

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

## **Analyses des arcs produits dans un connecteur électrique soumis au fretting de longue durée**

D. Mburasek Mawidi, E. Carvou, H. Essone Obame, M. Mavuni-Nzamba



**ISSN : 2428-8500**

**DOI : 10.52497/jitipee.v9i1.382**

*Le sujet de cet article a été présenté lors du colloque sur les arcs électriques (CAE XVII)  
les 17 et 18 mars 2025 à Limoges.*

*L'article publié a fait l'objet d'une expertise indépendante par deux spécialistes du domaine.*

## **Analyses des arcs produits dans un connecteur électrique soumis au fretting de longue durée**

Daniel Mburasek Mawidi<sup>(1,3)</sup>, Erwann Carvou<sup>(1)</sup>, Hans Essone Obame<sup>(2)</sup>  
Mack Mavuni-Nzamba<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Université de Rennes, CNRS, Institut de Physique de Rennes-UMR 6251, Rennes, France

<sup>(2)</sup> Laboratoire Pluridisciplinaire des Sciences (LAPLUS) Ecole Normale Supérieure,  
Libreville, Gabon

<sup>(3)</sup> Université Nouveaux Horizons, Lubumbashi, Congo (DRC)  
[daniel.mburasek@univ-rennes.fr](mailto:daniel.mburasek@univ-rennes.fr)

**Résumé** – Cet article présente les résultats expérimentaux de l'influence conjointe des paramètres électriques (tension et courant) et vibratoires (amplitude et accélération) sur la dégradation d'un connecteur électrique pour automobile soumis au fretting de longue durée. Les paramètres suivants des tests ont été modifiés : la tension de 5V à 16V, le courant de 1A à 16A, l'amplitude de 400µm à 800µm et la fréquence a été maintenue à 50Hz. Les terminaux sont en alliage de cuivre et recouverts d'une couche d'étain de 1 µm d'épaisseur. Un oscilloscope digital et une caméra rapide ont permis de capturer respectivement les fluctuations de la tension et les mouvements des terminaux au point de contact. La dégradation des terminaux a été évaluée par la mesure de la résistance électrique de contact. Les résultats montrent que les séparations intermittentes entre la languette et le clip, dues aux rebonds et à la présence d'oxydes, pourraient être les causes de la production d'arcs électriques à l'interface de contact, et le temps d'apparition des arcs diminue lorsque l'amplitude des vibrations imposée augmente. Il a été également démontré que la grande quantité de chaleur produite par les arcs était à l'origine de la perforation de la languette et de la carbonisation des terminaux.

**Mots clés** : Arcs électriques, carbonisation, connecteur électrique, fretting-corrosion, perforation,

**DOI :** 10.52497/jitipee.v9i1.382

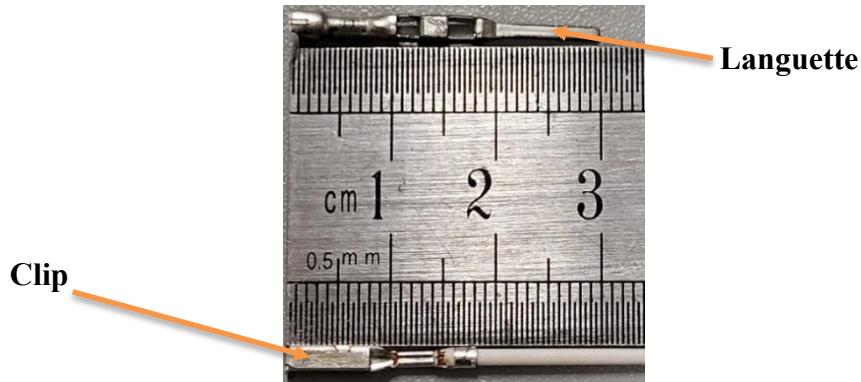
## **Introduction**

Cinquante pour cent (50%) des pannes dans un véhicule automobile proviennent des composants électroniques, dont quinze pour cent (15%) sont dues aux problèmes liés aux contacts électriques [1], [2]. Les vibrations et les variations de température sont connues comme les causes principales de la dégradation des contacts électriques. Ces sollicitations induisent des micro-déplacements entre la languette (partie mâle) et le clip (partie femelle) à l'interface des contacts. Pour un revêtement non noble (e.g. Sn), en raison du frottement, les débris d'usure résultants réagissent avec l'oxygène pour former des oxydes isolants. Ces oxydes, s'interposant à l'interface de la languette et du clip, augmentent la résistance électrique de contact (REC) et conduisent à la défaillance des contacts par le mécanisme de fretting-corrosion. Pour une détérioration très avancée des contacts, des arcs électriques peuvent apparaître dans la zone de contact et entraîner la carbonisation des terminaux. Cependant, l'origine et les conditions d'amorçage des arcs dans les connecteurs électriques pour automobile ne sont pas bien connues. Chen et al. [3] ont passé en revue et ont résumé le mécanisme de transfert de matière dû à la formation d'arcs dans les contacts électriques. De plus, ils ont souligné que la composition des matériaux de contact, les paramètres du circuit électrique, les températures des électrodes et les gaz environnants sont les principaux facteurs qui influencent le transfert de matière. Ces auteurs ont également montré que la présence de carbone à la surface de contact favorise la production d'arcs en raison du faible travail de sortie des électrons dans ce matériau. Cette accumulation d'oxydes et de carbone provient de l'érosion de contact et des composés organiques volatils [3] [4]. La présence d'oxydes à l'interface de contact réduit significativement la conductivité électrique et influence les fluctuations de la tension de constriction, qui augmente avec la dégradation de l'état de surface [5] pour se stabiliser autour de 400 mV, correspondant à la tension de fusion du substrat de cuivre [6]. L'influence de la tension d'alimentation et du courant électrique sur l'apparition des arcs dans les connecteurs électriques pour automobile est déjà documentée dans la littérature [5], [6]. Cependant, l'influence de l'amplitude des vibrations couplées au courant nominal des terminaux n'est pas suffisamment étudiée [6], [7]. L'objectif principal de cette étude est d'examiner conjointement l'influence de l'amplitude des vibrations, du niveau de tension et du courant électrique sur l'apparition des arcs électriques dans un connecteur pour automobile, qui conduisent à leur défaillance par carbonisation.

## **1. Description expérimentale**

### **1.1. Matériaux et caractéristiques des terminaux**

Les terminaux étudiés sont illustrés sur la figure 1. Ils sont composés de la partie mâle (languette) et de la partie femelle (clip). Le substrat est en alliage de cuivre recouvert d'une couche d'étain de 1 µm d'épaisseur.

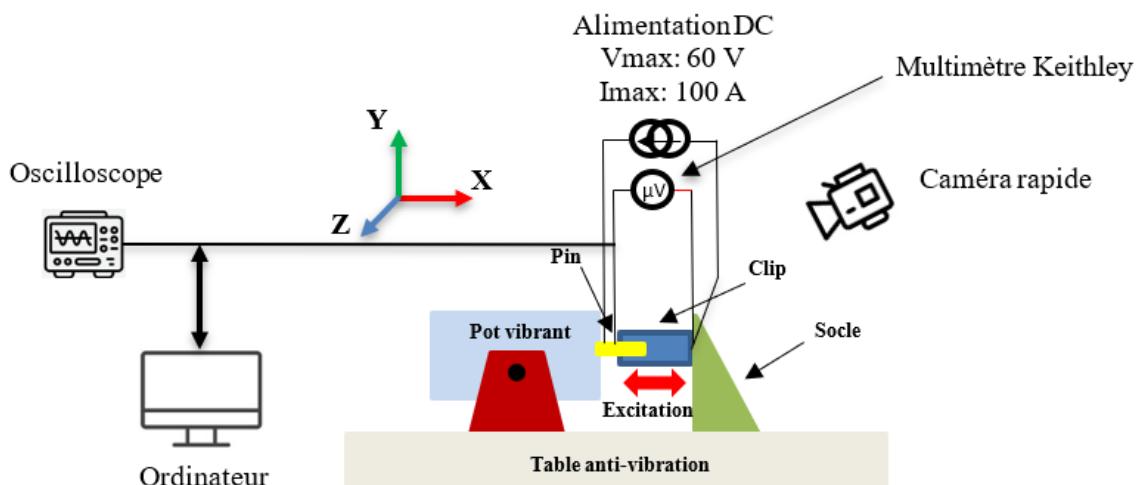


**Figure 1:** Languette et clip

## 1.2. Montage et mesures

### a) Montage sur pot vibrant

La languette est montée directement sur le pot vibrant, permettant de générer le mouvement oscillatoire de vibration, tandis que le clip est fixé sur le bâti (Fig. 2). Le pot vibrant électrodynamique LDS V555 peut générer une amplitude maximale de 2500 µm (pk-pk) et une accélération à vide de 100 G. Les mouvements de vibration sont imposés uniquement dans la direction X (sens insertion/extraction des terminaux). Les terminaux assemblés sont alimentés par une alimentation à courant continu programmable XANTREX XDC 60-100.



**Figure 2 :** Banc de test

### b) Mesure de la tension et du courant

Un multimètre Keithley 2000, dont la précision sur la tension est de 0,002% pour la plage de 0-20 VDC, mesure en continu la tension de contact aux bornes des terminaux à une fréquence 50 mesures par seconde pour une résolution à 6,5 digits. La résistance électrique de contact (REC) est déduite en divisant la tension mesurée par l'intensité du courant. L'augmentation de la REC avec le nombre de cycles de vibrations permet d'évaluer la performance électrique des contacts. En effet, une REC très élevée peut engendrer une perte du signal dans les contacts de

basse puissance, ou une augmentation significative de la température par effet Joule dans les contacts de puissance. La tension sur la piste de fretting est mesurée par un oscilloscope numérique de marque *Tektronix DPO 5104*. L'intensité du courant qui traverse les terminaux est mesurée par une sonde de courant *Tektronix TCP0150*. Les paramètres de l'oscilloscope sont présentés dans le tableau 1. La tension de déclenchement de l'oscilloscope pour capturer un arc est réglée à 10,8 V, car les arcs se produisent généralement pour des tensions et courants supérieurs à 10 V et 300 mA respectivement. Le mode moyen (average) est activé afin de réduire les bruits de mesure.

Tension à observer	Mode	Vitesse d'échantillonnage	Déclenchement
Arcs	Sample	125 MS/s	10.8 V
Tension de contact	Average :16	2.0 MS/s	-

**Tableau 1 :** Paramètres de l'oscilloscope

c) *Mesure du déplacement et de la température*

L'amplitude de déplacement du pot vibrant est mesurée sur une période vibratoire (20 ms) à l'aide d'un accéléromètre connecté à l'oscilloscope décrit ci-dessus. Un thermocouple standard de type K, placé au plus près du point de contact, permet de mesurer la température des terminaux en continu durant le test à une fréquence d'une mesure par seconde. Un programme *Labview* permet de collecter simultanément la tension de contact, l'intensité du courant, le déplacement et la température des terminaux.

### 1.3. Conditions de test

Les conditions des tests expérimentaux sont présentées dans le tableau 2. Trois niveaux de vibrations ont été choisis dans le but d'accélérer la dégradation tout en restant dans les limites de contrainte admissibles pour le bon fonctionnement des terminaux. Parallèlement, les niveaux de tension et de courant ont été sélectionnés afin de les comparer aux conditions réelles de fonctionnement (16V-10A).

Conditions	Paramètres électriques	Paramètres vibratoires
<b>Essai n° 1</b>	16V-1A 16V-10A 5V-10A	400 µm (pk-pk), 50 Hz, 2 G
<b>Essai n° 2</b>	16V-10A	400 µm (pk-pk), 50 Hz, 2 G 600 µm (pk-pk), 50 Hz, 3 G 800 µm (pk-pk), 50 Hz, 4 G

**Tableau 2 :** Paramètres utilisées durant les tests

La relation entre l'amplitude  $A_m$  ( $pk$ ), la fréquence  $f$  et l'accélération  $\gamma$  d'un signal sinusoïdal à fréquence et à amplitude fixe est donnée par la relation :

$$\gamma = 4\pi^2 f^2 A_m \quad (1)$$

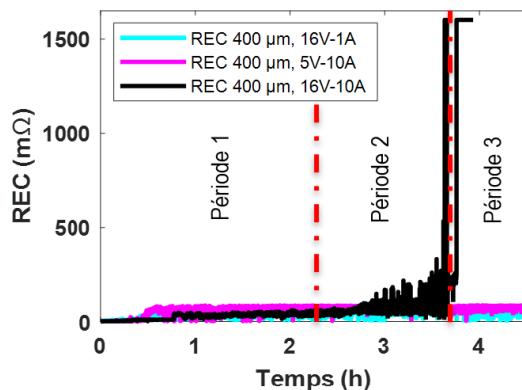
Ainsi, connaissant deux paramètres, le troisième peut être déduit aisément.

## 2. Résultats

### 2.1. Tension et courant variables et amplitude de vibration fixe

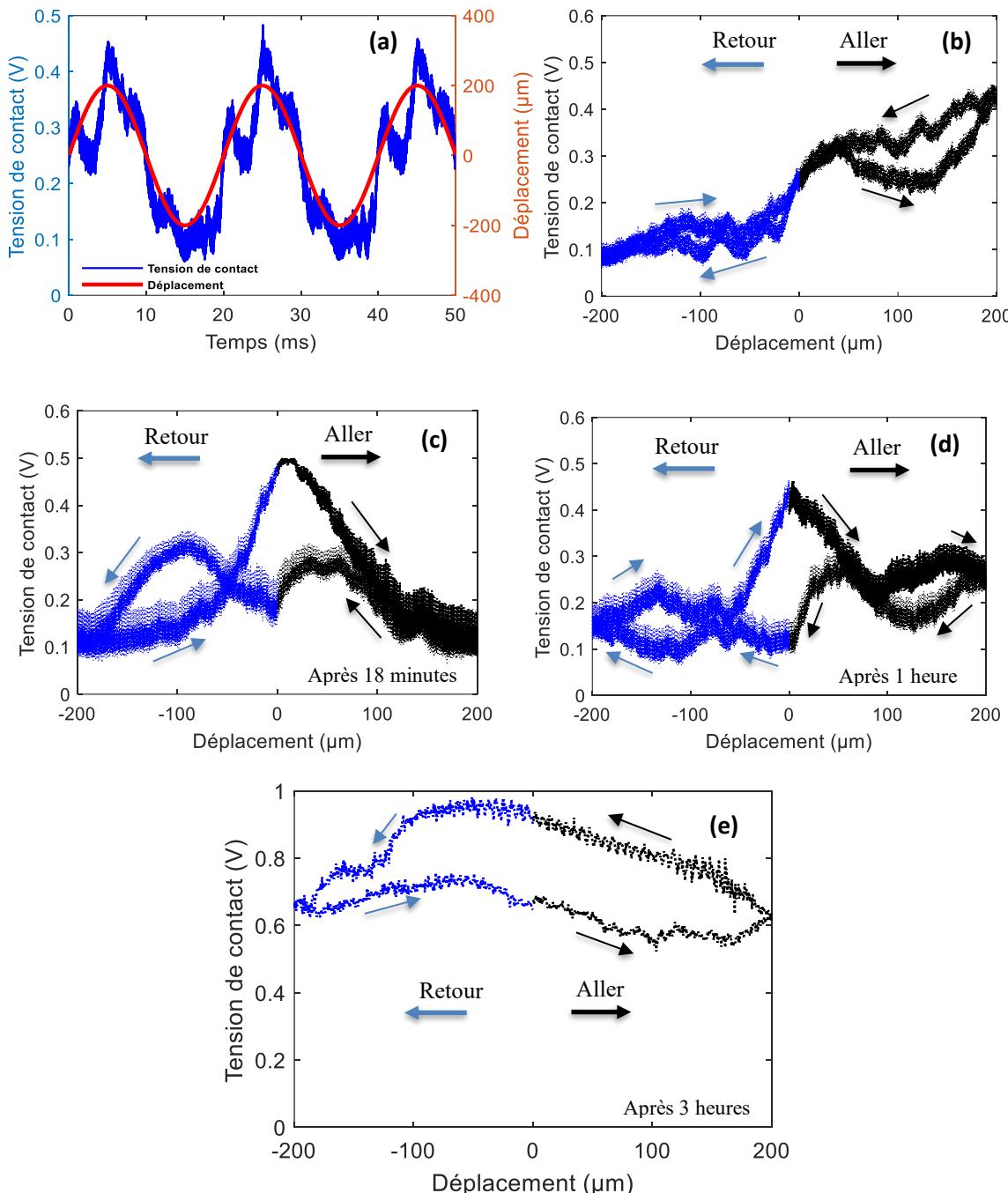
La figure 3 représente l'évolution de la résistance électrique de contact (REC) en fonction du temps. L'essai n°1 a été réalisé sur trois terminaux neufs pendant une durée de 4 heures et 30 minutes. Nous pouvons constater que pour le couple (16V-1A, 400  $\mu$ m), la REC est restée très faible et stable durant le test, autour de 80 m $\Omega$ . Seules des décharges ont été observées à l'oscilloscope pour cette condition de test. Ces décharges se distinguent par une faible émission d'électrons de la cathode, ce qui est insuffisant pour maintenir le plasma d'arc [8]. Pour le couple (5V-10A, 400  $\mu$ m), la REC est restée stable pendant environ 35 minutes, puis elle a soudainement augmenté pour se stabiliser autour de 110 m $\Omega$ . Bien que des arcs ne soient pas apparus pour cette condition de test, des décharges ont néanmoins été capturées par l'oscilloscope. Ces décharges sont des pics de tension de très courte durée et d'une amplitude d'environ 12V, dont l'origine peut être due à l'inductance de la source d'alimentation. Leur énergie est trop faible pour amener les matériaux en fusion. Cependant, leurs apparitions successives peuvent augmenter la température dans la zone de contact à la suite de la chaleur générée. Enfin, pour le couple (16V-10A, 400  $\mu$ m), nous pouvons observer trois périodes :

1. La première période est celle où se produit la dégradation due à l'usure par abrasion. La REC reste faible parce que la conduction est assurée par des spots de conduction présents sur la piste de fretting.
2. La deuxième période correspond à la période où le substrat est atteint et où des décharges suivies d'arcs électriques apparaissent, la tension de constriction atteignant environ 400 mV.
3. La troisième période correspond à une production importante d'arcs, suivie de la carbonisation et de la fusion des terminaux.



**Figure 3 :** Evolution des résistances électriques de contact (REC) en fonction du temps pour une sollicitation vibratoire de 400  $\mu$ m, 50 Hz, 2G et pour les paramètres électriques suivants (16V-10A), (5V-10A) et (16V-1A) pour une durée de 4 heures et 30 minutes.

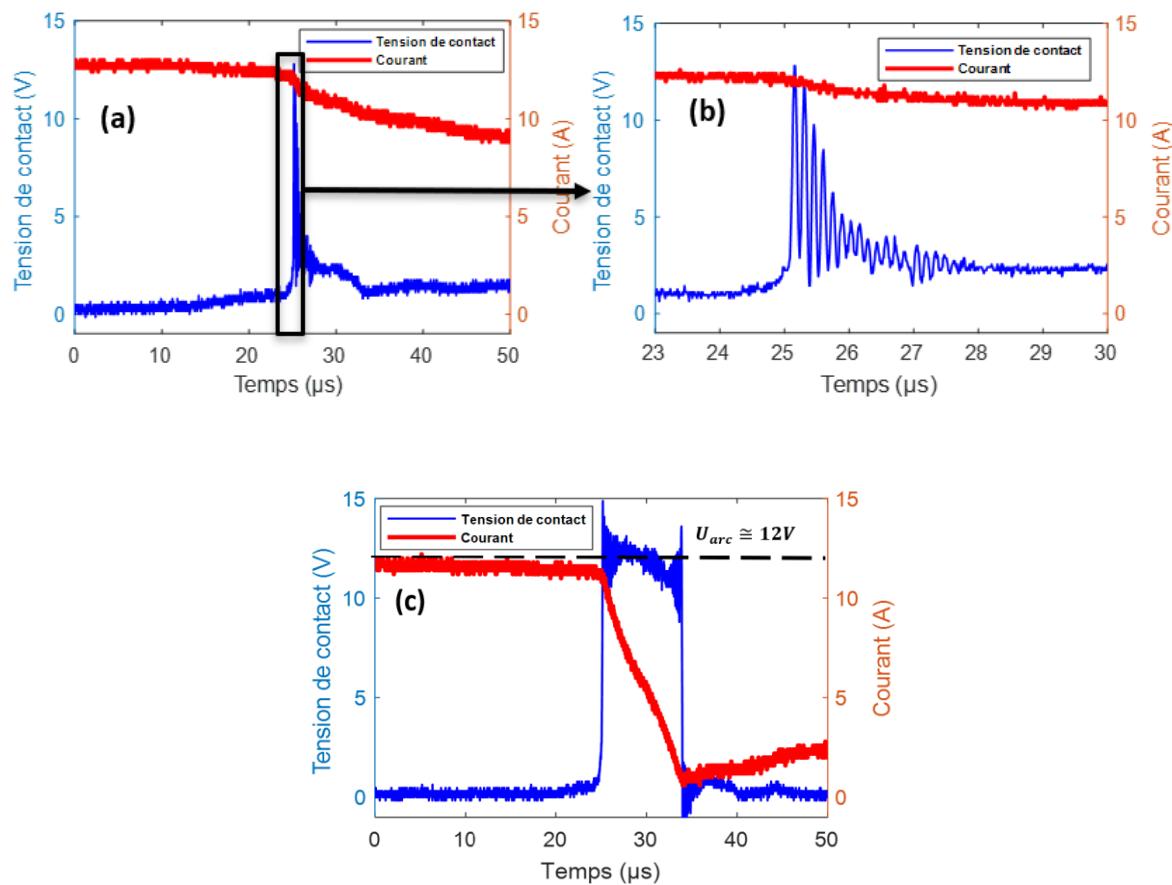
La figure 4 présente les fluctuations de tension sur la piste de fretting. Plus précisément, la variation de la tension au cours du temps sur deux périodes et demie est illustrée sur la figure 4.a. Nous pouvons observer que la tension évolue dans le même sens que le déplacement et se répète à la même période que celui-ci. Les fluctuations de tensions en fonction de la position lors d'un aller-retour (insertion/extraction) sont présentées sur les figures 4 b-e. On observe qu'au début, la tension est très faible, puis elle augmente au fur et à mesure que la couche de revêtement s'use.



**Figure 4 :** Evolution de la tension sur la piste de fretting et du déplacement pour une sollicitation de 16V-10A, 400 μm, 50 Hz : (a) tension et déplacement en fonction du temps, (b) tension de (a) en fonction de la position, (c) tension vs position après 18 min, (d) tension vs position après 1 heure et (e) tension vs position après 3 heures.

La figure 4 met en évidence les fluctuations de tension en fonction de la position, qui peuvent varier selon l'état de dégradation des surfaces. Celles-ci sont influencées par les transitions de phase et les variations des propriétés tribologiques des surfaces en contact. Dans le cas de fusion du métal, ces fluctuations peuvent atteindre jusqu'à 800 mV (Fig. 4.e.).

La figure 5 illustre l'évolution de la tension aux bornes des terminaux ainsi que le courant qui les traverse lors de l'apparition des décharges et des arcs électriques dans la zone de contact. Des décharges de très courte durée et de courant presque constant sont observées. Bien que la tension de ces décharges puisse atteindre celle de l'arc (12 V), elles ne constituent pas des arcs électriques. Elles résultent de l'influence de l'inductance de la bobine de la source d'alimentation (Fig. 5.a et b). En ce qui concerne l'apparition de l'arc (Fig. 5.c), elle se caractérise par une augmentation soudaine de la tension qui se stabilise pour une courte durée autour de 12 V (tension d'arc) et une diminution du courant tendant vers zéro due à l'augmentation de la distance entre languette et clip. Ce comportement, malgré la tension constante, semble être similaire aux arcs observés pendant les opérations d'ouverture des contacts. Ces ouvertures pourraient être dues aux rebonds entre la languette et le clip, ou à la présence d'oxydes formés à l'interface de contact.

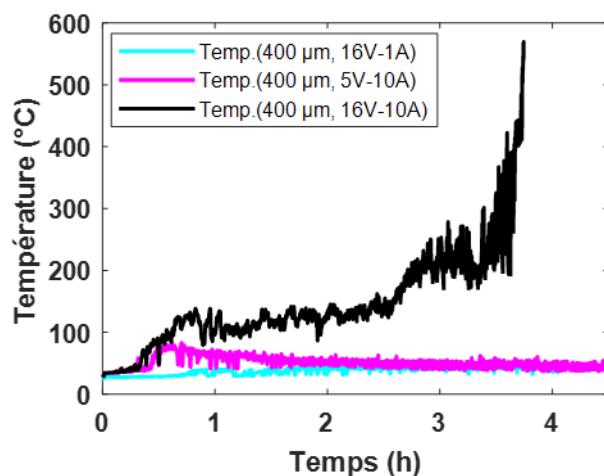


**Figure 5 :** Evolution de la tension et courant pendant l'apparition des décharges et de la trace d'arc :

- (a) décharge dans la zone de contact pour 5V-10A, 400 μm,
- (b) agrandissement de la figure (a) sur un court intervalle de temps,
- (c) tension et courant pendant l'apparition de la trace d'arc 16V-10A, 400 μm.

## 2.2. Température au point de contact

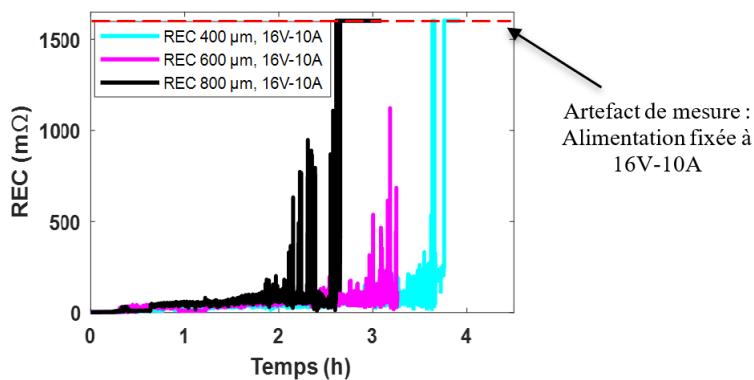
La figure 6 illustre l'évolution de la température au point de contact en fonction du temps. Initialement, la température augmente en raison du frottement entre les deux surfaces, puis elle diminue légèrement. Ce comportement s'explique par l'augmentation du coefficient de friction, conséquence du collage adhésif initial entre la languette et le clip [9]. Une fois le troisième corps formé par les débris d'usure entre la languette et le clip, le régime permanent s'établi, le coefficient de friction se stabilise, ce qui stabilise également la température [10]. Pour la même amplitude de déplacement imposée, la température au point de contact dépend du courant de la source d'alimentation (Fig. 6). En effet, l'effet Joule résultant du chauffage résistif prédomine sur la chaleur générée par le frottement.



**Figure 6 :** Evolution de la température en fonction du temps au point de contact pendant le test de fretting pour les conditions suivantes : (5V-10A, 400 μm), (16V-1A, 400 μm) et (16V-10A, 400 μm).

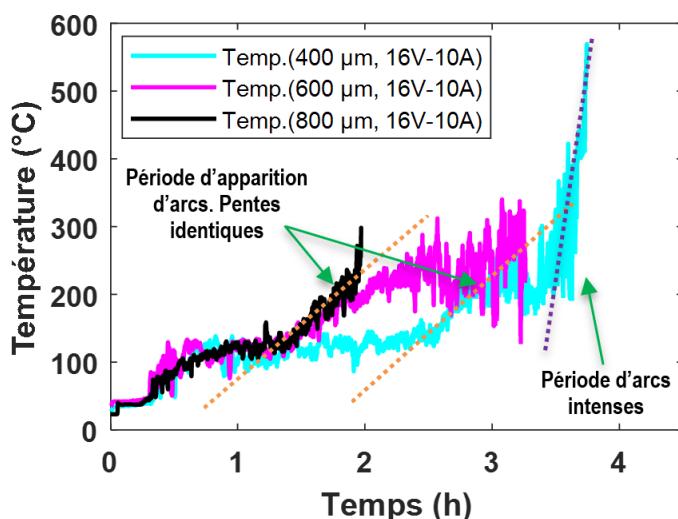
## 2.3. Tension et courant fixes, amplitude de vibration variable

Dans cette partie, les paramètres de la source d'alimentation sont maintenus fixes (16V-10A), l'amplitude de déplacement varient de 400 μm à 800 μm et la fréquence est maintenue à 50 Hz. Nous avons choisi d'augmenter progressivement le déplacement car le vieillissement des composants du connecteur entraîne l'augmentation des déplacements relatifs dans la zone de contact [11]. On peut observer sur la figure 7 que la dégradation arrive rapidement avec l'augmentation de l'amplitude des vibrations, ceci ayant été aussi rapporté par Kloch et al [12]. Cependant, lorsque les déplacements sont combinés avec les paramètres électriques nominaux (tension et courant), la dégradation est plus rapide et beaucoup plus sévère en comparaison à une situation où le courant est inférieur au courant nominal (e.g. le cas de 16V-10A). Cette dégradation entraîne la production d'arcs, la carbonisation et la perforation des terminaux. Ce type de dégradations est encore peu documentées dans la littérature. Dans une étude similaire, Carvou et al. [6] ont suggéré de tenir compte des paramètres nominaux des terminaux pendant les essais d'endurance des connecteurs électriques afin de ne pas dissimuler certaines dégradations. L'évolution de la tension sur la piste de fretting est similaire à celle présentée à la figure 4. La seule différence est qu'avec ces conditions de test, l'évolution de la tension avec le temps est très rapide.



**Figure 7 :** Evolution de la résistance électrique de contact pour trois conditions de tests respectivement 400 µm, 600 µm et 800 µm à 50 Hz.

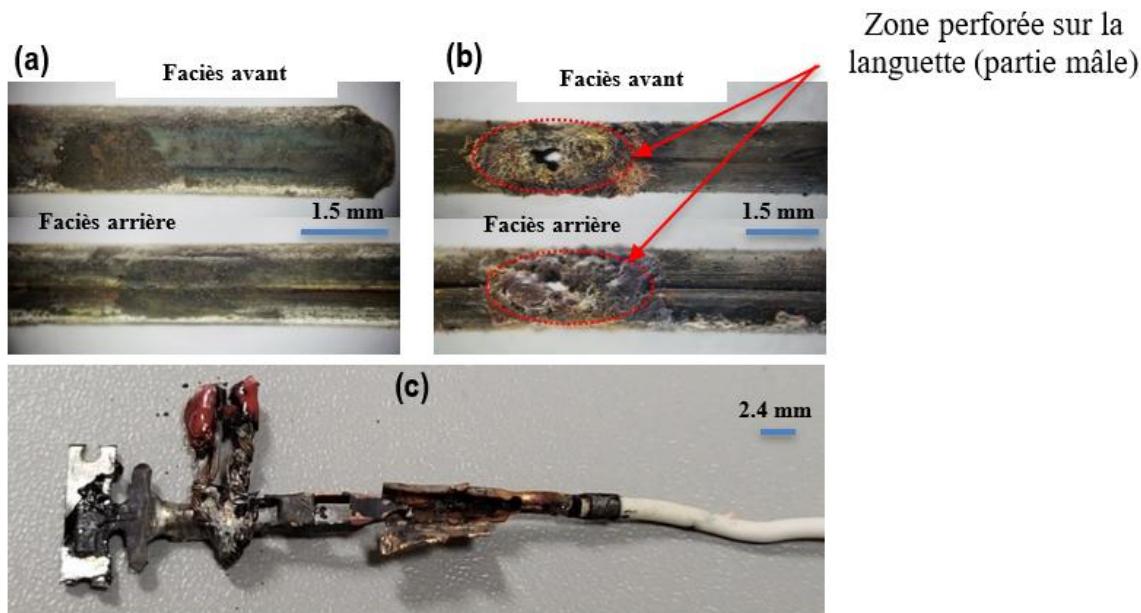
Les températures au plus près du point de contact, présentées à la figure 8, montrent qu'entre 0,5 heures et 1,5 heures, période de régime permanent, toutes les températures sont similaires et ce malgré les différentes amplitudes de vibration. Cela s'explique par le fait que la chaleur dans la zone de contact provient principalement de l'échauffement résistif, résultant de l'intensité du courant et de la résistance de confection, et que l'amplitude des vibrations n'a pas d'influence majeure sur la chaleur due au frottement. Lorsque les premiers arcs apparaissent, le changement dynamique de la résistance de confection devient considérable, et les températures augmentent avec des pentes approximativement identiques à 3,2 °C/min. Cela peut être expliqué par le fait que la même intensité du courant est imposée dans tous les cas. Pendant la phase d'arcs intenses, le taux d'accroissement de la température devient de plus en plus élevé, atteignant 25,6 °C/min, ce qui conduit à la carbonisation des terminaux.



**Figure 8 :** Température au point de contact pour tension et courant constants et amplitudes variables

## 2.4. Etats des terminaux après dégradation

La figure 9 montre l'état des terminaux après sollicitation au fretting du couple (16V-1A, 400 µm), (16V-10A, 400 µm) et (16V-10A, 800 µm). On peut voir sur la figure 9.a que le substrat en cuivre a été découvert sur la face avant et des débris d'usures sont observés sur les deux faces (avant et arrière). Tandis que sur la figure 9.b, on observe la fusion du métal ainsi que la perforation de la languette sur les deux faces, constituées d'une tôle de 0,25 mm d'épaisseur pliée en deux. Cette perforation est due à la haute température dégagée par les arcs. Comme illustré sur la figure 9.c, les terminaux présentent des signes de carbonisation tandis que le câble reste intact. Cela souligne que la croissance de la REC et la quantité de chaleur dégagée à l'interface sont responsables de la carbonisation.



**Figure 9 :** Etats des surfaces des terminaux, après sollicitation de 4h30', capturés avec un mini microscope APEXEL : (a) état des surfaces de la languette pour une sollicitation de 16V-1A, 400 µm ; (b) état des surfaces de la languette pour une sollicitation de 16V-10A, 400 µm ; (c) languette sectionnée et clip ouvert pour une sollicitation de 16V-10A, 800 µm

## Discussion

Les fluctuations de la tension sur la piste de frottement varient en fonction de la position. On s'attendait à observer une forme similaire dans le sens d'insertion et d'extraction. Cependant, des fluctuations inattendues ont été observées (Fig. 4.c, 4.d et 4.e). Celles-ci peuvent être dues, d'une part, aux transitions lors du passage de la tension de ramollissement à la tension de fusion ou de la tension de fusion à la tension de sublimation des matériaux, et d'autre part, à la présence des débris d'usures et d'oxydes sur la piste de fretting.

La température dans la zone de contact est le résultat simultané des cycles thermiques environnementaux, du frottement et de l'effet Joule (chauffage résistif et éventuellement arcs électriques). Il a été observé que le chauffage dû au frottement ne contribuait pas de manière significative à la production de chaleur dans la zone de contact, ce qui a également été souligné par [13]. Cela est évident, car le mouvement relatif dans la zone de contact est généralement très faible, de l'ordre du micron, et la chaleur dégagée, proportionnelle à la vitesse résultante, est également faible.

Bien qu'aucun arc n'ait été observé pour les conditions (16V-1A et 5V-10A), des décharges ont cependant été observées à l'oscilloscope. Pour que les arcs apparaissent, la tension imposée à la source d'alimentation doit être supérieure ou égale à 12V et le courant supérieur à 1A, indépendamment de l'amplitude des déplacements dans la zone de contact.

L'apparition des arcs à l'interface de contact correspond à l'état de dégradation le plus important, car la chaleur dégagée dans la zone de contact est plus importante, ce qui peut amener les terminaux à la fusion, à la perforation et à la carbonisation.

## Conclusion

Cette étude portait sur l'analyse d'apparition des arcs électriques dans un connecteur électrique pour automobile. Les paramètres de la source d'alimentation (tension et courant) et vibratoires (amplitude et fréquence) ont été choisies afin de permettre l'éventuel apparition des arcs électriques à l'interface de contact. Les principales conclusions se résument comme suit :

- La forme de la tension et du courant lors de l'apparition de l'arc montre que les ouvertures brèves entre la languette et le clip semblent être les causes principales des arcs. Ces ouvertures résultent soit des rebonds, soit de la présence d'oxydes à l'interface de contact.
- Lorsque les conditions électriques sont réunies ( $U > 12V$  et  $I > 1A$ ), les arcs apparaissent quel que soit l'amplitude du mouvement.
- L'amplitude des vibrations, combinée au courant nominal du connecteur, accélère la dégradation des terminaux électriques.
- La présence des arcs dans le connecteur est à l'origine de la fusion, de la perforation et de la carbonisation des terminaux qui peuvent entraîner jusqu'au sectionnement de la languette.

## Références

- [1] F. Pompanon, (2019) "Etude de l'endurance électrique de micro-contacts soumis à des sollicitations de fretting-usure : influence des paramètres environnementaux", PhD thesis, Université de Lyon.  
<https://theses.hal.science/tel-02870027/>
- [2] J. Swingler, J. W. McBride, et C. Maul, (2000) "Degradation of road-tested automotive connectors", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, vol. 23, no 1, p. 157-164.  
<https://doi.org/10.1109/6144.833055>
- [3] Z.-K. Chen et K. Sawa, (1996) "Effect of arc behavior on material transfer: a review", in Electrical Contacts - 1996. Proceedings of the Forty-Second IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Joint with the 18th International Conference on Electrical Contacts, p. 238-251.  
<https://doi.org/10.1109/HOLM.1996.557203>
- [4] C. H. Leung et A. Lee, (1991) "Electric contact materials and their erosion in automotive DC relays", in Electrical Contacts - 1991 Proceedings of the Thirty-Seventh IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts, p. 114-121.  
<https://doi.org/10.1109/HOLM.1991.170811>
- [5] S. E. Mossouess et al., (2014) "Analysis of temporal and spatial contact voltage fluctuation during fretting in automotive connectors", in ICEC 2014; The 27th International Conference on Electrical Contacts, p. 1-5.  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6857164/>

- [6] E. Carvou et N. Ben Jemaa, (2009) "Statistical Study of Voltage Fluctuations in Power Connectors During Fretting Vibration", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, vol. 32, no 2, p. 268-272.  
<https://doi.org/10.1109/TCAPT.2009.2019633>
- [7] W. Ren, P. Wang, J. Song, et G. Zhai, (2014) "Effects of current load on wear and fretting corrosion of gold-plated electrical contacts", Tribology International, vol. 70, p. 75-82.  
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.09.024>
- [8] A. Anders, (2024) "Glows, arcs, ohmic discharges: An electrode-centered review on discharge modes and the transitions between them", Applied Physics Reviews, vol. 11, no 3, p. 031310.  
<https://doi.org/10.1063/5.0205274>
- [9] R. Rybiak, S. Fouvry, et B. Bonnet, (2010) "Fretting wear of stainless steels under variable temperature conditions: introduction of a composite wear law", Wear, vol. 268, no 3-4, p. 413-423.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.08.029>
- [10] P. L. Hurricks, (1970) "The mechanism of fretting — A review", Wear, vol. 15, no 6, p. 389-409.,  
[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(70\)90235-8](https://doi.org/10.1016/0043-1648(70)90235-8)
- [11] K. T. Kloch, P. Kozak, et A. Mlyniec, (2021) "A review and perspectives on predicting the performance and durability of electrical contacts in automotive applications", Engineering Failure Analysis, vol. 121, p. 105143.  
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105143>
- [12] T. Ito, M. Matsushima, K. Takata, et Y. Hattori, (2007) "Factors Influencing the Fretting Corrosion of Tin Plated Contacts", IEICE TRANSACTIONS on Electronics, vol. E90-C, no 7, p. 1412-1416.  
<https://doi.org/10.1093/ietele/e90-c.7.1412>
- [13] F. Shen et L.-L. Ke, (2021) "Numerical Study of Coupled Electrical-Thermal-Mechanical-Wear Behavior in Electrical Contacts", Metals, vol. 11, no 6, Art. n° 6.  
<https://doi.org/10.3390/met11060955>