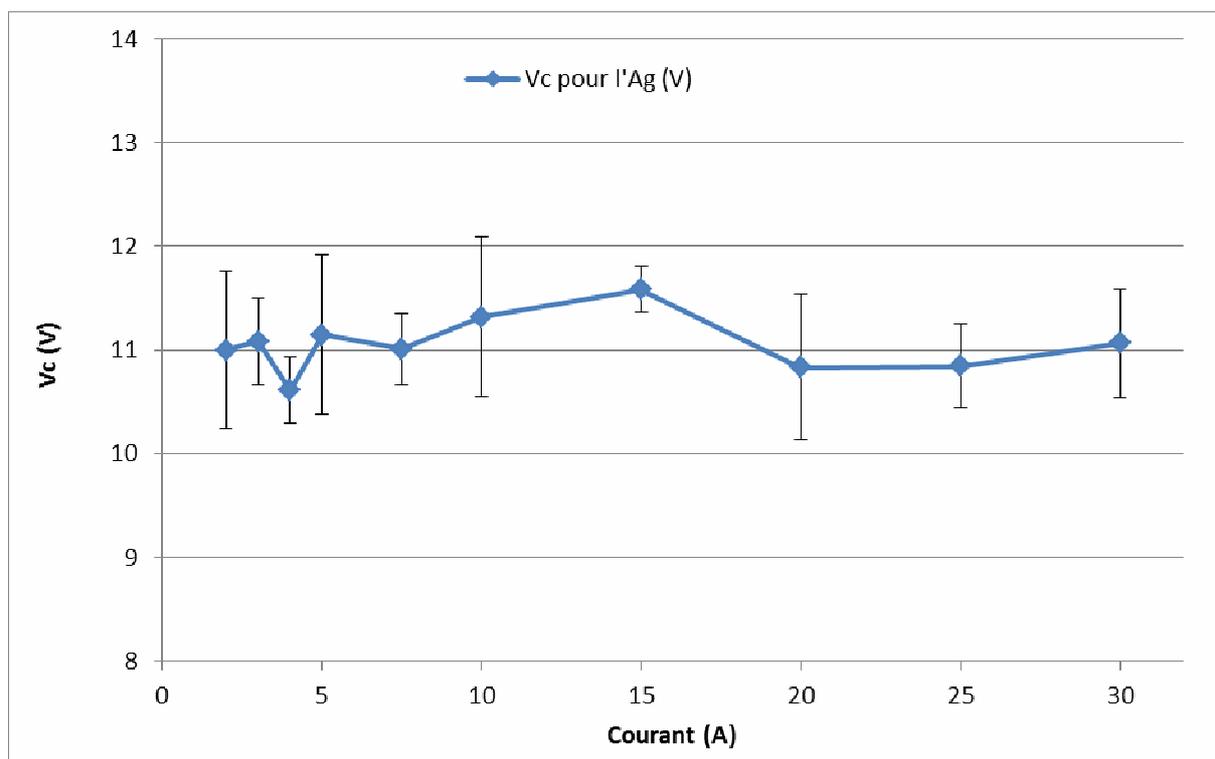


Figure 55 : Chute de tension cathodique pour l'argent avec la représentation de l'écart type relatif à chaque mesure.

b) Chute de tension anodique

Courant (A)	1.2	2	3	4	5	7.5	10	15	20	25	30
Va pour le Cu (V)		2.917	2.887	3.422	2.401	2.989	5.032	2.758	3.846	4.415	4.575
Incertitude Cu (V)		1.739	1.433	1.197	2.153	1.609	1.335	1.34	1.797	1.177	0.808
Ecart type Cu (V)		1.406	1.394	1.07	1.046	1.438	1.299	1.304	1.607	0.952	0.722
Va pour le Al (V)	0	5.133	4.956	5.259	4.349	3.419	4.19	4.068	5.023	3.907	4.136
Incertitude Al (V)	0	2.423	1.214	3.263	3.44	1.962	1.965	1.627	1.384	1.79	1.035
Ecart type Al (V)	0	1.729	0.867	2.329	2.455	1.4	1.757	1.455	1.238	1.447	0.926
Va pour le Sn (V)	0.975	4.051	1.831	2.316	1.822	2.714	2.754	3.342	3.801	4.375	3.52
Incertitude Sn	0.59	2.133	0.91	1.124	1.346	0.847	0.813	0.771	1.123	1.075	1.047
Ecart type Sn (V)	0.477	1.724	0.814	0.683	1.088	0.824	0.726	0.75	1.004	0.961	1.019
Va pour le Cd (V)		0.814	3.19	2.732	2.015	2.122	2.703	4.022	3.443	3.47	4.397
Incertitude Cd (V)		na	24.15	1.479	2.439	0.323	8E-05	0.598	1.056	0.939	1.072
Ecart type Cd (V)		na	0.537	1.196	0.835	0.314	4E-05	0.582	1.028	0.914	1.043
Va pour le W (V)	1.819	2.736	1.03	0.904	0.538	0.215	0.544	1.602	1.868	2.423	1.75
Incertitude W (V)	2.727	2.085	0.757	0.66	3.353	0.493	0.425	0.768	0.653	0.958	0.8
Ecart type W (V)	1.657	1.864	0.367	0.471	0.585	0.086	0.303	0.747	0.636	0.932	0.778
Va pour le C (V)		-2.7	-2.21	-2.68	-2.14	-1.14	-2.17	-2.01	1.527	2.235	1.014
Incertitude C (V)		2.148	1.226	2.495	2.907	1.658	6.621	1.945	1.726	2.927	1.912
Ecart type C (V)		1.736	0.991	1.516	0.995	1.007	1.155	0.666	0.591	1.422	0.655
Va pour le Zn (V)	1.858	0.91	1.763	1.469	1.869	3.152	1.833	1.415	1.865	2.863	2.426
Incertitude Zn (V)	1.339	0.921	1.394	1.418	1.381	1.436	0.976	0.826	1.305	1.137	1.387
Ecart type Zn (V)	0.956	0.896	1.356	1.268	1.344	1.025	0.95	0.804	0.932	1.016	0.843
Va pour le Ni (V)		2.631	2.525	2.976	2.399	2.136	2.423	2.321	2.491	2.295	1.899
Incertitude Ni (V)		1.583	0.557	0.655	0.585	0.917	0.686	0.754	1.44	0.833	0.635
Ecart type Ni (V)		0.542	0.338	0.398	0.284	0.557	0.417	0.258	1.028	0.506	0.453
Va pour l'Ag (V)		3.501	4.151	4.291	4.737	4.081	5.119	5.241	6.494	6.553	7.03
Incertitude Ag (V)		0.604	0.928	0.528	0.989	2.458	1.872	0.957	1.729	2.056	1.873
Ecart type Ag (V)		0.488	0.451	0.321	0.601	0.429	1.336	0.773	1.234	1.662	1.514

Tableau 7 : Valeurs des chutes de tension anodiques associées à l'écart type et à l'incertitude avec un intervalle de confiance à 99%.

Remarque : V_a est négatif pour le C, ceci est dû en partie à la méthode d'exploitation de la courbe de tension.

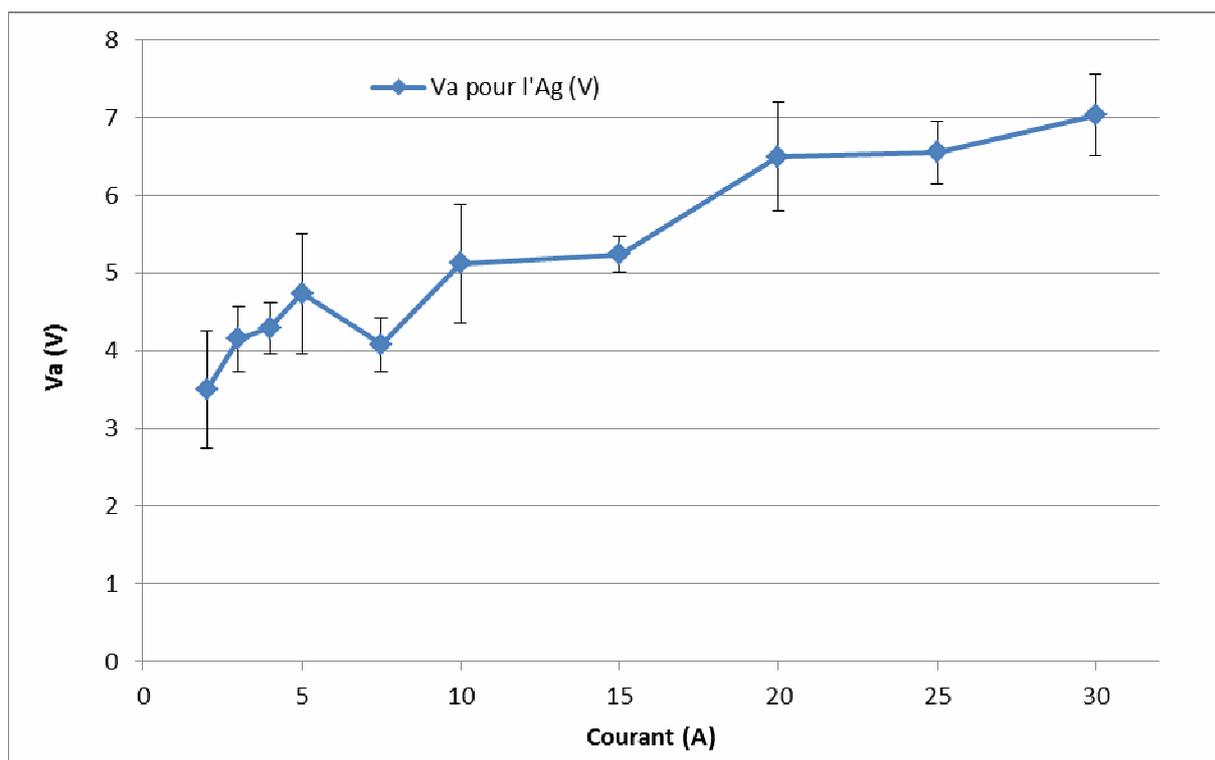


Figure 56 : Chute de tension anodique pour l'argent avec la représentation de l'écart type pour chaque mesure.

c) Temps d'arc

Courant (A)	1.2	2	3	4	5	8	10	15	20	25	30
t arc pour le Cu (S)		3.51E-04	5.63E-04	9.07E-04	1.29E-03	1.30E-03	2.05E-03	2.04E-03	3.03E-03	2.79E-03	2.68E-03
Incertitude Cu (S)		3.51E-05	5.63E-05	9.07E-05	1.29E-04	1.30E-04	2.05E-04	2.04E-04	3.03E-04	2.79E-04	2.68E-04
Ecart type Cu (S)		2.81E-06	4.50E-06	7.26E-06	1.04E-05	1.04E-05	1.64E-05	1.63E-05	2.42E-05	2.23E-05	2.14E-05
t arc pour le Al (S)		1.71E-03	2.65E-03	3.50E-03	3.41E-03	4.66E-03	4.54E-03	5.76E-03	5.69E-03	6.36E-03	7.70E-03
Incertitude Al (S)		4.12E-04	6.17E-04	6.46E-04	6.75E-04	8.98E-04	6.91E-04	8.75E-04	5.32E-04	5.71E-04	6.63E-04
Ecart type Al (S)		2.94E-04	4.99E-04	4.61E-04	4.82E-04	6.41E-04	6.18E-04	7.82E-04	4.76E-04	4.61E-04	6.45E-04
t arc pour le Sn (S)	2.53E-04	1.48E-03	1.89E-03	2.54E-03	2.76E-03	3.87E-03	4.85E-03	6.43E-03	7.48E-03	7.88E-03	8.12E-03
Incertitude Sn	3.49E-05	5.55E-04	6.36E-04	3.79E-04	3.00E-04	1.61E-04	2.30E-04	4.23E-04	4.90E-04	4.00E-04	3.86E-04
Ecart type Sn (S)	3.12E-05	4.96E-04	5.69E-04	2.30E-04	2.42E-04	1.56E-04	2.06E-04	4.11E-04	4.38E-04	3.57E-04	3.75E-04
t arc pour le Cd (S)		1.80E-04	4.16E-04	8.37E-04	1.41E-03	2.01E-03	2.23E-03	2.59E-03	2.92E-03	3.36E-03	3.77E-03
Incertitude Cd (S)		9.77E-05	1.18E-04	8.78E-05	2.74E-04	6.19E-05	8.28E-05	1.06E-04	1.30E-04	1.70E-04	1.50E-04
Ecart type Cd (S)		9.51E-05	1.14E-04	8.55E-05	2.45E-04	6.02E-05	4.02E-05	1.03E-04	1.26E-04	1.65E-04	1.46E-04
t arc pour le W (S)	1.57E-03	1.70E-03	2.14E-03	2.34E-03	2.67E-03	3.19E-03	4.04E-03	5.97E-03	7.05E-03	7.47E-03	7.23E-03
Incertitude W (S)	2.13E-04	2.99E-04	8.83E-05	1.75E-04	8.09E-04	2.80E-03	7.95E-04	2.51E-04	3.82E-04	8.15E-04	3.93E-04
Ecart type W (S)	1.72E-04	2.67E-04	4.29E-05	1.25E-04	1.41E-04	4.89E-04	5.67E-04	2.44E-04	3.72E-04	7.93E-04	3.82E-04
t arc pour le C (S)		3.44E-04	4.62E-04	5.25E-04	6.86E-04	1.06E-03	1.26E-03	1.85E-03	2.32E-03	2.60E-03	3.21E-03
Incertitude C (S)		3.25E-05	7.76E-05	6.49E-05	2.52E-04	2.13E-04	1.40E-03	2.51E-04	7.50E-04	1.21E-04	7.02E-04
Ecart type C (S)		2.63E-05	6.27E-05	3.94E-05	8.63E-05	1.29E-04	2.45E-04	8.58E-05	2.57E-04	5.88E-05	2.40E-04
t arc pour le Zn (S)	1.42E-03	1.76E-03	2.19E-03	2.46E-03	2.64E-03	3.34E-03	3.85E-03	4.81E-03	5.89E-03	6.61E-03	6.53E-03
Incertitude Zn (S)	1.31E-04	1.76E-04	1.01E-04	1.10E-04	1.53E-04	3.25E-04	2.26E-04	2.35E-04	2.45E-04	1.91E-04	1.84E-03
Ecart type Zn (S)	9.33E-05	1.71E-04	9.82E-05	9.86E-05	1.49E-04	2.32E-04	2.20E-04	2.29E-04	2.38E-04	1.86E-04	1.79E-03
t arc pour le Ni (S)		2.13E-04	4.93E-04	8.07E-04	1.08E-03	1.92E-03	2.56E-03	3.54E-03	4.50E-03	4.79E-03	5.43E-03
Incertitude Ni (S)		3.02E-04	2.44E-04	1.47E-04	2.62E-04	1.54E-04	2.11E-04	6.58E-04	5.95E-04	2.27E-04	2.08E-04
Ecart type Ni (S)		1.03E-04	1.48E-04	8.93E-05	1.27E-04	9.37E-05	1.28E-04	2.25E-04	4.25E-04	1.38E-04	2.03E-04
t arc pour l'Ag (S)		3.53E-04	7.85E-04	1.44E-03	1.53E-03	1.86E-03	2.00E-03	2.26E-03	2.46E-03	2.69E-03	3.19E-03
Incertitude Ag (S)		9.03E-05	5.31E-04	6.01E-05	8.43E-05	8.02E-05	7.31E-05	2.40E-05	6.26E-05	8.08E-05	7.97E-05
Ecart type Ag (S)		7.30E-05	2.58E-04	3.65E-05	5.12E-05	5.72E-05	5.22E-05	1.94E-05	4.47E-05	6.53E-05	6.44E-05

Tableau 8 : Valeurs des temps d'arc associées à l'écart type et à l'incertitude avec un intervalle de confiance à 99%.

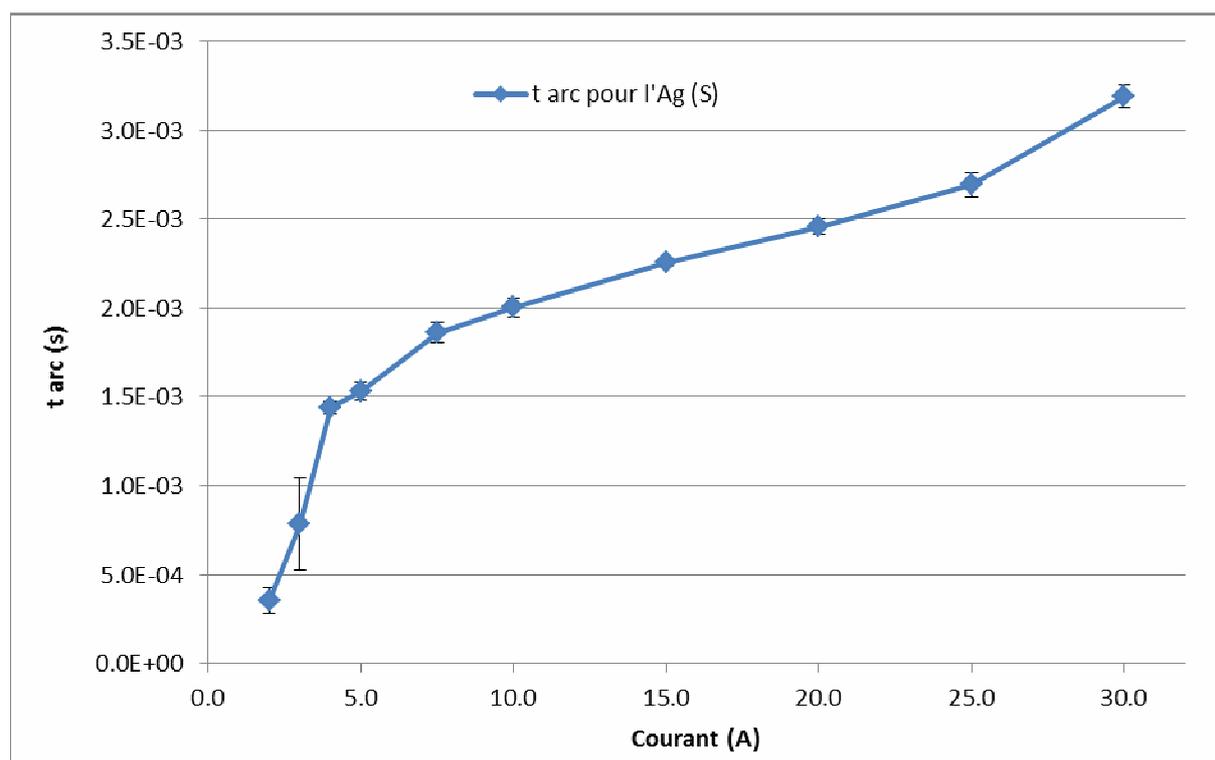


Figure 57 : Temps d'arc pour l'argent avec la représentation de l'écart type relatif à chaque mesure.

B. Alliages et pseudo alliages

a) Chute de tension cathodique

Courant (A)	1.2	2	3	4	5	7.5	10	15	20	25	30
Vc pour l'AgCdO (V)	11.61	11.33	11.56	11.41	11.61	10.77	10.99	10.99	11.25	11.87	11.2
Incertitude AgCdO (V)	2.062	1.439	1.6	0.86	0.461	1.293	1.107	1.286	1.949	0.402	0.82
Ecart type AgCdO (V)	0.046	0.699	0.777	0.295	0.224	0.923	0.895	1.15	1.743	0.359	0.798
Vc pour l'AgW (V)	11.73	11.49	12.24	11.85	11.92	11.77	11.28	11.84	12.15	12.15	11.61
Incertitude AgW (V)	0.167	0.684	0.648	0.656	0.497	0.901	0.542	0.881	0.461	0.34	0.543
Ecart type AgW (V)	0.081	0.415	0.524	0.468	0.402	0.805	0.438	0.857	0.448	0.274	0.529
Vc pour l'AgNi (V)	12.12	10.94	11.64	11.39	11.07	11.75	11.66	11.08	11.86	11.85	11.97
Incertitude l'AgNi (V)	7.511	3.079	0.591	0.565	1.253	0.642	0.572	0.978	0.577	0.368	0.5
Ecart type l'AgNi (V)	0.167	1.054	0.529	0.505	1.219	0.625	0.408	0.952	0.561	0.358	0.487
Vc pour l'AgZnO (V)	8.526	8.651	9.552	10.24	9.605	10.19	9.816	10.18	10.73	10.37	10.35
Incertitude AgZnO (V)	2.448	1.424	0.359	0.813	0.528	0.783	0.777	0.537	0.739	0.641	0.431
Ecart type AgZnO (V)	1.189	1.273	0.321	0.727	0.472	0.761	0.756	0.522	0.719	0.624	0.419
Vc pour l'AgSnO2 (V)	10.44	10.37	10.68	10.64	10.41	10.81	10.68	10.58	10.59	10.44	10.55
Incertitude AgSnO2 (V)	0.714	0.614	0.681	0.199	0.457	0.649	0.603	0.47	0.24	0.19	0.282
Ecart type AgSnO2 (V)	0.639	0.598	0.663	0.178	0.444	0.632	0.539	0.285	0.233	0.185	0.253

Tableau 9 : Valeurs des chutes de tension cathodiques associées à l'écart type et à l'incertitude avec un intervalle de confiance à 99%.

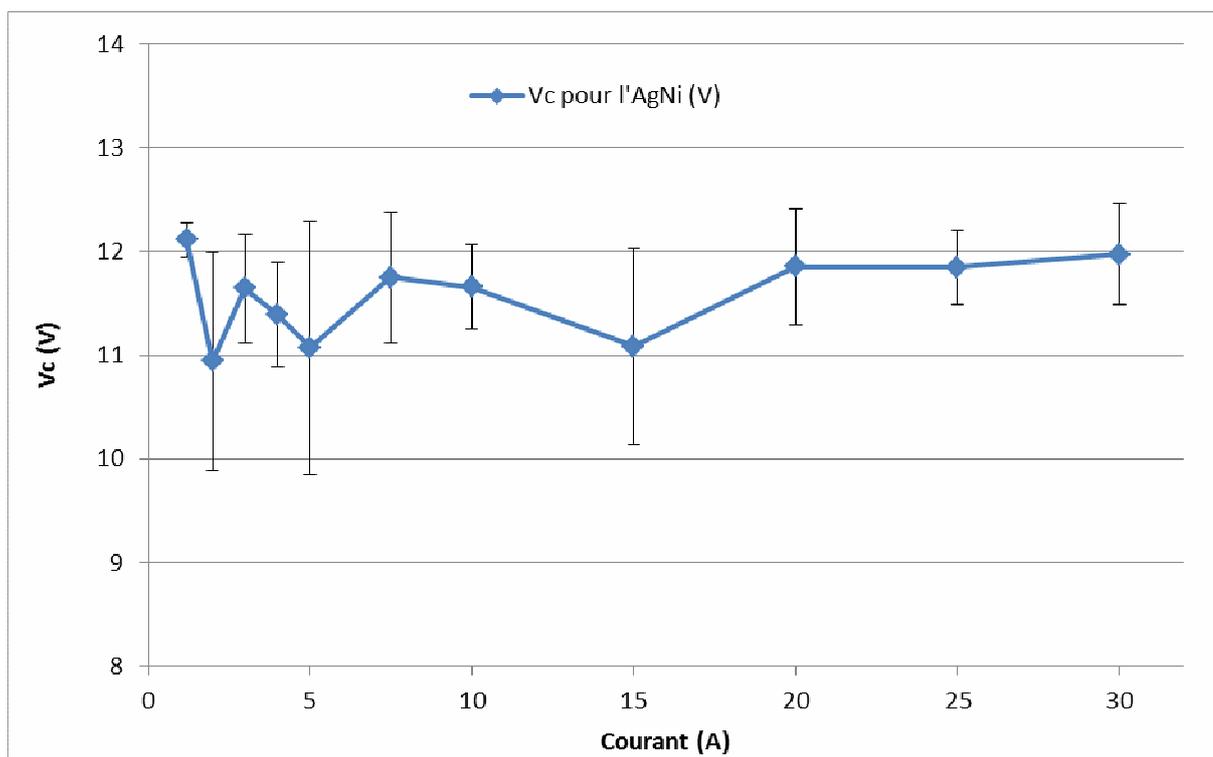


Figure 58 : Chute de tension cathodique pour l'AgNi avec la représentation de l'écart type relatif à chaque mesure.

b) Chute de tension anodique

Courant (A)	1.2	2	3	4	5	7.5	10	15	20	25	30
Va pour l'AgCdO (V)	0.613	1.25	1.506	0.425	1.023	1.838	2.375	2.874	3.439	2.712	3.231
Incertitude AgCdO (V)	0.613	1.912	2.02	0.731	1.584	1.911	0.785	1.427	1.853	1.614	1.221
Ecart type AgCdO (V)	0.673	0.928	0.981	0.25	0.769	1.364	0.635	1.276	1.657	1.443	1.188
Va pour l'AgW (V)	2.785	1.859	1.657	1.184	2.171	1.159	1.16	1.517	1.308	1.1	1.849
Incertitude AgW (V)	3.494	1.54	2.034	1.534	2.512	1.081	1.105	1.1	0.758	1.392	0.626
Ecart type AgW (V)	1.197	0.936	1.644	1.095	2.03	0.966	0.893	1.07	0.737	1.125	0.61
Va pour l'AgNi (V)	0.247	2.896	2.013	1.855	0.623	1.529	0.689	1.985	3.643	2.715	3.304
Incertitude l'AgNi (V)	10.98	5.901	2.251	1.093	0.458	1.055	0.836	1.439	3.207	0.69	1.056
Ecart type l'AgNi (V)	0.244	2.02	2.013	0.977	0.446	1.027	0.597	1.401	3.121	0.672	1.028
Va pour l'AgZnO (V)	1.361	2.402	1.627	0.928	1.427	0.769	1.222	1.135	0.813	1.78	1.137
Incertitude AgZnO (V)	2.702	1.865	0.653	0.823	0.705	0.718	0.843	0.79	0.498	1.494	1.311
Ecart type AgZnO (V)	1.312	1.667	0.584	0.735	0.63	0.699	0.821	0.769	0.485	1.454	1.275
Va pour l'AgSnO2 (V)	0.759	1.724	3.479	2.299	1.386	1.647	1.152	1.028	0.486	0.378	0.751
Incertitude AgSnO2 (V)	0.673	1.321	2.182	1.785	1.687	0.97	1.527	1.082	0.425	0.313	0.91
Ecart type AgSnO2 (V)	0.602	1.286	2.124	1.596	1.642	0.944	1.365	0.657	0.413	0.304	0.814

Tableau 10 : Valeurs des chutes de tension anodiques associées à l'écart type et à l'incertitude avec un intervalle de confiance à 99%.

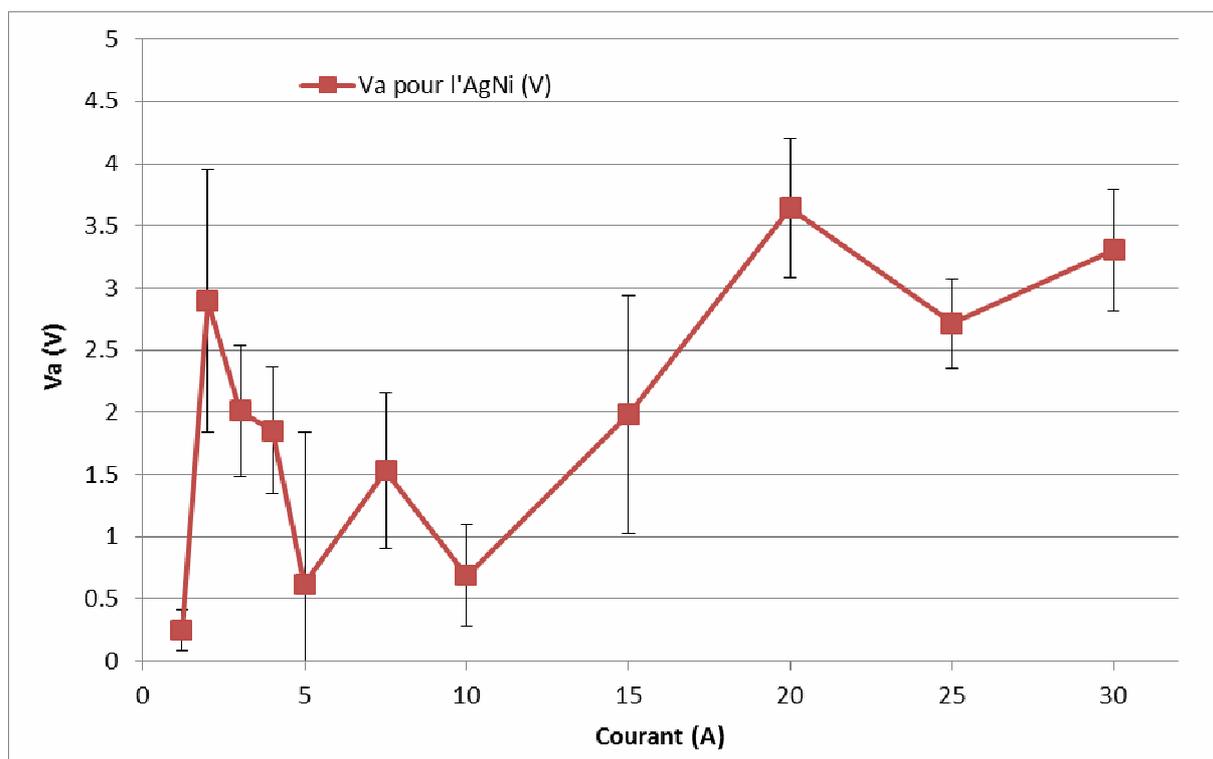


Figure 59 : Chute de tension anodique pour l'AgNi avec la représentation de l'écart type relatif à chaque mesure.

c) Temps d'arc

Courant (A)	1.2	2	3	4	5	8	10	15	20	25	30
t arc pour l'AgCdO (S)	4.01E-04	8.13E-04	1.16E+01	1.13E-03	1.39E-03	1.81E-03	1.96E-03	2.21E-03	2.54E-03	2.71E-03	2.99E-03
Incertitude AgCdO (S)	5.73E-03	8.55E-05	1.75E-04	3.98E-04	1.83E-04	1.38E-04	4.16E-05	7.48E-05	3.45E-04	4.78E-04	3.21E-04
Ecart type AgCdO (S)	1.27E-04	4.15E-05	8.49E-05	1.36E-04	8.90E-05	9.85E-05	3.36E-05	6.69E-05	3.09E-04	4.28E-04	3.12E-04
t arc pour l'AgW (S)	4.07E-04	8.58E-04	1.06E-03	1.31E-03	1.37E-03	1.67E-03	1.76E-03	2.17E-03	2.87E-03	2.93E-03	2.92E-03
Incertitude AgW (S)	2.62E-04	2.40E-04	2.58E-04	8.77E-05	1.91E-04	1.31E-04	2.14E-04	2.54E-04	5.50E-04	7.33E-04	3.35E-04
Ecart type AgW (S)	1.27E-04	1.46E-04	2.09E-04	6.26E-05	1.54E-04	1.17E-04	1.73E-04	2.47E-04	5.35E-04	5.93E-04	3.26E-04
t arc pour l'AgNi (S)	1.61E-04	7.30E-04	1.34E-03	1.57E-03	1.69E-03	1.92E-03	1.98E-03	2.31E-03	2.49E-03	2.59E-03	2.94E-03
Incertitude l'AgNi (S)	3.53E-03	3.49E-04	1.29E-04	7.13E-05	1.02E-04	1.33E-04	6.03E-05	5.25E-05	1.80E-04	2.01E-04	4.49E-04
Ecart type l'AgNi (S)	7.85E-05	1.20E-04	1.15E-04	6.37E-05	9.92E-05	1.29E-04	4.31E-05	5.10E-05	1.75E-04	1.95E-04	4.37E-04
t arc pour l'AgZnO (S)	6.46E-04	7.92E-04	1.05E-03	1.19E-03	1.32E-03	1.64E-03	1.84E-03	2.19E-03	2.61E-03	2.77E-03	3.06E-03
Incertitude AgZnO (S)	5.20E-05	4.90E-05	6.04E-05	9.08E-05	6.48E-05	2.74E-05	1.24E-04	1.08E-04	4.04E-04	3.70E-04	3.50E-04
Ecart type AgZnO (S)	2.52E-05	4.38E-05	5.40E-05	8.11E-05	5.79E-05	2.67E-05	1.20E-04	1.05E-04	3.93E-04	3.60E-04	3.41E-04
t arc pour l'AgSnO2 (S)	7.15E-04	9.93E-04	1.26E-03	1.46E-03	1.55E-03	1.88E-03	2.07E-03	2.29E-03	2.71E-03	2.86E-03	3.26E-03
Incertitude AgSnO2 (S)	1.20E-04	6.95E-05	7.41E-05	8.17E-05	5.36E-05	9.01E-05	1.02E-04	1.09E-04	3.09E-04	1.42E-04	1.78E-04
Ecart type AgSnO2 (S)	1.07E-04	6.77E-05	7.21E-05	7.31E-05	5.21E-05	8.77E-05	9.14E-05	6.60E-05	3.01E-04	1.38E-04	1.59E-04

Tableau 11 : Valeurs des temps d'arc associées à l'écart type et à l'incertitude avec un intervalle de confiance à 99%.

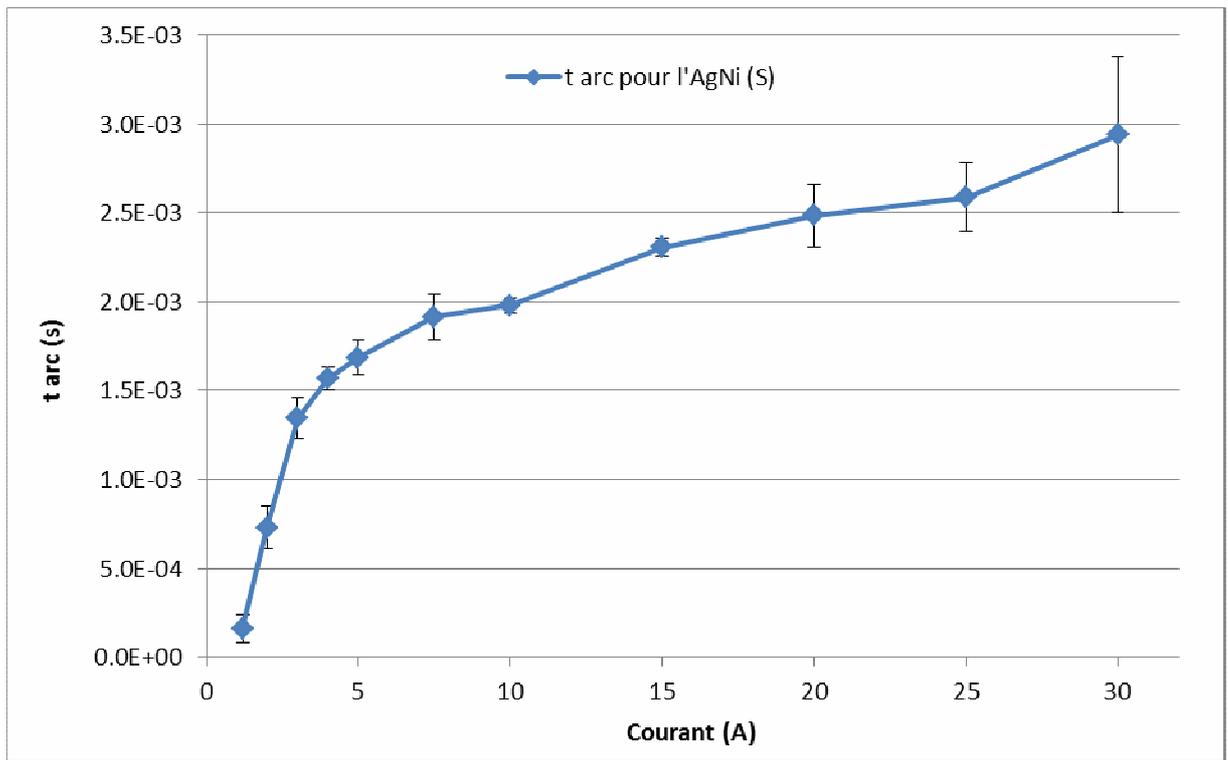


Figure 60 : Temps d'arc pour l'AgNi avec la représentation de l'écart type relatif à la mesure.

Index des illustrations.

<i>Figure 1</i> : Synoptique du système expérimental.	9
<i>Figure 2</i> : Courbes relatives au déplacement du chariot.	10
<i>Figure 3</i> : Modification du système d'ouverture des électrodes.	11
<i>Figure 4</i> : Profil de vitesse du chariot.	11
<i>Figure 5</i> : Synoptique du circuit électrique.	12
<i>Figure 6</i> : Vue de côté de la mise en place du matériel.	13
<i>Figure 7</i> : Vue de face de la mise en place du matériel.	14
<i>Figure 8</i> : Pastille de contact.	15
<i>Figure 9</i> : Evolution temporelle du courant et de la tension d'arc entre deux électrodes en argent pour un courant de 10 A et une vitesse de 1m/s.	16
<i>Figure 10</i> : Etapes du développement de l'arc de coupure.	17
<i>Figure 11</i> : Evolution temporelle de la tension d'arc pour différentes vitesses et intensités du courant pour des électrodes en argent.	18
<i>Figure 12</i> : Evolution temporelle de la tension d'arc pour différentes vitesses et intensités du courant dans le cas des électrodes en argent.	19
<i>Figure 13</i> : Durée d'arc en fonction :	21
<i>Figure 14</i> : Longueur d'arc en fonction :	22
<i>Figure 15</i> : Tension et courant d'arc en fonction du temps pour une vitesse d'ouverture de 1m/s et un courant de 20 A dans le cas des électrodes en nickel (Ni).	23
<i>Figure 16</i> : Tension et courant d'arc en fonction du temps pour une vitesse d'ouverture de 1m/s et un courant de 20 A dans le cas des électrodes en nickel (Ni).	25
<i>Figure 17</i> : Tension et courant d'arc en fonction du temps ; identification des zones	25
<i>Figure 18</i> : Tension et courant d'arc en fonction du temps ; dilatation de la courbe de tension dans la zone cathodique.	26
<i>Figure 19</i> : Evolution de la chute de tension cathodique en fonction de l'intensité du courant pour les matériaux purs.	27
<i>Figure 20</i> : Evolution de la chute de tension anodique en fonction de l'intensité du courant pour les matériaux purs, excepté le carbone.	28
<i>Figure 21</i> : Variation du temps d'arc en fonction de l'intensité du courant pour les matériaux purs pour une vitesse d'ouverture de 1 m/s.	29
<i>Figure 22</i> : Variation de la chute de tension cathodique en fonction de l'intensité du courant pour les alliages et pseudo alliages.	30
<i>Figure 23</i> : Variation de la chute de tension anodique en fonction de l'intensité du courant pour les alliages et pseudo alliages.	31
<i>Figure 24</i> : Evolution du temps d'arc en fonction de l'intensité du courant pour une vitesse d'ouverture des contacts de 1 m/s, dans le cas des alliages et pseudo alliages.	32
<i>Figure 25</i> : Comparaison des chutes de tension à la cathode de l'AgNi et de ses matériaux purs le constituant.	33
<i>Figure 26</i> : Comparaison des chutes de tension à la cathode de l'AgW et de ses matériaux purs le constituant.	33
<i>Figure 27</i> : Comparaison des chutes de tension à la cathode de l'AgCdO et de ses matériaux purs le constituant.	34
<i>Figure 28</i> : Comparaison des chutes de tension à la cathode de l'AgZnO et de ses matériaux purs le constituant.	34
<i>Figure 29</i> : Comparaison des chutes de tension à la cathode de l'AgSnO ₂ et de ses matériaux purs le constituant.	35
<i>Figure 30</i> : Comparaison des temps d'arc de l'AgNi et de ses matériaux purs le constituant.	36
<i>Figure 31</i> : Comparaison des temps d'arc de l'AgW et de ses matériaux purs le constituant.	36
<i>Figure 32</i> : Comparaison des temps d'arc de l'AgCdO et de ses matériaux purs le constituant.	37
<i>Figure 33</i> : Comparaison des temps d'arc de l'AgZnO et de ses matériaux purs le constituant.	37
<i>Figure 34</i> : Comparaison des temps d'arc de l'AgSnO ₂ et de ses matériaux purs le constituant.	38
<i>Figure 35</i> : Courbes de chutes de tension à la cathode pour tous les matériaux.	39
<i>Figure 36</i> : Courbes de chutes de tension à l'anode pour tous les matériaux.	39
<i>Figure 37</i> : Courbes de temps d'arc pour tous les matériaux.	40

<u>Figure 38</u> : Variation de $V_{c\text{-moyen}}$ en fonction du travail de sortie. _____	43
<u>Figure 39</u> : Variation de $V_{c\text{-moyen}}$ en fonction de l'énergie de 1 ^{ère} ionisation du matériau. _____	44
<u>Figure 40</u> : Variation de $V_{c\text{-moyen}}$ en fonction de l'enthalpie de vaporisation. _____	44
<u>Figure 41</u> : Epaisseur E_c et champ électrique ($E_c = \Delta V / \Delta l$) dans la zone de charge d'espace pour $I = 30$ A. _____	45
<u>Figure 42</u> : Champ électrique dans la zone d'expansion E_{ex} et dans la colonne E_{col} pour $I = 30$ A. _____	45
<u>Figure 43</u> : Micrographie d'électrode en argent avant essais. _____	47
<u>Figure 44</u> : Micrographie d'électrodes en argent après 10 essais pour un courant de 30 A. _____	47
<u>Figure 45</u> : Micrographie d'électrode en AgW avant essais. _____	48
<u>Figure 46</u> : Micrographie d'électrodes en AgW après 10 essais pour un courant de 30 A. _____	48
<u>Figure 47</u> : Micrographie d'électrode en AgNi avant essais. _____	49
<u>Figure 48</u> : Micrographie d'électrodes en AgNi après 10 essais pour un courant de 30 A. _____	49
<u>Figure 49</u> : Micrographie d'électrode en AgCdO avant essais _____	50
<u>Figure 50</u> : Micrographie d'électrodes en AgCdO après 10 essais pour un courant de 30 A. _____	50
<u>Figure 51</u> : Micrographie de l'électrode en AgZnO avant essais. _____	51
<u>Figure 52</u> : Micrographie des électrodes en AgZnO après 10 essais pour un courant de 30 A. _____	51
<u>Figure 53</u> : Micrographie de l'électrode en AgSnO ₂ avant essais. _____	52
<u>Figure 54</u> : Micrographie des électrodes en AgSnO ₂ après 10 essais pour un courant de 30 A. _____	52
<u>Figure 55</u> : Chute de tension cathodique pour l'argent avec la représentation de l'écart type relatif à chaque mesure. _____	56
<u>Figure 56</u> : Chute de tension anodique pour l'argent avec la représentation de l'écart type pour chaque mesure. _____	58
<u>Figure 57</u> : Temps d'arc pour l'argent avec la représentation de l'écart type relatif à chaque mesure. _____	60
<u>Figure 58</u> : Chute de tension cathodique pour l'AgNi avec la représentation de l'écart type relatif à chaque mesure. _____	61
<u>Figure 59</u> : Chute de tension anodique pour l'AgNi avec la représentation de l'écart type relatif à chaque mesure. _____	62
<u>Figure 60</u> : Temps d'arc pour l'AgNi avec la représentation de l'écart type relatif à la mesure. _____	63

Index des tableaux

<u>Tableau 1</u> : Matériaux de contact testés. _____	15
<u>Tableau 2</u> : Conditions d'essais en courant, vitesse et nature du matériau. _____	20
<u>Tableau 3</u> : Valeurs moyennes de V_o et V_c pour $5 \text{ A} \leq I \leq 30 \text{ A}$ _____	41
<u>Tableau 4</u> : Comparaison des résultats des matériaux purs _____	42
<u>Tableau 5</u> : Comparaison des ordres de grandeur dans la zone cathodique. _____	46
<u>Tableau 6</u> : Valeurs des chutes de tension cathodiques associées à l'écart type et à l'incertitude avec un intervalle de confiance à 99%. _____	55
<u>Tableau 7</u> : Valeurs des chutes de tension anodiques associées à l'écart type et à l'incertitude avec un intervalle de confiance à 99%. _____	57
<u>Tableau 8</u> : Valeurs des temps d'arc associées à l'écart type et à l'incertitude avec un intervalle de confiance à 99%. _____	59
<u>Tableau 9</u> : Valeurs des chutes de tension cathodiques associées à l'écart type et à l'incertitude avec un intervalle de confiance à 99%. _____	60
<u>Tableau 10</u> : Valeurs des chutes de tension anodiques associées à l'écart type et à l'incertitude avec un intervalle de confiance à 99%. _____	61
<u>Tableau 11</u> : Valeurs des temps d'arc associées à l'écart type et à l'incertitude avec un intervalle de confiance à 99%. _____	62

