

ETUDE DE L'ENDOMMAGEMENT

Etude de l'endommagement

3.1. Objectif et méthodologie	58
3.2. Endommagement des contacts de disjoncteurs	59
3.2.1. Dispositif utilisé	59
3.2.2. Microstructure des contacts avant essai	61
3.2.3. Effet des arcs électriques sur la microstructure des contacts	63
3.2.4. Estimation de l'endommagement	69
3.2.5. Evolution de la température au cours d'un essai	71
3.3. Endommagement des contacts de contacteurs	73
3.3.1. Dispositif utilisé	73
3.3.2. Microstructure des contacts avant essai	74
3.3.3. Effet des arcs électriques sur la microstructure des contacts	75
3.3.4. Indicateur de l'endommagement	84
3.3.5. Evolution de la température au cours d'un essai	90
3.5 Conclusion	93

Table des illustrations

Photographie 3.1. Machine d'essai électrique M2 (équipe I2EA).....	59
Figure 3.2. Implantation des contacts sur la machine « M2 »	60
Figure 3.3. Chronogramme de la fermeture des contacts électriques avec la machine « M2 ».....	60
Figure 3.4. Chronogramme d'une ouverture des contacts électriques suivi d'un rebond contrôlé	61
Figure 3.5. Géométrie des contacts électriques testés dans la machine M2	61
Micrographies MEB 3.6 et 3.7. Etat de surface d'un contact en Ag-C n'ayant pas subi d'essai.....	62
Micrographie optique 3.8. Microstructure d'un contact en Ag-C n'ayant pas subi d'essai	62
Micrographie MEB 3.9. Etat de surface d'un contact en Ag-WC n'ayant pas subi d'essai	63
Micrographie MEB 3.10. Etat de surface du contact fixe en Ag-C après 1 arc électrique	63
Micrographies MEB 3.11 et 3.12. Etat de surface du contact mobile en Ag-WC après 1 arc électrique	64
Micrographies MEB 3.13 à 3.16. Surface des contacts fixes Ag-C à différents nombres de manœuvres	65
Micrographie MEB 3.17. Mise en évidence du dégazage de l'argent lors du refroidissement d'un contact fixe Ag-C	66
Micrographie optique 3.18. Section transverse d'une goutte d'argent fondue et attaquée.....	66
Micrographies optiques 3.19 à 3.24. Evolution de la microstructure des contacts fixe en Ag-C à différents nombres de manœuvres.....	67
Micrographies optiques 3.25 à 3.28. Evolution de la microstructure des contacts mobiles en Ag-WC ayant subi différents nombres de manœuvres	68
Micrographie optique 3.29. Fissure de fatigue sur un contact mobile Ag-WC ayant subi 10 000 manœuvres	69
Figure 3.30. Evolution de l'écrasement des contacts au cours d'un essai.....	70
Figure 3.31. Evolution de l'érosion des contacts au cours d'un essai	70
Radiographie X 3.32. Contact mobile.	71
Figure 3.33. Evolution de la température dans le support du contact électrique pendant un essai ouverture, fermeture et rebond	71
Figure 3.34. Chronogramme du déplacement, du courant et de la tension sur « locomotive » de l'équipe I2EA. Essai « ouverture 300A ».....	73
Figure 3.35. Schéma de principe de la machine « Locomotive »	74
Micrographie optique 3.36. Microstructure d'un contact en Ag-SnO ₂ avant essai électrique.....	75
Figure 3.37. Profil rugosimétrique 3D d'un cratère d'impact d'un arc sur un contact en Ag-SnO ₂	75
Figure 3.38. Profil rugosimétrique 3D du contact opposé à celui de la figure 3.10	76
Micrographie MEB 3.39. Zone d'impact de l'arc (énergie 41 Joules).....	76

Micrographies MEB 3.40 et 3.41. Micrographie et microanalyse de la surface d'un contact en Ag-SnO ₂	77
Micrographie optique 3.42. Zone affectée après un arc de 24 Joules.....	77
Micrographie optique 3.43. Surface d'un contact en Ag-SnO ₂ ayant subi 40 000 manœuvres sans arc	78
Micrographies optiques 3.44 à 3.47. Microstructure de contacts en Ag-SnO ₂ à divers nombres de manœuvres	79
Micrographie 3.48. Section parallèle à la surface pour un contact ayant subi 20 000 manœuvres	80
Micrographie optique 3.49. Section transverse d'un contact électrique ayant subi un essai AC4	81
Figure 3.50. Evolution de la résistance de contact au cours d'un essai, valeur moyenne et valeur instantannée – Ag-SnO ₂ 12%	82
Figure 3.51. Evolution de l'usure de contacts avec le nombre de manœuvres – Ag-SnO ₂ 12%	83
Figure 3.52. Comparaison de l'usure sur la machine "Locomotive" pour des contacts en Ag-C et en Ag-SnO ₂	83
Figure 3.53. Evolution avec le nombre de manœuvres de la perte de masse – Ag-SnO ₂ 12%	84
Figure 3.54. Représentation des surfaces utilisées dans le calcul du dommage microstructural.....	86
Figure 3.55. Evolution du dommage massique, du dommage d'usure et du dommage microstructural en fonction du nombre de manœuvres au cours d'un essai « Locomotive »	86
Figure 3.56. Evolution du nombre de fissures en fonction du nombre de manœuvres et de la classe de longueur considérée.....	87
Figure 3.57. Evolution de la longueur moyenne du ligament en fonction du nombre de manœuvres .	88
Figure 3.58. Définition de h_{local} et h_{mini}	88
Figure 3.59. Evolution du critère de dommage D_{fiss} et du nombre de fissures au cours d'un essai « Locomotive »	89
Photographie 3.60. B-scan d'un contact en Ag-SnO ₂ ayant subi 3 000 manœuvres	90
Figure 3.61. Implantation du thermocouple	90
Figures 3.62. Evolution de la température du contact en Ag-SnO ₂ en cours d'essai	91

3.1. Objectif et méthodologie

La tendance actuelle orientée vers un accroissement du nombre de manœuvres en service pour les disjoncteurs et les contacteurs conduit à accorder aujourd'hui une plus grande importance aux problèmes d'endommagement des contacts. Ces problèmes proviennent essentiellement de l'apport d'énergie thermique dû à l'arc électrique sur les contacts. Ceci conduit à une modification des propriétés de la surface et de la couche sous-jacente et à une altération de la structure du contact électrique. Nous allons donc étudier l'importance des problèmes de vieillissement.

Le protocole expérimental peut être décrit de la manière suivante :

- Nous avons soumis une paire de contacts à un certain nombre d'arcs électriques ;
- Nous avons ensuite observé l'état de surface au Microscope Electronique à Balayage (MEB) ;
- Nous avons effectué des coupes micrographiques et nous avons observé la microstructure des contacts au microscope optique.

L'évolution de l'endommagement est obtenue en faisant varier le nombre d'arcs électriques sur des paires de contacts différents. Ceci suppose donc des caractéristiques microstructurales initialement identiques pour chaque contact.

De plus, nous nous intéresserons à l'évolution de la température dans le contact en cours d'essai pour dimensionner un modèle thermique. Nous avons pour cela implanté un ou plusieurs thermocouples dans un des contacts électriques.

Enfin, nous chercherons à quantifier l'endommagement des contacts.

3.2. Endommagement des contacts de disjoncteurs

Nous avons choisi un couple mixte commercial de contacts, issu des disjoncteurs MCCB Merlin – Gerin, en Ag – C 96/4% en masse et en Ag – WC 60/40%.

Les contacts ont été testés au moyen d'une machine d'essai électrique dans une configuration d'essai proche de celle des produits complets. L'utilisation d'une machine d'essai de laboratoire permet des gains de temps et d'argent appréciables par rapport à des essais réalisés sur des disjoncteurs. On reproduit des essais d'ouverture sous courant pour générer un arc électrique.

Les contacts ont subi 0, 1, 5, 10, 50, 100, 500, 1 000, 5 000 et 10 000 manœuvres.

Chaque contact a été pesé avant et après essai pour évaluer la perte de masse.

Les sections transverses ont toutes été réalisées sur des contacts enrobés avec une résine époxy dans une machine automatique. Les enrobages ont été rodés avec une machine automatique jusqu'au grade 4000 et polis manuellement au micron.

3.2.1. Dispositif utilisé

La machine dénommée M2, utilisée dans l'équipe I2EA de Schneider Electric, est composée d'un circuit de puissance, d'une centrale d'acquisition HP 3852, d'un pot électrodynamique LDS, d'un capteur laser de déplacement Keyence et d'une armature recevant les contacts (photographie 3.1). Des extracteurs évacuent l'air chaud. Un micro ordinateur de type Intel 80486 permet le pilotage de l'essai et le stockage des valeurs de résistance de contact, d'écrasement, d'énergie de rebond naturel et artificiel, de force de contact et de charge électrique.



Photographie 3.1. Machine d'essai électrique M2 (équipe I2EA)

Le contact fixe est solidaire du bâti de la machine. Le contact mobile est enchâssé au bout d'un bras en rotation autour d'un axe avec deux roulements à billes (figure 3.2). L'arc électrique est obtenu par le déplacement du bras autour de l'axe (cercle en pointillé).

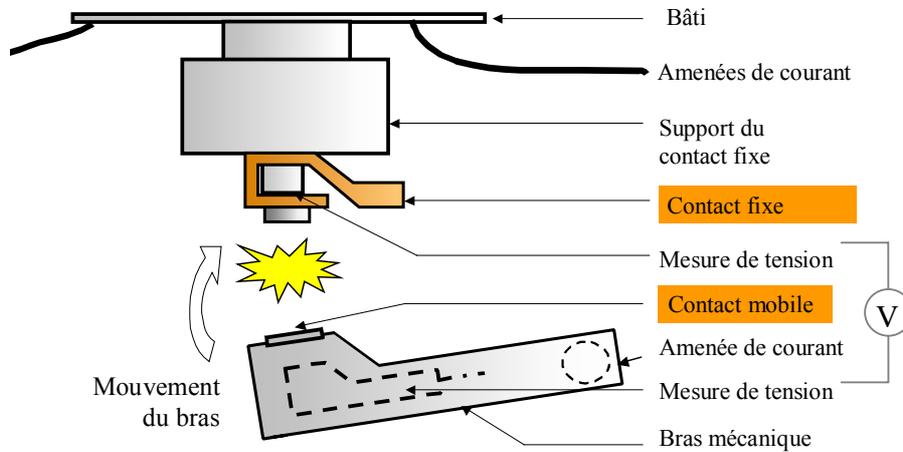


Figure 3.2. Implantation des contacts sur la machine « M2 »

La figure 3.3 présente l'évolution des grandeurs caractéristiques de l'essai à la fermeture.

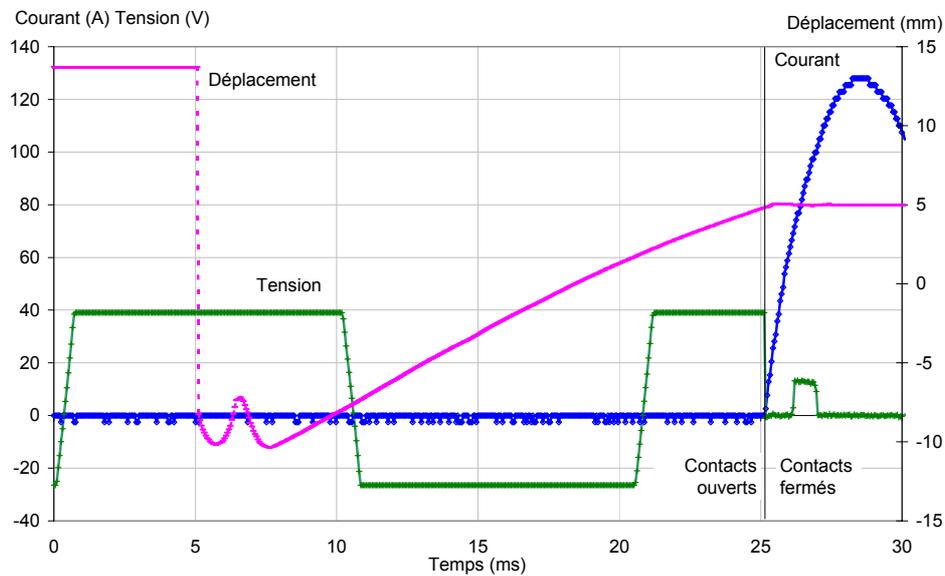


Figure 3.3. Chronogramme de la fermeture des contacts électriques avec la machine « M2 »

Oscilloscope numérique à mémoire Nicolet 490

Les essais sont réalisés à une intensité nominale de 100A avec une tension de 220V par une procédure de type ouverture – fermeture à polarité alternée. Un rebond contrôlé est généré quelques millisecondes après chaque manœuvre (opération d'ouverture ou de fermeture).

Le signal de déplacement (courbe avec des tirets) permet de situer la fermeture physique des contacts, mesurée au moyen d'un laser et repérée par un trait vertical. L'arc électrique de rebond apparaît sur la courbe de tension (courbe avec des croix) environ 1 ms après la fermeture. Il dure environ 1ms. Le courant (courbe avec des losanges) est établi peu avant la fermeture physique des contacts.

La figure 3.4 correspond à l'ouverture des contacts et au rebond contrôlé.

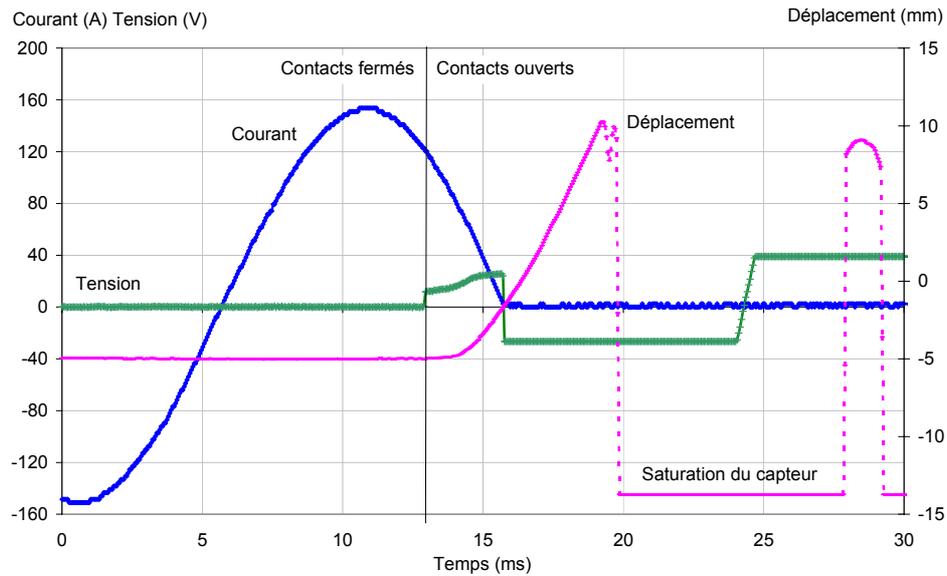


Figure 3.4. Chronogramme d'une ouverture des contacts électriques suivi d'un rebond contrôlé
Oscilloscope numérique à mémoire Nicolet 490.

Nous allons analyser la microstructure d'une paire de contacts n'ayant subi aucune manœuvre.

3.2.2. Microstructure des contacts avant essai

Les contacts sont composés d'une pastille de contact brasée sur un support en cuivre (figure 3.5).

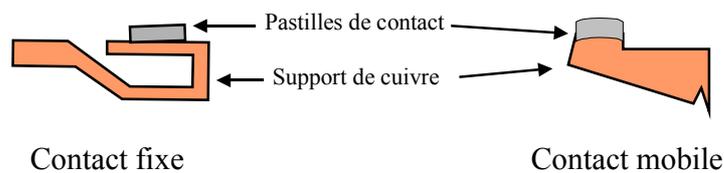
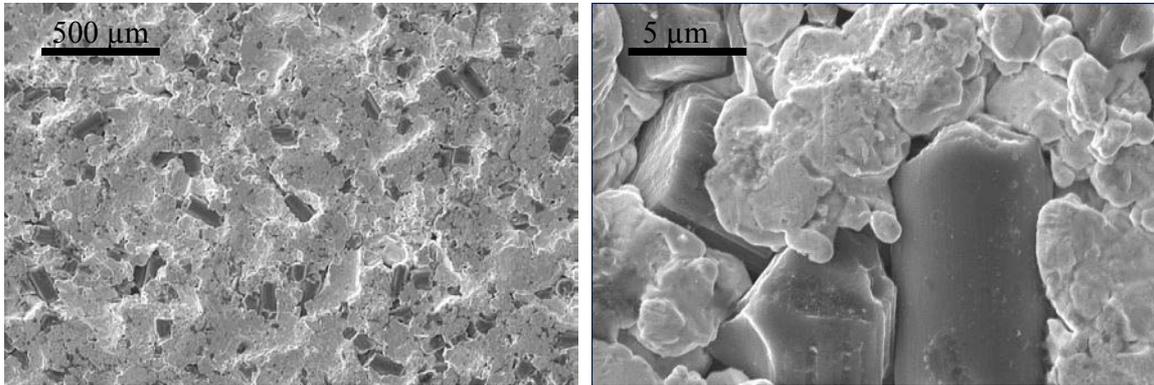


Figure 3.5. Géométrie des contacts électriques testés dans la machine M2

L'état de surface des contacts a été observé en microscopie électronique à balayage (MEB) en raison de la grande profondeur de champ nécessaire. Les micrographies 3.6 et 3.7 permettent de mettre en évidence la forte rugosité de la surface du contact fixe.



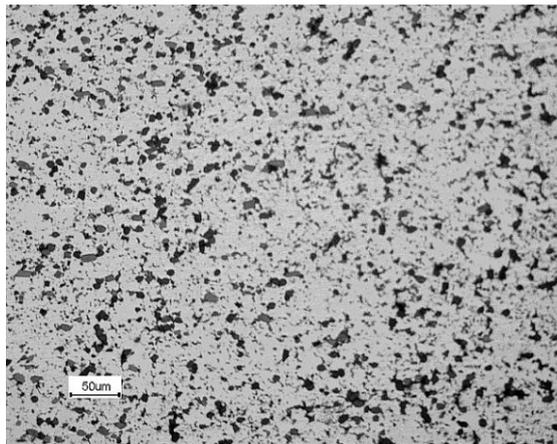
3.6

3.7

Micrographies MEB 3.6 et 3.7. Etat de surface d'un contact en Ag-C n'ayant pas subi d'essai
Cliché MEB Leo 1450VP en électrons secondaires. Grossissements 500 et 5 000.

L'interface métal – carbone est incohérente (micrographie 3.7). On distingue des porosités d'une taille supérieure au micron.

La répartition homogène du carbone dans la matrice apparaît dans la section transverse 3.8.



Micrographie optique 3.8. Microstructure d'un contact en Ag-C n'ayant pas subi d'essai
Contact fixe. Cliché microscope Zeiss Axiovert 405

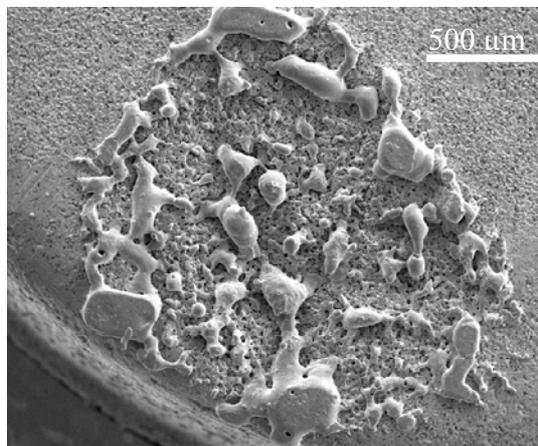
La surface du contact mobile semble plus régulière que celle du contact fixe (micrographie 3.9).



Micrographie MEB 3.9. *Etat de surface d'un contact en Ag-WC n'ayant pas subi d'essai
Contact mobile. Cliché MEB Leo en électrons secondaires*

3.2.3. Effet des arcs électriques sur la microstructure des contacts

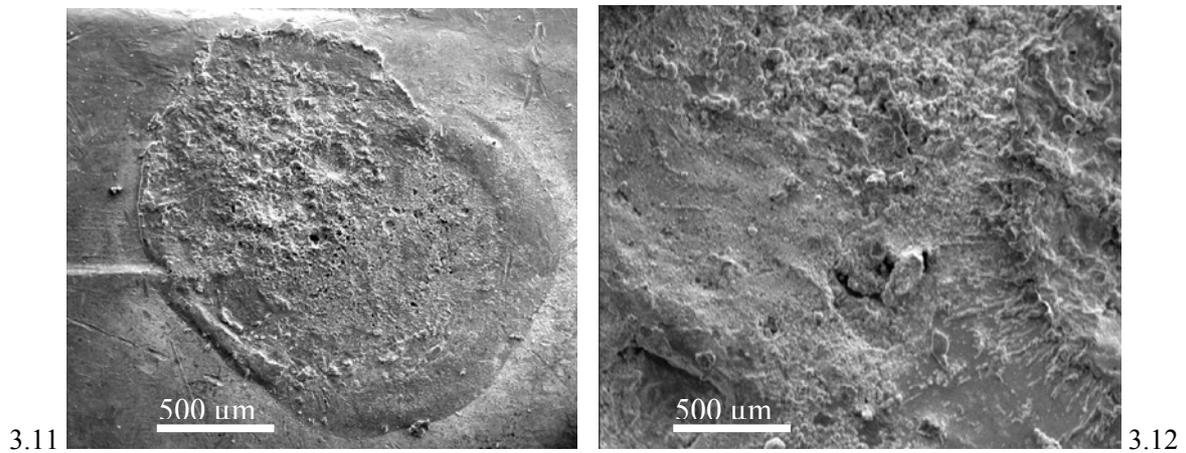
La micrographie MEB 3.10 de la surface du contact fixe après un arc d'environ 1J permet de rendre compte de l'effet de l'arc électrique sur le matériau.



Micrographie MEB 3.10. *Etat de surface du contact fixe en Ag-C après 1 arc électrique
Cliché MEB Jeol JX1-8800R en électrons secondaires. 1 ouverture / fermeture à 100A sous 220V.*

Des gouttelettes d'argent sont apparues à la surface. La fusion du métal a été provoquée par l'échauffement résultant de la réduction de taille de la striction électrique et de l'apparition d'un arc électrique. Le carbone a disparu de la surface. Il s'est oxydé en CO.

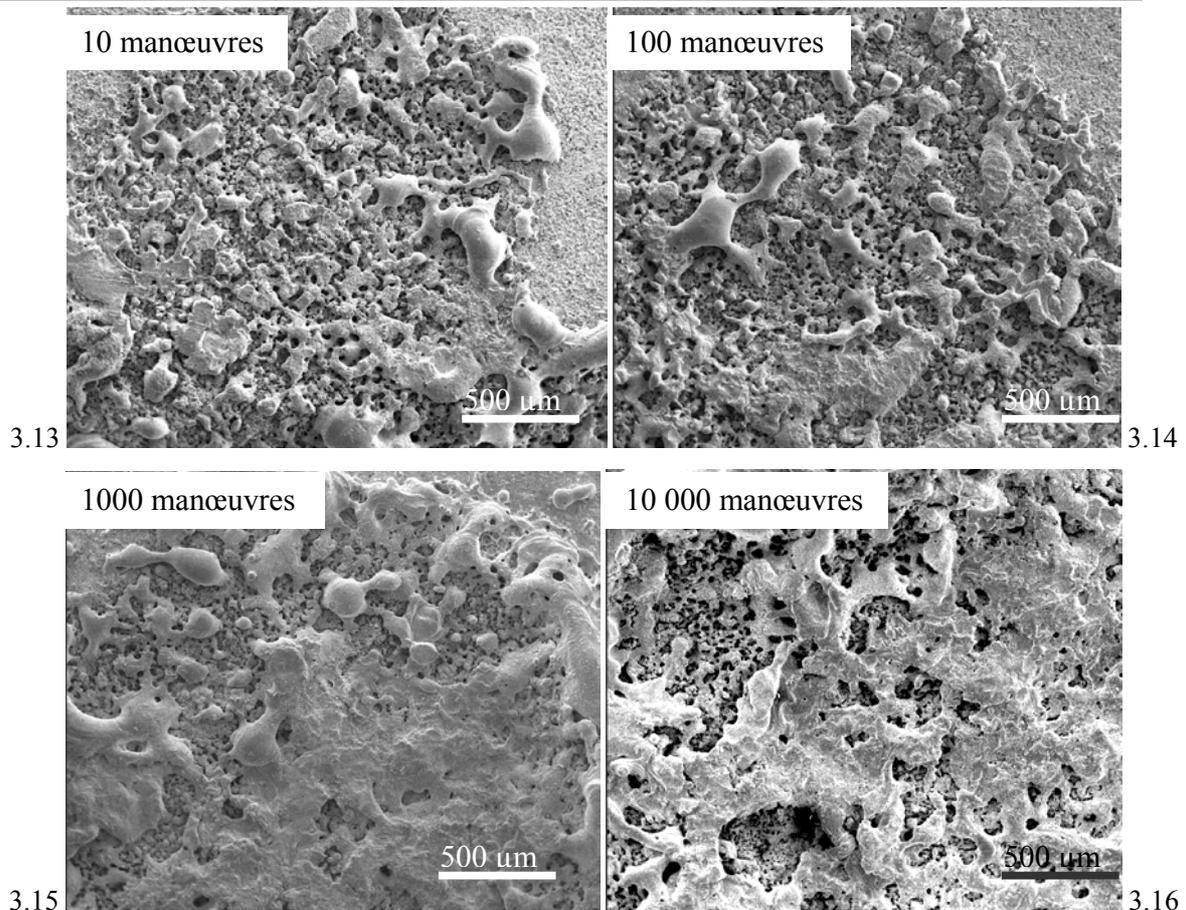
L'état de surface du contact mobile semble avoir été moins perturbé par l'arc électrique que le contact fixe (micrographie MEB 3.11).



Micrographies MEB 3.11 et 3.12. Etat de surface du contact mobile en Ag-WC après 1 arc électrique
Cliché MEB Jeol en électrons secondaires. 1 ouverture / fermeture à 100A sous 220V.

Notons toutefois la présence d'un cratère d'impact de taille millimétrique. De la matière a été projetée à l'état fondu à l'extérieur du cratère (micrographie MEB 3.12).

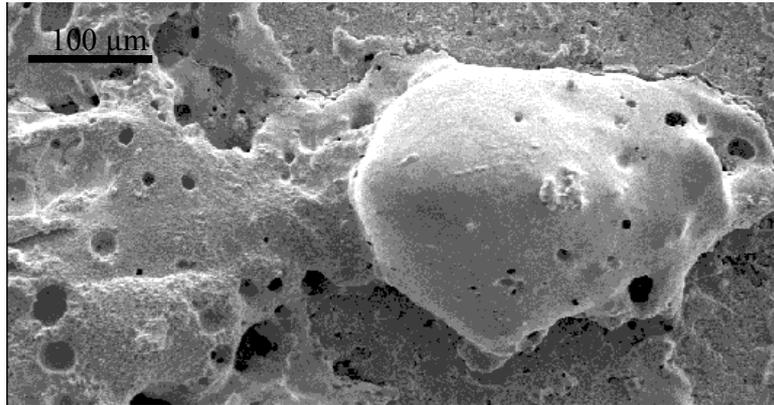
L'état de surface du contact fixe (micrographies MEB 3.13 à 3.16) se dégrade notablement quand le nombre de manœuvres augmente.



Micrographies MEB 3.13 à 3.16. Surface des contacts fixes Ag-C à différents nombres de manœuvres
Cliché MEB Jeol en électrons secondaires. 1 ouverture / fermeture à 100A sous 220V.

La taille de la zone affectée augmente. Un cordon de matière fondue apparaît alors autour de la zone affectée puis une peau tend à recouvrir la zone d'impact. A un grossissement plus important, on note la présence de retassures causées par des cycles répétés de fusion – solidification rapides (micrographie 3.16).

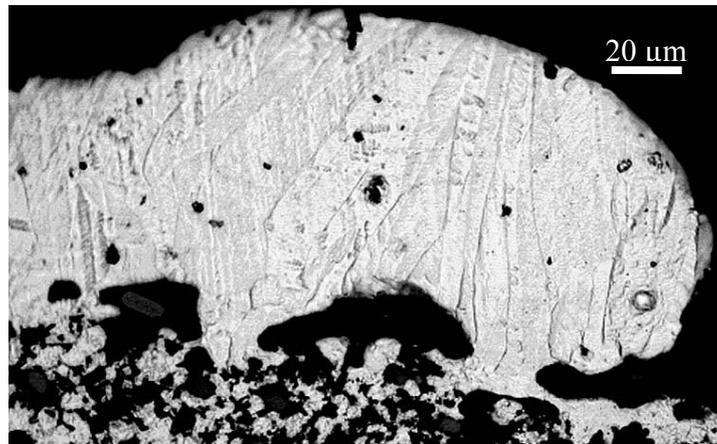
Les petites cavités sphériques de la micrographie 3.17 nous conduisent à penser que l'oxygène dissous dans l'argent liquide est repassé à l'état gazeux lors de la solidification des gouttelettes.



Micrographie MEB 3.17. Mise en évidence du dégazage de l'argent lors du refroidissement d'un contact fixe Ag-C

Contact fixe. Cliché MEB Jeol en électrons secondaires. 1 ouverture / fermeture à 100A sous 220V.

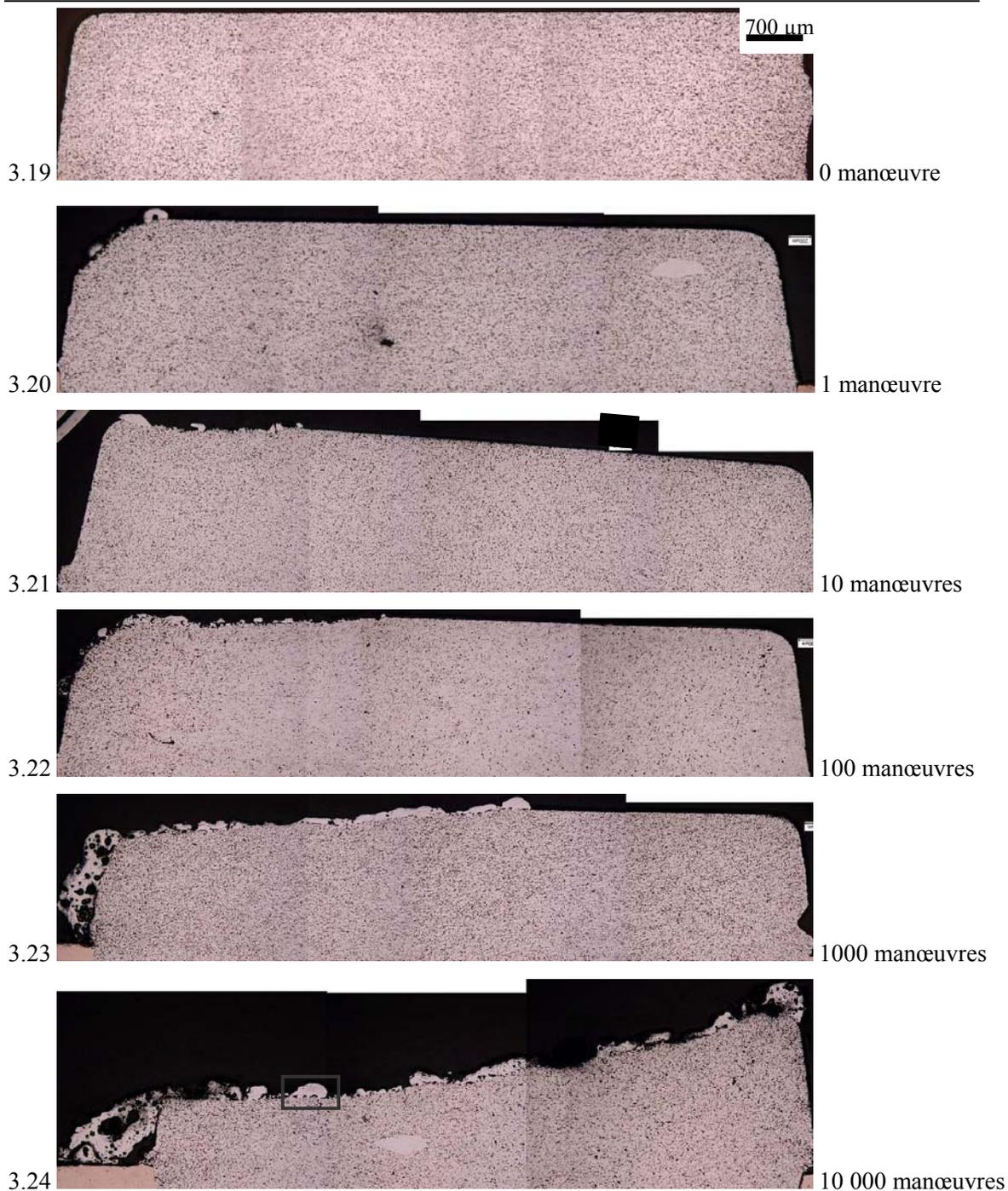
Notons également la forme basaltique des grains d'argent, témoin d'un fort choc thermique lors de la solidification (micrographie 3.18).



Micrographie optique 3.18. Section transverse d'une goutte d'argent fondue et attaquée

Contact fixe. Cliché microscope Zeiss Axiovert. 1 ouverture / fermeture à 100A sous 220V.

Les coupes micrographiques 3.19 à 3.24 ont été réalisées sur les contacts enrobés et polis.



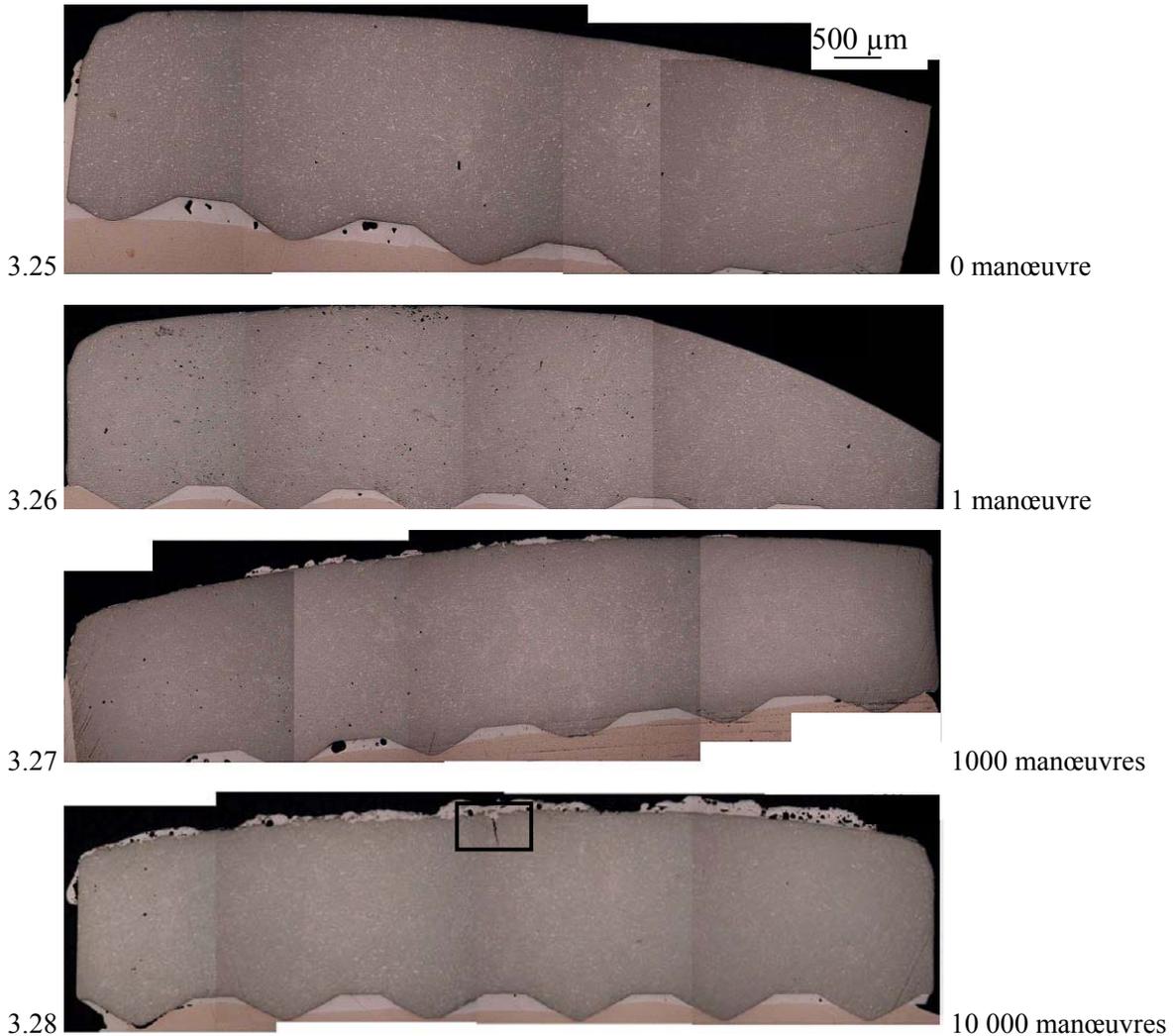
Micrographies optiques 3.19 à 3.24. Evolution de la microstructure des contacts fixe en Ag-C à différents nombres de manœuvres.

Coupes micrographiques Zeiss Axiovert. Ouvertures / fermetures à 100A sous 220V avec M2.

La goutte d'argent fondu est située dans le cadre noir de la micrographie 3.24. Les micrographies permettent de mettre en évidence une altération de la surface pour les faibles nombres de manœuvres puis une altération structurale quand le nombre de manœuvres est élevé. On note la présence de collerettes d'argent de part et d'autre de la zone fondue (à gauche des micrographies) et de fissures

dans la zone de choc thermique maximum (au centre près de la surface dans le cadre noir). Ces fissures suivent des chemins de particules de carbone et de porosités. L'épaisseur de la pastille à gauche est très inférieure à l'épaisseur à droite sur la micrographie 3.24.

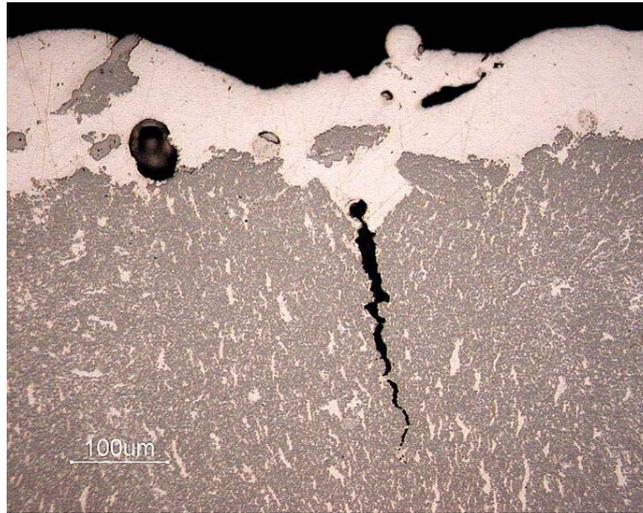
L'état de surface et la structure du contact mobile sont nettement moins altérés que celle du contact fixe par les chocs thermiques répétés (micrographies 3.25 à 3.28).



Micrographies optiques 3.25 à 3.28. Evolution de la microstructure des contacts mobiles en Ag-WC ayant subi différents nombres de manœuvres

Coupes micrographiques Zeiss Axiovert. Ouvertures / fermetures à 100A sous 220V avec M2

Notons tout de même la présence d'une fissure (au centre de la micrographie 3.28 dans un cadre noir). La micrographie 3.29 est un agrandissement de cette zone.



Micrographie optique 3.29. Fissure de fatigue sur un contact mobile Ag-WC ayant subi 10 000 manœuvres

Cliché microscope Zeiss Axiovert. Ouvertures / fermetures à 100A sous 220V avec M2

Cette fissure semble être une fissure de fatigue.

En conclusion, l'endommagement des contacts de disjoncteur pour des ouvertures / fermetures à courant nominal est dû essentiellement à une perte de masse en cours d'essai. Pour augmenter la durée de vie des contacts, il est possible d'augmenter l'épaisseur des pastilles de contact fixe mais cela engendre un surcoût important. On pourrait être tenté d'utiliser des matériaux ayant de meilleures propriétés mécaniques pour le contact fixe, au risque de rendre les processus de fissuration dominants. Il pourrait être possible de modifier la forme de la surface pour que celle-ci soit entièrement utilisée mais cela pose des problèmes de tolérance au désalignement des contacts.

3.2.4. Estimation de l'endommagement

La figure 3.30 montre l'évolution du déplacement mesuré par le capteur laser au cours d'un essai.

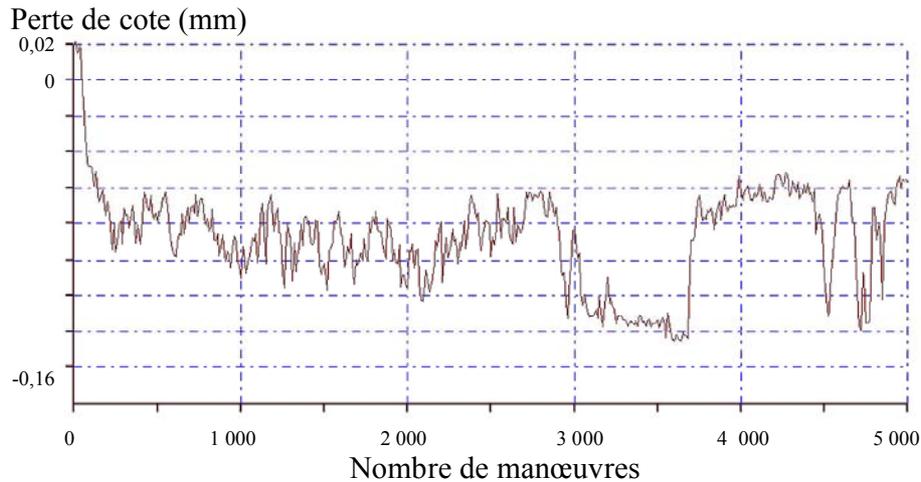


Figure 3.30. Evolution de l'écrasement des contacts au cours d'un essai

La perte de cote est très importante au début mais elle se stabilise vers $-0,08$ mm dès 200 manœuvres. Il y a un pseudo régime stationnaire entre 200 et 2800 manœuvres puis une augmentation très importante de l'écrasement entre 2800 et 3800 manœuvres. Les valeurs de perte de cote pour 3 800 à 500 manœuvres sont proches de celles obtenues entre 200 et 2800 manœuvres. Vers 4500 manœuvres, on constate à nouveau des fluctuations importantes de l'écrasement. La mesure du déplacement étant assurée au moyen d'un capteur laser, ces fluctuations ne saurait refléter une imprécision de mesure. En fait, elles sont principalement dues au jeu latéral de l'axe de rotation du bras supportant le contact mobile, rendant la mesure peu répétable. Il résulte pas d'une erreur de conception : les contacts mobiles dans les disjoncteurs peuvent se déplacer latéralement grâce au jeu présent entre le contact mobile et son axe de rotation. Ceci explique notamment la brusque diminution de la perte de cote vers 3 800 manœuvres. La perte de cote ne permet pas la création d'un estimateur de l'endommagement. La figure 3.31 donne l'évolution de la perte de masse cumulée en fonction du nombre de manœuvres.

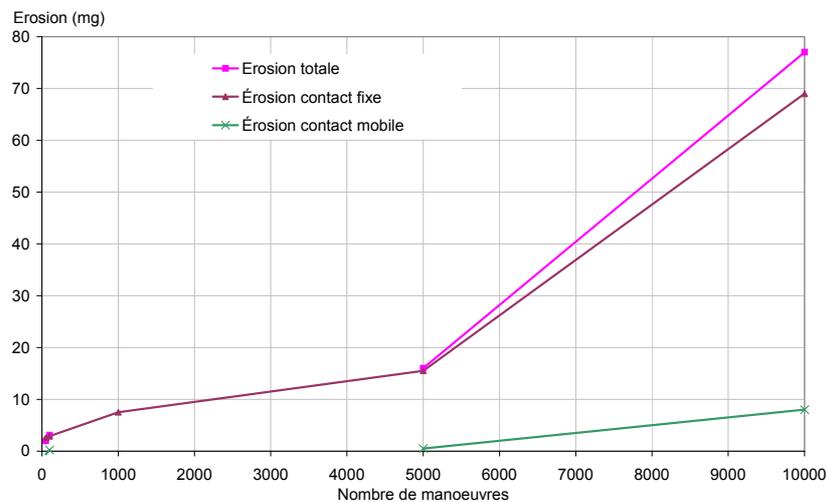


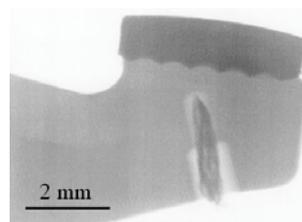
Figure 3.31. Evolution de l'érosion des contacts au cours d'un essai

L'usure est principalement le fait du contact fixe. Elle ne devient importante qu'à partir de 5 000 manœuvres.

Nous avons ensuite cherché à estimer l'augmentation de la température d'un contact mobile au cours d'un essai.

3.2.5. Evolution de la température au cours d'un essai

Afin de quantifier l'énergie traversant effectivement les électrodes, il nous faut connaître l'élévation de température subie par un contact au cours d'un essai électrique. Il nous était impossible pour des raisons d'encombrement, de disposer le thermocouple sur le contact fixe. Nous avons donc percé le contact mobile (en prenant soin de rester dans la partie en cuivre pour ne pas fragiliser la brasure) et collé dans le trou ainsi aménagé un thermocouple muni d'un dispositif d'isolation galvanique relié à un enregistreur Hydra Fluke (radiographie 3.32).



Radiographie X 3.32. Contact mobile.

On distingue le thermocouple en bas en dessous de la brasure, collé grâce à une colle conductrice.

La courbe d'évolution de la température est donnée à la figure 3.33.

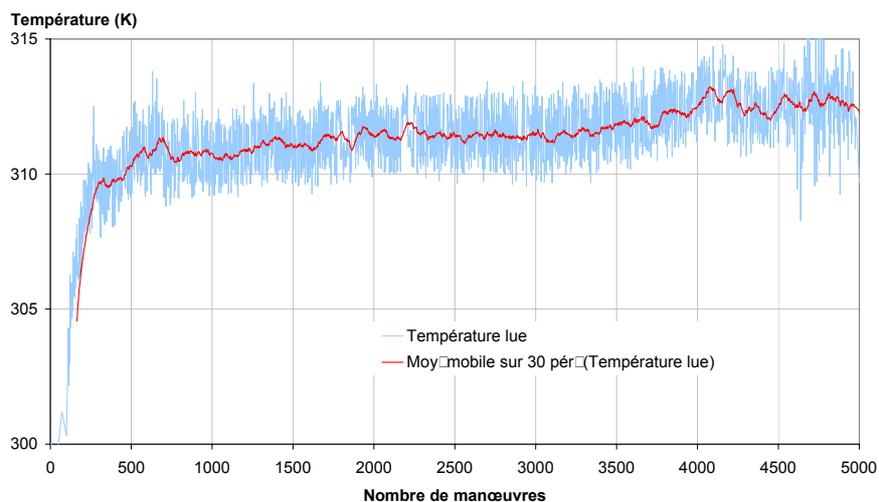


Figure 3.33. Evolution de la température dans le support du contact électrique pendant un essai ouverture, fermeture et rebond

Après un régime transitoire d'une durée de l'ordre de 500 manœuvres, le contact mobile est en régime thermique forcé. L'élévation de température mesurée par rapport à un thermocouple de référence placé dans la cloche est de 10 °C.

Le temps d'établissement d'un régime permanent peut être relié à la diffusivité thermique de l'ensemble {contacts électriques + machine d'essai} et à l'énergie apportée par l'arc au système. La température de stabilisation dépend essentiellement de l'énergie d'arc et de l'ampleur des phénomènes de convection qui vont refroidir l'ensemble.

3.3. Endommagement des contacts de contacteurs

La méthodologie est la même que pour les pastilles de disjoncteur. Les nombres de manœuvres retenus sont : 0, 1, 3, 10, 30, 100, 300, 1 000, 3 000, 6 000, 8 000, 10 000, 20 000, 29 000, 38 000, 45 000, 67 000 et 80 000 manœuvres.

Les essais électriques et les micrographies de cette partie ont été réalisées par François GAUDEMET²⁹ et Jean-Luc TOUZARD. Le matériau utilisé pour les contacts est l'Ag-SnO₂ 12% en masse.

3.3.1. Dispositif utilisé

Nous avons utilisé une machine « locomotive » localisée dans l'équipe I2EA de Schneider Electric. L'essai « locomotive » est basé sur des séquences « break-only test ». Ce type d'essai permet d'accélérer l'endommagement des contacts par rapport à un essai AC4⁹⁴. Le chronogramme de l'essai est donné à la figure 3.34.

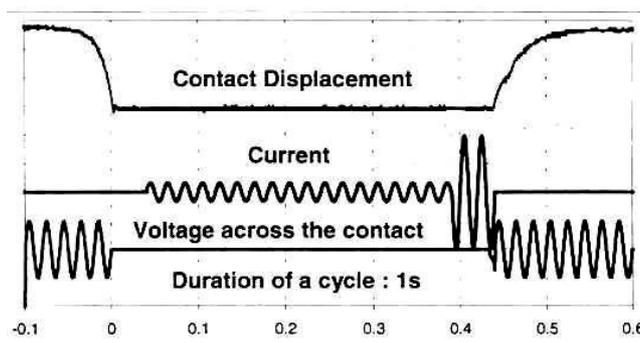


Figure 3.34. Chronogramme du déplacement, du courant et de la tension sur « locomotive » de l'équipe I2EA. Essai « ouverture 300A »

Les contacts sont fermés sous courant nul tandis que l'ouverture se fait à 6 fois le courant nominal I_n . Aucun rebond n'est généré et la vitesse d'ouverture est d'un ordre de grandeur plus faible que pour l'essai précédent.

L'ouverture / fermeture du circuit est essentiellement mécanique. Quand les contacts sont l'un contre l'autre avant l'ouverture, une bielle transmet à l'un des deux un mouvement longitudinal les séparant (figure 3.35) et selon l'intensité du courant circulant dans les contacts, il y a apparition d'un arc d'une énergie aléatoirement comprise entre 0 et 45 joules (mesurée par intégration temporelle du produit courant – tension d'arc). La valeur moyenne est de 18 Joules.

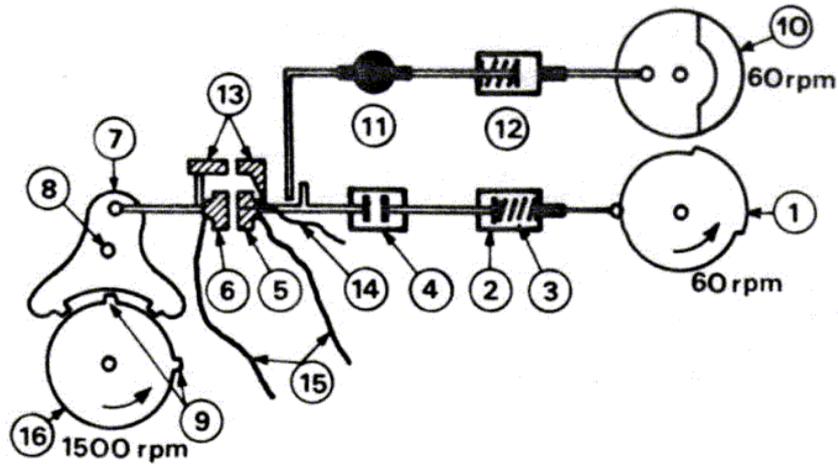


Figure 3.35. Schéma de principe de la machine « Locomotive »⁹⁵

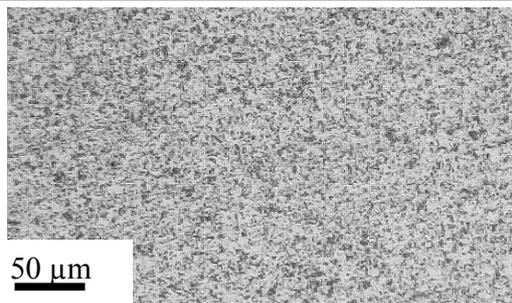
Deux cames (1 et 10) génèrent le déplacement des contacts (6 et 5). Des ressorts (3 et 12) appliquent une pression de contact sur les rivets et permettent de casser les soudures éventuelles. Un capteur de déplacement (11) permet d'évaluer l'écrasement des contacts. Des amenées de courant (15) et un thermocouple sont implantés au niveau des contacts.

Dans ce type d'essai, l'érosion des contacts à la fermeture est négligeable. Cependant, l'absence de synchronisation entre les ondes de courant et le déplacement des contacts limite l'utilisation de la machine pour de faibles quantités de manœuvres. En effet, la valeur aléatoire de la quantité d'énergie d'arc rend l'essai non répétable. L'essai n'est représentatif⁹⁶ que pour des essais de type contacteurs car sa vitesse d'ouverture est plus faible que celle de la machine « M2 ».

En tout état de cause, la « Locomotive » permet de définir des critères de classification de matériaux de contacts pour application aux contacts de contacteurs⁹⁷.

3.3.2. Microstructure des contacts avant essai

L'oxyde d'étain est dispersé dans la matrice d'argent de manière assez régulière. La coupe micrographique 3.36 servira de référence pour la suite.



Micrographie optique 3.36. Microstructure d'un contact en Ag-SnO_2 avant essai électrique
Cliché microscope Zeiss Axiovert

3.3.3. Effet des arcs électriques sur la microstructure des contacts

3.3.3.1 Effets microstructuraux

Le premier arc de notre essai a une énergie de 41 Joules (calculé par intégration temporelle du produit de la tension et du courant aux bornes des contacts), soit une valeur proche du maximum possible avec ce moyen d'essai. Les profils rugosimétriques (figures 3.37 et 3.38) mettent en évidence une dissymétrie des cratères d'impacts.

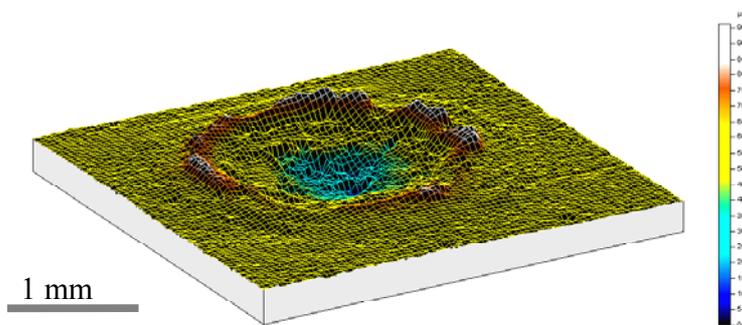


Figure 3.37. Profil rugosimétrique 3D d'un cratère d'impact d'un arc sur un contact en Ag-SnO_2
Rugosimètre laser UBM avec logiciel de génération 3D Mountain Map. Essai ouverture 300A.

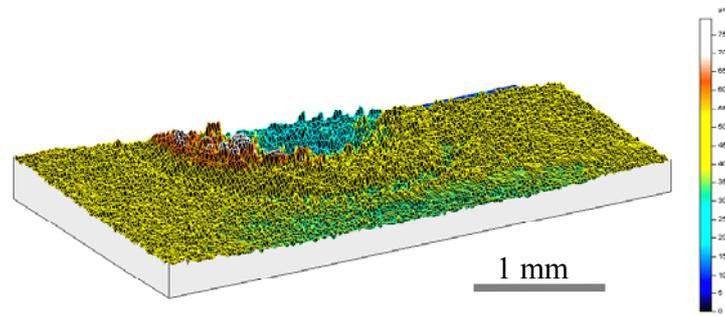
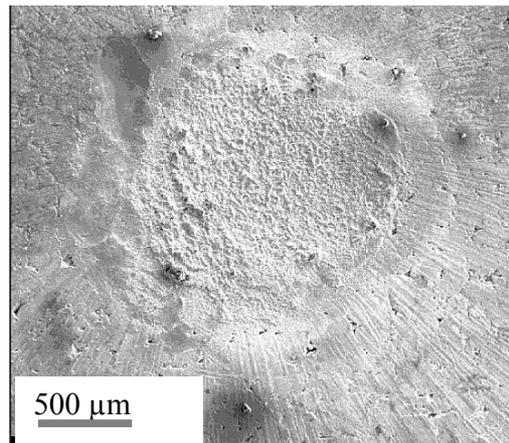


Figure 3.38. Profil rugosimétrique 3D du contact opposé à celui de la figure 3.10
Même équipement, même essai.

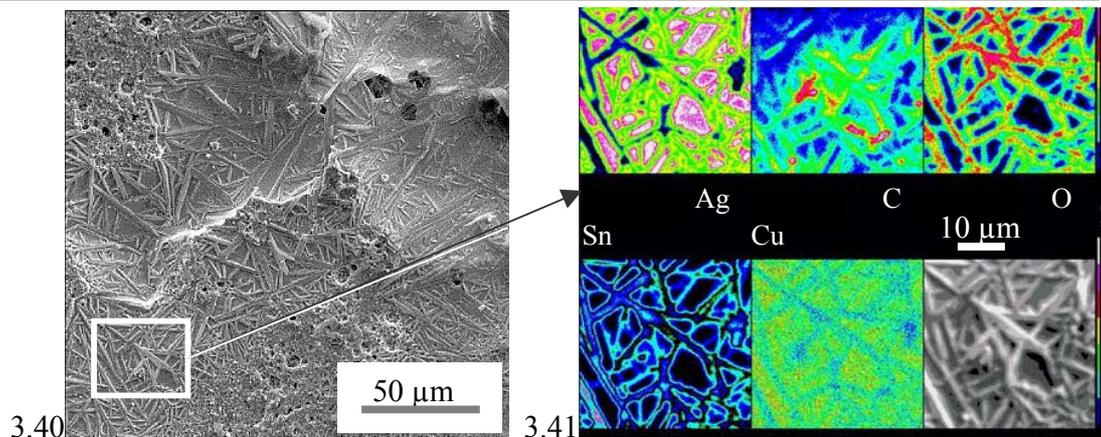
Le cratère de la figure 3.37 a un diamètre de 1,8 mm.

La micrographie 3.39 prise au MEB en électrons secondaires correspond au profil de la figure 3.38.



Micrographie MEB 3.39. Zone d'impact de l'arc (énergie 41 Joules)
Cliché MEB Jeol en électrons secondaires. Essai ouverture 300A (1 arc)

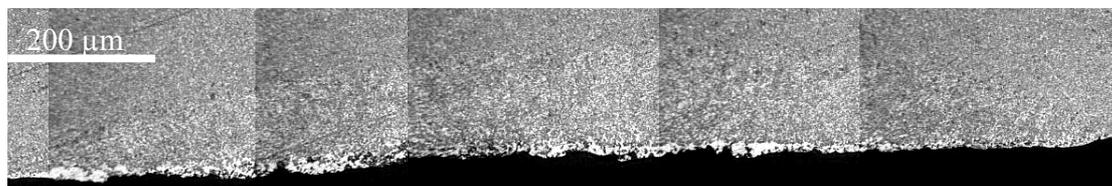
L'argent s'est vaporisé et « condensé » loin de la surface. Des fissures radiales partent de la zone d'impact de l'arc. Au centre du cratère, des aiguilles d'oxyde d'étain indiquent que celui-ci a fondu puis s'est resolidifié (micrographie 3.40 et microanalyse 3.41) sous forme de SnO₂.



Micrographies MEB 3.40 et 3.41. Micrographie et microanalyse de la surface d'un contact en Ag-SnO₂

Cliché MEB et microsonde Jeol après 1 manœuvre en ouverture 300A.

La micrographie 3.42 présente une vue de cette zone pour un arc de 24 Joules.



Micrographie optique 3.42. Zone affectée après un arc de 24 Joules

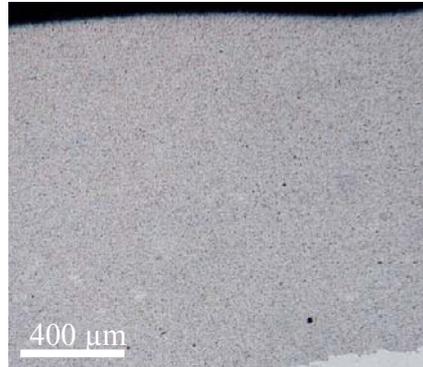
Cliché microscope Zeiss Axiovert

Nous avons ensuite cherché à évaluer la taille de la zone affectée par l'arc. Elle a un diamètre de l'ordre de 1,5 mm pour une profondeur maximum de 150 µm. La comparaison avec la courbure initiale de la pastille donne une perte de cote de 35 µm.

Cependant, il nous est impossible de savoir si ce contact est l'anode ou la cathode. Nous ne savons pas s'il a été affecté mécaniquement ou thermiquement.

Nous avons aussi cherché à faire apparaître des fissures sans arc. Pour cela, nous avons programmé la machine de façon à ce qu'elle ouvre et ferme le circuit sur un zéro de courant. Ainsi, l'effet thermique du passage du courant demeure. Nous avons d'abord effectué un essai avec un courant de 300 Ampères. Les contacts ont subi plus de 200 000 manœuvres sans fissurer. Nous avons ensuite augmenté l'intensité de façon à avoir le même effet Joule que celui provoqué par le passage de l'arc électrique. La température dans les contacts était élevée : ils étaient portés au rouge. Il n'y avait cependant pas de fissures. Nous avons aussi généré une entaille en V en surface pour savoir si les contraintes thermiques provoquées par le passage du courant dans la pastille suffisaient à expliquer la

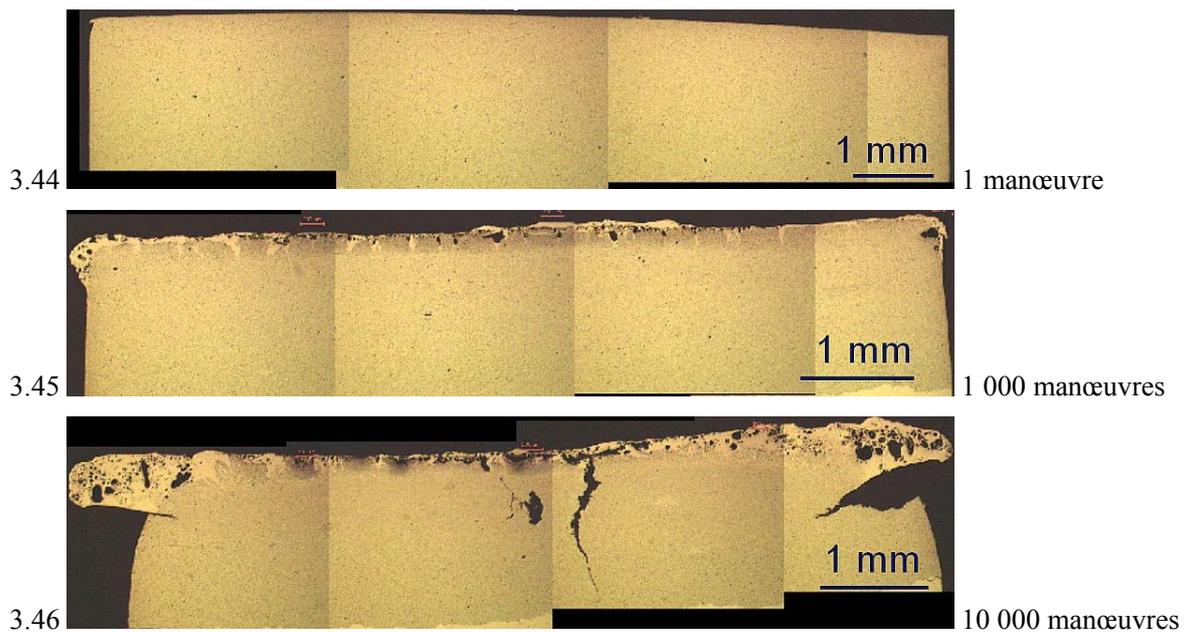
propagation de fissures de fatigue. Il n'y avait pas de fissures après 40 000 manœuvres (micrographie 3.43).

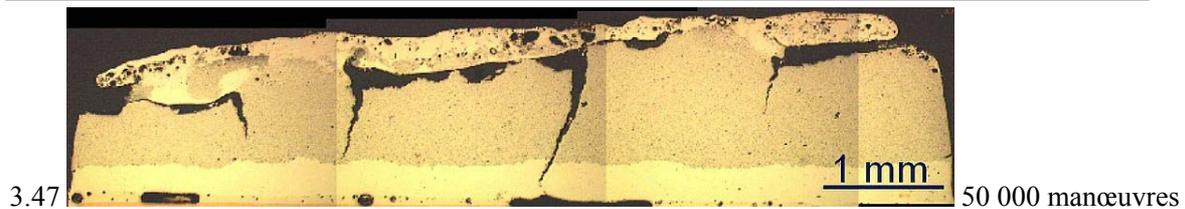


Micrographie optique 3.43. Surface d'un contact en Ag-SnO₂ ayant subi 40 000 manœuvres sans arc
Cliché microscope Zeiss Axiovert

De plus, les contacts étaient ouverts et fermés à chaque manœuvre. Nous pouvons donc en conclure que le bridage mécanique et le passage du courant dans le contact tel que nous l'avons testé ne permettent pas d'expliquer à eux seuls l'amorçage et la propagation de fissures.

Les coupes 3.44 à 3.47 ont été réalisées sur des contacts ayant subi 1, 1 000, 10 000 et 50 000 manœuvres.





Micrographies optiques 3.44 à 3.47. Microstructure de contacts en Ag-SnO₂ à divers nombres de manœuvres

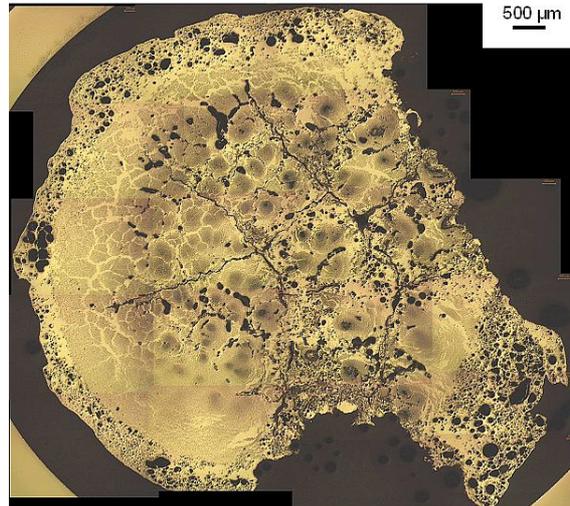
Cliché microscope optique Leica (d'après GAUDEMET²⁹). Essai ouverture 300A.

Elles ont été réalisées sur des contacts coupés et polis suivant leur diamètre. On constate que la surface est altérée de manière significative dès 1 000 cycles. Les fissures bouchées par de l'argent sont visibles. Elles ont environ 200 μm de profondeur. Des collerettes apparaissent sur les bords des contacts. La porosité devient importante en surface. Le cœur du matériau ne semble pas endommagé significativement. A 10 000 manœuvres, une fissure a atteint une taille comparable à l'épaisseur de la pastille. La structure semble alors altérée et sa forme change. On passe alors à un régime catastrophique d'érosion. Des blocs de matière sont arrachés lorsque des fissures coalescent ou lorsque la collerette se détache de la pastille. La surface est pelée par couches. Des fissures parallèles à la surface du contact apparaissent, probablement provoquées par des contraintes axiales trop importantes. Les fissures peuvent apparaître près de la surface des contacts, sous les collerettes de matériau fondu et solidifié entre un demi - millimètre et un millimètre de profondeur environ. On trouve des fissures aussi au niveau de l'interface Ag – Ag-SnO₂. Ce deuxième phénomène peut s'expliquer par les différences de coefficients de dilatation thermique entre l'argent et le composite. L'interface cuivre – argent, présentant une différence de coefficients de dilatation thermique plus faible, ne présente quasiment jamais de fissures⁷⁰.

Ces observations (ainsi que des coupes faites pour d'autres nombres de manœuvres) nous permettent d'envisager le scénario d'endommagement suivant :

- Les fissures apparaissent dès la première manœuvre du fait des forts gradients thermiques subis par les pastilles. Ces fissures peuvent être générées lors du chauffage ou lors du refroidissement (la surface du matériau est alors en traction). Les contraintes générées s'exercent à l'interface argent – oxyde d'étain ou au niveau de la structure de la pastille ;
- Les arcs suivants vont conduire soit à la germination d'autres fissures soit à la propagation des fissures existantes ;
- Au bout de 3000 cycles, la totalité de la surface est affectée. Il n'y a alors plus de germination mais seulement de la propagation. Tout nouvel arc fera alors croître les fissures existantes. Il est tout à fait possible d'imaginer une compétition entre fissures de taille comparable. L'une d'entre elle finira par avoir une longueur suffisamment différente de celle des autres pour se propager plus vite et traverser la structure comme sur la micrographie 3.46 ;
- L'énergie de l'arc va ensuite avoir pour effet de faire croître les autres fissures jusqu'à ce que l'une d'entre elle atteigne à son tour la taille critique.

La coupe parallèle à la surface de contact (micrographie 3.48) a été réalisée à environ 200 μm sous la surface du contact.



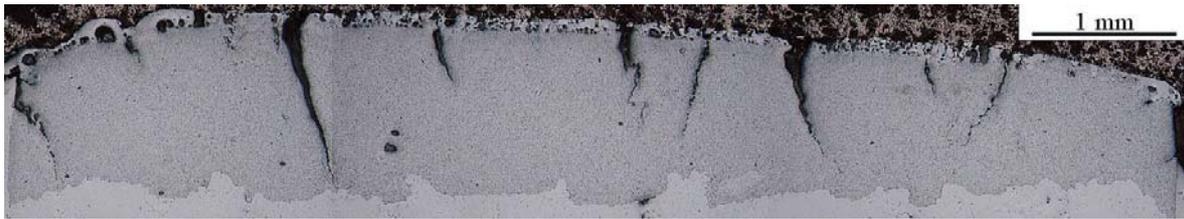
Micrographie 3.48. Section parallèle à la surface pour un contact ayant subi 20 000 manœuvres
Cliché microscope optique Leica (d'après GAUDEMET²⁹)

Elle permet de montrer que l'on a un profil typique de faïençage thermique avec des réseaux de fissures « blanches » radiales et orthoradiales au centre de la pastille. De profondes fissures (en noir), essentiellement radiales traversent la pastille.

Les fissures « blanches » sont souvent considérées comme des fissures ayant été guéries par de l'argent liquide apparu lors des cycles suivant la formation de la fissure²⁹. L'argent fondu présent à la surface peut éventuellement s'insinuer dans les fissures, ce qui aurait pour effet de faire chuter les contraintes vues par les pointes de fissures mais rien ne prouve que ceci ait pour effet de les « guérir » ou de les boucher.

Les collerettes observées dès 1000 manœuvres (micrographie 3.45) correspondent aux flaques d'argent de surface ayant coalescé. Lors des manœuvres suivantes, l'argent fondu se trouve rejeté autour de la pastille. Il participe moins à la conduction du courant : la résistance de contact augmente et exacerbe les effets thermiques de l'arc. L'argent des collerettes ne permet plus de bloquer les fissures. Enfin, il n'a que peu d'affinité avec le reste de la pastille et constitue une barrière au passage du courant. Des microanalyses X ont confirmé la nature des collerettes et mis en évidence une ségrégation microscopique et macroscopique de l'argent et de l'oxyde d'étain²⁹.

Nous avons aussi analysé des contacts commerciaux ayant subi des essais normatifs (micrographie 3.49).



Micrographie optique 3.49. Section transverse d'un contact électrique ayant subi un essai AC4
Cliché Microscope Zeiss Axiovert

Les phénomènes mis en jeu sont les mêmes que pour les contacts ayant subi les essais « locomotive ». La fissuration semble cependant être plus importante que pour la locomotive, tandis que les collerettes sont peu marquées, probablement en raison de l'existence sur ces appareils d'un dispositif de soufflage.

Le matériau de contact Ag-SnO₂ a subi plusieurs modes d'endommagement :

- 1 endommagement de surface, d'abord avec:
 - L'apparition de petites fissures de faïençage thermique contenant de l'argent entre les lèvres ;
 - L'apparition de porosité en surface ;
 - L'apparition de ségrégation microscopique et macroscopique de l'argent et de l'oxyde d'étain conduisant à l'apparition de zones riches en étain et d'une « peau » d'argent ;
- 2 Endommagement de la structure par la suite avec :
 - L'apparition de grandes fissures ;
 - l'apparition de collerettes
 - La modification de la forme de la pastille par écrasement de celle-ci.

La durée de vie dépend de l'endommagement de structure qui dépend lui-même de l'endommagement de surface. Le mode d'endommagement critique est la fissuration du composite sur les contacts ayant subi des essais normatifs. La cause première est le choc thermique violent et localisé provoqué par l'arc électrique.

3.3.3.2 Indicateurs macroscopiques

La « Locomotive » donne l'évolution de la résistance de contact R_c d'un essai. Elle est obtenue par une mesure 4 points donnant l'intensité et la tension aux bornes des contacts lorsque ceux-ci sont fermés. R_c est une grandeur macroscopique puisqu'elle intègre les propriétés microstructurales et interfaciales des contacts. La courbe 3.50 représente l'évolution de la résistance de contacts instantanée et d'une moyenne glissante sur 50 points en cours d'un essai.

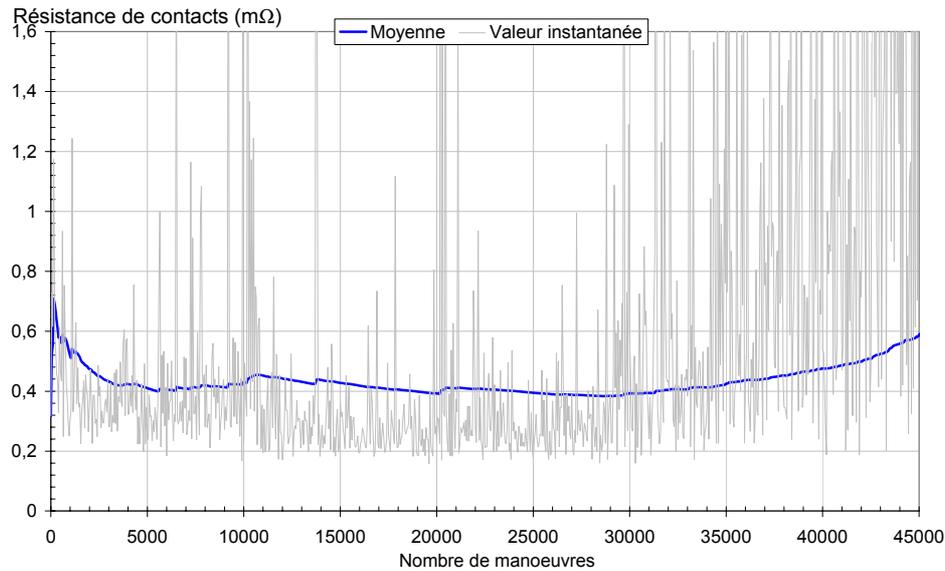


Figure 3.50. Evolution de la résistance de contact au cours d'un essai, valeur moyenne et valeur instantanée – Ag-SnO₂ 12%

La résistance de contact ne varie pas de manière monotone au cours de l'essai. R_c est décroissante en début d'essai puis croissante en fin d'essai. La dispersion de R_c est très importante et elle devient plus importante en fin d'essai.

Ce comportement s'explique par la dépendance de R_c à la configuration des contacts. Ceux-ci en effet ne se referment jamais de la même façon pour deux manoeuvres consécutives, ne serait-ce qu'à cause de l'évolution de la surface. Un creux et une bosse (conduisant par exemple à un bon contact) peuvent être remplacés au même endroit par deux bosses (donc un mauvais contact) pour la manoeuvre suivante. Il en résulte une grande dispersion de résultats. La dispersion augmente en fin d'essai parce que les surfaces en regard sont de plus en plus perturbées. Le contact est donc de plus en plus aléatoire.

Un autre indicateur important est l'usure des contacts. Celle-ci est mesurée lorsque les contacts sont fermés. La courbe 3. 51 donne l'évolution en fonction du nombre de manoeuvres de l'usure pour un essai.

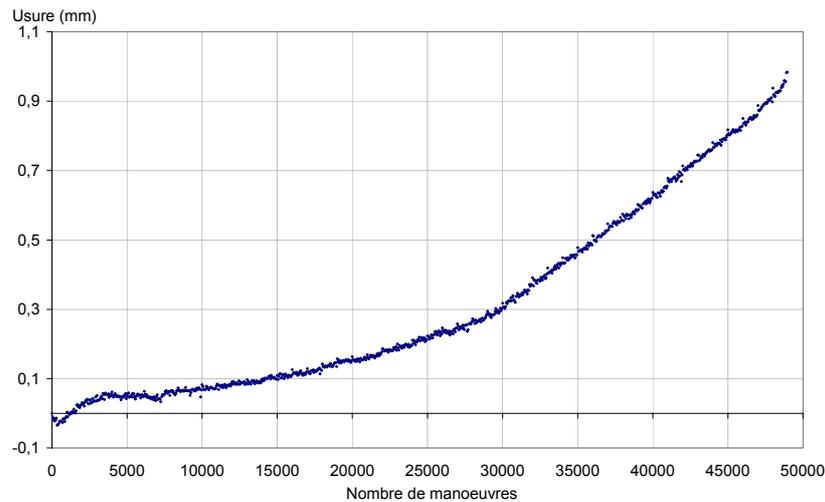


Figure 3.51. Evolution de l'usure de contacts avec le nombre de manœuvres – Ag-SnO₂ 12%

L'épaisseur augmente légèrement en début d'essai puis l'usure augmente avec le nombre de manœuvres. Le « gain » du début de l'essai est probablement dû à l'amélioration du contact entre les électrodes grâce au matériau liquide. La courbe présente une inflexion entre 20 000 et 25 000 manœuvres quand le matériau devient très endommagé. Or, à 10 000 manœuvres, la structure de la pastille est déjà profondément altérée (micrographie 3.46).

Ce matériau semble plus sujet à la fissuration que l'Ag-C mais ce n'est pas le cas : les contacts d'Ag-C testés avec la Locomotive ont présenté une usure supérieure à un millimètre au bout de seulement 500 manœuvres tandis que les contacts en Ag-SnO₂ testés sur la machine M2 avaient une usure nettement inférieure à celle de l'Ag-C ou même de l'Ag-WC (figure 3.52).

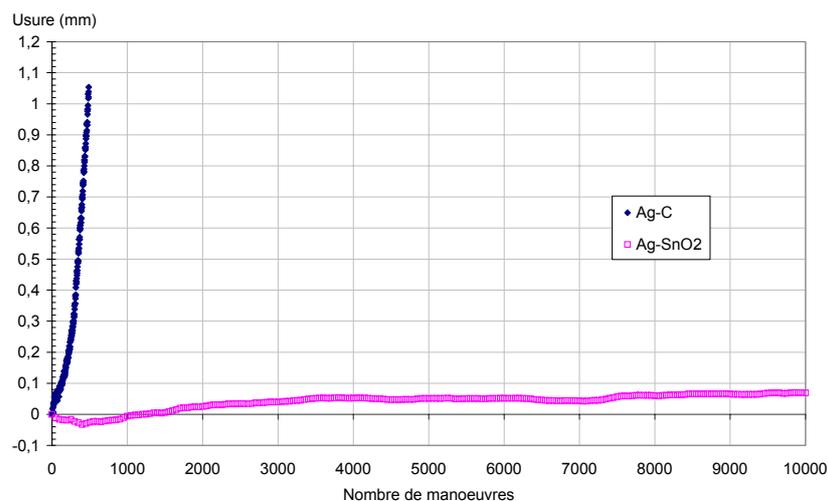


Figure 3.52. Comparaison de l'usure sur la machine "Locomotive" pour des contacts en Ag-C et en Ag-SnO₂

Le troisième indicateur couramment utilisé est la perte de masse des contacts, obtenue par pesage des contacts avant et après essai. La figure 3.53 représente l'évolution avec le nombre de manœuvres de la perte finale de masse des contacts.

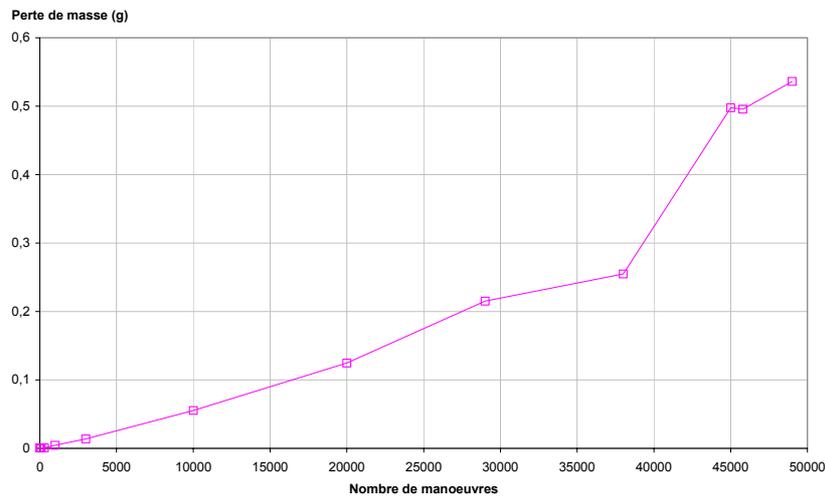


Figure 3.53. Evolution avec le nombre de manœuvres de la perte de masse – Ag-SnO₂ 12%

Chaque point correspond donc à un essai. On constate que la perte de masse augmente avec le nombre de manœuvres pour atteindre des valeurs importantes. Cependant, ce facteur ne prend pas en compte la perte de matière dans la zone utile du contact mais dans la totalité du contact. Il est cependant difficile d'identifier la limite entre la zone utile et la zone non utile des contacts.

Nous allons maintenant localiser le moment de la transition entre les deux types d'endommagement au moyen d'estimateurs.

3.3.4. Indicateur de l'endommagement

Nous avons cherché un estimateur de l'endommagement pour évaluer le moment séparant le régime normal du régime catastrophique. Il peut être basé sur des mesures microscopiques ou macroscopiques. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Il doit être compris entre 0 (matériau sain) et 1 (matériau totalement endommagé) ;
- Il doit être croissant quand le matériau s'endommage ;
- Il doit être sans dimension.

3.3.4.1 Résistance de contact

La résistance électrique du couple de contacts R_c semble être un bon candidat. Elle a l'avantage d'être en lien avec l'application du matériau, de prendre en compte des variations de structure et d'être de mise en œuvre aisée. Or, l'endommagement ne peut être que croissant sous l'effet des arcs électriques (figure 3.50) : R_c n'est donc pas un estimateur de l'endommagement pertinent.

3.3.4.2 Dommage d'usure

Le deuxième estimateur testé est le dommage d'usure. Il est défini par le rapport entre la perte de cote de la pastille cumulée depuis le début de l'essai et l'épaisseur initiale de la pastille. Le dommage d'usure est représenté par la courbe bleue de la figure 3.55. Ce critère peut être retenu comme estimateur d'endommagement mais il semble, du fait de la position de l'inflexion, plus sensible aux conséquences de l'endommagement qu'à ses causes.

3.3.4.3 Dommage massique

Un troisième critère d'endommagement, lié à la perte de masse, peut être défini par le rapport entre la masse perdue lors de l'essai et la masse initiale de la pastille. Il est représenté en rose sur la figure 3.55. On remarque qu'il évolue de manière identique au dommage d'usure. Il caractérise en effet les mêmes phénomènes.

3.3.4.4 Dommage microstructural

Le quatrième critère est le dommage surfacique. Il est établi au moyen des sections transversales des micrographies 3.44 à 3.47. Pour chaque nombre de manœuvres, nous avons évalué la surface de la partie saine observée sur la micrographie. La partie saine est celle exempt de fissure, ayant une microstructure composée d'Ag-SnO₂ non ségrégué. Les collerettes d'argent visibles en surface ne sont donc pas prises en compte. Le dommage microstructural est défini par :

$$D_{\text{micro}} = (S - S^{\sim}) / S \quad (3.1)$$

avec : S : surface totale de la pastille,

S^{\sim} : surface de la partie non endommagée.

Notons qu'en réalité, la surface S varie en cours d'essai (du fait de la perte de masse) mais qu'elle est considérée comme étant une surface idéalisée correspondant aux observations micrographiques sur des contacts n'ayant subi aucun essai (figure 3.54). La détermination de S^{\sim} est malaisée.

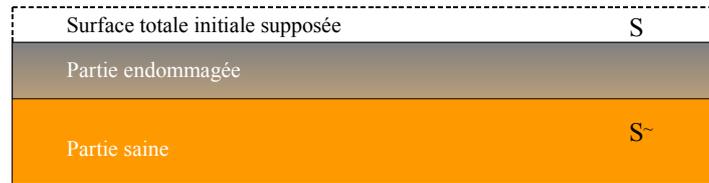


Figure 3.54. Représentation des surfaces utilisées dans le calcul du dommage microstructural

La courbe des différents dommages est donnée à la figure 3.55.

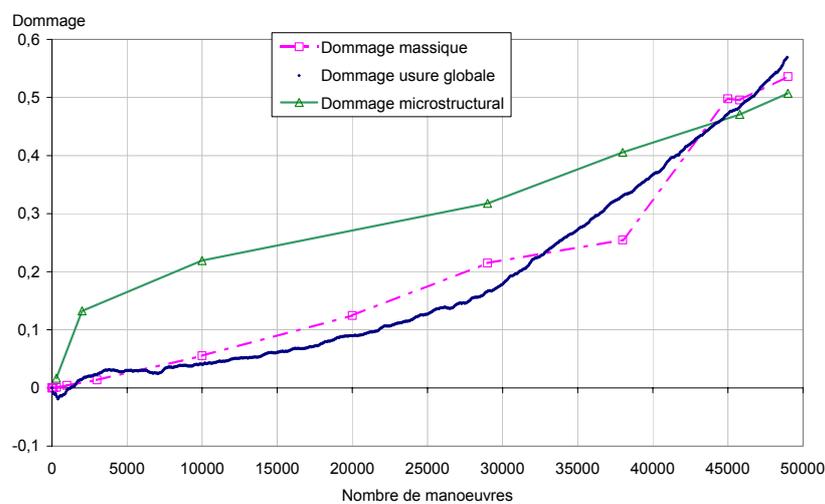


Figure 3.55. Evolution du dommage massique, du dommage d'usure et du dommage microstructural en fonction du nombre de manœuvres au cours d'un essai « Locomotive »

La représentation du dommage microstructural en fonction du nombre de manœuvres conduit à la mise en évidence de deux régimes. Aux faibles nombres de manœuvre, la surface du contact est altérée. Cela conduit à une augmentation rapide du dommage. Aux nombres de manœuvres élevés, les deux principaux types d'endommagement sont la formation de fissures macroscopiques et l'arrachement de blocs. L'arrachement de blocs est pris en compte dans l'évaluation du dommage mais la fissuration, qu'elle soit microscopique ou macroscopique, est faiblement prise en compte en raison de la faible surface des fissures.

Ce critère de dommage caractérise des phénomènes différents des deux derniers. Ces indicateurs caractérisent l'ensemble de la pastille : ce sont des indicateurs d'usure globale. Le dommage microstructural caractérise une usure microscopique mesurée localement. Il est difficile sur une micrographie d'évaluer la surface occupée par les fissures, la surface occupée par la ségrégation et la surface résultant d'une altération de la structure.

3.3.4.5 Dommages de fissuration

Nous nous sommes finalement intéressés à un dommage plus spécifique de la fissuration. Une fissure se caractérise par sa longueur à partir de la surface et de la distance à l'interface. La figure 3.56 représente le nombre de fissures en fonction de leur longueur et du nombre de manœuvres.

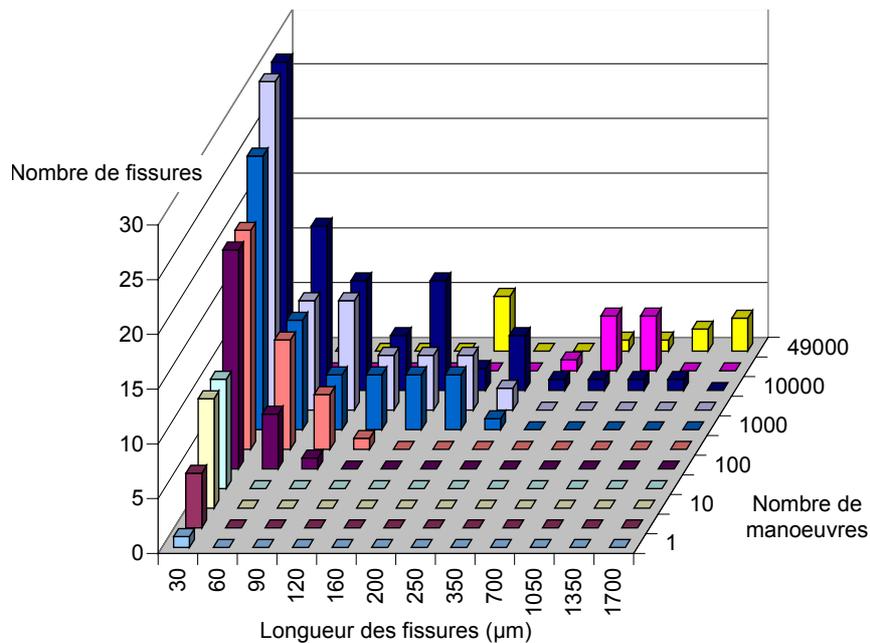


Figure 3.56. Evolution du nombre de fissures en fonction du nombre de manœuvres et de la classe de longueur considérée.

On constate sur le graphique que l'on a une augmentation de la longueur des plus grandes fissures avec l'augmentation du nombre de manœuvres. On a aussi, à partir de 10 000 manœuvres, quand une fissure au minimum a une longueur comparable à l'épaisseur de la pastille, une augmentation du nombre de fissures appartenant à la classe de fissures longues. La fissuration continue donc même après que la structure ait été ruinée. Dans la plupart des phénomènes de fatigue thermique, la fissure cesse de se propager au delà d'une certaine longueur. Les contraintes thermomécaniques sont alors insuffisantes pour permettre la propagation. Dans notre cas, la fissuration continue : l'endommagement des contacts électriques par propagation des fissures de fatigue est un phénomène atypique. Le nombre de petites fissures augmente avec le nombre de manœuvres jusque vers 10 000 manœuvres. C'est un profil typique de faïençage thermique. Au delà de 10 000 manœuvres, les petites fissures disparaissent. La figure 3.57 représente la longueur moyenne du ligament (épaisseur de la pastille exempt de fissures) en fonction du nombre de manœuvres.

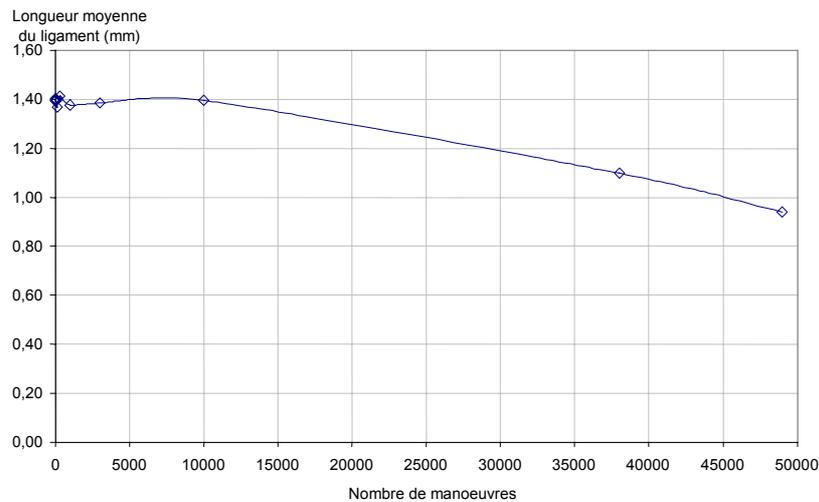


Figure 3.57. Evolution de la longueur moyenne du ligament en fonction du nombre de manœuvres

La longueur a été à chaque fois mesurée perpendiculairement à la sous-couche. On constate qu'elle est globalement constante pour $N < 10\,000$ manœuvres et qu'elle diminue fortement pour des nombres de manœuvres supérieurs à 10 000. Le faible nombre de petites fissures pour le deuxième régime s'explique donc par le fait que le contact a été pelé sur une épaisseur de l'ordre de la longueur des petites fissures du premier régime.

Le dommage de fissuration est défini par la relation :

$$D_{\text{fiss}} = 1 - h_{\text{mini}} / h_{\text{local}} \quad (3.2)$$

Avec h_{mini} : distance minimale entre la pointe de la fissure la plus développée et la sous-couche de la pastille.

h_{local} : épaisseur de la pastille en ce point.

La représentation schématique de ce type de défaut est donné à la figure 3.58.

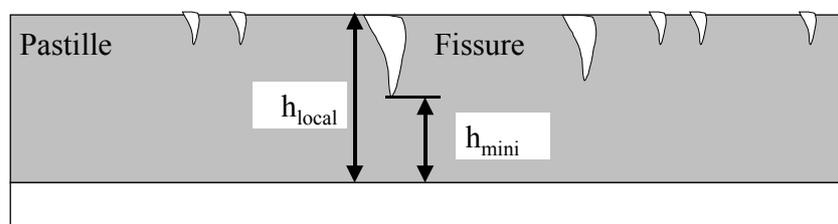


Figure 3.58. Définition de h_{local} et h_{mini}

L'évolution de D_{fiss} est donnée à la figure 3.59. Sur le même graphique est indiqué le nombre de fissures. On voit apparaître les deux régimes : aux faibles nombres de manœuvres (inférieurs à 5 000

manœuvres), on a de la fissuration microscopique avec un grand nombre de fissures de faible longueur. Aux nombres de manœuvres élevés (supérieurs à 5 000 manœuvres), on a de la fissuration macroscopique avec un faible nombre de fissures de grande longueur. La transition entre la fissuration microscopique et la fissuration macroscopique est rapide : elle se situe entre 3 000 et 6 000 manœuvres.

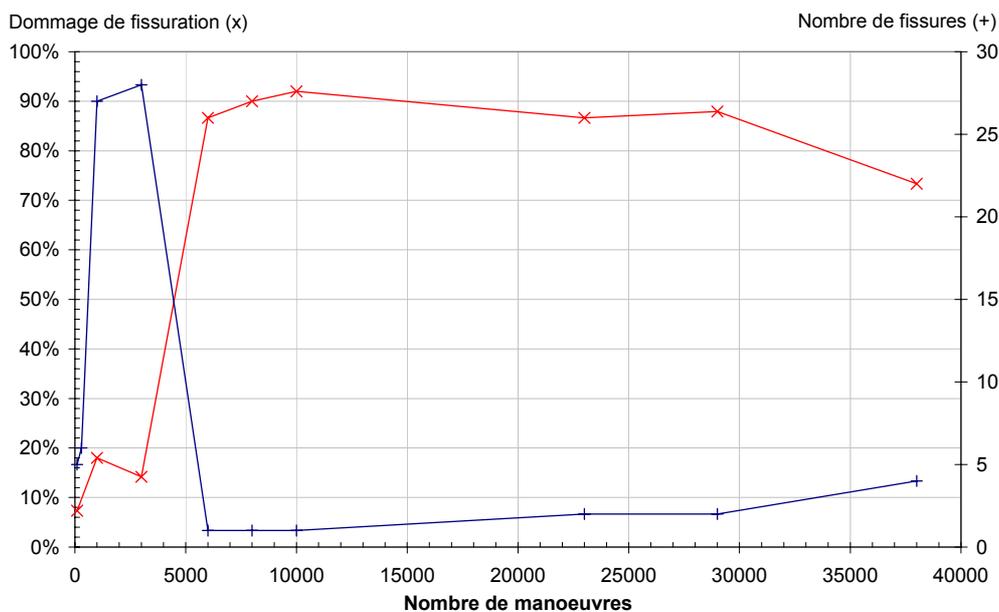
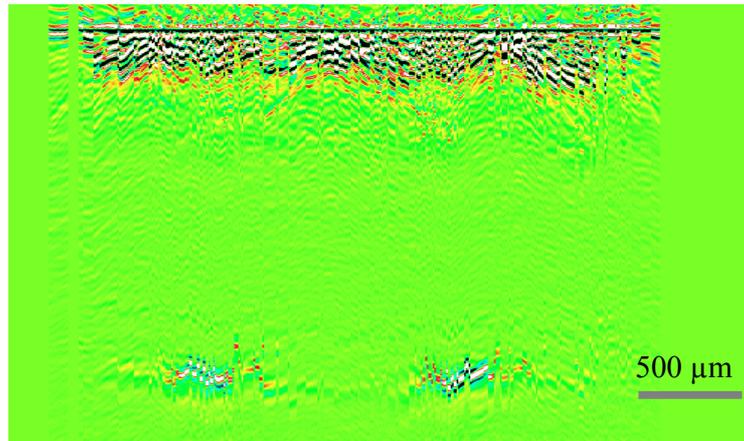


Figure 3.59. Evolution du critère de dommage D_{fiss} et du nombre de fissures au cours d'un essai « Locomotive »

Nous allons donc considérer que le mode d'endommagement dominant est la propagation des fissures thermomécaniques microscopiques puis macroscopiques. Nous avons donc retenu D_{fiss} .

La définition que nous avons prise privilégie la plus grande fissure. Compte tenu de la dispersion d'un échantillon à l'autre (il s'agit d'échantillons différents subissant des nombres de manœuvres différents), le dommage de fissuration tend à diminuer alors que le nombre de grandes fissures augmente de 1 à 4 : les pastilles dissipent donc de l'énergie par la fissuration. Il serait donc préférable de prendre comme paramètre de dommage la longueur de fissures cumulée mais les petites fissures, extrêmement difficiles à mesurer, rendent la détermination de la valeur de ce paramètre difficile.

Nous avons fait des essais avec un microscope à ultrasons doté d'une grande résolution spatiale. Nous avons effectué des B-Scans (coupes perpendiculaires à la surface de contact) et des C-scans (coupes parallèles à la surface de contact) de pastilles de contact après essai. La réalisation de ces essais est très difficile en raison de la surface très perturbée des contacts et des échos ultrasons dus à la forme ronde des pastilles. Nous avons corrélé les observations ultrasonores avec des sections réalisées au même endroit. La photographie 3.60 représente le B-Scan (coupe perpendiculaire à la surface de contact) d'un contact ayant subi 3 000 manœuvres.



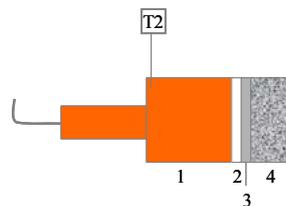
Photographie 3.60. B-scan d'un contact en Ag-SnO₂ ayant subi 3 000 manœuvres

On constate que le contact présente une surface très perturbée mais que la structure semble relativement saine avec toutefois la présence d'une zone perturbée à environ 500 μm de la surface. Il semblerait d'après les corrélations que ce soit une fissure. Il est alors possible de dire que ce contact est dans son histoire au moment de la transition faïençage thermique – fissuration macroscopique. L'analyse de ces résultats est toutefois trop délicate pour constituer une preuve irréfutable. Nous n'avons pas non plus obtenu de résultat correct par tomographie X du fait de la forte masse des atomes d'argent.

Pour mener à bien une modélisation de cette fissuration, nous avons besoin de caractériser l'évolution de la température dans les contacts afin d'identifier un modèle thermique.

3.3.5. Evolution de la température au cours d'un essai

GAUDEMET a réalisé un suivi de la température dans un contact subissant un essai ouverture (figure 3.61).

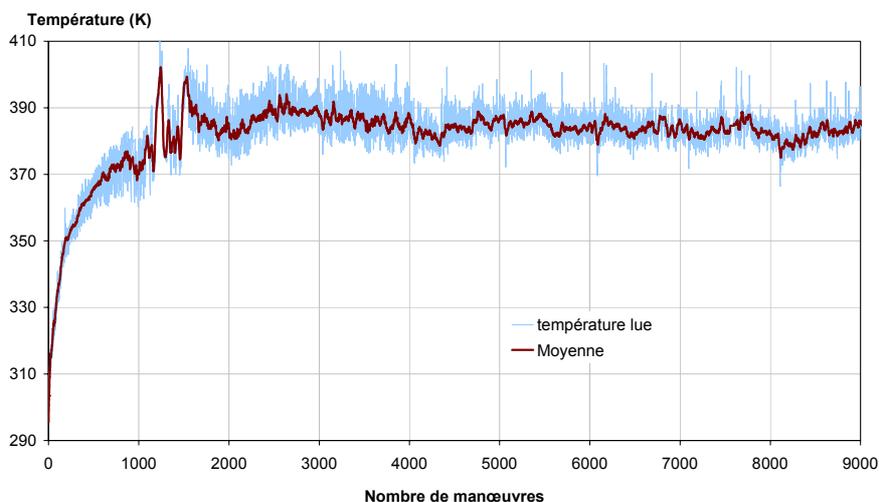


Vue d'un contact de contacteur :

- 1 : rivet en cuivre (support)
- 2 : brasure
- 3 : sous-couche d'argent
- 4 : pastille de contact en Ag-SnO₂
- T2: thermocouple

Figure 3.61. Implantation du thermocouple

La courbe de température est donnée à la figure 3.62.



Figures 3.62. Evolution de la température du contact en Ag-SnO₂ en cours d'essai

La température varie de manière importante en début d'essai (jusqu'à 1 500 manœuvres). Cela est dû à l'énergie aléatoire de l'arc : plusieurs arcs de forte énergie peuvent faire augmenter considérablement la température (comme on le constate au bout de 1200 manœuvres). On note une augmentation finale de température de 87 K et une stabilisation de la température au bout de 1800 manœuvres environ.

Nous avons réalisé des mesures de température à l'aide de thermocouples collés dans les contacts. Nous n'avons pas pu implanter de thermocouple à proximité immédiate de la zone affectée en raison du caractère destructeur de l'arc électrique. Ils étaient à un ou plusieurs millimètres de la zone d'impact de l'arc. Cet éloignement de la mesure de température par rapport à la source de chaleur rend difficile l'évaluation du champ de température dans un contact en cours d'essai. Il faudrait donc coupler ces mesures avec des mesures de température en surface des contacts au niveau de la zone d'impact pour avoir une idée claire de la forme des isothermes. Nous ne sommes pas parvenus à faire des mesures pyrométriques de la température de la zone d'impact de l'arc. Cela est dû au caractère aléatoire de l'arc électrique, d'une part, et aux spécificités de l'essai « locomotive » d'autre part. Il est cependant possible avec les mesures effectuées d'estimer l'énergie reçue par les contacts.

Nous avons ensuite caractérisé l'évolution de la microstructure des contacts en cours d'essai grâce à des sections transverses de contacts. Le caractère destructeur des sections nous conduisait à utiliser à chaque fois un couple de contacts différents. Or, la microstructure des contacts peut varier d'un spécimen à l'autre du fait du procédé de fabrication ou de l'histoire propre du contact. Il peut être utile de compléter ces mesures par des procédés de contrôle non destructif. Nous n'avons pas trouvé de système permettant d'avoir de manière claire l'évolution de la microstructure en 3 dimensions ou au minimum suivant des coupes.

En ce qui concerne les estimateurs d'endommagement, les deux premiers estimateurs (le dommage d'usure et de masse) sont très régulièrement utilisés dans le domaine des contacts électriques. Les estimateurs choisis sont classiques en mécanique de l'endommagement mais le sont moins dans le