Banc d'essai pour la mesure de l'échauffement du point de contact

Marion Kubler-Riedinger, Patrice Joyeux, Gauthier Déplaude, Jean-Marc Bauchire, Dunpin Hong

▶ **To cite this version:**

Marion Kubler-Riedinger, Patrice Joyeux, Gauthier Déplaude, Jean-Marc Bauchire, Dunpin Hong. Banc d'essai pour la mesure de l'échauffement du point de contact. Journal International de Technologie, de l'Innovation, de la Physique, de l'Energie et de l'Environnement , 2019, 5 (2), pp.8. 10.18145/jitipee.v5i2.242 . hal-02920069

HAL Id: hal-02920069
https://hal.science/hal-02920069

Submitted on 25 Aug 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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

Banc d'essai pour la mesure de l'échauffement du point de contact

M. Kubler-Riedinger, P. Joyeux, G. Déplaude,

J.-M. Bauchire, D. Hong

ISSN : 2428-8500

DOI : 10.18145/jitipee.v5i2.242

Le sujet de cet article a été présenté lors du colloque sur les arcs électriques (CAE XIV) les 19 et 20 mars 2019 à Bourges.
L'article publié a fait l'objet d'une expertise indépendante par deux spécialistes du domaine.

Journal International de Technologie, de l'Innovation, de la Physique, de l'Energie et de l'Environnement
ISSN : 2428-8500 *vol. 5, n°2, 8, 2019*
DOI : http://dx.doi.org/10.18145/jitipee.v5i2.242

Banc d'essai pour la mesure de l'échauffement du point de contact

Marion Kubler-Riedinger [1, 2], Patrice Joyeux [1], Gauthier Déplaude [1],

Jean-Marc Bauchire [2], Dunpin Hong [2]

(1) Hager Electro SAS, 132 Boulevard d'Europe, 67210 Obernai France
(2) GREMI, UMR7344 Université d'Orléans/CNRS, 14 Rue d'Issoudun, BP 6744, 45067 Orléans Cedex 2 France
marion.kubler@hager.com

Résumé *– Le point de contact présent dans le disjoncteur et l'interrupteur différentiel modulaires est le lieu où les lignes de courant se concentrent. Ce phénomène conduit à l'échauffement du point de contact, voire à sa fusion. Pour déterminer son échauffement et les conditions induisant une fusion, un gabarit de test a été conçu et réalisé. Nous pouvons ainsi quantifier l'influence des différents paramètres opératoires. Ce gabarit permet notamment la mesure de la tension de contact qu'il est nécessaire de connaître pour le calcul de la température au centre de la striction à l'aide de la formule de Kohlrausch. Cette relation suppose un régime de fonctionnement statique malgré la nature impulsionnelle du courant. Cet article décrit le banc de mesure mis au point, la justification du régime statique et les premières mesures effectuées.*

Mots clés *: point de contact électrique, résistance de contact, échauffement, fusion, force de contact, formule de Kohlrausch*

DOI : 10.18145/jitipee.v5i2.242

Introduction

Le disjoncteur et les différents produits différentiels modulaires font partie des organes de protection des installations électriques. Leurs contacts électriques ont donc un rôle crucial car c'est la séparation de ces contacts qui met l'installation hors tension. Ils doivent, lors du fonctionnement normal de l'installation, conduire le courant avec un échauffement minimal, mais aussi permettre une ouverture effective du circuit pour couper le courant lors d'une anomalie.

Les échauffements du point de contact conduisent à des problématiques de collage : si l'un des matériaux en contact atteint sa température de fusion, il y a un risque de soudure. Cela empêche l'ouverture du produit si la force d'ouverture n'est pas suffisante pour décoller les contacts, ce qui peut occasionner de graves dommages pour l'installation électrique et les personnes. Il est donc indispensable d'éviter tout phénomène de soudure des contacts après une opération de coupure. Les appareillages de coupure sont ainsi dimensionnés pour que les contacts s'ouvrent avant que le courant de fusion ne soit atteint.

Pour étudier l'échauffement des contacts fermés de produits commercialisés et dans le cadre du développement de nouveaux produits, nous avons conçu et réalisé un banc de mesure spécifique aux contacts électriques destinés aux disjoncteurs industriels. Il permet aussi de tester des contacts réels prélevés en production dans le cadre des opérations de contrôle, en utilisant un courant représentatif du courant émis par le réseau électrique lors d'une coupure en cas de court-circuit. Sa forme, notamment en phase ascendante, est proche d'une demi-onde évoluant temporellement selon la fonction sinusoïdale de fréquence 50 Hz. De plus, les supports de contact utilisés sont réalistes par rapport aux produits industriels, notamment la géométrie de leurs amenées de courant. Notre stratégie ici est de reproduire le plus fidèlement possible le point de contact présent dans les produits de protection. Cette approche qui a l'avantage d'être réaliste implique néanmoins une interprétation et une modélisation complexes à cause du grand nombre de phénomènes physiques mis en jeu. Notre banc de mesure permet d'étudier la capacité des contacts à éviter le collage en fonction de plusieurs paramètres mesurés : la tension de contact, l'intensité traversant le point de contact et la force de contact statique, préréglée via un ressort.

1. Résistance de contact et Formule de Kohlrausch

Une des relations majeures de la littérature du point de contact [1] est la relation qui définit la résistance de contact R_c par rapport au rayon a de ce point de contact visible sur la figure 1 :

$$R_c = \frac{\rho}{2a} \quad (1)$$

Avec R_c la résistance de contact en **Ω**, ρ la résistivité des matériaux de contact en **Ω**.m et a le rayon de la tâche de contact en mètre.

La formule de Kohlrausch associée à la loi de Wiedeman-Franz est aussi utilisée. Elle lie la température maximale T_m de la zone de striction (illustrée sur la figure 1) à la tension de contact $U_{contact}$ suivant [1], [2] et [3] :

$$U_{contact} = \sqrt{4L}\sqrt{{T_m}^2 - T_0^2} \approx 3{,}13 \cdot 10^{-4}\sqrt{T_m^2 - T_0^2} \qquad (2)$$

Avec L le nombre de Lorentz (valeur théorique pour les métaux : $2{,}45 \cdot 10^{-8}\, V^2.K^{-2}$), T_m la température en K de la striction et T_0 celle des conducteurs assez loin du point de contact pour ne pas être affectée par le phénomène de striction, typiquement la température ambiante en K. Notons qu'en réalité selon la nature des matériaux en contact, la constante L peut légèrement varier, de l'ordre de 1 %.

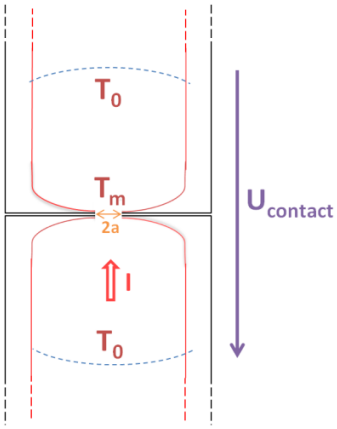

Figure 1 : Schéma du point de contact : Exemple d'une coupe de deux conducteurs pleins cylindriques semi-infinis, la partie centrale représente le point de contact et les lignes rouges symbolisent les lignes de courant aboutissant au point de contact ou partant de ce point.

La validité de cette formule est néanmoins limitée par les hypothèses suivantes [4] :

- Le contact est purement métallique, sans influence d'une pollution ou d'une couche d'oxyde à sa surface.
- Les pertes de puissance dues à la striction sont évacuées uniquement par conduction thermique.
- La géométrie des lignes de courant est en régime permanent, c'est-à-dire que les équipotentielles et les isothermes sont confondues. Autrement dit : en tout point, les températures atteintes sont des températures d'équilibre thermique qui dépendent de l'intensité du courant en ce point.

Nous pouvons alors d'ores et déjà nous demander si nos conditions expérimentales satisfont les hypothèses émises par Kohlrausch pour pouvoir utiliser sa formule. En particulier, celle d'un processus en régime permanent, alors que notre onde de courant est transitoire. La validation de cette hypothèse sera présentée à la section 3 de cet article.

2. Présentation de l'équipement

Comme illustré sur les figures 2 et 3, le gabarit de test consiste en un couple de contacts montés en vis-à-vis. Nous utilisons pour les contacts des matériaux typiques du disjoncteur. Il y a donc deux types de contacts : un en cuivre pur revêtu avec une couche d'argent d'épaisseur 5 µm ± 1 µm, et un en argent-carbone qui est un matériau composite formé d'argent et d'un faible pourcentage de fibres de carbone (de l'ordre de 4 % massique). Un mécanisme de vis micrométrique permet le rapprochement des contacts, puis l'application d'une force de contact. Sa valeur est fixée avant le début de chaque essai via la contrainte exercée par un ressort. Nous l'appelons force de contact statique (F_c) puisqu'elle ne varie pas pendant l'essai.

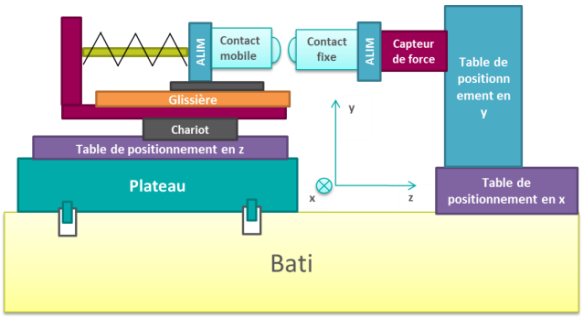

Figure 2 : Schéma simplifié du montage expérimental

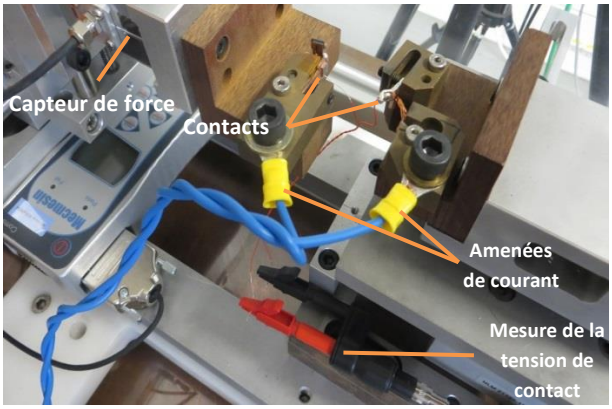

Figure 3 : Photo des contacts sur leurs supports

Nous établissons ensuite un courant électrique pour créer un échauffement du point de contact. Ce courant, dont l'intensité est visible en rouge sur la figure 4, est délivré par la décharge d'un banc de condensateurs faisant partie d'un circuit RLC série fonctionnant en régime apériodique. Comme décrite précédemment dans l'introduction, la forme de cette onde est proche d'une demi-onde sur le front de montée évoluant temporellement selon la fonction sinusoïdale de fréquence 50 Hz. L'intensité du courant passe de 0 à sa valeur maximale I_0 en 5 ms.

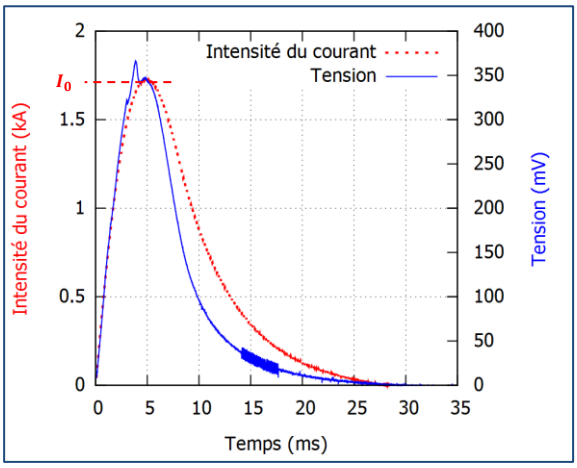

Figure 4 : Evolution temporelle de la tension de contact et de l'intensité du courant traversant le contact

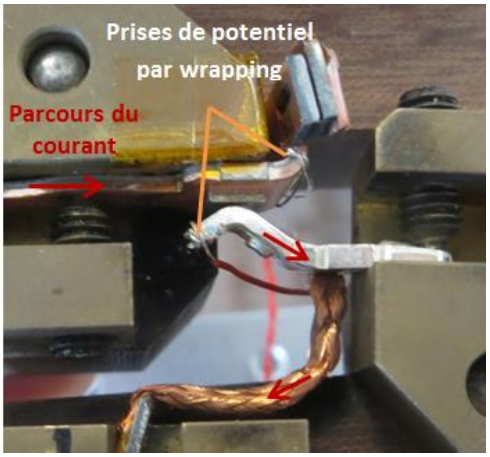

Figure 5 : Détail des contacts et du système de prise de potentiel

Durant l'essai, nous mesurons la force de contact grâce au dynamomètre AFG 100 N de la marque Mecmesin fixé sur le contact fixe (contact de gauche sur la figure 3). Cette force mesurée est en fait la somme de plusieurs contributions :

- La force statique F_c imposée mécaniquement par le ressort et préréglée avant l'essai.
- La force de répulsion électromagnétique des contacts due à la striction des lignes de courant au point de contact.
- La force de répulsion électromagnétique des contacts due à la boucle formée par les amenées de courant.

La précision intrinsèque du capteur de force est de ± 120 mN. Lors de nos mesures, les perturbations électromagnétiques subies par la partie électronique de la chaine de mesure augmentent les incertitudes de mesure à ± 300 mN. L'intensité du courant traversant le contact est mesurée à la sortie du banc de condensateurs grâce à une sonde de type Rogowski de modèle CWT Mini 30B de Power Electronic Measurement, avec une précision de ± 10 A. Nous mesurons les potentiels électriques avec une sonde de tension (modèle TA 132 de Pico Technology) au plus près du point de contact, sur des parties des contacts non traversées par le courant, comme l'illustre la figure 5. La précision de mesure sur la tension de contact est de ± 10 mV. Nous mesurons également la température ambiante (reflétant la température des conducteurs loin du contact) avant chaque essai par lecture d'un thermomètre placé au pied du gabarit sous les contacts, avec une précision de ± 0.5 °C. Ces mesures de tension et de température ambiante nous permettent de déterminer la température T_m de la striction en utilisant la formule de Kohlrausch.

3. Bilan énergétique d'un essai

Le bilan énergétique au point de contact entre la quantité de chaleur générée par effet Joule et celles servant à chauffer le point de contact et à maintenir son gradient de température s'écrit :

$$E_J = E_{ch} + E_F \tag{3}$$

Avec, pendant un intervalle de temps Δt, E_J la quantité de chaleur générée par effet Joule, E_{ch} la quantité de chaleur nécessaire au chauffage du point de contact, et E_F la quantité de chaleur nécessaire pour maintenir le gradient de température entre T_m et T_0. Ces quantités de chaleur sont exprimées en joules.

Pour vérifier si nos conditions expérimentales satisfont l'hypothèse du régime permanent, nous devons nous assurer que l'énergie E_J générée au point de contact est suffisante pour chauffer le point de contact et maintenir en température un volume cylindrique autour de ce point de contact, c'est-à-dire $E_J > E_{ch} + E_F$. L'éventuelle quantité de chaleur E_J supplémentaire est évacuée par d'autres processus, comme le rayonnement thermique.

A partir des valeurs expérimentales de l'intensité de courant et de la tension illustrées à la figure 4, nous calculons tout d'abord la puissance P_J des pertes Joule au point de contact :

$$P_J = U_{contact} \cdot I \tag{4}$$

Avec P_J les pertes Joule en W, $U_{contact}$ en V et I en A.

Nous choisissons ensuite de calculer l'énergie E_J correspondante sur chaque intervalle de temps Δt de 0,1 ms :

$$E_J = P_J \cdot \Delta t \quad (5)$$

Avec E_J l'énergie dissipée par effet Joule, P_J les pertes Joule et Δt l'intervalle de temps choisi.

La figure 6 illustre la puissance P_J et l'énergie E_J générées. Ces deux courbes se superposent à un facteur multiplicatif près, ce qui est cohérent puisque pour calculer l'énergie E_J nous multiplions chaque valeur de la puissance P_J par un intervalle de temps constant $\Delta t = 0{,}1\ ms$.

Le volume cylindrique choisi correspond au volume de matière qui va être chauffé par conduction de la chaleur générée par effet Joule au point de contact. En se référant à la formule (1) et en prenant une résistance de contact de 220 $\mu\Omega$ (valeur en accord avec nos données expérimentales), nous obtenons un rayon a environ égal à 70 μm. Nous prenons comme rayon du cylindre 3,5 fois le rayon a de la tâche de contact, donc 245 μm selon la référence [1]. De même, la hauteur du cylindre, centré sur le point de contact, est de $h = 8a = 560\ \mu m$ [1].

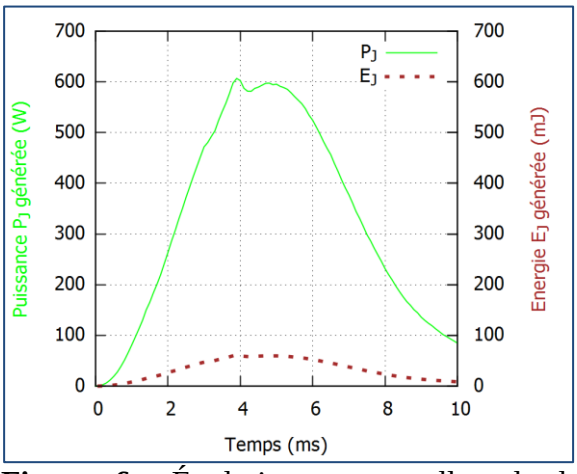

Figure 6 : Évolutions temporelles de la puissance P_J et de l'énergie E_J

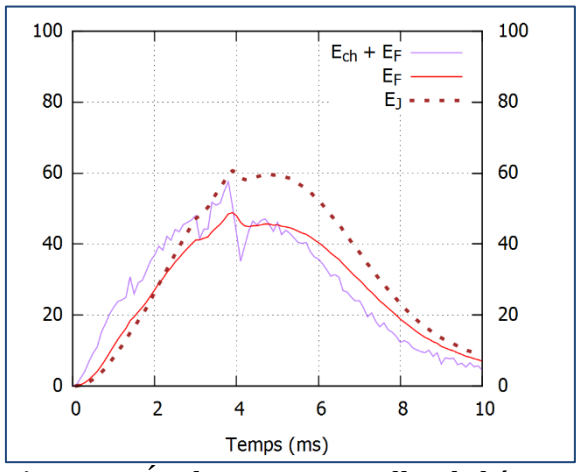

Figure 7 : Évolutions temporelles de l'énergie E_J, de l'énergie E_F et de la somme $E_{ch} + E_F$

Nous calculons à présent la quantité de chaleur E_{ch} nécessaire au chauffage de ce volume cylindrique autour du point de contact, toujours pendant un intervalle de temps Δt de 0,1 ms. Pour cela nous calculons la somme de l'énergie de chauffage pour chacun des deux matériaux de part et d'autre du point de contact : Le cuivre et l'argent. Nous choisissons ces deux matériaux car comme nous l'avons vu dans la section 2, les matériaux en contact sont en grande majorité composés de cuivre pour un côté et d'argent pour l'autre côté du point de contact.

$$E_{ch} = \left(\rho_{Cu} \cdot c_{p_{Cu}} + \rho_{Ag} \cdot c_{p_{Ag}}\right) \cdot \frac{V_{TOT}}{2} \cdot (T_m^i - T_m^{i-1}) \quad (6)$$

Avec E_{ch} la quantité de chaleur nécessaire au chauffage du cylindre en J, ρ les masses volumiques des matériaux chauffés en g/m^3, c_p les capacités calorifiques des matériaux chauffés en J/(g.K), V_{TOT} le volume total de matière chauffée en m^3 et les températures T_m^i et T_m^{i-1} calculées avec la formule de Kohlrausch en K, T_m^{i-1} étant la température maximale de la striction à l'instant précédent, c'est-à-dire 0,1 ms avant l'instant où la température maximale du point de contact vaut T_m^i.

Pour calculer la température T_m au point de contact, nous faisons dans un premier temps l'hypothèse que l'on se trouve en régime statique afin d'utiliser la formule de Kohlrausch pour calculer cette température à partir de la tension de contact mesurée. Nous démontrerons à la fin de cette section que nous sommes bien en régime établi, ce qui validera cette hypothèse de calcul.

Notons finalement que pour le calcul de cette énergie E_{ch} nécessaire au chauffage du volume de matière, nous considérons une température de chauffe égale à T_m en tout point du volume chauffé, alors qu'en réalité la température dans le cylindre décroît selon un gradient de température jusqu'à atteindre la température ambiante T_0 au bord du cylindre. Nous surestimons donc l'énergie E_{ch} nécessaire, ce qui nous place dans le cas le plus défavorable pour satisfaire l'hypothèse de régime établi. Nous sommes ainsi plus sereins quant à la vérification de l'hypothèse de régime établi.
Nous calculons également l'énergie E_F nécessaire pour maintenir par conduction thermique l'écart de température entre T_m et T_0, toujours sur le même intervalle de temps Δt. Nous utilisons pour cela la loi de Fourier intégrée au volume cylindrique. Nous prenons comme source de chaleur un disque de rayon $3{,}5\,a$ représentant le point de contact étendu jusqu'au bord du cylindre, et comme distance de part et d'autre de la jonction la demi hauteur $\frac{h}{2}$ du cylindre à chauffer. Nous doublons ensuite la valeur trouvée pour obtenir l'énergie nécessaire aux deux côtés du point de contact :

$$E_F = 2 \cdot \left[\lambda \cdot \frac{S}{h/2} \cdot (T_m - T_0) \cdot \Delta t\right] = 4\,\lambda \cdot \frac{S}{h} \cdot (T_m - T_0) \cdot \Delta t \qquad (7)$$

Avec E_F la quantité de chaleur nécessaire au maintien du gradient de température en J, λ la conductivité thermique du matériau chauffé en J/(m.K), S la surface du disque de rayon $3{,}5\,a$ en m², h la hauteur du cylindre chauffé en m et T_m et T_0 les températures en K.

Nous prenons ici la moyenne des conductivités thermiques de l'argent et du cuivre à 293 K, et nous calculons la température T_m au point de contact avec la formule de Kohlrausch.

Pour vérifier si nous nous trouvons en régime établi, nous comparons dans la figure 7 les évolutions temporelles de l'énergie E_J générée d'une part, et d'autre part la somme des énergies E_{ch} et E_F nécessaires respectivement au chauffage et au maintien en température du volume cylindrique.
L'énergie générée est jusqu'à $t = 3\,ms$ inférieure à la somme des énergies nécessaires au chauffage et au maintien en température du volume cylindrique, puis elle devient supérieure jusqu'à la fin de l'essai. A travers ce calcul simplifié, nous pouvons en déduire que hormis les 3 premières millisecondes, notre essai se déroule en régime permanent, comme Kohlrausch en avait fait l'hypothèse dans les conditions de validité de sa formule. Il faut néanmoins rester critique envers ce calcul qui n'est qu'une estimation pour savoir si nous satisfaisons l'hypothèse de régime permanent. En effet le choix du volume chauffé influence grandement la somme des énergies $E_{ch} + E_F$ nécessaires.

4. Caractéristique tension courant dynamique pour différentes intensités maximales du courant I_0

Pour la première série de tests, nous visualisons la caractéristique tension courant dynamique pour des intensités maximales I_0 croissantes, en gardant avant chaque essai une force de contact statique de l'ordre de 6 N. Les tests sont réalisés avec les contacts initialement "non-collés" : entre chaque essai les contacts sont séparés avant d'être remis en contact pour briser l'éventuel collage d'un précédent test.

La figure 8 est une autre représentation des courbes de tension de contact et d'intensité du courant. La figure 4 représente temporellement ces courbes tandis que la figure 8 les présente sous la forme d'une caractéristique U(I) dynamique. Cette caractéristique U(I) fait apparaitre des cycles d'hystérésis caractéristiques que l'on retrouve dans la littérature, par exemple dans les références [1] et [5]. Avec l'augmentation de I_0, la tension aux bornes des contacts est de plus en plus élevée. Avec I_0 de l'ordre de 1700 A, un palier légèrement déformé de tension égale à environ 350 mV apparait à partir de 1600 A. La présence du palier démontre la fusion des contacts. Notons que la moyenne des tensions de fusion du cuivre et de l'argent trouvée dans la littérature est de 394 mV [6]. Sur le même principe que les moyennes réalisées en section 3, nous choisissons ici la moyenne des tensions de fusion du cuivre et de l'argent. Nous avons donc ici un écart de 11 %. Cet écart peut être dû à des incertitudes de mesure. Nous avons également vu dans la section 3 que l'on pouvait en première approche considérer un échauffement en régime établi. Ce calcul simplifié peut néanmoins être complexifié, par exemple en l'élargissant à un nombre plus élevé d'essais. L'hypothèse de régime statique est donc potentiellement non vérifiée à des ordres plus importants. Une autre hypothèse de Kohlrausch n'est aussi probablement pas respectée ici : celle d'un contact purement métallique. En effet le contact est sûrement influencé par une pollution ou une couche d'oxyde se déposant au fur et à mesure des essais.

Notons que pour un cycle donné, la partie haute correspond à la phase ascendante du courant. Nous pouvons aussi remarquer que pour les faibles courants, le début de la courbe U(I) évolue linéairement. La pente correspond à la valeur de la résistance de contact à froid qui est d'environ 220 μΩ. Avec le modèle simplifié de la relation (1) présentée à la section 1, nous pouvons en déduire une valeur de rayon d'environ 70 μm en prenant comme valeur de résistivité la moyenne des résistivités du cuivre et de l'argent.

5. Caractéristique tension courant dynamique pour différentes forces de contact statiques F_c

Nous avons vu dans la formule (1) de la section 1 le modèle simplifié de la formule de la résistance de contact, i.e. $R_c = \rho/2a$. En réalité la résistance de contact dépend également de la force de contact totale F. Dans cette section nous vérifions l'influence de la force de contact sur la tension de contact.

L'application d'une force de contact F plus élevée augmente la surface effective de contact, ce qui fait décroître la résistance de contact selon la loi suivante [1] :

$$R_c = \frac{\rho}{F^{0,9}}\sqrt{\frac{\pi\xi H}{8}} + \frac{\sigma_0 \xi H}{F} \quad (8)$$

Avec ρ la résistivité des matériaux de contact en $\Omega.m$, F la force de contact en N, ξ un coefficient expérimental sans unité compris entre 0,3 et 0,75 et mal connu en général, H la dureté des matériaux en contact en Pa et σ_0 la résistivité superficielle des couches isolantes ou semi-conductrices existant à l'interface en $\Omega.m^2$ et pouvant être traversées par le courant suivant un mécanisme d'effet tunnel.

Pour un courant donné, la diminution de la résistance R_c diminue l'effet Joule, donc l'échauffement de la zone de striction. Par conséquent, cette diminution fait chuter la température et donc la tension de contact en accord avec la formule de Kohlrausch.
Notons par ailleurs que dans les produits de protection étudiés ici, la géométrie des amenées de courant implique un effet de boucle qui va exercer une force de répulsion électrodynamique sur les contacts. Ce phénomène est néfaste pour l'échauffement du point de contact car il diminue la force de contact et augmente donc la résistance de contact.

Pour vérifier l'influence de la force de contact sur la résistance de contact, et donc sur la tension de contact, nous reprenons une configuration précédente qui a mené à la fusion des contacts : pour I_0 d'environ 1700 A et une force de contact statique de l'ordre de 6 N, nous avons un palier à 350 mV. La figure 9 présente la caractéristique tension courant dynamique pour différentes valeurs de force de contact statique F_c, mais avec la même valeur I_0 de l'ordre de 1700 A. Nous constatons que pour cette intensité I_0, la tension diminue avec l'augmentation de F_c. Ce résultat est en bon accord la relation (8) et avec des résultats publiés [1], [7] et [8].

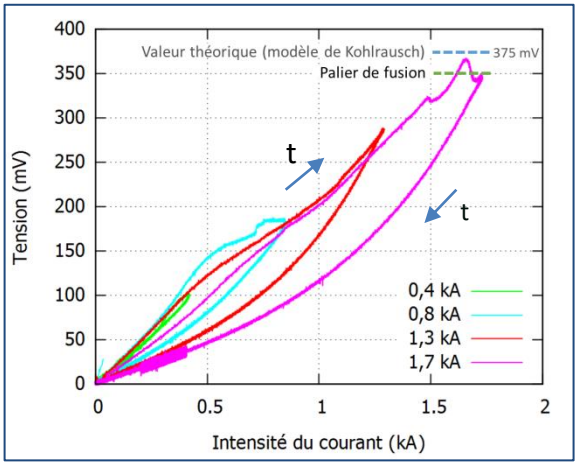

Figure 8 : Caractéristique U(I) dynamique typique pour différentes intensités maximales I_0

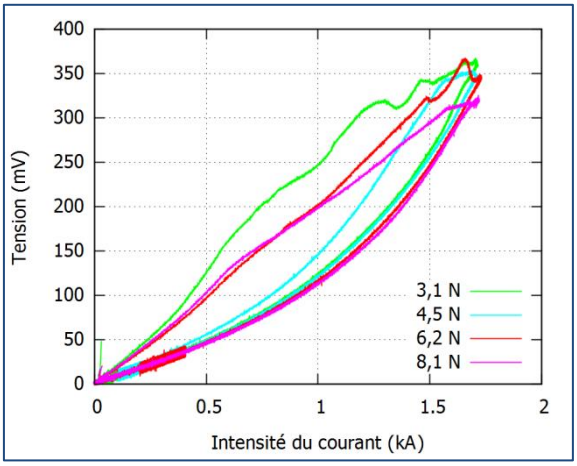

Figure 9 : Caractéristique U(I) dynamique typique pour différentes forces de contact F_c

Par ailleurs, pour les faibles forces la courbe de tension fluctue lors de la montée du courant tandis que la variation de cette tension est plus lisse quand la force est plus grande. Avec une force statique d'environ 8 N, nous observons l'absence du palier de fusion en raison de la diminution de l'échauffement expliquée par la relation (8). En effet pour une même onde de courant d'intensité maximale 1,7 kA, une force de contact statique plus élevée diminue la

résistance de contact R_c, ce qui diminue l'échauffement. Avec une force de contact statique suffisante, 8 N dans notre cas, la tension de contact n'atteint plus la tension de fusion.

6. Calcul de la tension de fusion

Dans la section 4 nous avons pris l'exemple d'une configuration de test menant à la fusion des contacts (présence d'un palier de fusion). Nous pouvons ici ajuster cette valeur en prenant en compte l'ensemble des configurations de test induisant la fusion. Nous calculons alors la moyenne sur 17 essais de la tension de fusion dont les valeurs vont de 320 mV à 375 mV :

$$U_{fusion} = 358 \pm 10\, mV$$

Pour la température moyenne de fusion du couple de matériaux testé, la formule de Kohlrausch nous donne une tension de fusion théorique de 394 mV. La tension expérimentale est moins élevée même si elle est dans le bon ordre de grandeur. La différence de 9 % peut ici également être due à des incertitudes de mesure ou à des différences entre nos conditions expérimentales et les hypothèses de validité de la formule de Kohlrausch : échauffement en régime permanent et contact purement métallique. Nous n'avons à l'heure actuelle pas assez de données expérimentales pour statuer sur l'une ou l'autre de ces éventualités.

Conclusion et perspectives

Le collage des contacts électriques est un phénomène complexe qui reste mal appréhendé à l'heure actuelle. Le but de cette étude est ainsi de concevoir et de fabriquer un banc de mesure fiable pour mesurer la tension de contact d'une paire de matériaux. L'objectif suivant est de mesurer les échauffements et de déterminer notamment les conditions d'apparition de la fusion du point de contact.

Après avoir défini la formule de Kohlrausch, nous l'avons utilisée en justifiant le régime de fonctionnement statique du montage, malgré la nature impulsionnelle de l'onde de courant générée. Plusieurs jeux de paramètres peuvent être étudiés dans notre montage. Pour la paire de contacts en cuivre revêtu d'argent face au composite argent-carbone et avec l'impulsion de courant décrite, nous avons vu que la valeur de l'intensité maximale I_0 doit atteindre environ 1700 A pour atteindre la fusion des contacts. La force de contact statique F_c joue également un rôle important et complémentaire à I_0 dans le processus d'échauffement puisqu'au-delà de 6 N, une onde de courant d'intensité maximale $I_0 \approx 1700$ A ne suffit plus pour obtenir la fusion. En effet une force de contact élevée augmente la surface de la tâche de contact, ce qui réduit la résistance de contact et par conséquent l'échauffement du point de contact. En moyennant la tension de fusion de tous les essais menant à la fusion des contacts, nous avons obtenu une tension de fusion $U_{fusion} = 358 \pm 10\, mV$. L'écart entre cette tension et la tension de fusion théorique de 394 mV peut être due à des incertitudes de mesure ou à des différences entre nos conditions expérimentales et les hypothèses de validité de la formule de Kohlrausch. En effet l'échauffement peut malgré notre calcul énergétique de première approche ne pas être assimilable à un régime établi, et le contact peut être influencé par la présence d'oxydes ou de pollution à sa surface.

L'utilisation de ce banc de mesure nous a permis dans un premier temps de valider l'ordre de grandeur de la tension de fusion théorique des contacts testés. Pour la suite de notre étude, nous allons explorer plusieurs voies :

- Augmenter la quantité de données expérimentales afin de diminuer les incertitudes de mesures, et préciser l'influence des différents paramètres expérimentaux sur la fusion des contacts.
- De plus, une des conditions d'application de la formule de Kohlrausch [9] étant d'avoir des surfaces sans influence de couches d'oxydes, il sera donc intéressant de chercher à caractériser l'état de surface des contacts afin de déterminer l'existence ou non d'une corrélation entre l'état de surface et les écarts de tension de contact obtenus.
- Nous avons également vu que la force de contact mesurée était composée de la force de contact statique F_c réglée avant chaque essai et des deux forces de répulsion électromagnétique dues à la striction des lignes de courant et à la boucle formée par les amenées de courant. Nous pourrons pour la suite caractériser la contribution de la boucle de courant qui est inhérente à notre montage actuel pour pouvoir la soustraire à nos valeurs de force de contact mesurées. Nous pourrons aussi repenser la géométrie des amenées de courant pour éviter cet effet de boucle et faciliter le traitement post-expérimental, en évitant toutefois de trop s'éloigner de la géométrie réelle des produits de protection étudiés.

Références

[1] Louis Féchant (1996), « *Le contact électrique: Phénomènes physiques et matériaux* », Hermès, ISSN: 1264-4366

[2] R.S. Timsit (1990), « *The 'melting' voltage in electrical contacts* », IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, vol. 14 , issue 2, p 285 – 292. Doi: 10.1109/33.87306

[3] A. Tslaf (1982), « *A Thermophysical Criterion for the Weldability of Electric Contact Material in a Steady-State Regime* », IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, vol. 5, issue 1, p 147 – 152. Doi: 10.1109/TCHMT.1982.1135937

[4] Paul G. Slade (1999), « *Electrical Contacts, Principles and Applications* », Taylor & Francis Group, ISBN: 978-0-8247-1934-0

[5] Ragnar Holm (1967), « *Electric Contacts* », 4th ed., Springer, ISBN: 3-540-03875-2

[6] Lucien Siffroi (1988), « *Le Contacteur électromagnétique* », ISBN: 978-2906314061

[7] S. Harada et K. Mano (1966), « *The effect of Surface Roughness on Contact Resistance* », Proc. of the Third International Research Symposium on Electric Contact Phenomena, at Orono, USA.

[8] C. Turner et H.W. Turner (1967), « *The Temperature Rise and Millivolt Drop of Contactor Contacts* », Engineering Seminar on Electric Contact Phenomena

[9] Mitsunori Sato, Masayuki Hijikata, and Ichiro Moritimo (1970), « *Influence of Temperature in the Contact Area on the Static Welding Characteristics of Electrical Contacts* », J. Jap. Inst. Metals, vol. 34, p. 1067