



HAL
open science

Détection et étude de micro-déplacements des contacts sous contrainte vibratoire et leurs conséquences sur les matériaux et revêtements des connecteurs-automobiles

Julien Labbé

► To cite this version:

Julien Labbé. Détection et étude de micro-déplacements des contacts sous contrainte vibratoire et leurs conséquences sur les matériaux et revêtements des connecteurs-automobiles. Matériaux. Université de Rennes; Rennes 1, 2017. Français. NNT : 2017REN1S146 . tel-01827666

HAL Id: tel-01827666

<https://theses.hal.science/tel-01827666>

Submitted on 2 Jul 2018

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.

THÈSE / UNIVERSITÉ DE RENNES 1

sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

pour le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1

Mention : Physique

Ecole doctorale SDLM

présentée par

Julien Labbé

Préparée à l'unité de recherche UMR6251 - IPR
Institut de Physique de Rennes
Département Physique Moléculaire (Equipe CPE)

**Détection et étude de
micro-déplacement des
contacts sous
contrainte vibratoire et
leurs conséquences
sur les matériaux et
revêtements des
connecteurs
automobiles**

**Thèse soutenue à l'université de
Rennes1 le 17 juillet 2017**

devant le jury composé de :

François Robbe-Valloire

Professeur des Universités, ISMP (Supméca Paris)/
rapporteur

Luc LAVISSE

Maître de Conférence, Université de Bourgogne Franche-
Comté/ *rapporteur*

Tayeb MOHAMMED BRAHIM

Professeur des Universités, IETR / *examineur*

Mariko DUNSEATH-TERAO

Professeur des Universités, Université de Rennes1 /
examineur

Noureddine BEN JEMÂA

Expert externe, Société Contelec / *examineur*

Florence LE STRAT

Ingénieur de recherche, Entreprise Renault/
examineur

Rochdi EL ABDI

Professeur des Universités, Université de Rennes1 /
directeur de thèse

Erwann CARVOU

Ingénieur de recherche, Université de Rennes1/
co-directeur de thèse

THÈSE / UNIVERSITÉ DE RENNES 1

sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

pour le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1

Mention : Physique

Ecole doctorale SDLM

présentée par

Julien Labbé

Préparée à l'unité de recherche UMR6251 - IPR
Institut de Physique de Rennes
Département Physique Moléculaire (Equipe CPE)

**Détection et étude de
micro-déplacement des
contacts sous
contrainte vibratoire et
leurs conséquences
sur les matériaux et
revêtements des
connecteurs
automobiles**

**Thèse soutenue à l'université de
Rennes1 le 17 juillet 2017**

devant le jury composé de :

François Robbe-Valloire

Professeur des Universités, ISMP (Supméca Paris)/
rapporteur

Luc LAVISSE

Maître de Conférence, Université de Bourgogne Franche-
Comté/ *rapporteur*

Tayeb MOHAMMED BRAHIM

Professeur des Universités, IETR / *examineur*

Mariko DUNSEATH-TERAO

Professeur des Universités, Université de Rennes1 /
examineur

Noureddine BEN JEMÂA

Expert externe, Société Contelec / *examineur*

Florence LE STRAT

Ingénieur de recherche, Entreprise Renault/
examineur

Rochdi EL ABDI

Professeur des Universités, Université de Rennes1 /
directeur de thèse

Erwann CARVOU

Ingénieur de recherche, Université de Rennes1/
co-directeur de thèse

Remerciements

Je tiens tout d'abord à fortement remercier mes encadrants. Florence et Cécile, de l'alliance Renault-Nissan, m'ont apporté de nombreux conseils, notamment en lien avec des problématiques d'ingénierie. Cela a été un véritable plaisir de travailler à vos côtés pendant ces années de thèse. Ton enthousiasme sans faille, Cécile, m'a beaucoup aidé tout au long de ce travail. Erwann et Rochdi ont encadré ma thèse au sein du laboratoire de l'institut de Physique de Rennes 1 avec succès. Je remercie très sincèrement Erwann pour sa disponibilité et ses conseils avisés qui m'ont permis de réaliser cette thèse. Erwan, les heures de travail à tes côtés, rythmées par tes humeurs et tes blagues incroyablement pourries resteront pour moi de joyeux et sympathiques souvenirs.

Je remercie toutes les personnes qui ont aidé précieusement au déroulement de cette thèse, avec notamment un très grand merci à Loïc, Luc et Pascal et également Ewenn, Jean-René, Jonathan, Daniel, les Nathalie's... Je remercie mes rapporteurs et le jury de ma thèse qui ont apporté une contribution primordiale dans la finalisation du manuscrit.

J'ai pu réaliser cette thèse dans un laboratoire chaleureux, où l'on arrive avec le sourire, le tout accompagné de discussions enrichissantes, amicales et drôles autour d'un café ou d'un sandwich, avec Elsa, Sofiane, le maitre jedi Hans, Jean-Luc, Kevin, Jonathan, Abdou, Sophie, Robert, Sébastien, Ian, Ludovic, Nour... en espérant penser à tout le monde.

Je remercie amoureusement ma compagne, Anne et notre petit bonhomme Sacha. Du haut de leurs 164 et 60 (petits) centimètres, ils m'ont aidé, encouragé, supporté, cageolé... Leur soutien m'a été plus que précieux durant ces années de thèse. Je remercie mon père, à qui je dédie cette thèse, ma mère, ma p'tite soeur, mes grand-parents et toute ma famille pour leurs encouragements dans mon parcours disons...pas vraiment hyper droit. Je remercie mes potes : Doudou, Marco, Aline, Victor, Chaton, Sophie en re-lectrice attentionnée, Fabinou, la taupe et beaucoup d'autres pour ces moments très très importants "hors" thèse.

Résumé

Les vibrations issues du fonctionnement d'un véhicule automobile (moteur, route) sont transmises aux connecteurs électriques. Ces vibrations peuvent induire des déplacements relatifs entre certains des composants du connecteur à l'interface de contact. Les éléments en contact sont de diverses formes et diverses natures dont une partie femelle (dite clip) dans laquelle s'introduit une partie mâle (dite languette). Or, un déplacement relatif de quelques micromètres entre le clip et la languette est suffisant pour dégrader et ce de manière irréversible, l'interface de la zone de contact électrique (phénomène de fretting-corrosion). Il est donc nécessaire de connaître le comportement vibratoire interne d'un connecteur i.e. des connectiques pour préconiser sa meilleure utilisation au sein d'un véhicule.

Un banc d'essai sur pot vibrant a été réalisé dans le but de caractériser le comportement vibratoire d'un connecteur soumis à un profil vibratoire. Les mesures ont été réalisées par tribométrie en réalisant des orifices d'accès au clip et à la languette. De là, l'analyse des vibrations induites a mis en évidence des directions de déplacement multi-axiales des composants du connecteur et notamment celles d'un support du clip dit porte-clip, et ce malgré une vibration dont la direction est mono-axiale. L'analyse a également mis en évidence une correspondance vibratoire entre le clip et le porte-clip ainsi que des phénomènes de résonance. De là, une première approche sur une modélisation numérique, basée sur un système masse-ressort-amortisseur, a été proposée. Cette analyse permet de caractériser le comportement vibratoire général d'un connecteur sans dépendre du type de vibration appliquée. C'est une nouvelle approche dans la caractérisation de connecteurs électriques utilisés dans l'industrie automobile.

Les éléments en contact d'un connecteur sont revêtus de matériaux qui les protègent des dégradations mécaniques et chimiques. Ces revêtements (de quelques micromètres d'épaisseur) peuvent être des matériaux nobles (or, argent, ...) ou non nobles (étain, ...). Le déplacement relatif entre un clip étamé et une languette étamée engendre la formation d'un troisième corps à l'interface de contact. Ce troisième corps est composé de débris oxydés qui perturbent la conduction des charges électriques. L'utilisation d'une atmosphère de di-azote (N₂) et l'analyse de la tension de contact en fonction de l'emplacement du clip par rapport à la languette ont mis en évidence la dynamique des débris oxydés avec notamment leur évacuation hors de la zone de contact. De plus, l'analyse d'une zone de contact dégradée à la microsonde nucléaire a permis de doser l'oxygène et de mettre en valeur deux types d'oxydes de cuivre. Ces caractérisations permettent de mieux comprendre le phénomène de fretting-corrosion et ses conséquences.

Table des matières

1	État de l’art et généralités sur les contacts électriques d’un connecteur	3
1.1	Théorie sur le contact électrique statique	5
1.1.1	Présentation des composants d’un connecteur	5
1.1.2	Aires de contact	6
1.1.3	Résistance électrique de contact	8
1.1.4	Passage des charges électriques à travers la zone de contact	11
1.1.5	Matériaux à l’usage des contacts électriques	12
1.1.6	Paramètres influençant la conduction	17
1.1.7	État de surface d’une zone de contact sous l’application d’une charge	21
1.2	Dégradation d’une zone de contact sous sollicitation vibratoire	22
1.2.1	Fretting-corrosion	22
1.2.2	Évolution de tension/résistance de contact sous sollicitation vibratoire	24
1.2.3	Notion de glissement	28
1.2.4	Paramètres influençant le fretting-corrosion	34
1.2.5	Analyses de surface	41
1.2.6	Modélisation numérique du fretting-corrosion	44
1.3	Vibrations-induites au sein des connecteurs	45
1.3.1	Étude mécanique d’un contact (clip/languette) et modélisation mécanique.	46
1.3.2	Comportement électrique d’un connecteur	49
1.3.3	Étude des connecteurs sur véhicule	51
1.4	Conclusion	52
2	Mesures expérimentales des vibrations induites au sein d’un connecteur et leurs conséquences sur l’état de surface des connectiques	53
2.1	Présentation des échantillons	55
2.2	Présentation des dispositifs expérimentaux	59
2.2.1	Sources vibratoires	59
2.2.2	Appareils de mesure	60
2.3	Résultats expérimentaux : étude du comportement vibratoire d’un connecteur soumis à des micro-vibrations	63
2.3.1	Définition de la plage fréquentielle d’utilisation de l’actionneur piézo-électrique	63
2.3.2	Mesures vibratoires - Porte-échantillon 1	64
2.3.3	Mesures électriques - Porte-échantillon 1	65
2.3.4	Mesures vibratoires - Porte-échantillon 2	67
2.4	Résultats expérimentaux : étude du comportement vibratoire d’un connecteur soumis à un profil vibratoire de type véhicule	68
2.4.1	Connecteur RH-PCPL	69
2.4.2	Connecteur PMH-GTS	73
2.4.3	Conclusion sur le comportement vibratoire des connecteurs RH-PCPL et PMH-GTS soumis à un profil vibratoire	75
2.5	Mesures électriques et analyse des surfaces des connecteurs soumis à un profil vibratoire	76
2.5.1	Mesures électriques	76
2.5.2	Analyses de surface	79
2.5.3	Conclusion des mesures électriques et des analyses de surface	82
2.6	Conclusion	82

3	Analyse des mesures expérimentales et mise au point d'un modèle numérique	85
3.1	Analyse des déphasages et des déplacements relatifs	88
3.1.1	Connecteur RH-PCPL	89
3.1.2	Connecteur PMH-GTS	93
3.1.3	Conclusion sur l'analyse des déphasages et des déplacements relatifs des connecteurs RH-PCPL et PMH-GTS	95
3.2	Analyse des fonctions de transfert	96
3.2.1	Connecteur RH-PCPL	97
3.2.2	Connecteur PMH-GTS	100
3.2.3	Conclusion sur l'analyse des fonctions de transfert des connecteurs	102
3.3	Mise en place d'un modèle numérique	103
3.3.1	Mise en place d'un modèle de type masse-ressort-amortisseur	104
3.3.2	Connecteur RH-PCPL - Vibration parallèle à l'axe de la languette	105
3.3.3	Connecteur RH-PCPL - Vibration orthogonale à l'axe de la languette	107
3.3.4	Détermination des déplacements relatifs entre le clip et la languette à partir des fonctions de transfert et du modèle numérique	108
3.3.5	Conclusion sur l'utilisation d'un modèle masse-ressort-amortisseur	111
3.4	Utilisation du vibromètre sur un banc d'essai Renault	112
3.5	Conclusion	113
4	Étude du comportement électrique et analyse de surface d'un contact étamé sous sollicitation vibratoire	116
4.1	Caractérisation d'une trace de fretting corrosion par la micro-sonde nucléaire	118
4.1.1	Présentation des régions analysées	118
4.1.2	Analyse des régions de la zone de contact	120
4.1.3	Simulation numérique	123
4.1.4	Conclusion sur l'analyse d'une zone de contact par la micro-sonde nucléaire	128
4.2	Etude du fretting-corrosion par changement d'atmosphère	129
4.2.1	Échantillons et procédés expérimentaux	129
4.2.2	Résultats sous enceinte	130
4.2.3	Étude de la dynamique du comportement électrique	136
4.3	Analyse spatio-temporelle du signal électrique	142
4.3.1	Présentation des échantillons et des conditions expérimentales.	143
4.3.2	Cartographie en fonction de la valeur de la tension de contact	143

Introduction Générale

Dans le domaine automobile, la connectique électrique est un ensemble de connecteurs et de fils qui relient les différents modules d'un véhicule. Ce réseau permet la transmission de signaux associés à une instruction ou une énergie électrique. Par conséquent, il est primordial que ces informations soient transmises sans endommagement. Toutefois, les connecteurs doivent résister à des conditions d'utilisation sévère, notamment issues des sollicitations vibratoires. En effet, un mouvement relatif de faible amplitude entre deux contacts métalliques d'un connecteur peut provoquer la formation de particules. Ces particules, issues des métaux en contact, forment un ensemble appelé troisième corps. Ce type d'usure est le fretting, il est à la fois sévère et définitif.

Le type de matériaux en contact est un des paramètres importants. Il s'agit soit d'un matériau non-noble soit d'un matériau noble. Dans le premier cas, l'oxydation du troisième corps intervient au contact de l'oxygène de l'atmosphère. Par conséquent, les particules deviennent d'une part abrasives ce qui accroît la dégradation mécanique de l'interface sous sollicitation vibratoire, et d'autre part électriquement isolantes ce qui accroît la dégradation électrique. Il s'agit d'une dégradation par fretting-corrosion. Dans le deuxième cas, un matériau noble offre une bonne résistance à la dégradation au fretting. De plus, il possède des propriétés de conduction électrique intéressantes. Toutefois, les particules de matériaux nobles peuvent-être éjectées sous sollicitation vibratoire, laissant apparaître un substrat oxydable.

Le type de sollicitation définit le degré de dégradation au cours du temps. En effet, un mouvement rapide dégradera moins l'interface qu'un mouvement lent. De plus, un connecteur subira différents types de vibrations suivant qu'il soit placé proche du moteur ou bien dans l'habitacle. Dès lors, l'enjeu majeur est de prédire la durée de vie d'un connecteur suivant ses caractéristiques physico-chimiques (matériaux, environnement...) et son positionnement au sein du véhicule (source vibratoire). Il existe de nombreuses études académiques sur le comportement électrique des matériaux soumis à une sollicitation vibratoire contrôlée. Néanmoins, les mouvements d'un connecteur sur les contacts métalliques dépendent de nombreux facteurs : la forme du connecteur, le type de source vibratoire... Ces informations doivent être prises en compte dans la préconisation de durée de vie d'un connecteur.

Cette thèse est réalisée dans le cadre d'une collaboration entre la société Renault et l'Institut de Physique de Rennes (département de physique moléculaire). L'objectif principal de mon travail a été de mettre en place un banc d'essai pour caractériser le comportement vibratoire de chaque composant de connecteurs (extérieur/intérieur). Pour cela, un moyen de mesure innovant, basé sur l'effet Doppler, a été utilisé dans le domaine de la connectique. Cela a permis de déterminer le comportement au sein d'un connecteur i.e. l'interface entre les connectiques métalliques et donc de préconiser l'utilisation d'un connecteur. Une seconde partie de mon travail s'est orientée sur l'analyse du comportement électrique de connectique et d'analyse de surface.

Dans le premier chapitre de ce manuscrit, un contact électrique est tout d'abord décrit en indiquant ces différentes caractéristiques (aires de contact, matériaux utilisés...). Ensuite, la dégradation d'une zone de contact par fretting-corrosion est expliquée en indiquant les causes et les conséquences physico-chimiques de ce phénomène. Enfin, nous verrons comment ce phénomène de dégradation peut se transmettre au sein d'un connecteur par les vibrations induites.

Le deuxième chapitre concerne tout d'abord l'analyse de surface par une micro-sonde nucléaire. Ce moyen d'analyse est novateur dans le domaine des contacts électrique. Cela a permis de mettre en avant différents types d'oxydes à l'interface. Ensuite, une première analyse de la dégradation électrique a mis en évidence une forte dynamique d'éjection des débris sous sollicitation vibratoire. Pour cela, des alternances d'atmosphères oxydante et inerte ont été utilisée. Enfin, une seconde analyse de la dégradation électrique en utilisant des paramètres spatial (le long d'une piste de fretting) et temporel ont mis en évidence des zones stables de fortes et de faibles dégradations sur une zone de contact soumis à des sollicitations vibratoires.

Le troisième chapitre concerne la mise en place des bancs d'essai et les modèles concernant les comportement vibratoires des connecteurs. Les résultats mettent en évidence le lien entre la vibration externe d'un connecteur, i.e. accessible visuellement et la vibration interne d'un connecteur. De ce fait, il est permis de définir des plage fréquentielles où une dégradation mécanique et électrique de la zone de contact est possible sous l'application d'amplitude de vibration prédéfinie par un profil vibratoire.

Le dernier chapitre utilise les résultats du troisième chapitre pour mettre en place une analyse plus générale en utilisant tout d'abord les fonctions de transfert puis en élaborant une première approche d'une modélisation numérique du comportement vibratoire. De ce fait, il est possible de définir le comportement vibratoire du connecteur.

Chapitre 1

État de l'art et généralités sur les contacts électriques d'un connecteur

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux caractéristiques d'un contact électrique. L'objectif est de mieux comprendre les problématiques et les enjeux pour améliorer la fiabilité des connecteurs. Tout d'abord, il est nécessaire de comprendre la conduction des charges à travers un contact statique. Ensuite, nous verrons les dégradations par fretting-corrosion issues de sollicitations vibratoires. Enfin, nous verrons l'influence des connecteurs et notamment leurs vibrations induites sur les contacts métalliques.

1.1 Théorie sur le contact électrique statique

1.1.1 Présentation des composants d'un connecteur

Un connecteur est composé d'un porte-clip et d'un porte-langue. Ces dispositifs comportent des enveloppes mécaniques qui englobent le ou les contacts métalliques, voir figure 1.1.

- L'enveloppe mécanique assure d'une part le maintien de la connexion entre le porte-clip et le porte-langue par un système d'attache et d'autre part constitue une protection environnementale des contacts métalliques (humidité, vibration...).
- Le contact métallique se réalise entre le clip et la languette. Le clip assure une force de contact sur la languette. Cette force assure le maintien de la connexion et le passage du courant à travers une zone de contact, voir figure 1.2.

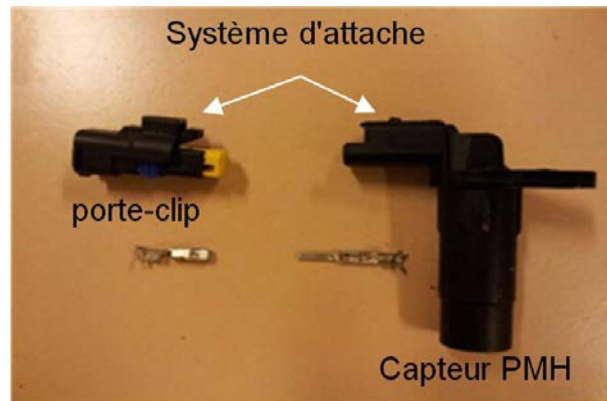


FIGURE 1.1 – Photographie d'un clip et d'une languette de type Sicma 2 associés au porte-clip et un capteur PMH.

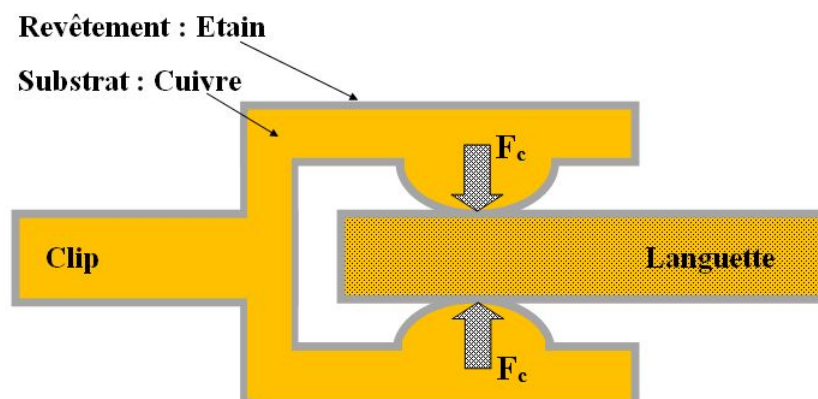


FIGURE 1.2 – Schéma d'un contact métallique par deux points. La force de contact F_c assure le maintien d'une zone de contact entre le clip et languette. Ces derniers sont généralement composés d'un substrat recouvert d'un revêtement protecteur.

1.1.2 Aires de contact

La conduction du courant se fait via le contact entre les matériaux du clip et ceux de la languette suite à la connexion d'un porte-clip et d'un porte-languette. Au sein de la zone de contact, on distingue deux types d'aires de contact, voir figure 1.3 :

- L'aire de contact mécanique représente l'ensemble de la zone de contact entre le clip et la languette. Sa superficie dépend de plusieurs facteurs qui sont d'une part géométriques (contact plan/plan, sphère/plan, circulaire...) et d'autres part physico-chimiques : l'état de surface (rugosité), la dureté du matériau, la présence d'oxydes...
- L'aire de contact électrique représente la surface par laquelle passe le courant. Elle est divisée en plusieurs spots de contact contenus dans l'aire de contact mécanique. La superficie totale de l'aire de contact électrique est plus petite que l'aire de contact mécanique. D'après Williamson [1], comparer ces deux aires revient à comparer la surface de l'Amérique du nord à celle d'un stade de football.

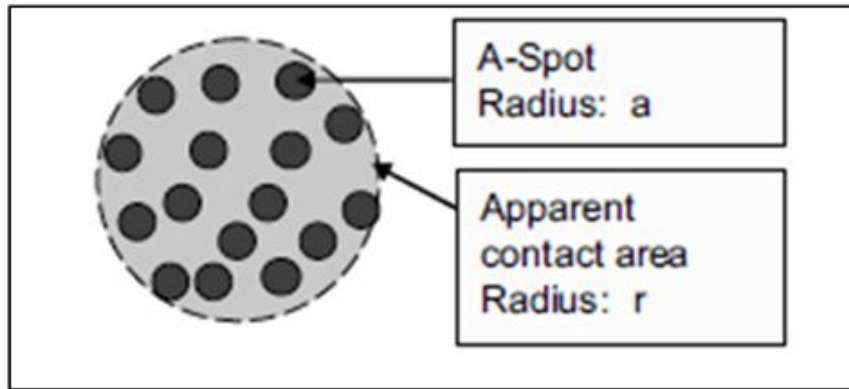


FIGURE 1.3 – Contact apparent/mécanique de rayon r et spots de contact de rayons a selon le modèle de Holm [2].

Pour un cas donné, il est évidemment impossible de connaître le nombre, les positions ou encore les dimensions de ces spots. Toutefois, des modèles de représentation et de calcul ont été mis en place pour définir ces paramètres et comprendre la conduction du courant à travers une zone de contact. Les principaux modèles sont ceux de Hertz et de Greenwood-Williamson.

Le modèle de Hertz

Hertz a mis au point cette modélisation des aires de contact en 1882 [3]. Il détermine une zone de contact circulaire de rayon a . Ce modèle est applicable si les matériaux suivent une loi de comportement élastique. Cependant, cette hypothèse ne correspond pas à la réalité. En effet, une force appliquée sur une petite aire de contact entraîne forcément des déformations plastiques dans la zone de conduction [4]. Le calcul revient donc à calculer l'aire de contact mécanique.

Les hypothèses suivantes sont également admises pour appliquer le modèle de Hertz :

- La force tangentielle est nulle.
- La surface est continue, homogène et isotrope.

L'équation 1.1 définit la méthode de calcul dans le cadre d'un contact sphère/plan ou sphère/sphère, voir figure 1.4. La valeur de l'aire de contact dépend du module d'Young E ou du module d'Young effectif E^* , de la force de contact F_C et du rayon de courbure R_S . Il est également admis que le rayon du spot de contact a est très inférieur au rayon de courbure de la sphère de contact r_s [3].

$$a = \left(\frac{3F_C R_S}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.1)$$

Le module d'Young E définit le paramètre intrinsèque du matériau en contact. Dans le cas où les matériaux sont différents, l'équation 1.2 permet le calcul du module d'Young effectif E^* . Ce calcul nécessitera l'utilisation des coefficients de Poisson ν_1 et ν_2 des deux matériaux en contact.

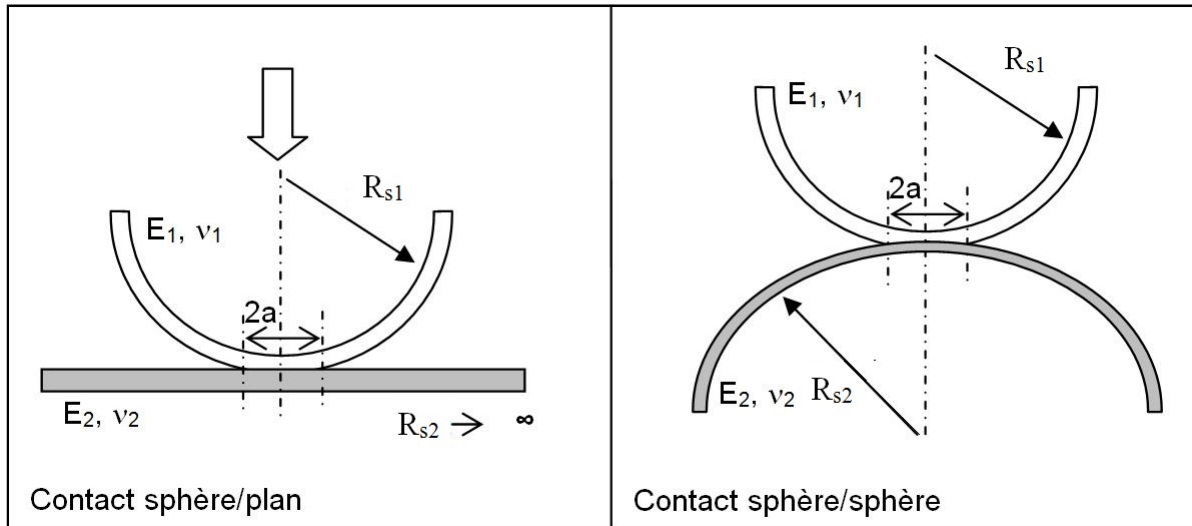


FIGURE 1.4 – Schéma de contact sphère/plan et sphère/sphère avec les caractéristiques géométriques et mécaniques (E : module d'Young et ν : coefficient de Poisson).

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (1.2)$$

Le type du contact est défini par la force F_C et le rayon de courbure R_S . L'équation 1.3 permet le calcul du rayon de courbure R_S voir figure 1.4. En général, le contact clip/languette est assimilé à un contact sphère/plan.

$$\frac{1}{R_s} = \frac{1}{R_{s1}} + \frac{1}{R_{s2}} \quad (1.3)$$

Le modèle de Greenwood et Williamson

A la différence du modèle de Hertz, Greenwood et Williamson [5] prennent en compte la rugosité et la plasticité des aspérités. La figure 1.5 schématise ce modèle qui met en contact une surface plane avec une surface rugueuse. Ce modèle admet l'hypothèse que la déformation d'une aspérité n'en affecte pas une autre.

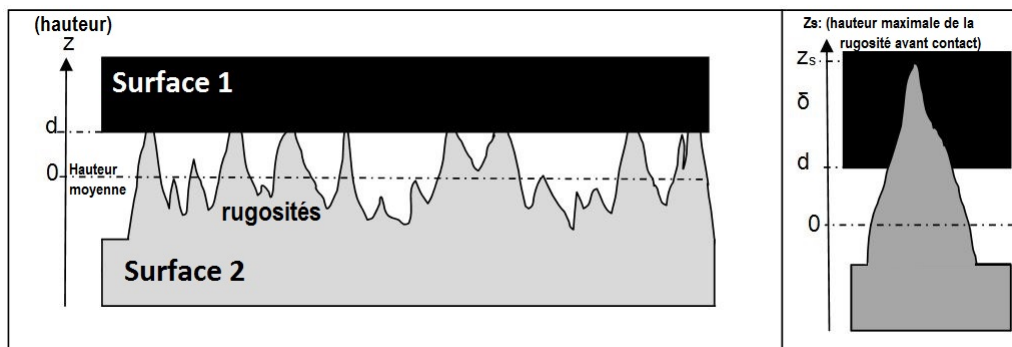


FIGURE 1.5 – Schéma d'un contact selon le modèle de Greenwood et Williamson en prenant en compte la rugosité seulement sur la surface 2.

Le calcul de l'aire de contact totale A est indiqué par l'équation 1.4. Cette valeur dépend du nombre d'aspérités n et de l'ensemble de leurs aires de contact $\sum A_i$, voir les équations 1.5 et 1.6.

$$A = N \int_d^\infty A(Z_S - d)\Theta(Z_S)dZ_S \quad (1.4)$$

— Le nombre d'aspérités en contact n est défini selon le nombre total d'aspérités N et une loi de probabilité en fonction de leurs hauteurs $\Theta(Z)$, voir équation 1.5.

$$n = N \int_d^\infty \theta(Z_S)dZ_S \quad (1.5)$$

— L'aire d'une aspérité A_i dépend de la différence de hauteur δ entre la hauteur maximale (Z_S) et la position de la surface plane (d), voir équation 1.6 et la figure 1.5.

$$A_i(\delta_i) = A_i(Z_S - d) = \pi a_i^2(\delta_i) \quad (1.6)$$

Le modèle de Greenwood et Williamson met en évidence l'importance de prendre en compte la plasticité d'un matériau. En effet, l'aire de contact double si le matériau suit une loi de déformation plastique au lieu d'une loi de déformation élastique. Les équations 1.7 et 1.8 résument le calcul de l'aire de contact suivant ces deux cas :

$$A_{\text{élastique}} = \pi\delta r \quad (1.7)$$

$$A_{\text{plastique}} = 2\pi\delta r \quad (1.8)$$

1.1.3 Résistance électrique de contact

La résistance de contact définit le type de conduction électrique à l'interface entre deux contacts. Dans le meilleur des cas, les charges électriques passent à travers des spots de conduction dont l'aire de contact totale est suffisamment grande pour que la résistance de contact soit la plus faible possible. Cependant, un contact peut être pollué, posséder un faible nombre de spots, subir des changements de phase d'un ou des matériaux, réagir chimiquement avec l'environnement... Autant de causes physico-chimiques qui auront pour conséquences d'améliorer, de diminuer voir d'empêcher la conduction du courant électrique. Il existe donc différents types de conduction/résistance électrique à l'interface du contact.

La résistance ohmique

Les charges électriques rencontrent des défauts localisés à travers un matériau conducteur. Cette résistance à la conduction est dite ohmique car elle dépend seulement des défauts intrinsèques dudit matériau. Sa valeur est généralement très faible pour les métaux. Cette résistance est à prendre en compte avant le contact.

L'équation 1.9 définit la résistance ohmique R_{Ohm} à travers un fil de longueur l et de surface S . La caractéristique électrique du matériau est définie par sa résistance linéaire ρ . La loi d'Ohm stipule que l'intensité I qui traverse un dipôle passif est liée à la différence de potentiels à ses bornes U par une relation linéaire, voir l'équation 1.10 :

$$R_{Ohm} = \rho \frac{l}{S} \quad (1.9)$$

$$U = R_{Ohm} \times I \quad (1.10)$$

La résistance de constriction

Les lignes de courant sont parallèles à travers une surface d'un matériau conducteur. Cependant, elles se resserrent pour passer à travers un spot de contact de rayon a , voir figure 1.6. Une résistance de constriction correspond donc à un rétrécissement des lignes du à une diminution de l'aire de contact électrique.

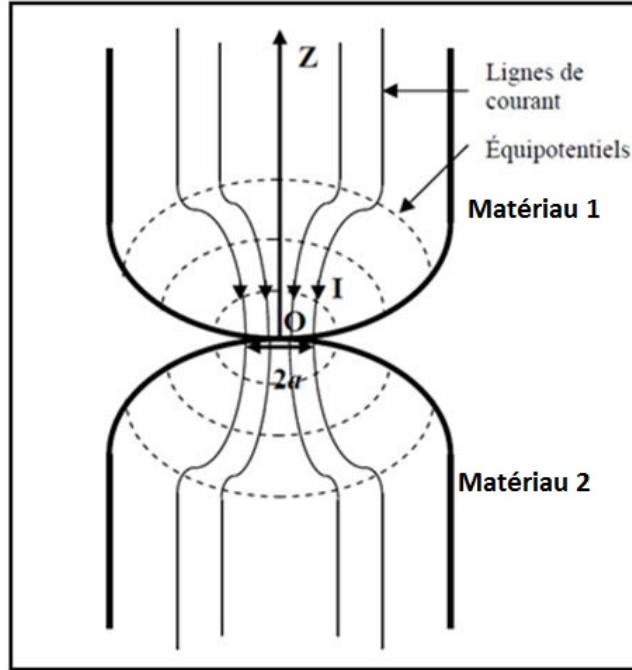


FIGURE 1.6 – Schéma du rétrécissement des lignes de courant à travers un spot de contact caractéristique d'une résistance de constriction entre deux matériaux.

En 1928, Holm s'est basé sur les équipotentiels orthogonaux aux lignes de courant et de formes cylindriques pour définir la valeur de la résistance électrique suivant l'axe verticale z , voir l'équation 1.11 [2]. Cette valeur dépend de la résistance linéaire ρ du matériau et du rayon a du spot de contact circulaire.

$$R_{Holm}(z) = \frac{\rho}{2\pi a} \arctan\left(\frac{z}{a}\right) \quad (1.11)$$

Son modèle est basé sur les hypothèses ci-dessous :

- La taille du spot est inférieure au rayon de la sphère tel que $z \gg a$.
- La taille du spot est supérieure au libre parcours moyen de l'électron tel que $a \gg l.p.m.$
- La déformation est purement élastique.

La première hypothèse simplifie l'équation 1.11 afin d'obtenir l'équation de la résistance de constriction 1.12. La conduction se réalise à travers deux matériaux en contact d'où le facteur 2.

$$R_{Holm,constr.1spot}(2a) = 2 \times \frac{\rho}{4a} = \frac{\rho}{2a} \quad (1.12)$$

En 1966, Greenwood [6] a mis en place un modèle multi-spots pour le calcul de la résistance de constriction. Contrairement au modèle de Holm, celui-ci prend en compte l'interaction entre n spots circulaires de rayon a_i ainsi que leur distance de séparation r_{ij} , voir l'équation 1.13. Les hypothèses de ce modèle sont les suivantes :

- Les spots sont éloignés les uns des autres, ils ne se touchent pas.
- La taille et la position des spots n'ont aucune corrélation.

$$R_{Greenwood,constr.multispot} = \frac{\rho}{2 \sum_i a_i} + \frac{\rho}{\pi n^2} \sum_{i \neq j} \sum_{j,i} \frac{1}{r_{ij}} \quad (1.13)$$

Il est difficile de connaître les caractéristiques géométriques de chaque spot. Pour cela, les deux hypothèses ci-dessous sont admises pour obtenir l'équation 1.14 :

- Les rayons des n spots de rayon sont constants et de valeurs a .
- L'ensemble des spots est compris dans un cercle de rayon R (type Holm). Le deuxième terme de cette équation exprime l'interaction entre les spots de contact.

$$R_{Greenwood,constr.multispot,simpl.} = \frac{\rho}{2\pi a} + \frac{\rho}{2R} \quad (1.14)$$

En 1995, des nouveaux modèles de calcul de la résistance de constriction se sont basés sur des spots de forme carrée, triangulaire ou encore rectangulaire [7]. Les équations 1.16 et 1.15 comparent le modèle de spots circulaires de Greenwood-Williamson au modèle de spots carré de Nakamura. Les résultats mettent en évidence une résistance de contact similaire pour un grand nombre de spots [8].

$$R_{Greenwood,circulaire} = 0,862 \times \frac{\rho}{R} \quad (1.15)$$

$$R_{Nakamura,carre} = 0,868 \times \frac{\rho}{L} \quad (1.16)$$

En résumé, la conduction à travers une résistance de constriction sera influencée soit par un grand nombre de spots, auquel cas la forme importe peu, soit par leurs formes, auquel cas le nombre de spots doit être faible. Par exemple, le tableau 1.1 reprend les valeurs de résistance de constriction pour un spot de $100 \mu m^2$ suivant différentes formes. Il illustre que la résistance électrique double entre un spot circulaire et un spot carré.

TABLE 1.1 – Exemple de calcul de la résistance de contact pour un spot de $100 \mu m^2$ suivant différentes formes [9].

Type	Remarque	Résistance
Circulaire	rayon de $5,64 \mu m$	$1,53 \cdot 10^{-3} \Omega$
Carré	$10 \mu m \times 10 \mu m$	$3,04 \cdot 10^{-3} \Omega$
Rectangulaire	$50 \mu m \times 2 \mu m$	$0,43 \cdot 10^{-3} \Omega$
Annulaire	rayon de $16,61 \mu m$	$0,71 \cdot 10^{-3} \Omega$

La résistance de Sharvin

La résistance de contact dite de Sharvin est applicable pour un spot de rayon inférieur à 100 nm , voir l'équation 1.17 [10]. Cette condition est due aux libres parcours-moyens électroniques du cuivre et de l'étain. Leurs valeurs sont respectivement égales à $38,7 \text{ nm}$ et $4,1 \text{ nm}$.

Le contact est de type balistique car le flux des charges électriques est très faible. Le modèle de calcul de la résistance électrique suit donc une distribution statistique de type Fermi-Dirac avec P_f le moment de Fermi, N la densité électronique et e la charge de l'électron [10] [11]. Sa valeur sera plus importante que la résistance de constriction.

$$R_{sharvin} = \frac{4P_f}{2N\pi e^2 a} \quad (1.17)$$

La résistance filmique/tunnel

Un métal peut réagir avec les réactifs environnementaux pour former un produit en surface. Généralement, il s'agit de l'oxygène de l'air avec la formation de composés oxydés (Cu_2O , $\text{SnO}_2\dots$) ou bien la formation de composés soufrés si l'atmosphère est polluée ($2\text{Ag} + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{Ag}_2\text{S} + \text{H}_2$). Pour l'étain, cuivre et le nickel, ce type de résistance atteste un état de surface électriquement dégradé. En effet, une fine couche oxydée en surface peut devenir :

- Semi-conductrice si l'épaisseur est de l'ordre de l'angström. Dans ce cas, les charges électriques doivent posséder une énergie suffisamment importante pour franchir cette fine couche. Cette dernière représente donc un GAP. La résistance de contact sera alors importante.

- Isolante si l'épaisseur est de l'ordre du nanomètre. La résistance de contact sera infinie. La conduction électrique est stoppée.

On remarquera que tous les oxydes ne sont pas forcément isolants. En effet, certains oxydes possèdent des caractéristiques de niveau de conduction, de valence et de Fermi telles que la conduction de charges électriques est possible. Par exemple, il est possible de doper un oxyde en remplaçant un cation par un autre cation de degré d'oxydation différent. De ce fait, une charge supplémentaire sera présente dans la structure du composé. Par conséquent, le niveau de Fermi se déplacera permettant le passage de charges électriques de la bande de valence vers la bande de conduction du composé dopé. Dans notre cas, les débris d'étain et de cuivre sont électriquement isolants.

1.1.4 Passage des charges électriques à travers la zone de contact

Le type de résistance de contact influence la manière de conduction du courant. En effet le rétrécissement des lignes du courant entraîne une répartition non-uniforme de la densité électrique sur la zone de contact. Par conséquent, l'augmentation des charges électriques sur une zone de contact spécifique modifie les paramètres intrinsèques du ou des matériaux en contact.

Répartition de la densité de courant à travers une zone de contact

Tsukiji [12] a mis en place un moyen original pour observer cette répartition de la densité électronique. L'expérience consiste à établir un contact entre une sonde en indium et un matériau semi-conducteur (n-GaP). Le passage du courant à travers la zone de contact du matériau semi-conducteur provoque l'émission d'une onde dans le visible. De ce fait, il est possible de localiser le passage des charges à travers un spot.

Les résultats sont enregistrés par une caméra, voir les figures 1.7 ci-dessous et la figure 1.8 de la page 12. La répartition de la densité de charge à travers un spot dépend de la présence ou non d'un film d'oxyde électriquement isolant :

- Sans film d'oxyde, la densité des charges électriques est plus importante en périphérie que sur la zone centrale et ce quel que soit la force de contact.
- Avec la présence d'un film d'oxyde, la densité des charges électriques est répartie de manière uniforme sur l'ensemble de la zone de contact. Pour cause, la conduction n'est plus de type multi-spots mais filmique.

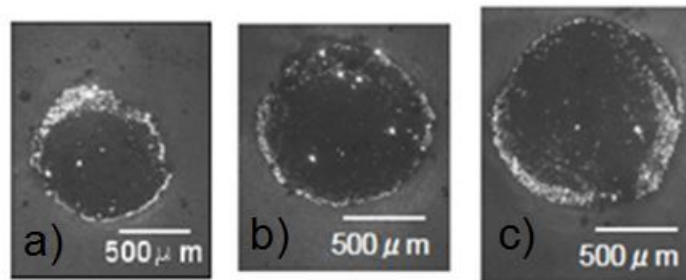


FIGURE 1.7 – Observation de la conduction électrique à travers un contact indium-SC sous une force de (a) 4N, (b) 7N et (c) 9N. Les zones claires correspondent aux fortes densités de courant [12].

Mashimo [13] a mis au point une simulation numérique sur la densité de courant à travers un spot. Ils démontrent que la densité de courant est plus importante en périphérie qu'au centre du spot. La figure 1.9 de la page 12 représente une comparaison entre les valeurs d'une simulation numérique de la densité de courant J en fonction de la position r sur un spot circulaire de rayon a et la courbe théorique de l'équation 1.18. Ces résultats sont indépendants de la forme du contact (circulaire, rectangulaire...).

$$J_{\text{théorique}} = \frac{I}{2\pi a \sqrt{a^2 - r^2}} \quad (1.18)$$

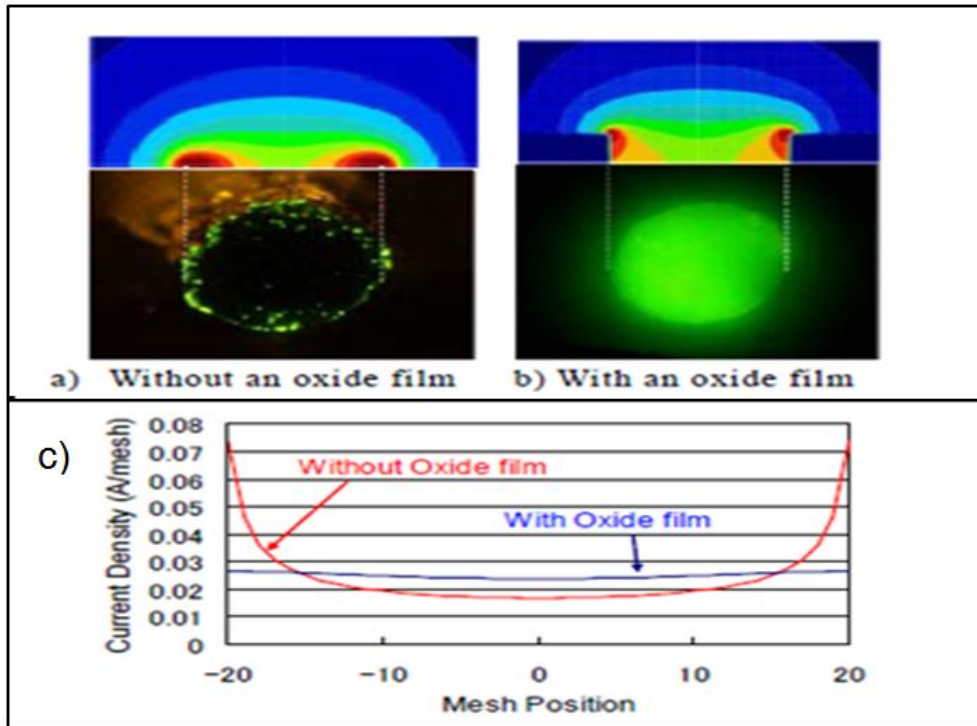


FIGURE 1.8 – Observation de la conduction électrique entre un semi-conducteur (type p) et une sonde en indium (a) sans un film oxydé et (b) avec un film oxydé. (c) Simulation numérique de la densité de courant en fonction de la position sur la trace de contact avec et sans film d'oxyde [12].

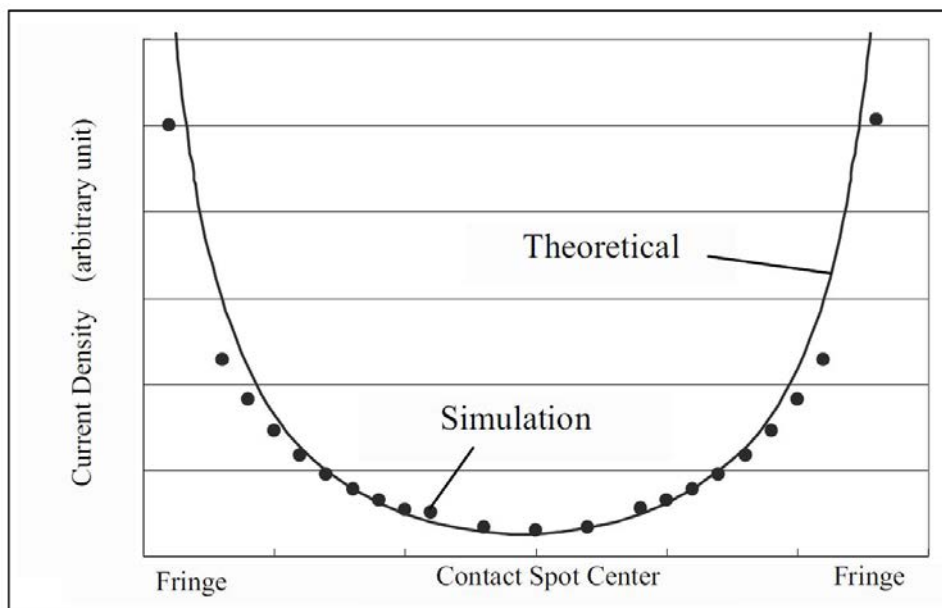


FIGURE 1.9 – Courbe comparative entre la simulation numérique et les résultats théoriques de la densité de courant en fonction de la position sur le rayon d'un spot de contact [13]

1.1.5 Matériaux à l'usage des contacts électriques

Une ou plusieurs couches de revêtements sont déposées, sur quelques micromètres d'épaisseur, dans le but d'améliorer les propriétés du substrat : meilleure résistance à la corrosion, meilleure résistance à l'usure... Les matériaux généralement utilisés sont les suivants :

- Le substrat est un alliage de cuivre. Ses propriétés mécaniques sont meilleures que le cuivre pur. Les propriétés électriques diminuent mais restent excellentes, voir tableau 1.2.

TABLE 1.2 – Caractéristiques mécaniques, électriques et thermiques du cuivre et de ses alliages [9].

		Cuivre	Bronze (Sn)	Laiton (Zn)
Résistivité électrique (20°C)	$10^{-8}\Omega.m$	1,65	13,3	6,3
Module D'Young	GPa	115	115	114
Module de cisaillement	GPa	48	45	40
Dureté	$10^2 N.mm^{-2}$	7	10	10
Conductivité thermique	$W.m^{-1}K^{-1}$	394	67	124
Température de fusion	°C	1083	950	925

- Le revêtement est composé d'un métal non-noble ou noble selon les besoins :
 - L'étain est un métal non-noble. Il s'oxyde donc en surface. Cette couche est électriquement isolante. Elle peut-être facilement brisée de par la malléabilité de l'étain. Cela permet à ce matériau d'être utilisé dans la connectique automobile. De plus, cette malléabilité permet d'avoir une surface de contact plus importante [5].
 - L'or et l'argent sont des métaux nobles. Ils ne s'oxydent pas. Ils offrent une meilleure protection à la corrosion. Néanmoins, ils peuvent réagir avec les composés d'un environnement pollué et engendrer une dégradation par pollution de la zone de contact.
L'utilisation de métaux nobles concerne les contacts électriques qui nécessitent une excellente fiabilité (airbag, sécurité, transmission d'informations sensibles...). Ces métaux sont cependant moins utilisés que l'étain pour des raisons économiques.
- Une sous-couche de nickel peut être utilisée pour empêcher l'inter-diffusion des éléments entre le revêtement et le substrat. Cette disposition est préconisée dans le cas d'utilisation de métaux nobles [14].

TABLE 1.3 – Caractéristiques mécaniques, électriques et thermiques du cuivre, de l'étain, l'argent, l'or et le nickel [9].

		Cuivre	Étain	Argent	Or	Nickel
Résistivité électrique (20°C)	$10^{-8} \Omega.m$	1,65	11,6	2,19	1,59	7
Module D'Young	GPa	124	41	83	78	214
Module de cisaillement	GPa	48	18	29	29	76
Dureté	$10^2 N.mm^{-2}$	7	0,5	5	4	4
Conductivité thermique	$W.m^{-1}K^{-1}$	394	63	419	317	91
Température de fusion	°C	1083	232	961	1063	1455

Formation de composés inter-métalliques

L'utilisation d'un revêtement protecteur entraîne la formation de composés inter-métalliques par inter-diffusion. Cette formation nécessite deux migrations d'éléments : la première du substrat vers le revêtement et la deuxième du revêtement vers le substrat. Elle dépend notamment :

- Des éléments considérés.
- De la cinétique de la réaction chimique.
- De la structure cristallographique/métallurgique des matériaux.

Un flux migratoire J_i suit une loi de Fick définie par l'équation 1.19. Cette dernière dépend du coefficient de diffusion D dans la phase considérée et de la concentration C [15].

$$J_i = -D_i \frac{dC_i}{dx} \quad (1.19)$$

Comme pour toute réaction chimique, la variation de la vitesse d'une réaction chimique dépend de la température. Cette variation est définie par la loi d'Arrhenius. En premier point, elle indique que plus la température est importante, plus la formation de composés inter-métalliques sera favorisée. En second point, une énergie d'activation minimale est nécessaire pour provoquer une réaction chimique.

Entre l'étain et le cuivre, le composé Cu_6Sn_5 est formé à température ambiante [16]. Sa structure cristallographique est hexagonale. La stœchiométrie Cu-Sn de ce composé n'est pas uniforme si bien que des sites lacunaires sont présents et favorisent l'inter-diffusion. La phase Cu_3Sn se développe à partir de 60°C et est prédominante à 220°C [17] [18].

La formation de ces composés inter-métalliques aura deux conséquences pour un contact électrique :

- Une résistivité électrique plus importante que l'étain ou le cuivre avec une différence de trois ordres de grandeur, voir tableau 1.4 [19].
- Une dureté plus importante. La dureté de Cu_6Sn_5 est égale à 600HV, voir tableau 1.4 [20]. De ce fait, l'aire de contact sera plus petite entre un contact IMC-IMC (IMC : InterMetallic Compound i.e. composé inter-métallique) qu'un contact Sn-Sn pour des conditions similaires [21].

TABLE 1.4 – Mesure de la résistivité électrique et de la dureté Vickers du cuivre, de l'étain et des composés inter-métalliques [19] [20].

Phase	Résistivité électrique $m\Omega.cm$	Dureté HV
Cu	$1,71.10^{-3}$	230
Sn	$11,5.10^{-3}$	45
Cu_6Sn_5	17,5	600
Cu_3Sn	8,9	/

Le processus de diffusion se réalise au niveau des joints de grain de l'étain. Par conséquent, la structure métallique du revêtement influence la formation du composé inter-métallique :

- L'étain brillant est composé de petits grains. Cette structure sera identique pour la formation du composé Cu_6Sn_5 , voir figure 1.10 [18].
- L'étain mat est composé de grains de plus grande taille. Cette micro-structure sera identique après formation du composé Cu_6Sn_5 , voir figure 1.11 [18].

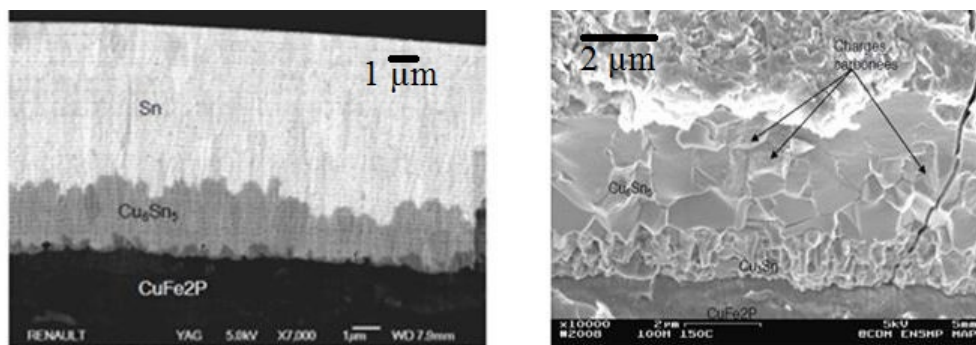


FIGURE 1.10 – (a) Image MEB (BSE) d'un revêtement en étain brillant sur substrat en coupe transversale ($\times 7000$, vieillissement 100h à 125°C pour favoriser l'inter-diffusion). (b) Image MEB (BSE) en électrons secondaires après fractographie d'un étain brillant vieilli 100h à 150°C pour favoriser l'inter-diffusion [18].

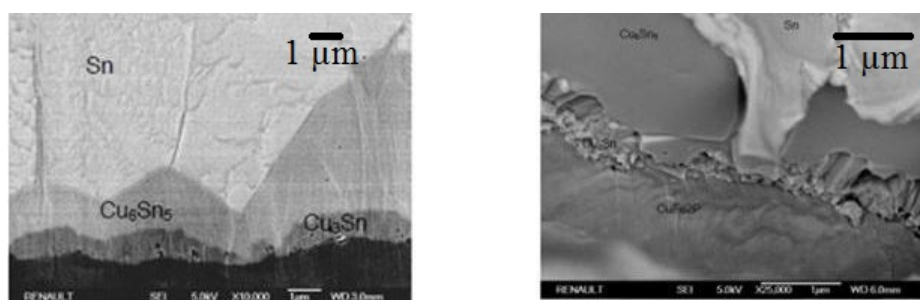


FIGURE 1.11 – (a) Image MEB (BSE) d'un revêtement en étain mat sur substrat en coupe transversale ($\times 10000$). (b) Image MEB (BSE) en électrons secondaires après fractographie d'un étain mat vieilli durant 200h à 125°C pour favoriser l'inter-diffusion [18].

Cinétique de formation des oxydes

Les oxydes métalliques sont électriquement isolants. Ils proviennent de la réaction entre l'oxygène et un élément métallique. La provenance de l'oxygène peut provenir de trois sources différentes :

- L'atmosphère (O_2).
- L'humidité (H_2O).
- La diffusion de l'oxygène provenant d'oxydes voisins.

En surface, la couche d'oxyde d'épaisseur D est formée sur une durée t , voir l'équation 1.20. Cette équation dépend du facteur A , lui même dépendant de la température. En effet, la formation de 10 nm de SnO_2 nécessitera plus de temps à température ambiante qu'à 100 °C. Cette vitesse de réaction est quantifiable par le coefficient de vitesse n [22] [23].

$$D^n = At \quad (1.20)$$

Les oxydes d'étain

Les oxydes d'étain SnO_2 et SnO proviennent soit de la réaction avec l'oxygène atmosphérique, soit de la diffusion de l'oxygène issu du revêtement. Cette cinétique dépend de la température, voir figure 1.12.

- Pour une température inférieure à 150°C, la cinétique de formation suit une loi linéaire ($n=1$) jusqu'à 2nm d'épaisseur. Les réactifs sont l'oxygène de l'atmosphère et l'étain du revêtement.
- Pour une température inférieure à 150°C et au delà de 2nm d'épaisseur, la cinétique de réaction diminue car le coefficient de vitesse suit une loi $n = \frac{1}{4}$. Le processus de formation est lié à la diffusion de l'oxygène dans la matière [24].
- Pour une température égale à 150°C, le coefficient de vitesse suit une loi parabolique ($n=2$) qu'importe l'épaisseur. Pour cause, l'état de phase de l'étain est ramolli avec une température proche de sa température de fusion (231 °C) [24] [25], voir figure 1.13. Le processus réactionnel de l'oxyde est donc différent. L'étain n'est d'ailleurs pas préconisé à cette température.

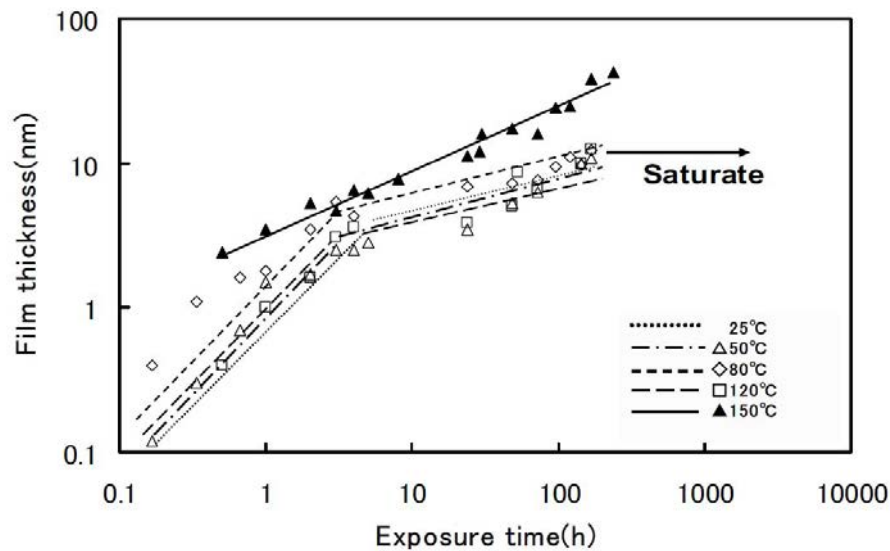


FIGURE 1.12 – Croissance du film d'oxyde d'étain exposé à des températures de 25, 50, 80, 120, et 150 °C [24]

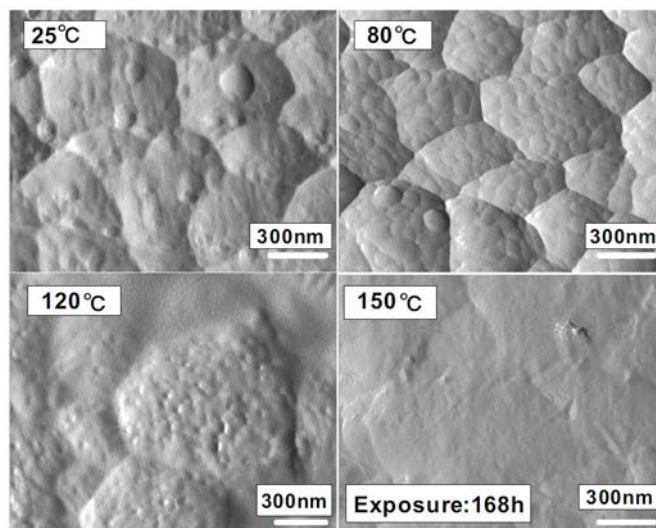


FIGURE 1.13 – Images AFM de la surface d'un revêtement d'étain exposé durant 168 heures pour des températures de 25, 80, 120 et 150 °C [24].

La formation de SnO est favorisée à température ambiante tandis que la formation de SnO₂ est favorisée à plus haute température, voir figures 1.14 [24]. Lorsque ces deux composés sont présents, le composé SnO est situé en sous couche, sa structure est amorphe tandis que le composé SnO₂ est situé en surface avec une structure plus ordonnée, voir figure 1.15.

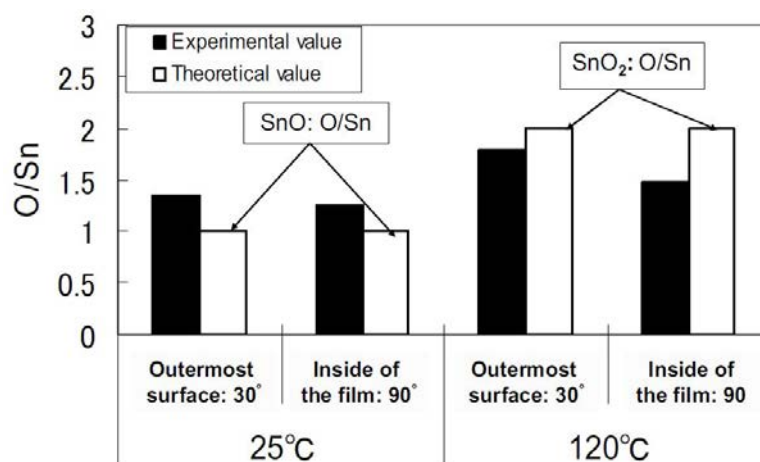


FIGURE 1.14 – Composition du ratio oxygène-étain en surface et à l'intérieur du film pour deux températures : 25 °C et 120 °C [24]

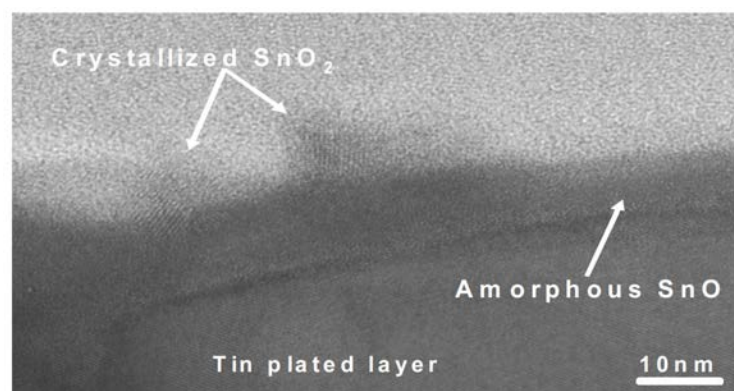


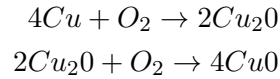
FIGURE 1.15 – Identification des composés SnO et SnO₂ par analyse TEM [24].

Les oxydes de cuivre

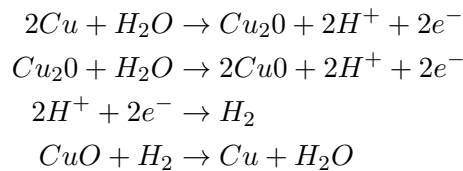
Les oxydes de cuivre sont formés selon deux types de mécanismes réactionnels :

- Par corrosion sèche i.e. une réaction chimique avec l'oxygène issu de l'atmosphère.
- Par corrosion humide i.e. une réaction chimique avec l'oxygène issu des molécules d'eau.

L'oxygène de l'atmosphère réagit avec le cuivre pour former Cu_2O . Au delà d'une épaisseur de 100 nm, la formation du composé CuO devient possible par une réaction entre Cu_2O et l'oxygène de l'atmosphère, voir les équations chimiques ci-dessous [26] :



Une hygrométrie de 50 % est suffisante pour former une fine couche de molécules H_2O par adsorption sur une épaisseur de 10 nm à la surface. Cette corrosion humide joue un rôle important car une molécule d'eau est plus petite (0,19-0,22 nm) qu'une molécule de di-oxygène (0,28-0,4 nm). Elle peut ainsi rentrer dans des nano-fissures pour d'une part réagir avec le Cu pour former Cu_2O et d'autre part réagir avec Cu_2O pour former CuO de manière locale. A noter que ce dernier mécanisme engendre du di-hydrogène qui reforme des molécules d'eau et empêche ainsi la formation de CuO à l'interface par les réactions suivantes [27]. Les molécules d'eau ont un double effet en associant et dissociant l'oxygène des oxydes de cuivre.



1.1.6 Paramètres influençant la conduction

La force de contact

La force de contact correspond à la force du clip sur une languette. Sa direction est orthogonale à la zone de contact. Son sens est donc dirigé du clip vers la languette au centre de la zone de contact. Cette force influence d'une part le type de résistance de contact et d'autre part le type de loi de déformation (élastique/plastique). Sawada [28] a mesuré la résistance de contact pour deux types de revêtements et en fonction de la force, voir figure 1.16.

- Pour une force de contact supérieure à 10 N, la résistance de constriction prédomine pour un contact argent ou étain car l'aire de contact électrique est équivalente à l'aire de contact mécanique.
- Pour une force de contact inférieure à 10 N, la résistance de contact augmente car les résistances filmiques et l'effet tunnel prennent des proportions plus importantes.

Ben Jemaa [29] a réalisé la même expérience pour quatre matériaux différents pour des valeurs de force de contact comprises entre 1 mN et 10 N, voir figure 1.17. L'équation 1.21 du modèle numérique correspond bien aux résultats. La résistance électrique R_c dépend de la force F_c , de la nature, de la géométrie du matériau K et du caractère élasto-plastique n :

$$R_c = K_c F_c^{-n} \quad (1.21)$$

- En dessous de 0,15 N, le coefficient n est égal à 1/2, caractéristique d'une déformation élastique.
- Au dessus de 0,15 N, le coefficient n est égal à 1/3, caractéristique d'une déformation plastique

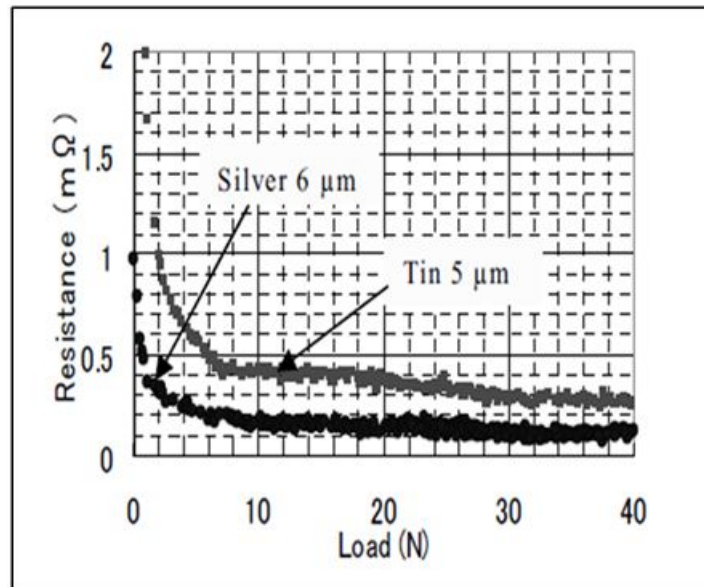


FIGURE 1.16 – Résultats expérimentaux de la mesure de la résistance de contact en fonction de la force de contact pour un revêtement en étain ou en argent [28].

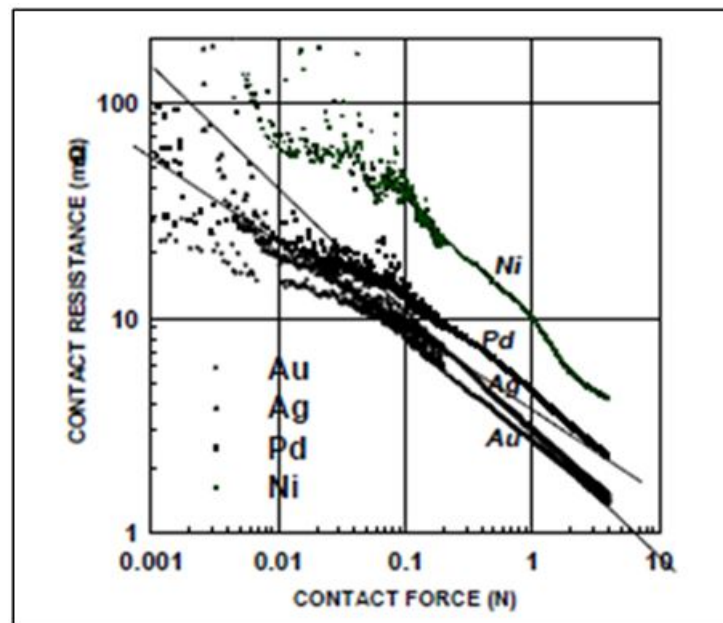


FIGURE 1.17 – Mesure de la résistance de contact en fonction de la force de contact pour les matériaux suivant : or, argent, palladium et nickel [29].

La température et l'intensité du courant

L'effet Joule se produit lors du passage des charges électriques à travers l'aire de contact électrique. Les variations de la température influencent :

- Le comportement mécanique du matériau (plasticité/élasticité) qui fait varier l'aire de contact [30].
- L'électro-migration qui favorise la formation de composés inter-métalliques.
- La formation d'oxydes à l'interface.

Des variations de la température de l'ensemble de la zone de contact nécessitent des intensités de courant importantes i.e. les contacts de puissance. La figure 1.18 illustre une augmentation de la température de l'ordre de 100 °C pour des courants de plus de 10A.

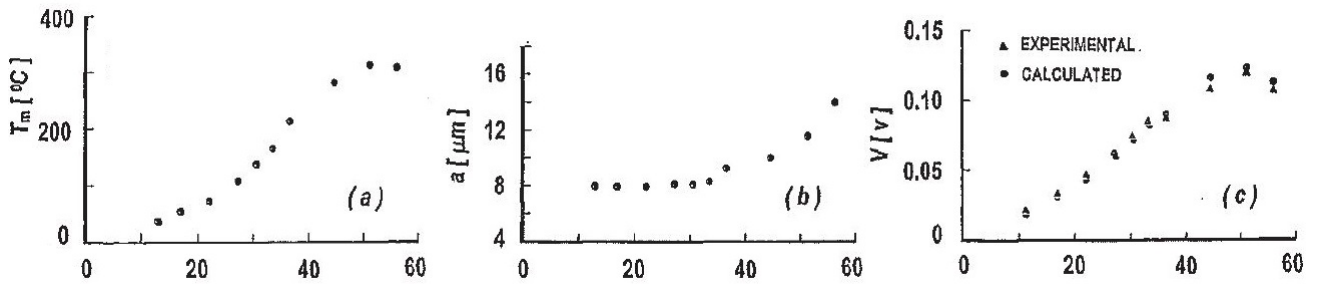


FIGURE 1.18 – Mesure de (a) la température de la zone de contact (b) du rayon de l'aire de contact et (c) la tension de contact en fonction du courant [31].

Les charges électriques favorisent localement l'augmentation de la température par effet Joule. A fort courant, l'électro-migration des éléments favorise la formation de composés inter-métalliques et des dislocations [32]. Ce phénomène dégrade donc la conduction par les spots de contact. Cette dégradation dépend de la taille des spots, de leurs positions et de leurs interactions [33].

La figure 1.19 montre la densité de courant par simulation numérique d'une zone de contact en fonction du temps. J(0) représente le point central et J(6) est le point en périphérie. Plus le temps avance, plus les spots extérieurs se dégradent. La densité de courant devient donc plus importante vers les points centraux. Ce type de dégradation entraîne une isolation électrique en chaîne de la périphérie vers le centre de la zone de contact.

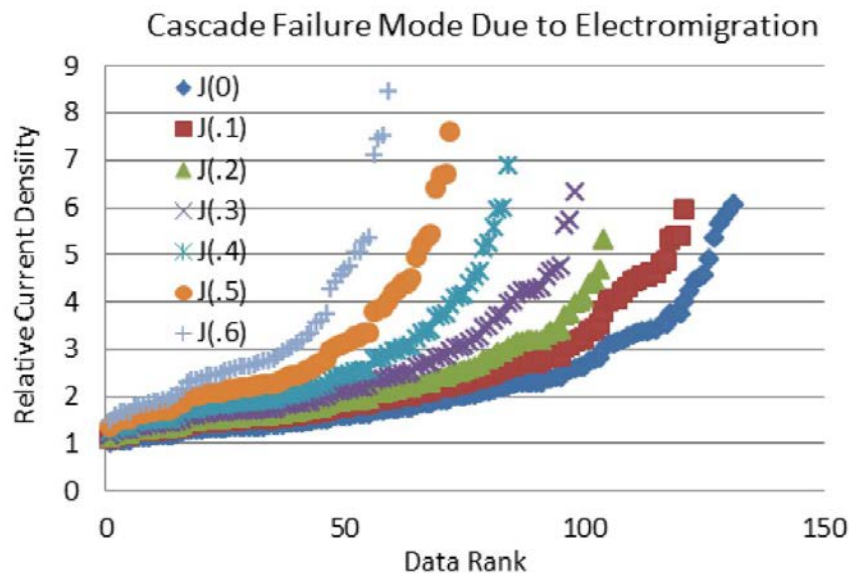


FIGURE 1.19 – Modélisation de la densité de courant des spots de contact en fonction du temps. J(0) représente le point central et J(6) le point en périphérique [33].

Variation de la température selon Kohlrausch

Le modèle de la zone de contact est multi-spots. L'aire d'un des spots dépend donc de l'état de surface. La valeur de cette aire peut-être suffisamment petite pour engendrer une résistance de contact importante (résistance de constriction \rightarrow résistance de Sharvin). La température peut alors fortement augmenter sur un spot de contact suivant la densité de courant imposée. Des changements de phase des matériaux interviennent de manière très locale [34].

La différence de potentielle V aux bornes du spot est associée à la résistance de constriction R_1 en série avec la résistance de Sharvin R_2 . Si la différence de potentiel théorique V_1 de l'équation 1.22 atteint des valeurs spécifiques, des changements de phase interviennent [35], voir tableau 1.5. Néanmoins, la chaleur de l'effet Joule issue de la conduction n'est pas entièrement évacuée à travers un spot, une partie est dissipée [36]. C'est pourquoi la tension appliquée V doit être plus importante que les valeurs indiquées dans le tableau 1.5.

$$V_1 = V \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.22)$$

TABLE 1.5 – Valeurs de la tension V et de la température associées aux changements de phase de l'étain, cuivre, or et argent.

	Ramollissement		Fusion		Ébullition	
	Tension [mV]	Temp. [°C]	Tension [mV]	Temp. [°C]	Tension [mV]	Temp. [°C]
Cu	112	190	415	1083	884	2567
Sn	72	103	129	232	865	2507
Au	80	100	430	1063	900	2817
Ag	95	150	375	960	757	2163

La relation entre température et tension de contact a été définie selon l'hypothèse suivante : les conceptions électroniques et thermiques empruntent le même chemin pour un point de contact mono-métallique de petite taille. De ce fait, les isothermes sont situés sur les équipotentielles (voir figure 1.6 de la page 9). Par conséquent, l'équation 1.23 donnant la relation température-tension de contact combine la relation de Kohlrausch (équation 1.24) et la formule de Wiedermann-Franz [37] (équation 1.25) :

$$U_c = 4L_0(T_m^2 - T_0^2) \quad (1.23)$$

$$U_c DU = \lambda \rho dT \quad (1.24)$$

$$\lambda \rho = L_0 T \quad (1.25)$$

Les paramètres des équations ci-dessous sont les suivants :

- U_c la tension de contact [V]
- λ la conductivité thermique [$W.m^{-1}.K^{-1}$].
- ρ la résistivité électrique [$\Omega.m$].
- L_0 le coefficient de Lorentz ($2,45.10^{-8}V^2.K^{-2}$)
- T_m la température au point de contact [K].
- T_0 la température au point de mesure de la tension [K].

1.1.7 État de surface d'une zone de contact sous l'application d'une charge

Un contact de type clip/languette étamé est assimilable à un contact de type sphère/plan. Ce type de contact est similaire à ceux utilisés dans un connecteur d'intérêt automobile. La zone de contact est de type circulaire, voir figure 1.20 (a) et (b). La fine couche d'oxyde est tout d'abord cassée afin d'obtenir un contact étain-étain.

Les photographies de la figure 1.20 (c) et (d) représente des analyses transversales d'un revêtement d'étain sur cuivre sur et en dehors de la zone de contact [38] :

- Sous l'application de la charge, la morphologie de la surface est clairement dégradée.
- En profondeur, le composé inter-métallique n'est pas dégradé. Il adhère mieux au substrat car il possède de meilleures caractéristiques mécaniques que l'étain.

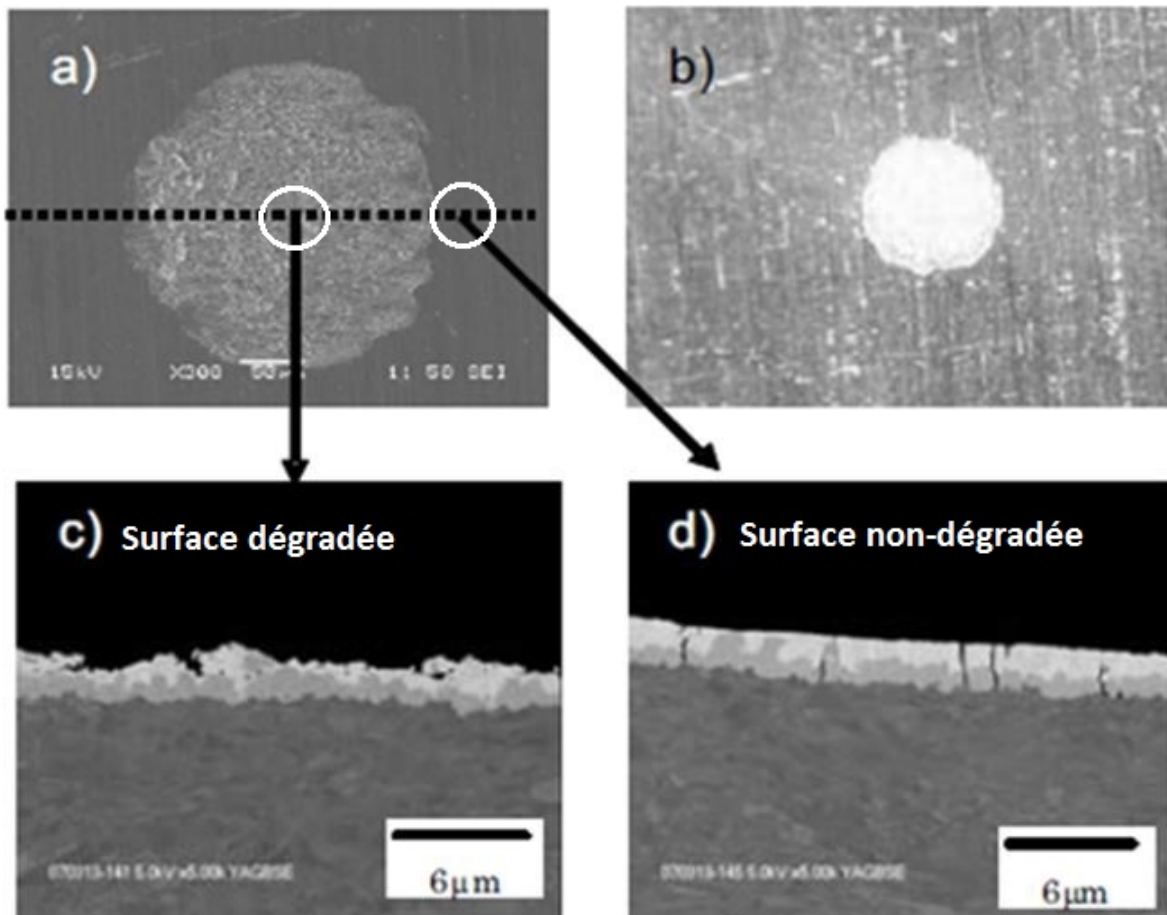


FIGURE 1.20 – Analyse SEM (a) et image au microscope optique (b) d'un revêtement étain de $1\mu\text{m}$ d'épaisseur sur cuivre suite à l'application d'un contact statique par une bille de 1mm de rayon dont la force de contact est de 40N. Coupe transversale d'une zone dégradée(c) et d'une zone non dégradée (d) [38]

Tamai [24] a mesuré la résistance de contact en fonction de l'épaisseur d'oxyde d'étain sur un revêtement d'étain tout en variant la force de contact suivant 3 ordres de grandeur : 1, 0.1 et 0.01N, voir figure 1.21.

- Pour une force de contact égale à 0.01N, la résistance de contact est égale à $1\ \Omega$ jusqu'à une épaisseur de 10 nm puis augmente jusqu'à atteindre $5\ \Omega$.
- Pour une force de contact égale à 0.1N, la résistance de contact est égale à $0.5\ \Omega$ jusqu'à une épaisseur de 10 nm puis augmente jusqu'à atteindre $2\ \Omega$.
- Pour une force de contact égale à 1N, la résistance de contact est quasi-nulle jusqu'à une épaisseur d'oxyde de 18 nm.

Pour des faibles forces de contact, la fine couche d'oxyde est peu dégradée voir non-brisée. Par conséquent, la résistance de contact est de type filmique et atteindra de fortes valeurs. La conduction électrique est alors défectueuse.

Pour des forces de contact de l'ordre du Newton, la couche d'oxyde est suffisamment brisée pour laisser apparaître l'étain pur. Les charges électriques circuleront à travers ces spots de contact. La résistance de contact sera faible ce qui indique une aire de contact suffisante pour assurer la conduction des charges électriques. Il s'agit de l'ordre de grandeur de la force de contact pour la connectique bas-niveau de type clip/languette.

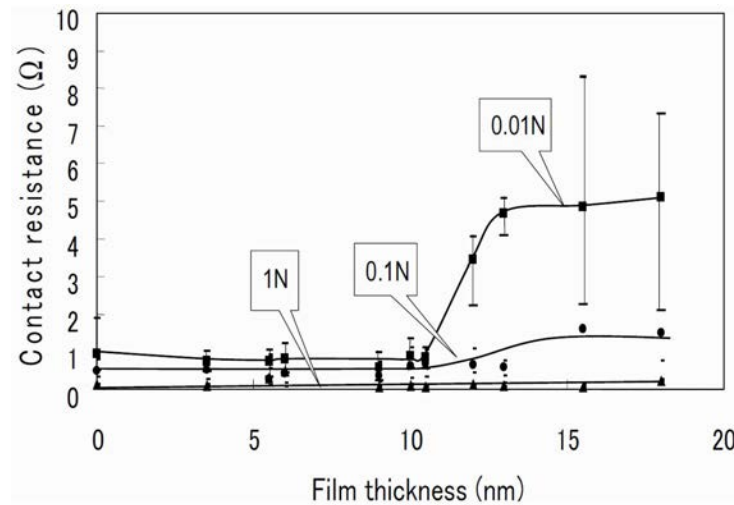


FIGURE 1.21 – Mesure de la résistance de contact en fonction de l'épaisseur d'oxyde étain à 25 °C pour des forces de contact égales à 0.01N, 0.1N et 1N [24]

1.2 Dégradation d'une zone de contact sous sollicitation vibratoire

1.2.1 Fretting-corrosion

Les vibrations répétées au même point de contact génèrent une dégradation de l'interface de contact. En effet, les matériaux en contact s'usent en formant des particules. Ces particules s'intercaleront à l'interface pour former un troisième corps. Ces particules, appelées plus communément débris, peuvent être électriquement conductrices ou isolantes. Cette dégradation mécanique pour un matériau oxydable est le fretting-corrosion. Dans le cadre des contacts électriques, ces débris sont généralement des oxydes d'étain et/ou des oxydes de cuivre. ces oxydes sont des isolants électriques. Par conséquent, ils engendrent des perturbations électriques. La figure 1.22 illustre de manière schématique la formation du troisième corps suivant trois étapes [39] :

1. Au début, les particules se positionnent entre les aspérités. La conduction électrique est réalisée à travers des spots de contact.
2. Ensuite, elles s'intercalent entre les deux contacts pour former le troisième corps. L'épaisseur est très faible. La conduction électrique est alors perturbée dans la mesure où les particules sont électriquement isolantes.
3. Et enfin, l'épaisseur du troisième corps augmente. Une partie de ces particules est évacuée autour de la zone de contact, l'autre partie reste à l'interface. La conduction électrique est alors fortement perturbée voire impossible dans la mesure où les particules sont électriquement isolantes.

Les perturbations mécaniques et électriques, issues du fretting-corrosion, sont d'autant plus importantes qu'elles sont irréversibles. Ce type d'usure est complexe car il dépend de nombreux paramètres : les matériaux en contact qui définissent le type de débris, les réactions chimiques (oxydation..), les caractéristiques de la sollicitation vibratoire (amplitude, fréquence...)...

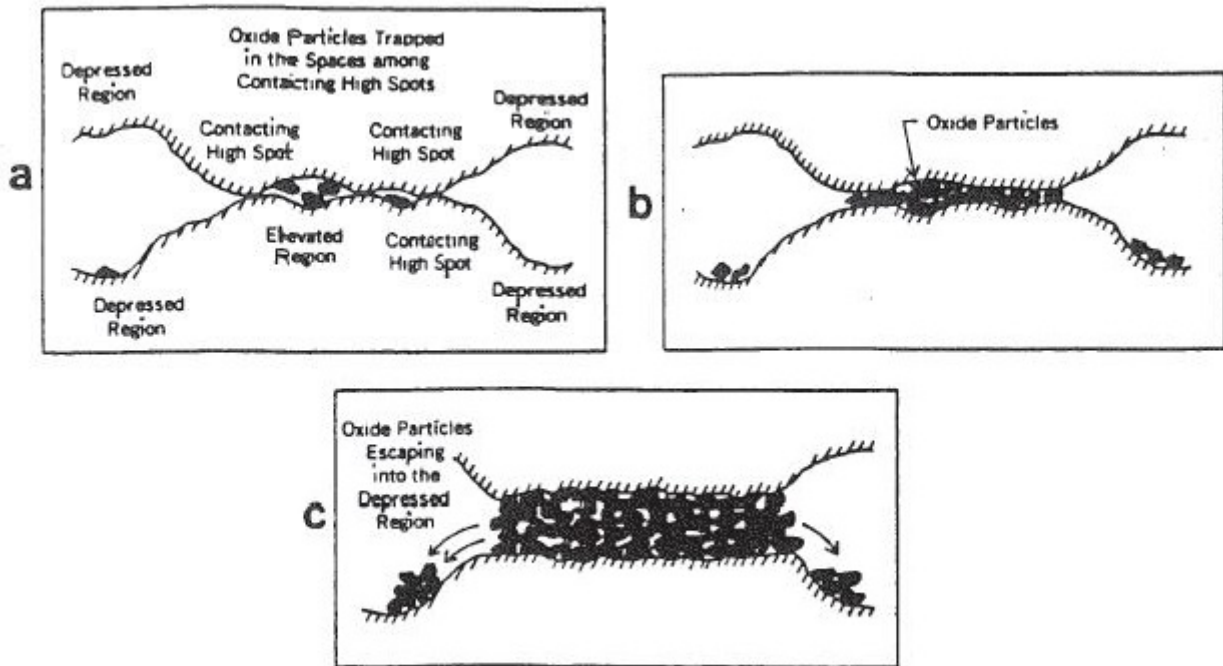


FIGURE 1.22 – Schémas en trois étapes de formation du troisième corps et des débris à l’interface d’une zone de contact [39].

Les matériaux du troisième corps

Le cuivre est connu pour ses excellentes propriétés électriques. Cependant, l’usage exclusif d’un alliage cuivreux pour des contacts électriques entraîne une dégradation rapide par fretting-corrosion [40]. Par conséquent, une amélioration des propriétés de cet alliage est nécessaire pour améliorer la résistance à l’oxydation en utilisant un revêtement protecteur : or, argent ou étain. Les débris du troisième corps seront donc tout d’abord issus de ces revêtements.

- L’étain est un métal non-noble donc ses débris s’oxydent pour devenir électriquement isolants et abrasifs. Cependant, la malléabilité de l’étain permet d’une part l’éjection des débris et d’autre part le maintien de la zone de contact électrique étain-étain. Ce type de revêtement assure donc une protection correcte à la corrosion du cuivre.
- A l’inverse, les débris issus des métaux nobles ne s’oxydent pas. Ils offrent donc une excellente protection à la corrosion. Cependant, l’usure par fretting dégradera la zone de contact. Par conséquent, le substrat en cuivre s’oxydera en surface et provoquera une usure de l’interface par fretting-corrosion. [41].

Les conditions environnementales et les matériaux en contact déterminent la structure et la composition du troisième corps. Néanmoins, l’usure par fretting-corrosion s’accompagne d’une perte de matière de la zone de contact et amène plusieurs matériaux à être en contact [42]. De ce fait, la composition du troisième corps évolue au cours du temps. Son épaisseur dépend des conditions vibratoires et des processus de formation et d’évacuation des débris [43].

Par ailleurs, la perte de matière entraîne un contact entre les composés inter-métalliques dont les structures sont fragiles et ne résistent pas aux sollicitations vibratoires. Le contact métallique se réalisera à travers le substrat en cuivre, voir figure 1.23 [18].

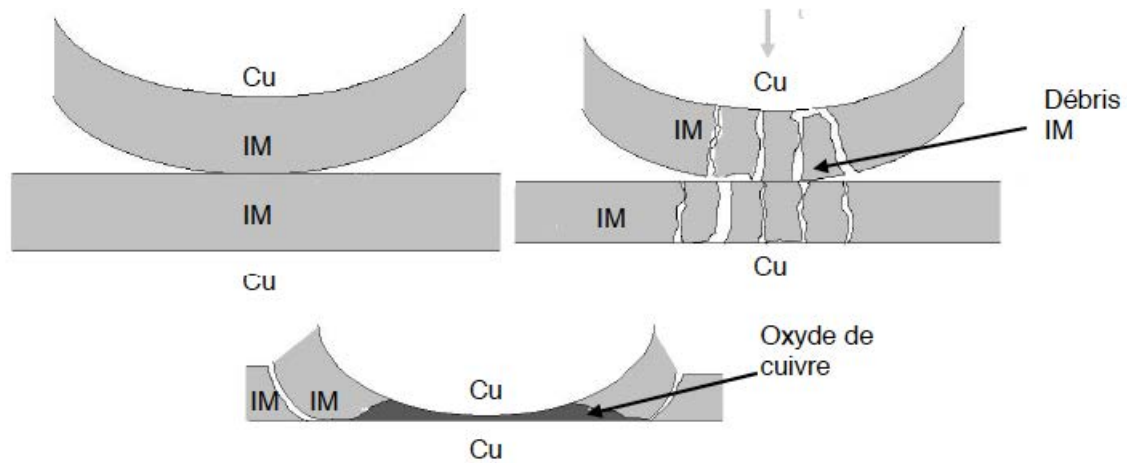


FIGURE 1.23 – Schéma de la dégradation de deux contacts en composés inter-métalliques (IMC) soumis à une sollicitation vibratoire [18].

1.2.2 Évolution de tension/résistance de contact sous sollicitation vibratoire

Mesure expérimentale de tension/résistance de contact

La dégradation mécanique par fretting-corrosion peut-être constatée en mesurant les perturbations électriques. L'expérience de laboratoire classique consiste à appliquer un déplacement relatif et sinusoïdal entre deux contacts de type clip/languette. Un courant (ou une différence de potentiel) est imposé aux bornes des contacts. La mesure de la tension/résistance de contact indique le type de conduction à leur interface. Selon le cahier des charges constructeur, la limite préconisée est de $4\text{ m}\Omega$ [44]. Au delà, le contact est défini comme défaillant.

La mesure expérimentale doit seulement correspondre aux interactions électriques de l'interface. Pour cela, une méthode de mesure 4 fils est utilisée. Elle consiste à mesurer la tension de contact par un chemin différent que prend le courant imposé par un générateur aux bornes du contact. En effet, un courant nul est équivalent à une tension nulle. Par conséquent, la mesure de la différence de potentiel sera prise à des points d'entrée et de sortie différents des connexions du générateur, voir figure 1.24.

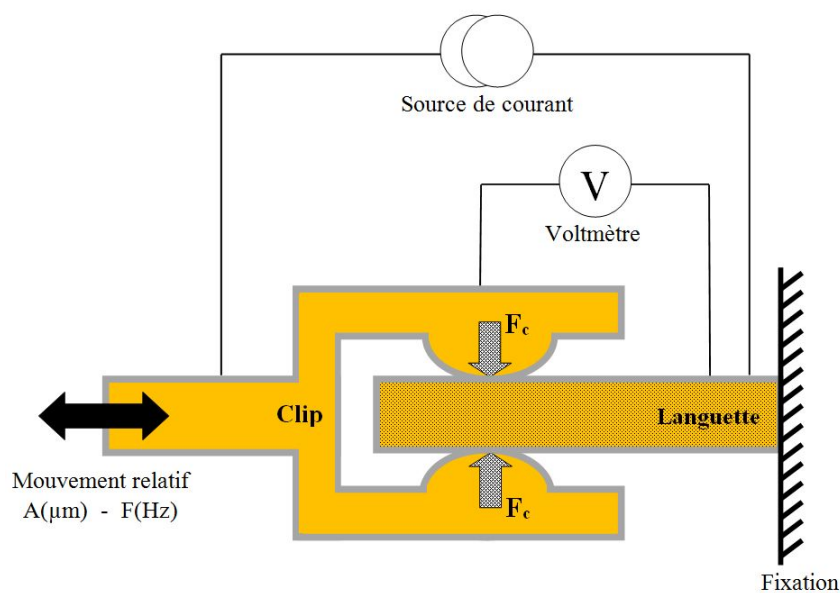


FIGURE 1.24 – Schéma d'un contact électrique de type clip/languette soumis à un mouvement relatif sinusoïdal d'amplitude A , de fréquence f . Un courant continu de valeur I est imposé aux bornes du contact. La mesure de la tension/résistance de contact V est réalisée selon la méthode 4 fils.

La figure 1.25 présente une dégradation électrique typique d'un contact étamé. La résistance de contact est mesurée en fonction du nombre de cycles. Les lettres A à H indiquent des moments/étapes clés qui expliquent les différents types de conduction liés à un état spécifique du troisième corps. Ces moments sont d'ailleurs commentés et illustrés par des états de surface du clip et de la languette ci-après, voir les figures 1.26 à 1.28.

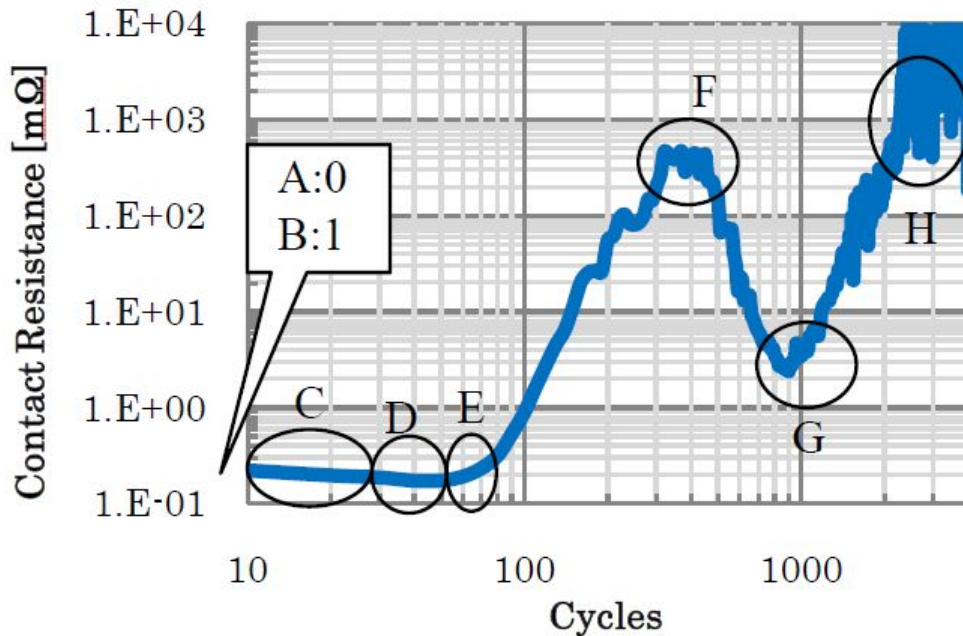


FIGURE 1.25 – Évolution de la résistance de contact en fonction du nombre de cycles d'un contact Sn-Sn ($50 \mu\text{m}$, 1 Hz, 3 N, 100 mA) [43].

Cas A → D : Résistance de contact stable (figure 1.25). La figure 1.26 représente l'état de surface au bout de 30 cycles de déplacements relatifs. Avant les contraintes vibratoires, la zone de contact est de forme circulaire. Elle correspond à une zone de contact statique typique. Au bout de 30 cycles, la zone est élargie suivant l'axe du mouvement en raison de l'effet du mouvement. Les pollutions de surface (poussières...) et les premiers débris d'étain commencent à s'accumuler sur les contours de la trace de fretting, voir figure 1.26 [43].

Entre ces deux stades, la résistance de contact est à la fois faible et stable. En effet, l'aire de contact électrique est suffisamment grande pour conduire les charges électriques à travers l'étain pur et sans perturbation.

Cas E → F - Première augmentation de la résistance de contact (figure 1.25).

Les photographies MEB de la figure 1.27 indiquent les traces de fretting entre 60 et 350 cycles de déplacements relatifs. Elles sont représentées par les moments E et F de la figure 1.25. Les observations sont les suivantes :

- En premier point, les valeurs de dureté du centre de la piste augmentent au cours du temps. En effet, elles sont tout d'abord inférieures à 50 HV pour être ensuite supérieures à 350 HV. De ce fait, l'état de surface est constitué tout d'abord d'étain pur puis d'un inter-métallique.
- En deuxième point, les valeurs de dureté autour de la piste augmentent également. Elles sont tout d'abord inférieures à 50 HV pour être ensuite comprises entre 75 et 150 HV. Cette augmentation est due à la présence d'oxydes d'étain en surface. Ils proviennent d'une part de l'oxydation de cette zone en surface et d'autre part des débris issus de la zone centrale.

La zone centrale de contact est entièrement dégradée au bout de seulement 350 cycles de vibration. Les oxydes d'étain sont à la fois durs et abrasifs. Par conséquent, ils dégradent facilement et rapidement les zones de contact. Sous l'effet de la sollicitation vibratoire, ces débris seront d'une part éjectés sur les contours de la zone de contact et d'autre part s'intercaleront à l'interface. Leur présence à l'interface est mesurable par une forte augmentation de la résistance de contact de 0,2 mΩ à 500 mΩ.

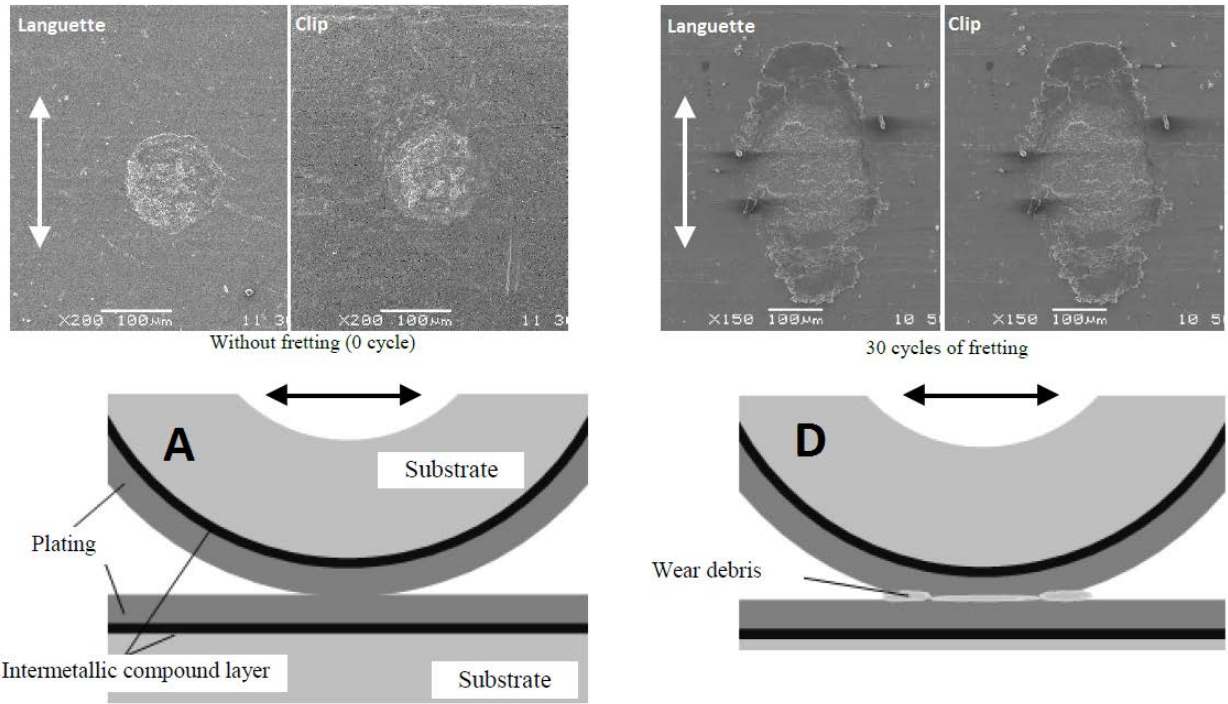


FIGURE 1.26 – Photographie MEB des zones de contact du clip et de la languette et schématisation du processus de dégradation (A) avant les contraintes vibratoires et (D) au bout de 30 cycles (conditions expérimentales : $50 \mu m$, 1 Hz, 3 N, 100 mA) [43].

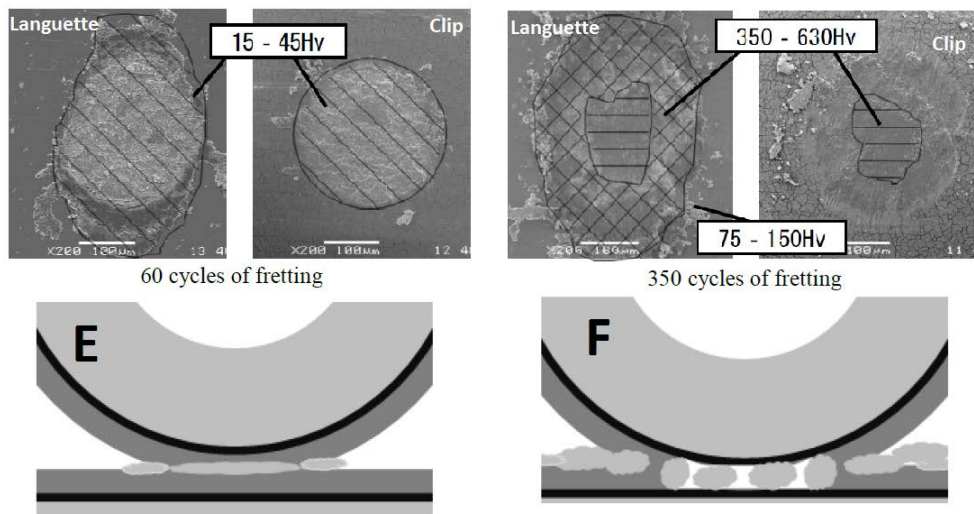


FIGURE 1.27 – Photographies MEB des zones de contact du clip et de la languette et schématisation du processus de dégradation au bout de (E) 60, (F) 350 cycles (conditions expérimentales : $50 \mu m$, 1 Hz, 3 N, 100 mA) [43].

Cas F → G - Amélioration de la résistance de contact (figure 1.25).

Entre 350 et 900 cycles de sollicitations vibratoires, la résistance de contact diminue en passant de $500 m\Omega$ à $2 m\Omega$ en raison d'une amélioration de la conduction électrique via des spots de contact en cuivre. Cette affirmation provient des observations de la figure 1.28 :

- L'alliage en cuivre apparaît progressivement sur la zone de contact. En effet, les mesures de dureté de la zone centrale indiquent la présence exclusive du substrat en cuivre au bout de 900 cycles.
- Les mesures de dureté autour de la zone de contact attestent de la présence d'oxydes d'étain (75-150HV) et de l'inter-métallique (351-630 HV) autour de la zone centrale. Par conséquent, les débris d'étain oxydés et du composé inter-métallique sont éjectés hors de la zone de contact. La conduction électrique a donc lieu par la zone centrale.

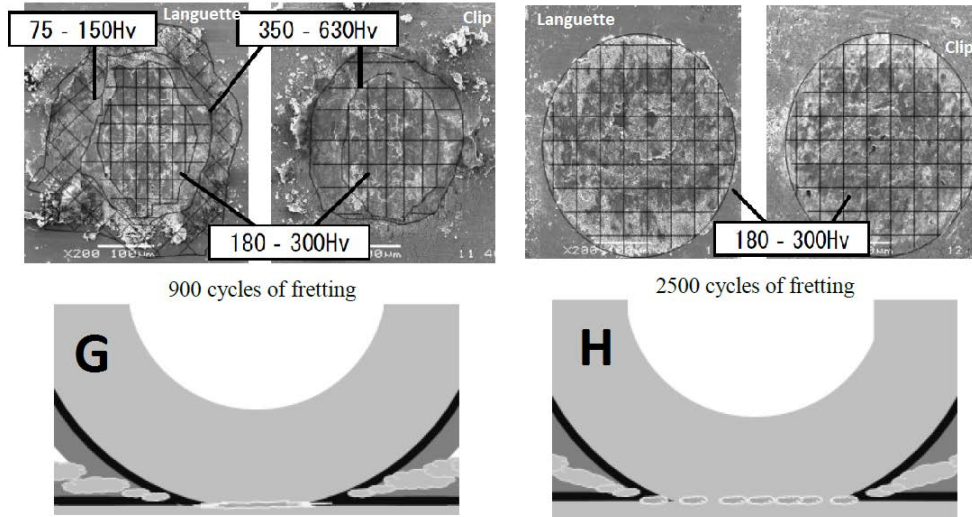


FIGURE 1.28 – Photographies MEB des zones de contact du clip et de la languette et schématisation du processus de dégradation au bout de (G) 900 et (H) 2500 cycles (conditions expérimentales : $50\ \mu\text{m}$, 1 Hz, 3 N, 100 mA) [43].

Cas G \rightarrow H - Dégradation définitive de la résistance de contact (figure 1.25).

La résistance de contact augmente de trois ordres de grandeur entre 900 et 2500 cycles. Les mesures de dureté au bout de 2500 cycles sont comprises entre 180 et 300 HV sur toute la trace de fretting. Le substrat en cuivre est donc présent sur toute cette zone. Cependant, les mesures électriques attestent de la présence de composés isolants à l'interface. Les débris composés de cuivre pur commencent donc à s'oxyder. Une partie de ces oxydes s'intercalent à l'interface, une autre partie est évacuée autour de la zone de contact.

En résumé, la dégradation par fretting-corrosion d'un contact étamé est rapide. En effet, le substrat en cuivre est rapidement atteint en moins de 1000 cycles. Les perturbations électriques sont dues à l'apparition d'oxydes et de composés inter-métalliques à l'interface. Les différents stades d'évolution de la conduction électrique correspondent à la composition et la structure du troisième corps.

Les intermittences et micro-coupures.

Les perturbations électriques ne sont pas seulement évolutives car des intermittences et des micro-coupures peuvent survenir. Ce sont des augmentations soudaines de la tension de contact à une amplitude donnée et une durée très courte. Ces perturbations de la tension de contact sont contraignantes car une partie de l'information électrique est alors perdue.

La figure 1.29 représente le nombre d'événements où ces intermittences de contact apparaissent en fonction du nombre de cycles. Ces résultats sont illustrés suivant 4 amplitudes limites pour un contact Sn-Sn [45]. Les remarques suivantes indiquent que plus l'état de surface est dégradé, plus les intermittences sont importantes :

- Les intermittences de faibles amplitudes (2 et 4 mV) ont lieu au début et au milieu de l'expérience. Par conséquent, il s'agit de résistance de constriction.
- Les intermittences à 500 mV sont dues à la présence de cuivre à l'interface. En effet, la relation de Kohlrausch relie cette tension de contact à la fusion du cuivre.
- Des intermittences de 12 V ont également été mesurées et associées à l'apparition d'arcs électriques.

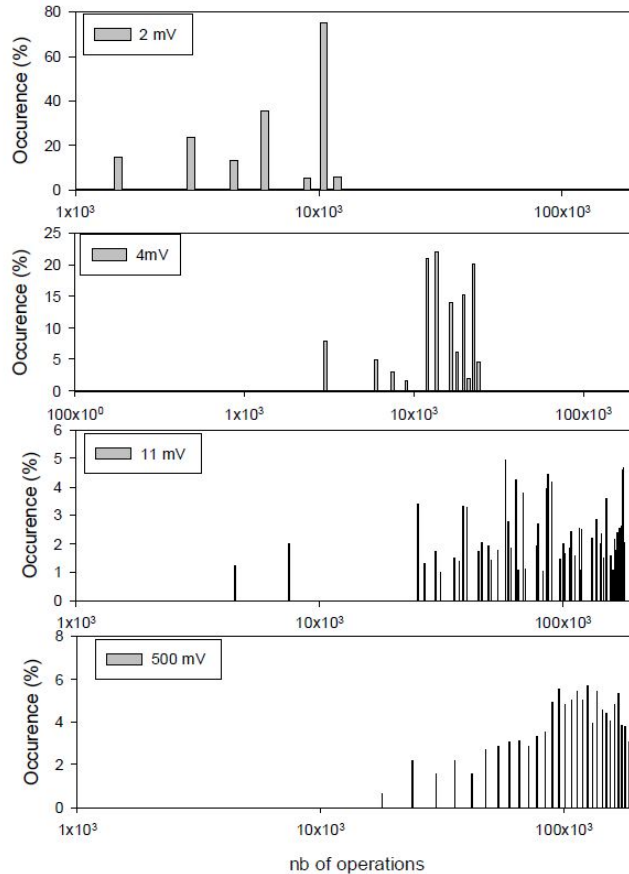


FIGURE 1.29 – Histogramme des événements pour quatre valeurs de tensions limites : 2, 4, 11 et 500mV en fonction du nombre de cycles d'un contact étain-étain ($50 \mu m$, 100 Hz, 3 A, 20 V).[45]

Cartographie de la résistance de contact

La figure 1.30 montre une zone de contact dégradée par fretting-corrosion [46]. Entre les points A et B, la cartographie de l'oxygène indique la présence d'oxydes autour de la zone de contact. La cartographie de la résistance de contact montre que les zones électriquement isolantes sont celles où les proportions d'oxygène sont importantes. Par conséquent, l'isolation électrique d'un contact est reliée à la présence des oxydes à l'interface. Leur concentration n'est pas homogène sur l'ensemble de la surface.

1.2.3 Notion de glissement

L'effet d'une force de contact, combiné aux vibrations, génèrent une force tangentielle F_T à l'interface. Sa direction est orthogonale à la force de contact F_C . Son sens dépend de celui de la vibration. Sa norme dépend de l'état de surface. Tout comme la structure de l'interface, cette grandeur évolue donc au cours du temps et dépend du coefficient de friction.

Il existe deux types de zones de contact sur une trace de fretting. La première zone est dite *collée* lorsque le contact est maintenu sous sollicitation vibratoire. A ce stade, le coefficient de friction est faible. A l'inverse, une zone est dite *glissante* lorsque le contact s'effectue sur un troisième corps. En effet, les débris durs et abrasifs n'adhèrent pas à l'interface. Par conséquent, le coefficient de friction augmente. De ces deux types de zones de contact, trois types de glissements sont définis, voir figure 1.31 :

- Le glissement partiel : la surface de la zone collée est supérieure à la surface de la zone glissante. L'aire de contact électrique est donc suffisamment grande pour assurer une bonne conduction électrique. A ce stade, la force tangentielle est faible.
- Le glissement mixte : sa caractéristique est une diminution de la surface de la zone collée et donc une augmentation de la zone glissante si bien que la force tangentielle augmente.
- Le glissement total : seule la zone glissante est présente, la force tangentielle est maximale. A ce stade, la conduction électrique est fortement perturbée.

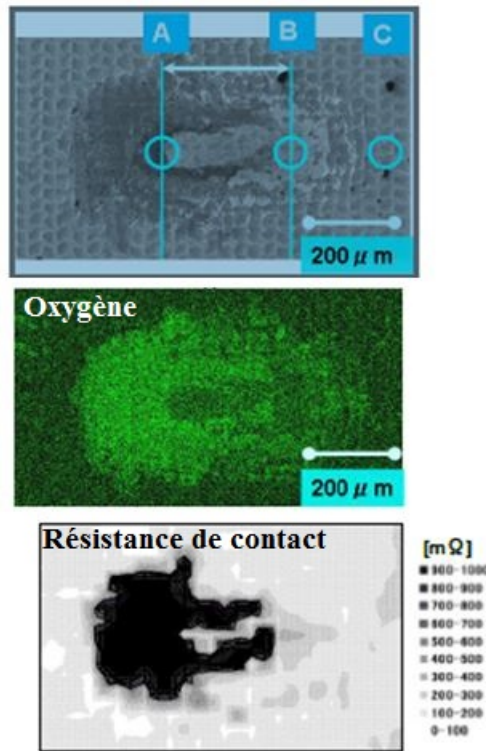


FIGURE 1.30 – (a) Observation SEM,(b) observation de l'élément oxygène par EDX (c) cartographie de la résistance de contact [46].

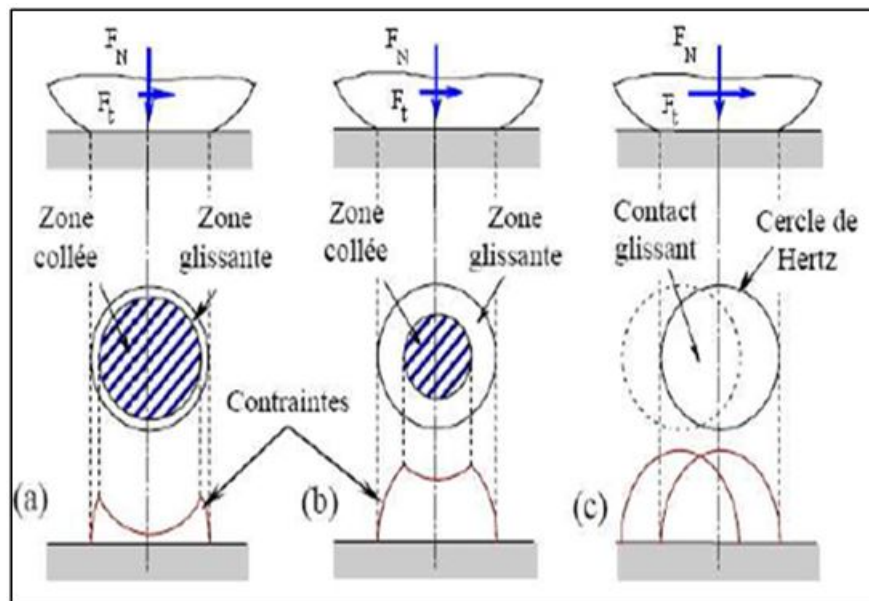


FIGURE 1.31 – Schémas des 3 types de glissement (a) partiel ($F_T \ll \mu F_N$), (b) mixte ($F_T \leq \mu F_N$) et (c) total ($F_T = \mu F_N$).

Diminution de l'aire de contact électrique

Ces trois types de glissements sont mis en évidence par des mesures expérimentales de la force tangentielle et de la tension/résistance de contact [45]. L'expérience de la figure 1.32 correspond à la tension de contact en faisant varier l'amplitude de déplacement relatif de 1 à 6 μm par pas de 1 μm toute les 10⁵ cycles. En parallèle, les courbes de la figure 1.33 représentent les mesures de la force tangentielle à trois amplitudes de déplacement : 2, 4 et 6 μm.

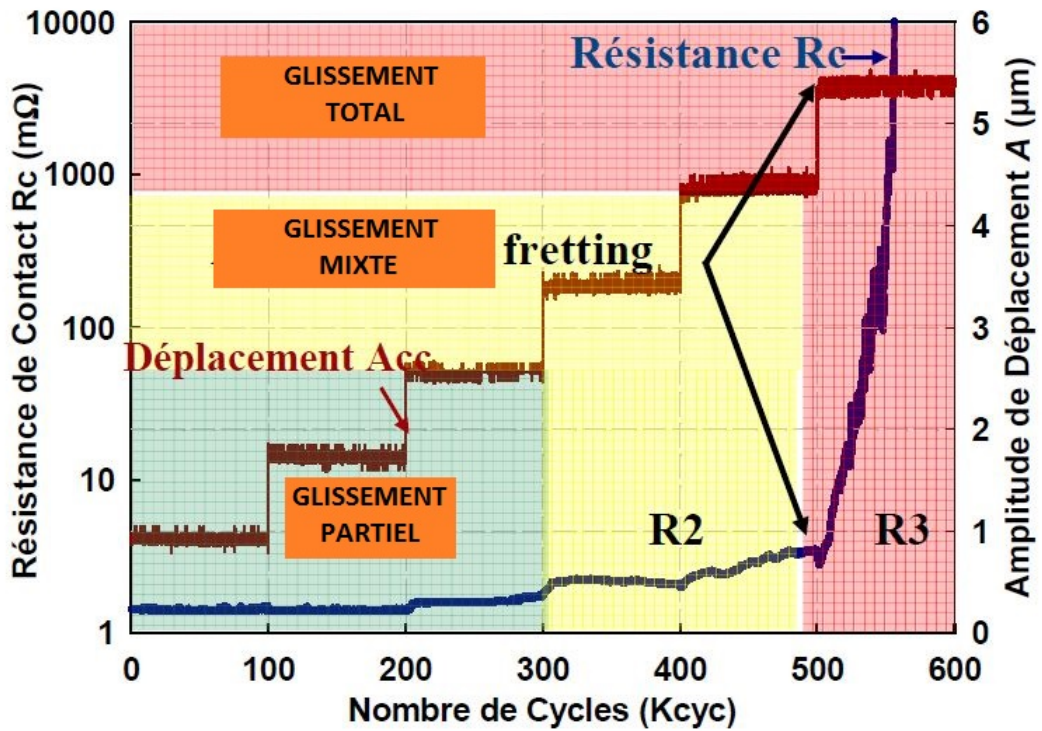


FIGURE 1.32 – Évolution de la résistance de contact R_C en fonction du nombre de cycles et de l'amplitude de déplacement A_{CC} [47].

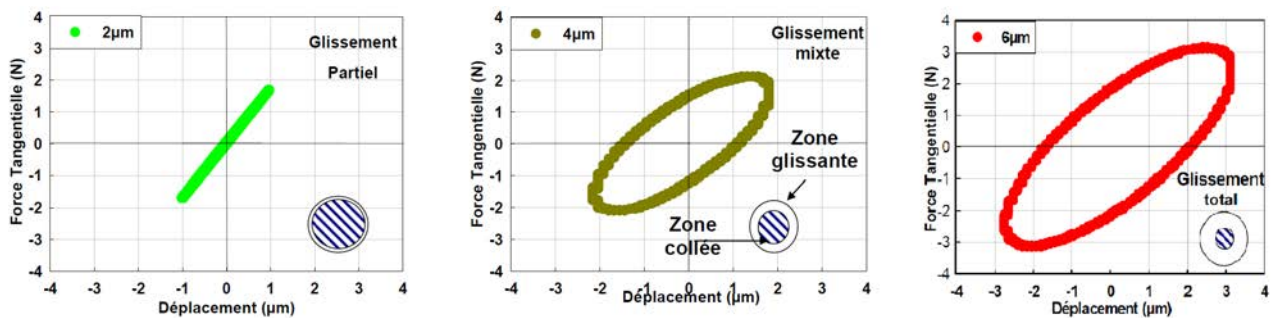


FIGURE 1.33 – Mesure de la force tangentielle pour trois amplitudes de déplacement : 2, 4 et 6 μm (10 Hz, $F_C = 2,5$ N, $I = 100$ mA) [47].

Les observations sont les suivantes :

- Entre 1 et 2,5 μm d'amplitude de déplacement relatif, la résistance de contact est faible et stable. L'allure de la force tangentielle en fonction du déplacement est linéaire ce qui atteste d'un glissement partiel.
- Entre 2,5 et 4,5 μm d'amplitude de déplacement relatif, la résistance de contact fluctue mais reste faible (inférieure à 10 $m\Omega$). L'allure de la force tangentielle est de type ellipsoïdale, caractéristique d'une augmentation de la surface de la zone collée. Le glissement est alors mixte.
- Entre 4,5 et 6 μm d'amplitude de déplacement relatif, la résistance de contact augmente fortement. La courbe de force tangentielle est ellipsoïdale avec une amplitude plus importante que précédemment. Le glissement est total.

L'analyse des deux figures précédentes permet de faire le lien entre le type de glissement et les perturbations électriques. En effet, la dégradation mécanique de la zone de contact induit une diminution de la taille de la zone collée soit une diminution du nombre de spots de contact et donc une augmentation de la tension de contact.

Énergie dissipée durant le glissement

Durant un cycle vibratoire, l'énergie dissipée E_d définit également le type de glissement. En effet, sa valeur sera d'autant plus importante que la zone glissante sera présente. Elle est mesurable en calculant l'aire de la courbe force tangentielle/déplacement. Cela correspond à l'aire grisée de la courbe (a) de la figure 1.34. La forme de cette aire est complexe car elle dépend du caractère élasto-plastique du contact, voir la courbe (b) de la figure 1.34 [48]. En parallèle, l'énergie totale du cycle E_T correspond à l'aire qui englobe entièrement la courbe de la figure 1.34 par ces maxima δ^* et Q^* .

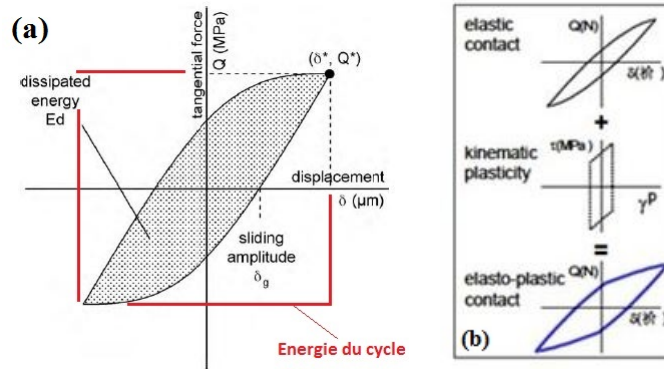


FIGURE 1.34 – (a) Courbe de la force tangentielle en fonction du déplacement, (b) détermination du type de contact en fonction de l'allure de la courbe [48].

Les valeurs de ces énergies, E_d et E_T , fluctuent de la même manière au cours du temps car elles dépendent du type de matériaux en contact. L'analyse de ces valeurs manquerait donc de précision pour définir le degré de dégradation de l'interface. C'est pourquoi le rapport A entre ces deux énergies est utilisé, voir l'équation 1.26 [49].

$$A = \frac{E_d}{E_t} = \frac{E_d}{4\delta^*Q^*} \quad (1.26)$$

La figure 1.35 illustre le rapport A et le coefficient de friction f en fonction du type de glissement. La valeur de A correspond au rapport du nombre de cycles de glissement total sur 1000 cycles. Les trois types de glissement sont alors mis en évidence.

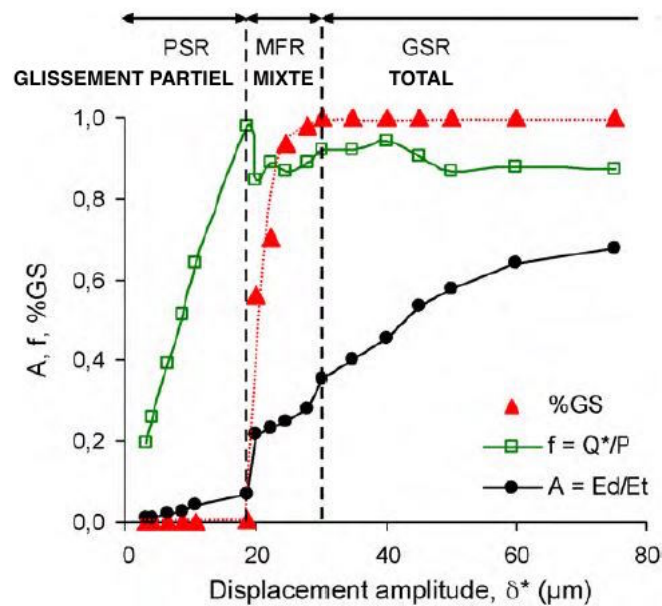


FIGURE 1.35 – Résultats de la mesure du coefficient de friction f et du rapport A [41].

Le rapport A augmente constamment au cours de l'expérience. Ainsi, la zone collée diminue dès le début jusqu'à la fin de l'expérience. Ce constat illustre une dégradation continue par fretting-corrosion tout au long de l'expérience.

Deux augmentations importantes ont lieu lors du passage entre glissement partiel \leftrightarrow mixte puis lors du passage glissement mixte \leftrightarrow partiel. Par conséquent, la valeur du rapport A définit non seulement le type de glissement mais le type de conduction électrique :

- $A \simeq 0,1$ correspond à une transition électrique pour une amplitude de déplacement notée δ_{ilt} . Le coefficient de friction est à son maximum. Les premières perturbations électriques commencent [50].
- $0,1 < A < 0,2$ correspond à un glissement mixte.
- $A \simeq 0,2$ correspond à une transition mécanique pour une amplitude de déplacement notée δ_t . Il s'agit de la transition entre un glissement mixte vers un glissement total.

Amplitude de vibration/glissement - comparaison entre l'étain, l'argent et l'or.

L'amplitude de vibration peut définir le degré de la dégradation. Sa valeur doit être inférieure à δ_{ilt} pour assurer une conduction électrique sans perturbation [41]. La figure 1.36 indique le nombre de cycles nécessaires pour atteindre des perturbations électriques à une amplitude donnée. Les résultats permettent notamment de comparer trois types de revêtements sur barreaux croisés : étain, argent et or. Les observations sont les suivantes :

- L'amplitude de transition électrique δ_{ilt} est identique pour les trois revêtements. Sa valeur est de $4 \mu m$.
- Le comportement électrique des matériaux suit une loi similaire qui est de forme exponentielle décroissante.
- Un revêtement en étain aura une durée de vie plus courte qu'un revêtement en or ou argent. En effet, la conduction électrique est perturbée avec la présence d'oxydes à l'interface.
- L'or et l'argent ont un comportement électrique similaire car ils ne s'oxydent pas.

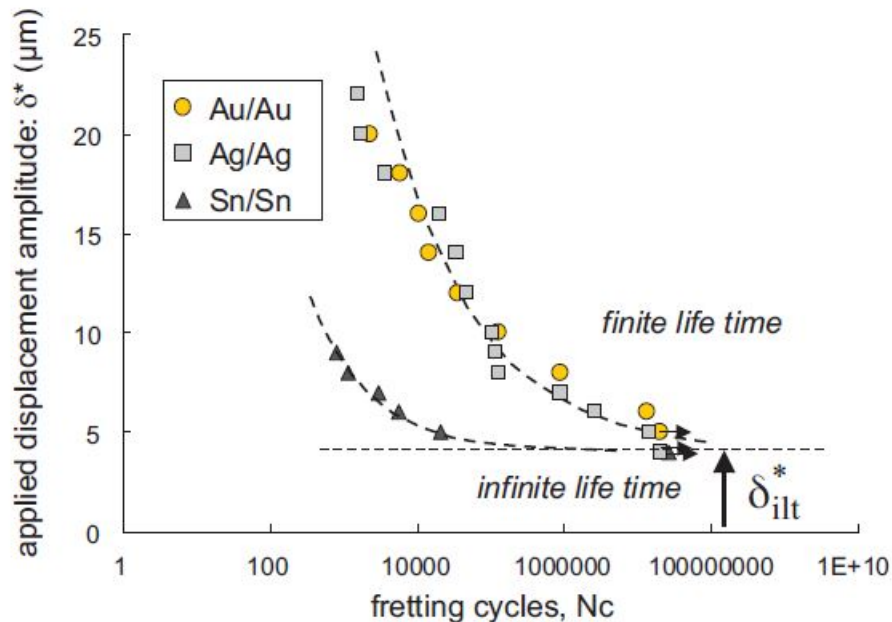


FIGURE 1.36 – Évolution de la conduction électrique en fonction de l'amplitude de déplacement et du nombre de cycles pour 3 types de revêtements : or, argent et étain [41]. Pour chaque cas, l'épaisseur du revêtement est de $1,3 \mu m$, la sous-couche de nickel est de $2 \mu m$, le substrat est un alliage en cuivre.

État de surface suivant le type de glissement.

La figure 1.37 compare l'état de surface d'un contact Sn-Sn pour deux types de glissements : partiel et total [49]. L'analyse chimique de la zone de contact permet de définir le degré de dégradation :

- Sous glissement partiel, les débris oxydés d'étain sont localisés autour de la zone de contact. De ce fait, ils situent la zone glissante. De plus, l'élément cuivre du substrat n'apparaît pas, attestant d'une zone faiblement dégradée.
- Sous glissement total, le revêtement en étain n'est plus présent. En effet, la zone centrale est clairement dégradée avec l'apparition du substrat en cuivre et de ses oxydes.

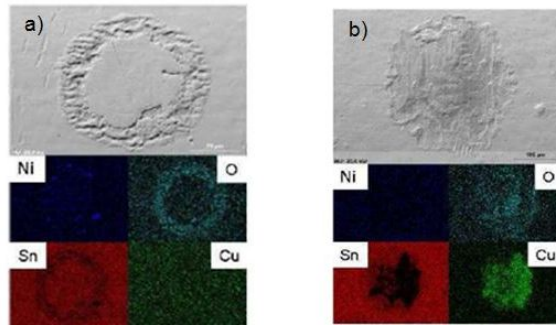


FIGURE 1.37 – Observation et analyse EDX de la distribution des éléments cuivre, étain, oxygène et nickel sur la trace de fretting d'un contact Sn-Sn pour (a) un glissement partiel et (b) un glissement total [49]

La figure 1.38 compare l'état de surface d'un contact revêtu d'argent pour deux types de glissements : partiel ou total[49]. L'analyse chimique permet de définir les points suivants :

- La conduction électrique sous un revêtement noble atteste d'une bonne conduction électrique. Toutefois, la zone est dégradée car l'argent ne figure plus sur la zone de contact laissant apparaître la sous-couche de nickel. Le substrat en cuivre n'est cependant pas atteint.
- Sous un glissement total, la dégradation est plus importante. En effet, le substrat en cuivre apparaît et laisse place à la formation d'oxydes de cuivre électriquement isolants.

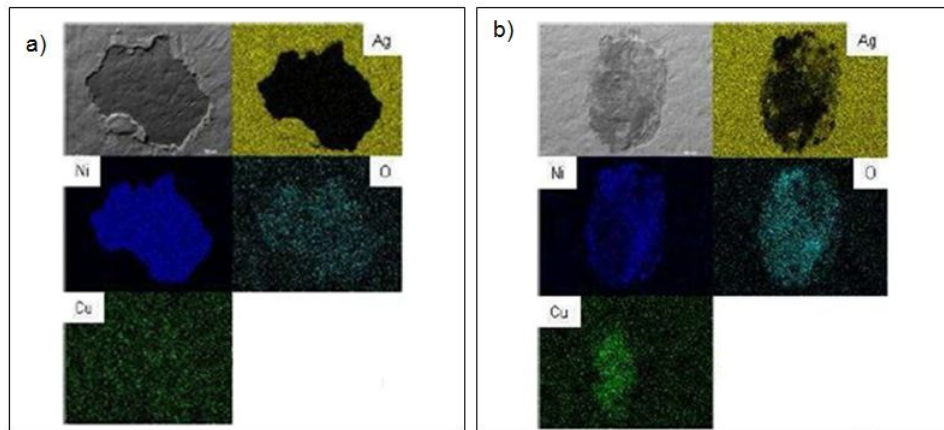


FIGURE 1.38 – Observation et analyse EDX de la distribution des éléments présents sur la trace de fretting d'un contact Ag-Ag pour (a) un glissement partiel et (b) un glissement total [49].

En résumé, les revêtements nobles et non-nobles ne se dégradent pas de la même manière sous sollicitation vibratoire. Un revêtement en étain fera apparaître une zone glissante de forme annulaire tandis qu'un revêtement en argent subira une dégradation sur l'ensemble de la surface. Néanmoins, la présence de débris d'argent conducteurs assure un bon fonctionnement du contact. La concentration volumique d'éléments définit le type de conduction :

- Pour un revêtement noble, la concentration volumique de l'élément du troisième corps doit être supérieure à 5% pour assurer une conduction électrique correcte.
- Pour un revêtement non-noble, la concentration volumique en oxygène, issue des oxydes, doit être inférieure à 50%.

1.2.4 Paramètres influençant le fretting-corrosion

Amplitude et fréquence et de la vibration

Un mouvement relatif correspond à la différence de déplacement entre un clip et une languette (voir la figure 1.24 de la page 24). Dans le cadre du fretting-corrosion, son amplitude de vibration est comprise entre quelques micromètres et plusieurs dizaines de micromètres. Ce mouvement $x(t)$ est généralement de type sinusoïdal, soit une amplitude X à une fréquence f (ou pulsation $\omega = 2\pi f$), voir l'équation 1.27.

$$x(t) = X \sin(\omega t) \quad (1.27)$$

Accélération et vitesse

Les équations de la vitesse $v(t)$ et de l'accélération $a(t)$ sont reliées au déplacement $x(t)$ par une dérivée simple et double, voir les équations 1.28 et 1.29. Cette opération mathématique implique un déphasage respectif de 90° et 180° par rapport au signal sinusoïdal $x(t)$.

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = X\omega \times \sin(\omega t + 90) = V \cos(\omega t) \quad (1.28)$$

$$a(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2} = X\omega^2 \times \sin(\omega t + 180) = -A \sin(\omega t) \quad (1.29)$$

Les amplitudes V et A dépendent d'une part de l'amplitude de déplacement X et d'autre part de la pulsation ω . Par conséquent, une augmentation de la fréquence et/ou de l'amplitude entraînerait un accroissement de la vitesse et de l'accélération. Par ailleurs, la vitesse apporte une information concernant l'énergie cinétique par la relation $E = \frac{1}{2}mv^2$ tandis que l'accélération apporte une information concernant une *force* tel que $\|\vec{F}\| = m\|\vec{a}\|$. En exemple, la figure 1.39 illustre la durée nécessaire pour que la résistance de contact atteigne $100 \text{ m}\Omega$ pour plusieurs couples d'amplitude-fréquence [51] :

- Une augmentation de la fréquence diminue la longévité du contact. Ce premier constat est déductif dans la mesure où une augmentation de l'énergie et de la force à l'interface induit une augmentation de la dégradation de l'état de surface.
- Une augmentation de l'amplitude de 5 à $25 \mu\text{m}$ améliore la longévité du contact. Ce deuxième constat n'est pas logique car la force et l'énergie qui interagissent à l'interface augmentent. Cependant, les débris ont moins d'énergie pour être évacués à $5 \mu\text{m}$, ils restent bloqués à l'interface. Par conséquent, il y a moins de renouvellement de la zone de contact pour une amplitude de $5 \mu\text{m}$ qu'à $25 \mu\text{m}$ [52].

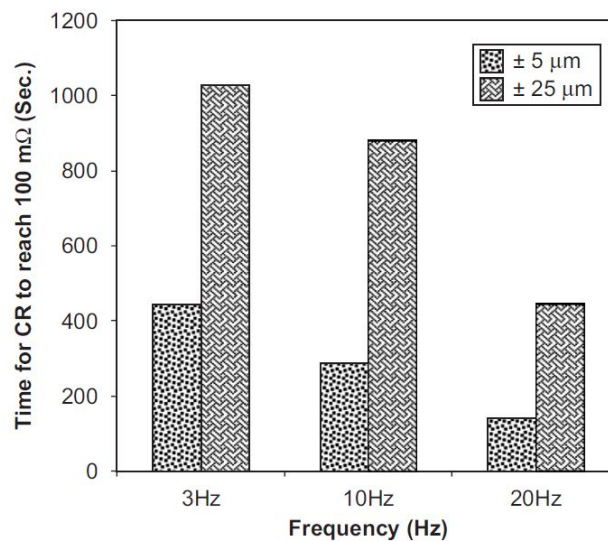


FIGURE 1.39 – Mesure du temps pour atteindre une résistance de contact égale à $100 \text{ m}\Omega$ pour une amplitude de déplacement de $5 \mu\text{m}$ et $25 \mu\text{m}$, fréquence de 3, 10 et 20 Hz. La force de contact est égale à 0.5 N , le courant imposé est de 100 mA [51].

Les amplitudes et fréquences de vibration définissent non seulement la taille de la zone de contact mais également le degré de dégradation mécanique. La figure 1.40 représente des profils de concentration en éléments (Cu, Sn et O) par analyse EDX. L'axe des profils de concentration est orthogonal à l'axe de vibration. Les conditions expérimentales sont $5\mu\text{m}$ -3Hz, $25\mu\text{m}$ -3Hz, $5\mu\text{m}$ -20Hz, $25\mu\text{m}$ -20Hz [46].

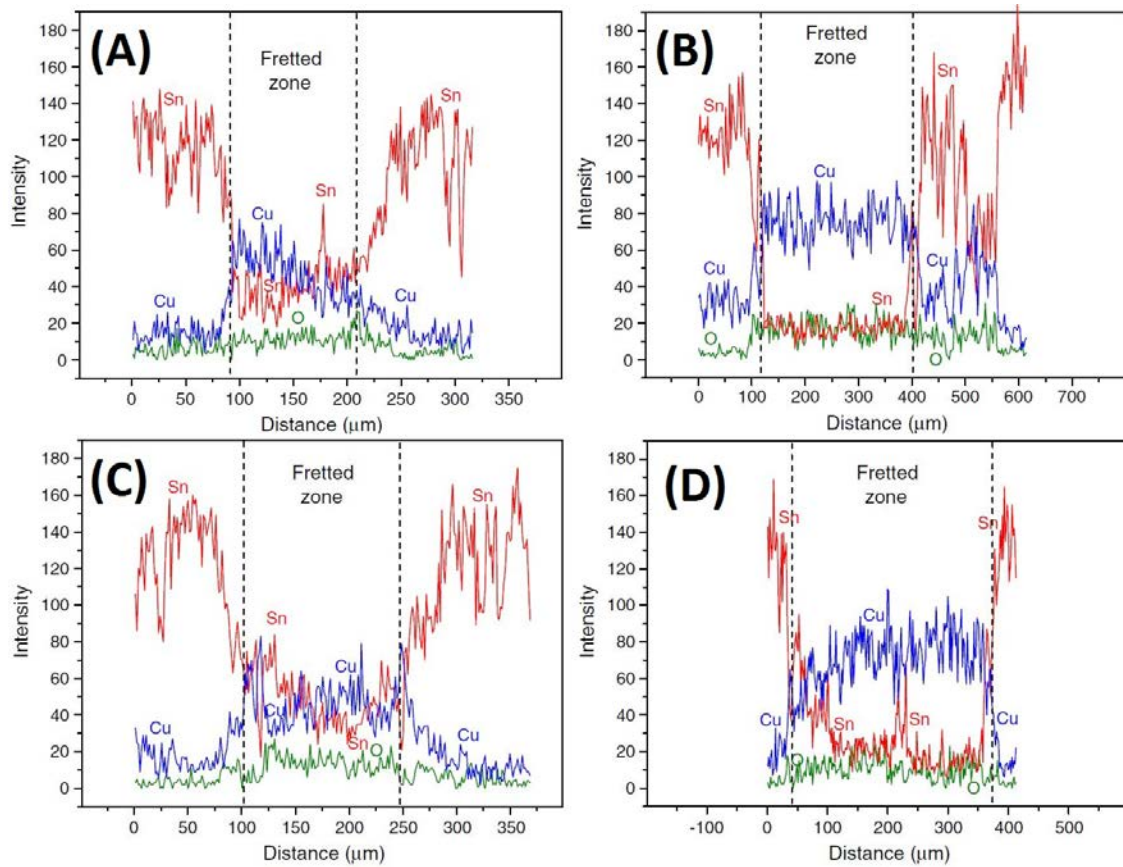


FIGURE 1.40 – Profils de concentration des éléments cuivre, étain et oxygène par analyse EDX. L'axe du profil est orthogonal à l'axe de vibration. Les conditions expérimentales sont les suivantes (a) $5\mu\text{m}$ -3 Hz, (b) $25\mu\text{m}$ -3 Hz, (c) $5\mu\text{m}$ -20 Hz, (d) $25\mu\text{m}$ -20 Hz. La force de contact est de 0,5 N. [46]

En premier point, les proportions en étain et cuivre varient sur la surface usée. En effet, le profil (A) de la figure 1.40 indique des concentrations en cuivre et étain égales à 60% et 30% à gauche de la zone de contact. Ces valeurs atteignent 30% et 50% à droite de la zone de contact. La composition chimique d'une surface dégradée n'est donc pas homogène sur toute sa surface. En deuxième point, les quatre sollicitations vibratoires permettent les observations suivantes sur la composition chimique :

- Une augmentation en amplitude de vibration de 5 à $25\mu\text{m}$ induit les effets suivants :
 - La largeur de la zone de contact augmente. Elle passe de $150\mu\text{m}$ à $300\mu\text{m}$.
 - La proportion en cuivre de la zone de contact augmente globalement de 50 à 80%.
 - La proportion en étain de la zone de contact diminue globalement de 40 à 20%. La présence de l'étain peut être due à des restes du revêtement ou bien du composé inter-métallique.
- Une augmentation de la fréquence n'indique pas de différence sur les profils de concentration. En effet, les profils (A) et (C) puis (B) et (D) sont similaires.

La figure 1.41 représente les profils de la rugosité de ces mêmes traces, mais cette fois, suivant l'axe de vibration [46]. Les observations sont les suivantes :

- L'augmentation en amplitude de vibration de 5 à 25 μm induit les effets suivants :
 - Une augmentation de la longueur de la zone de contact d'environ 240 μm à environ 450 μm .
 - Une augmentation de la rugosité à l'interface.
- L'augmentation de la fréquence de 3 à 20 Hz induit une augmentation de la profondeur de la dégradation.

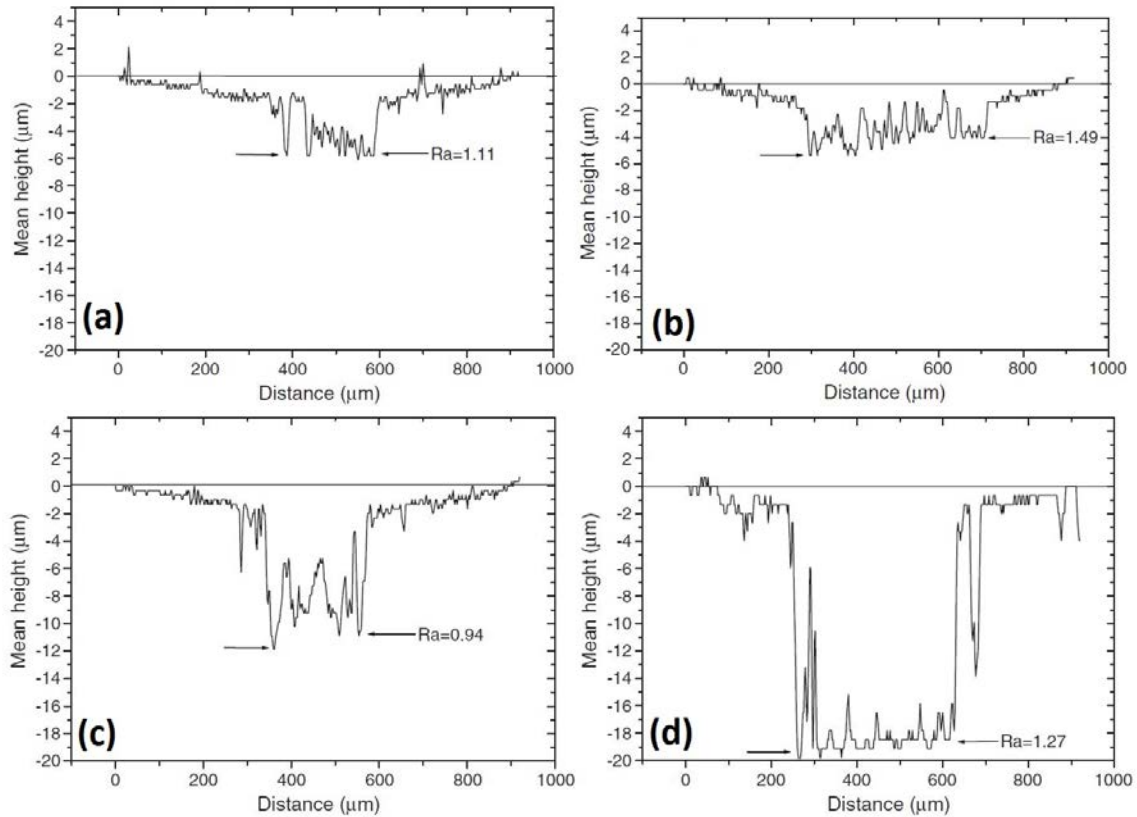


FIGURE 1.41 – Profils de l'état de surface par mesure de la rugosité suivant l'axe de vibration. Les conditions expérimentales sont les suivantes (a) 5 μm -3 Hz, (b) 25 μm -3 Hz, (c) 5 μm -20 Hz, (d) 25 μm -20 Hz . La force de contact est de 0,5 N [46].

Le profil (c) est plus dégradé que le profil (b). Or la proportion en étain est plus importante pour le profil (c). Cette raison provient du fait que l'amplitude de vibration égale à 5 μm ne permet pas l'évacuation des débris hors de la zone de contact. En effet, l'énergie pour évacuer les débris n'est pas assez importante. Le tableau 1.6 résume les résultats de ces analyses de surface.

TABLE 1.6 – Caractéristiques des zones de contact en fonction de l'amplitude et de la fréquence (Ra : rugosité).

Amplitude	Fréquence [Hz]	Longueur	largeur	Profondeur	Ra	Cu	Sn	O
[μm]	[Hz]	[μm]			μm	% atom.		
5	3	240	130	-6	1,11	50	40	10
5	20	220	140	-8	0,94	40	45	15
25	3	420	280	-5	1,49	70	15	15
25	20	520	330	-18	1.27	70	20	10

L'amplitude et la fréquence sont des paramètres importants mais l'état de surface et les conditions expérimentales doivent être pris en compte pour expliquer les phénomènes de dégradation. Par exemple, les résultats réalisés sur des échantillons de type barreaux-croisés seront différents de ceux issus des échantillons clip/languette. En effet, la forme sphérique de ces échantillons permet une meilleure évacuation des débris.

La force de contact

La force de contact permet le maintien du contact sous sollicitation vibratoire. L'augmentation de sa valeur améliore la résistance au fretting-corrosion. En effet, la figure 1.42 indique que le minimum d'amplitude avant dégradation électrique augmente lorsque la force de contact augmente également. Le minimum d'amplitude correspond à l'amplitude de vibration minimale pour éviter une augmentation soudaine de la tension de contact. Sa valeur peut être calculée théoriquement selon la relation de Mindlin [45].

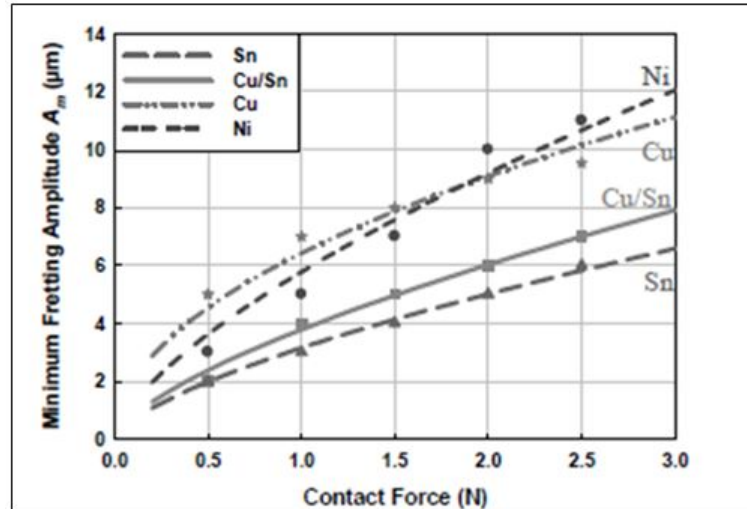


FIGURE 1.42 – Mesure de la résistance de contact en fonction de la force de contact pour des contacts Sn-Sn, Cu-Sn, Cu-Cu et Ni-Ni pour une fréquence de vibration égale à 10 Hz. Les droites théoriques sont tracées en suivant la formule théorique de Mindlin [45].

L'épaisseur du revêtement

Les caractéristiques mécaniques du revêtement sont forcément différentes de ceux du substrat. Lors d'un contact clip/languette, cette combinaison définit le caractère élasto-plastique. Ce dernier dépend aussi de l'épaisseur du revêtement. La figure 1.43 montre l'endurance d'un contact en fonction de l'épaisseur d'argent sur substrat. L'endurance correspond au nombre maximal de cycles où la résistance de contact augmente de $4 m\Omega$. Les résultats confirment les points suivants :

- La durée de vie du contact est quasi-nulle pour une épaisseur de revêtement inférieure à $1,5 \mu m$.
- Au-delà de $1,5 \mu m$, l'endurance du contact électrique est améliorée. Elle semble suivre une loi linéaire.

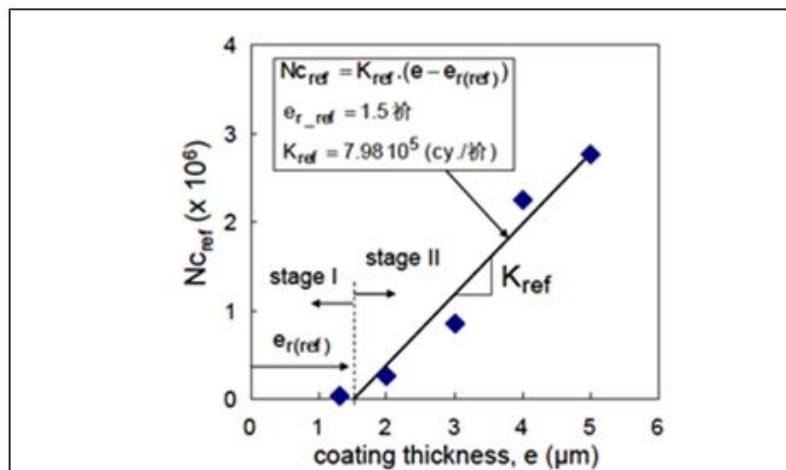


FIGURE 1.43 – Endurance maximale d'un contact Ag-Ag en fonction de son épaisseur soumis à une sollicitation vibratoire ($25 \mu m$, 30 Hz) [48].

Selon Antler, la résistance à la génération de débris est meilleure pour les faibles épaisseurs sur substrat [21]. Par conséquent, une faible épaisseur d'argent devrait mieux résister à une usure par génération de débris en surface. C'est pourquoi le résultat de cette expérience est surprenant. Toutefois, le fretting ne dégrade pas seulement la surface par génération de débris mais modifie également la profondeur du matériau avec une augmentation des contraintes internes en profondeur.

L'atmosphère

L'air contient 20 % d'oxygène , 79 % d'azote et 1 % de multiples gaz (fraction molaire). La forte réactivité chimique de l'oxygène avec les métaux non-nobles entraîne la formation de composés oxydés en tant que troisième corps. Ces débris dégradent mécaniquement et électriquement l'interface [42]. Les études sur l'influence d'une atmosphère avec une concentration partielle ou nulle en oxygène sont actuellement peu nombreuses malgré l'importance de ce paramètre. En effet, ces études apporteront une information primordiale sur le processus de formation des débris.

Les courbes de la figure 1.44 représentent les mesures de la tension de contact entre une atmosphère oxygénée (20% O₂ + 80% Ar) et une atmosphère chimiquement inerte (100% argon sur un contact glissant carbone-cuivre. Dans chaque cas, Ueno [53] a également comparé l'influence du ponçage (2000 et 6000) mais cette donnée ne sera pas commentée.

- Une atmosphère oxygénée induit une augmentation de la tension de contact jusqu'à 0,8V. Il s'agit d'un comportement électrique classique.
- Une atmosphère neutre fait également augmenter la tension de contact jusqu'à 0,3V. En effet, un troisième corps se forme par adsorption physique de l'argon et/ou la formation d'une fine couche isolante de carbone.

L'absence de composés oxydés améliore cependant la conduction comme c'est le cas d'un matériau noble. Une dégradation par fretting-corrosion d'un revêtement en étain formerait donc un troisième corps composé de débris purs.

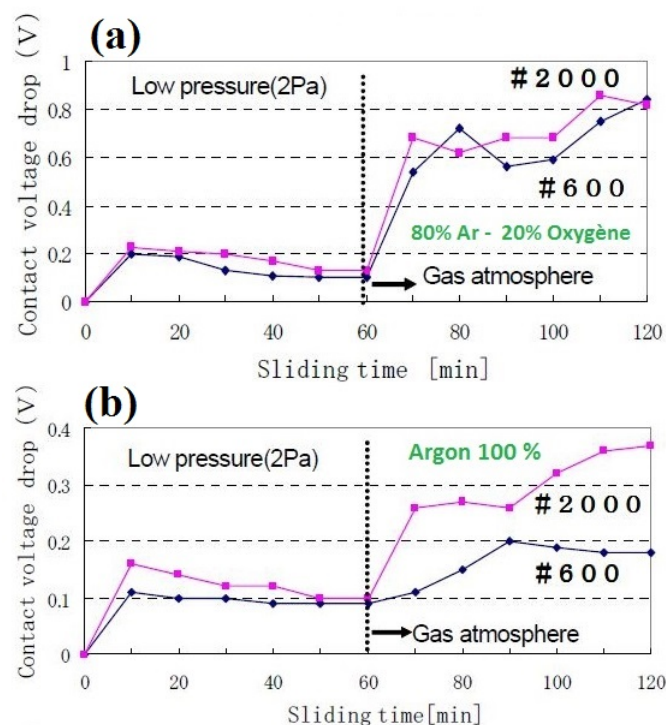


FIGURE 1.44 – Analyse de la tension de contact d'un contact glissant dans deux atmosphères différentes (a) 80% Argon et 20% O₂ et (b) 100% Argon [53].

Effet du courant

Le courant I correspond à un flux de charges électriques J à travers un volume V . Ce dernier dépend du nombre et de la taille des spots de conduction. A courant constant, une diminution de ce volume V entraîne une augmentation de concentration des charges et donc une augmentation de l'effet Joule et de la température. Par conséquent, la cinétique des réactions chimiques augmente et des changements de phases peuvent se mettre en place. La valeur du courant I a donc une forte influence.

La figure 1.45 représente trois courbes de résistance de contact pour trois valeurs de courants différentes : 1, 2 et 3 A. Chacune de ces courbes est partagée en trois étapes [46] :

- Etape I : résistance faible, aucune fluctuation.
- Etape II : résistance faible, légères fluctuations.
- Etape III : résistance élevée, fortes fluctuations.

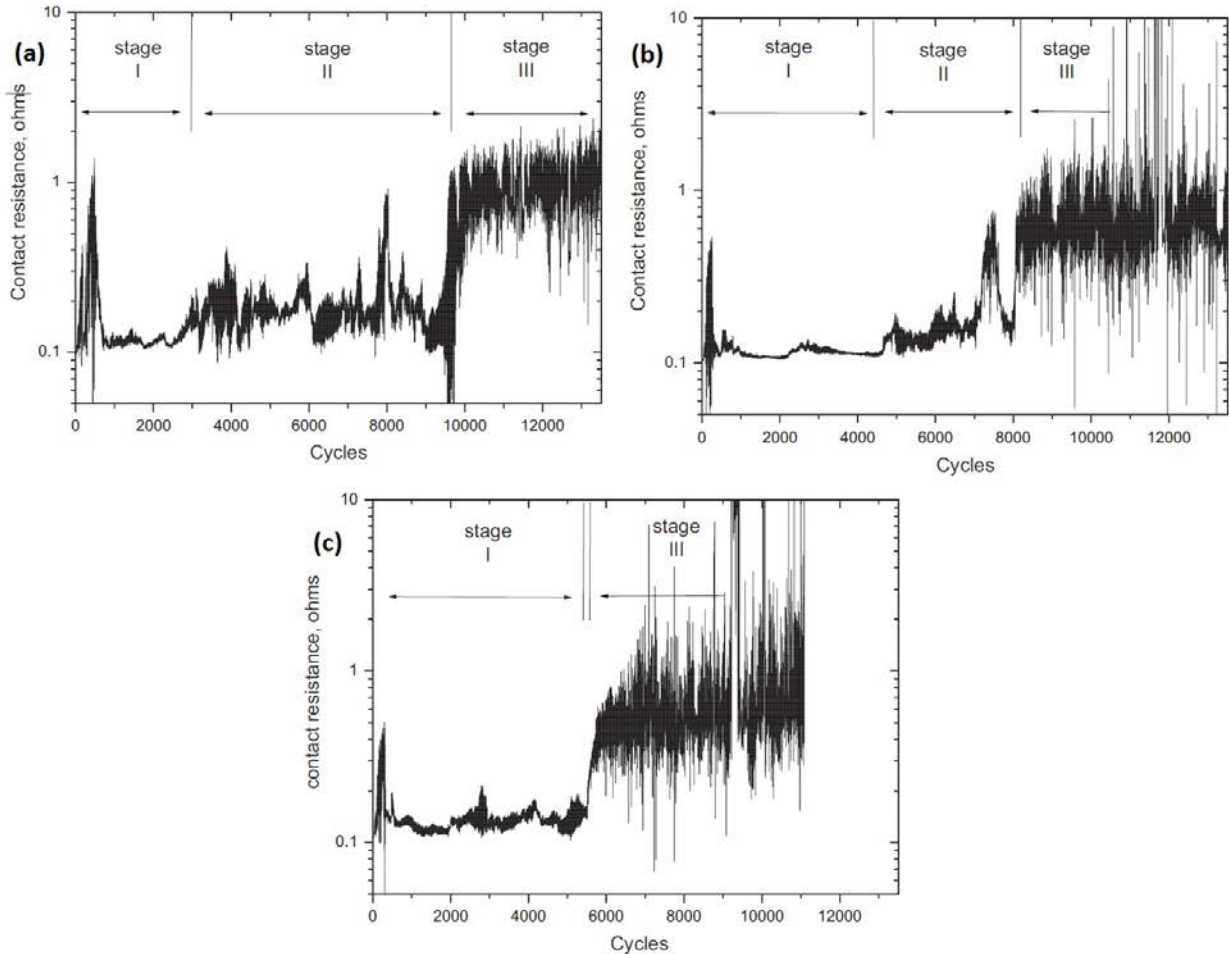


FIGURE 1.45 – Mesure de la résistance de contact en fonction du nombre de cycles pour un contact étain-étain à des courants de (a) 1 A, (b) 2 A et (c) 3 A [46].

Le comportement électrique évolue lorsque le courant augmente de 1 à 3A. D'une part, le commencement du stade III intervient plus rapidement. D'autre part, la durée de l'étape I passe de 3000 à 5500 s. La stabilité de la conduction est améliorée mais le changement est plus brutal.

La raison de cette évolution électrique provient du troisième corps. La figure 1.46 regroupe les photographies de débris au centre et au bord des zones de contact. La taille des débris est différente suivant la valeur du courant.

- La taille des particules au centre diminue.
- La taille des particules au centre de la trace est comprise entre 1 et $7.5\mu\text{m}$ pour des courants de 1 et 2A et comprise entre 0.05 et $2\mu\text{m}$ pour un courant de 3A.
- La taille des particules à l'extérieur augmente.

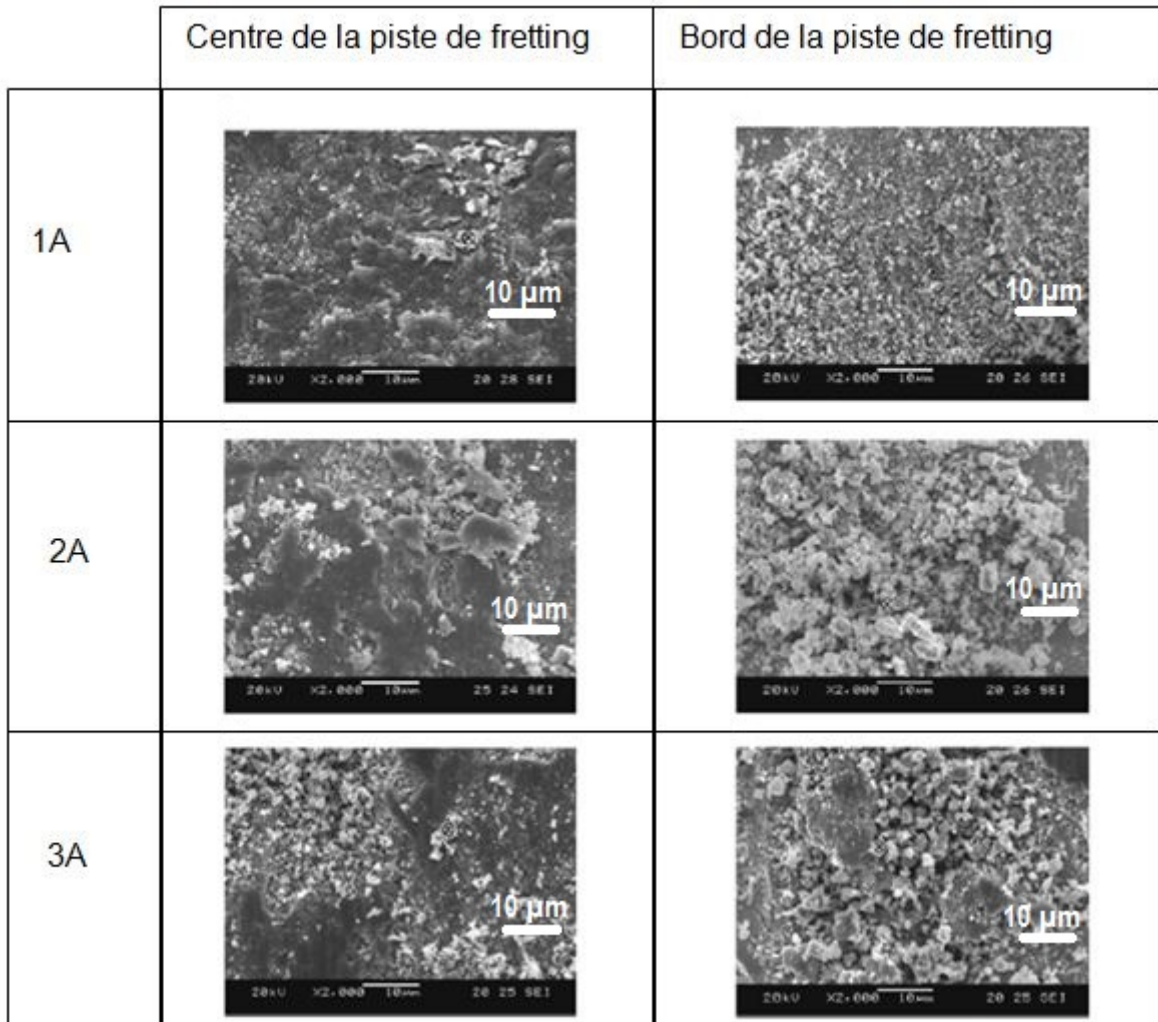


FIGURE 1.46 – Observation des débris sur le centre et en dehors de la trace de fretting pour différents courants : 1A, 2A et 3A [46].

La diminution de la durée de l'étape serait donc due à deux phénomènes :

- L'absence de débris de forte taille au centre de la trace de fretting-corrosion. En effet, les débris sont plus petits pour un courant de 3A. Ils s'accumulent autour des aspérités avant de rendre le contact complètement isolant.
- Une augmentation de la température. L'augmentation de l'intensité de courant augmente l'effet Joule. L'aire de contact est agrandie pour un contact étain-étain [51].

Le changement du courant influence la taille des débris, la température et d'autres paramètres... Cette influence témoigne du réseau entre les différents paramètres du fretting-corrosion. Néanmoins, le comportement dépend fortement du troisième corps.

1.2.5 Analyses de surface

Caractérisation d'une trace de fretting-corrosion par EDX

Les analyses chimiques de surface sont réalisées par MEB en utilisant la technique d'analyse EDX. Cette technique permet notamment d'analyser le spectre de rayonnement X issu de l'interaction entre le faisceau incident et les matériaux de la surface dans le but de les identifier. C'est par conséquent, une technique couramment utilisée dans l'étude des contacts électriques.

L'analyse EDX ne permet pas de doser avec une bonne résolution car la poire d'interaction mesure environ $5 \mu\text{m}$. De plus, les rayonnements émis depuis les éléments légers ne possèdent pas une énergie susceptible de leur permettre de provenir d'une couche au-delà d'un micromètre, voir figure 1.47. Aussi, l'analyse effectuée par un MEB est faussée, car les volumes sondés entre les éléments lourds (métaux de transition) et les éléments légers ne sont pas les mêmes. De plus, les rayonnements issus des éléments lourds perturbent les rayonnements des éléments légers. La composition de ces derniers est donc parfois très éloignée de la réalité. Par conséquent, le dosage d'éléments légers n'est pas possible par l'analyse EDX.

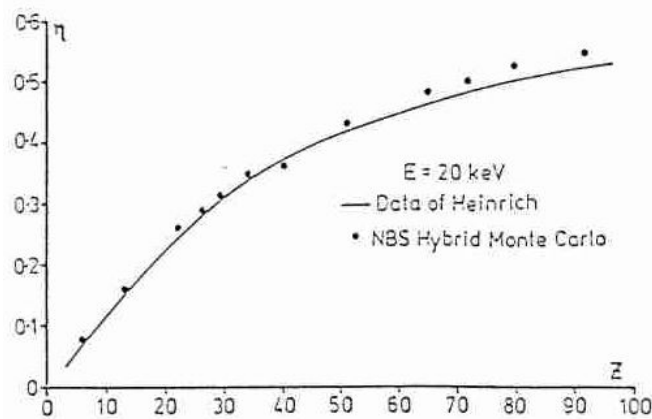


FIGURE 1.47 – Graphique du rendement énergétique d'une analyse EDX en fonction du numéro atomique de l'élément considéré [54].

En résumé, l'analyse d'une zone de contact par la technique EDX permet d'une part de doser quantitativement les éléments lourds (étain, cuivre) et d'autre part d'observer qualitativement la présence des éléments légers (oxygène, carbone).

Caractérisation d'une trace de fretting corrosion par la micro-sonde nucléaire

La micro-sonde nucléaire est un dispositif expérimental situé au laboratoire de recherche IRAMIS à Saclay, voir figure 1.48 [55]. Ce dispositif permet notamment de générer un faisceau qui va permettre d'engendrer des interactions spécifiques avec les isotopes des éléments présents dans la zone d'interaction entre le rayon incident et la surface de l'échantillon afin de localiser, de quantifier et de sonder les éléments légers sur une surface. Pour cela, plusieurs types d'interactions se font entre le faisceau incident et le noyau de l'atome cible, d'où la dénomination de réaction nucléaire. Par conséquent, les quantifications obtenues à l'aide de la micro-sonde apporteront de nouvelles informations sur les proportions en éléments légers.

Dans le cadre de cette thèse, les éléments légers concernés sont l'oxygène ($Z=8$) et le carbone ($Z=6$). Ces éléments sont en lien respectif avec les oxydes et les impuretés.

Le faisceau est constitué par des deutérons (${}^2\text{H}$). Ils sont injectés depuis une bouteille dans un accélérateur de particules de type Van-De-Graaff. Le faisceau est de forme elliptique dont la longueur et la largeur sont respectivement égales à $4 \mu\text{m}$ et $3 \mu\text{m}$. Il est possible d'analyser une surface de la taille du faisceau (1 pixel) ou une surface plus importante en reconstruisant un spectre général pixel par pixel. Dans ce dernier cas, une cartographie est obtenue.

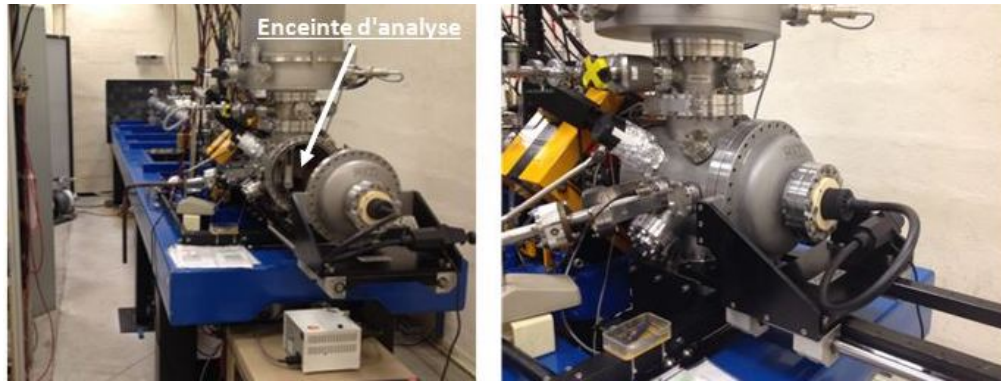


FIGURE 1.48 – Photographies du dispositif expérimental de la micro-sonde nucléaire

Son énergie a été fixée à 1430 keV. De ce fait, il est possible d'obtenir un spectre énergétique assez large pour différencier les interactions entre les éléments lourds et légers [56] [57]. Les détecteurs permettent de récupérer les rayons X et les rayons Gamma, voir figure 1.49.

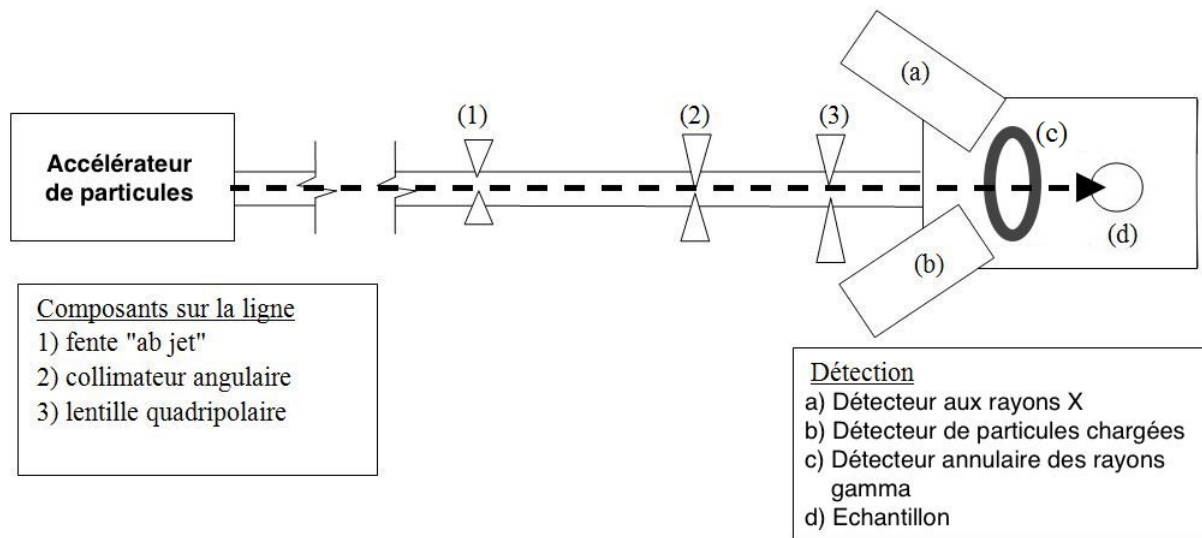


FIGURE 1.49 – Schéma du dispositif expérimental de la micro-sonde nucléaire

Les données expérimentales sont issues de trois interactions entre le faisceau et la matière. Ils permettront de détecter les éléments suivants : oxygène, carbone, étain et cuivre. Parmi les trois techniques d'analyse associées aux interactions, PIXE, RBS et NRA, nous allons indiquer quelques précisions :

La technique PIXE (Proton Induced X-ray Emission) est basée sur une interaction inélastique et électronique correspondant à une analyse EDX. Son principe est le suivant : un deuteron rentre en collision avec un électron situé dans une couche électronique interne d'un élément. Cet électron est alors éjecté puis remplacé par un autre électron d'une couche électronique de plus forte énergie. La relaxation énergétique produit un rayon X caractéristique de l'élément considéré. La résolution du détecteur de la microsonde est de l'ordre de 0,1 keV, il est donc possible de différencier chacune des raies caractéristiques d'un élément. Toutefois, cette technique permet de doser que les éléments lourds.

La technique RBS (Rutherford BackScattering) est basée sur le choc élastique entre la particule cible, dans notre cas le deutéron, et un noyau cible. Le deutéron perdra alors une fraction K (facteur cinématique inférieur à 1) de son énergie incidente $E_{incidente}$, voir équation 1.30. Cette interaction concerne donc tout les éléments.

$$E_{mesure} = KE_{incident} \text{ avec } K \leq 1 \quad (1.30)$$

Dans le cas de la NRA, le deutéron incident interagit avec le noyau de l'isotope présent dans l'échantillon. Il en résulte la génération d'une particule chargée et la création d'un nouveau noyau. Cette interactions ne concernent que les éléments considérés et tient compte de la rugosité de la surface.

La réaction entre l'isotope 16 de l'oxygène et le deutéron génère deux réactions nucléaires qui conduisent à deux pics ${}^{16}_8O(d,p0){}^{17}_8O$ et ${}^{16}_8O(d,p1){}^{17}_8O$ sur le spectre. Le carbone génère seulement un pic identifié par ${}^{12}_6C(d,p0){}^{13}_6C$. La hauteur et la largeur d'un pic dépendent d'une part de la concentration et de la disposition des éléments et d'autre part des conditions expérimentales. On écrit alors ces réactions par les bilans suivants :



Le tableau 1.7 reprend les caractéristiques liées aux interactions RBS, NRA et DRX en lien avec les éléments cuivre, étain, oxygène et carbone. Ces données seront ensuite utilisées pour l'analyse des résultats.

TABLE 1.7 – Caractéristiques énergétiques des éléments cuivre, étain, oxygène et carbone en lien avec les techniques des analyses RBS, NRA et PIXE.

	Cuivre		Étain		Oxygène		Carbone
RBS							
Facteur cinématique K	0,8817		0,9349		-		-
$K \times 1430$ keV	1276 keV		1376 keV		-		-
NRA	-	-	-	-	${}^{16}_8O(d,p0){}^{17}_8O$	${}^{16}_8O(d,p1){}^{17}_8O$	${}^{12}_6C(d,p0){}^{13}_6C$
	-	-	-	-	A	B	C
PIXE (DRX) [keV]	$K_{\alpha 1}$	$K_{\beta 1}$	$L_{\alpha 1}$	$L_{\beta 1}$	$K_{\alpha 1}$	-	$K_{\alpha 1}$
	8,047	8,905	3,444	3,663	0,525	-	0,277

En résumé, les interactions nucléaires ont des interactions énergétiques de valeurs différentes des interactions électroniques. De ce fait, il est possible d'une part de les différencier et d'autre part de doser les éléments légers.

1.2.6 Modélisation numérique du fretting-corrosion

Modélisation numérique de l'évolution de la résistance de contact liée à la présence d'oxydes.

Une modélisation numérique connecte chacun des paramètres qui influencent le fretting-corrosion. L'objectif est d'obtenir des résultats numériques au plus proche des résultats expérimentaux. La modélisation mise au point par Mashimo [58] utilise un réseau de résistance suivant trois dimensions, voir figure 1.50. Au centre de chacune de ces résistances se situe une cellule qui peut être soit de l'étain pur, soit de l'étain oxydé, soit de l'air.

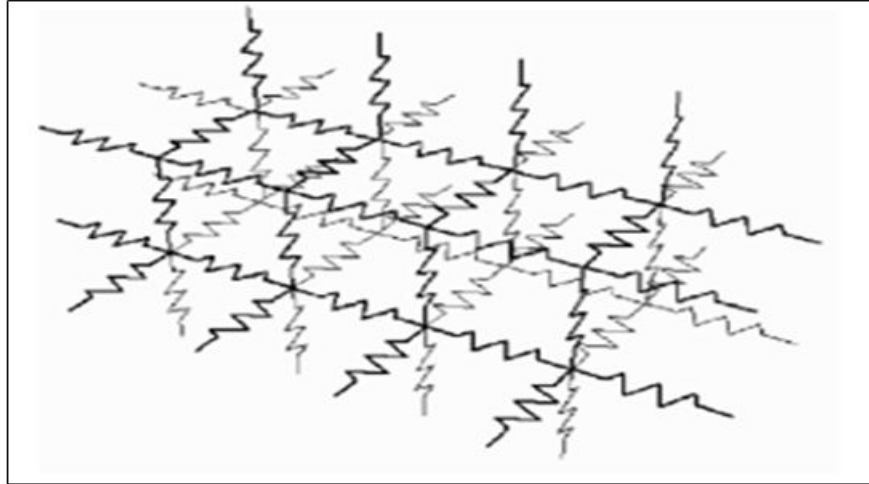


FIGURE 1.50 – Réseau de résistance en trois dimensions pour la modélisation de la résistance de contact lors de la dégradation par fretting-corrosion [58].

La figure 1.51 montre l'évolution de la résistance de contact en fonction de la concentration de SnO en surface en suivant ce modèle numérique. Entre le premier et le deuxième cas, un ajout de seulement 1% d'étain pur a été imposé. L'allure des courbes n'est pas similaire car la résistance de contact baisse d'un facteur 10. Par conséquent, une légère évolution de la matière présente à l'interface entraîne de forts changements.

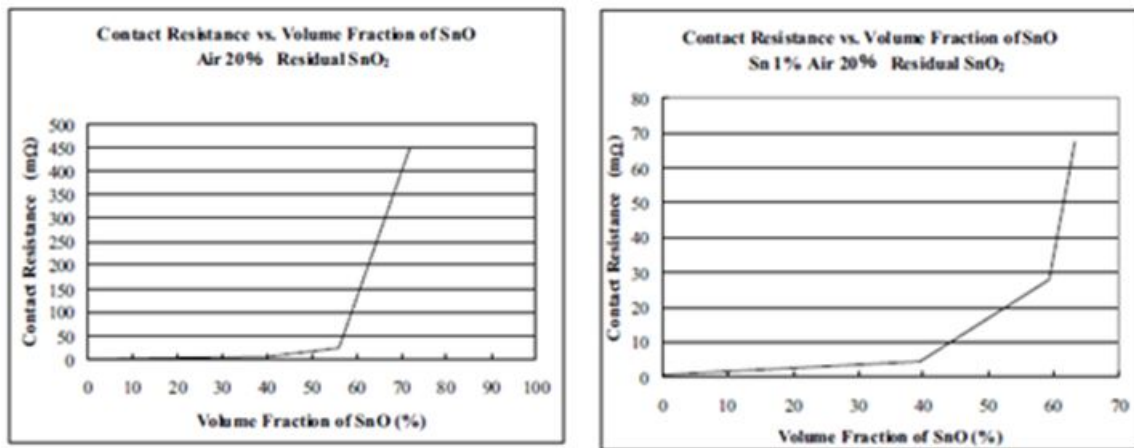


FIGURE 1.51 – Modélisation de la résistance de contact en fonction de la concentration de SnO. (a) 20% d'air et SnO₂, (b) 20% d'air, 1% de Sn et SnO₂ [13].

Modélisation liée à la présence de débris

Selon le même principe d'un réseau de résistance en trois dimensions, la modélisation de la figure 1.52 rajoute un mouvement des débris selon le sens de la vibration. Les résultats numériques ne correspondent pas parfaitement aux résultats expérimentaux. Cependant, ils mettent en avant le rôle des particules qui perturbent la conduction électrique [59].

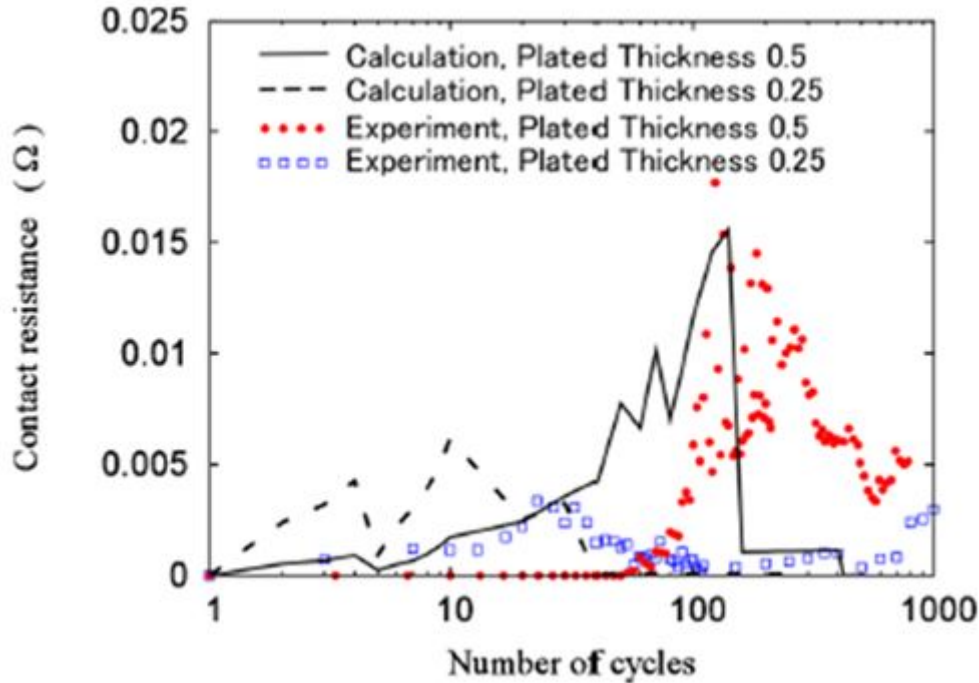


FIGURE 1.52 – Comparaison entre la modélisation du fretting-corrosion et des résultats expérimentaux de la résistance de contact en fonction du nombre de cycles pour un contact étain-étain [49]

A ce jour, aucune modélisation numérique n'a été mise en place. Le fretting-corrosion est une dégradation complexe où des petits arrangements dans la structure entraînent de grands changements dans la conduction des charges électriques [13].

1.3 Vibrations-induites au sein des connecteurs

Les essais en laboratoire sont réalisés dans des conditions vibratoires précisément définies en raison de l'influence importante de l'amplitude et de la fréquence sur le comportement électrique. Dans un cas réel, les conditions vibratoires au contact sont complexes. Elles dépendent des deux points suivants :

- Premièrement, la géométrie du connecteur influence son propre comportement vibratoire. En effet, son inertie et sa masse peuvent provoquer des phénomènes de résonance et d'adsorption.
- Deuxièmement, les vibrations de la source, issues du véhicule, sont transmises vers le connecteur puis vers le contact. Chaque étape de cette chaîne détermine le type de vibration à l'interface du contact métallique. Il est donc important de comprendre cette influence afin de préconiser un type de connecteur suivant leur utilisation.

1.3.1 Étude mécanique d'un contact (clip/languette) et modélisation mécanique.

La figure 1.53 montre la photographie d'un dispositif expérimental dans le but d'analyser le comportement vibratoire d'un contact. La languette est fixée au socle du pot vibrant tandis que le clip est relié à un socle extérieur par un fil. Un poids est rajouté sur le fil pour faire baisser la fréquence de résonance du système. Les mesures de déplacements sont réalisées par vibrométrie. En parallèle, des mesures électriques sont réalisées durant ces expériences [60].

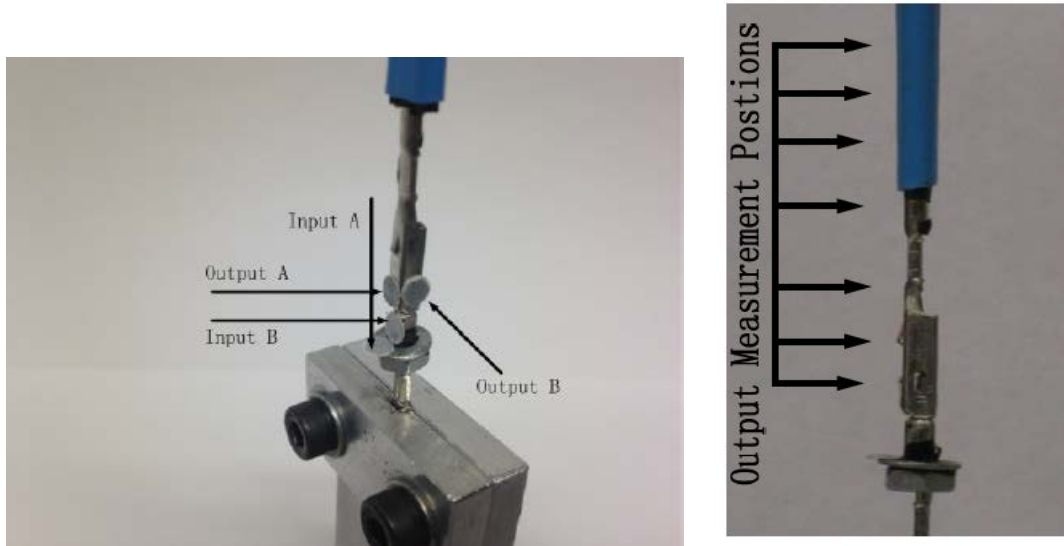


FIGURE 1.53 – Photographies du dispositif expérimental [60].

Les résultats de la figure 1.54 indiquent des amplitudes de mouvements différents suivant l'orientation de la mesure. Les observations sont les suivantes :

- Les mesures orthogonales suivant les axes X (inputA - outputB) et Z (inputA - outputA) indiquent des fréquences de résonances respectives à 300 et 500 Hz.
- Ces mouvements ne sont pas de type longitudinal mais de type "bascule" (rocking) à des résonances différentes.

Les mouvements d'un connecteur relié à un fil sont complexes à décrire. Cependant, l'étude mécanique d'un connecteur se doit d'être réalisée suivant les trois directions.

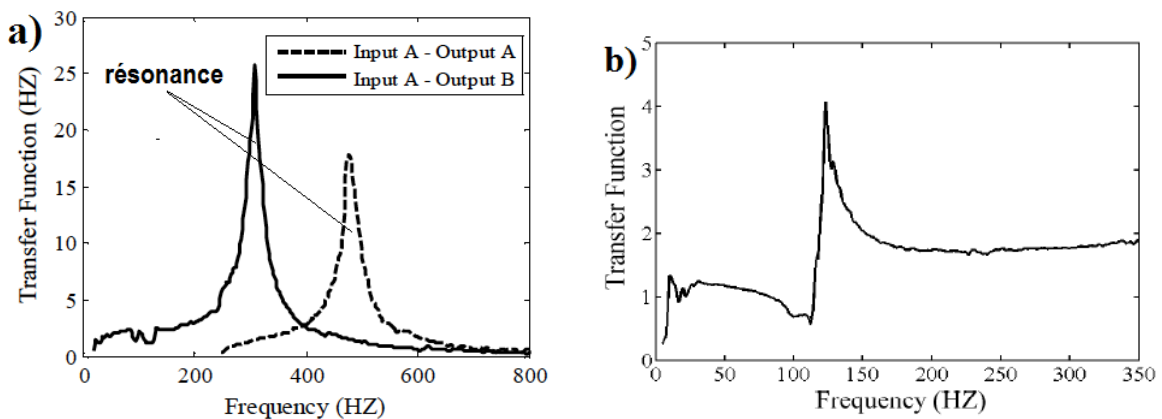


FIGURE 1.54 – Résultats expérimentaux du comportement mécanique du connecteur.(a) Fonction de transfert en fonction de la fréquence pour deux types de mesures. (b) Déphasage en fonction de la fréquence [60].

L'influence des fils est importante. En effet, l'augmentation de la longueur de fil implique une diminution de la constante de raideur k et une augmentation de la masse m . Par conséquent, la fréquence de résonance diminue, voir figure 1.55 [60].

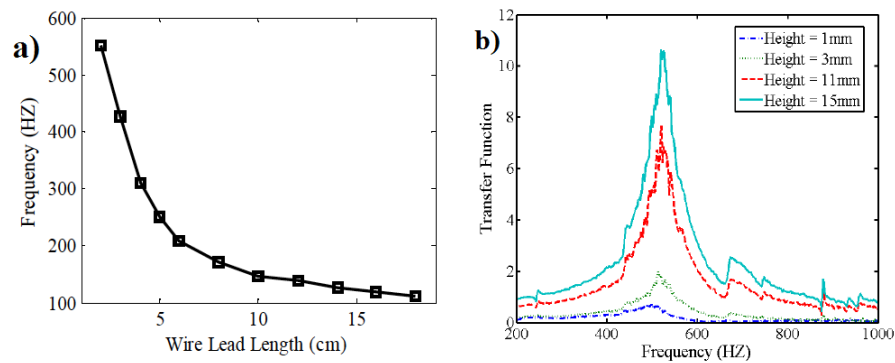


FIGURE 1.55 – Résultats expérimentaux sur le comportement mécanique d'un connecteur avec fil tendu. (a) Amplitude de déplacement (b) Fréquence de résonance en fonction de la longueur de fil [60].

Premier exemple d'une modélisation numérique d'un contact

Une modélisation mécanique permet de recréer le comportement d'un échantillon en fonction de ses paramètres initiaux (masse, inertie, matériaux...).

La figure 1.56 montre différents modes de vibrations entre le système fil-clip et la languette et la schématisation du comportement mécanique de la languette [60]. Cette dernière rend compte d'un système amortisseur-ressort suivant 2 axes et le comportement mécanique en appliquant des moments. Cette approche a permis de se rapprocher au mieux de la réalité de mouvement du connecteur.

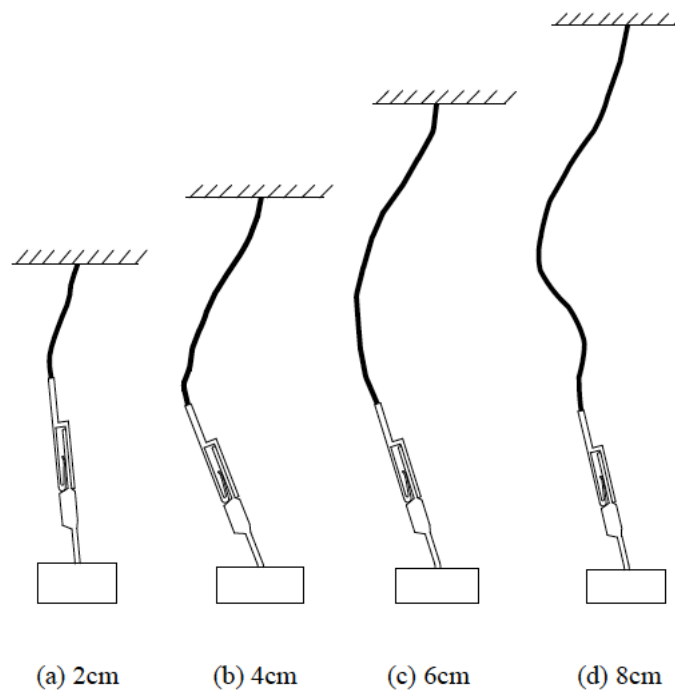


FIGURE 1.56 – Exemple du type de mouvement entre le clip et la languette et le type de modélisation [60].

Deuxième exemple d'une modélisation numérique d'un contact

Dans cet exemple, la direction du fil électrique est orthogonale à la direction de vibration, voir figure 1.57. Les résultats indiquent des mesures de déplacements suivant trois types de rugosité pour le revêtement du connecteur métallique. Cette technique a permis la mise au point d'une fonction de transfert Z_F en fonction de l'amplitude du mouvement M et de la phase mesurée Ω , voir équation 1.33.

$$Z_F = \sqrt{[1 - M \cos \Omega]^2 + M \sin [\Omega]} \quad (1.33)$$

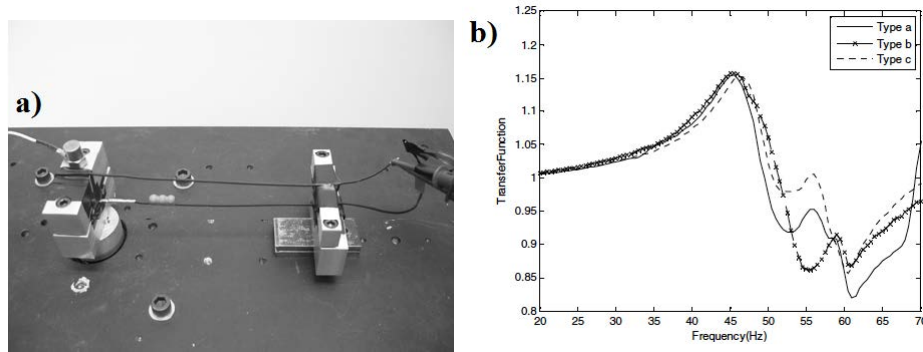


FIGURE 1.57 – (a) Photographie du dispositif expérimental (b) fonction de transfert des trois types de connectiques.

Transmission des vibrations au sein d'un connecteur

La réponse vibratoire d'un système soumis à une sollicitation vibratoire dépend d'une part de cette source vibratoire (sinusoïdale, aléatoire, fréquence, amplitude..) et d'autre part de la géométrie et de la masse de ce système. De ce fait, de nombreux paramètres doivent être pris en considération. Dans le cadre d'un connecteur, la connection entre la partie mâle (porte-langnette) et la partie femelle (porte-clip) n'est pas fixe. Par conséquent, il existe des degrés de liberté de mouvement multi-axiale. La réponse vibratoire du porte-clip dépend non seulement de ses caractéristiques mais également de type de liaison avec le porte-langnette. De ce fait, la transmission des vibration est complexe et propre à chaque type de connecteur.

1.3.2 Comportement électrique d'un connecteur

Le comportement électrique est étudié sur un connecteur de type *nappe*. A fréquence fixe, la résistance électrique est mesurée suivant plusieurs accélérations, voir figure 1.58 [61]. Les mesures révèlent une valeur seuil d'accélération :

- En dessous de 3,7g, la résistance de contact est faible, elle ne varie pas.
- Au dessus de 3,7g, la résistance de contact augmente, liée à une dégradation électrique.
- Plus l'accélération est importante, plus l'augmentation de la résistance de contact est rapide indiquant une dégradation avancée de l'interface.

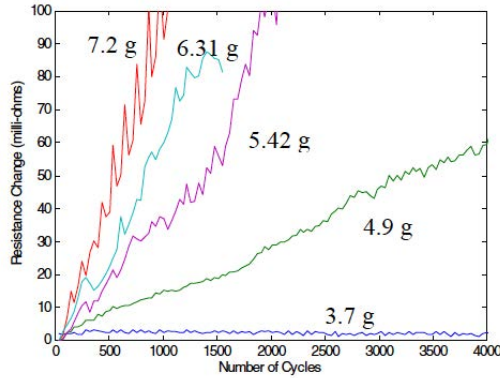


FIGURE 1.58 – Mesure électrique de la résistance de contact en fonction du nombre de cycles pour plusieurs accélérations à 36 Hz ($1g = 9,81 m.s^{-2}$) [61].

La figure 1.59 indique le seuil minimal d'accélération en fonction de la fréquence. L'allure de la courbe montre une première diminution de l'accélération suivie d'un plateau entre 40 et 80 Hz puis une seconde diminution de l'accélération. Au dessous de cette limite, le comportement électrique du connecteur est de bonne qualité. Cette courbe ne peut pas être extrapolée car ces résultats sont spécifiques au connecteur étudié.

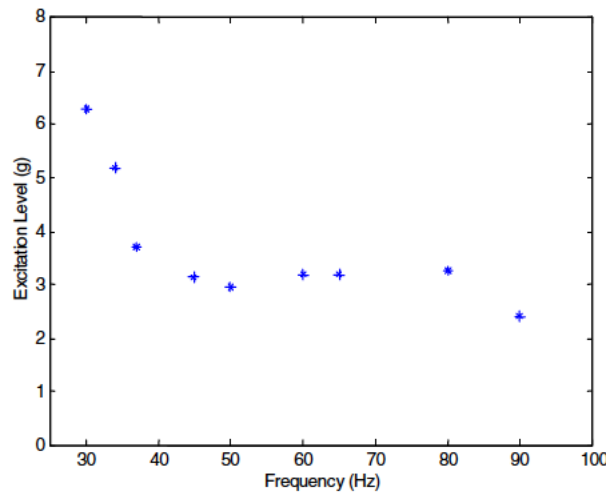


FIGURE 1.59 – Mesure du seuil minimal d'accélération en fonction de la fréquence [61].

La figure 1.60 révèle l'influence de la longueur de fil sur la résistance électrique [62].

- Des fils de petite longueur dégradent plus rapidement un contact électrique.
- Pour une longueur donnée, une diminution de la fréquence dégrade plus facilement la contact électrique.

Une modélisation électrique entre ce changement de résistance ΔR et la fonction de transfert Z_F a été mise au point, voir équation 1.34. Cette équation prend en compte la valeur d'accélération seuil liée au connecteur G_{seuil} . Le facteur d'ajustement D dépend de la fréquence f et du type de vibration [63].

$$\frac{\Delta R}{dt} = Z_F \times D (G - G_{seuil}) f \quad (1.34)$$

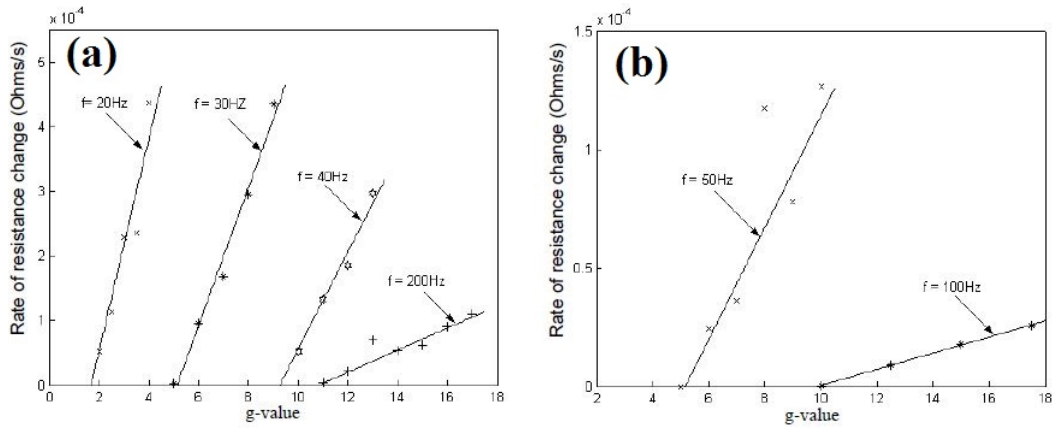


FIGURE 1.60 – Résultats du comportement électrique temporel à différentes fréquences en fonction d'une part de l'accélération et d'autre part de la longueur de fil (a) 3 inches (76mm) (b) 8 inches (203 mm) [62] ($1 g = 9,81 m.s^{-2}$)

Intermittence sur un connecteur sollicité par les fils

La figure 1.61 représente le nombre d'événements où une tension de contact dépasse une valeur comprise entre 0 et 1,6V. Cette étude [45] est réalisée sur un connecteur par lequel la vibration provient des fils sur le porte-clip. Quant au porte-langouette, il est fixe. Les observations sont les suivantes :

- Au début, les fluctuations de la tension de contact sont faibles, autour de 15 mV. Cette valeur correspond à une résistance de constriction.
- Ensuite, les fluctuations augmentent. Leurs valeurs sont comprises entre 400 et 700mV. Ce résultat est associé à la tension de fusion du cuivre et du composé inter-métallique Cu_5Sn_6 (relation de Kohlrausch).
- NB : Une tension maximale de 1,5V est associée à une conduction à travers les débris de l'interface [45].

Les intermittences sont nombreuses. Dès que le substrat est atteint, les valeurs de tension de contact augmentent et empêchent le passage du courant.

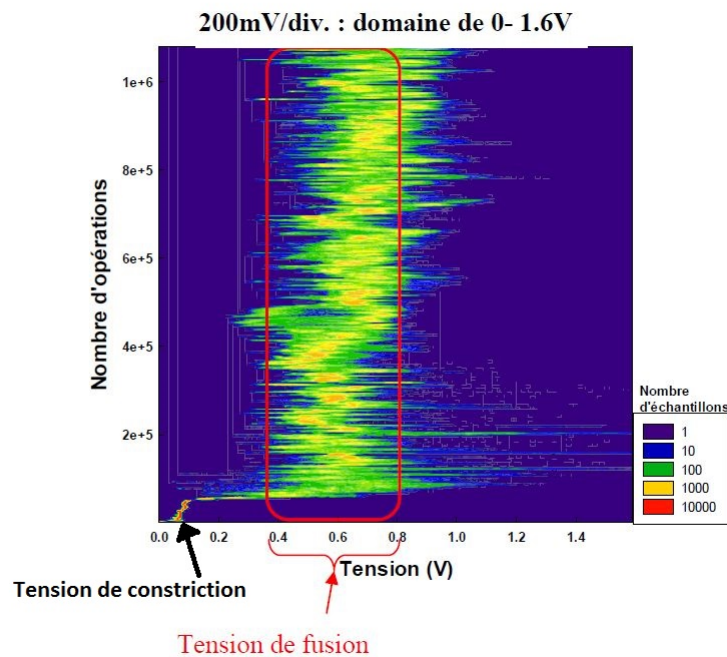


FIGURE 1.61 – Distribution des tensions de contact mesurées en fonction du nombre de cycles de vibrations [45].

1.3.3 Étude des connecteurs sur véhicule

Pour cette étude, les connecteurs étudiés sont des capteurs PMH dont les fils sont soit attachés soit laissés libres [64]. Ils ont subi un vieillissement sur véhicule durant 8 ans correspondant à une distance parcourue de 100 000 km [64]. Les mesures électriques sont réalisées en introduisant un courant de 10 mA entre deux contacts d'un connecteur. La résistance des fils a été soustraite au résultat afin de ne garder que la résistance de contact électrique, voir figure 1.62. Des comparaisons d'état de surface ont également été réalisées, voir figure 1.63.

Les connecteurs les plus défectueux sont ceux dont les fils sont libres avec une résistance de l'ordre de 4 mΩ. A l'inverse, les connecteurs avec les fils attachés ont une résistance de contact de l'ordre de 2 mΩ. L'état de surface des connecteurs avec les fils libres est plus dégradé avec la présence de débris plus importante hors de la trace de fretting.

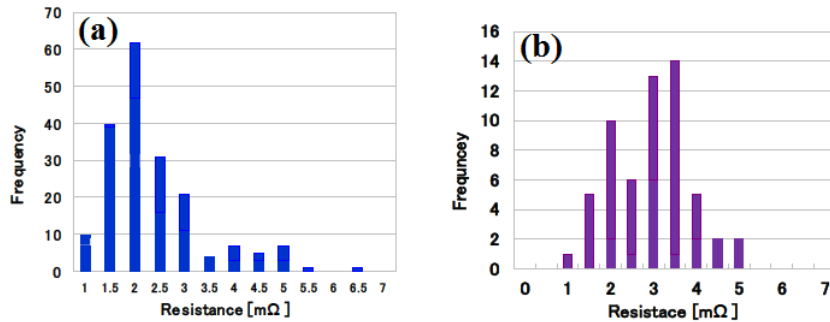


FIGURE 1.62 – Mesure de la tension de contact pour deux types de connecteurs (a) fils attachés et (b) fils libres. [64].

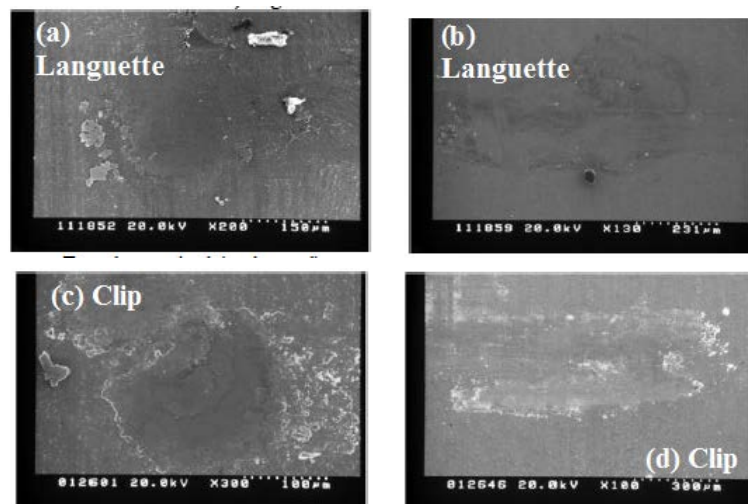


FIGURE 1.63 – Analyse SEM de l'état de surface des clip et languette des connecteurs PMH vieillis sur véhicule [64]. (a) et (c) : fils attachés. (b) et (d) : fils libres.

Le comportement vibratoire des connecteurs a été mis en évidence en plaçant des accéléromètres au sein du véhicule. Les résultats ont montré que les fils libres induisent plus de mouvements sur le connecteur, voir figure 1.64. *Plus la résistance augmente, plus la taille des débris baisse*, cette analogie fut utilisée en comparant les débris des connecteurs vieillis sur véhicule et en laboratoire. ($50 \mu\text{m}$ à 1 Hz sur échantillon de type cuivre-étain (Sn : $3 \mu\text{m}$, rayon de courbure : 1 mm), voir figure 1.64. Le nombre de vibrations subi par le connecteur est faible, de l'ordre de 75 à 150 oscillations.

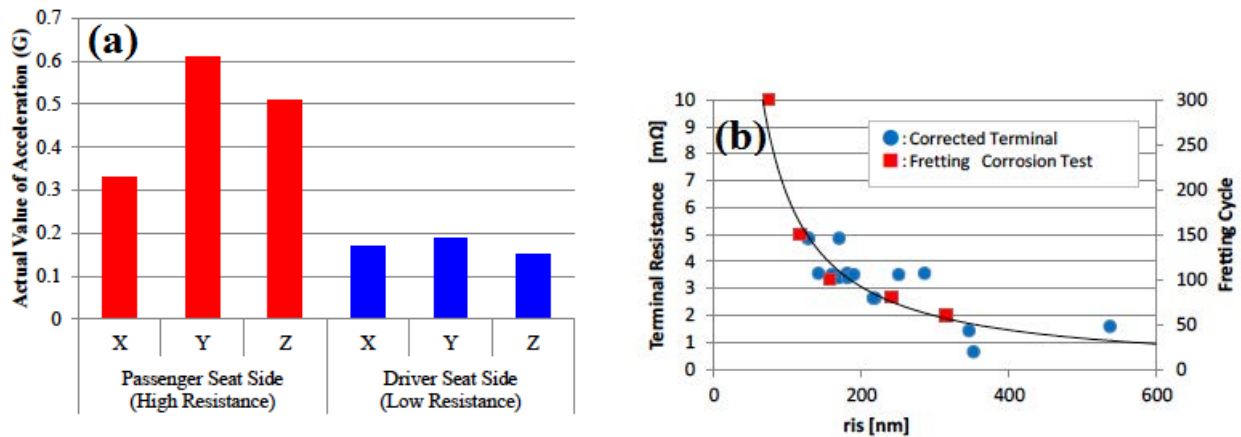


FIGURE 1.64 – (a) Mesures des accélérations sur les deux types de connecteurs et (b) corrélation entre la taille des débris et le nombre d'oscillations subit par les connecteur [64].

1.4 Conclusion

L'aire de contact électrique dépend des caractéristiques du connecteur : le type de matériaux, la géométrie, la force de contact... La modification d'un de ces paramètres influencera d'autres paramètres. Par conséquent, l'étude électrique d'un contact statique est complexe.

Sous contraintes vibratoires, la formation du troisième corps entraîne une usure du revêtement. En effet, des débris s'intercaleront à l'interface. Ce phénomène conduira à une dégradation de type fretting-corrosion. Par conséquent, l'étude électrique de ce phénomène est encore plus complexe.

- A ce stade, la conduction des charges à travers des spots de contact sera fortement perturbée. Les multiples facteurs qui régissent les phénomènes physico-chimiques à l'interface sont simples s'ils sont pris au cas par cas mais deviennent complexes en les combinant. En effet, un léger changement dans la structure à l'interface peut entraîner des modifications importantes de la conduction des charges. C'est pourquoi les modélisations numériques ne peuvent pas être abouties. Par conséquent, il est difficile de définir la durée de vie d'un contact.
- Il est cependant possible de situer l'avancée de la dégradation d'un contact en réalisant la mesure in-situ de la tension de contact. En effet, cette valeur peut-être comparée à un état de surface et/ou la structure du troisième corps. Pour cela, il est nécessaire de connaître les paramètres expérimentaux.

Les vibrations induites au sein d'un connecteur dépendent notamment de ses caractéristiques géométriques mais également de la source vibratoire (fils, connecteurs...). Il est donc nécessaire de connaître et de comprendre le comportement vibratoire d'un connecteur afin de définir la vibration entre le clip et la languette. Cependant, les vibrations induites sont peu étudiées à ce jour.

Chapitre 2

Mesures expérimentales des vibrations induites au sein d'un connecteur et leurs conséquences sur l'état de surface des connectiques

Introduction

Ce chapitre concerne les mesures expérimentales menées sur des connecteurs soumis à des sollicitations vibratoires. L'objectif est de caractériser le comportement vibratoire de chaque composant du connecteur (porte-clip, clip, porte-languette et languette) et ce de manière indépendante. Pour cela, nous allons utiliser un vibromètre. Il s'agit d'un moyen de mesure sans contact basé sur l'effet Doppler qui mesure une vitesse dont la direction est orthogonale à l'axe de la visée.

D'une manière générale, le comportement vibratoire du connecteur est caractérisé sur un banc moteur avec un accéléromètre. Ce moyen de mesure est fixé sur le connecteur ce qui implique un changement à la fois de la masse et de l'inertie. C'est pourquoi le comportement vibratoire mesuré ne sera pas propre à ce connecteur. Pour répondre à cette problématique, la technique Doppler a été utilisée comme moyen d'essai pour caractériser le comportement vibratoire propre au connecteur. Pour cela, le connecteur étudié est percé à travers la membrane plastique de sa partie externe afin d'accéder visuellement à la languette et au clip. Il est donc possible de caractériser non seulement les mouvements des composants externes du connecteur (porte-clip et porte-languette) mais également les composants internes (clip et languette). Ce dispositif de mesure en connectique est donc un moyen innovant pour caractériser le comportement vibratoire d'un connecteur.

Entre le clip et la languette, un mouvement relatif supérieur à $5 \mu m$ est suffisant pour dégrader l'interface de contact par fretting. En effet, un troisième corps composé de débris issus des matériaux en contact s'intercale sur la zone de contact. Si le matériau est non-noble (étain, cuivre..), il s'agit d'une dégradation par fretting-corrosion liée à l'oxydation des débris. Dans ce cas, le mouvement relatif entre le clip et la languette induit des perturbations électriques irréversibles. Par conséquent, la caractérisation du comportement vibratoire interne d'un connecteur permet d'évaluer sa fiabilité électrique. C'est pourquoi les mesures vibratoires sont accompagnées d'analyses de surface et de mesures de comportements électriques. Dans un premier temps, les connecteurs étudiés et les procédés expérimentaux seront présentés. Dans un second temps, nous étudierons le comportement vibratoire de connecteurs soumis à des micro-vibrations. Cette analyse est à mettre en relation avec la mise en place du banc d'essai et la réalisation des programmes d'acquisition et d'étude des résultats. Dans un troisième temps, les connecteurs seront soumis à un profil vibratoire de type véhicule. Enfin, le comportement électrique et les analyses de surface seront commentés.

Il existe peu d'études sur les vibrations induites. En effet, les recherches concernent principalement les études sur les contacts métalliques. C'est pourquoi ces résultats seront directement mis en correspondance avec les résultats issus des tests électriques (barreaux croisés, test sur clip-languette...) [47] [50].

2.1 Présentation des échantillons

D'une manière générale, un connecteur est composé d'une part d'une partie externe correspondant au porte-clip et au porte-languette et d'autre part d'une partie interne correspondant au clip et à la languette. A priori, ces différentes parties ne sont pas fixées entre elles ce qui peut impliquer des mouvements relatifs sous sollicitation vibratoire.

Le premier échantillon est un connecteur de type Porte-Clip/Porte-Languette (PCPL) de référence RH-PCPL. Le deuxième échantillon est un connecteur de type capteur de référence PMH-GTS. Ils se différencient par leur géométrie, leur poids, leur type de fixation et leur fonctionnement. Leurs caractéristiques sont détaillées ci-après. Ces différences aideront d'ailleurs à expliquer leurs comportements vibratoires tel que :

- La transmission des vibrations entre d'une part la partie externe et interne et d'autre part au sein du connecteur. Il s'agit des vibrations induites.
- Des phénomènes spécifiques comme la résonance ou l'absorption. Il s'agit de la réaction vibratoire d'un connecteur à une fréquence de vibration spécifique.

Ces deux échantillons se différencient également par leurs procédés de fabrication. En effet, la languette

est solidaire du capteur PMH contrairement à la languette du porte-languette RH. Par conséquent, la transmission des vibrations sera différente. De plus, la languette du capteur PMH provient d'un fournisseur équipementier tandis que la languette du RH-PCPL est développée par des connecticiens.

Échantillon 1 : connecteur RH-PCPL

Le connecteur RH-PCPL comporte deux voies : ses deux clips et ses deux languettes sont introduits et maintenus respectivement dans le porte-clip et le porte-languette, voir les figures 2.1 et 2.2. Le porte-clip est maintenu sur le porte-languette par un système d'attache par clipsage. Pour ce connecteur, la connectique utilisée est étamée i.e. un revêtement en étain sur un substrat en alliage de cuivre.

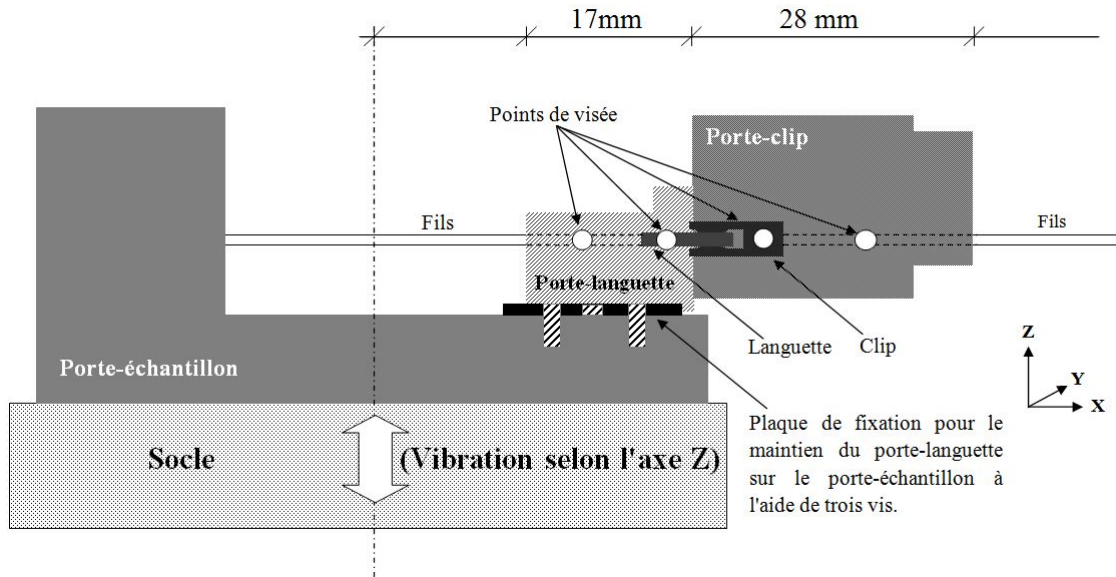


FIGURE 2.1 – Schéma de l'échantillon RH-PCPL. Dans ce cas, l'axe vibratoire est orthogonal à celui de la languette. L'axe des vibration est donc selon l'axe Z. Le type du système de fixation porte-échantillon/porte-languette est caractéristique d'une fixation sur véhicule.



FIGURE 2.2 – Photographie de l'échantillon RH-PCPL.

Le porte-échantillon associé au RH-PCPL possède une petite plaque qui s'insère dans la base du porte-languette. Un jeu de vis permet de maintenir cette petite plaque. Par conséquent, le porte-languette est solidaire de la source vibratoire. Deux orifices ont été réalisés afin de mesurer les déplacements des contacts métalliques à l'intérieur du connecteur.

Échantillon 2 : connecteur PMH-GTS

Le deuxième type d'échantillon est composé d'un capteur de type PMH (Point Mort Haut) et d'un porte-clip GTS, voir les figures 2.3 et 2.4. Ce capteur est composé d'un dipôle actif qui génère un faible

courant par induction électromagnétique. Sa connectique est composée de deux languettes moulées dans le polymère du capteur. Ses deux languettes sont donc solidaires du capteur. Les clips sont introduits et maintenus définitivement dans le porte-clip. Le porte-clip GTS est ensuite connecté au capteur PMH avec un système d'attache par clipsage. Ce dernier est accessible à un utilisateur afin de pouvoir débrancher le porte-clip du capteur.

Dans le dispositif expérimental, le connecteur est inséré dans le porte-échantillon. Il est maintenu en position par un joint en plastique dans le tube et par une vis de fixation sur le côté, voir la figure 2.3. Les contacts utilisés sont composés d'un substrat en cuivre, revêtu d'une sous-couche de nickel et d'une couche en or.

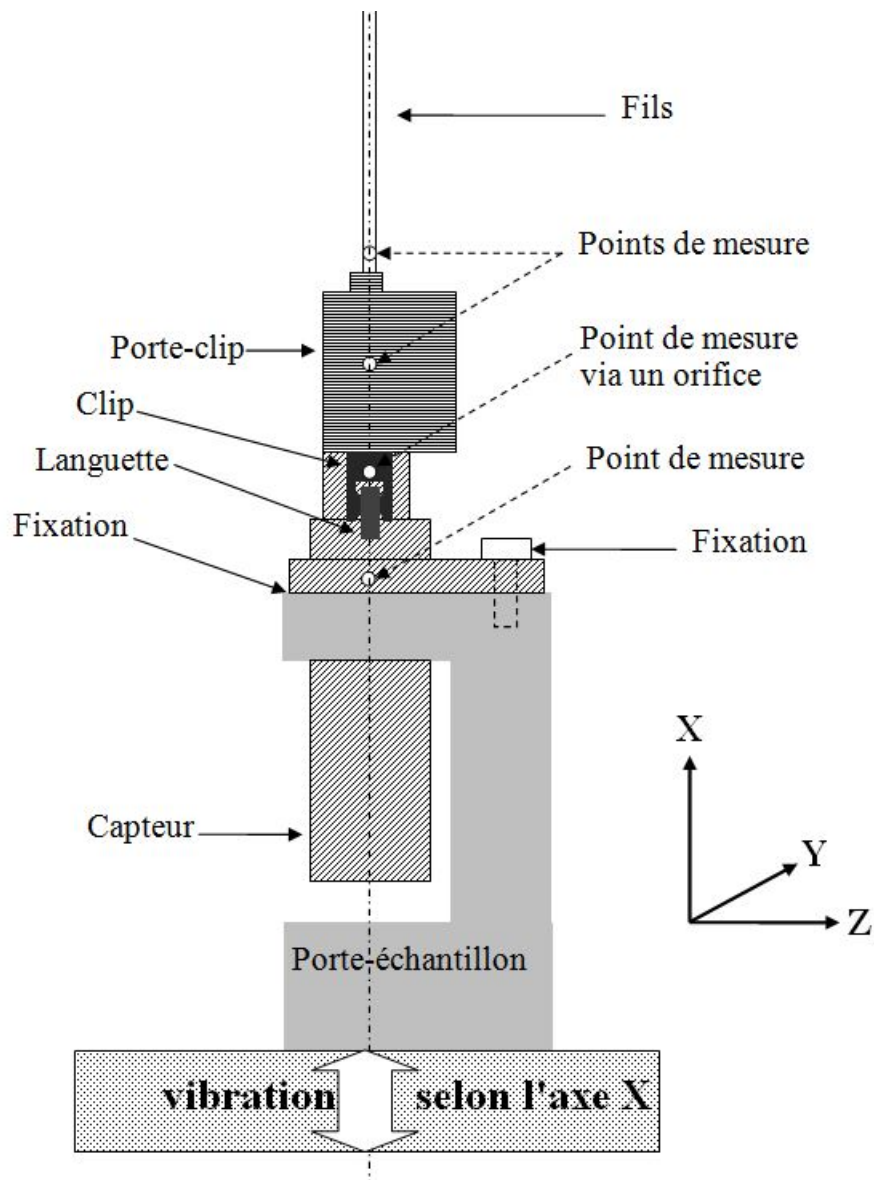


FIGURE 2.3 – Schéma de l'échantillon PMH-GTS en position verticale vu de côté. Dans ce cas, l'axe de vibration est parallèle à l'axe de la languette. L'axe des vibration est donc selon l'axe X. Le système de fixation porte-échantillon/capteur est caractéristique d'une fixation sur véhicule



FIGURE 2.4 – Photographie de l'échantillon PMH-GTS

Disposition des échantillons sur le banc d'essai

Les échantillons sont reliés à une source vibratoire par le biais d'un porte-échantillon. Il est en effet primordial que la vibration imposée par la source vibratoire soit intégralement transmise vers le connecteur. Pour cela, des porte-échantillons ont été développés lors de l'utilisation du banc d'essai avec l'actionneur piézo-électrique. Ils permettent de disposer l'échantillon tel que la direction de la source vibratoire sera soit orthogonale soit parallèle à l'axe de la languette.

La référence spatiale sera l'axe de la languette. Il est en effet nécessaire de pouvoir relier les mouvements mesurés selon une direction référence : X. Pour cela, le repère orthonormé dépend non pas de l'axe de vibration mais de l'axe de la languette, voir figure 2.5. La direction de l'axe Z correspond à la hauteur de la languette. La direction de l'axe Y correspond à celle de la largeur de la languette. Les déplacements relatifs mesurés pourront ainsi être associés à des dégradations électriques quelle que soit la position du connecteur.

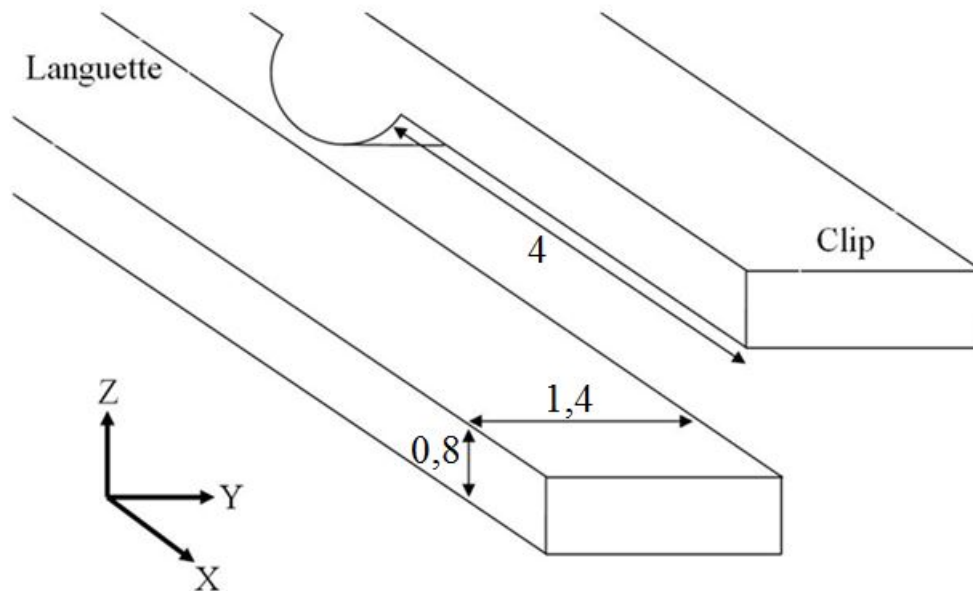


FIGURE 2.5 – Schémas du clip et de la languette en lien avec le repère orthonormé. L'unité des longueurs est le millimètre.

2.2 Présentation des dispositifs expérimentaux

2.2.1 Sources vibratoires

Deux sources vibratoires sont utilisées pour les essais expérimentaux. Elles permettent d'appliquer un déplacement contrôlé sur un échantillon.

L'actionneur piézo-électrique

L'actionneur piézo-électrique a été fabriqué par Physik Instrumente. Le modèle utilisé est le PI-216. Il est composé d'un matériau en céramique déposé en multi-couches. De cette manière, l'application d'une énergie électrique à ses bornes est convertie en énergie mécanique. Dans notre cas, l'actionneur utilisé nécessite une différence de potentiel de 1000V pour un déplacement maximal égal à $30 \mu m$. Un système d'asservissement relie l'actionneur et l'amplificateur de tension afin d'assurer le mouvement demandé.

Le dispositif expérimental doit être isolé de toute vibration extérieure. Pour cela, il est disposé sur une table pneumatique anti-vibrations à air comprimé. Cette dernière est composée de trois capteurs qui ajustent la pression nécessaire en fonction du poids à supporter, voir figure 2.6.

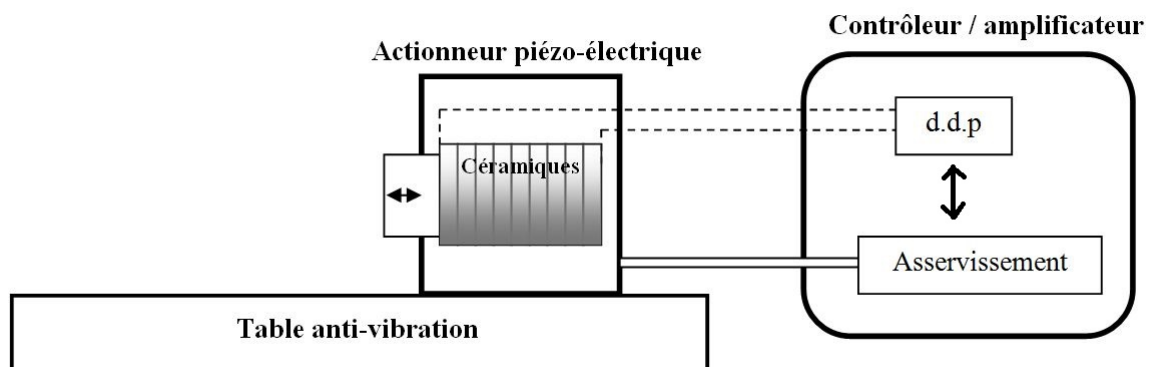


FIGURE 2.6 – Schéma de principe de l'actionneur piézo-électrique

Le pot vibrant

Le pot vibrant LDS 455 a été fabriqué par Brüel and Kjaer [65]. Ses caractéristiques permettent, suivant la masse de l'échantillon et la fréquence de vibration, un déplacement maximal de 19 mm et une accélération maximale de 117 g ($1148 m.s^{-2}$). Sa plage fréquentielle est comprise entre 5 et 7500 Hz. Par conséquent, le pot vibrant est utilisé pour déplacer une masse conséquente suivant une amplitude de déplacement importante.

Cette source vibratoire est composée d'une bobine dans laquelle se trouve un socle. Ce dernier est maintenu par un système de ressort. Un courant électrique passe dans la bobine pour créer un champ magnétique qui régit le mouvement du socle par une force de Laplace. Un accéléromètre est disposé sur le socle pour asservir le mouvement, voir figure 2.7 de la page 60.

Le dispositif repose sur une table anti-vibration composée d'une table de fixation et d'un établi. L'inertie et la masse de l'ensemble du dispositif expérimental empêchent les vibrations extérieures d'influencer le mouvement du socle du pot vibrant.

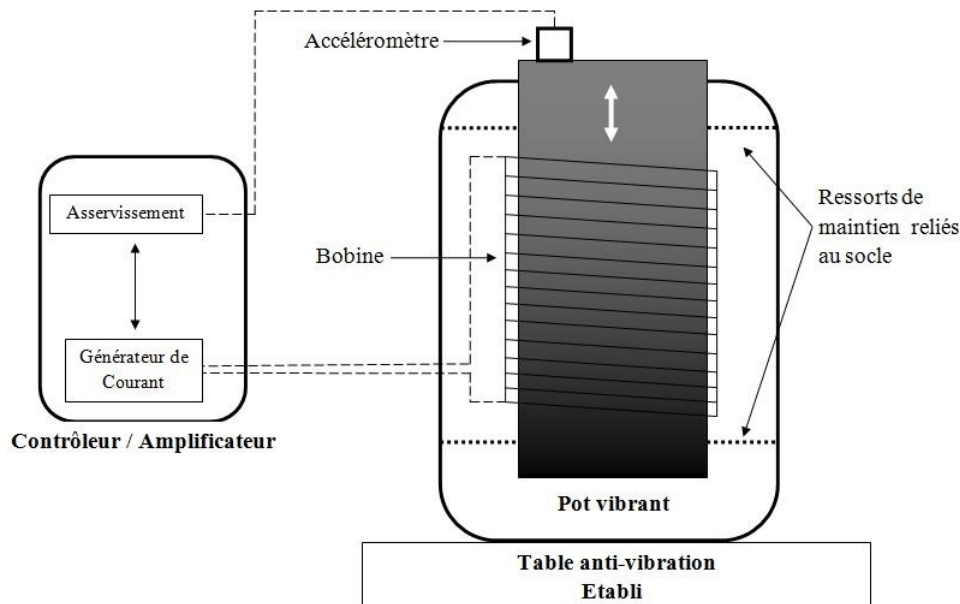


FIGURE 2.7 – Schéma de principe du pot vibrant.

2.2.2 Appareils de mesure

L'échantillon est fixé à la source vibratoire. Le déplacement et la vitesse sont mesurés à différents points de mesure grâce à un capteur de déplacement et des vibromètres de type 1D et 3D.

Capteur de déplacement

Les capteurs de déplacement utilisés sont les modèles Keyence LK-G32. Ils permettent de mesurer des déplacements suivant l'axe du laser avec une résolution de l'ordre du $0,1 \mu m$. Pour cela, ils doivent être situés à 30 mm de la cible avec une plage de mesure située à plus ou moins 5 mm, voir figure 2.8.

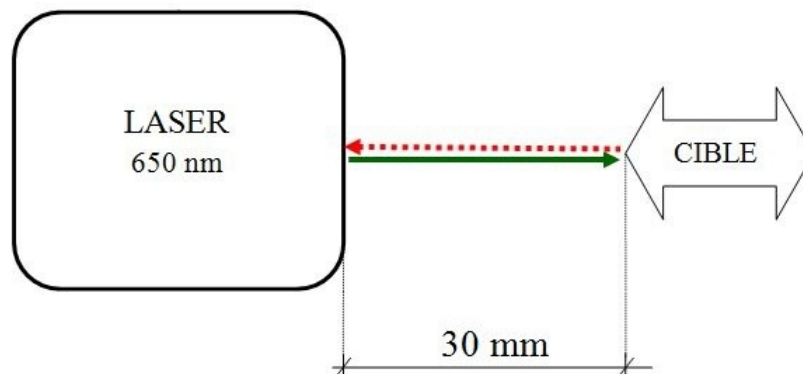


FIGURE 2.8 – Schéma de principe de la mesure de l'amplitude de déplacement grâce à un capteur de déplacement de type laser.

Les capteurs de déplacement seront uniquement utilisés sur le banc d'essai de l'actionneur piézo-électrique. En effet, les échantillons sont disposés en hauteur tel qu'il nécessite des poteaux pour accrocher les capteurs de déplacement. Or, les vibrations du pot vibrant sur le poteau induisent des vibrations sur le capteur de déplacement. Les mesures de déplacements des composants du connecteur seront donc erronées. De plus, la direction de leurs mouvements est orthogonale à l'axe du laser. Il ne sera donc pas possible de mesurer les déplacements relatifs entre le clip et la languette avec cet appareil de mesure.

Vibromètre

Le vibromètre de type 1D est fabriqué par Polytech. La mesure de la vitesse est basée sur l'effet Doppler. Cet effet se traduit par une différence de fréquence Δf entre l'onde émise et l'onde réfléchie sur une cible en mouvement à une vitesse v . Cette différence fréquentielle correspond en premier lieu au mouvement de la cible par rapport à l'appareil de mesure et en second lieu à la position fixe de l'appareil de mesure par rapport au mouvement de la cible. De ce fait, la différence fréquentielle correspond à 2 fois la vitesse v sur la longueur d'onde λ , voir équation 2.1.

$$\Delta f = 2 \times \frac{v}{\lambda} \quad (2.1)$$

L'appareil de mesure utilisé comprend un laser qui émet un rayonnement source de fréquence F_0 . Cette onde est modulée à travers une cellule de Bragg qui induit un changement fréquentiel tel que $F_{onde} = F_0 + F_{bragg}$. Le rayonnement réfléchi ($F_0 + F_{bragg} + \Delta f$) est capté puis comparé à la source sur un capteur optique via un système de miroir (interféromètre de Mach-Zendher). La mesure est basée sur l'interférence entre ces deux ondes autour de F_{bragg} et non F_0 . De ce fait, il est permis d'en déduire le sens de la vitesse, voir figure 2.9.

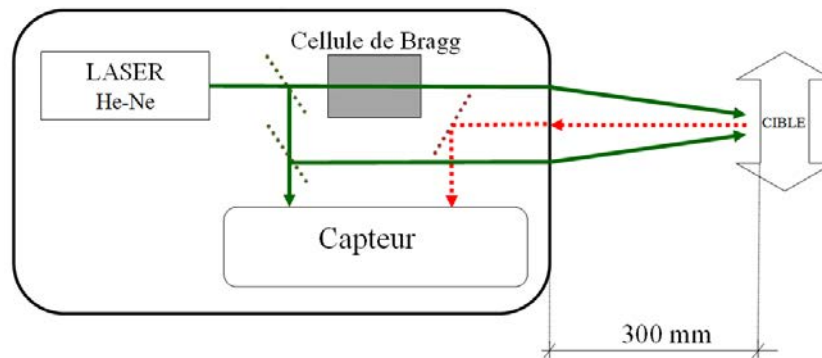


FIGURE 2.9 – Schéma de principe de la vibrométrie pour une mesure orthogonale au déplacement.

La mesure d'une vitesse orthogonale à la visée est possible en orientant la source laser vers deux points de sortie. En effet, les deux ondes sont orientées pour se rencontrer à une distance de 30 cm. L'onde réfléchie subit un changement en fréquence qui dépend de la vitesse de la cible. La direction de l'onde réfléchie est orthogonale à l'axe de la visée.

Un vibromètre de type 3D sera également utilisé. Son fonctionnement repose sur le même principe que le vibromètre 1D. Il est cependant composé de trois sources laser au lieu de deux. Il est donc possible de mesurer les composantes de la vitesse suivant trois axes. Sa puissance de fonctionnement est néanmoins moins importante que le vibromètre 1D. Suivant le type de surface où se situe le point de visée, il est nécessaire d'utiliser un revêtement réfléchissant pour améliorer la puissance de l'onde réfléchie et donc la qualité de la mesure.

Les mesures de vibrations pourraient être réalisées avec un accéléromètre. Or, la masse de ce dernier n'est pas négligeable avec la masse d'un connecteur. De ce fait, les résultats seraient faussés. De plus, il ne serait pas possible de mesurer à l'intérieur du connecteur.

La figure 2.10 représente la résolution de l'appareil en fonction de la fréquence de la vibration. Sa valeur augmente en fonction de la fréquence pour atteindre $316 \mu m/s$ à 1000 Hz. Dans le cadre d'un signal de type sinusoïdal, il est possible d'en déduire une correspondance avec l'amplitude de déplacement. Elle est de l'ordre de $1 \mu m$ dans les basses fréquences et de $0,1 \mu m$ dans les hautes fréquences.

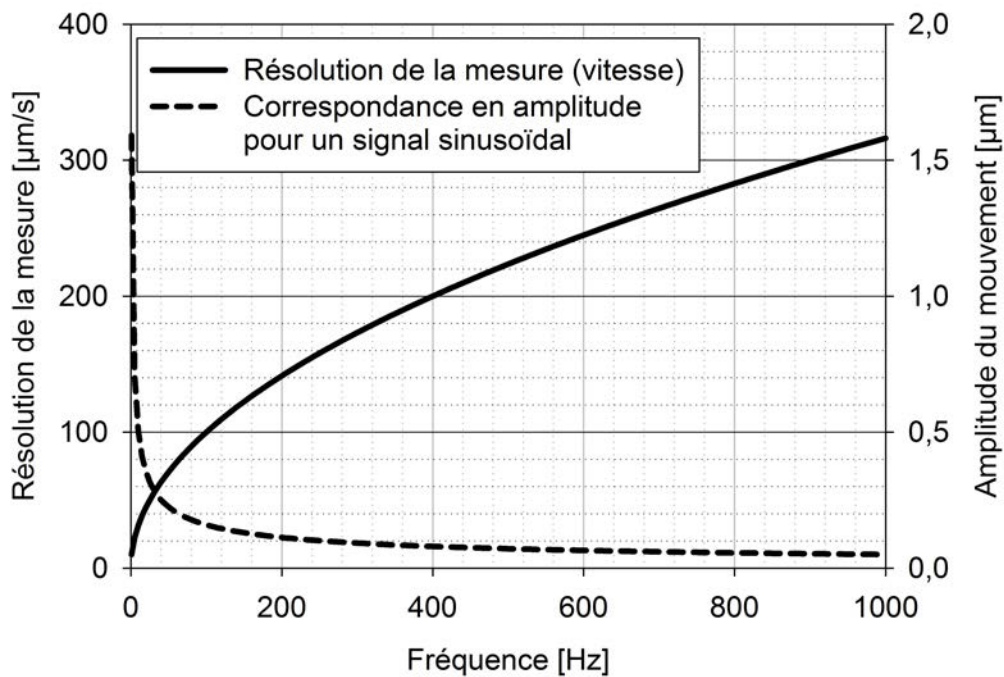


FIGURE 2.10 – Résolution de vibromètre 1D dont la valeur dépend de la fréquence. La correspondance en amplitude de déplacement est valide si la vibration est de type sinusoïdal.

Mesure de la tension de contact

L'application de la méthode 4 fils permet de mesurer la tension de contact. Pour cela, les points de mesure de la différence de potentiel ne correspondent au chemin emprunté par la courant. De ce fait, la mesure ne prend ni en compte les résistances de soudure, ni les résistances internes des matériaux mais uniquement la résistance au point de contact entre le clip et la languette, voir figure (a) 2.11.

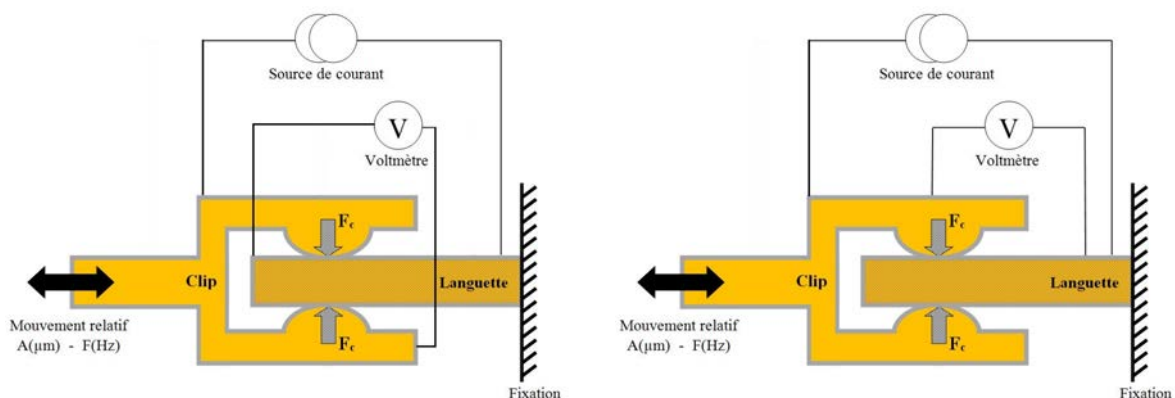


FIGURE 2.11 – schéma de la méthode de la mesure par 4 fils et la méthode de la mesure par 4 fils approché

L'intérieur du clip n'est pas accessible pour réaliser une mesure de tension. C'est pourquoi les mesures sont réalisées au plus proche de la zone de contact pour minimiser les résistances supplémentaires, voir figure (b) 2.11. Par exemple, la résistivité du cuivre est de $17.10^{-9} \Omega.m$, soit une résistance de $50 \mu \Omega$ à travers une surface de $10 mm^2$ sur une longueur de 3 cm. Cette résistance est donc faible soit négligeable comparé à une résistances de contact qui est de l'ordre du $m\Omega$ au début d'une perturbation électrique.

2.3 Résultats expérimentaux : étude du comportement vibratoire d'un connecteur soumis à des micro-vibrations

Dans cette première partie expérimentale, le connecteur RH-PCPL est soumis à des micro-vibrations afin de déterminer son comportement vibratoire. Ces expériences permettent d'une part de tester le dispositif expérimental et d'autre part de concevoir des programmes de commande et d'acquisition via le logiciel Labview.

La puissance mécanique de l'actionneur piézo-électrique dépend d'une part de la masse du connecteur étudié et d'autre part de la fréquence et l'amplitude de la vibration. Or, cette puissance est limitée. Par conséquent, seul le connecteur RH-PCPL sera étudié dans cette étude car sa masse est plus faible que le connecteur PMH-GTS. De là, l'actionneur piézo-électrique pourra être d'une part utilisé sur une plage fréquentielle plus importante et d'autre part il ne sera pas endommagé.

Ces premières mesures permettront d'analyser le comportement vibratoire et électrique de ce connecteur. Les résultats indiqueront notamment la nécessité d'usiner un porte-échantillon similaire à une fixation de type véhicule.

2.3.1 Définition de la plage fréquentielle d'utilisation de l'actionneur piézo-électrique

L'objectif est de définir la plage fréquentielle d'utilisation de l'actionneur piézo-électrique, voir les figures 2.12. Les observations sont les suivantes :

- La fréquence maximale est égale à 70 Hz pour une amplitude fixée à 15 μm . Au-delà de cette fréquence, l'actionneur piézo-électrique ne fonctionne plus.
- Les mesures à basse fréquence ne correspondent pas à la commande en raison d'une configuration spécifique de l'amplificateur.
- Les mesures issues du laser de déplacement et du vibromètre s'accordent. En effet, la différence entre les deux mesures est seulement égale à 0,5 μm . Ce résultat démontre que ces deux appareils peuvent mesurer des mouvements de faibles amplitudes.

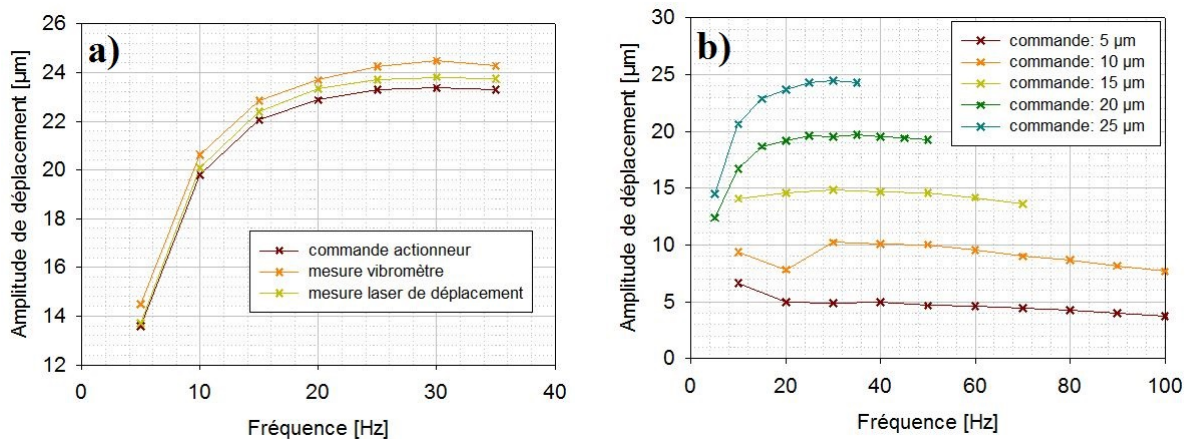


FIGURE 2.12 – (a) Graphique des amplitudes de mouvement mesurées par un laser de déplacement et un vibromètre sur l'actionneur piézo-électrique. (b) Graphique des amplitudes mesurées par le vibromètre pour différentes amplitudes de commande.

Les amplitudes de mouvement mesurées ne correspondent pas forcément à la consigne. Néanmoins, l'amplitude de mouvement imposé sera la plus petite possible afin de réaliser les mesures sur la plus grande plage fréquentielle possible.

2.3.2 Mesures vibratoires - Porte-échantillon 1

Le porte-échantillon de type 1 est fixé par un système de vis sur le socle de l'actionneur. Nous avons vérifié qu'ils étaient bien solidaires. Ce porte-échantillon pince le connecteur (porte-langouette et porte-clip) pouvant correspondre à une fixation de type véhicule. Les mesures sont réalisées en trois points suivant les trois axes du repère, voir figure 2.13.

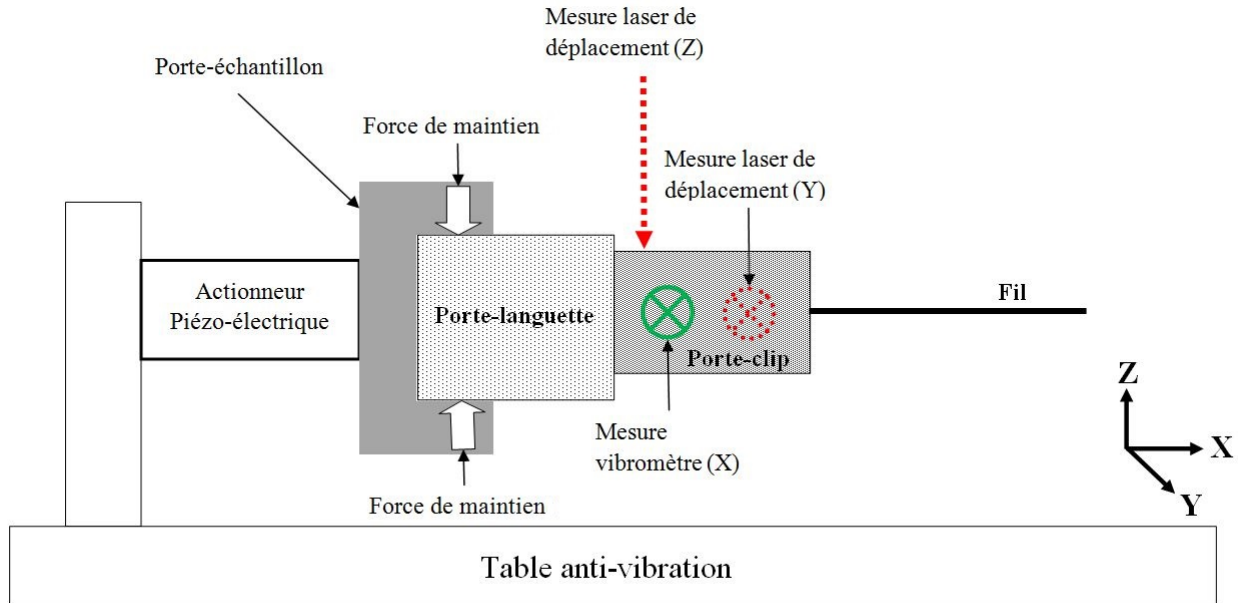


FIGURE 2.13 – Schéma du banc d'essai avec les mesures de déplacement et vitesse sur les différents composants du connecteur suivant les trois axes.

La consigne de déplacement est fixée à $5 \mu m$ selon l'axe X. La fréquence varie de 5 à 300 Hz par pas de 5 Hz. Les résultats indiquent les amplitudes de déplacement suivant l'axe X, voir figure 2.14. Une résonance est observée à 205 Hz pour le porte-langouette, le clip et le porte-clip. Elle n'est pas visible pour l'actionneur qui constitue la référence.

Les déplacements du porte-clip et du porte-langouette sont supérieurs de $1 \mu m$ par rapport au déplacement de l'actionneur, ce résultat indiquant un problème de fixation du connecteur sur le porte-échantillon 1.

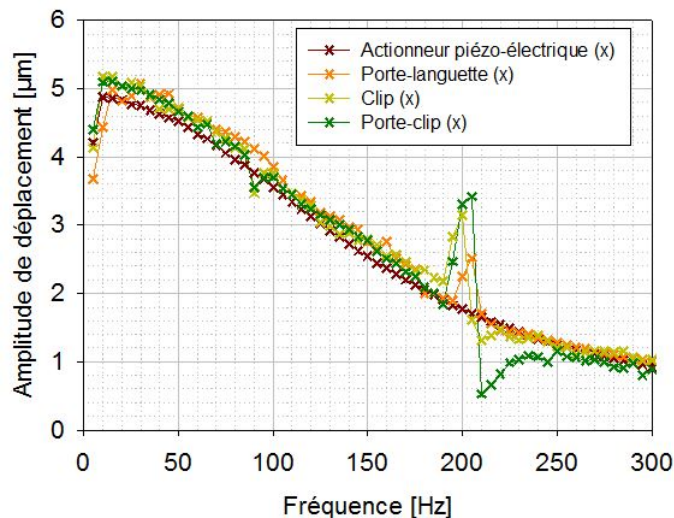


FIGURE 2.14 – Mesure des déplacements selon l'axe X correspondant à l'axe de vibration mesuré par vibrométrie des différents composants du connecteur RH-PCPL avec le porte-échantillon 1.

Les mesures de mouvement ont été réalisées sur le porte-clip suivant les trois axes, voir figure 2.15. Des amplitudes importantes ont également été détectées à 205 Hz. En effet, l'amplitude du porte-clip selon l'axe Y augmente pour atteindre $12 \mu m$ tandis que l'amplitude de l'actionneur est égale à $2 \mu m$ selon l'axe X. Les amplitudes de déplacement suivant les axes X et Z sont moins importantes.

Cette réaction vient du fait que le porte-échantillon 1 bloque l'échantillon selon l'axe Z. En effet, l'échantillon est pincé suivant l'axe Z. Par conséquent, la direction privilégiée du mouvement est selon l'axe Y.

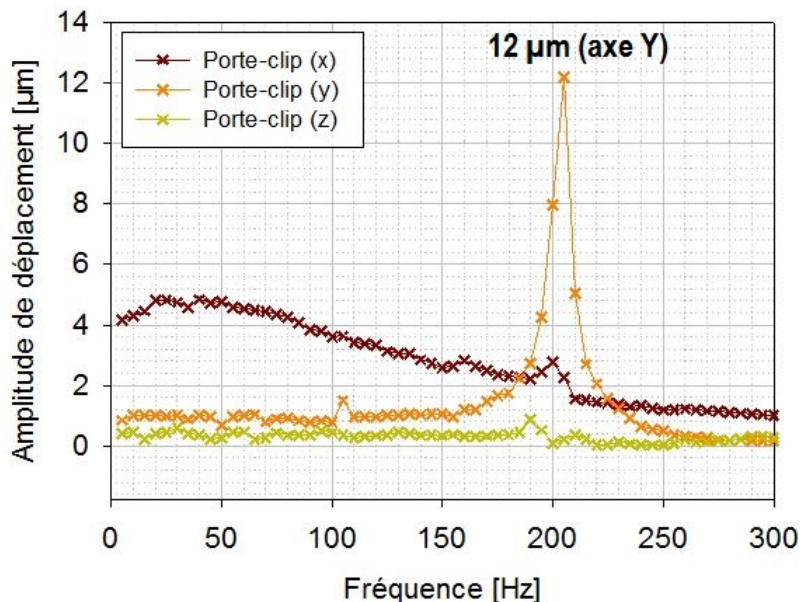


FIGURE 2.15 – Mesure des déplacements du porte-clip du connecteur RH-PCPL suivant les trois axes : X, Y et Z.

2.3.3 Mesures électriques - Porte-échantillon 1

Les mesures électriques ont été réalisées à la fréquence de résonance. En effet, il est probable que les perturbations électriques interviennent sur le connecteur RH-PCPL à 205 Hz. Les points de mesures de la tension de contact sont disposés au plus près de zone de contact clip-languiette afin de minimiser la résistance ohmique du matériau. L'expérience a duré 24 heures avec un courant imposé à 200 mA, voir figure 2.16.

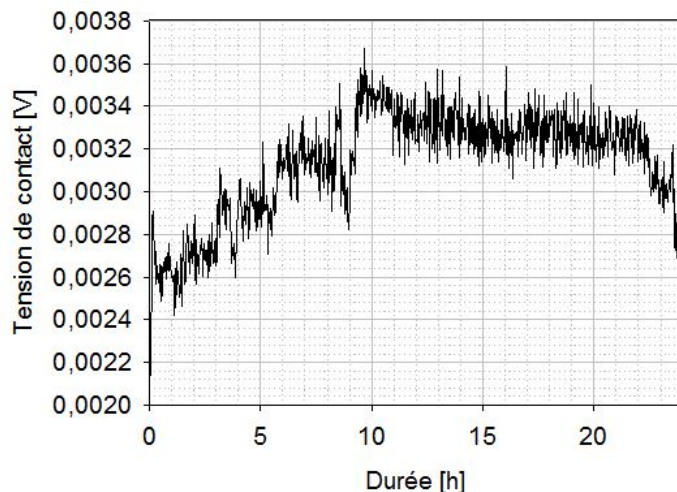


FIGURE 2.16 – Mesure électrique pour un connecteur RH-PCPL avec des connectiques étamées (consigne de $5 \mu m$, 205 Hz ($12,7 m.s^2$), 200 mA).

La tension de contact indique qu'il n'y a pas eu de perturbation électrique notable. En effet, sa valeur a tout d'abord augmenté de seulement 1 mV au bout de 10h pour ensuite rester stable à 3,2 mV, voir figure 2.16 de la page 65. Cette valeur de la tension de contact correspond à une résistance de constriction. Par conséquent, le connecteur est fiable dans les conditions vibratoires utilisées [47].

Analyse de surface

Les analyses de surface indiquent une faible dégradation de la zone de contact, voir figure 2.17. D'ailleurs, sa localisation est difficile à établir. De plus, l'analyse chimique révèle l'absence de cuivre pur sur la surface, voir figure 2.18. Par conséquent, le substrat en cuivre n'est pas atteint.

Les tâches sombres sur l'analyse SEM correspondent au composé inter-métallique étain-cuivre. Sa présence est relativement importante. En effet, cet échantillon a été stocké suivant des conditions atmosphériques classiques de laboratoire. Par conséquent, la cinétique de la formation de ce composé est favorisée. Par ailleurs, l'épaisseur d'étain est égale à 1 μm si bien que le composé inter-métallique est présent sur toute la surface, visible par des taches sombre sur la figure 2.18.

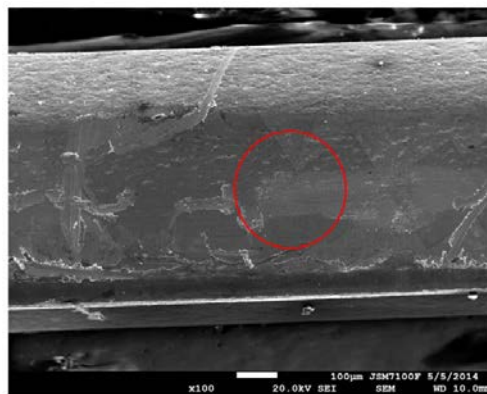


FIGURE 2.17 – Analyse SEM de la languette RH après 24h de test à 205 Hz.

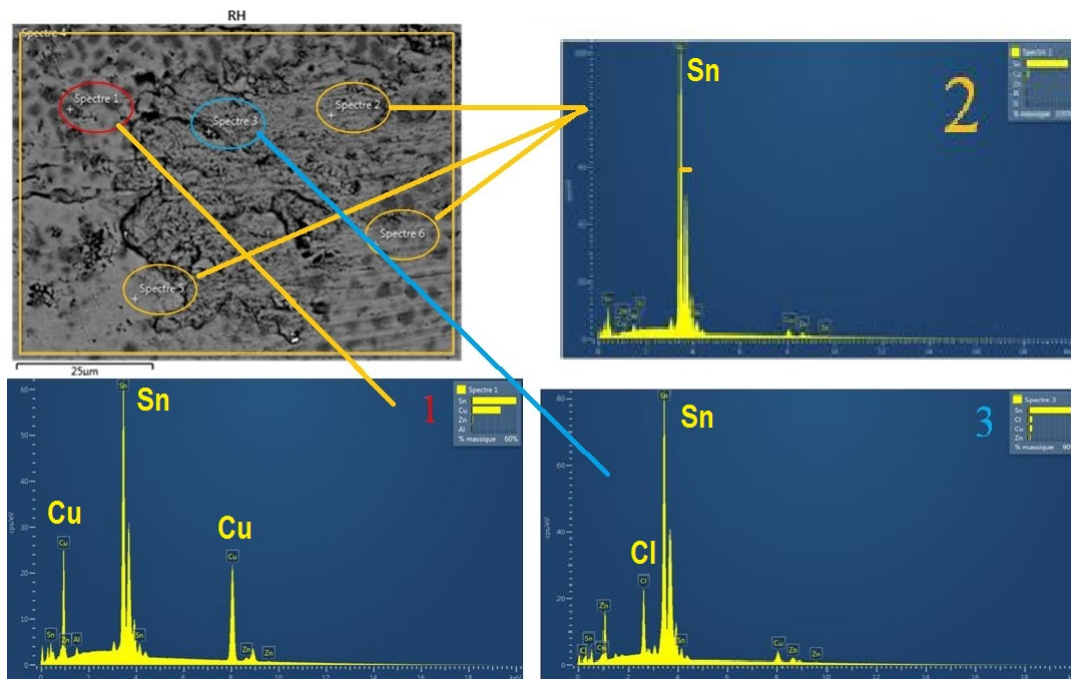


FIGURE 2.18 – Analyse EDX de la zone de contact au bout de piste d'insertion après 24h de test à 205 Hz. Les résultats indiquent la présence de l'étain et du composé inter-métallique cuivre-étain en surface.

2.3.4 Mesures vibratoires - Porte-échantillon 2

Un nouveau porte-échantillon a été mis en place. Le but est de se rapprocher au mieux d'un système de fixation sur véhicule. Le porte-languette n'est donc plus pincé mais se retrouve solidaire du porte-échantillon. Une plaque réalise la liaison entre le porte-échantillon et le porte-languette, voir figure 2.19.

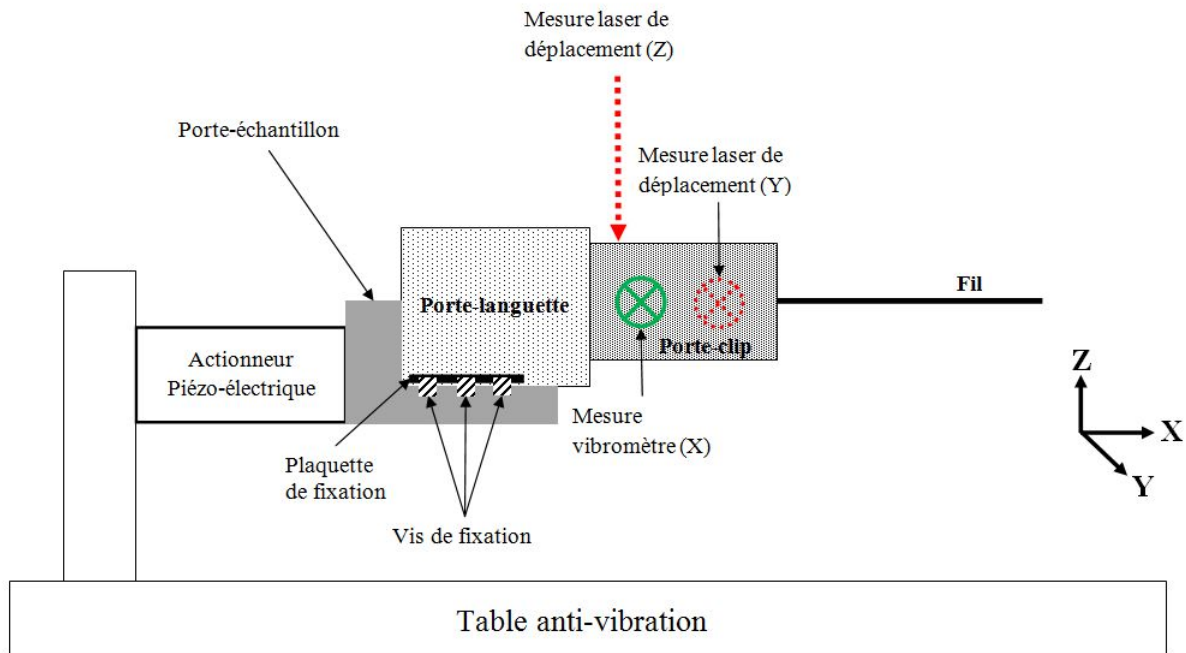


FIGURE 2.19 – Schéma du banc d'essai avec les mesures de déplacement et de vitesse sur un connecteur.

Les mesures de déplacement n'ont pas détecté de résonance du système. En effet, l'amplitude de vibration du porte-clip est identique au porte-languette selon l'axe X, voir figure 2.20.

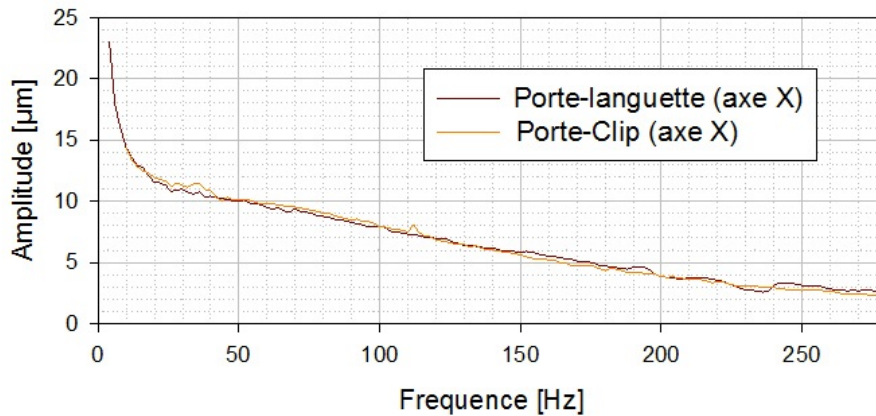


FIGURE 2.20 – Mesures selon l'axe X avec le nouveau porte-échantillon sur un échantillon RH-PCPL.

Conclusion sur le comportement vibratoire du connecteur RH-PCPL soumis à des micro-vibrations

Les premières analyses ont permis de mettre au point un banc d'essai utilisant un actionneur piézo-électrique comme source vibratoire. Ce banc d'essai combine trois appareils de mesure afin de caractériser en même temps les déplacements d'un composant suivant les trois axes. La difficulté a été de paramétrer chaque appareil. En effet, ils doivent être placés à une distance spécifique de la cible. C'est pourquoi un espace important est nécessaire autour de l'échantillon. Ce moyen de mesure ne peut pas être utilisé sur un banc d'essai moteur. Ces expériences ont toutefois permis d'une part la réalisation d'un nouveau

porte-échantillon de type véhicule et d'autre part de mettre en évidence l'utilisation d'un vibromètre pour caractériser le comportement vibratoire des connecteurs :

- L'avantage d'une mesure de vitesse par effet Doppler est de mesurer des déplacements à l'intérieur du connecteur soumis à des vibrations sinusoïdales forcées. Ce moyen de mesure est d'autant plus efficace que sa résolution est de l'ordre du micromètre. Les résultats sont d'ailleurs en accord avec des appareils de mesure de forte précision. Il est donc possible de détecter les mouvements de faible amplitude du clip ou de la languette.
- L'inconvénient du vibromètre est l'encombrement car ses deux rayons incidents doivent se rencontrer à 30 cm de l'appareil. L'orifice pour accéder visuellement au clip ou la languette doit être assez important et l'amplitude de vibration assez faible pour ne pas empêcher un des rayons d'atteindre la cible. Dans le cas contraire, la mesure est impossible.

Les résultats ont mis en évidence un léger phénomène de résonance du connecteur RH-PCPL avec l'ancien porte-échantillon. Néanmoins, les tests électriques et les analyses de surface montrent que les dégradations électriques et mécaniques de l'interface sont faibles malgré la présence du composé inter-métallique en surface. En effet, la présence de ce composé est sensée favoriser la dégradation mécanique à l'interface du contact.

La mise au point du nouvel porte-échantillon de type véhicule a permis de se rapprocher au mieux d'un cas réel. Cette réalisation a mis en avant l'importance de la fixation entre le connecteur sur la source vibratoire dans la mesure où le comportement vibratoire du connecteur est différent. Par la suite, un vibromètre 3D sera utilisé afin de mesurer les composantes de la vitesse suivant trois axes. Par conséquent, il sera possible de caractériser le comportement vibratoire du connecteur d'une manière plus précise.

L'utilisation de l'actionneur piézo-électrique induit des déplacements contrôlés de faibles amplitudes. Toutefois, ses limites d'utilisation ne permettent pas d'appliquer un profil vibratoire. De plus, ses capacités de déplacement sont trop petites pour induire des dégradations électriques.

2.4 Résultats expérimentaux : étude du comportement vibratoire d'un connecteur soumis à un profil vibratoire de type véhicule

Dans cette seconde partie expérimentale, les amplitudes de mouvement des connecteurs RH-PCPL et PMH-GTS seront analysés suivant les trois directions définies par le repère orthonormé dépendant de l'axe de la languette. L'objectif est de définir le comportement vibratoire du porte-languette/capteur, de la languette, du clip, du porte-clip et du fil lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations vibratoires définies par un profil vibratoire.

Les connecteurs sont positionnés tels que la direction de la sollicitation est soit orthogonale soit parallèle à l'axe de la languette. Des comportements vibratoires différents seront mis en évidence. Le but est de mettre en avant l'importance de l'origine de la vibration sur le comportement vibratoire du connecteur.

Conditions expérimentales - Profil vibratoire

Les connecteurs sont soumis à une vibration sinusoïdale dont les caractéristiques amplitudes-fréquences sont définies par le profil vibratoire 15g issu du cahier des charges Renault [44]. La figure 2.21 représente d'une part les amplitudes d'accélération du profil et d'autre part les correspondances en amplitude de mouvement. Le connecteur est soumis à un déplacement compris entre quelques millimètres et quelques micromètres. Le balayage fréquentiel est de type logarithmique à raison d'une minute par octave. De ce fait, le balayage fréquentiel entre 10 et 1000 Hz dure 6 min et 32 s.

Ce type de profil vibratoire est fréquemment utilisé dans le domaine de la connectique. La conception de ces profils provient :

- des mesures accélération-fréquence qui ont été réalisées directement sur véhicule suivant un profil de roulage. Ces informations indiquent des amplitudes d'accélération en fonction de la fréquence

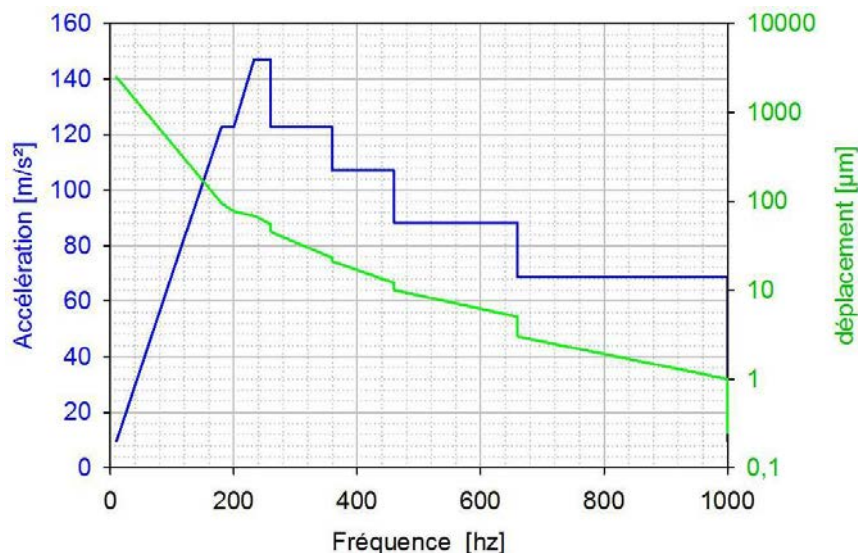


FIGURE 2.21 – Profil vibratoire utilisé lors des essais sur pot vibrant et défini selon le cahier des charges Renault. Correspondance entre les amplitudes d'accélération et les amplitudes de mouvement [44].

de la sollicitation vibratoire sur le connecteur.

- de la diminution de la durée d'un profil de roulage vers un profil vibratoire d'essai. Pour cela, l'amplitude du profil est amplifiée. De ce fait, le degré de la sollicitation vibratoire devrait être similaire au point précédent. Ce rapport entre l'amplitude de la sollicitation vibratoire et la durée de l'essai est issu des courbes de Wöhler.

Les courbes de Wöhler représentent la probabilité de rupture à 50 % d'une éprouvette d'un matériau soumis à des sollicitations vibratoires. Par conséquent, ces profils ne conviennent pas à l'étude du comportement électrique du matériau. Néanmoins, il n'existe pas d'autres procédés à l'heure actuelle. Par conséquent, nous utiliserons le profil vibratoire défini selon le cahier des charges Renault.

Sur la pot vibrant, la source vibratoire a un défaut inhérent. En effet, des mouvements non-contrôlés ont lieu entre 10 et 200 Hz uniquement suivant les axes orthogonaux à l'axe de la vibration imposée. Ses effets sont une augmentation de l'amplitude de vibration de l'ordre de plusieurs dizaines de micromètres. Il est donc difficile d'analyser les mesures absolues des déplacements sur cette plage fréquentielle. Néanmoins, les mesures sont utilisables lors de l'analyse des fonctions de transfert.

Caractéristiques des connecteurs

Les résultats sont spécifiques à un type de connecteur. Dans notre cas, les échantillons étudiés sont les connecteurs RH-PCPL et PMH-GTS. D'un point de vue vibratoire, ils se différencient notamment par leur géométrie, leur masse et leur mode de fixation :

- Le connecteur RH-PCPL est composé d'un système porte-clip/porte-languette. La languette est donc insérée puis bloquée dans le porte-languette. De ce fait, le mouvement entre la languette et le porte-languette peut être différent. A l'inverse, le connecteur PMH-GTS est composé de deux languettes moulées dans un capteur. Par conséquent, leurs mouvements sont identiques.
- La masse du capteur PMH est égale à 53g tandis que la masse du porte-languette RH est de 3g. Par conséquent, cette différence de masse induit des forces d'inertie plus importantes pour le connecteur PMH-GTS que le connecteur RH-PCPL.

Les fils sont laissés libres car il s'agit d'une possibilité de disposition dans le moteur. Leur rigidité est assez importante pour assurer leur stabilité. Cette caractéristique est importante car ils peuvent influencer le comportement vibratoire des clips.

2.4.1 Connecteur RH-PCPL

L'échantillon RH-PCPL est défini comme un système porte-languette/porte-clip. Dans un premier cas, l'axe des sollicitations vibratoires correspond à l'axe X. La vibration est donc parallèle à l'axe de la languette, voir figure 2.22. Dans un second cas, l'axe des sollicitations vibratoires correspond à l'axe Z.

La vibration est donc orthogonale à l'axe de la languette, voir figure 2.23.

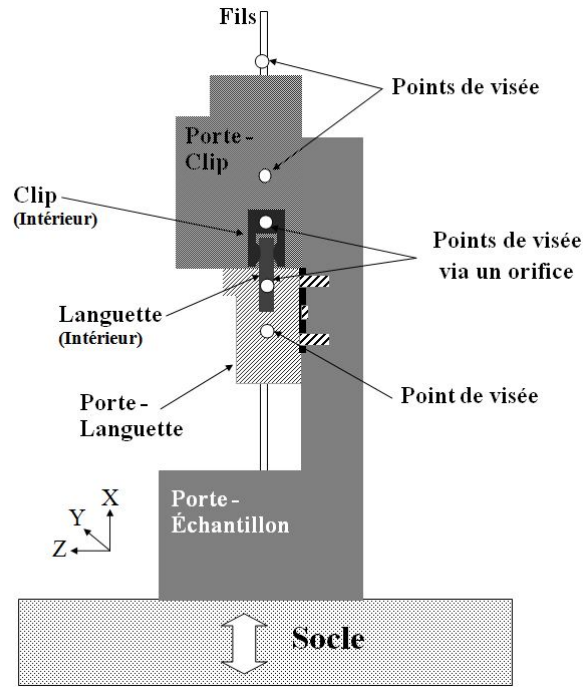


FIGURE 2.22 – Schéma du connecteur RH-PCPL avec les différents points de visée. Les vibrations sont parallèles à l'axe de la languette.

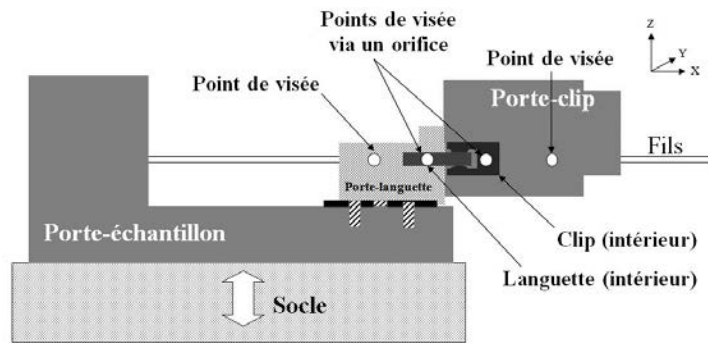


FIGURE 2.23 – Schéma du connecteur RH-PCPL avec les différents points de visée. Les vibrations sont orthogonales à l'axe de la languette.

La figure 2.24 regroupe l'ensemble des amplitudes absolues de mouvement du porte-languette/capteur, de la languette, du clip, du porte-clip et du fil suivant les trois directions et les deux dispositions du connecteur.

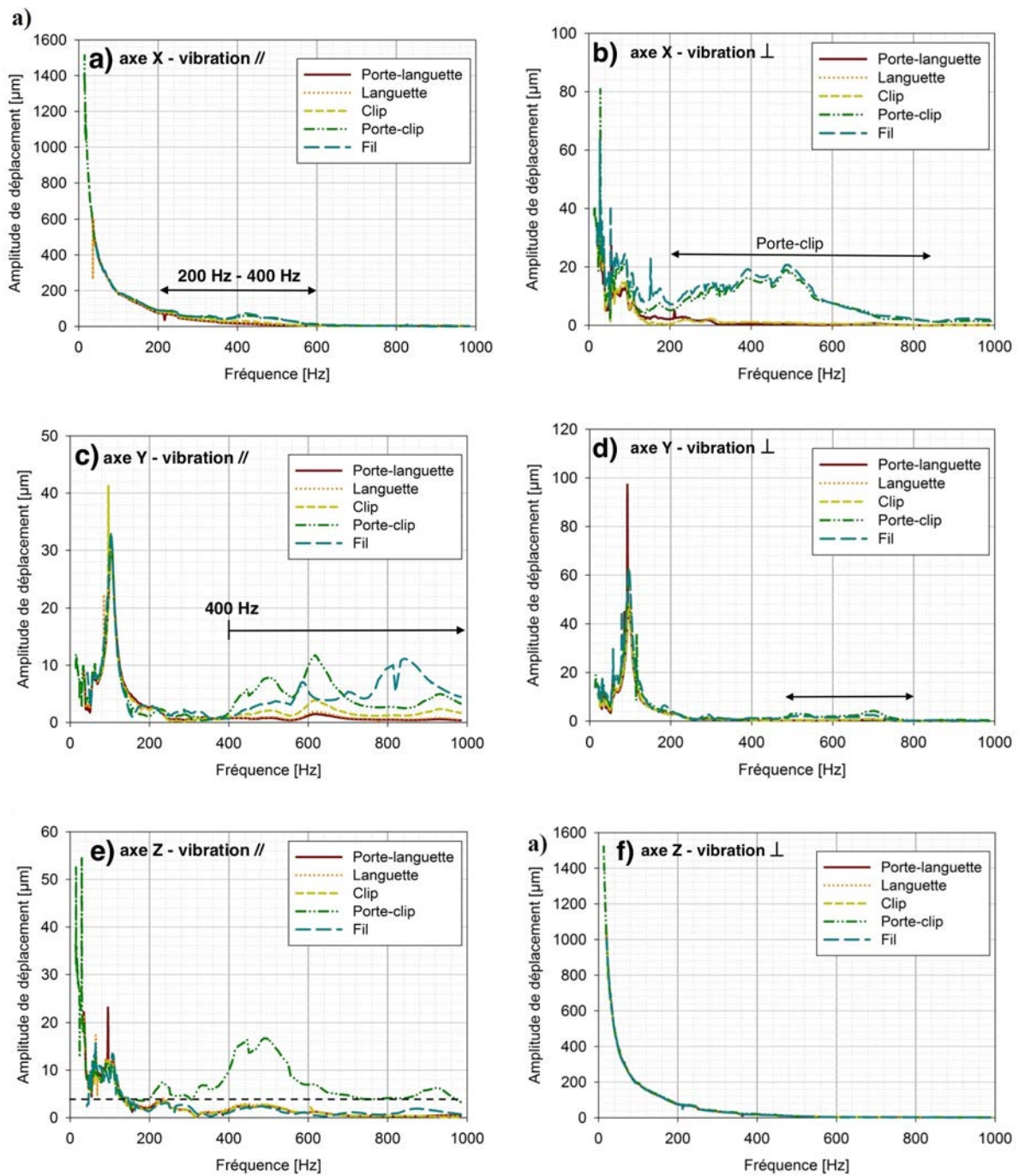


FIGURE 2.24 – Amplitudes absolues de déplacement du connecteur RH-PCPL. Résultats suivant (a) l'axe X, (c) l'axe Y et (e) l'axe Z avec une vibration imposée parallèle à l'axe de la languette. Résultats suivant (b) l'axe X, (d) l'axe Y et (f) l'axe Z avec une vibration imposée orthogonale à l'axe de la languette.

Cas 1 : vibration parallèle à l'axe de vibration

Les observations sont les suivantes :

- Suivant l'axe X, les amplitudes de mouvement de tous les composants du connecteur sont égales jusqu'à 200 Hz. Ensuite, les amplitudes de mouvement du clip, du porte-clip et du fil augmentent par rapport à la languette et au porte-languette entre 200 et 600 Hz, voir figure 2.24 (a).
- Suivant l'axe Y, les amplitudes de mouvement des composants varient à partir de 400 Hz, voir figure 2.24 (c). Hormis le fil, l'allure du comportement vibratoire des composants est similaire mais leurs amplitudes sont différentes. Par exemple, les amplitudes maximales du porte-clip, clip, languette et porte-languette sont respectivement égales à $12 \mu m$, $5 \mu m$ et $2 \mu m$ à la fréquence de 620 Hz.
- Suivant l'axe Z, les déplacements de tous les composants du connecteur sont de faibles amplitudes. Hormis l'allure de la courbe du porte-clip qui est différente sur l'ensemble de la plage fréquentielle. En effet, sa valeur maximale est égale à $16 \mu m$ à 500 Hz tandis que l'amplitude des autres composants ne dépassent pas $5 \mu m$, voir figure 2.24 (e).

Cas 2 : vibration orthogonale à l'axe de vibration

Les observations sont les suivantes :

- Suivant l'axe X, les amplitudes de déplacement du porte-clip et du fil augmentent entre 200 et 800 Hz, voir figure 2.24 (b). Le maximum est atteint par le porte-clip à 475 Hz pour une valeur égale à $20 \mu m$. Le clip, la languette et le porte-languette ont des amplitudes de déplacement proches de zéro sur l'ensemble de la plage fréquentielle.
- Suivant l'axe Y, les amplitudes de déplacement de l'ensemble du connecteur sont faibles, voir figure 2.24 (d). En effet, leurs valeurs sont inférieures à $5 \mu m$ sur toute de la plage fréquentielle. Cependant, une légère augmentation de l'amplitude de mouvement du porte clip et du fil a lieu entre 500 et 800 Hz.
- Suivant l'axe Z, les amplitudes de déplacement de l'ensemble du connecteur sont égales à l'amplitude de déplacement imposée par profil vibratoire, voir figure 2.24 (f).

Une remarque supplémentaire concerne le porte-languette qui a une amplitude de mouvement maximale égale à $3 \mu m$ suivant l'axe Z avec une vibration parallèle à la languette. Le connecteur penche donc légèrement, voir figure 2.24 (e). L'amplitude de mouvement du porte-languette est nulle suivant l'axe X avec une vibration orthogonale à la languette, voir figure 2.24 (b). Ces deux cas sont étudiés suivant la même direction en prenant comme référence la direction de la vibration. Par conséquent, l'inclinaison du connecteur dans le premier cas est bien un comportement vibratoire propre au connecteur et non pas à un défaut inhérent à la source vibratoire.

2.4.2 Connecteur PMH-GTS

Le connecteur PMH-GTS est composé d'un capteur et d'un porte-clip. Les languettes sont moulées dans le capteur tandis que les clips sont introduits au sein du porte-clip. Dans le premier cas, les vibrations sont transmises suivant l'axe de la languette, voir figure 2.25. Dans le second cas, les vibrations sont transmises orthogonalement à l'axe de la languette, voir figure 2.26.

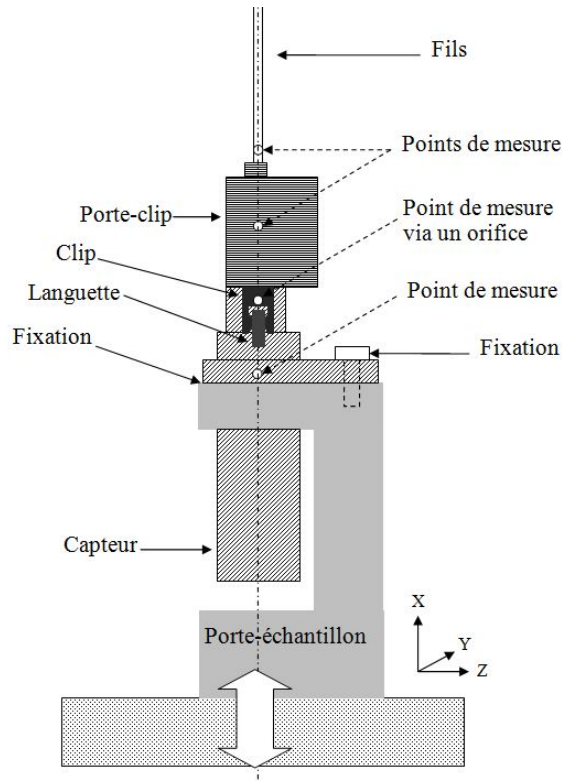


FIGURE 2.25 – Schéma du capteur PMH avec le porte-clip GTS. La vibration est parallèle à l'axe de la languette.

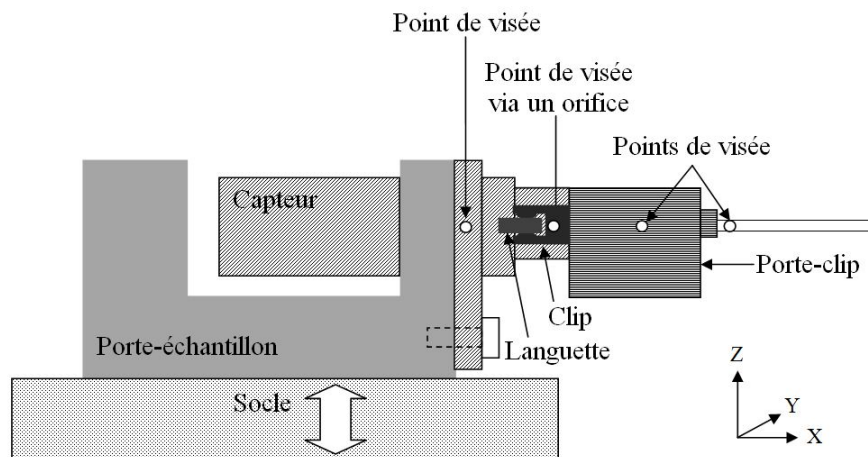


FIGURE 2.26 – Schéma du capteur PMH avec le porte-clip GTS. La vibration est orthogonale à l'axe de la languette.

La figure 2.27 regroupe l'ensemble des mesures des amplitudes absolues de mouvement du porte-languette/capteur, de la languette, du clip, du porte-clip et du fil suivant les trois directions et les deux dispositions du connecteur.

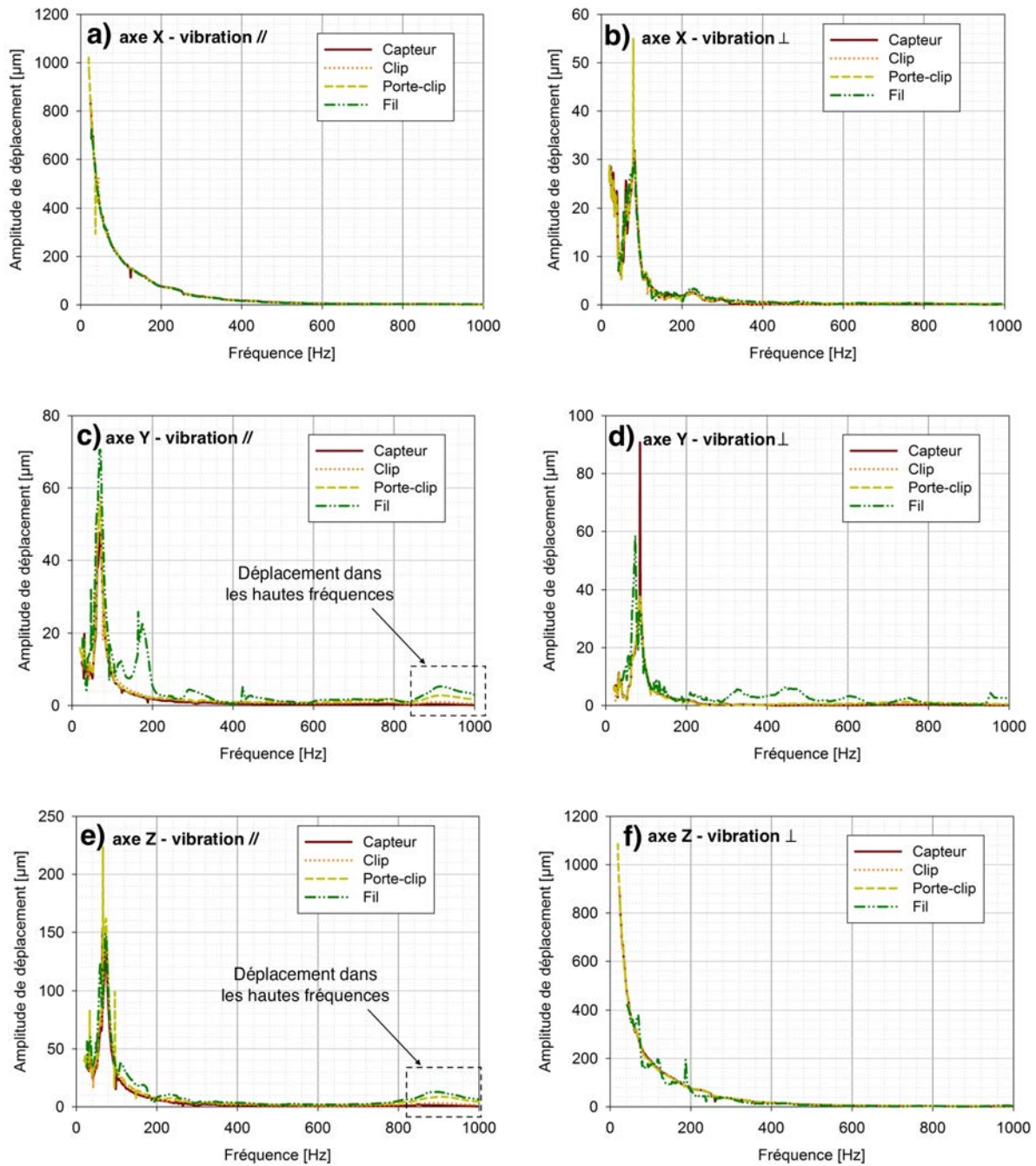


FIGURE 2.27 – Amplitudes absolues de déplacement du connecteur PMH-GTS. Résultats suivant (a) l'axe X, (c) l'axe Y et (e) l'axe Z avec une vibration imposée parallèle à l'axe de la languette. Résultats suivant (b) l'axe X, (d) l'axe Y et (f) l'axe Z avec une vibration imposée orthogonale à l'axe de la languette

Cas 1 : vibration parallèle à l'axe de vibration

Les observations sont les suivantes

- Suivant l'axe X, les amplitudes de déplacement de l'ensemble du connecteur correspondent à l'amplitude de déplacement imposé par le profil vibratoire, voir figure 2.27 (a).
- Selon l'axe Y et Z, les comportements vibratoires du clip et du porte-clip sont similaires, voir les figures 2.27 (c) et 2.27 (e). En effet, leurs amplitudes de mouvement sont égales avec des valeurs proches de zéro jusqu'à 800 Hz. Pour les hautes fréquences, leurs amplitudes de déplacement augmentent. En effet, le porte-clip atteint un maximum à 910 Hz égale à $2 \mu m$ selon l'axe Y et $9 \mu m$ selon l'axe Z.

Le comportement vibratoire du connecteur PMH-GTS est stable. Une légère augmentation de l'amplitude du porte-clip selon les axes Y et Z est observable dans les hautes fréquences. On remarque également que les amplitudes de mouvement du fil varient sur l'ensemble de la plage fréquentielle selon les axes Y et Z.

Cas 2 : vibration orthogonale à l'axe de vibration

Les observations sont les suivantes :

- Suivant l'axe X, les amplitudes de mouvement de l'ensemble du connecteur sont identiques, voir figure 2.27 (b).
- Suivant les axes Y et Z, les amplitudes de déplacement de l'ensemble du connecteur sont égales au mouvement imposé par le profil vibratoire. Seul le fil indique une amplitude de mouvement qui varie sur l'ensemble de la plage fréquentielle, voir les figures 2.27 (d) et (f).

Le comportement vibratoire du connecteur PMH-GTS est stable lorsque la direction de la vibration est orthogonale à l'axe de la languette. Seules les amplitudes de mouvement du fil varient sur l'ensemble de la plage fréquentielle selon les axes orthogonaux à l'axe de la languette.

2.4.3 Conclusion sur le comportement vibratoire des connecteurs RH-PCPL et PMH-GTS soumis à un profil vibratoire

Les déplacements absolus sont mesurés en suivant les amplitudes de déplacement imposées par le profil vibratoire, voir figure 2.21 de la page 69. Les tableaux 2.1 et 2.2 résument les différentes observations :

TABLE 2.1 – Résumé de l'analyse des mesures absolues en amplitude des composantes des connecteurs RH-PCPL et PMH-GTS soumis à une vibration parallèle à la languette

	Connecteur RH-PCPL	Connecteur PMH-GTS
Axe X	Clip et porte-clip entre 200 et 600 Hz Différence d'amplitude : $20 \mu m$	Aucune différence notable
Axe Y	Tous les composants à partir de 400 Hz Différence d'amplitude : $20 \mu m$	Porte-clip entre 800 et 1000 Hz Différence d'amplitude : $2 \mu m$
Axe Z	Porte-clip entre 10 et 1000 Hz Différence d'amplitude : $20 \mu m$	Porte-clip entre 800 et 1000 Hz, Différence d'amplitude : $10 \mu m$

TABLE 2.2 – Résumé de l'analyse des mesures absolues en amplitude des composantes des connecteurs RH-PCPL et PMH-GTS soumis à une vibration orthogonale à la languette

	Connecteur RH-PCPL	Connecteur PMH-GTS
Axe X	Porte-clip entre 200 et 800 Hz Différence d'amplitude : $20 \mu m$	Aucune différence notable
Axe Y	Porte-clip entre 500 et 800 Hz Différence d'amplitude : $2 \mu m$	Aucune différence notable
Axe Z	Aucune différence notable	Aucune différence notable

Le connecteur PMH-GTS a un comportement vibratoire plus stable que le connecteur RH-PCPL. En effet, ses amplitudes de mouvement suivant les trois axes et ses deux dispositions ne mettent pas en évidence de fortes différences de déplacement. A l'inverse, le connecteur RH-PCPL a un comportement vibratoire dynamique au cours duquel les vibrations induites sont nombreuses.

Les connecteurs ont un comportement vibratoire différent suivant l'axe de vibration imposée suivant les trois axes. En effet, les plages fréquentielles où l'amplitude du porte-clip augmente par rapport au profil sont différentes pour chaque cas. Toutefois, les mesures d'amplitude absolue mettent en évidence une meilleure stabilité lorsque la vibration est orthogonale à l'axe de la languette.

Le composant dont le comportement diffère du profil est le porte-clip en raison du maintien entre ce dernier et le porte-languette RH ou le capteur PMH. De ce fait, le comportement vibratoire du porte-clip peut influencer celui du clip. Par conséquent, le comportement vibratoire du porte-clip peut induire des perturbations d'ordre électrique.

2.5 Mesures électriques et analyse des surfaces des connecteurs soumis à un profil vibratoire

2.5.1 Mesures électriques

Les tests électriques ont été réalisés sur les connecteurs RH-PCPL et PMH-GTS. L'objectif est de caractériser le comportement électrique en lien avec d'une part les résultats du comportement vibratoire et d'autre part des analyses de surface.

Le premier test a été réalisé dans des conditions vibratoires spécifiques lors de la mise en place du banc d'essai. L'amplitude de vibration est fixée à $50 \mu m$ et la fréquence est comprise entre 10 et 300 Hz.

Les tests suivants ont été réalisés en appliquant le profil vibratoire :

- Le connecteur PMH-GTS en position horizontale durant 11h (revêtement en or).
- Le connecteur PMH-GTS en position verticale durant 16h (revêtement en or).
- Le connecteur RH-PCPL en position verticale durant 16h (revêtement en étain).

Connecteur PMH-GTS - test à fréquence constante

Dans le cadre d'un test de mesure d'amplitude de vibration, l'amplitude est fixée à $50 \mu m$ et le balayage fréquentiel entre 10 et 325 Hz. Le résultat indique une augmentation de l'amplitude de mouvement de la languette et du clip à 100 Hz, voir figure 2.28 (a). Par conséquent, l'étude électrique a consisté à enregistrer les fluctuations de la tension de contact en fixant l'amplitude à $50 \mu m$ à 100 Hz durant 48h, voir figure 2.28 (b).

La tension de contact a été mesurée sur un capteur PMH-GTS selon une méthode proche de la méthode 4 fils [2]. En effet, cette mesure prend en compte la résistance de contact et la résistance d'accès. Cette dernière dépend d'une part de la conductivité électrique du cuivre ($60.10^6 S.m^{-1}$) et d'autre part de la longueur de fil considérée (5 cm). Par conséquent, la valeur de la résistance d'accès est faible. Elle peut donc être négligée lors de la mesure de la résistance.

Les observations du comportement électrique indiquent une valeur moyenne de la tension de contact égale à 5,5 mV, voir figure 2.28. Elle fluctue légèrement car sa valeur maximale et minimale est respectivement égale à 6,2 et 5,2 mV. Par conséquent, la conduction est relativement stable.

Les clips et les languettes du connecteur PMH-GTS sont composés d'un substrat en alliage de cuivre, d'une sous-couche de nickel et d'une couche d'or. L'or est à la fois un excellent conducteur électrique et un matériau résistant au phénomène de fretting-corrosion [41]. Cette caractéristique explique le comportement électrique observé.

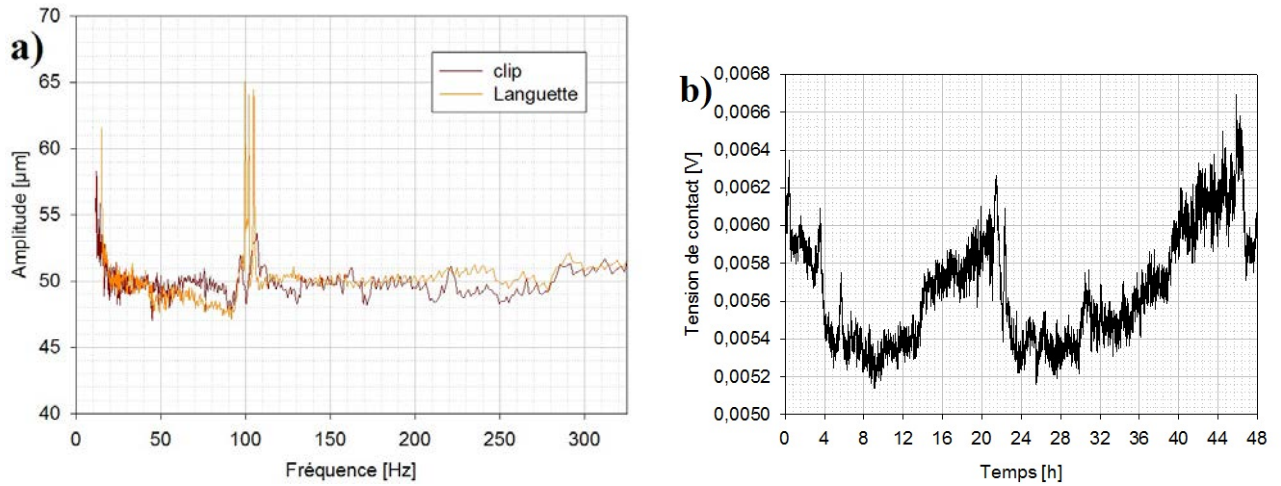


FIGURE 2.28 – Mesure du déplacement en amplitude et de la tension de contact à la fréquence de 100 Hz.

Connecteur PMH-GTS - Vibration orthogonale à la languette durant 11h

Pour cet essai, le profil vibratoire Renault 15g est appliqué durant 11h sur les échantillons en appliquant un courant de 500 mA pour observer les défaillances électriques. Il s'agit de suivre les conditions d'essai du cahier des charges Renault.

Les mesures de la tension de contact sont réalisées sur un connecteur PMH-GTS dont la sollicitation vibratoire est orthogonale à la languette, voir figure 2.29. La tension de contact fluctue et augmente à partir de 7h. Par conséquent, une dégradation électrique est mise en évidence.

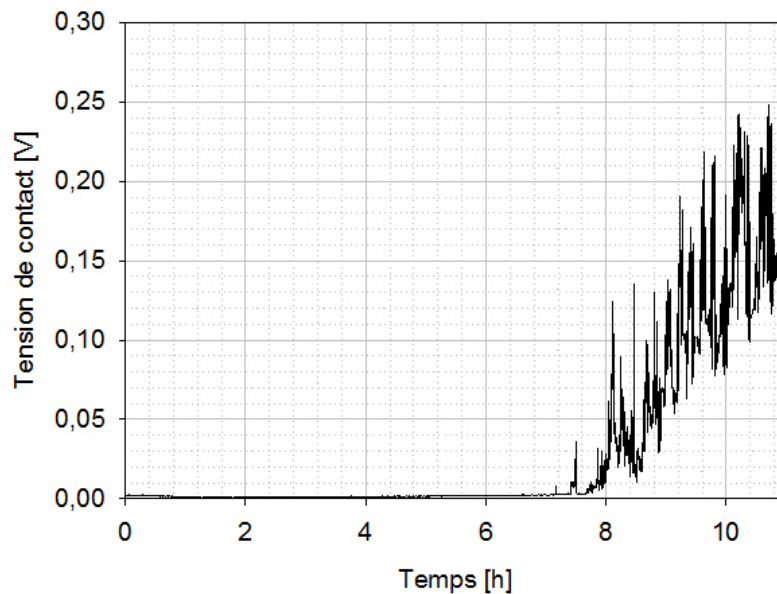


FIGURE 2.29 – Mesures électriques du connecteur PMH-GTS en position horizontale durant 11h.

Connecteur PMH-GTS - Vibration parallèle à la languette durant 16h

Un deuxième échantillon est analysé en appliquant le profil vibratoire 15g durant 16h. L'échantillon est disposé tel que l'axe de la languette soit parallèle à l'axe de vibration. Les mesures électriques indiquent une bonne conduction durant toute la durée de l'expérience. Une diminution de 1,5 mV est observée durant les 6 premières heures suivie d'une stabilisation à 16,5 mV jusqu'à la fin de l'expérience, voir figure 2.30. Par conséquent, le capteur PMH-GTS a un bon comportement électrique.

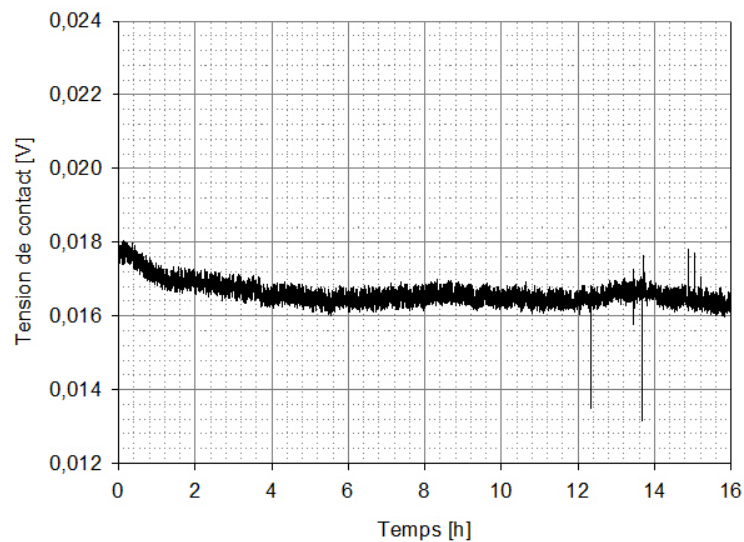


FIGURE 2.30 – Mesures électriques du connecteur PMH-GTS en position verticale durant 16h.

Connecteur RH-PCPL - Vibration parallèle à la languette durant 16h

Les clips et les languettes de l'échantillon RH-PCPL sont composés d'un revêtement en étain sur un substrat en cuivre. L'échantillon est disposé en position verticale durant 16h. La figure 2.31 indique une bonne conduction électrique avec une valeur de tension de contact de départ égale à 9 mV, suivie d'une diminution jusqu'à 1,2 mV au bout de 2h puis d'une stabilisation durant 5h et enfin d'une diminution lente jusqu'à atteindre une valeur quasi-nulle au bout de 16h. Par conséquent, les résultats mettent en évidence une bonne conduction électrique du connecteur RH-PCPL.

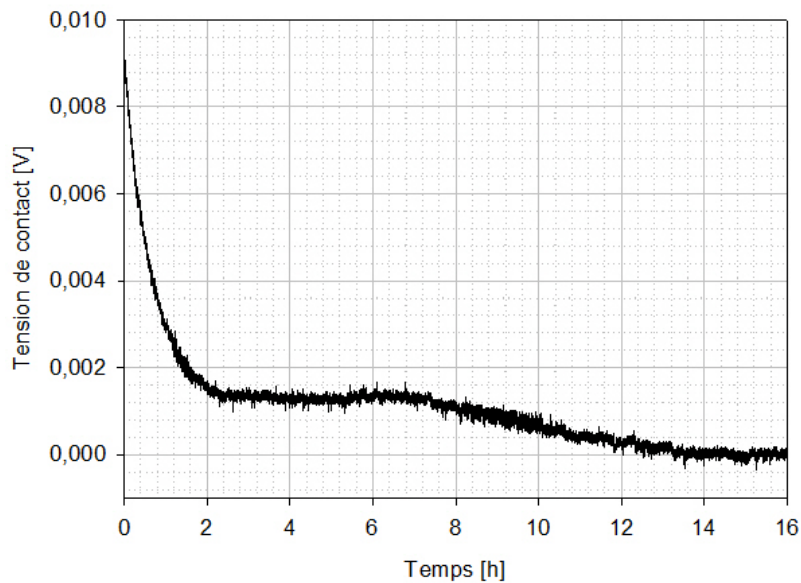


FIGURE 2.31 – Mesures électriques du connecteur PCPL-RH en position verticale durant 16h.

2.5.2 Analyses de surface

Analyse de surface à la loupe binoculaire des échantillons du connecteur PMH-GTS

Suite à l'essai électrique, l'analyse visuelle de la zone de contact est réalisée avec une loupe binoculaire. La dégradation mécanique de la surface est visible malgré le bon comportement électrique. En effet, les feuillets d'or se détachent de la surface de la surface laissant apparaître la sous-couche de nickel, voir figure 2.32.

Le procédé du dépôt du revêtement en or sur la sous-couche de nickel a entraîné une dégradation de la zone de contact. Par conséquent, cette dégradation n'est pas due aux sollicitation mais au procédé de dorure. Toutefois, cela est un problème ponctuel qui ne concerne que peu d'échantillons.

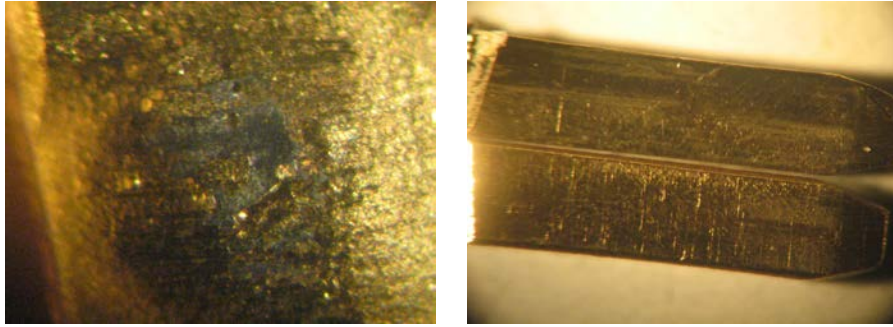


FIGURE 2.32 – Analyse à la loupe binoculaire de la zone de contact sur le clip et la languette du connecteur PMH-GTS.

Connecteur PMH-GTS - Vibration orthogonale à la languette durant 11h

Les analyses MEB et physico-chimique du clip et de sa zone de contact ainsi qu'une analyse physico-chimique ont été réalisées, voir figure 2.33. Les fissures sont issues d'une part du procédé de fabrication de la courbure du clip et d'autre part à la différence des propriétés mécaniques entre l'or et la sous-couche de nickel. L'analyse physico-chimique dans une de ces fissures indique d'ailleurs la présence exclusive de nickel.

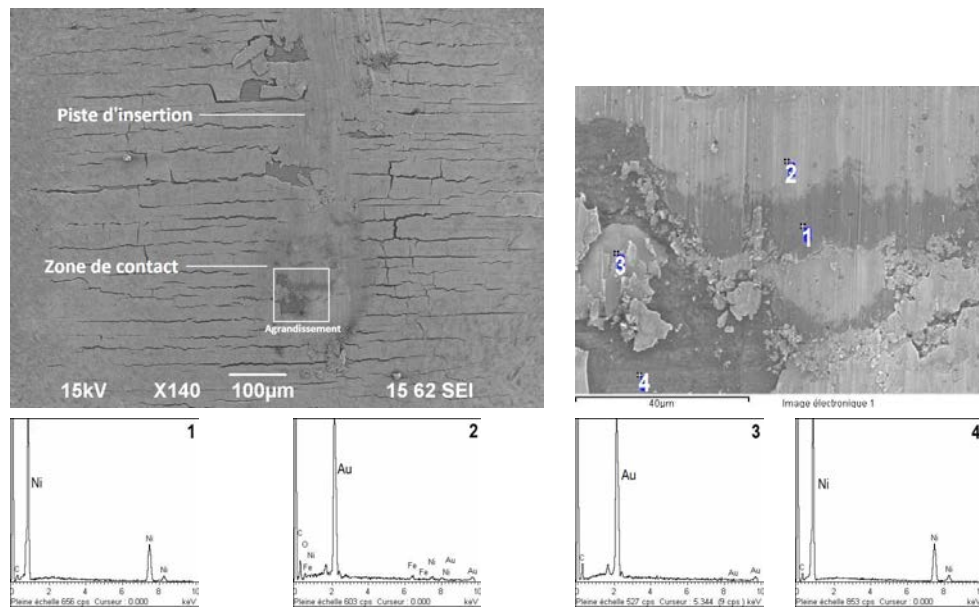


FIGURE 2.33 – Analyse MEB et physico-chimique d'une trace de contact d'un clip revêtu d'or et de nickel sur cuivre d'un porte-clip GTS sur capteur PMH après 11h de vibration en appliquant le profil 15g (cahier des charges Renault).

Les analyses chimiques hors des fissures n'indiquent pas la présence de nickel. En effet, l'épaisseur de l'or est suffisamment importante pour que le nickel ne rentre pas dans la "poire" d'interaction du MEB. Par conséquent, ces fissures n'ont aucune incidence sur la conduction électrique.

La piste d'insertion est visible ainsi que la zone de contact. En agrandissant cette dernière, la fissure est toujours visible. Ainsi, la fissuration était présente avant l'insertion de la languette. L'analyse physico-chimique indique bien la présence de l'or.

L'analyse MEB de la languette indique une zone de contact peu dégradée, voir figure 2.34. Les fissures ne sont pas présentes et l'analyse physico-chimique indique l'absence de la sous-couche de nickel. Néanmoins, une pollution de l'état de surface est à noter avec la présence de débris d'étain (points 1 et 4) et de carbone (points 2) en tant qu'impureté. Les points 3,5 et 6 indiquent la présence de l'or sur la surface, voir figure 2.34. La défaillance électrique mesurée (figure 2.29) n'est pas due à une dégradation par fretting-corrosion car l'or est présent en surface du clip et de la languette.

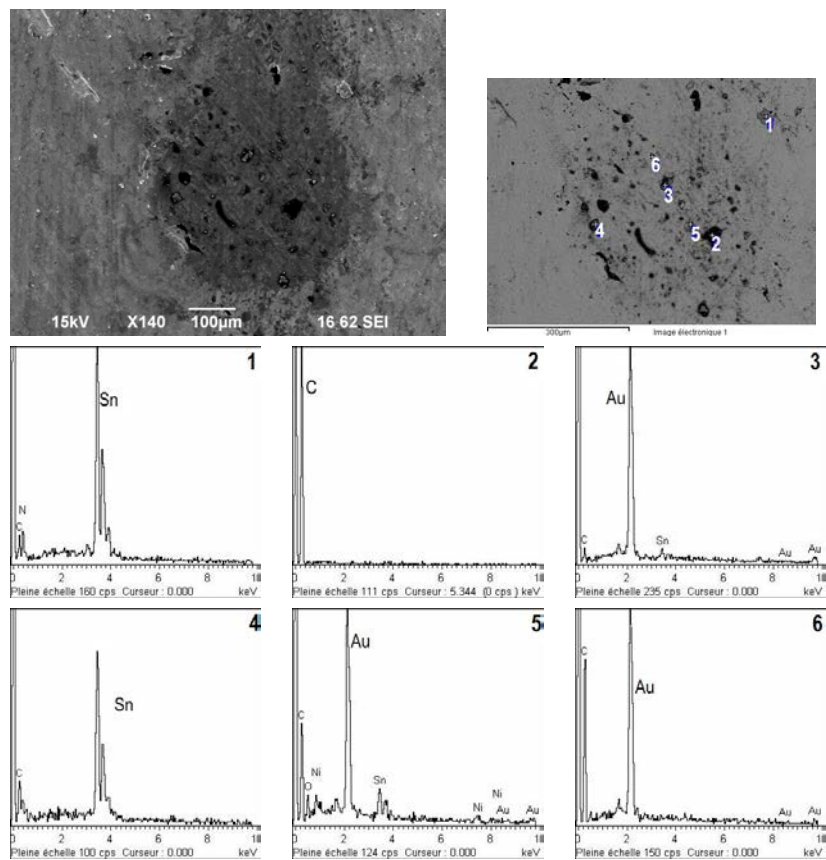


FIGURE 2.34 – Analyse MEB et physico-chimique d'une trace de contact d'une languette revêtue d'or et de nickel sur cuivre d'un capteur PMH connecté à un porte-clip GTS après 11h de vibrations en appliquant le profil 15g (cdc Renault).

Connecteur PMH-GTS - Vibration parallèle à la languette durant 16h

L'analyse MEB montre les mêmes caractéristiques que précédemment avec une dégradation du revêtement. En effet, des fissures sont présentes sur l'ensemble de la surface, voir figure 2.35. L'analyse des zones du clip montre l'absence de feuillet d'or sur la zone de contact. Cela met en évidence des problèmes d'adhérence du revêtement en or. Toutefois, cela n'occasionne pas de problèmes de conduction électrique sous sollicitation vibratoire.

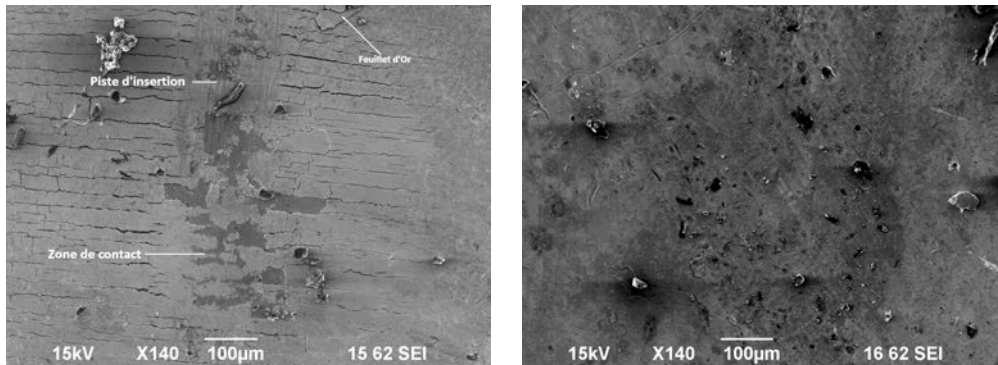


FIGURE 2.35 – Photographies MEB (a) du clip et (b) de la languette du porte-clip GTS et du capteur PMH après 16h de test. L'axe de vibration correspond à l'axe de la languette.

Connecteur RH-PCPL - Vibration parallèle à la languette durant 16h

Les analyses MEB du clip, de la languette et du plancher indiquent une zone de dégradation visible sur le clip et le plancher tandis que le trace est difficilement visible sur la languette, voir figure 2.36. La taille des traces sur le clip est plus importante que sur la languette avec la présence de débris en fin de piste.

L'analyse physico-chimique du clip indique la présence de l'étain sur le bord de la trace (points 2 et 3) tandis que le point 1 indique la présence de cuivre et d'étain correspondant à un composé inter-métallique, voir figure 2.37. L'absence exclusive de cuivre indique une faible dégradation électrique.

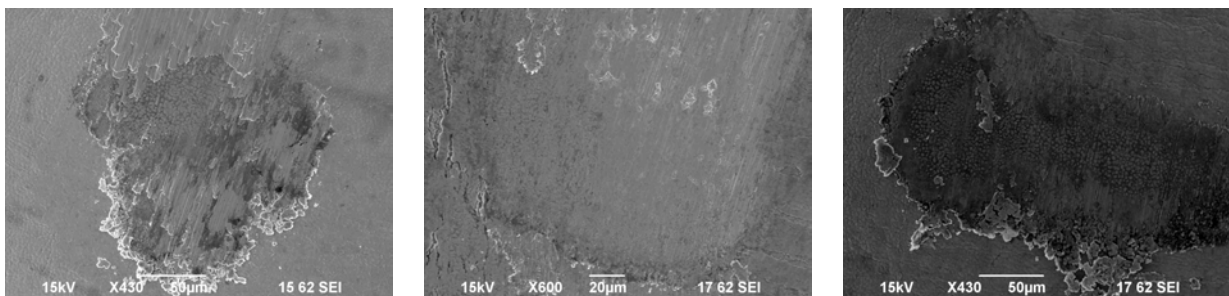


FIGURE 2.36 – Photographie MEB du clip, de la languette et du plancher du connecteur RH-PCPL en position verticale après 16h de test

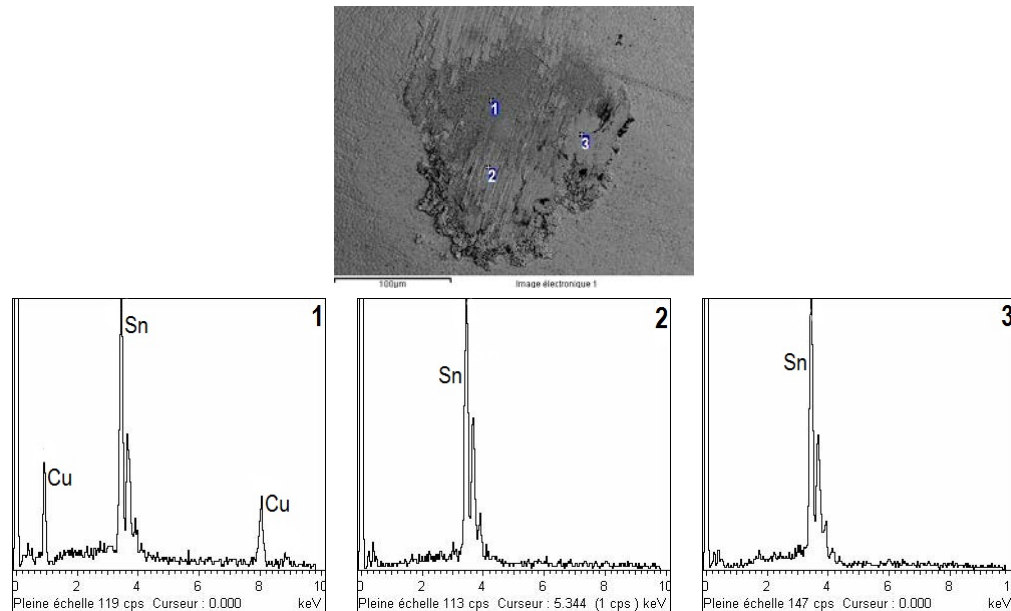


FIGURE 2.37 – Photographie MEB de la zone de contact clip du connecteur PCPL-RH en position verticale et analyse physico-chimique au centre (point1) et au bord de la trace de fretting (points 2 et 3).

2.5.3 Conclusion des mesures électriques et des analyses de surface

La conduction électrique des connecteurs soumis à des vibrations met en évidence de faibles fluctuations de la tension de contact. Seul le connecteur PMG-GTS soumis à une vibration orthogonale indique une augmentation de la tension de contact de l'ordre de 200 mV ($100\text{ m}\Omega$). Toutefois, les analyses de surface n'ont pas montré de dégradation particulière. Cette augmentation de la tension de contact n'est donc pas due au phénomène de fretting-corrosion.

Ces essais ont mis en évidence le problème d'adhérence de la connectique en or, qui peut poser problème à long terme pour un connecteur qui doit assurer le passage d'informations importantes vers un ordinateur d'un système embarqué automobile. Ce problème a été signalé dans un autre centre de recherche. Toutefois, les connecteurs présentent une bonne stabilité électrique.

2.6 Conclusion

La mise en place des bancs d'essai utilisant l'actionneur piézo-électrique et le pot vibrant a mis en évidence l'importance d'utiliser un vibromètre comme moyen d'essai. De cette manière, il est possible de mesurer l'amplitude de déplacement absolue sur différents points de visée et notamment à l'intérieur des connecteurs. De plus, la précision de mesure est l'ordre du micromètre. Par conséquent, ce moyen de mesure et le système d'analyse des données mis en place sont des outils primordiaux pour la compréhension du comportement vibratoire d'un connecteur.

Les résultats mettent en avant le comportement vibratoire du PMH-GTS, plus stable que celui du connecteur RH-PCPL. Dans les deux cas, les amplitudes de déplacement absolues les plus importantes sont celles du porte-clip. De ce fait, il se peut que ce soit le composant qui influence le comportement vibratoire du clip. De plus, une vibration parallèle à l'axe de la languette entraîne des différences d'amplitude entre le porte-clip et le porte-languette plus importante qu'une vibration orthogonale à l'axe de la languette. Par conséquent, il s'agit de l'axe de vibration le plus défavorable.

L'analyse des mesures électriques, conjointe à l'analyse des surfaces de contact, n'a pas révélé de dégradation particulière. Toutefois, les connectiques des connecteurs PMH-GTS sont revêtus d'or. De ce fait, elles ont une bonne résistance au fretting-corrosion. Les perspectives seraient de réaliser des essais avec d'une part des profils vibratoires dont les amplitudes sont les plus importantes et d'autre part des durées expérimentales également plus longues.

Pour conclure, l'amplitude de vibration du clip est moins importante que celle du porte-clip. Cette diminution peut provenir d'une part de la force de contact entre le clip et la languette et d'autre part du fait que le porte-clip et le clip ne sont pas fixés entre eux. De plus, les analyses de surface ont mises en évidence une faible dégradation mécanique. D'autre part, les mesures n'ont pas mises en évidence de relation directe entre les amplitudes de déplacement du porte-clip et le clip. Par conséquent, il est nécessaire de mesurer directement le déplacement du clip et de la languette pour caractériser le comportement vibratoire et électrique d'un connecteur.

Chapitre 3

Analyse des mesures expérimentales et mise au point d'un modèle numérique

Introduction

Les mesures expérimentales correspondent à l'amplitude de déplacement d'un point de visée i.e. un des composants du connecteur (porte-languette, clip...). Il s'agit de l'amplitude de déplacement absolue. Les observations de ces mesures permettent d'avoir une première approche sur le comportement vibratoire du connecteur étudié. En effet, il est possible de définir si l'amplitude de déplacement de ce composant est :

- soit identique à l'amplitude imposé par le profil vibratoire, auquel cas le comportement vibratoire du connecteur ne devrait pas induire des déplacements relatifs entre le clip et la languette.
- soit différente de l'amplitude imposée, auquel cas ces vibrations induites peuvent provoquer des déplacements relatifs à l'interface entre le clip et la languette. Par conséquent, des dégradations de la conduction électrique peuvent avoir lieu.

Il est toutefois nécessaire de connaître le déphasage entre deux points de visée en plus des amplitudes de déplacement absolue. En effet, cette grandeur permet de calculer le déplacement relatif entre ces deux points de mesure. Par conséquent, il est possible de définir si ce déplacement relatif induit des dégradations mécaniques voir électriques à l'interface de contact en fonction du profil vibratoire appliqué. Ces résultats pourront être comparés avec les résultats des essais électriques menés sur les connectiques. Cette analyse fera l'objet du premier point abordé dans ce chapitre.

Le second point abordé dans ce chapitre correspond aux fonctions de transfert, i.e. le ratio des amplitudes de déplacement entre deux composants du connecteur. De là, il sera possible de définir le comportement vibratoire entre ces deux composants. Cette analyse met notamment en évidence des effets de résonance et/ou d'absorption des vibrations. Par conséquent, il est possible de définir l'influence des composants du connecteur entre eux.

Dans un troisième temps, les fonctions de transfert permettent de mettre en place une modélisation de type masse-ressort-amortissement. Ce modèle pourra ensuite être utilisé pour quantifier les observations des courbes de déplacement. Par conséquent, il sera possible de prédire le comportement vibratoire du connecteur en fonction d'une part de son emplacement sur le moteur et d'autre part sa position par rapport à la source de vibration.

Dans le dernier point, nous aborderons les perspectives d'utilisation du vibromètre sur un banc d'essai moteur. Nous verrons notamment les difficultés rencontrés et les possibilités pour caractériser les comportements vibratoires d'un connecteur sur véhicule.

3.1 Analyse des déphasages et des déplacements relatifs

Le déphasage est une grandeur relative i.e. la différence de phase entre deux points de mesure. Dans notre cas, la référence sera le porte-languette du connecteur RH-PCPL ou le capteur du connecteur PMH-GTS. Cette grandeur est primordiale pour définir le déplacement relatif entre le clip et la languette par exemple. En effet, deux mouvements peuvent avoir la même amplitude de déplacement mais un déphasage non-nul ce qui induira un déplacement relatif.

Un programme d'analyse a été réalisé pour comparer les phases des différents points de mesure. En effet, si les fréquences de deux signaux acquis sont différentes, il est alors impossible de comparer leur déphasage. Néanmoins, la phase d'un signal est une grandeur continue. Par conséquent, chacun des signaux doit être analysé et étudié. Cette analyse permet d'obtenir le déphasage par régression linéaire pour des fréquences communes à chaque point de mesure.

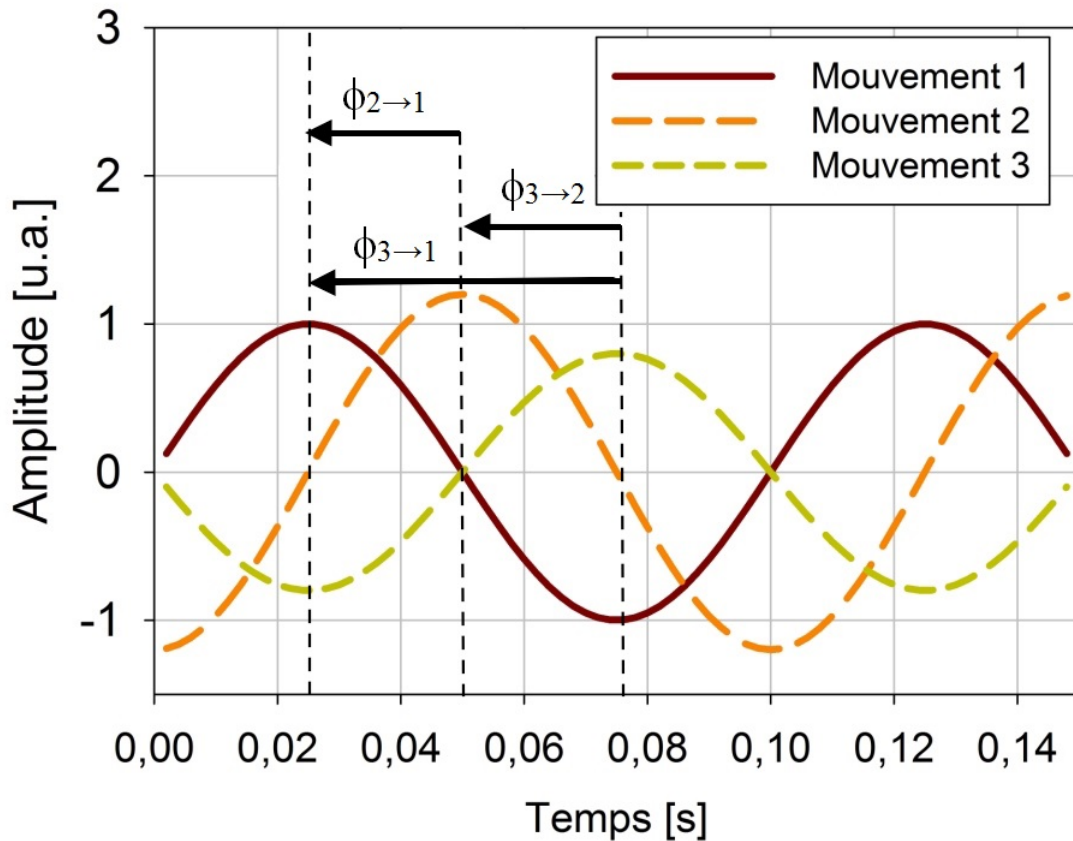


FIGURE 3.1 – Graphique de deux signaux correspondant à des mouvements sinusoïdaux mettant en évidence l'amplitude mesurée et le déphasage. Le mouvement 1 est la référence. La mesure des déphasages $\Phi_{2 \rightarrow 1}$ et $\Phi_{3 \rightarrow 1}$ permet d'en déduire le déphasage $\Phi_{3 \rightarrow 2}$

Dans un premier temps, les résultats concerneront les déphasages de chaque composant par rapport au porte-languette du connecteur RH-PCPL ou du capteur PMH. Dans un second temps, nous nous focaliserons sur les déplacements relatifs entre d'une part le porte-clip et le porte-languette ou le capteur et d'autre part le clip et la languette.

3.1.1 Connecteur RH-PCPL

Les résultats des mesures des déphasages sont indiqués sur la figure 3.2. Les courbes situées sur la gauche correspondent à une vibration parallèle à l'axe de la languette, les courbes situées sur la droite correspondent à une vibration orthogonale à l'axe de la languette.

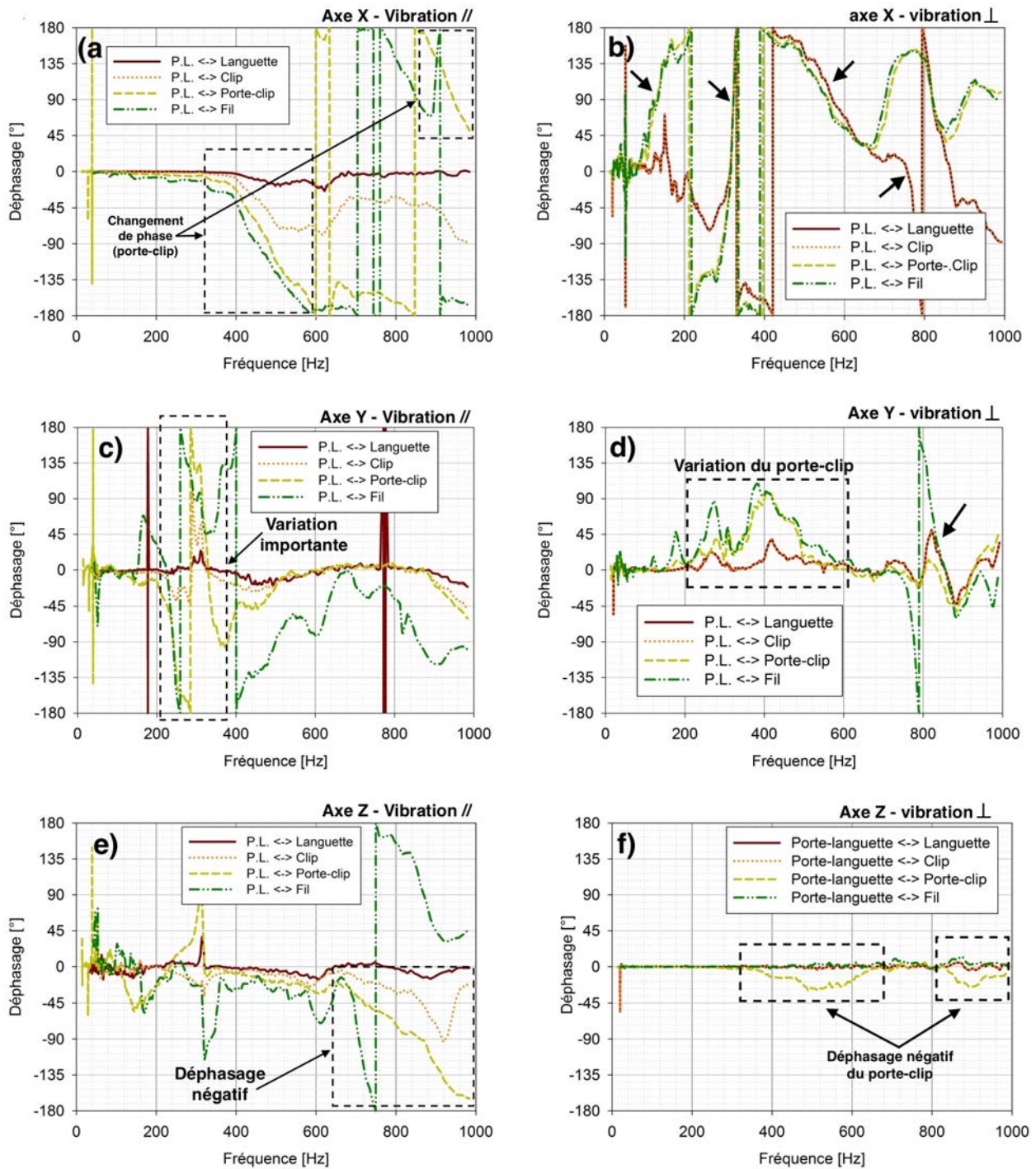


FIGURE 3.2 – Déphasage entre le porte-languette et les autres composants du connecteur RH-PCPL. Dans le premier cas, les résultats sont suivant (a) l'axe X, (c) l'axe Y et (e) l'axe Z avec une vibration parallèle à la languette. Dans le deuxième cas, les résultats sont suivant (b) l'axe X, (d) l'axe Y et (f) l'axe Z avec une vibration orthogonale à la languette.

La figure 3.3 indique les amplitudes des déplacements relatifs entre d'une part le porte-clip et le porte-languette et d'autre part la languette et le clip. Les courbes situées sur la gauche correspondent à une vibration parallèle à l'axe de la languette, les courbes situées sur la droite correspondent à une vibration orthogonale à l'axe de la languette.

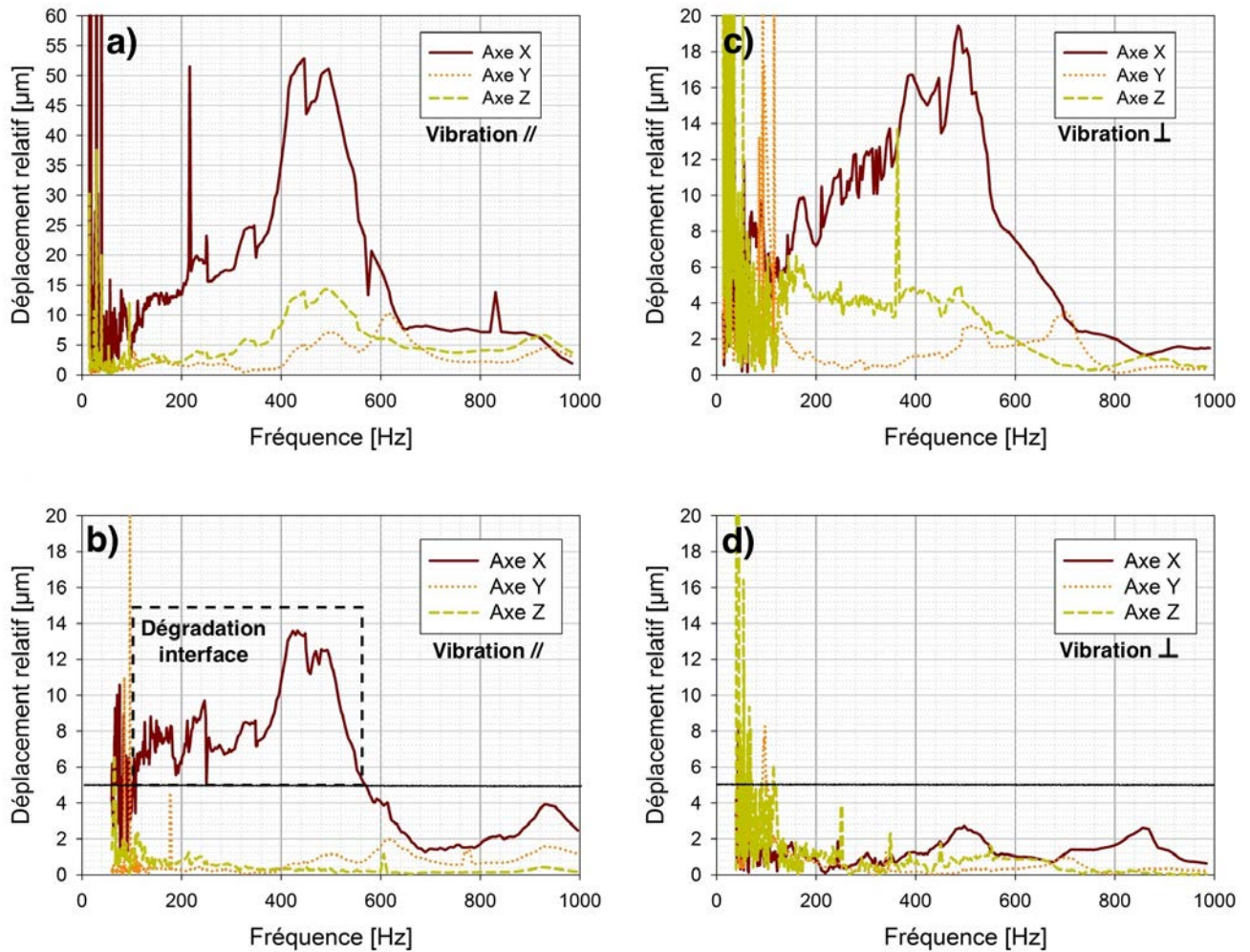


FIGURE 3.3 – Mesure des déplacements relatif entre (a)(c) le porte-languette et le porte-clip puis (b)(d) la languette et le clip suivant que la vibration soit (a)(b) parallèle ou (c)(d) orthogonale à la languette

Cas 1 : vibration parallèle à l'axe de la languette

Les observations concernant les déphasages sont les suivantes, voir figure 3.2 :

- Suivant l'axe X, les déphasages des composants varient légèrement jusqu'à 300 Hz. D'ailleurs, une légère diminution du déphasage des fils et du porte-clip est observable. A partir de 300 Hz, les valeurs des composants du connecteur diminuent fortement :
 - La languette a un déphasage négatif entre 300 et 670 Hz. Le minimum atteint est égale à -29° .
 - Le clip a un déphasage négatif entre 300 et 670 Hz avec un minimum atteint égal à -70° .
 - Le déphasage du porte-clip diminue à partir de 300 Hz pour être en opposition de phase à partir de 600 Hz. D'ailleurs, un second changement de phase est observable vers 900 Hz.
- Suivant l'axe Y, les déphasages fluctuent de manière importante entre 200 et 500 Hz. Le porte-clip illustre notamment deux changements de phase à 230 et 330 Hz. Les déphasages du clip et de la languette ont des allures similaires mais de moindre importance que le porte-clip. Hormis le fil, les déphasages des composants sont globalement similaires en étant proches de zéro à partir de 500 Hz.

- Suivant l'axe Z, les déphasages fluctuent mais restent globalement stables jusqu'à 600 Hz. Au delà, les déphasages du porte-clip et du clip se différencient en devenant négatifs. Le porte-clip est d'ailleurs en opposition de phase vers 1000 Hz, voir figure 3.2 (b).

Le déphasage du porte-clip est plus important que celui du clip, lui-même plus important que celui de la languette. Le déphasage est donc plus important si le composant concerné est éloigné de la source vibratoire. Cette similitude semble provenir du porte-clip dont le comportement vibratoire influence les mouvements internes au connecteur.

Les trois observations principales concernant les déplacements relatifs sont les suivantes, voir figure 3.3 :

1. Les mouvements relatifs entre l'extérieur et l'intérieur sont similaires suivant l'axe X. En effet, une augmentation est visible pour atteindre un maximum à 500 Hz dans chacun des cas. Néanmoins, l'amplitude du mouvement relatif est plus importante à l'extérieur qu'à l'intérieur du connecteur. Par conséquent, la vibration est absorbée.
 - Dans le cadre d'une vibration parallèle à l'axe de la languette, l'amplitude de déplacement relatif entre le clip et la languette est supérieure à $5 \mu m$ entre 10 et 550 Hz. Des dégradations de l'interface sont à prévoir dans ce cas particulier, voir figure 3.3 (b) et (d).
 - Pour les autres cas, les amplitudes des mouvements sont inférieures à $5 \mu m$. Il n'y aura pas de dégradation par fretting-corrosion de l'interface.
2. L'amplitude des déplacements est plus importante suivant l'axe Z que selon l'axe Y entre le porte-clip et le porte-languette, voir figure 3.3 (a) et (c).
 - Suivant l'axe Y, l'amplitude du déplacement relatif diminue entre l'extérieur et l'intérieur. Néanmoins, l'allure des courbes est similaire. Les amplitudes de déplacement sont globalement inférieures à $2 \mu m$.
 - Suivant l'axe Z, le mouvement entre le porte-languette et le porte-clip n'influence pas celui du clip et de la languette, leurs amplitudes de déplacement sont quasi-nulles.
3. Le mouvement entre le clip et la languette est majoritairement dirigé suivant l'axe de la languette, d'autant plus que le clip est en contact avec la languette suivant trois points, voir figure 3.4. Par conséquent, un déplacement relatif suivant l'axe Z est impossible.

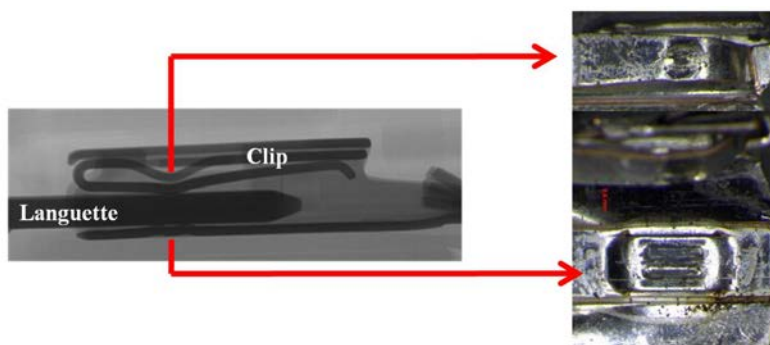


FIGURE 3.4 – Vue en coupe du contact clip-languette avec une photographie des points de contact du clip.

Ces observations permettent de mettre en évidence :

- d'une part que l'amplitude du mouvement suivant l'axe Y est faible mais non-nulle. Par conséquent, le type de mouvement peut être soit dirigé suivant une direction dont les composantes sont suivant les axes X et Y. Le mouvement est donc de type multi-axial.
- d'autre part que les valeurs de déplacement du porte-languette et du porte-clip sont plus importantes selon l'axe Z que selon l'axe Y. Toutefois, ces déplacements ne se répercutent pas sur ceux du clip et de la languette. Par conséquent, les déplacements orthogonaux externes ne correspondent pas au déplacement orthogonaux internes.

Cas 2 : vibration orthogonale à l'axe de la languette

Les observations concernant les déphasages sont les suivantes :

- Suivant l'axe X, les déphasages entre le porte-languette et les autres composants varient de manière importante sur toute la plage fréquentielle, voir figure 3.2 (b). Chacun des composants du connecteur présente des changements de phase d'environ 180° à plusieurs reprises. C'est notamment le cas pour le porte-clip vers 120 Hz, 300 Hz, 550 Hz et 800 Hz et pour le clip et la languette vers 300 Hz, 550 Hz, 800 Hz et 900 Hz.
- Suivant l'axe Y, voir figure 3.2 (d), les valeurs de déphasage entre le porte-languette et les autres composants varient sur l'ensemble de la plage fréquentielle mais de manière moins importante que les déphasages selon l'axe X, voir figure 3.2 (b). En effet, les déphasages du clip et de la languette sont compris entre -45° et $+45^\circ$. Néanmoins, le déphasage du porte-clip atteint un maximum égal à 90° vers 410 Hz.
- Suivant l'axe Z, les déphasages de la languette et du clip sont globalement nuls sur l'ensemble de la plage fréquentielle. Seul le porte-clip a un déphasage négatif entre 400 et 650 Hz puis entre 850 et 1000 Hz, voir figure 3.2 (f). Par conséquent, le comportement vibratoire du connecteur suivant l'axe vibratoire n'indique pas de résonance ou d'absorption.

D'une manière générale, il subsiste deux allures de courbes de déphasage, d'une part le porte-clip et le fil et d'autre part le clip et la languette. Les amplitudes et déphasages de ces deux courbes sont égaux sur l'ensemble de la plage fréquentielle étudiée. En effet, le déphasage du porte-clip atteint deux maximums vers 214 Hz et 410 Hz. Ces fréquences correspondent également à deux maximums entre le clip et la languette. Par conséquent, les mouvements entre d'une part le porte-clip et d'autre part le clip et la languette sont liés.

Les observations des déplacements relatifs sont les suivantes :

1. Les mouvements relatifs entre l'extérieur et l'intérieur sont similaires suivant l'axe X. En effet, une augmentation est visible pour atteindre un maximum à 500 Hz dans chacun des cas. Néanmoins, l'amplitude du mouvement relatif est plus importante à l'extérieur qu'à l'intérieur. Par conséquent, la vibration est absorbée.
 - Dans le cadre d'une vibration parallèle à l'axe de languette, l'amplitude de déplacement relatif entre le clip et la languette est supérieure à $5 \mu\text{m}$ entre 10 et 550 Hz. Des dégradations de l'interface sont à prévoir dans ce cas particulier.
 - Pour les autres cas, les amplitudes des mouvements sont inférieures à $5 \mu\text{m}$. Il n'y aura pas de dégradation par fretting-corrosion de l'interface.
2. Des déplacements orthogonaux entre la languette et le clip sont observables mais leurs amplitudes sont globalement inférieures à $2 \mu\text{m}$.
3. L'amplitude des déplacements est plus importante suivant l'axe Z que selon l'axe Y entre le porte-clip et la languette.
 - Suivant l'axe Y, l'amplitude du déplacement relatif diminue entre l'extérieur et l'intérieur. Néanmoins, l'allure des courbes est similaire.
 - Suivant l'axe Z, le mouvement entre le porte-languette et le porte-clip n'influence pas celui du clip et de la languette. En effet, le clip est en contact avec la languette suivant trois points, voir figure 3.4 de la page 91. Par conséquent, ce mouvement est bloqué.

A l'interface du contact, le mouvement entre le clip et la languette est majoritairement dirigé suivant l'axe de la languette. Néanmoins, l'amplitude du mouvement suivant l'axe Y est faible mais non-nulle. Par conséquent, le type de mouvement peut être soit dirigé suivant une direction dont les composantes sont suivant les axes X et Y soit le mouvement est de type circulaire.

3.1.2 Connecteur PMH-GTS

Les résultats des mesures des déphasages sont indiqués sur la figure 3.5. Les courbes situées sur la gauche correspondent à une vibration parallèle à l'axe de la languette, les courbes situées sur la droite correspondent à une vibration orthogonale à l'axe de la languette.

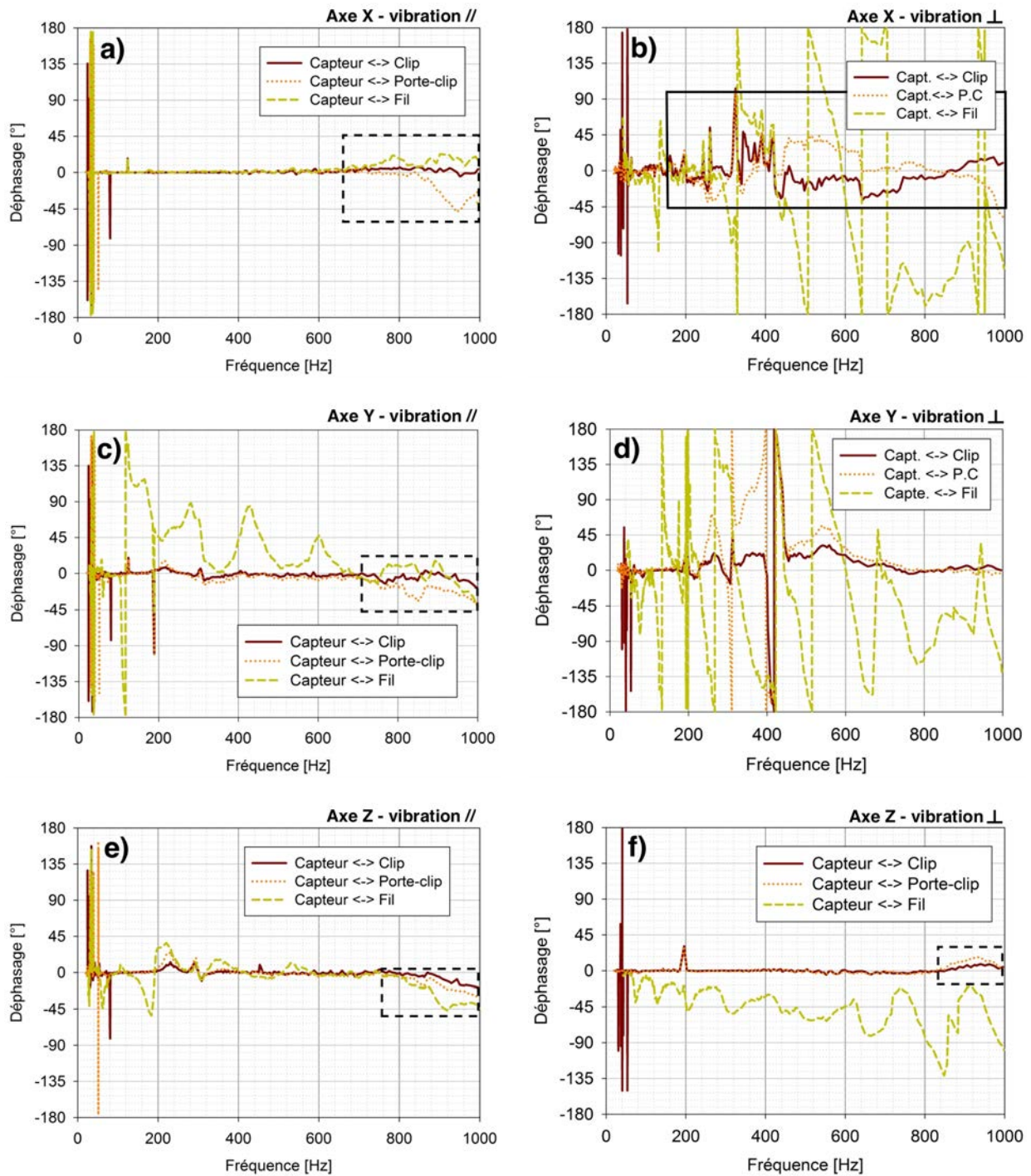


FIGURE 3.5 – Déphasage entre le capteur et les autres composants du connecteur PMH-GTS. Dans le premier cas, les résultats sont suivants (a) l'axe X, (c) l'axe Y et (e) l'axe Z avec une vibration parallèle à la languette. Dans le deuxième cas, les résultats sont suivants (b) l'axe X, (d) l'axe Y et (f) l'axe Z avec une vibration orthogonale à la languette.

La figure 3.6 indique les amplitudes des déplacements relatifs entre d'une part le porte-clip et le capteur et d'autre part la languette et le clip. Les courbes situées sur la gauche correspondent à une vibration parallèle à l'axe de la languette, les courbes situées sur la droite correspondent à une vibration orthogonale à l'axe de la languette.

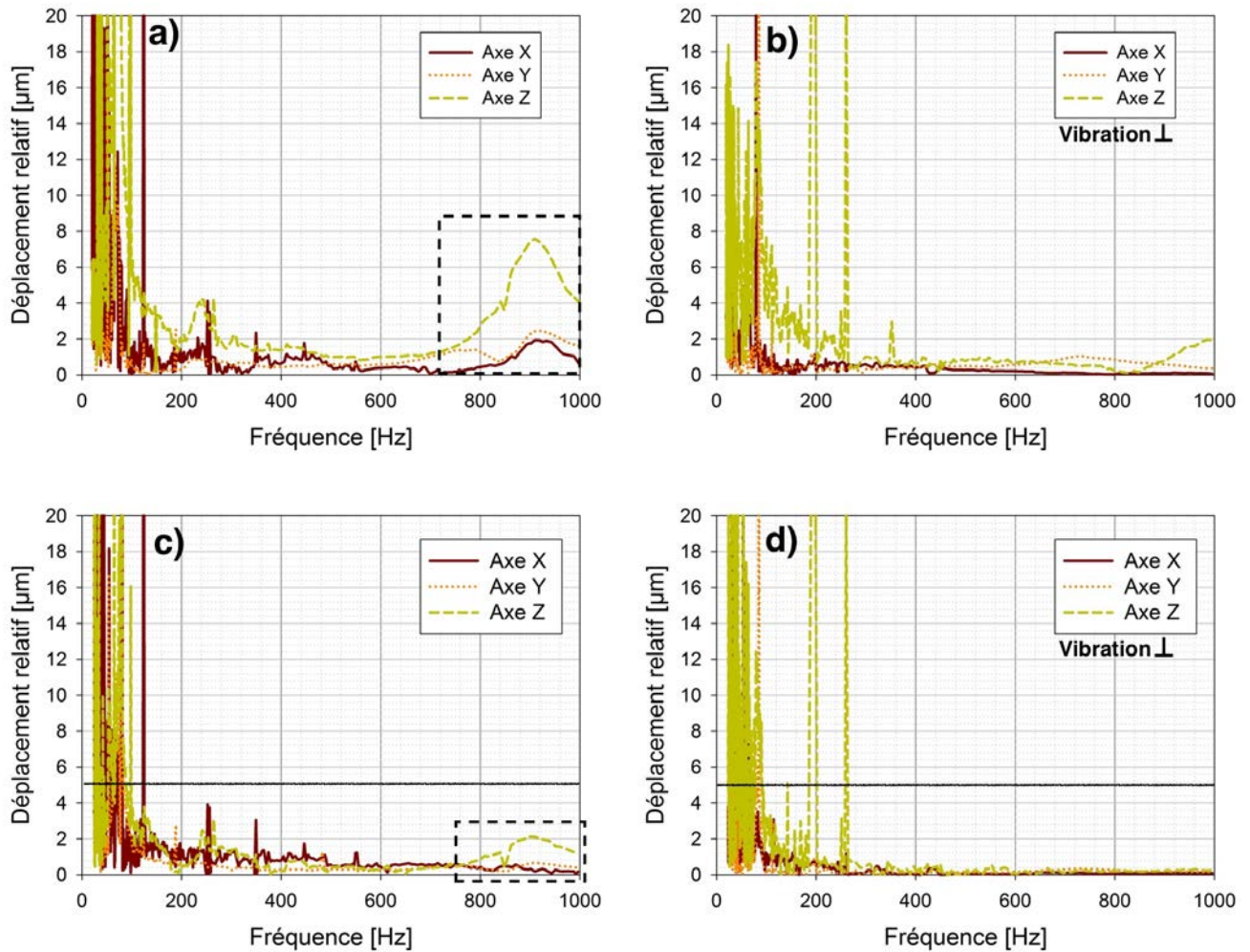


FIGURE 3.6 – Mesure des déplacements relatifs entre (a)(b) le capteur et le porte-clip puis (c)(d) la languette et le clip suivant que la vibration soit (a)(c) parallèle ou (b)(d) orthogonale à la languette.

Cas 1 : vibration parallèle à l'axe de la languette

Les observations sont les suivantes :

- Suivant l'axe X, les déphasages entre le capteur et les autres composants sont proches de zéro jusqu'à 700 Hz. Au delà, seul le déphasage du porte-clip varie en diminuant. Le minimum atteint est égale à -45° à 950 Hz, voir figure 3.5 (a).
- Suivant les axes Y et Z, les comportements vibratoires du clip et du porte-clip sont similaires, voir les figures 3.5 (c) et (e). En effet, leurs déphasages sont égaux avec des valeurs proches de zéro jusqu'à 800 Hz. Pour des fréquences supérieures, leurs déphasages diminuent pour atteindre des minimums égaux à -45° . Le comportement vibratoire du connecteur PMH-GTS est plus stable dans les basses fréquences que dans les hautes fréquences.

Les amplitudes de déplacement et les déphasages du fil fluctuent de manière plus importante selon l'axe Y que selon l'axe Z. Par conséquent, son mouvement possède un axe privilégié. Cette caractéristique peut influencer le mouvement du clip par lequel il est relié.

Cas 2 : vibration orthogonale à l'axe de la languette

Les observations sont les suivantes :

- Suivant l'axe X, les déphasages du clip et du porte-clip varient à partir de 300 Hz avec des valeurs comprises entre -45° et $+100^\circ$, voir figure 3.5 (b). Par contre, le déphasage du fil par rapport au capteur indique plusieurs changements de phases à partir de 300 Hz. Ce comportement vibratoire est dû à sa liberté de mouvement.
- Suivant l'axe Y, les déphasages du clip et du porte-clip augmentent entre 250 et 600 Hz, voir figure 3.5 (d). D'ailleurs, ces composants sont en opposition de phase vers 400 Hz.
- Suivant l'axe Z, les mouvements de tous les composants sont égaux au mouvement imposé par le profil vibratoire. Les déphasages des composants sont respectivement égaux et proches de zéro, voir les figures 3.5 (a) et (b). Néanmoins, une légère augmentation du déphasage est observable vers 900 Hz.

Tout comme le connecteur RH-PCPL, le clip du connecteur PMH-GTS possède trois points de contact, voir figure 3.7. Cela empêchera tout mouvement suivant cet axe.

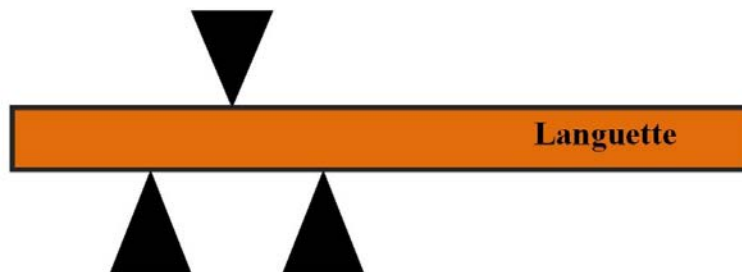


FIGURE 3.7 – Schéma de la connectique métallique du connecteur PMH-GTS

Le comportement vibratoire du connecteur RH-PCPL est stable sur l'ensemble de la plage fréquentielle. En effet, l'amplitude maximale entre la languette et le clip est suivant l'axe Z lorsque la vibration est parallèle à la languette pour atteindre la valeur de $2 \mu m$.

Seul le porte-clip indique un déplacement relatif avec le capteur dans les hautes fréquences. Suivant que la vibration soit orthogonale ou parallèle à l'axe de la languette, ce déplacement relatif est suivant l'axe Z. Néanmoins, ce mouvement est bloqué au point de contact entre le clip et la languette. En effet, leurs amplitudes de mouvement relatif sont nulles suivant l'axe Z et sur l'ensemble de la plage fréquentielle étudiée.

3.1.3 Conclusion sur l'analyse des déphasages et des déplacements relatifs des connecteurs RH-PCPL et PMH-GTS

Les déphasages sont nombreux et influencent les déplacements relatifs. Leur prise en compte est importante et nécessite un travail d'analyse plus approfondi que l'analyse des amplitudes.

- Le connecteur RH-PCPL a un comportement vibratoire moins stable que le connecteur PMH-GTS. En effet, le connecteur RH-PCPL présente de nombreuses oppositions de phase du porte-clip par rapport au porte-languette. Ce phénomène a une plus grande importance lorsque la vibration est parallèle à l'axe de la languette.

- Le connecteur PMH-GTS n'indique qu'un seul cas d'opposition de phase. Il s'agit du cas où la vibration est orthogonale à l'axe de la languette et uniquement suivant l'axe Y. Par conséquent, il se peut que ce soit l'axe par lequel les fluctuations des mouvements interviennent.

Le mouvement relatif entre le porte-languette et le porte-clip est similaire à celui entre la languette et le clip. Cette caractéristique est intéressante car il suffirait juste de mesurer les caractéristique du mouvement à l'extérieur (amplitude-phase) pour en déduire celui de l'intérieur. Le tableau 3.1 ci-dessous résume l'ensemble des observations.

TABLE 3.1 – Résumé de l'analyse des déplacement relatifs entre le porte-languette et le porte-clip au sein des connecteurs RH-PCPL et PMH-GTS soumis à une vibration parallèle ou orthogonale à la languette.

Vibration parallèle		
	Connecteur RH-PCPL	Connecteur PMH-GTS
Extérieur	Déplacement relatif important Max (axe X) : 50 μm - 200/600 Hz)	Déplacement relatif faible (max (axe Z) : 20 μm - 10/600 Hz)
Intérieur	Dégr. élec. possible entre 10 et 600 Hz Mouvement préférentiel : parallèle	Aucune dégradation de l'interface
Vibration orthogonale		
	Connecteur RH-PCPL	Connecteur PMH-GTS
Extérieur	Déplacement relatif moyen max.(axe X) : 20 μm 200/600 Hz	Aucun déplacement relatif
Intérieur	Aucune prévision d'une dégradation de l'interface	

3.2 Analyse des fonctions de transfert

L'objectif de cette analyse est de caractériser le comportement vibratoire des connecteur d'une manière plus générale. Pour cela, les fonctions de transfert sont utilisées. Cette opération mathématique correspond au rapport d'amplitude entre la sortie et l'entrée. Par exemple, il s'agit du rapport d'amplitude de mouvement entre la porte-clip et le porte-languette, voir l'équation 3.1. Par conséquent, ce premier type de fonctions de transfert en amplitude indique un lien de proportionnalité entre l'amplitude de sortie et l'amplitude d'entrée à une fréquence donnée et selon un axe de vibration.

Chacune des mesures d'amplitude de mouvement correspond à une fréquence donnée. Par conséquent, les mesures d'amplitudes de mouvement pour un composant sont réalisées sur une plage de données en fréquence. Toutefois, chacune de ces plages de données en fréquence des composants ne sont pas identiques. Or, il est nécessaire qu'elles soient identiques pour calculer les fonctions de transfert. C'est pourquoi un fitting est réalisé sur chaque donnée et pour chacune des valeurs en amplitude et fréquence afin d'obtenir une plage de données correspondant à la même plage fréquentielle pour chaque composant.

$$H(f) = \frac{A_{sortie}}{A_{entree}} \quad (3.1)$$

Il est également possible d'analyser l'influence de la vibration suivant son axe sur ses axes orthogonaux. Ce second type de fonctions de transfert correspond au rapport d'amplitude entre la sortie suivant un axe orthogonal et l'entrée suivant l'axe parallèle à l'axe vibratoire, voir l'équation 3.2.

$$H'(f) = \frac{A_{\text{sortie,orthogonal}}}{A_{\text{entree,parallele}}} \quad (3.2)$$

Dans un premier temps, les fonctions de transfert suivant un axe seront analysées suivant les axes X, Y et Z en fonction de la position du connecteur. L'objectif est de caractériser le comportement vibratoire du connecteur d'une manière globale i.e. sans prendre en compte le profil vibratoire.

Dans un second temps, les fonctions de transfert liées au comportement vibratoire orthogonal seront analysées. Elle mettront notamment en avant le comportement vibratoire multi-axial des connecteurs.

3.2.1 Connecteur RH-PCPL

Les fonctions de transfert entre le porte-languette (vibration d'entrée) et la languette, le clip, le porte-clip et le fil (vibrations de sortie) sont regroupées sur la figure 3.8 de la page 98.

Cas 1 : vibration parallèle à l'axe de la languette

Les observations suivantes concernent les fonctions de transfert suivant un axe et dans le cas d'une vibration parallèle à l'axe de la languette, voir figure 3.8 de la page 98.

1. Suivant l'axe X,
 - les amplitudes du porte-clip et du fil sont bien plus importantes que le clip et la languette entre 200 et 640 Hz et entre 720 et 1000 Hz. Les amplitudes de mouvement du porte-clip et du clip sont d'ailleurs 5 et 2 fois plus importantes que le porte-languette à 500 et 900 Hz.
 - La fonction de transfert du clip a une allure similaire mais de moindre importance. Elle atteint cependant le même maximum que le porte clip à 912 Hz, voir figure 3.8 (a).
 - Entre 500 et 1000 Hz, l'amplitude de la fonction de transfert de la languette est inférieure à 1 suivant l'axe X. Par conséquent, ce comportement vibratoire indique une absorption de la vibration.
2. Suivant l'axe Y, la languette est globalement solidaire au porte-languette car l'amplitude la fonction de transfert reste égale à 1, voir figure 3.8 (c). A l'inverse, les courbes du porte-clip et de le clip indiquent des amplitudes plus importantes à partir de 400 Hz. l'allure de leurs courbes sont d'ailleurs similaires. Des fluctuations sont également visibles entre 250 et 350 Hz.
3. Suivant l'axe Z, le clip et la languette sont solidaires du porte-languette. En effet, l'amplitude de leur fonction de transfert est globalement égale à 1 sur l'ensemble de la plage fréquentielle, voir figure 3.8 (e). A l'inverse, l'amplitude de mouvement du porte-clip est 5 fois supérieure à celle du porte-languette à partir de 300 Hz.

Cas 2 : vibration orthogonale à l'axe de la languette

Les observations suivantes concernent les fonctions de transfert suivant un axe et dans le cas d'une vibration orthogonale à l'axe de la languette.

1. Suivant l'axe X, les amplitudes des fonctions de transfert du fil et du porte-clip sont plus importantes que celle du clip et de la languette entre 300 et 1000 Hz, voir figure 3.8 (b). Des maximums sont observables à 320, 420, 550 et 811 Hz.
2. Suivant l'axe Y, des maximums sont observables au alentour de 520 Hz, 845 Hz et 964 Hz où les amplitudes de la fonction de transfert du porte-clip sont égales à 9, 16 et 18, voir figure 3.8 (d).
3. Suivant l'axe Z et contrairement aux autres axes, un phénomène d'absorption du porte-clip est notable entre 500 et 750 Hz. En effet, l'amplitude baisse pour être inférieur à 1. A l'inverse, les amplitudes des fonctions de transfert du clip et de la languette sont stables. Leurs valeurs sont globalement égales à 1.

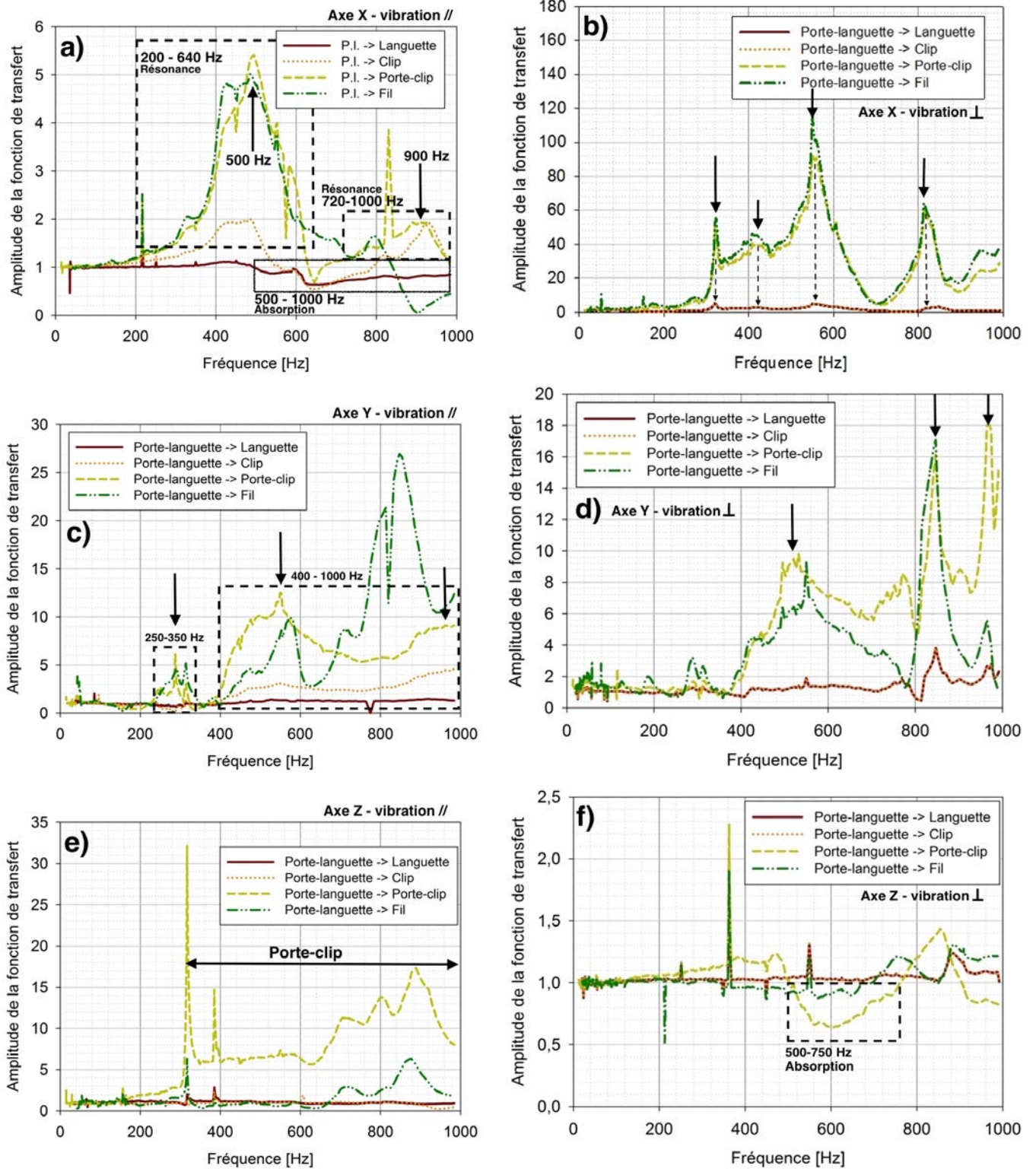


FIGURE 3.8 – Fonctions de transfert en amplitude de la languette, du clip, du porte-clip et du fil par rapport au porte-languette RH. Dans le premier cas, les résultats sont suivant (a) l'axe X, (b) l'axe Y et (c) l'axe Z avec une vibration parallèle à l'axe de la languette. Dans le deuxième cas, les résultats sont suivant (b) l'axe X, (d) l'axe Y et (f) l'axe Z avec une vibration orthogonale à l'axe de la languette.

Le connecteur RH-PCPL indique de nombreuses variations de l'amplitude de la fonction de transfert sur l'ensemble de la plage fréquentielle étudiée et ce quelque soit l'axe et la position du connecteur. De nombreux pics sont présents, ils mettent en évidence des phénomènes de résonance. Les variations de forte amplitude concernent principalement le porte-clip et le fil. En effet, les amplitudes du clip et de la languette sont de moindre importance. Toutefois l'allure des courbes du porte-clip est similaire à celle du clip. Par conséquent le comportement vibratoire du porte-clip influence celui du clip.

Influence de la vibration sur les axes orthogonaux

L'analyse des fonctions de transfert entre les mouvement orthogonaux et les mouvement longitudinaux à l'axe de vibration met en évidence les observations suivantes, voir figure 3.9.

- Lorsque la vibration est parallèle à l'axe de vibration (influence de X sur Y et Z), des pics apparaissent à 490 Hz, 606 Hz et 916 Hz, voir les figures 3.9 (a) et (c). Le porte clip a d'ailleurs une amplitude de mouvement plus importante sur l'amplitude du porte-languette à partir de 500 Hz. L'allure de la courbe du clip est similaire mais d'amplitude moins importante avec des maximums situés aux mêmes fréquences.
- Lorsque la vibration est orthogonale (influence de Z sur X et Y) et selon l'axe X, les amplitudes associées au porte-clip et au fil augmentent entre 200 et 1000 Hz. Elles sont d'ailleurs supérieures à 1 entre 430 et 705 Hz. Trois maximums sont mis en évidence à 500, 700 et 900 Hz. Selon l'axe Y, la valeur maximale de la fonction de transfert atteint 1,2 à 700 Hz. De plus, la plage fréquentielle (où l'amplitude associée au porte-clip est non nulle) est comprise entre 400 et 1000 Hz.

L'axe X est donc plus influencé par la source vibratoire que l'axe Y car ses amplitudes sont plus importantes et la plage fréquentielle plus grande. Néanmoins, la vibration influence les deux axes à la même fréquence. En effet, les courbes associées au clip et à la languette possèdent un pic à 700 Hz dans les deux cas. Le clip et la languette sont cependant peu influencés par la vibration suivant l'axe Z. En effet, leurs valeurs restent inférieures à 0,2.

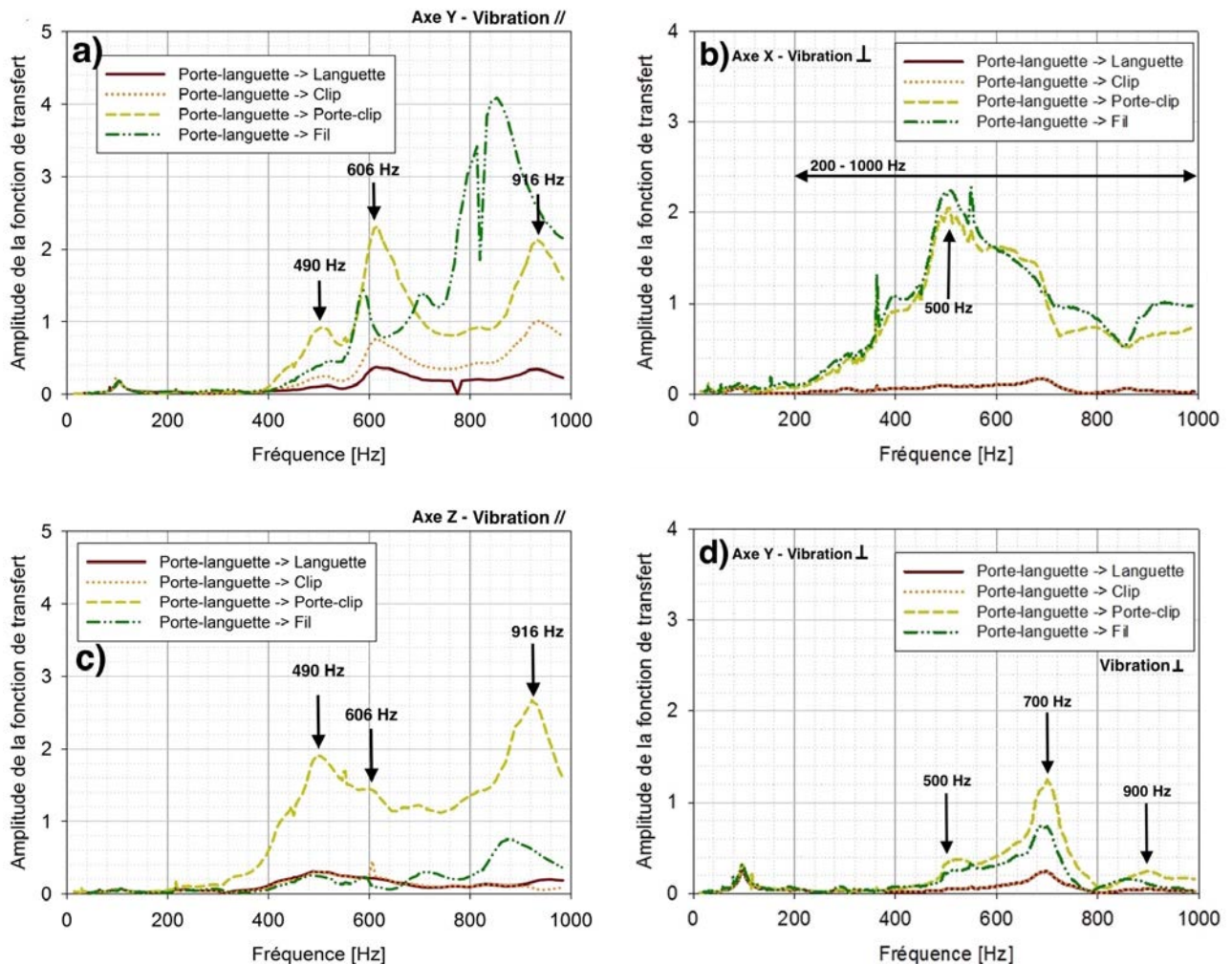


FIGURE 3.9 – Fonctions de transfert des mouvements orthogonaux à l'axe de vibration : H' . Dans le premier cas, il s'agit des déplacements suivant les axes (a) Y et (c) Z sur celui selon l'axe X. Dans le deuxième cas, il s'agit des déplacements suivant les axes (b) X et (d) Y sur celui selon l'axe Z.

3.2.2 Connecteur PMH-GTS

Les fonctions de transfert entre d'une part le capteur (vibration d'entrée) et d'autre part le clip, le porte-clip ou le fil (vibration de sortie) sont regroupées sur la figure 3.10.

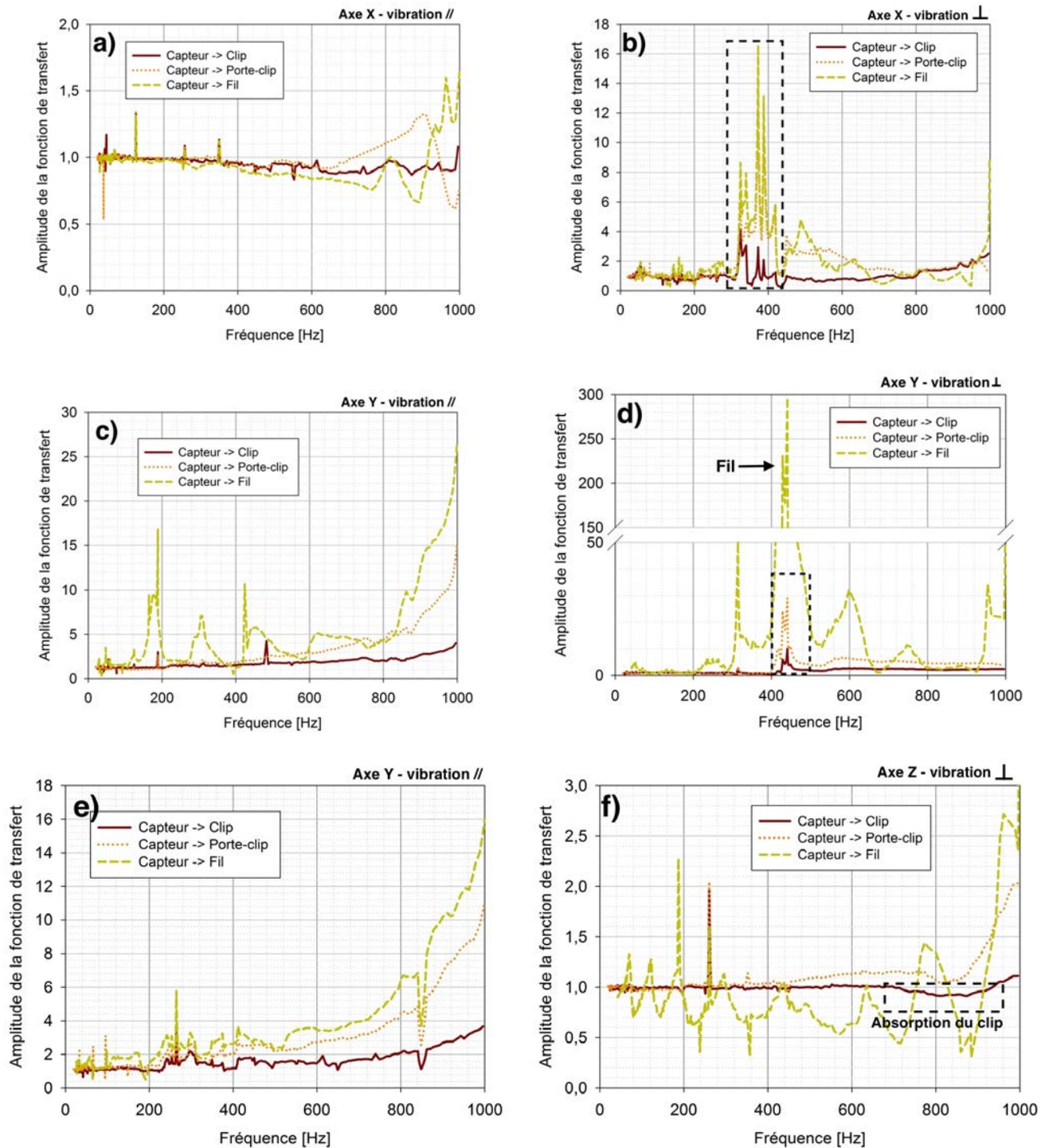


FIGURE 3.10 – Fonctions de transfert en amplitude de la languette, du clip, du porte-clip et du fil par rapport au capteur PMH. Dans le premier cas, les résultats sont suivant (a) l'axe X, (c) l'axe Y et (e) l'axe Z avec une vibration parallèle à l'axe de la languette. Dans le deuxième cas, les résultats sont suivant (b) l'axe X, (d) l'axe Y et (f) l'axe Z avec une vibration orthogonale à l'axe de la languette.

Les observations suivantes concernent les fonctions de transfert suivant un axe du connecteur PMH-GTS, voir figure 3.10 de la page 100.

Cas 1 : vibration parallèle à l'axe de la languette

1. Suivant l'axe X, l'amplitude du clip diminue dès 300 Hz. Elle se stabilise à partir de 600 Hz pour une valeur égale à 0,9. Le comportement du porte-clip est similaire jusqu'à 600 Hz. Au delà, l'amplitude de sa fonction de transfert augmente pour atteindre la valeur de 1,3 à 1000 Hz, voir figure 3.10 (a).
2. Suivant les axes Y et Z, les amplitudes du clip et du porte-clip augmentent à partir de 300 Hz. Leurs comportements vibratoires sont similaires, voir les figures 3.10 (c) et 3.10 (e).

Cas 2 : vibration orthogonale à l'axe de la languette

1. Suivant l'axe X, les fonctions de transfert indiquent de fortes fluctuations entre 300 et 440 Hz suivant l'axe X, voir les figures 3.10 (b) et (d). En effet, les amplitudes du fil et du porte-clip sont de l'ordre de 16 et de 2 pour le clip. A partir de 400 Hz, leurs amplitudes se stabilisent. Néanmoins, l'amplitude de la fonction de transfert du clip augmente à partir de 800 Hz.
2. Suivant l'axe Y, le porte-clip et le clip indiquent également des fluctuations entre 400 et 500 Hz suivant l'axe Y, voir figure 3.10 (d). Le fil atteint des amplitudes importantes car sa valeur atteint 300. Ce comportement vibratoire est lié à sa liberté de mouvement.
3. Suivant l'axe Z, sur la figure 3.10 (f), l'amplitude du clip est inférieure à 1 entre 700 et 950 Hz lié à une absorption. Le porte-clip indique une allure similaire mais avec une forte augmentation vers 1000 Hz.

Influence de la vibration parallèle sur les axes orthogonaux

L'analyse des fonctions de transfert entre les mouvement orthogonaux et les mouvement longitudinaux à l'axe de vibration mettent en évidence les observations suivantes, voir figure 3.11 de la page 102.

1. L'influence de la source vibratoire sur les axes Y et Z est croissante à partir de 500 Hz jusqu'à atteindre un maximum à 950 Hz, voir figure 3.11. L'influence de la vibration est donc plus importante dans les hautes fréquences. L'influence de la vibration est plus importante suivant l'axe Z que suivant l'axe Y car le maximum d'amplitude du clip est égale à 3 suivant l'axe Z et égale à 1 suivant l'axe Y.
2. L'influence de la vibration est plus faible selon X que selon l'axe Y. Néanmoins, l'amplitude maximale du porte-clip est égale à celle du clip suivant l'axe X. Ce n'est pas le cas suivant l'axe Y. Néanmoins, leurs allures sont similaires avec une augmentation à partir de 400 Hz jusqu'à atteindre un maximum à 900 Hz selon l'axe X et un maximum à 750 Hz selon l'axe Y.

Conclusion sur l'analyse des fonctions de transfert du connecteur PMH-GTS

Le comportement vibratoire du connecteur PMH-GTS indique une augmentation de l'amplitude des composants du connecteur dans les hautes fréquences lorsque la vibration est parallèle et orthogonale à l'axe de la languette. Toutefois, cette augmentation est de moindre importance lorsque la vibration est orthogonale.

Une vibration orthogonale entraîne d'une part des perturbations entre 300 et 400 Hz suivant notamment l'axe X et d'autre part une absorption des vibrations du clip suivant l'axe Z dans les hautes fréquences. Par conséquent, ces comportements vibratoires peuvent entraîner des dégradations de l'interface en fonction de l'amplitude d'entrée.

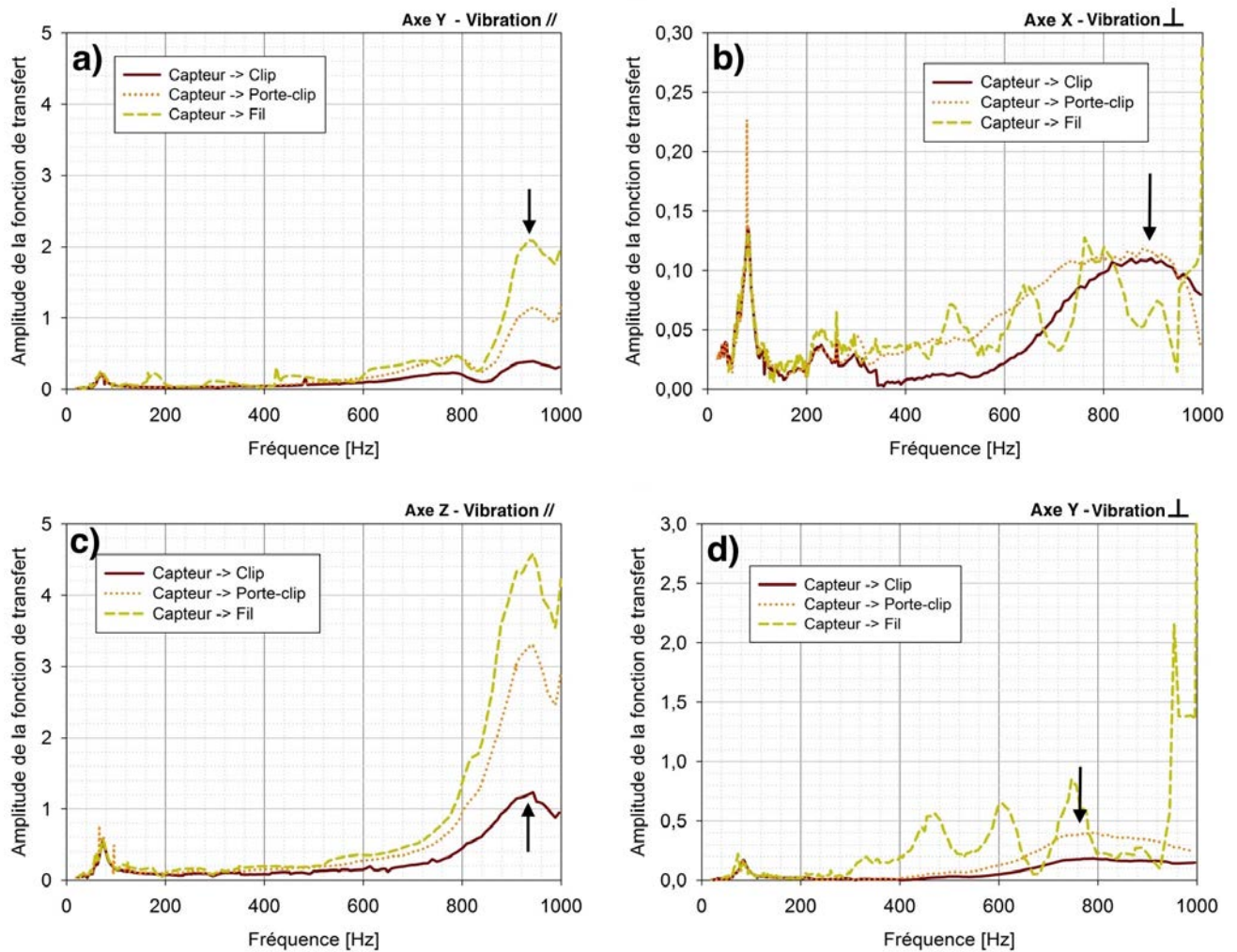


FIGURE 3.11 – Fonctions de transfert des mouvement orthogonaux à l’axe de vibration : H' . Dans le premier cas, il s’agit des déplacements suivant les axes (a) Y et (c) Z sur celui selon l’axe X. Dans le deuxième cas, il s’agit des déplacements suivant les axes (b) X et (d) Y sur celui selon l’axe Z.

3.2.3 Conclusion sur l’analyse des fonctions de transfert des connecteurs

Les fonctions de transfert ont mis en évidence des phénomènes de résonance et d’absorption pour les deux connecteurs étudiés :

Dans le cas du connecteur RH-PCPL, il existe de nombreux points de résonance situés majoritairement dans les hautes fréquences i.e. à partir de 500 Hz. De plus, les amplitudes de mouvement les plus importantes sont situées selon les axes X et Y quelle que soit la position de l’échantillon. Par conséquent, le comportement vibratoire de ce connecteur possède des axes privilégiés.

L’analyse des amplitudes absolues de mouvement laisse supposer des mouvement de rotation et de bascule entre d’une part le porte-clip et le porte languette et d’autre part entre le clip et la languette. Le comportement vibratoire du connecteur RH-PCPL est donc complexe.

L’influence de l’axe vibratoire induit également des résonances à des fréquences différentes. Ces dernières se répercutent sur les deux axes orthogonaux. En effet, une augmentation de l’amplitude de l’ensemble clip-languette est visible pour le connecteur RH-PCPL en position orthogonale à l’axe de vibration à 700 Hz. Par conséquent, ce type d’analyse permet d’obtenir des informations qui auraient pu ne pas être détectées par une courbe de fonction de transfert classique. En effet, ce pic n’a pas été détecté sur le porte-clip mais seulement sur le clip, voir figure 3.9.

L'ensemble des amplitudes décroît entre 500 Hz et 700 Hz. Cette réaction vibratoire affecte l'ensemble du connecteur. Le fil a une comportement vibratoire différent du porte-clip mais il n'influence pas celui du clip. Les amplitudes de vibration sont plus importantes si la vibration est parallèle à l'axe de la languette.

La relation entre les mesures de déplacement et les fonctions de transfert est plus évidente suivant les axes orthogonaux à la vibration. Cela est du aux faibles valeurs des amplitudes de déplacement. Cette relation est moins évidente sous l'application du profil vibratoire car l'échelle des amplitudes est plus importante.

TABLE 3.2 – Résumé de l'analyse des déplacements relatifs au sein des connecteurs RH-PCPL et PMH-GTS soumis à une vibration parallèle ou orthogonale à la languette.

Vibration parallèle	
Connecteur RH-PCPL	Connecteur PMH-GTS
Influence du porte-clip sur le clip suivant les axes X et Y (résonances vers 500 Hz et les hautes fréquences)	Influence du porte-clip sur le clip dans les hautes fréquences suivant les trois axes.
Aucune influence du porte-clip sur le clip suivant l'axe Z	
Influence importante de la vibration parallèle sur les axes orthogonaux	Faible influence de la vibration parallèle sur les axes orthogonaux dans les hautes fréquences
Vibration orthogonale	
Connecteur RH-PCPL	Connecteur PMH-GTS
Influence du porte-clip sur le clip suivant les axes X et Y (nombreux pics de résonance entre 300 et 1000 Hz)	Influence du porte-clip sur le clip dans les hautes fréquences suivant les trois axes
Aucune influence du porte-clip sur le clip suivant l'axe Z Influence importante de la vibration parallèle sur les axes orthogonaux Influence de la vibration parallèle sur les axes orthogonaux dans les hautes fréquences avec un phénomène d'absorption	

3.3 Mise en place d'un modèle numérique

Suite à l'analyse des fonctions de transfert, des phénomènes de résonance et d'absorption ont été mises en évidence concernant le connecteur RH-PCPL. Le comportement vibratoire du connecteur PMH-GTS indique également un pic de résonance. Toutefois, la fréquence de résonance de ce pic est supérieure à 1000 Hz. En effet, seule l'augmentation de l'amplitude de sa fonction de transfert est visible. Par conséquent, il ne sera pas possible de l'étudier. La mise en place du modèle concernera donc seulement le connecteur RH-PCPL.

Le comportement vibratoire du connecteur RH-PCPL indique que les mouvements multi-axiaux du clip sont liés à celui du porte-clip. Par conséquent, seul le porte-clip sera analysé. L'objectif de cette modélisation sera donc de caractériser l'extérieur du connecteur.

Dans un premier temps, les détails du modèle seront explicités avec d'une part les équations de mouvements et d'autre part les hypothèses. Dans un second temps, la méthodologie de la mise en place de ce modèle sera expliquée. Dans un dernier temps, les résultats du connecteur RH-PCPL seront analysés.

3.3.1 Mise en place d'un modèle de type masse-ressort-amortisseur

Les connecteurs sont des systèmes linéaires avec des déplacements continus en petites perturbations. Il est donc possible de les caractériser suivant un modèle de type masse-ressort-amortisseur, voir figure 3.12. Certaines études utilisent des modélisations sur le comportement dynamique des connectives mais très peu sur le comportement des connecteurs [61] [60].

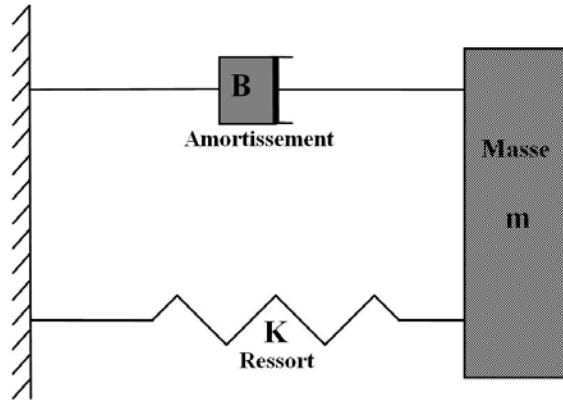


FIGURE 3.12 – Schéma du mécanisme ressort-amortisseur avec le coefficient d'amortissement B et la constante de raideur K .

Les paramètres de ce modèle sont la masse m du système étudié, le coefficient de raideur K et le coefficient d'amortissement B . Ils sont identifiables dans l'équation de mouvement 3.3 pour un système soumis à des oscillations forcées où $u(t)$ représente la fonction déplacement en fonction du temps et de la masse.

En posant :

$$m\ddot{u}(t) + B\dot{u}(t) + Ku(t) = f(t) \quad (3.3)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (3.4)$$

$$\nu = \frac{B}{2m} \quad (3.5)$$

L'équation 3.3 devient :

$$\ddot{u}(t) + \frac{B}{m}\dot{u}(t) + \frac{K}{m}u(t) = \frac{f(t)}{m} \quad (3.6)$$

$$\ddot{u}(t) + 2\nu\dot{u}(t) + \omega_0^2u(t) = \frac{f(t)}{m} \quad (3.7)$$

L'équation 3.8 représente la relation entre le déplacement du système étudié \bar{u} et le déplacement imposé par la source vibratoire $\frac{\bar{f}(\omega)}{K}$ par le biais d'une fonction de transfert $H(\omega)$. En effet, cette dernière relation correspond au rapport de la force statique sur la raideur du ressort $\frac{f_0}{K}$ qui représente l'élongation du ressort.

$$\bar{u}(\omega) = H(\omega) \frac{\bar{f}(\omega)}{K} \quad (3.8)$$

Les équations 3.7 et 3.8 sont combinées pour obtenir les relations suivantes :

$$H(\omega) = \omega_0^2 \times \frac{(\omega_0^2 - \omega^2) - i2\nu\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\nu\omega)^2} \quad (3.9)$$

$$|H(\omega)| = H(\omega) \times H^*(\omega) \quad (3.10)$$

$$|H(\omega)| = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\nu\omega)^2}} \quad (3.11)$$

Il s'agit d'une première approche sur la modélisation du comportement vibratoire d'un connecteur soumis à des sollicitations périodique. Par conséquent, les hypothèses formulées ne permettent pas de prendre en compte tous les paramètres. Par exemple, les déphasages ne sont pas pris en compte dans la mise en place de ce modèle. Les résultats sont donc à mettre en lien seulement avec ce modèle.

Le module de la fonction de transfert de l'équation 3.11 présente un pic de résonance pour une valeur précise de K et B. Or, le connecteur RH-PCPL présente ce phénomène à de nombreuses reprises pour des vibrations comprises entre 10 et 1000 Hz. De plus, un pic de résonance est généralement suivi d'une absorption des vibrations. Dans l'approche d'un premier modèle, les hypothèses suivantes sont réalisées :

- L'effet d'une résonance diminue au carré de la fréquence, voir la relation 3.11. Par conséquent, les degrés de liberté sont supposés indépendants.
- Il est nécessaire de construire un modèle qui englobe chacune des résonances. Pour cela, nous utiliserons une modélisation qui reprend toutes les résonances en réalisant une moyenne, voir la relation 3.12.
- Les déphasages ne sont pas pris en compte. Il s'agit seulement de fonctions de transfert en amplitude.

$$|H_{moyenne}(\omega)| = \frac{\sum_n |H(\omega)_n|}{n} \quad (3.12)$$

La mise en place du modèle masse-ressort-amortissement du connecteur RH-PCPL est réalisée en indiquant d'une part la masse du système étudié (7g pour le porte-clip) et d'autre part en ajustant les paramètres K et B afin que le modèle numérique correspondent aux résultats expérimentaux. L'objectif est d'établir les caractéristiques spécifiques du connecteur RH-PCPL.

3.3.2 Connecteur RH-PCPL - Vibration parallèle à l'axe de la languette

La figure 3.13 de la page 106 reprend les fonctions de transfert suivant les axes X, Y et Z ainsi que les différents pics de résonance caractéristiques du connecteur. Les caractéristiques de chacun de ces pics de résonance et d'absorption sont indiquées dans le tableau 3.3.

TABLE 3.3 – Ensemble des coefficients caractérisant les pics de résonance issus des fonctions de transfert suivant les trois axes. f_0 [Hz], K [N.m⁻¹] et B [kg.s⁻¹] représentent respectivement la fréquence de résonance, la constante de raideur et le facteur d'amortissement.

Pic	axe X			axe Y			axe Z		
	f_0	K	B	f_0	K	B	f_0	K	B
1	inexistant			287	22762	1,4	316	27945	0,22
2	495	67712	2,28	550	83595	0,68	inexistant		
3	930	239014	12,2	900	223842	1,62	890	218895	1,13

Les observations indiquent la présence de trois cas de résonances décrits ci-dessous :

- Un premier pic de résonance est modélisé vers 300 Hz. Il ne concerne que les vibrations orthogonales.
- La seconde résonance concerne seulement l'axe X et Y. En effet, cette résonance est inexistante selon l'axe Z.
- La troisième résonance concerne l'ensemble des trois axes de vibration.

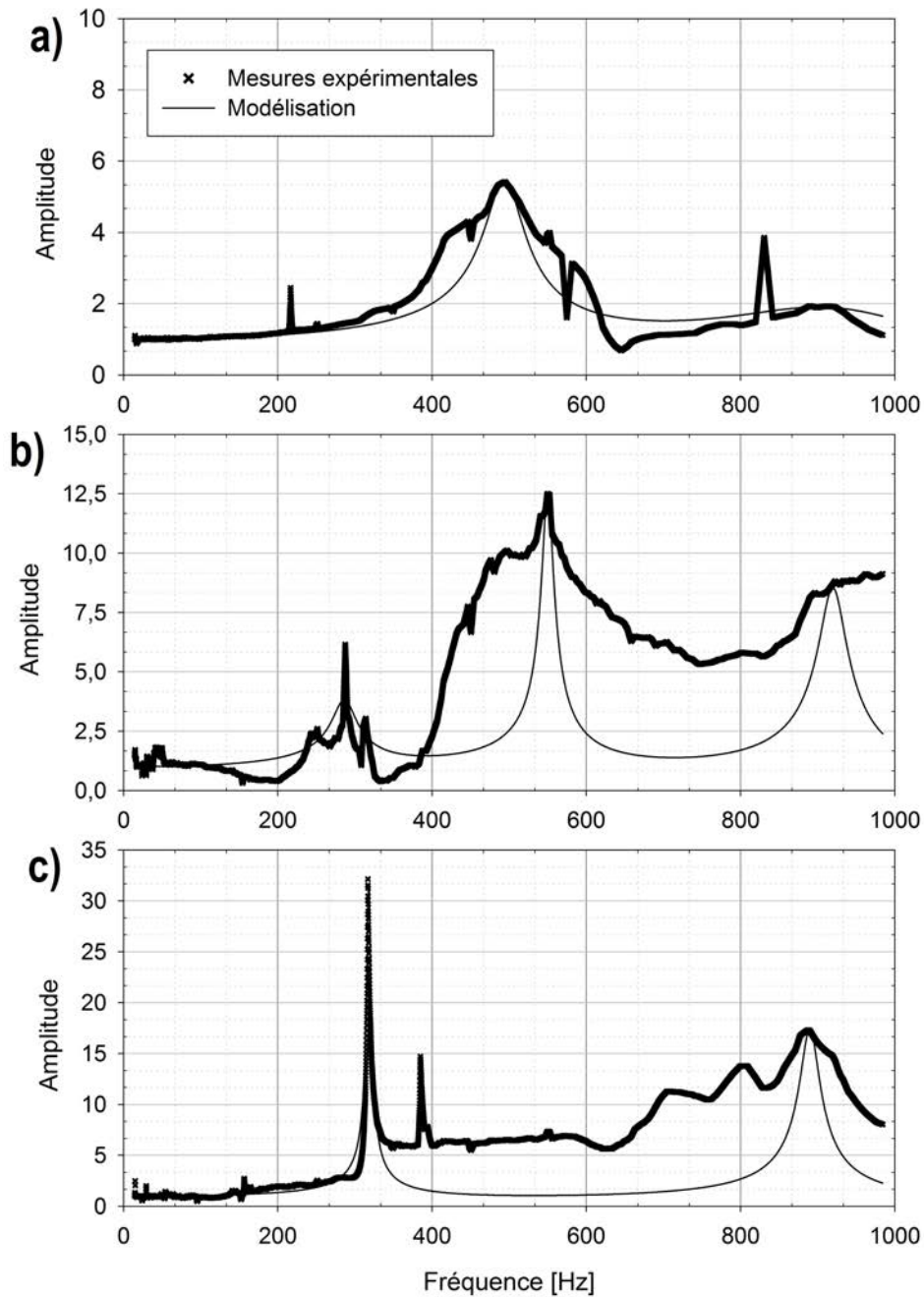


FIGURE 3.13 – Simulations numériques des pics caractéristiques des fonctions de transferts suivant les axes (a) X, (b) Y et (c) Z. Pour cela, l'équation 3.12 est utilisée.

En résumé, le connecteur RH-PCPL présente trois cas de résonance. Pour chaque cas, des axes sont privilégiés. Par exemple, la résonance vers 500 Hz n'influence pas les vibrations selon l'axe Z. Cela indique d'une part que la géométrie du connecteur ne permet pas de mouvement selon l'axe Z et d'autre part que le mouvement est par conséquent multi-axial selon les axes X et Y.

Les constantes d'absorption sont plus importantes selon l'axe de vibration X que selon les autres axes de vibration vers 500 et 900 Hz. Par conséquent, le porte-clip atténue mieux les vibrations selon cet axe.

3.3.3 Connecteur RH-PCPL - Vibration orthogonale à l'axe de la languette

La figure 3.14 de la page 107 représente d'une part les courbes des fonctions de transfert suivant les axes X, Y et Z et d'autre part les courbes théoriques avec les différents pics de résonance correspondant au modèle numérique. L'ensemble des valeurs des coefficients B et K est indiqué dans le tableau 3.4 ci-dessous :

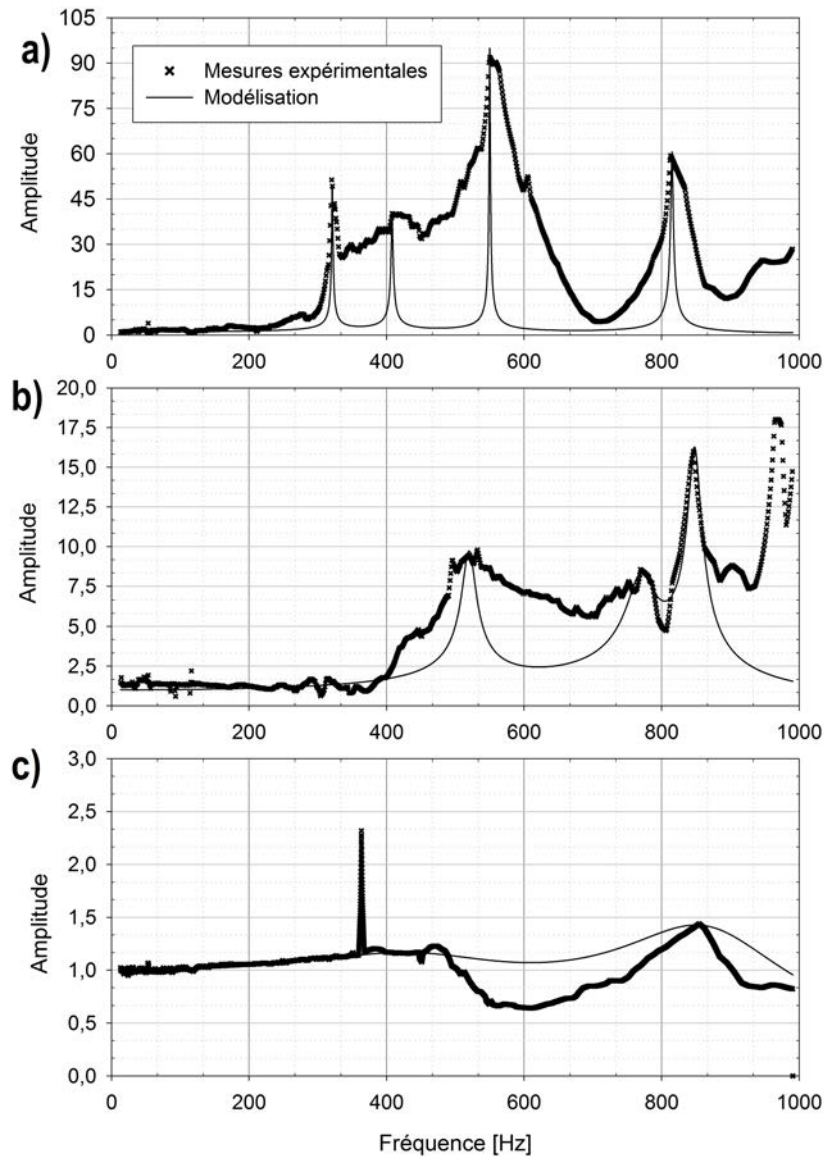


FIGURE 3.14 – Simulations numériques des pics caractéristiques des fonctions de transferts suivant les axes (a) X, (b) Y et (c) Z. Pour cela, l'équation 3.12 est utilisée.

TABLE 3.4 – Ensemble des coefficients caractérisant les pics de résonances issus des fonctions de transfert suivant les trois axes. f_0 [Hz], K [$N.m^{-1}$] et B [$kg.s^{-1}$] représentent respectivement la fréquence de résonance, la constante de raideur et le facteur d'amortissement.

Pic	axe X			axe Y			axe Z		
	f_0	K	B	f_0	K	B	f_0	K	B
1	321	28298	0,0729	inexistant			inexistant		
2	408	46002	0,121	inexistant			inexistant		
3	inexistant			inexistant			475	62351	14,47
4	550	83595	0,0643	520	74724	0,889	550	83595	44,32
5	inexistant			770	163847	1,827	inexistant		
6	815	183558	0,148	848	198723	0,854	875	211579	10,88

Les observations du modèle concernant le connecteur RH-PCPL lorsque la vibration est orthogonale à l'axe de la languette sont les suivantes :

1. Le nombre de pics est égal à 4, 3 et 2 suivants les axes X, Y et Z. Par conséquent, des phénomènes de résonance sont plus présents suivant les axes orthogonaux à l'axe de vibration.
2. Les pics dont la résonance influence les trois axes se situent vers 550 Hz et 850 Hz.
 - Un phénomène d'absorption est observable suivant l'axe Z. En effet, le coefficient d'absorption est égal à 27,57 à 550 Hz. A l'inverse, ce coefficient n'augmente pas suivant les axes X et Y. Par conséquent, ce phénomène d'absorption est mono-axial.
3. Les facteurs d'amortissement ont un ordre de grandeur de différence entre les résultats de l'axe X et l'axe Y puis entre les résultats de l'axe Y et l'axe Z. En effet, les amplitudes des fonctions de transfert sont bien plus importantes selon l'axe X que selon l'axe Y. Par conséquent, le coefficient d'amortissement met en valeur l'axe privilégié de mouvement.

Il existe six familles de pics différents lorsque le connecteur est positionné tel que la vibration est orthogonale à la vibration. De plus, le comportement du porte-clip influence celui du clip. Par conséquent, cette position du connecteur peut induire des dégradations à l'interface en fonction de la fréquence de résonance.

3.3.4 Détermination des déplacements relatifs entre le clip et la languette à partir des fonctions de transfert et du modèle numérique

A ce stade, les fonctions de transfert et les modélisations numériques permettent de caractériser le comportement vibratoire du connecteur. De là, il est possible de déterminer les déplacements relatifs entre la languette et le clip. Pour cela, nous allons utiliser les résultats du connecteur RH-PCPL selon l'axe X. Dans un premier temps, la fonction de transfert entre le porte-languette et la languette est utilisée. Ensuite, la fonction de transfert et les résultats de la modélisation entre la languette et le clip seront utilisés. Il s'agit donc d'un processus de calcul pour définir les déplacements relatifs entre le clip et la languette, voir figure 3.15.

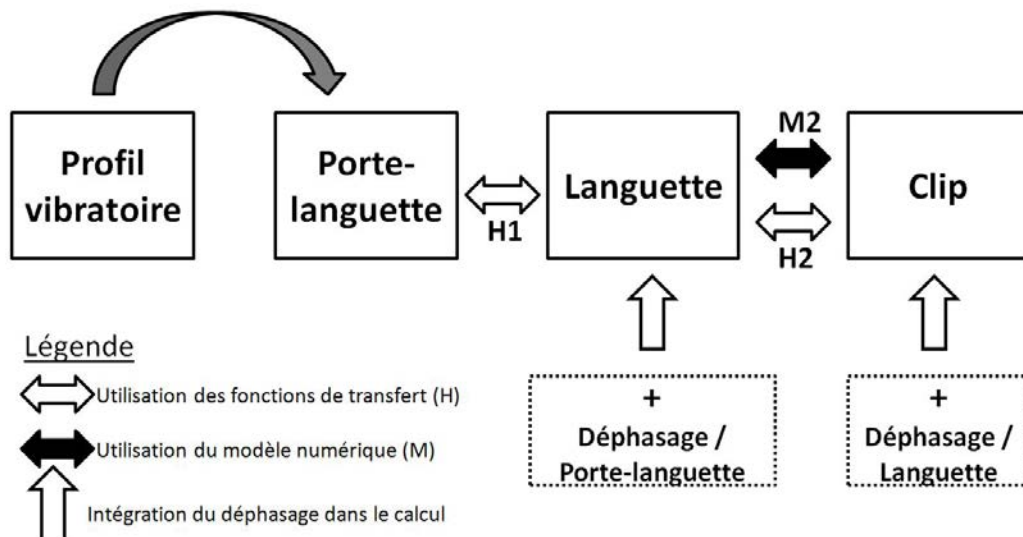


FIGURE 3.15 – Processus de calcul pour définir les déplacements relatifs entre le clip et la languette.

Dans un premier temps, la fonction de transfert entre le porte-languette (source vibratoire) et la languette est utilisée. La modélisation de cette fonction de transfert n'a pas abouti à un résultat satisfaisant. En effet, les phénomènes d'absorption à partir de 500 Hz ainsi que les faibles variations de la fonction de transfert ne permettent pas de définir les pics de manière précise. De ce fait, nous utiliserons seulement la fonction de transfert H1, voir la figure 3.15 et la figure 3.16 de la page 109.

Dans un second temps, les valeurs de déphasages entre le porte-languette et la languette sont intégrées au calcul du mouvement réel de la languette. Cette donnée sera ensuite utilisée pour définir le déplacement relatif entre le clip et la languette.

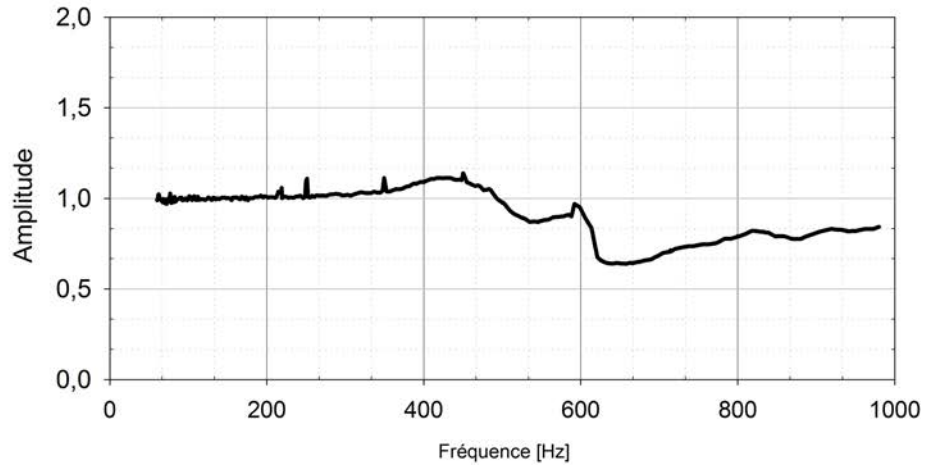


FIGURE 3.16 – Fonction de transfert entre le porte-languette et la languette du connecteur RH-PCPL.

Dans un troisième temps, la modélisation numérique du comportement vibratoire entre le clip et la languette (M2) est réalisée, voir figure 3.17. De là, les coefficients K et B sont calculés à l'aide du modèle, voir tableau 3.5. La fonction de transfert H_2 correspond aux mesures expérimentales pour définir la fonction de transfert.

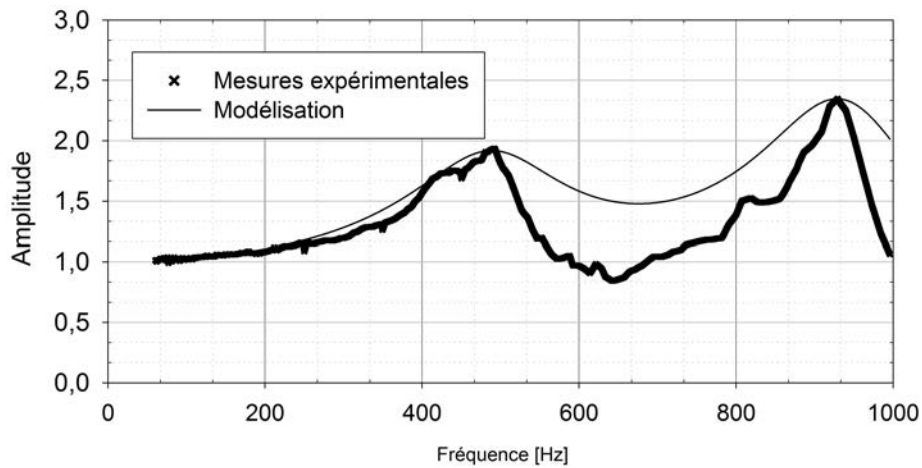


FIGURE 3.17 – Fonction de transfert et modélisation numérique des pics caractéristiques de la fonction de transfert entre la languette et le clip suivant l'axe X

TABLE 3.5 – Ensemble des coefficients caractérisant les deux pics de résonances issus de la fonction de transfert suivant l'axe X. f_0 [Hz], K [$N.m^{-1}$] et B [$kg.s^{-1}$] représentent respectivement la fréquence de résonance, la constante de raideur et le facteur d'amortissement.

	axe X		
Pic	f_0	K	B
1	502	69641	9,04
2	945	246786	9,73

Au final, l'amplitude de déplacement du clip par rapport à la languette est calculée en utilisant d'une part la fonction de transfert H2 et d'autre part la modélisation M2 afin de comparer. De la même manière, les valeurs de déphasage sont intégrées au calcul. De cette manière, il est possible de définir l'amplitude maximale de déplacement entre deux mouvements sinusoïdaux (i.e. les déplacements du clip et de la languette) ce qui correspond au déplacement relatif à l'interface de la zone de contact.

Ce processus de calcul, issu de résultats expérimentaux, permet de calculer les déplacements de chacun des composants du connecteur à partir d'un profil vibratoire. Par la suite, cette méthode de calcul permettra d'utiliser différents profils. La méthode de calcul avec les fonctions de transfert est donc une méthode globale.

La figure 3.18 indique les courbes issues d'une part des résultats expérimentaux i.e. des mesures d'amplitudes et de phases de la languette et du clip soumis à une sollicitation vibratoire et d'autre part du calcul avec les fonctions de transfert H1 et H2 ainsi que les valeurs de déphasage.

Dans ce dernier cas, il suffit d'appliquer le profil vibratoire choisi qui correspond au mouvement du porte-languette. Les observations sont les suivantes :

- Les courbes des résultats expérimentaux et du calcul avec le profil 15g sont similaires. Toutefois, les maximums ne sont pas égaux. En effet, l'amplitude maximale des résultats expérimentaux et par calcul sont respectivement égales à $14 \mu m$ et $12 \mu m$. Cette source d'erreur peut provenir du processus de calcul.
- L'utilisation des fonctions de transfert permet d'appliquer un profil vibratoire au choix. De ce fait, le maximum de déplacement relatif entre le clip et la languette sous l'application d'un profil 24g est égal à $21 \mu m$. Toutefois, il n'a pas été possible de réaliser des mesures car les amplitudes du profil 24g sont trop importantes pour la source vibratoire i.e. pot-vibrant. Il s'agit donc de résultats calculés.

L'utilisation des fonctions de transfert en amplitude et des déphasages permettent de prédire les déplacements relatifs en fonction de la source vibratoire.

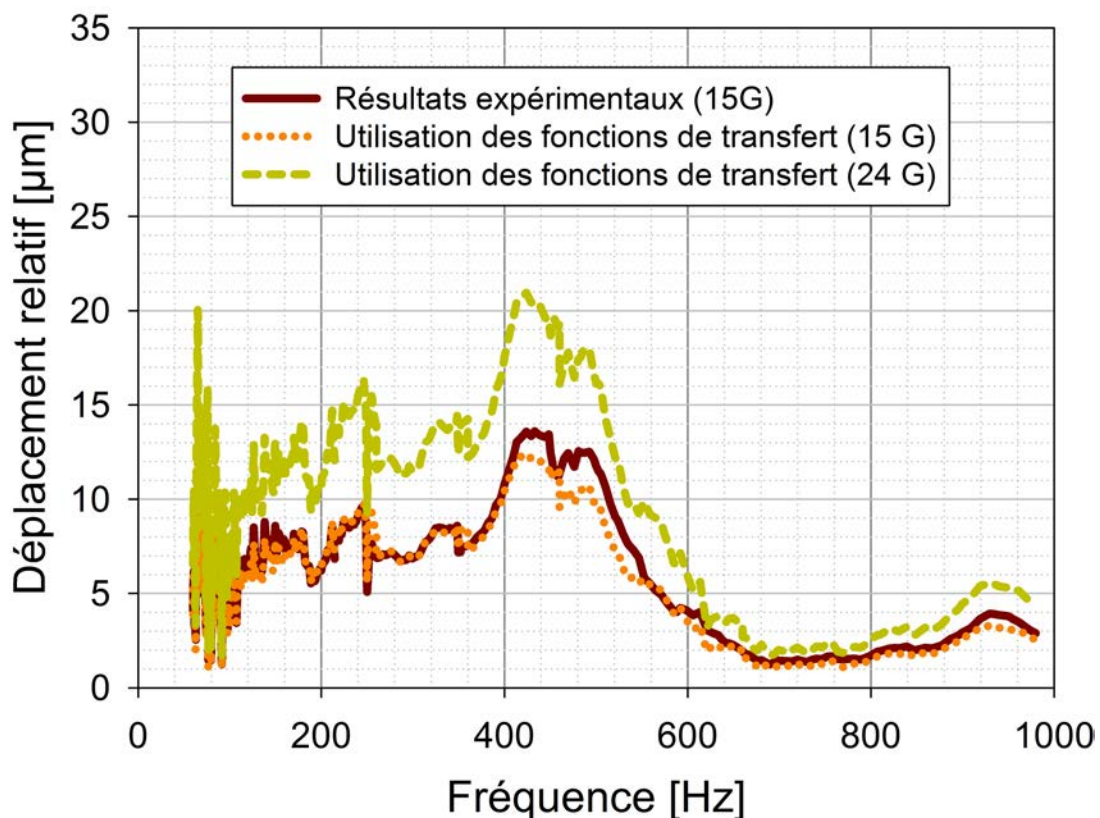


FIGURE 3.18 – Déplacements relatifs entre le clip et la languette : résultats expérimentaux et résultats basés sur les fonctions de transfert en appliquant deux profils vibratoires.

L'utilisation de la modélisation (M2) entre le clip et la languette permet de se dispenser de la fonction de transfert en amplitude (H2). Par conséquent, il suffit de rentrer les caractéristiques de la modélisation du comportement vibratoire clip-languette qui sont caractéristiques du connecteur RH-PCPL en position horizontale, voir figure 3.19. Les courbes sont similaires mais de nombreuses différences subsistent. Notamment entre 240 et 400 Hz, les résultats du modèle numérique sont supérieurs aux résultats expérimentaux.

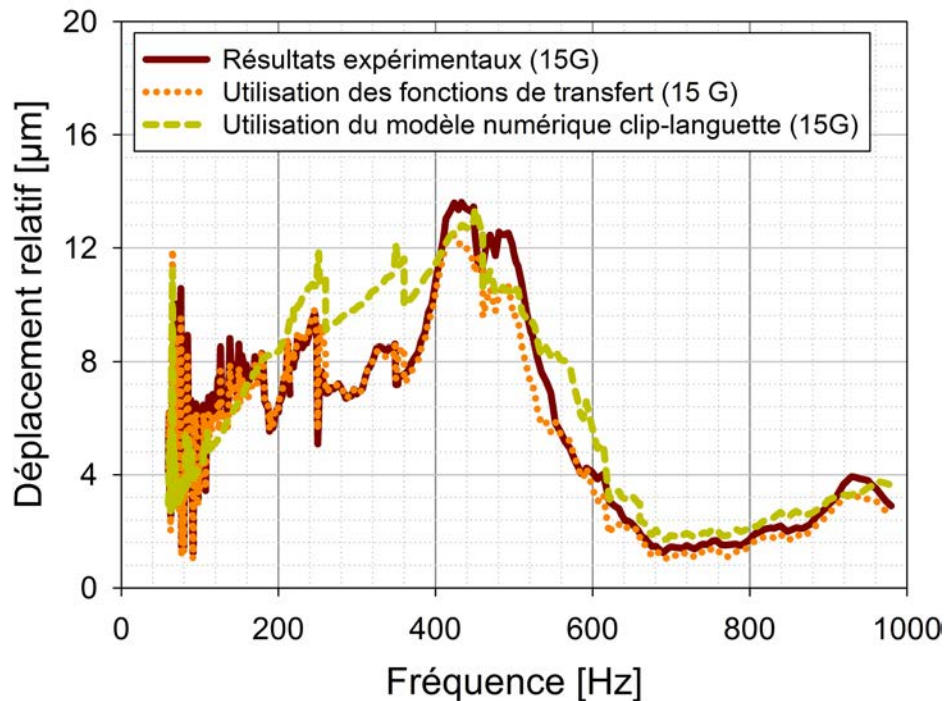


FIGURE 3.19 – Déplacements relatifs entre le clip et la languette : résultats expérimentaux, résultats basés sur les fonctions de transfert et les résultats basés sur une modélisation.

En résumé, l'utilisation des fonctions de transfert permet d'une part de prédire le comportement vibratoire entre le clip et la languette en fonction du profil vibratoire appliqué. Toutefois, il est nécessaire d'avoir une grande quantité de valeurs suivant la plage fréquentielle étudiée.

La modélisation numérique du comportement vibratoire entre le clip et la languette permet d'obtenir un résultat satisfaisant pour prédire les déplacements relatifs clip-languette. Toutefois, cette modélisation nécessite d'être améliorée en prenant en compte le déphasage.

3.3.5 Conclusion sur l'utilisation d'un modèle masse-ressort-amortisseur

Le connecteur RH-PCPL présente plus de résonances lorsque la vibration est orthogonale que parallèle à l'axe de vibration. Par conséquent, le positionnement du connecteur influencera son comportement mécanique.

Ce type de modélisation permet d'ajouter une analyse quantitative aux observations des fonctions de transfert. Les connaissances de la constante de raideur et du facteur d'amortissement permettent d'une part de définir des axes privilégiés du comportement vibratoire du connecteur étudié et d'autre part de préconiser son utilisation sachant le type de vibrations issu de sa position.

Cette analyse nécessite d'être améliorée en prenant en compte la géométrie du connecteur, les matériaux en contact. Ce type d'analyse est d'autant plus complexe que le nombre de paramètres est important. Cette analyse apporte une idée novatrice dans la caractérisation des connecteurs. En effet, il est possible d'utiliser les coefficients B et K d'un connecteur pour prédire son comportement vibratoire. Toutefois, ce modèle nécessite d'être amélioré en prenant également en compte les déphasages.

3.4 Utilisation du vibromètre sur un banc d'essai Renault

L'objectif est de pouvoir utiliser un vibromètre sur un banc d'essai moteur en complément d'une utilisation d'un banc expérimental de type pot vibrant. Toutefois, un banc d'essai moteur présente de nombreux inconvénients pour l'utilisation de ce type de moyen de mesure :

1. Le premier problème est l'accessibilité du point de mesure. En effet, la distance entre l'appareil de mesure et le point de mesure est précisément de 30 cm. Par conséquent, l'encombrement du moyen de support empêche d'atteindre tous les connecteurs.
2. Les profils d'utilisation du banc d'essai moteur contiennent des phases d'accélération positives et négatives. Ces phases d'accélération impliquent des mouvements de type choc et de forte amplitude (plusieurs centimètres).
 - Or, le vibromètre ne peut pas suivre ce mouvement car ce type d'appareil ne supporte pas les vibrations. Il n'est donc pas possible d'utiliser un support de cet appareil fixé sur le banc moteur.
 - Par ailleurs, un système où le support du vibromètre suivrait le mouvement du banc moteur en utilisant des capteurs de positionnement, impliquerait un retard de mouvement du moyen de mesure. Par conséquent, la mesure ne serait pas réalisable.
3. Si le banc d'essai moteur bouge de quelques millimètres, il est nécessaire de ré-ajuster son positionnement. Or, l'entrée dans la chambre de fonctionnement du banc d'essai moteur est interdite. En effet, une pièce peut être éjectée du banc et ainsi blesser l'utilisateur.
4. Un banc d'essai moteur implique des montées en température de plusieurs dizaines de degrés Celsius. Or, le vibromètre est d'une part sensible aux changements de température et d'autre part sa température d'utilisation maximale est fixée à 40 °C selon le constructeur.

Il est préconisé d'utiliser un vibromètre seulement sur un banc d'essai de type pot-vibrant. Son utilisation est en effet impossible par rapport aux conditions d'utilisation d'un banc d'essai moteur.

En perspective, l'idée serait de mesurer le profil vibratoire d'un emplacement sur un banc d'essai moteur à l'aide d'un accéléromètre par exemple. En parallèle, le connecteur serait caractérisé par un profil vibratoire défini par le cahier des charges. L'analyse de ces caractéristiques vibratoires permettrait de prédire son comportement. La finalité serait d'utiliser des mesures électriques pour confirmer l'utilisation du connecteur à l'emplacement donnée. L'ensemble des données pourra être travaillé pour définir des familles de connecteurs en fonction du type de vibration induit par le véhicule.

3.5 Conclusion

L'utilisation d'un vibromètre basé sur l'effet Doppler a permis de caractériser les connecteurs et surtout de définir le type de mouvement relatif entre le clip et la languette. Cela a notamment permis de mettre en avant des comportements vibratoires peu intuitifs tels que des directions de mouvement multi-axiaux.

D'une manière générale, les amplitudes de vibration du porte-clip sont plus importantes par rapport aux autres composants du connecteur soumis à une sollicitation vibratoire. En effet, son branchement au capteur ou au porte-languette, n'est pas fixe. De plus, les résultats expérimentaux ont mis en évidence que le porte-clip vibre suivant les trois directions d'un repère orthonormé défini selon l'axe de la languette alors que la source de vibration (pot-vibrant) est uni-axiale. Par conséquent, il est nécessaire de caractériser le comportement vibratoire d'un composant suivant ces trois directions.

- Le comportement vibratoire du porte-clip influence forcément mais d'une manière moins importante celui du clip. Suivant l'axe de la languette, les amplitudes de vibration du clip sont en effet moins importantes que celle du porte-clip. Ce comportement vibratoire peut être expliqué par celui de la languette. En effet, le porte-clip et la languette constituent les deux composants en contact avec le clip. La languette étant principalement influencée par le comportement vibratoire du porte-languette. Le clip possède donc deux sources de vibration.
- De la même manière, le comportement vibratoire de la languette dépend de celui du porte-languette, du capteur, et du clip. D'une manière générale, les comportements vibratoires internes du connecteur (clip/languette) dépendent des comportements vibratoires externes du connecteur (porte-languette/capteur et porte-clip). Le porte-languette, ou le capteur, sont supposés fixes par rapport à la source vibratoire. Par conséquent, c'est le comportement vibratoire du porte-clip sur lequel il faut se focaliser en premier lieu.
- Dans notre cas, la languette a trois points de contact avec le clip. Ainsi, le degré de liberté de mouvement entre le clip et la languette est moins important. En effet, leurs amplitudes de mouvement relatif suivant l'axe Z sont nulles. Le comportement vibratoire du porte-clip ne correspond donc pas forcément à celui du clip. Par conséquent, il est nécessaire de définir les points de contact entre chaque composant i.e. la structure du connecteur pour caractériser leurs comportements vibratoires.

En résumé, un connecteur soumis à des vibrations aura un comportement vibratoire multi-axial qui dépend d'une part de la vibration imposée et d'autre part de la structure de ce connecteur. En effet, les comportements vibratoires du clip et de la languette dépendent de ceux des composants externes du connecteur. Toutefois, ils peuvent être différents. Par conséquent, l'analyse du comportement vibratoire d'un connecteur est complexe et nécessite une analyse complète.

Les résultats concernant les connecteurs RH-PCPL et PMH-GTS ont mis en évidence des comportements vibratoires différents soumis à une source vibratoire identique.

- En effet, leur géométrie, leur masse et fonction d'usage sont différents. Par exemple, les résultats ont mis en évidence que l'amplitude de vibration relative entre le clip et la languette ne dépasse pas $5 \mu m$ pour le connecteur PMH-GTS tandis ce mouvement relatif du connecteur RH-PCPL, avec une source vibratoire orthogonale sur une plage fréquentielle comprise entre 100 et 600 Hz, aura un maximum égale à $12 \mu m$ (ces valeurs ont été obtenues en appliquant le profil vibratoire 14G selon le cahier des charges Renault). En utilisant des connectiques étamés, cela aura pour conséquence des dégradations mécaniques et électriques de la zone de contact. C'est pourquoi, il est nécessaire de caractériser chaque connecteur sur un banc d'essai sous l'application d'un profil vibratoire de type véhicule.
- De plus, le comportement vibratoire des connecteurs ont mis en évidence des effets de résonance et d'absorption i.e. une augmentation et une diminution de l'amplitude de vibration. Cette dernière peut être importante. Par exemple, le connecteur RH-PCPL a montré six résonances sur l'ensemble de la plage fréquentielle étudié. Ces augmentations d'amplitude sont à éviter car cela peut impliquer

des déplacements relatifs importants entre le clip et la languette.

En résumé, les connecteurs présentent des comportements vibratoires complexes. Les vibrations induites dans un connecteur sont difficiles à préconiser. Il est nécessaire de caractériser et de mettre en évidence chaque réaction vibratoire des composants du connecteur en fonction de la fréquence. Pour cela, l'utilisation d'un vibromètre apporte des informations primordiales.

La caractérisation du comportement vibratoire d'un connecteur sur un banc d'essai moteur est difficile. En effet, le vibromètre est un appareil de mesure qui nécessite des précautions d'utilisation avec notamment une distance de mesure précise égale à 30 cm. Il s'agit du point de rencontre entre les deux lasers. Cet appareil de mesure ne peut donc pas suivre les mouvements du moteur sur le banc sans perte d'information. Par conséquent, il est impossible d'utiliser le vibromètre sur une cible dont les amplitudes de mouvement sont importantes. Nous avons donc le moyen de caractériser de façon précise le comportement vibratoire du connecteur sans nécessité de réaliser les mesures sur un banc d'essai moteur.

- C'est pourquoi il est nécessaire d'analyser le comportement vibratoire du connecteur sur un banc d'essai de type pot vibrant. Ensuite, ces analyses doivent être utilisées pour obtenir des fonctions de transfert qui constituent un rapport d'amplitude de déplacement entre la source vibratoire et le composant du connecteur. Il est donc possible d'appliquer cette fonction de transfert à un profil défini et non pas le profil vibratoire du banc d'essai du pot vibrant. De là, il sera possible de préconiser le comportement vibratoire du connecteur.
- A ce stade, ce travail nécessite encore des recherches et notamment une mesure propre à chaque connecteur. Cela constituera leur empreinte vibratoire. En effet, chaque connecteur présente des pics de résonances différents suivant l'orientation de la source vibratoire.
- De plus, un modèle numérique du comportement vibratoire permet de mettre en évidence la raideur et l'absorption des chaque composant suivant l'axe. Il s'agit de quantifier le comportement vibratoire en terme de raideur et d'absorption. Cette nouvelle approche permettra d'apporter des informations et les possibles modifications à apporter pour améliorer le connecteur.

En résumé, le comportement vibratoire d'un connecteur est complexe. il dépend de l'axe de la source vibratoire, de sa structure. Toutefois, une analyse approfondie du connecteur basée notamment sur les mesures de déplacement des composants du connecteur permet de préconiser l'utilisation d'un connecteur en fonction de son emplacement.

Chapitre 4

Étude du comportement électrique et analyse de surface d'un contact étamé sous sollicitation vibratoire

Introduction

Ce chapitre portera sur l'étude d'un contact électrique étamé soumis à des sollicitations vibratoires. La dégradation électrique est issue de la présence de composés électriquement isolants à l'interface. Plusieurs paramètres définissent les évolutions de la tension de contact et par conséquent la structure du troisième corps. La présence d'oxydes abrasifs implique un degré de dégradation avancé. L'objectif sera d'étudier l'état de surface d'une zone dégradée et de comprendre la dynamique d'évacuation et de formation des débris afin d'apporter de nouvelles connaissances à la compréhension du fretting-corrosion.

Une première partie concerne l'étude de l'état de surface d'un contact étamé dégradé. Le dispositif expérimental est composé d'une micro-sonde nucléaire qui pourra doser les éléments légers. Une seconde partie étudiera la dynamique de la tension de contact en utilisant un flux de gaz inerte. Il sera alors possible d'évaluer la formation/évacuation des débris. Une dernière partie portera sur l'étude de la tension de contact en temps réel afin d'évaluer la conduction des charges le long de la trace de fretting corrosion.

4.1 Caractérisation d'une trace de fretting corrosion par la micro-sonde nucléaire

La caractérisation d'une piste de fretting par la microsonde nucléaire permet de connaître l'inclusion de l'oxygène au sein de la matière. Le but est de déterminer les types d'oxydes à l'interface d'un contact dégradé par fretting-corrosion. Cette technique permet d'obtenir des informations à la fois quantitatives et spatiales. Ce dispositif expérimental est utilisé pour la première fois sur un échantillon de cuivre revêtu d'étain.

4.1.1 Présentation des régions analysées

L'échantillon est une languette composée d'un substrat en cuivre recouvert d'une couche en étain. La sollicitation vibratoire imposée sur le clip est de type sinusoïdal, d'amplitude $50 \mu m$ et de fréquence 50 Hz. De ce fait, ces conditions expérimentales provoquent une dégradation sévère au point que le substrat est visible sur toute la zone de contact.

L'analyse effectuée à l'aide de la micro-sonde par faisceau d'ion est réalisée sur cinq régions placées le long de la zone de contact et notées de 1 à 5, voir figure 4.1.

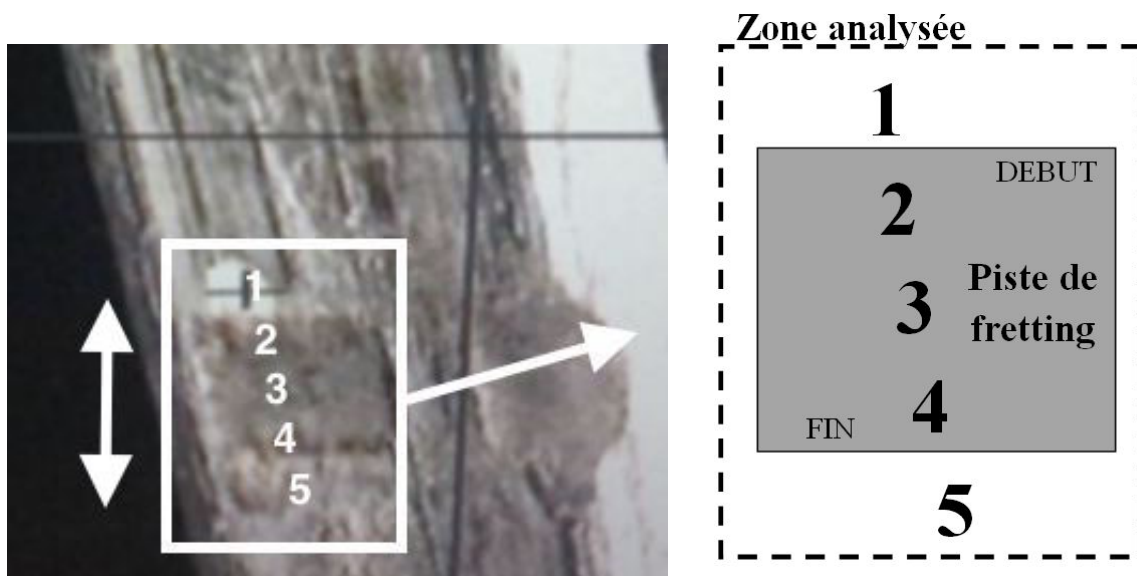


FIGURE 4.1 – Photographie illustrant la position des régions 1 à 5 le long de la piste de fretting.

TABLE 4.1 – Tableau des quantités de rayonnements reçues pour les régions analysées [Coulomb] et la taille de la zone.

Région	Position sur la trace de fretting	Coulomb [$10^{-6}C$]	Taille [$\mu m \times \mu m$]
1	avant	2,0349	120x90
2	début	1,2342	
3	milieu	1,5055	
4	fin	1,6909	
5	après	1,8296	

La figure 4.2 indique les cartographies brutes associées aux régions 1 à 5. D'une part, elles comportent des zones riches de forte intensité (couleur jaune) correspondant à un nombre important d'interactions. D'autre part, elles comportent des zones pauvres de faible intensité (couleur bleue) correspondant à un faible nombre d'interactions. Chacune de ces régions comportent des formes distinctes et complexes avec des intensités différentes.

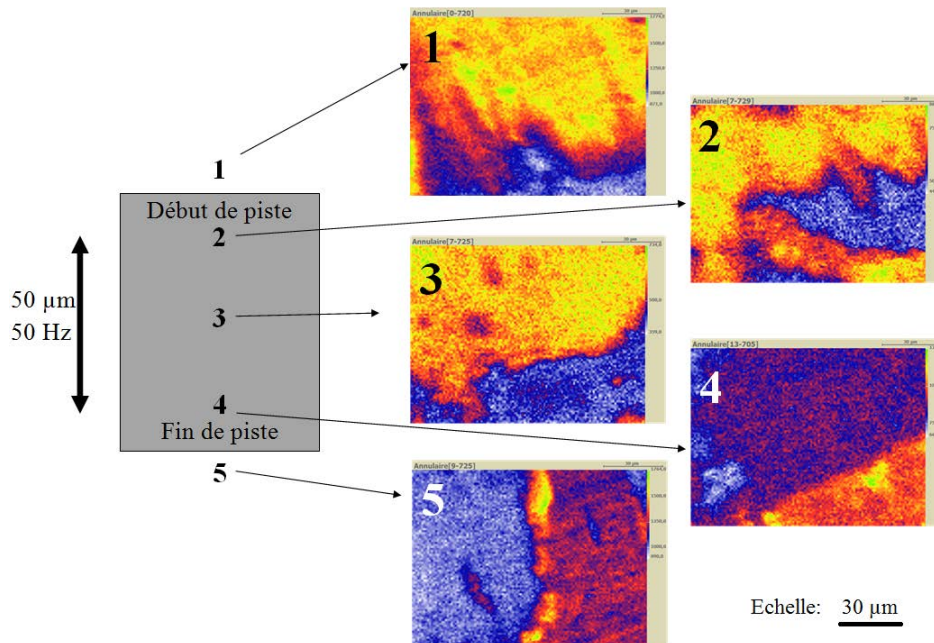


FIGURE 4.2 – Schéma de la piste de fretting associé aux cartographies brutes des régions 1 à 5.

Avant la dégradation, la surface est composée d'une couche d'étain (Sn), du composé inter-métallique (Cu_6Sn_5) puis du substrat (Cu). Suite aux sollicitations vibratoires, les débris issus de l'étain et du composé inter-métallique seront évacués hors de la piste de fretting-corrosion [47]. Par conséquent, le substrat réagit alors avec l'oxygène de l'atmosphère pour former à son tour des oxydes de cuivre.

En résumé, l'analyse chimique mettra en avant l'étain, le cuivre, le composé inter-métallique (Cu_6Sn_5) et les oxydes (SnO , SnO_2 , CuO , $Cu_2O...$). On choisira donc les réactions nucléaires de l'oxygène (isotope 16) et en PIXE les raies caractéristiques de l'étain et du cuivre.

4.1.2 Analyse des régions de la zone de contact

En premier lieu, les spectres RBS, NRA et DRX des régions 1 à 5 seront analysés afin d'apporter une idée globale de la composition de ces régions. Ensuite, l'analyse des cartographies des régions 1 à 5 permettra de définir des sous-régions pour une analyse plus fine des composés présents en surface. Enfin, des simulations numériques pourront déterminer la composition chimique avec plus de précision.

Analyses des spectres RBS et NRA

Les figures 4.3 (a) et (b) représentent les interactions de type RBS et NRA issues des régions 1 à 5 (Ces résultats sont issus d'un logiciel spécifique). En effet, le nombre d'interactions de type NRA est plus faible que le nombre d'interactions de type RBS. Par conséquent, l'acquisition des interactions NRA est difficile.

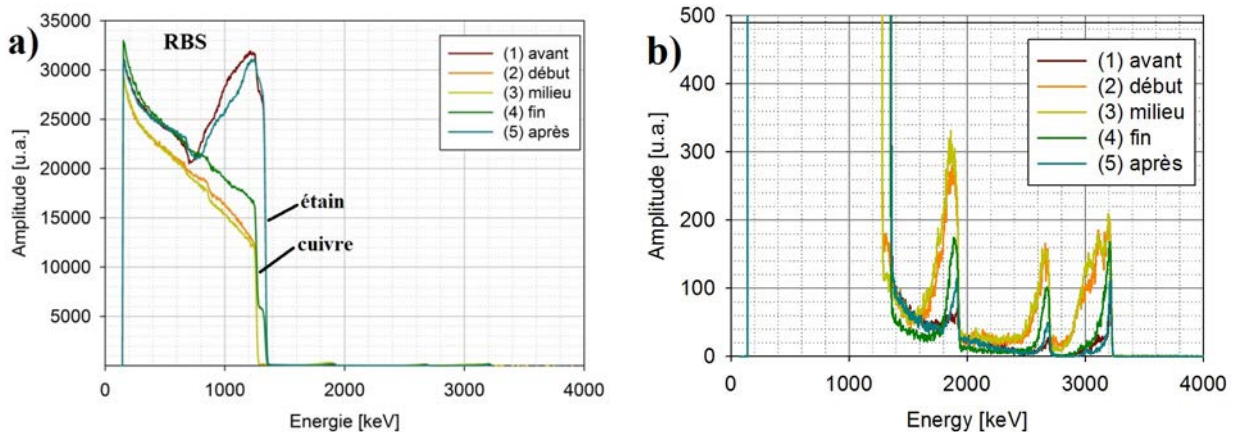


FIGURE 4.3 – (a) Spectres RBS et (b) NRA liés aux cinq régions analysées en échelle linéaire.

Les interactions du signal RBS concernent à la fois les éléments lourds (étain, cuivre...) et les éléments légers (oxygène, carbone...). Les observations indiquent différentes compositions en surface suivant les cinq régions :

- Les régions 1 et 5 sont composées d'étain en surface. En effet, le front RBS se situe en énergie à 1376 keV. De plus, l'intensité de leurs spectres respectifs est plus importante entre 700 et 1376 keV en raison du numéro atomique de l'étain qui est plus important que le cuivre car l'intensité est proportionnelle au carré du numéro atomique de l'élément considéré.
- Les régions 2 et 3 sont composées de cuivre en surface. En effet, le front RBS se situe en énergie à 1276 keV.
- Le spectre de la région 4 comporte successivement ces deux fronts. De ce fait, le cuivre et l'étain sont présents en surface. Il est probable que le composé inter-métallique soit présent.

Les interactions du signal NRA indiquent la présence des éléments oxygène et carbone sur chaque spectre. Néanmoins, des différences subsistent. Les valeurs des pics $^{16}\text{O}(d,p0)^{17}\text{O}$ et $^{16}\text{O}(d,p1)^{17}\text{O}$ de l'oxygène et la valeur du pic $^{12}\text{C}(d,p0)^{13}\text{C}$ du carbone des régions 2 et 3 sont plus importantes que ceux des régions 1, 4 et 5. Par conséquent, les régions 2 et 3 sont plus oxydées et possèdent également plus d'impuretés que les régions 1, 4 et 5.

Analyse des spectres PIXE issus des régions 1 à 5

La figure 4.4 représente les spectres de fluorescence X issus de l'analyse PIXE des cinq régions (figure 4.2). Les pics compris entre 3 et 4,5 keV correspondent aux raies caractéristiques *L* de l'étain. Les pics compris entre 8 et 9,5 keV correspondent aux raies caractéristiques *K* du cuivre.

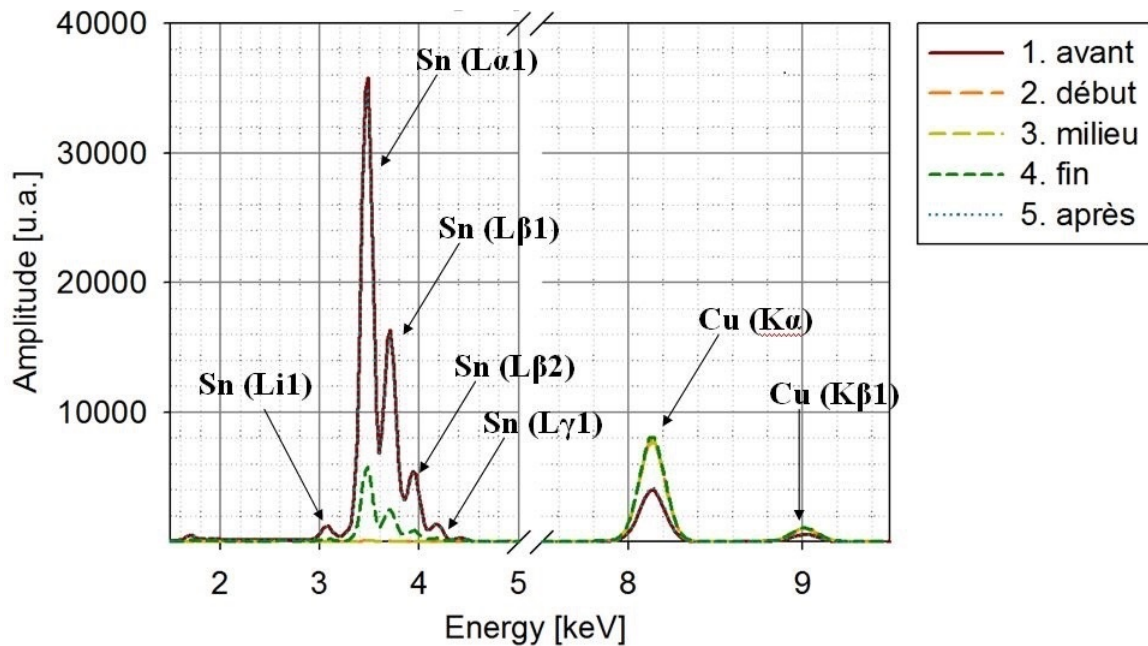


FIGURE 4.4 – Spectres DRX liés aux cinq régions analysées.

Les observations, ci-dessous, confirment les précédentes observations à l'aide de l'analyse NRA.

- Les hauteurs des raies d'étain des régions 1 et 5 sont les plus importantes. Elles sont d'ailleurs confondues sur le spectre. À l'inverse, les raies du cuivre de ces régions ont les plus faibles intensités.
- Les raies de l'étain ne sont pas visibles pour les régions 2 et 3 contrairement à celles du cuivre.
- Le spectre de la région 4 indique la présence d'étain et de cuivre.

Analyse des cartographies issues des régions 1 à 5 par éléments

Chaque cartographie brute représente les surfaces définies par les régions 1 à 5 (figure 4.2). Chaque pixel de ces cartographies représente toutes les interactions énergétiques caractéristiques de tous les éléments rencontrés sur ce point de mesure. Par conséquent, des régions riches (forte intensité en jaune/rouge) et des zones pauvres (blanc/bleu) sont mises en évidence sur les cartographies. Chacune de ces régions correspond à une composition élémentaire différente.

Par un raisonnement inverse, il est possible de sélectionner chaque élément en fonction d'une de ces réactions caractéristiques pour obtenir une cartographie. Pour cela, il suffit de sélectionner la plage énergétique en lien avec l'interaction recherchée. Par exemple, il suffit de sélectionner les énergies d'interaction comprises entre 1600 et 2000 keV pour sélectionner l'oxygène. Ce raisonnement a été appliqué d'une part pour les éléments cuivre et étain grâce aux spectres DRX et d'autre part pour les éléments oxygène et carbone grâce aux spectres NRA, voir figure 4.5 de la page 122.

Les observations élément par élément permettent de définir des sous-régions afin d'affiner les résultats sur leur répartition spatiale :

- Les zones riches en étain sont visibles sur le haut de la région 1, le bas de la région 4 et sur la droite de la région 5. Une zone de moyenne intensité est visible sur la gauche de la région 5. Les zones pauvres sont visibles sur le bas de la région 1, les régions 2, 3 et le haut de la région 4.
- L'étain est issu du revêtement et indique les zones non-dégradées. Ces cartographies délimitent la trace de fretting.

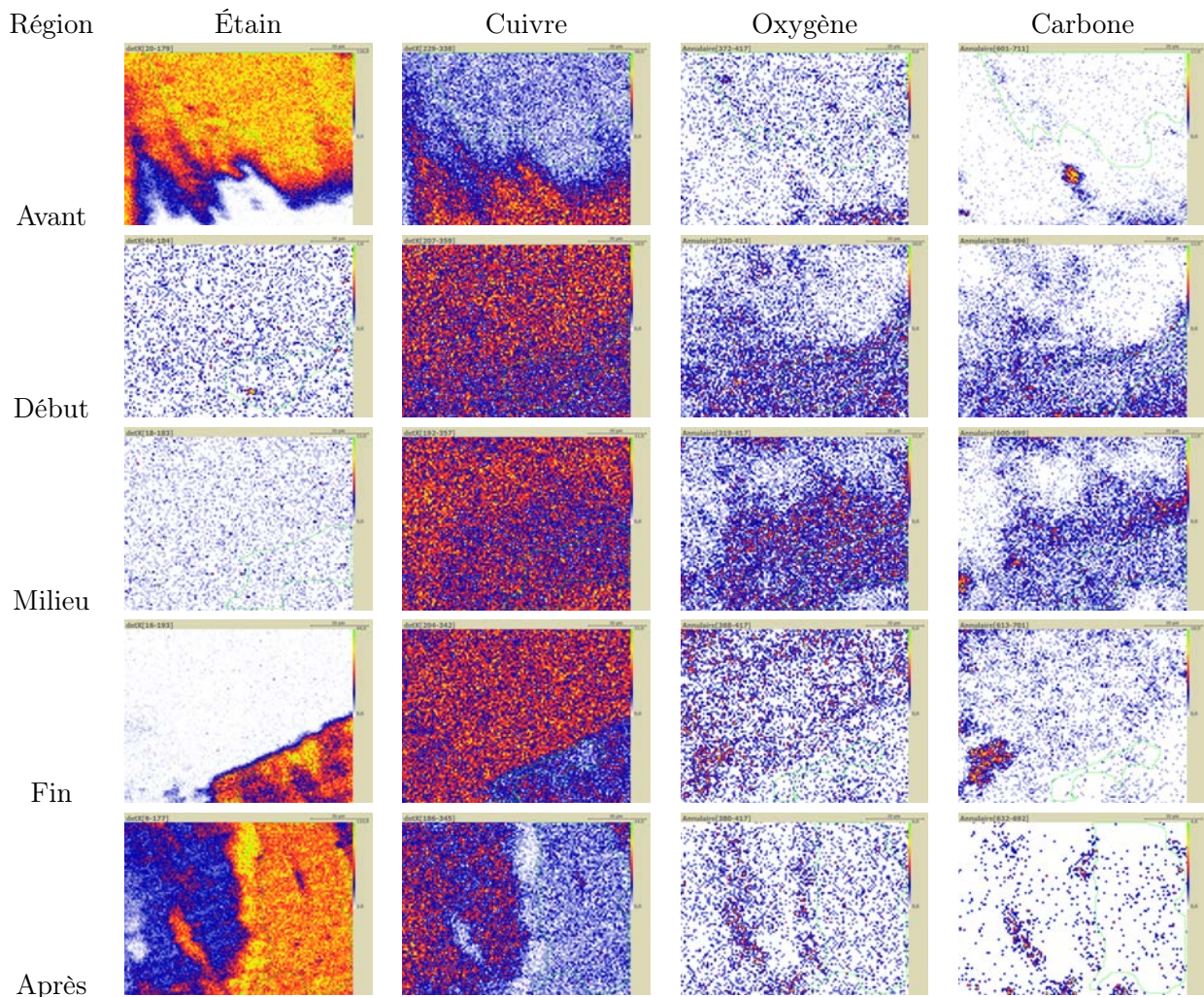


FIGURE 4.5 – Cartographies des éléments étain, cuivre, oxygène et carbone pour les régions 1 à 5

- Les zones riches en cuivre sont visibles sur le bas de la région 1, les régions 2 et 3, le haut de la région 4 et la gauche de la région 5. Les régions 2 et 3 indiquent des contrastes de proportion avec des zones plus ou moins riches malgré l'absence d'étain.
- Le cuivre est présent en tant que substrat. Sa présence est donc visible sur toutes les régions. En effet, la zone d'interaction du faisceau englobe le substrat. Sa présence contraste avec l'absence d'étain.
- Des zones riches en oxygène et carbone sont visibles sur les régions 2, 3 et 4. Ces éléments sont également présents de manière plus locale en bas de la région 1 et sur la région 5.
- L'oxygène indique la présence d'oxydes. Cet élément est donc visible sur toute la surface. Sa présence est à mettre en lien avec le cuivre.

Conclusion sur l'analyse des régions 1 à 5

Cette première analyse des cartographies brutes et des spectres associés a permis de mettre en évidence d'une part les zones non-dégradées qui contiennent principalement de l'étain en surface et d'autre part les zones dégradées qui contiennent du cuivre et ses oxydes. D'ailleurs, la délimitation entre les zones dégradées et non-dégradées est parfaitement visible sur les régions 1 et 4. Par conséquent, l'étain a été enlevé de la zone de contact.

Sur la zone dégradée, les différents degrés d'intensité visibles dans les cartographies 2 à 4 mettent en évidence différentes compositions chimiques. Cette caractéristique est due soit à la présence du carbone liée aux impuretés présentes en surface, soit la présence de plusieurs types d'oxydes (Cu_2O ou CuO) en surface.

4.1.3 Simulation numérique

Un logiciel de calcul, SIMNRA, modélise un spectre théorique RBS/NRA à partir des conditions expérimentales, de la composition chimique en profondeur, de l'état de surface et des sections efficaces de chacune des interactions. L'objectif est de se rapprocher au plus près des résultats expérimentaux suivant les observations de la sous-partie précédente. Pour cela, il est nécessaire de définir des sous-régions délimitées par une composition chimique homogène.

Les spectres NRA dépendent seulement de l'élément considéré et de sa position. Par exemple, si le pic associé au carbone est large, cela implique une présence en profondeur. Les spectres RBS dépendent également de l'élément considéré et de sa position mais aussi de l'état de surface. Cette dernière caractéristique permet d'ajuster les modélisations et donc les résultats ci-dessous.

Simulation numérique d'une région non-dégradée

La figure 4.6 représente la région 1 (voir figure 4.2 de la page 119) i.e. la limite entre une zone non-dégradée et une zone dégradée. A gauche, il s'agit de la cartographie brute. A droite, il s'agit de la cartographie issue uniquement des interactions RBS de l'étain. De là, il est possible de définir les quatre sous-régions 1A, 1B, 1C et 1D afin d'obtenir les spectres correspondants.

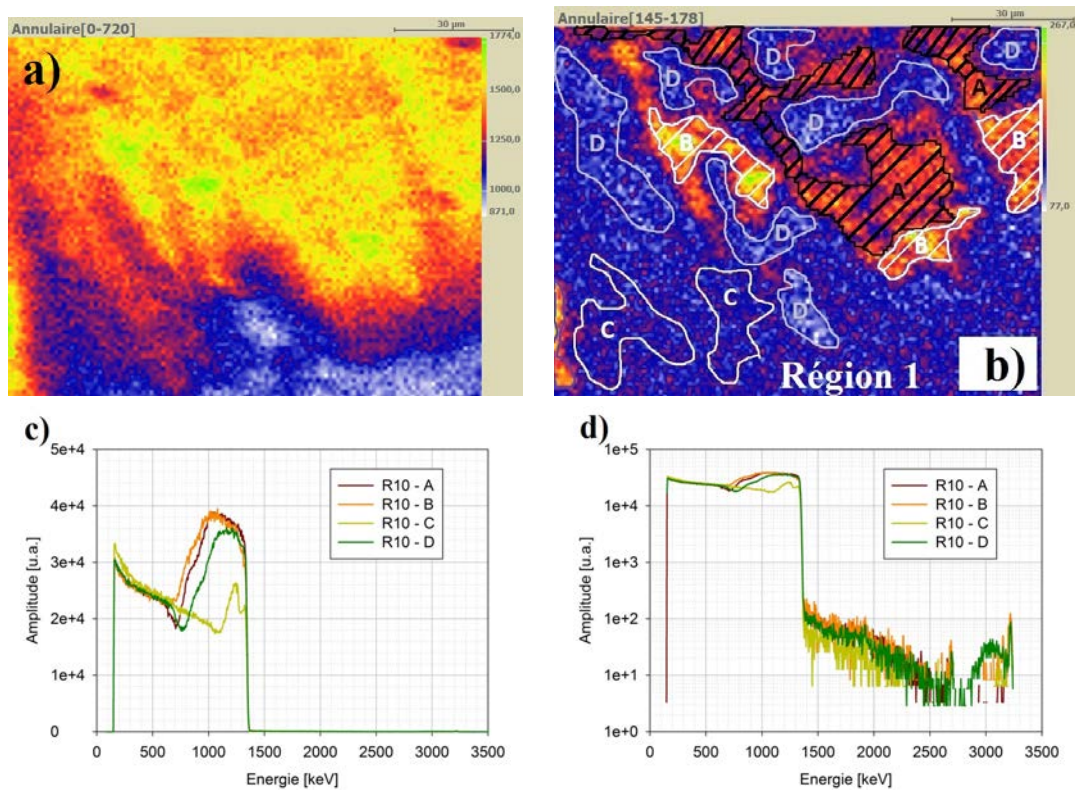


FIGURE 4.6 – (a) Cartographie générale de la région 1. (b) Cartographie de la région 1 liée uniquement au signal RBS de l'étain définissant les sous-régions 1A, 1B, 1C et 1D. (c) Spectres associés aux sous-régions en échelle linéaire. (d) Spectres associés aux sous-régions en échelle logarithmique.

Les observations des spectres (figure 4.6(c) et 4.6(d)) de la page 123 indiquent que l'étain est présent en surface dans chaque sous-région. Dans le cas de la sous-région 1C, le cuivre l'est également. Par conséquent, cela suppose la présence du composé inter-métallique à la surface de la bordure de la zone dégradée. Cette analyse met en évidence des indications qualitatives sur les éléments présents. De là, il sera possible de mettre en place des simulations numériques :

- Les pics NRA des sous-régions 1A, 1B, 1C et 1D ont des pics de faibles épaisseurs. Par conséquent, l'oxygène est seulement présent en surface sur une faible épaisseur.
- Les spectres RBS des sous-régions 1A, 1B et 1D indiquent une forte intensité entre 700 et 1378 keV liée à une forte proportion d'étain en surface et de cuivre en profondeur, voir figure 4.6 (c).

- Le spectre RBS de la sous-région 1C indique une augmentation de l'intensité entre 1100 et 1270 keV suivie de deux diminutions à 1270 et 1370 keV. Ces dernières correspondent à la présence de cuivre et d'étain en surface, voir figure 4.6 (c). Le composé inter-métallique est supposé présent en surface.
- La sous-région 1D possède une quantité importante de carbone en profondeur en raison de la présence d'une impureté locale. L'analyse de l'impureté ne fait pas partie de l'objectif de cette étude. Cette sous-région ne sera pas modélisée.

La figure 4.7 représente deux modélisations numériques. La première est composée d'un revêtement en d'étain, du composé inter-métallique Cu_6Sn_5 et du substrat en cuivre. Cette configuration correspond aux sous-régions 1-A, 1-B. La deuxième est composée d'un inter-métallique sur substrat ce qui correspond à la sous-région 1-C. Ces modélisations confirment les observations issues des spectres.

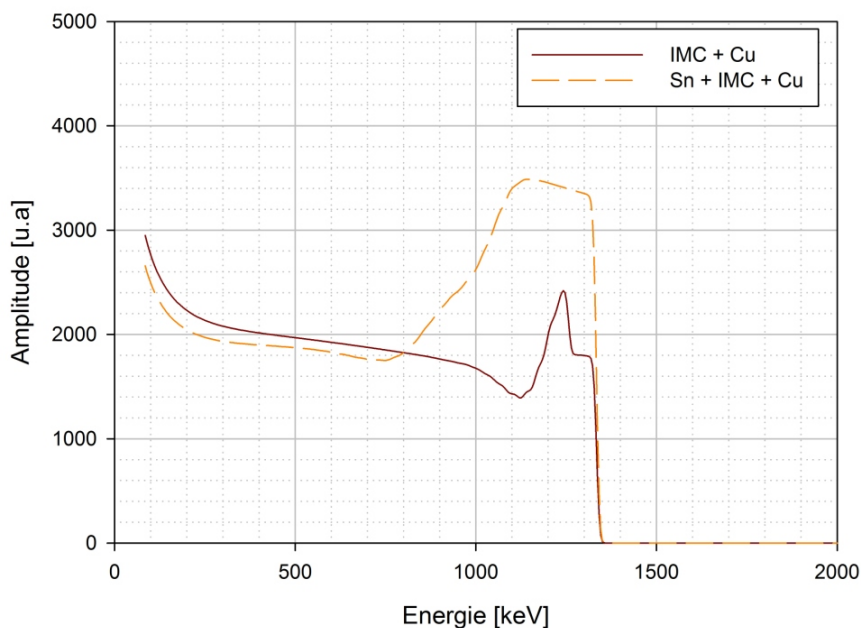


FIGURE 4.7 – Simulations numériques de deux cas correspondant à une zone peu dégradée et non-dégradée. Ces spectres sont similaires aux spectres observés sur la figure 4.6

En résumé, les sous-régions non-dégradées comportent de l'étain en surface. L'épaisseur du revêtement varie avec la présence du composé inter-métallique. Par conséquent, plusieurs zones complexes apparaissent et définissent des sous régions. La sous-région la plus proche de la zone dégradée comporte en surface le composé inter-métallique. Le revêtement en étain a été évacué sous les sollicitations vibratoires. L'oxygène est uniquement présent en surface avec probablement la présence de l'oxyde SnO_2 . Cette simulation est en accord avec les connaissances issues de la littérature. Nous nous focaliserons par la suite seulement sur les zones dégradées et notamment sur leurs oxydes.

Simulations numériques des zones dégradées - les oxydes de cuivre

Les zones dégradées comportent exclusivement du cuivre, de l'oxygène et du carbone. En effet, l'usure par fretting-corrosion a éjecté le revêtement sous forme de débris. Ces zones sont présentes sur les régions 1 à 4. Les sous-régions ont été définies en se basant sur les zones riches et pauvres du cuivre. Tout d'abord, les régions 1 et 4 seront analysées car elles sont proches des limites de la zone dégradée. Ensuite, les régions 2 et 3 seront analysées car elles sont au centre de la trace de fretting.

Simulations numériques des régions 1 et 4 - Limites de la zone de contact

La figure 4.8 indique les régions 1 et 4 (voir figure 4.2 de la page 119) avec des zones dégradées situées en bord de piste. Cinq sous-régions y ont été définies : 1A, 1B puis 4A, 4B et 4C.

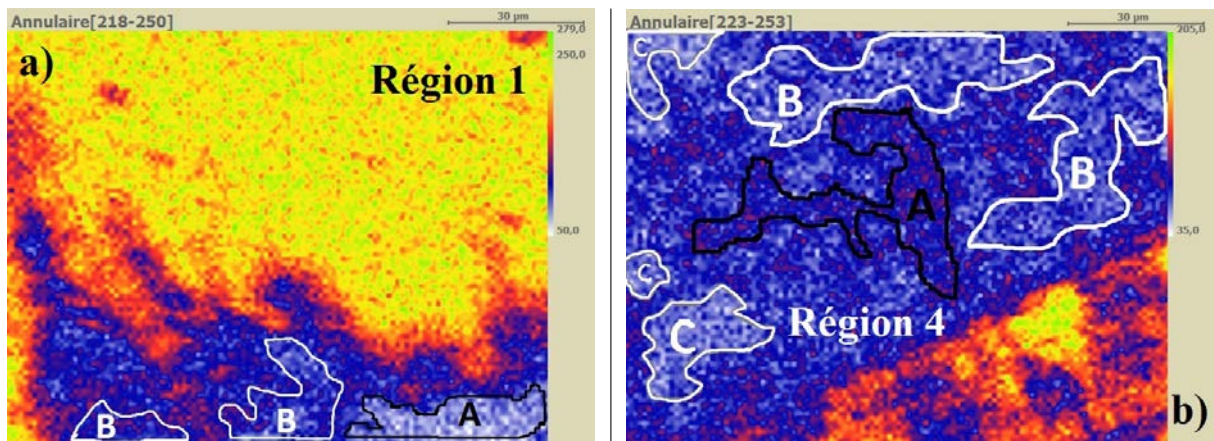


FIGURE 4.8 – (a) Cartographie brute de la région 1 avec les sous-régions 1A et 1B. (b) Cartographie brute de la région 4 avec les sous-régions 4A, 4B et 4C.

Chacun des spectres de la figure 4.9 est associé à une simulation numérique dont les caractéristiques physico-chimiques sont indiquées dans le tableau 4.2. La sous région 4C comporte une forte proportion en carbone due à une impureté locale. Par conséquent, elle ne sera pas analysée.

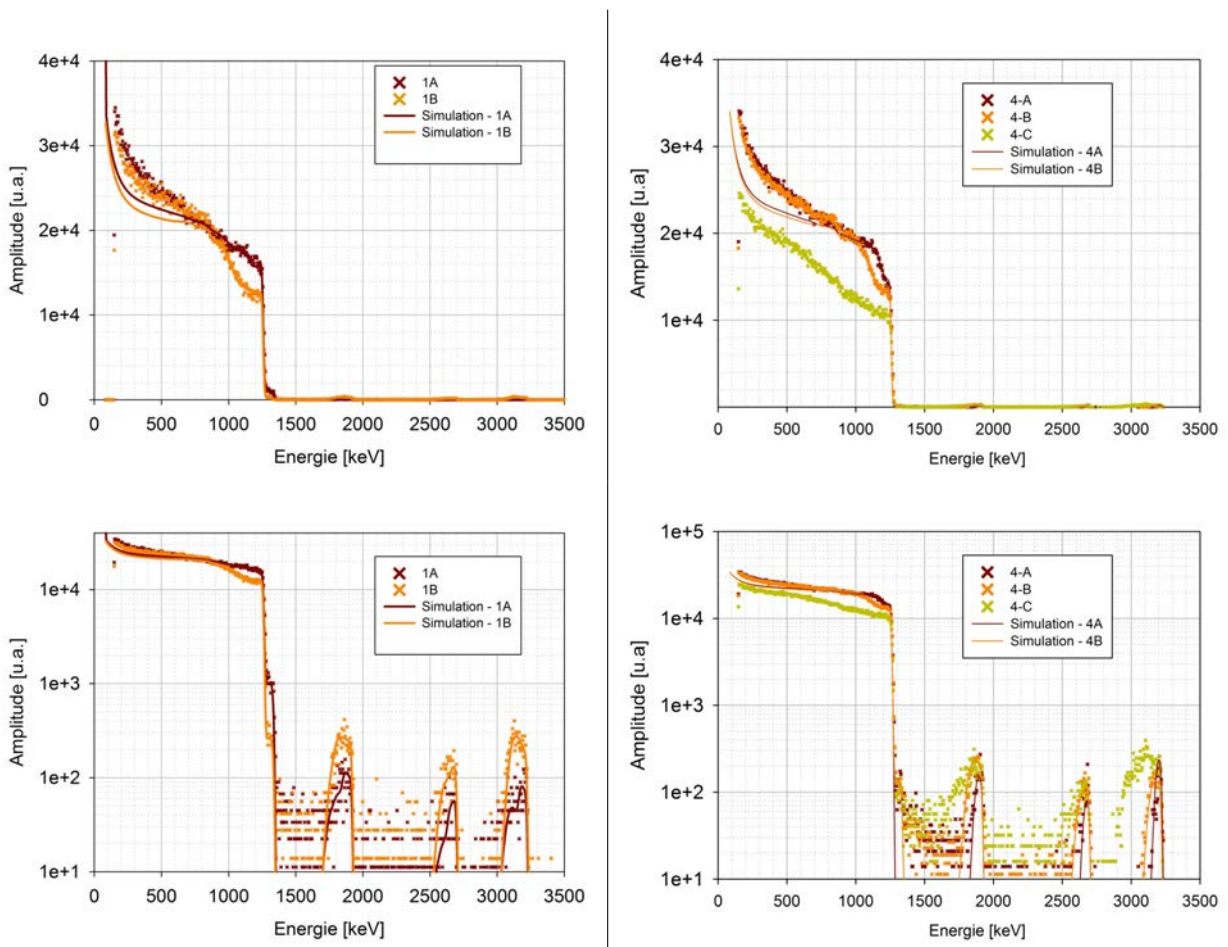


FIGURE 4.9 – Spectres RBS et NRA associés aux sous-régions 1A, 1B, 4A, 4B et 4C.

TABLE 4.2 – Compositions chimiques obtenues à l'aide des simulations numériques effectuées avec SIMNRA des sous-régions 1A, 1B, 4A et 4B.

Sous-région	couche	épaisseur [μm]	rugosité	[Stoechiométrie]			
				Cu	Sn	O	C
1-A	1	1,20	0,3	0,576	0,004	0,35	0,07
1-A	2	1,70	1,57	0,58	0	0,34	0,08
1-A	substr.	inf	-	1	0	0	0
1-B	-	-	-	-	-	-	-
4-A	1	1,39	0,59	0,63	0	0,29	0,08
4-A	substr.	inf	-	1	0	0	0
4-B	2	2,77	1,58	0,635	0,01	0,31	0,045
4-B	substr.	inf	-	1	0	0	0

Les observations sont les suivantes :

- La sous région 1A est composée d'un oxyde de cuivre de stœchiométrie $\text{Cu}_{1,645}\text{O}_1$ sur une épaisseur de $2,9 \mu\text{m}$. La forte rugosité est relativement importante. Les proportions de Cu_2O et CuO sont respectivement égales à 65% et 35%.
- Les sous-régions 4A et 4B sont composées de l'oxyde de cuivre Cu_2O en surface. Les épaisseurs sont égales respectivement à 1,39 et $2,77 \mu\text{m}$ avec une rugosité importante. Ces oxydes reposent notamment sur un substrat en cuivre.
- La sous-région 4C comporte une forte quantité de carbone. La composition chimique de l'impureté n'est pas connue. Sa présence peut donc influencer la stœchiométrie de l'oxygène et fausser les résultats obtenus. Par conséquent, la simulation n'a pas été réalisée.

Simulations numériques des régions 2 et 3 - Centre de la zone de contact

Les régions 2 et 3 correspondent au centre de la zone de contact avec la présence exclusive de cuivre et d'éléments légers (voir figure 4.2 de la page 119). Six sous régions y ont été définies : 2A, 2B, 2C, 3A, 3B et 3C, voir figure 4.10.

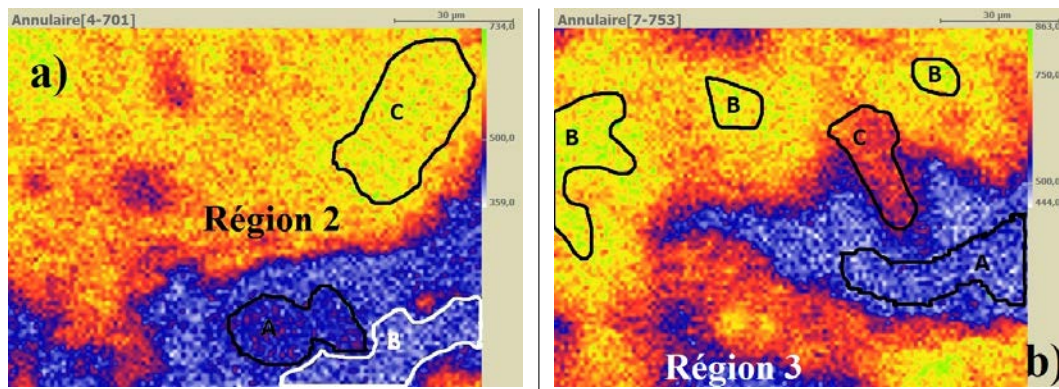


FIGURE 4.10 – (a) Cartographie de la régions 2 avec les sous-régions 2A et 2B. (b) Cartographie de la région 3 avec les sous-régions 3A, 3B et 3C.

Les spectres et les simulations numériques des sous-régions 2A, 2B, 2C, 3A, 3B et 3C sont indiqués sur la figure 4.11 de la page 127 et le tableau 4.3. Les observations sont les suivantes :

- Les sous-régions 2A, 2C, 3B et 3C sont composées d'une couche de l'oxyde de cuivre Cu_2O sur le substrat en cuivre. Les épaisseurs respectives sont égales à 13,8, 1,6, 1,20 et $7,9 \mu\text{m}$.
- La sous-région 2B est composée exclusivement de l'oxyde de cuivre Cu_2O sur toute l'épaisseur de l'interaction.
- La sous-région 3A est composée exclusivement d'un mélange d'oxyde de cuivre $\text{Cu}_{1,20}\text{O}$. Cette stœchiométrie correspond à 20% de Cu_2O et 80% de CuO .

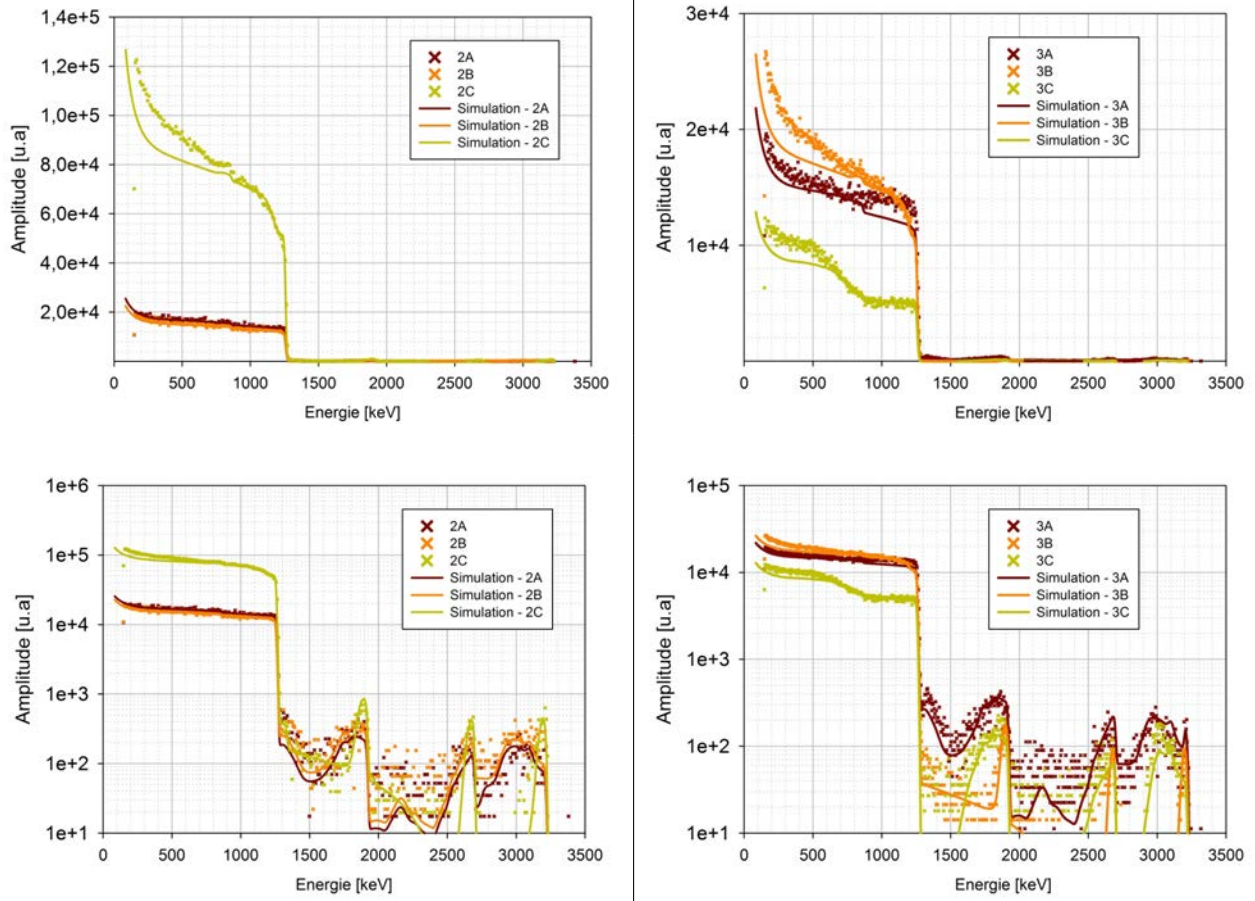


FIGURE 4.11 – Spectres RBS et NRA associés aux sous-régions 2A, 2B, 2C, 3A, 3B et 3C.

TABLE 4.3 – Compositions chimiques obtenues grâce aux simulations numériques des sous-régions 2A, 2B, 2A, 3A, 3B et 3C.

Sous-région	couche	épaisseur [μm]	rugosité	[Stoechiométrie]			
				Cu	Sn	O	C
2-A	1	13,8	0,04	0,65	0	0,325	0,025
2-A	substr.	inf	-	0,658	0	0,33	0,012
2-B	substr.	inf	-	0,64	0	0,32	0,04
2-C	1	1,58	1,19	0,643	0,0009	0,315	0,0409
2-C	substr.	inf	-	1	0	0	0
3-A	substr.	inf	-	0,53	0	0,44	0,03
3-B	1	1,20	0,79	0,637	0	0,323	0,04
3-B	substr.	inf	-	1	0	0	0
3-C	1	7,92	2	0,60	0	0,37	0,03
3-C	substr.	inf	-	1	0	0	0

En résumé, les oxydes de cuivre sont présents sur toute la zone de contact. Tout d'abord, les épaisseurs de ces couches d'oxydes varient d'une sous-région à l'autre. D'autre part, leurs valeurs sont relativement importantes. La zone centrale de la zone de contact semble plus dégradée car les épaisseurs d'oxydes sont plus importantes, notamment pour les sous-régions 2A et 3C. Plusieurs types d'oxydes sont présents à l'interface. En effet, les sous-régions 1A et 3A possèdent majoritairement du monoxyde de cuivre.

4.1.4 Conclusion sur l'analyse d'une zone de contact par la micro-sonde nucléaire

Une micro-sonde nucléaire a été utilisée pour la première fois afin d'analyser une trace de fretting-corrosion dans le domaine des contacts électriques. Autour de la zone de contact, les matériaux sont composés du substrat en cuivre, du composé inter-métallique et probablement d'étain. La variation des épaisseurs du composé inter-métallique définit des sous-régions de formes complexes. La zone de contact est entièrement dégradée et délimitée par l'absence d'étain. En effet, seul le cuivre, l'oxygène et le carbone sont présents. Les sous régions sont délimitées par des proportions différentes de plusieurs oxydes de cuivre.

Il est possible de connaître les éléments présents suivant leurs répartitions en profondeur. Par conséquent, deux types d'oxydes de cuivre ont été identifiés Cu_2O et CuO . La sous-région 3A comporte d'ailleurs environ 80% de CuO . Sa présence est probablement due à un échauffement local qui favoriserait sa cinétique chimique.

Les épaisseurs de ces oxydes peuvent atteindre plusieurs micro-mètres d'épaisseur. La dégradation de surface est alors importante. Il est probable que ces oxydes soient bloqués sur la zone de contact sans pouvoir être éjectés hors de la surface.

Les impuretés carbonées proviennent de l'huile de coupe du procédé de fabrication des connecteurs. Leurs concentrations les plus importantes sont situées aux limites de la zone de contact. Il se peut que ces impuretés soient écartées de la zone de contact sur les bords de la trace. Les valeurs de leurs concentrations restent faibles mais présentes sur l'ensemble de la zone de contact.

En perspectives, l'idée serait de pouvoir caractériser des zones de contact à différents stades de dégradations en lien avec l'évolution de l'état de surface en suivant par exemple la valeur de rugosité et des diverses structures de la surface.

4.2 Etude du fretting-corrosion par changement d'atmosphère

Le fretting-corrosion est une dégradation mécanique par formation d'un troisième corps. Ce dernier est composé de débris oxydés, durs et abrasifs s'il s'agit d'un revêtement étamé. Sous l'effet d'un mouvement relatif, un débris dégrade d'une part l'interface (revêtement, substrat) et d'autre part les autres débris [66] [43] [47] [67]. En effet, la taille des débris diminue au cours du temps par effet de concassage [68] [69]. Par conséquent, la formation de ces débris est issue de ces deux processus. Ces débris d'étain oxydés sont électriquement isolants et provoquent des perturbations électriques.

Malgré de nombreuses études, ces processus de formation et d'évacuation de ces débris sont partiellement compris [9]. Une question principale reste en suspens : les débris restent-ils bloqués à l'interface pour former un troisième corps ou sont-ils rapidement évacués hors de la zone de contact ? Pour y répondre, une atmosphère chimiquement inerte sera utilisée pour stopper leurs formations. Les expériences consisteront à étudier le comportement électrique d'un contact étamé soumis à des sollicitations vibratoires.

Une première partie étudiera le phénomène du fretting-corrosion sous enceinte suivant une atmosphère non-oxygénée et oxygénée. Une seconde partie étudiera la dynamique du comportement électrique en introduisant le gaz inerte dans une enceinte durant la phase expérimentale pour étudier la transition entre une atmosphère oxygénée et non-oxygénée. Une troisième partie consistera à étudier le comportement électrique non pas sous une enceinte mais via un flux de gaz inerte dirigé vers le contact.

4.2.1 Échantillons et procédés expérimentaux

Les échantillons sont des contacts de type clip-languette, composés d'un revêtement d'étain sur un substrat en cuivre. Le clip est relié à un actionneur piézo-électrique. Le courant est imposé par un générateur. Les mesures de tension de contact, de température et des caractéristiques I-V seront réalisées durant les expériences. Ces caractérisations permettront de définir le type de conduction électrique. Des analyses de surface seront également réalisées dans le but d'analyser la dégradation mécanique. Les deux conditions expérimentales utilisées sont $10 \mu\text{m}/10 \text{ Hz}$ ($0,0394 \text{ m.s}^{-2}$) et $25 \mu\text{m}/50 \text{ Hz}$ ($2,46 \text{ m.s}^{-2}$).

L'air est composé à 79% de di-azote. De ce fait, ce gaz est un candidat naturel pour les expériences. Ce gaz sera introduit grâce à deux moyens expérimentaux. Le premier utilise une enceinte qui englobe tout le dispositif expérimental. Le gaz est introduit par le haut de l'enceinte ce qui permet une bonne évacuation de l'air, voir figure 4.12.

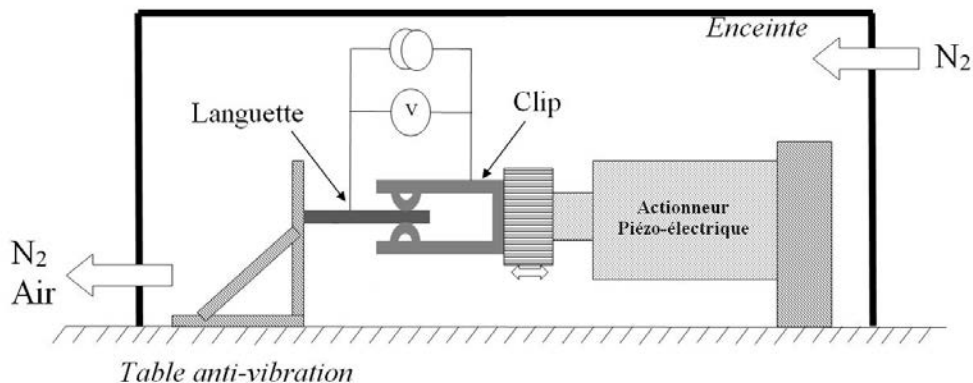


FIGURE 4.12 – Schéma du test expérimental avec la languette fixée à une console et le clip fixé à un actionneur piézo-électrique sous une enceinte avec l'arrivée du di-azote. L'étude sous air est réalisée dans les mêmes conditions sans imposer un flux de di-azote.

Le deuxième moyen expérimental utilise un tube en téflon placé à 2 cm du contact. De cette manière, il est possible d'alterner rapidement l'atmosphère autour du contact, voir figure 4.13.

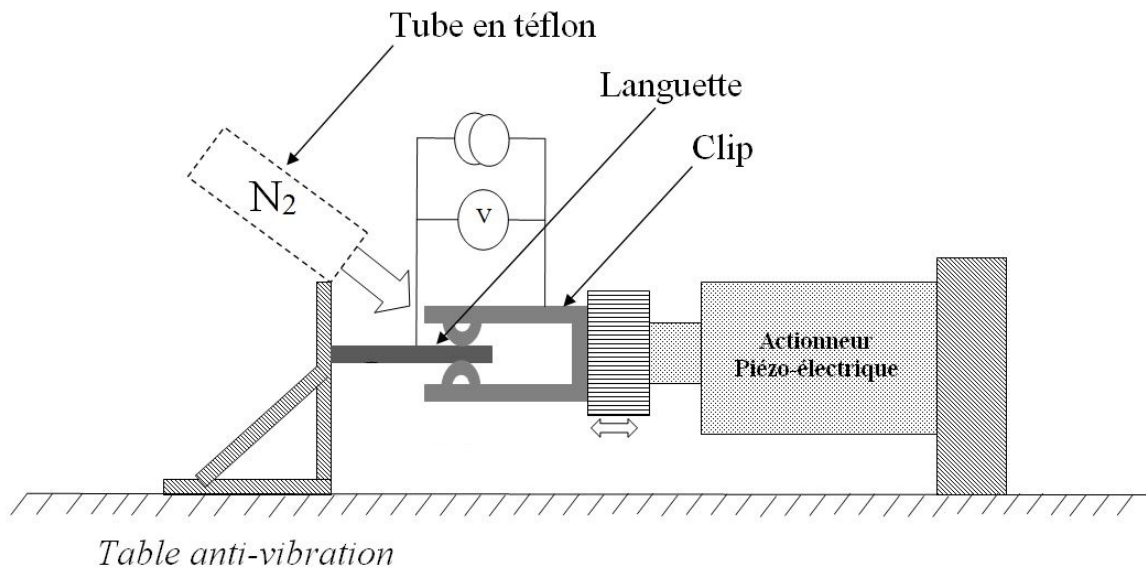


FIGURE 4.13 – Schéma du test expérimental avec la languette fixée à une console et le clip fixé à un actionneur piézo-électrique, le di-azote est introduit par un flux de gaz dirigé vers le contact.

4.2.2 Résultats sous enceinte

Etude électrique sous une enceinte contenant soit de l'air soit du di-azote

Cette première partie étudie le comportement électrique d'un connecteur étamé soumis à une vibration de $10 \mu m$, 20 Hz sous une atmosphère chimiquement inerte. Le di-azote est introduit 10 min avant le début du test expérimental. Par conséquent, l'oxygène est évacué de l'enceinte. Un second test expérimental a été mené sous air de manière à comparer les deux comportements électriques, voir figure 4.14.

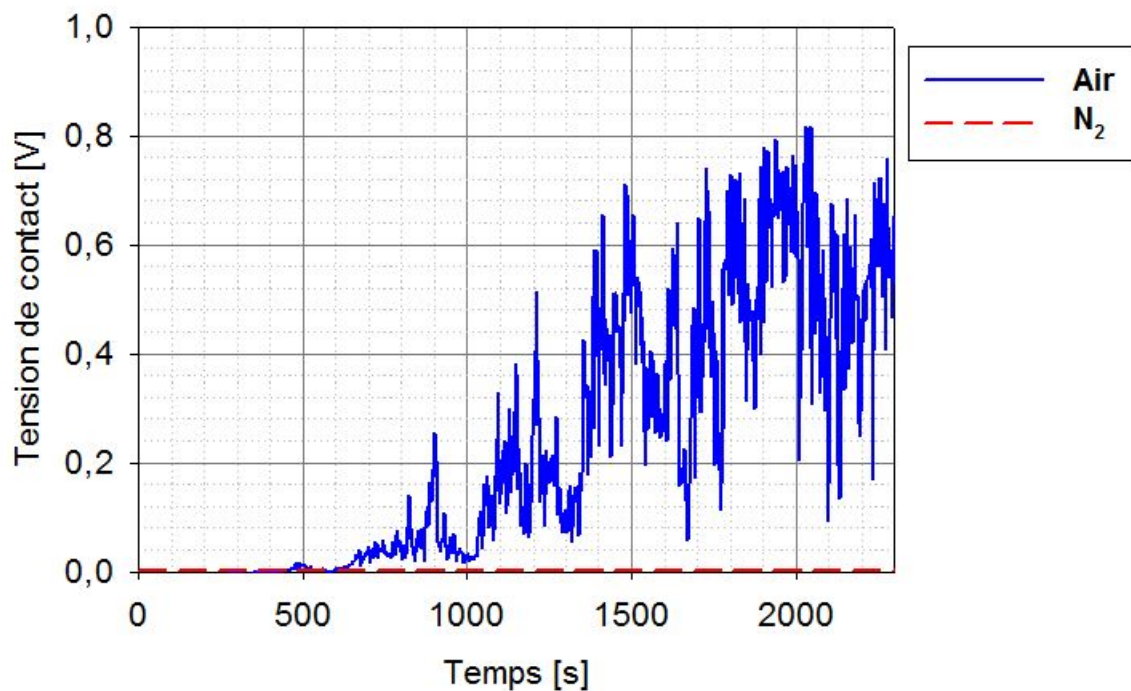


FIGURE 4.14 – Courbes de la tension de contact en fonction du temps sous d'une atmosphère d'air et une atmosphère de di-azote. Les conditions expérimentales sont $10 \mu m$, 20 Hz, 200 mA.

Les observations de la figure 4.14 de la page 130 sont les suivantes :

- Sous une atmosphère d'air, la tension de contact fluctue à partir de 500s puis augmente jusqu'à atteindre des valeurs supérieures à 0,6V à partir de 1500s. Il s'agit du comportement électrique classique d'un contact étamé [45].
- Sous une atmosphère de di-azote, la tension de contact est faible tout au long de l'expérience. Par conséquent, la conduction électrique est excellente. Cependant, l'échelle de la figure 4.14 est trop grande pour observer les fluctuations électriques. La figure 4.15 représente la même courbe avec une échelle plus adaptée au cas de l'azote. La tension de contact augmente légèrement de 8 à 12 mV entre 0 et 500 s, se stabilise entre 500 et 1150 s puis diminue jusqu'à se re-stabiliser à 10 mV. Les fluctuations sont donc très faibles et la conduction électrique excellente.

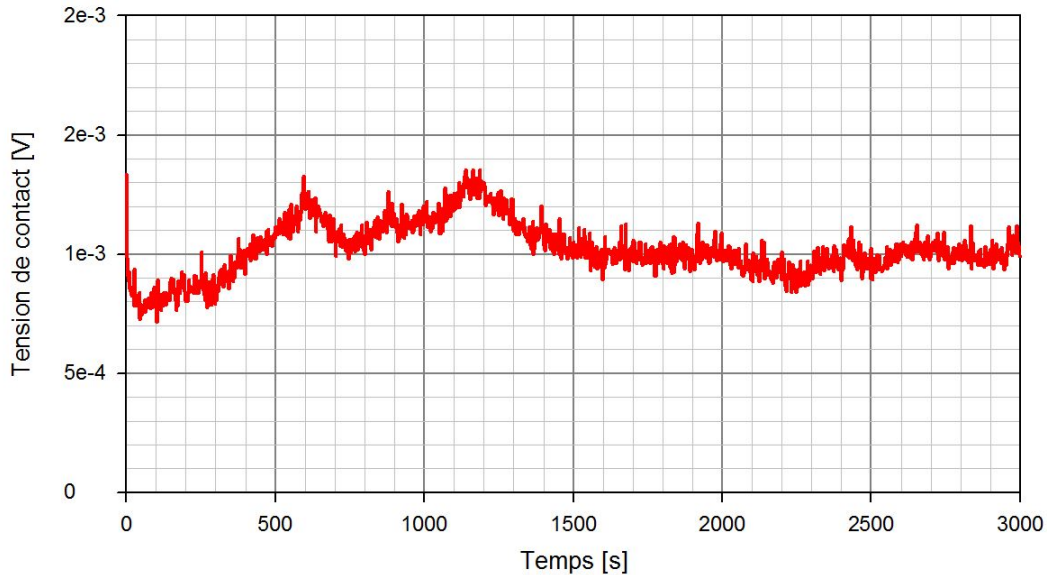


FIGURE 4.15 – Courbe de la tension de contact en fonction du temps sous une atmosphère de di-azote. Les conditions expérimentales sont $10 \mu m$, 20 Hz, 200 mA.

Les caractéristiques I-V permettent de définir si la conduction est ohmique ou non-ohmique. La durée d'acquisition doit être faible afin de ne pas enregistrer un changement soudain de la tension de contact. Pour cela, cette durée est fixée à 400 ms. Ces types de mesures ont été réalisés durant les expériences sous air et sous di-azote, voir les figures 4.16 et 4.17.

- Sous air et avant 500 s, l'allure des courbes I-V est linéaire. La conduction est donc ohmique.
- Sous air et après 500 s, les courbes I-V n'ont plus une allure linéaire. Elles atteignent rapidement un palier autour de 0,15 V. La conduction est non-ohmique.
- Sous une atmosphère de di-azote, l'allure générale des courbes est de type linéaire tout au long de l'expérience. De ce fait, la conduction est de type ohmique.

Avant 500 s, les pentes des deux caractéristiques I-V sous air augmentent ce qui indique une augmentation de la résistance de contact. A l'inverse, les pentes des caractéristiques I-V sous di-azote sont d'une part identiques tout au long de l'expérience et d'autre part de valeurs plus faibles que sous air. La conduction n'est donc pas perturbée sous une atmosphère de di-azote.

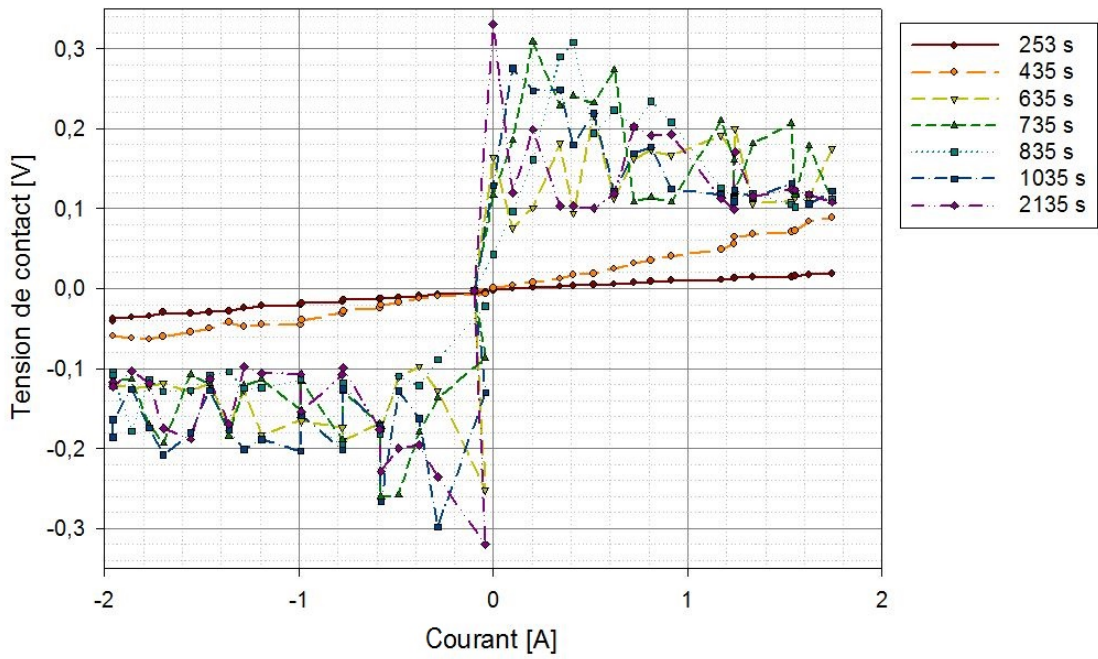


FIGURE 4.16 – Caractéristiques I-V relevées à différents moments entre un clip et une languette soumis à un déplacement relatif de $10\ \mu m$, 20 Hz sous une atmosphère d’air.

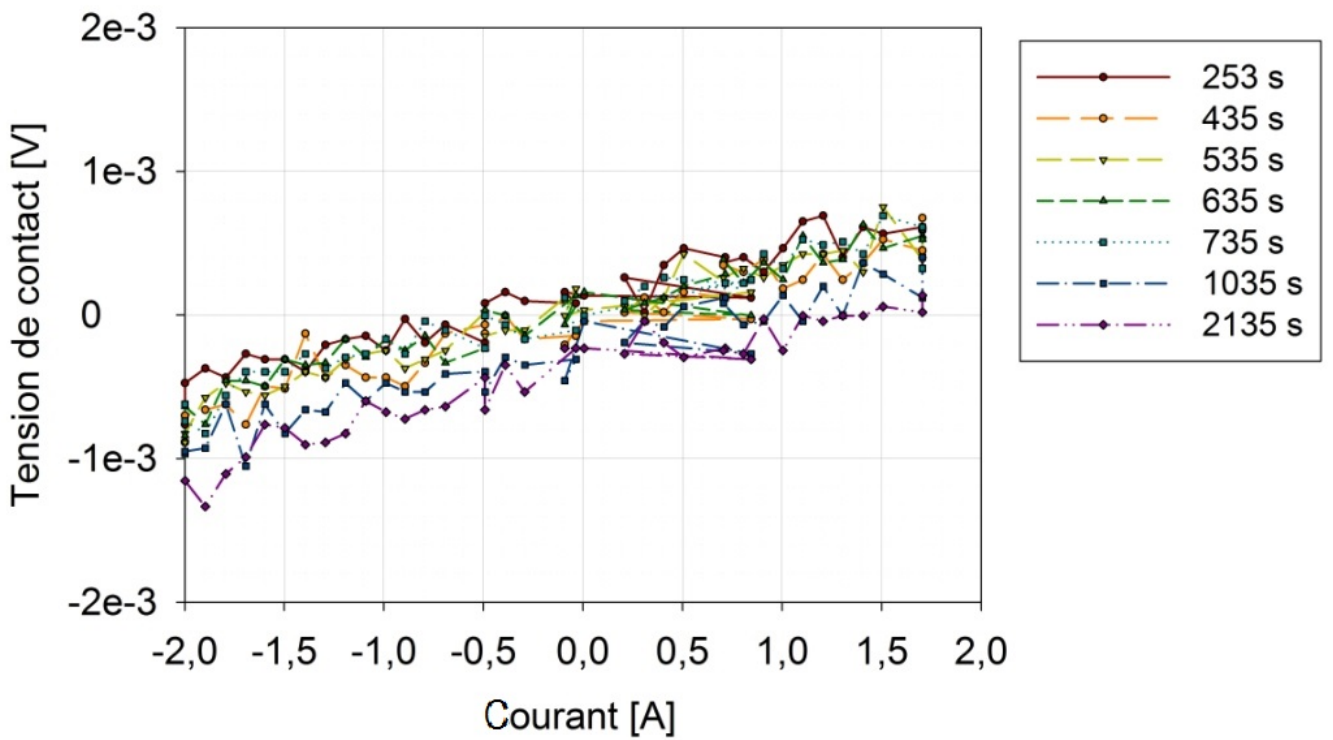


FIGURE 4.17 – Caractéristiques I-V relevées à différents moments entre un clip et une languette soumis à un déplacement relatif de $10\ \mu m$, 20 Hz sous une atmosphère de di-azote.

Étude électrique sous air puis sous di-azote

Cette deuxième partie étudie le comportement électrique d'un contact étamé en réalisant une transition d'atmosphère air/di-azote au cours de la même expérience. La vibration imposée est de $25 \mu m$ à 50 Hz. La figure 4.18 indique la tension de contact au cours du temps. Le di-azote est introduit dans l'enceinte à partir de 500 s.

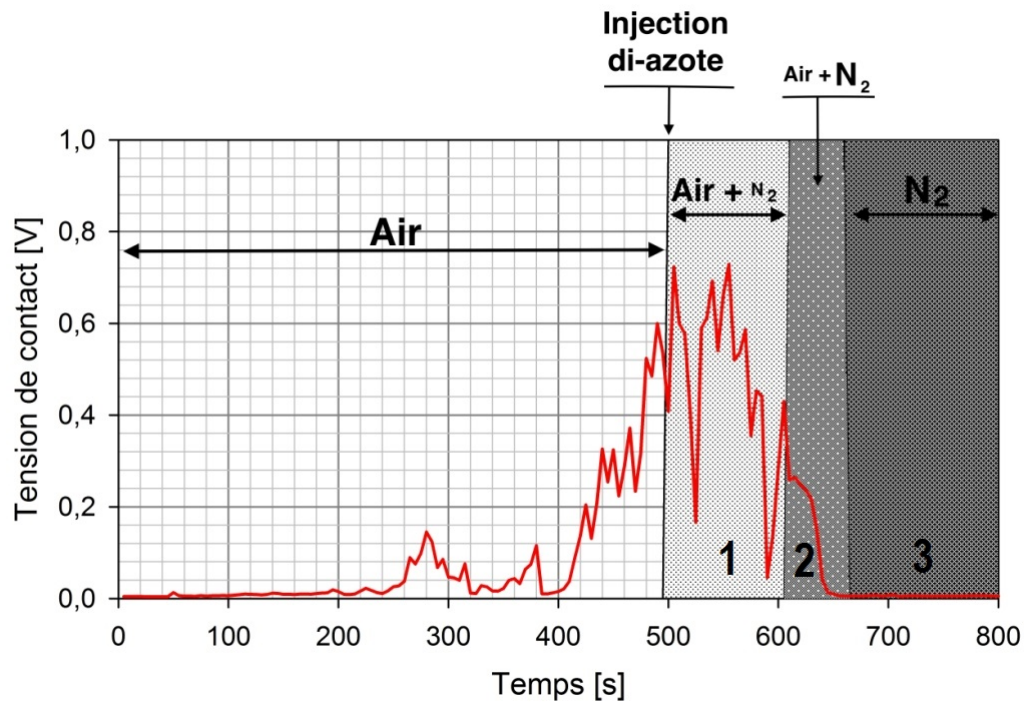


FIGURE 4.18 – Mesure de la tension de contact en fonction du temps. L'atmosphère est entièrement composée d'air jusqu'à 500s puis le di-azote est introduit. La zone hachurée 1 correspond à des fluctuations importantes de la tension de contact. Les zones hachurées 2 et 3 correspondent à l'absence de fluctuations de la tension de contact. Les conditions expérimentales sont $25 \mu m$, 50 Hz ($2,46 m.s^{-2}$), 200 mA.

Les observations de la figure 4.18 indiquent une stabilisation puis une diminution des fluctuations électriques suite à l'introduction du di-azote :

- Jusqu'à 250s, la tension de contact est faible.
- Entre 250s et 500s, la tension de contact fluctue et augmente jusqu'à atteindre 0,6 V. A ce stade, le contact est fortement dégradé. Le troisième corps est composé d'oxydes de cuivre [70]. Cette partie de la courbe est typique d'une dégradation par fretting-corrosion.
- Entre 500s et 610s, la tension de contact fluctue toujours mais diminue pour atteindre 0,4V (zone hachurée 1 de la figure 4.18). L'introduction du di-azote dans l'enceinte implique une diminution progressive de l'oxygène. De ce fait, la formation de débris oxydés est toujours possible.
- Entre 610s et 650s, la tension de contact diminue sans fluctuer pour atteindre une valeur proche de zéro (zone hachurée 2 de la figure 4.18). Cette caractéristique met en évidence une zone de contact moins dégradée. En effet, la concentration en débris est moins importante à l'interface. Par conséquent, la concentration en oxygène est faible.
- A partir de 650, la tension de contact est faible (zone hachurée 3 de la figure 4.18).

La concentration en oxygène de l'atmosphère sous enceinte n'est pas connue. Par conséquent, il est difficile de définir quand a eu lieu l'arrêt exact de l'oxydation des débris et donc leur formation. Néanmoins, l'introduction du di-azote dans l'enceinte a permis d'obtenir une tension de contact proche de zéro sur une durée 150s. Il est d'ailleurs probable que l'oxygène ne soit plus présent autour du contact dès 610s. En effet, les fluctuations de la tension de contact ne sont plus visibles.

Il aurait fallu 40 s pour évacuer tous les débris d'une interface dégradée. La dynamique d'évacuation serait relativement rapide. L'évacuation des débris est un processus continu durant la dégradation par fretting-corrosion. En effet, la tension de contact est quasi nulle à partir de 650s. Par conséquent, la majorité des débris a été éjectée.

Avant 610 s, les débris se sont accumulés entre le clip et la languette sur la zone de contact par des processus de formation et d'éjection, et ce de manière continue [43]. L'arrêt du processus de formation durant ces 40 s indique que le processus d'évacuation des débris est important.

Analyse des surfaces des échantillons sous enceinte

Les zones de contact des échantillons sous enceinte ont été analysées au MEB. Les atmosphères expérimentales des échantillons de la figure 4.19 sont respectivement le di-azote et l'air.

- La trace sous une atmosphère de di-azote montre quelques débris situés autour de la trace. En effet, la zone de contact n'est pas dégradée. Par conséquent, l'introduction du di-azote a bien empêché l'oxydation du revêtement. Les oxydes présents autour de la trace ont pu être formés avant l'expérience et évacués dès les premières vibrations.
- La trace sous une atmosphère d'air est fortement dégradée. En effet, les débris sont présents autour et sur la zone de contact. Leur concentration est relativement importante.

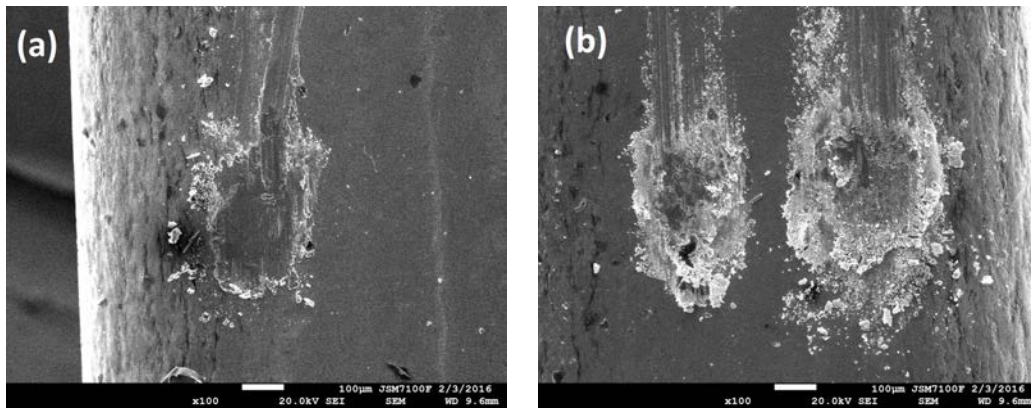


FIGURE 4.19 – Photographie MEB d'une zone de contact sur la languette sous une atmosphère de di-azote (a) et sous une atmosphère d'air où se trouvent deux points de contact (b).

La figure 4.20 de la page 135 est une analyse chimique par EDX des trois échantillons réalisés sous enceinte suivant trois conditions atmosphériques différentes : air, di-azote et air ↔ di-azote. Les cartographies représentent les éléments étain, cuivre, oxygène et azote. Les observations sont les suivantes :

- L'étain est absent de la zone de contact pour les trois cas atmosphériques.
- Le cuivre du substrat apparaît sur la zone de contact pour les trois cas atmosphériques. Dans les cas où l'air est présent, le cuivre est également présent autour de la zone de contact avec la présence des débris de cuivre oxydés.
- La répartition de l'oxygène dépend des conditions atmosphériques :
 - Sous air, les proportions d'oxygène sont à mettre en relation avec les proportions de cuivre. Dès lors, la zone de contact comporte des oxydes de cuivre en surface.
 - Sous di-azote, la zone centrale ne comporte pas d'oxygène. L'oxydation du cuivre n'a pas eu lieu.
- La répartition en azote est quasi-inexistante sur chacune des traces.

Les zones de contact sont dégradées quelles que soient les conditions atmosphériques et donc malgré l'absence d'oxydes. De plus, les dimensions des traces de fretting sont identiques dans les deux cas. Par conséquent, la dégradation d'une zone de contact ne dépend pas seulement de la présence d'oxydes à l'interface.

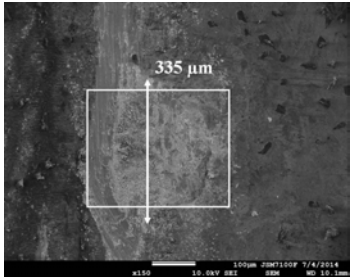
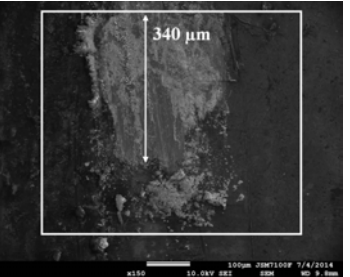
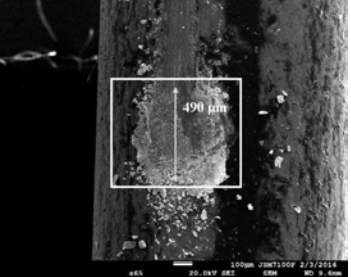
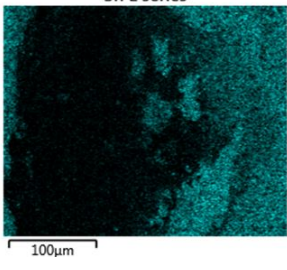
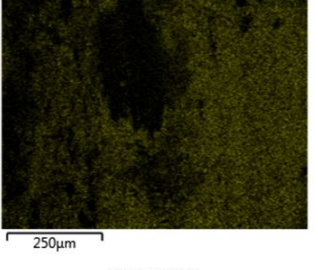
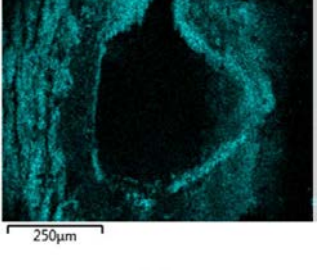
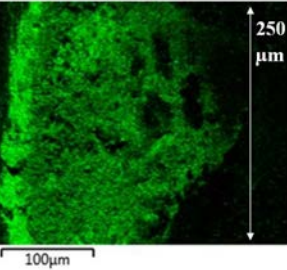
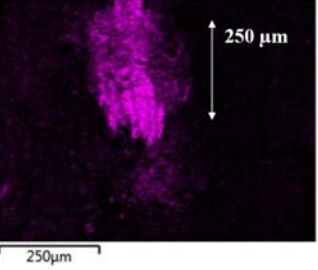
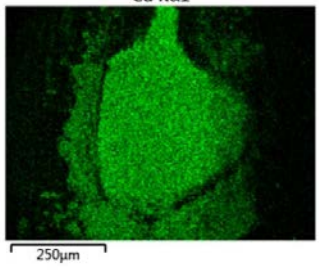
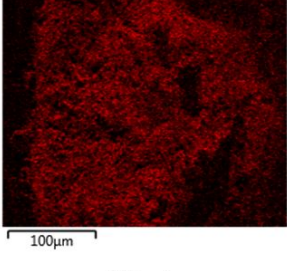
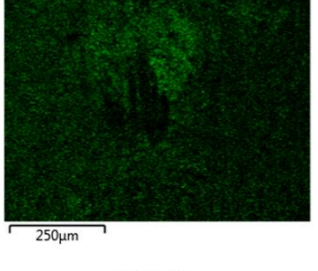
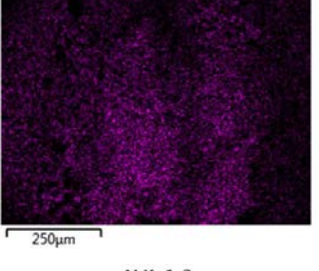
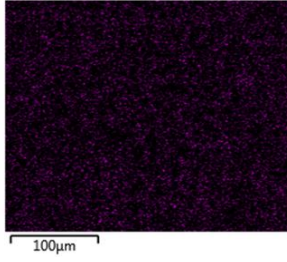
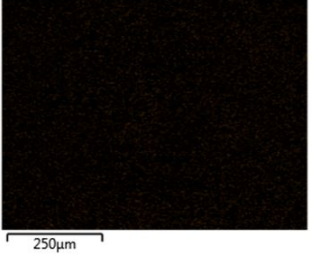
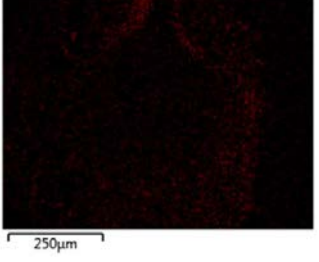
	Air	N ₂	air → N ₂
	10 μm 10 Hz		25 μm 100 Hz
Imagerie Electron secondaire			
Cartographie Etain			
			
Cartographie Cuivre			
			
Cartographie Azote			

FIGURE 4.20 – Analyse MEB des languettes des échantillons sous une atmosphère air et diazote (condition : 10 μm, 10 Hz) et sous une atmosphère transitoire air → di-azote (condition : 25 μm, 50 Hz).

4.2.3 Étude de la dynamique du comportement électrique

Cette troisième partie étudie le comportement électrique de contact étamé soumis à des sollicitations vibratoires en utilisant un flux de di-azote. L'objectif de cette méthode est de permuter rapidement entre une atmosphère inerte et oxygénée, voir figure 4.13 de la page 130.

Influence d'un flux d'air et de di-azote

La tension de contact est mesurée sous une des trois conditions atmosphériques : atmosphère d'air, flux d'air et flux de di-azote pour des conditions expérimentales identiques ($10 \mu m$, 20 Hz, 200 mA), voir figure 4.21.

- Sous air, les fluctuations de la tension de contact commencent à partir de 400 s. Ensuite, la tension de contact augmente. Il n'y a aucune différence entre un flux d'air et une atmosphère d'air. Le flux n'influence donc pas le comportement électrique.
- Sous un flux de di-azote, le comportement électrique indique une excellente conduction comme c'est le cas sous-enceinte, voir figure 4.14 de la page 130.

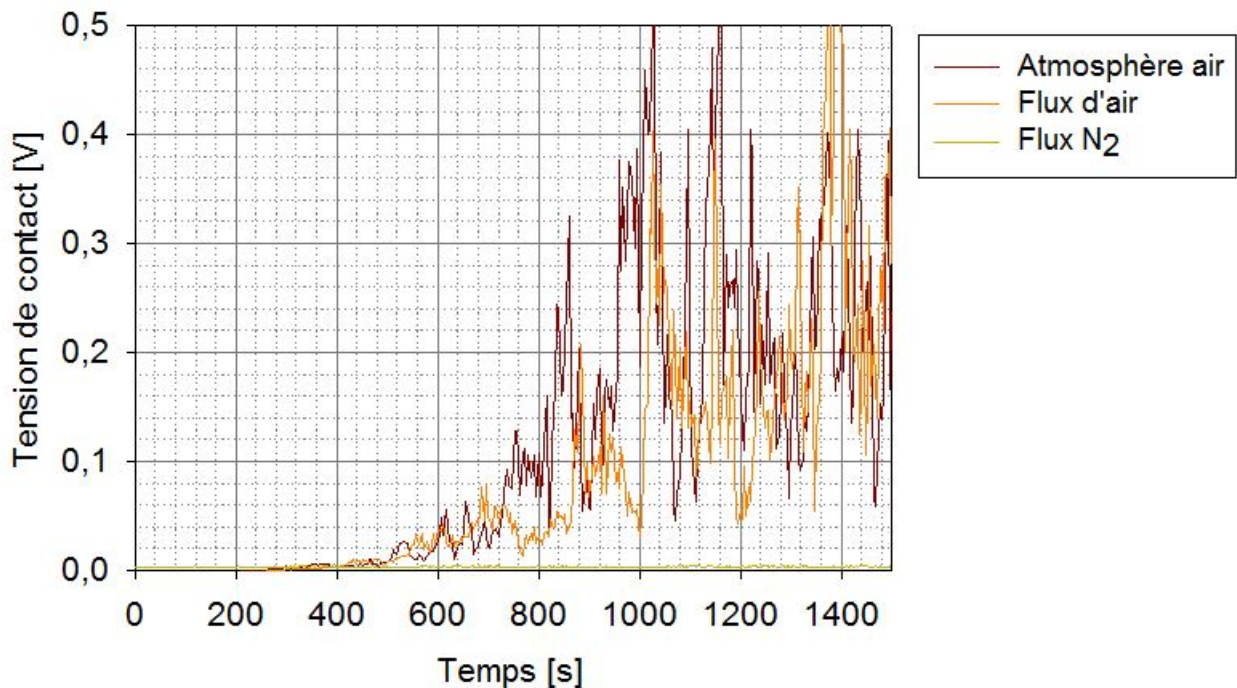


FIGURE 4.21 – Mesure de la tension de contact en fonction du temps sous une atmosphère d'air, un flux d'air comprimé et un flux de di-azote. Les conditions expérimentales sont $10 \mu m$, 20 Hz, 200 mA.

Analyse du comportement électrique en alternant flux de di-azote et une atmosphère d'air.

L'étude de la dynamique de la tension de contact est réalisée en alternant une atmosphère d'air et un flux de di-azote. Les mesures de la tension de contact en fonction du temps sont indiquées sur la figure 4.22. Les zones grises correspondent à l'injection du di-azote. La tension de contact augmente sous air puis diminue dès l'introduction du flux d'azote tandis que l'arrêt du flux coïncide avec une augmentation immédiate de la tension de contact.

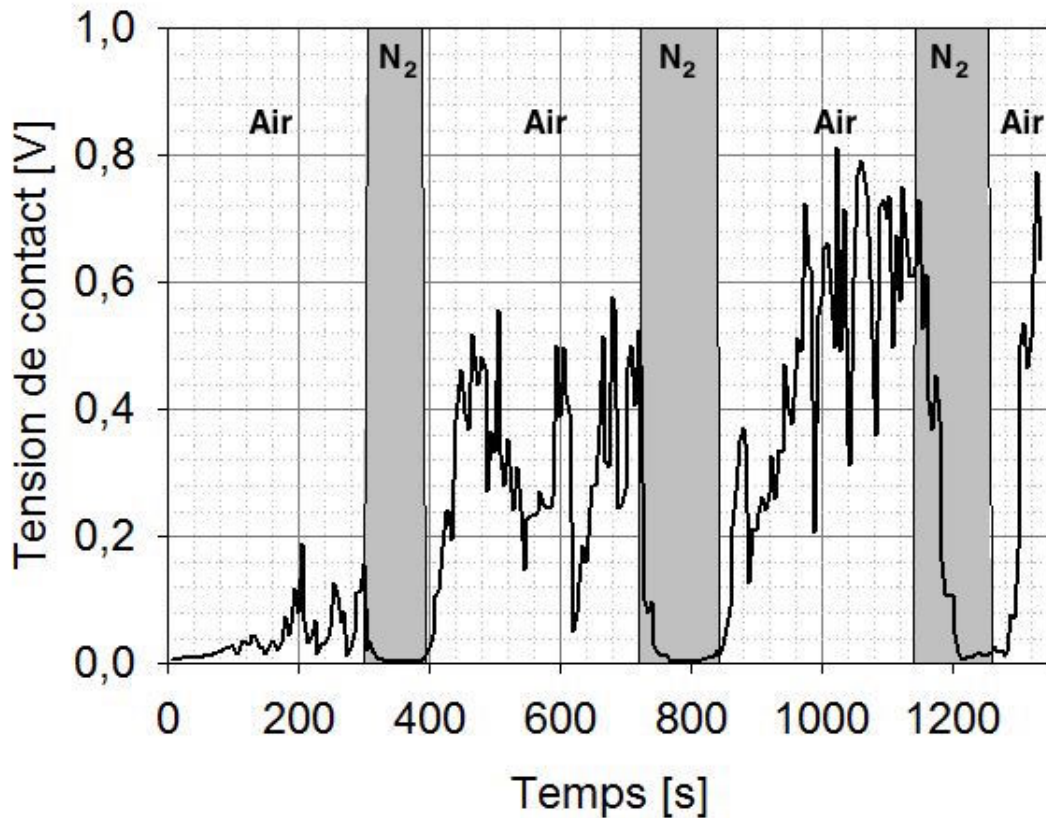


FIGURE 4.22 – Mesure de la tension de contact par alternance d’atmosphères. Les zones grises correspondent à l’injection du flux d’azote.

Dans le but d’étudier le type de conduction, quatre caractéristiques I-V ont été réalisées avant (710s), au début (744s), durant (820s) et suite (923s) à la deuxième injection de di-azote, voir figure 4.23. Le courant varie de -1A à +1A par pas de 50mA, voir figure 4.24. Ces quatre temps ont été choisis en fonction des valeurs de la tension de contact. En effet, la tension de contact est égale à 0,5V attestant une conduction à travers le troisième corps composé d’oxydes de cuivre [70]. De plus, la caractéristique I-V avant l’injection du di-azote n’est pas linéaire. De ce fait, la conduction n’est pas ohmique.

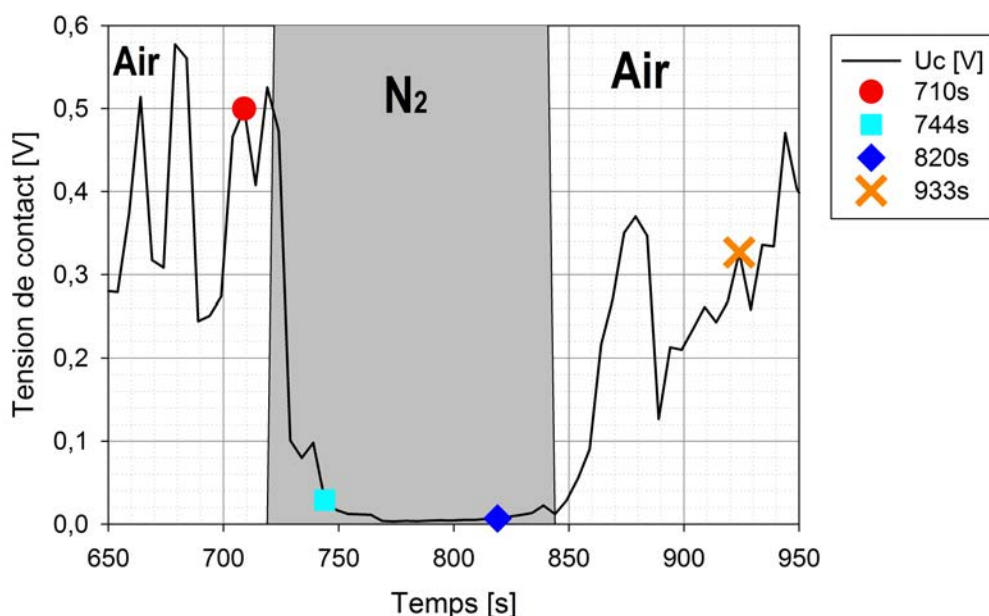


FIGURE 4.23 – Points de mesures des caractéristiques I-V.

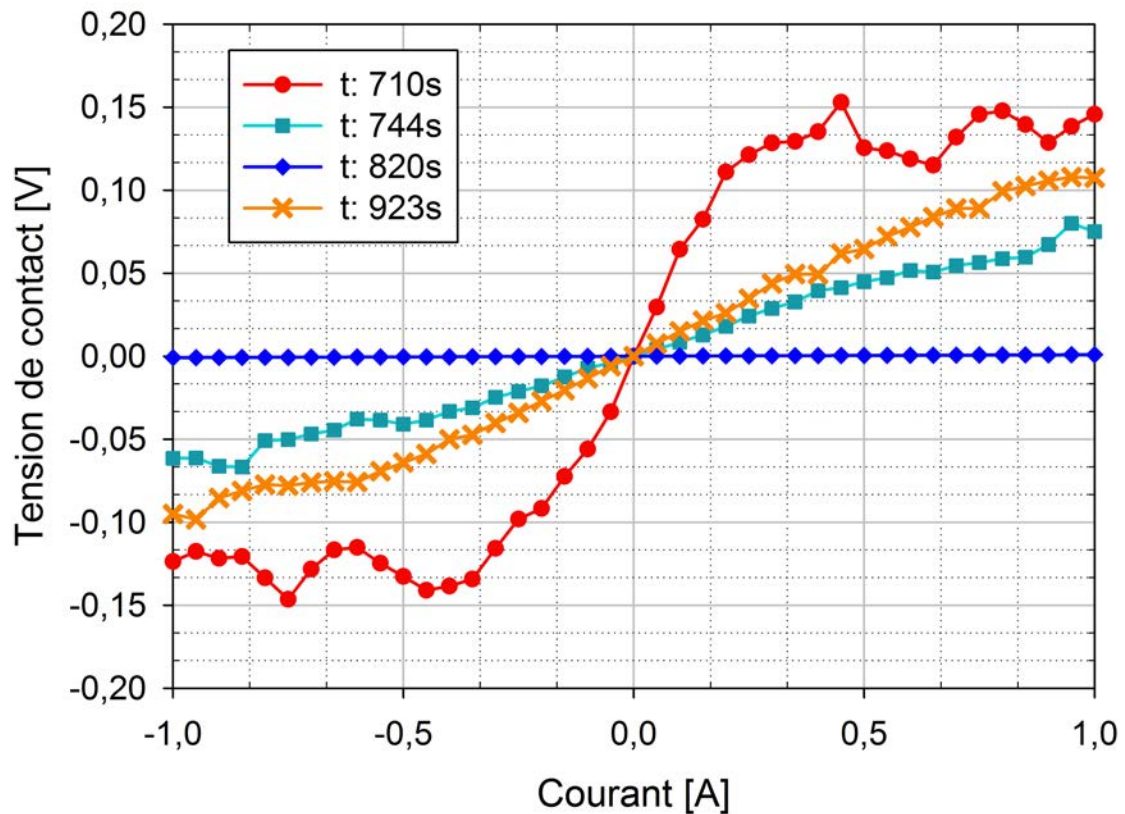


FIGURE 4.24 – Caractéristiques I-V à quatre instants différents : avant, début, durant et après la deuxième injection de di-azote.

Sous di-azote, les analyses des caractéristiques IV à 744s, 820s et 923s indiquent les deux points suivants :

- Les courbes des caractéristiques IV sont linéaires. Par conséquent, la conduction est de type ohmique. Dès lors, l'aire de contact électrique est suffisamment grande pour permettre la conduction des charges.
- Les pentes des courbes à 744s et 820s sont plus importantes que la pente à 820 secondes. De ce fait, l'amélioration et la dégradation de la conduction électrique par la présence de débris oxydés sont des phénomènes évolutifs. Par exemple, l'introduction du di-azote induit une baisse immédiate de la tension de contact. Étant donné que la formation de débris est stoppée, l'évacuation immédiate des premiers débris implique l'apparition d'une zone de contact électrique. Cette zone s'agrandira au cours du temps. Cette permutation d'atmosphère met en valeur la dynamique d'apparition d'une aire de contact électrique liée à l'évacuation/éjection des oxydes de cuivres. Ce phénomène est observable que l'on soit sur un contact étain-étain ou cuivre-cuivre.

Étude de la dynamique de la tension de contact

Les figures 4.25 et 4.26 indiquent les courbes expérimentales de la tension de contact où l'atmosphère est alternée. Les conditions expérimentales sont les suivantes : $10\ \mu\text{m}$, 10 Hz, 200 mA et $25\ \mu\text{m}$, 50 Hz, 1A. L'objectif de cette sous-partie est d'étudier les variations de la tension de contact suite au démarrage et l'arrêt d'injection du di-azote.

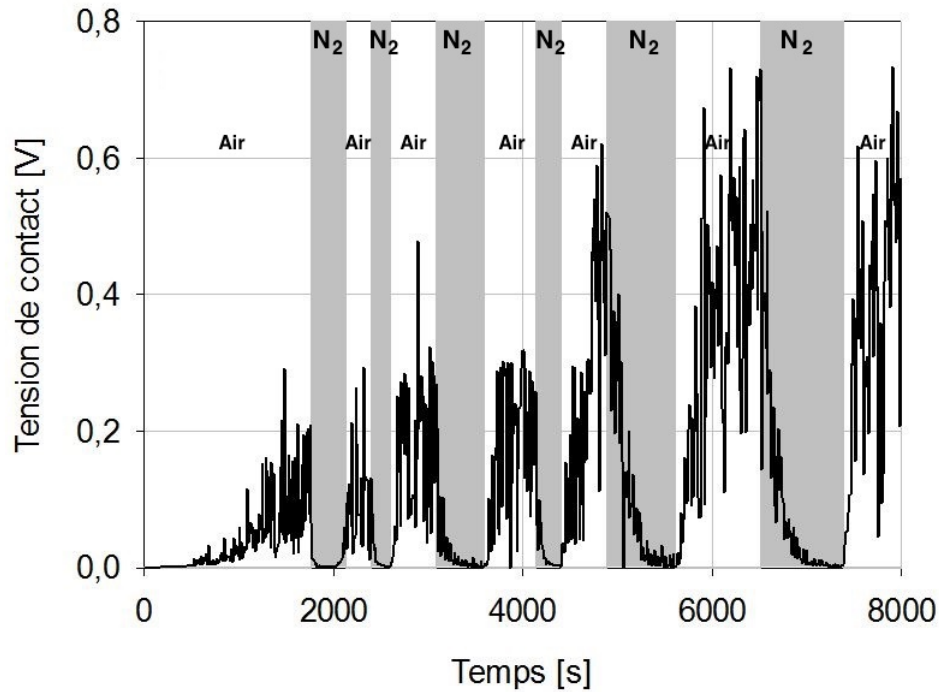


FIGURE 4.25 – Mesure de la tension de contact en alternant le flux d'azote et l'atmosphère d'air ($10\ \mu\text{m}$ - 10 Hz).

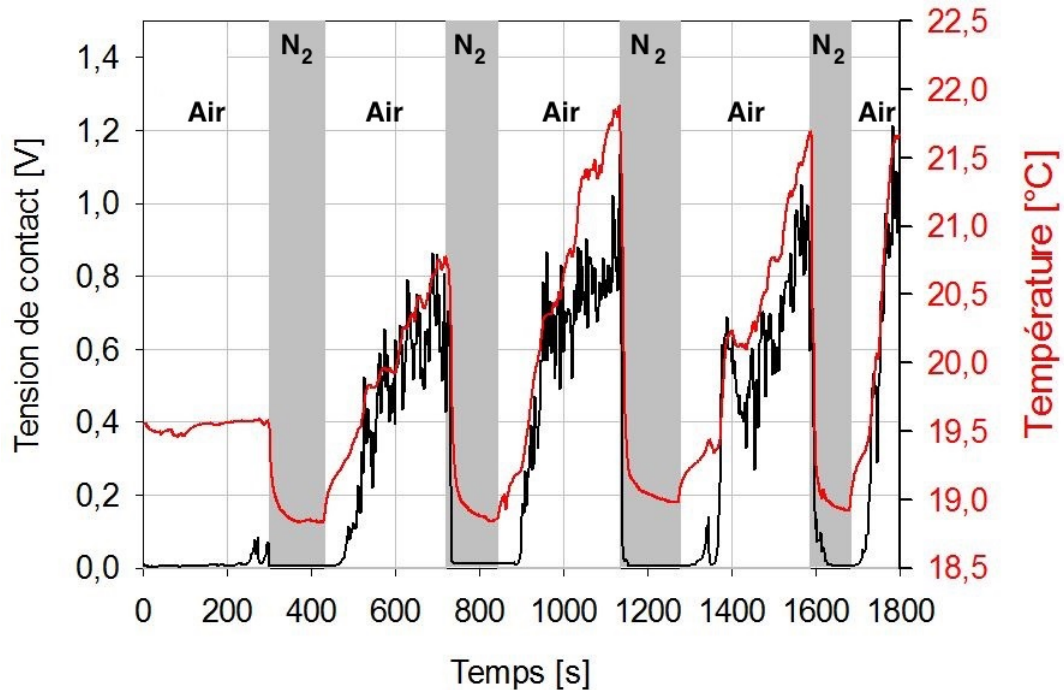


FIGURE 4.26 – Mesure de la tension de contact en alternant le flux d'azote et l'atmosphère d'air ($25\ \mu\text{m}$ -50 Hz).

Dans ces deux conditions expérimentales, les décroissances de la tension U sont similaires i.e. de type exponentielle, voir les figures 4.27 et 4.28. Cette variation de la tension de contact dépend directement des conditions initiales i.e. l'état de dégradation. Par conséquent, cette décroissance suit la solution d'une équation différentielle de premier ordre, voir les équations 4.1 et 4.2. Le coefficient U_0 est la condition initiale et τ est la constante de décroissance. Le tracé de chaque courbe extrapolée est réalisé par le logiciel de calcul Sigmaplot.

$$\frac{dU(t)}{dt} = -\tau.U(t) \quad (4.1)$$

$$U(t) = U_0 \exp(-\tau t) \quad (4.2)$$

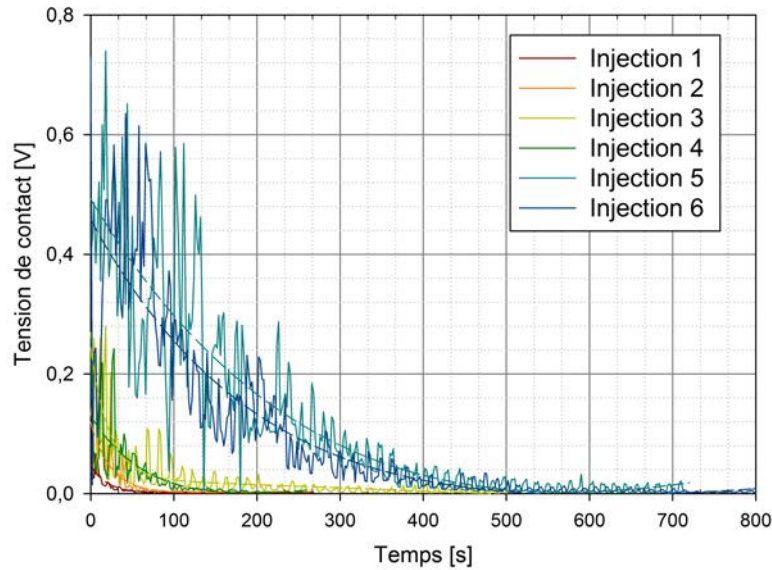


FIGURE 4.27 – Diminution de la tension de contact par introduction du di-azote suivant les conditions expérimentales suivantes : $10 \mu\text{m}$ -20 Hz. Chaque courbe est extrapolée.

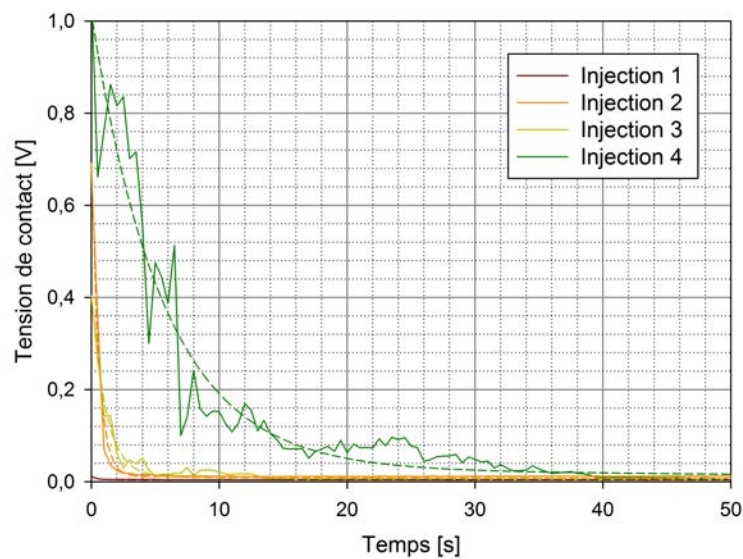


FIGURE 4.28 – Diminution de la tension de contact par introduction du di-azote suivant les conditions expérimentales suivantes : $25 \mu\text{m}$ -50 Hz. Chaque courbe est extrapolée.

Les coefficients des décroissances exponentielles sont regroupés dans les tableaux 4.4 et 4.5. En premier lieu, les coefficients U_0 et τ correspondent aux décroissances exponentielles. En deuxième lieu, les coefficients U_a et U_b correspondent à la partie linéaire, voir l'équation 4.3. En effet, la tension de croissance diminue de manière linéaire suite à la décroissance exponentielle. Par conséquent, il a été nécessaire de rajouter cette composante linéaire pour extrapoler l'ensemble des résultats expérimentaux. Les valeurs de ces coefficients sont toutes faibles. De ce fait, ils ne présentent pas une influence notable, ils ne seront donc pas étudiés par la suite.

$$U(t) = U_0 e^{-\tau t} + U_a t + U_b \quad (4.3)$$

TABLE 4.4 – Coefficients des décroissances exponentielles composés avec des décroissances linéaires dans la cas d'une sollicitation vibratoire sinusoïdale de $10 \mu m$, 10 Hz sous un flux de di-azote.

Injection	Temps [s]	U_0 [V]	τ [s^{-1}]	U_a [V]	U_b [V]	R^2
1	1760	0,0468	-0,05	2,07e-6	0,0005	0,786
2	2400	0,1193	-0,0411	1,265e-5	-0,0002	0,82
3	3090	0,218	-0,0447	5,31e-5	0,0256	0,689
4	4140	0,1754	-0,0138	0,0002	-0,0452	0,545
5	4190	1,0069	-0,0029	0,0006	-0,5145	0,806
6	6400	0,6008	-0,0046	0,0002	-1,1427	0,804

TABLE 4.5 – Coefficients des décroissances exponentielles composés avec des décroissances linéaires dans la cas d'une vibration sinusoïdale de $25 \mu m$, 50 Hz sous un flux de di-azote.

Injection	Temps [s]	U_0 [V]	τ [s^{-1}]	U_a [V]	U_b [V]	R^2
1	300	0.0066	-2,3568	-3.96e-7	0.0044	0.8505
2	729	0.6804	-1.766	9,78e-6	0,0112	0.9855
3	1139	0.3937	-0.8791	-5.087e-5	6.267 e-4	0.9765
4	1587	0,9893	-0.1781	-0.0002	0.0265	0.9704

Le coefficient U_0 correspond à la valeur de la tension de contact au début de l'injection de di-azote sur le contact. Globalement, sa valeur augmente au cours du temps dans le cadre des deux expériences. Cependant, elle peut aussi diminuer comme c'est le cas entre la 5ième et 6ième injection de la première expérience. En effet, sa valeur dépend de la valeur de la tension de contact avant l'injection de di-azote.

La constante de temps τ diminue au cours du temps. En effet, plus la dégradation est importante, plus il faut du temps pour évacuer les débris.

— Pour l'expérience 1, $10 \mu m$ -10 Hz, le coefficient est compris entre $-0,05 s^{-1}$ et $-0,0046 s^{-1}$.

— Pour l'expérience 2, $25 \mu m$ -50 Hz, le coefficient est compris entre $-2,35 s^{-1}$ et $-0,18 s^{-1}$.

Ces différences entre les constantes de temps sont évidemment dues aux conditions vibratoires. En effet, $10 \mu m$ -20 Hz équivaut à une accélération maximale de $0,16 m.s^{-2}$ (vitesse maximale de $0,001 m.s^{-1}$) tandis que $25 \mu m$ -50 Hz équivaut à une accélération maximale de $2,46 m.s^{-2}$ (vitesse maximale de $0,01 m.s^{-1}$). Par conséquent, les débris sont évacués plus rapidement dans l'expérience 2 que l'expérience 1.

Conclusion de l'utilisation d'un gaz inerte pour étudier un contact électrique.

L'injection de di-azote sur un contact sous sollicitation vibratoire induit une variation de la tension de contact. D'une part, la décroissance de la tension de contact est instantanée. Par conséquent, l'apparition d'une première zone de contact électrique est rapide. D'autre part, cette décroissance est continue, la taille de cette zone augmente donc de manière continue. Ensuite, les fluctuations électriques sont inexistantes durant cette décroissance. Les surfaces de contact électriques sont donc stables lors de la décroissance. Et enfin, la tension de contact devient quasi-nulle. Par conséquent, les débris oxydés sont absents de l'interface. En effet, ils ne s'accumulent pas à l'interface.

La formation de composés oxydés est inhibée sous une atmosphère inerte. Par conséquent, il ne reste que l'évacuation des débris existants en dehors de la zone de contact. Le contact électrique à travers le troisième corps est remplacé par un contact stable à travers un matériau pur. Ce contact s'effectue donc à travers des spots de contact et/ou des débris purs. Pour ces deux expériences, la durée pour atteindre une tension de contact proche de zéro prend de plus en plus de temps. Il est probable que la quantité d'oxydes soit plus importante, liée à une dégradation plus avancée.

L'accélération et la vitesse du déplacement entre le clip et la languette sont plus importantes pour la deuxième expérience que pour la première. De ce fait, l'énergie et la force sont également plus importantes. En effet, l'évacuation des débris est plus rapide pour la deuxième expérience que pour la première.

Ces expériences ont permis de mettre en avant de nombreuses informations sur la dynamique de la tension de contact et les processus d'évacuation du troisième corps. En perceptive, l'observation des débris durant des sollicitations vibratoires apporterait de nouvelles informations. En parallèle, les débris devraient être analysés à différents stades de dégradation.

4.3 Analyse spatio-temporelle du signal électrique

Les perturbations électriques d'un contact étamé sont dues à la présence de débris oxydés à l'interface. Ces perturbations sont mises en évidence en mesurant la tension au contact du clip et de la languette. Avec un voltmètre, la mesure est moyennée sur plusieurs aller-retour entre le clip et la languette. Cette technique de mesure est suffisante et efficace pour évaluer l'état de dégradation d'une zone de contact.

La tension de contact n'est cependant pas uniforme le long d'une zone de contact [71] [70]. En effet, les débris sont éjectés et s'accumulent autour de la zone de contact. La tension de contact est donc plus importante au début et à la fin de la zone de contact qu'au milieu. L'objectif est d'analyser l'évolution de la tension de contact en fonction de sa position le long d'une zone de contact. Pour cela, la résolution temporelle de la mesure est diminuée pour atteindre la dizaine de micromètre. De là, une séquence de 5000 points de mesure de la tension de contact est réalisée sur un aller-retour entre le clip et la languette soit un cycle vibratoire, voir figure 4.29.

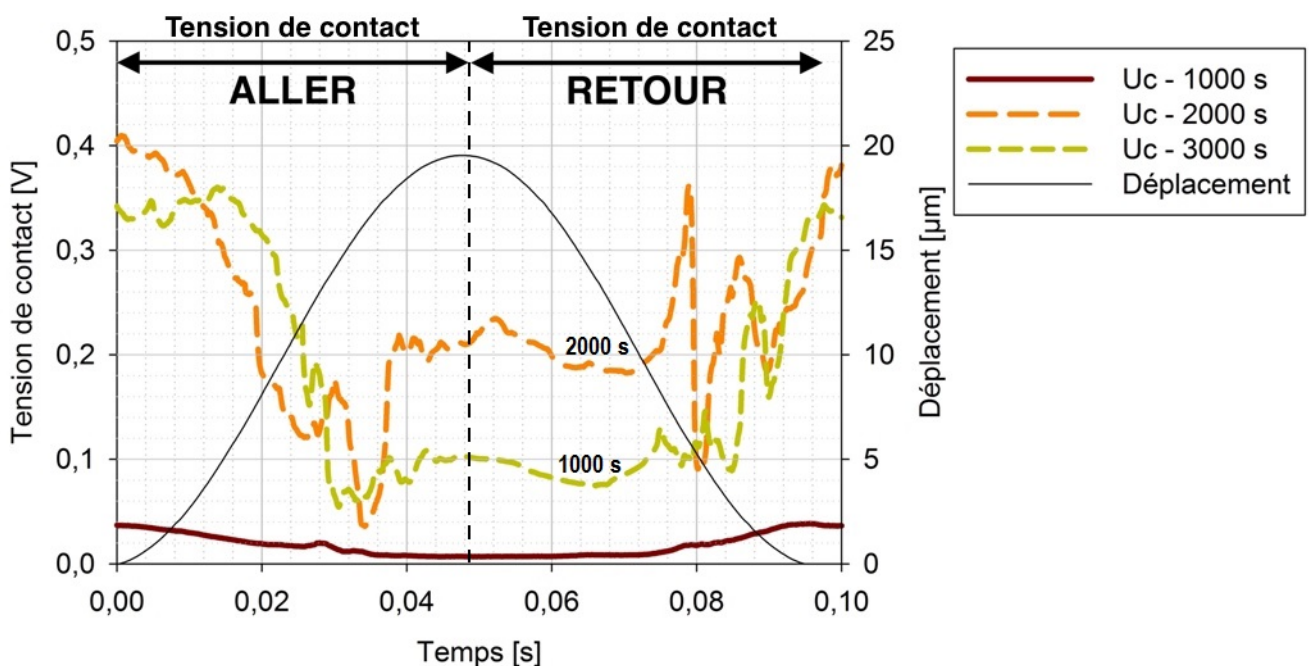


FIGURE 4.29 – Plusieurs mesures de tension de contact en temps réel relevées à 1000, 2000 et 3000 s pour un contact étain-étain suivant les conditions expérimentales suivantes : $10\ \mu\text{m}$, 10 Hz, 500 mA.

4.3.1 Présentation des échantillons et des conditions expérimentales.

Les expériences sont réalisées sur des échantillons de type clip-languette sur le banc d'essai de l'actionneur piézo-électrique. Le courant imposé à travers le clip et la languette est de 500 mA. Les caractéristiques expérimentales sont indiquées dans le tableau 4.6. La tension de contact est acquise durant un aller-retour avec une résolution temporelle de l'ordre de la 40 μs .

TABLE 4.6 – Conditions expérimentales des deux expériences.

	Connectique	Atmosphère	Conditions vibratoires		
			Déplacement	Fréquence	Accélération
Expérience 1	étamé	air	10 μm	10 Hz	$39,4 \cdot 10^{-3} m \cdot s^{-2}$
Expérience 2	étamé	air \leftrightarrow di-azote	25 μm	50 Hz	$2,46 m \cdot s^{-2}$

Sur la zone de contact, l'aller correspond au chemin entre l'origine et la fin de la zone de contact. Les zones A1 et A2 correspondent respectivement à la première et la seconde moitié du chemin parcouru. De même, R1 et R2 correspondent respectivement à la première et la seconde moitié du chemin parcouru au retour. Par conséquent, A2 et R2 correspondent à la même zone sur la zone de contact, voir figure 4.30.

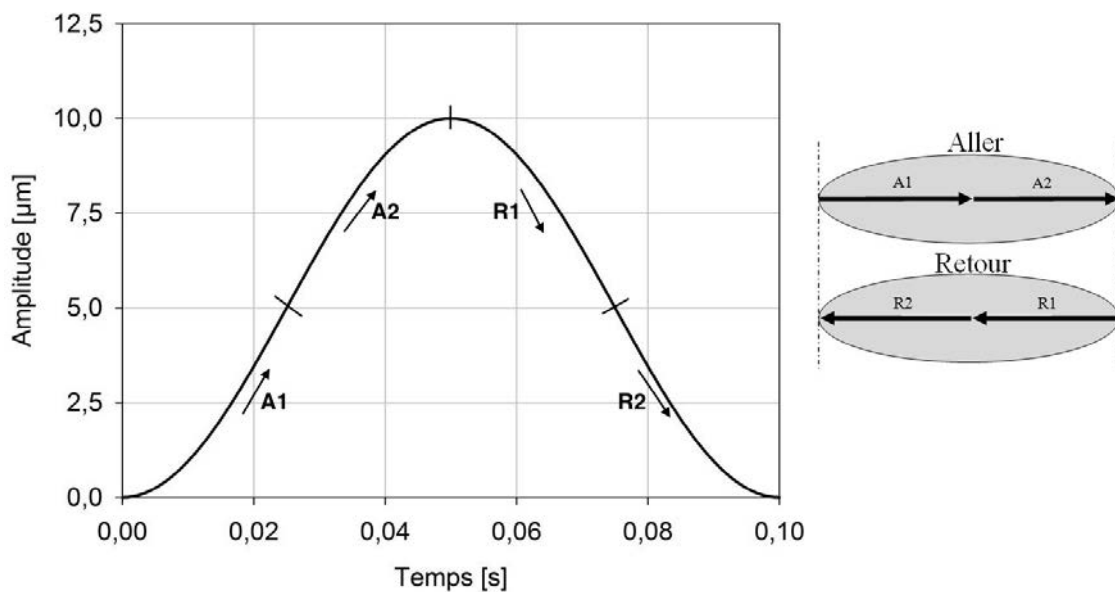


FIGURE 4.30 – Chemin parcouru par le clip sur la languette sur un aller-retour (10 μm , 10 Hz). Les zones A1, A2, R1 et R2 correspondent aux moitiés de l'aller et retour.

4.3.2 Cartographie en fonction de la valeur de la tension de contact

L'amplitude de la tension de contact varie sur un aller-retour. Ses valeurs dépendent d'une part de l'état de dégradation de la tension de contact et d'autre part de la localisation du clip sur la languette. Pour cela, l'origine spatiale est située au début de la zone de contact. Les zones de basse et bonne conduction sont mises en valeur en traçant la cartographie de la tension de contact en fonction de la distance sur la piste de fretting et du nombre de cycles.

La figure 4.31 représente une cartographie de la tension de contact de l'expérience n°1. Les zones A1 et R1 correspondent aux premières moitiés du chemin aller et retour. De même, les valeurs de la tension de contact sont graduées de 0 à 0,5V. La courbe de la tension de contact est rajoutée sur la droite afin de faire le rapport entre les résultats électriques issus d'un voltmètre et ceux de la cartographie.

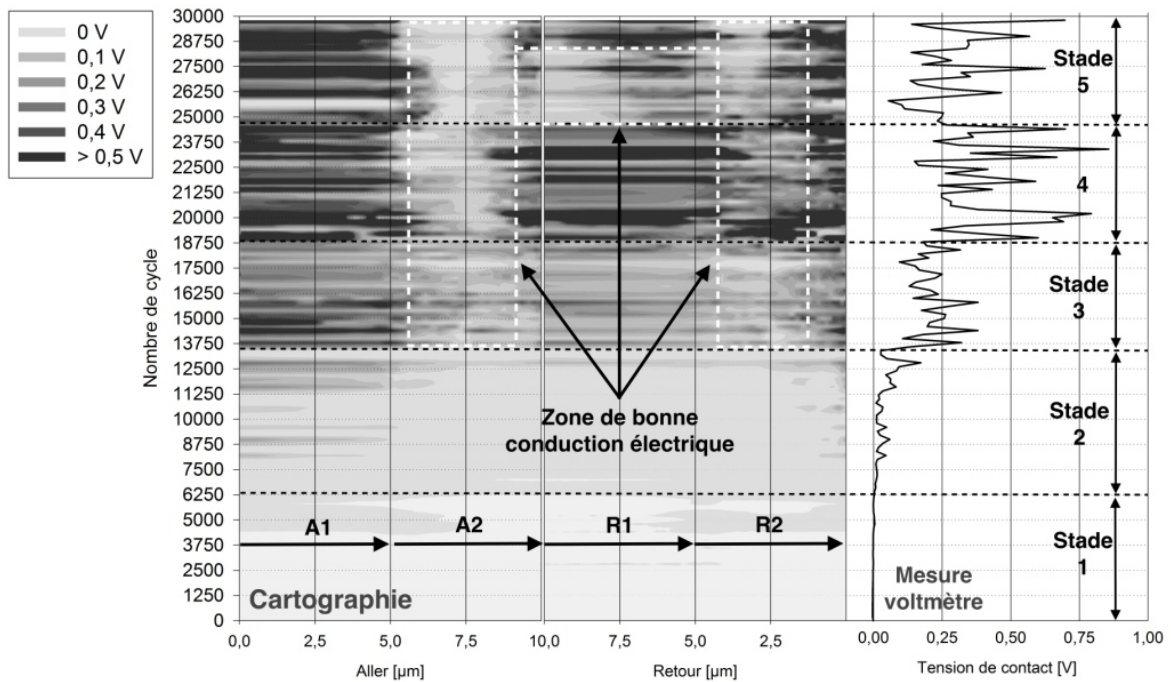


FIGURE 4.31 – Cartographie aller et retour en fonction de la localisation sur la piste de fretting et du nombre de cycle. Les zones de fortes fluctuations sont indiquées pour une valeur de tension de contact maximale égale à 0,5 V. La courbe de la tension de contact située à droite est mesurée par voltmètre. Les conditions expérimentales sont $10 \mu m$, 10 Hz ($39,4 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-2}$). Les points (1) à (5) indiquent différents stades de fluctuations de la tension de contact.

L'analyse est faite suivant cinq durées différentes, numérotées de 1 à 5. Ce choix est dû à un changement de comportement électrique sur la courbe issue des mesures par voltmètre :

1. Entre 0 et 625s (stade 1), les valeurs de la tension de contact de la courbe de mesure par voltmètre et de la cartographie sont proches de zéro.
2. Les premières fluctuations de la tension de contact mesurées par voltmètre sont comprises entre 625s et 1375s (stade 2). Les valeurs de la tension de contact issues de la cartographie augmentent sur toute la surface avec des résultats globalement inférieurs à 0,2V.
3. Entre 1375 et 1875s (stade 3), la tension de contact de la courbe augmente et fluctue autour de 0,2 V. Les tensions de contact de la cartographie augmentent également. Des valeurs supérieures à 0,5V sont d'ailleurs obtenues sur la première moitié de l'aller et la toute fin du retour. Par conséquent, les perturbations électriques ont lieu sur l'ensemble de la trace de fretting.
4. Entre 1875 et 2400s (stade 4), la tension de contact de la courbe augmente et fluctue autour de 0,4 V. La première moitié de l'aller indique des valeurs globalement supérieures à 0,5 V tandis que sa seconde moitié indique une zone de meilleure conduction électrique. Le retour indique des valeurs supérieures à 0,4 V où la conduction est également meilleure sur la seconde moitié du retour.
5. Entre 2400 et 3000s (stade 5), la tension de contact diminue et fluctue autour de 0,3 V. L'aller ne change pas tandis que le retour présente des fluctuations moins importantes.

Analyse des fortes fluctuations de la tension de contact (stades 3,4 et 5)

Ces observations indiquent que la conduction électrique de la seconde moitié de l'aller (zone A2) est meilleure que la première moitié du retour (zone A1) à partir de 13 750 cycles soit les stades 3, 4 et 5. Par conséquent, la tension de contact varie en fonction de la position du clip sur la languette sur l'aller.

De plus, la seconde moitié de l'aller (A2) correspond à la première moitié du retour (R1) d'un point de vue spatial. Néanmoins, leur comportement électrique respectif est différent. La tension de contact varie également en fonction de la direction du mouvement du clip sur la languette.

Analyse des faibles fluctuations de la tension de contact (stades 1 et 2)

Les premières fluctuations de la tension de contact sont comprises entre un et plusieurs dizaines de millivolts. Il s'agit donc de comparer l'ensemble de ces valeurs sur deux ordres de grandeur. Pour cela, une approche différente est utilisée en imposant une valeur de 0% pour la valeur minimale et une valeur de 100 % pour la valeur maximale sur un aller-retour, voir figure 4.32. L'objectif est d'analyser les premières étapes du fretting-corrosion sur la tension de contact.

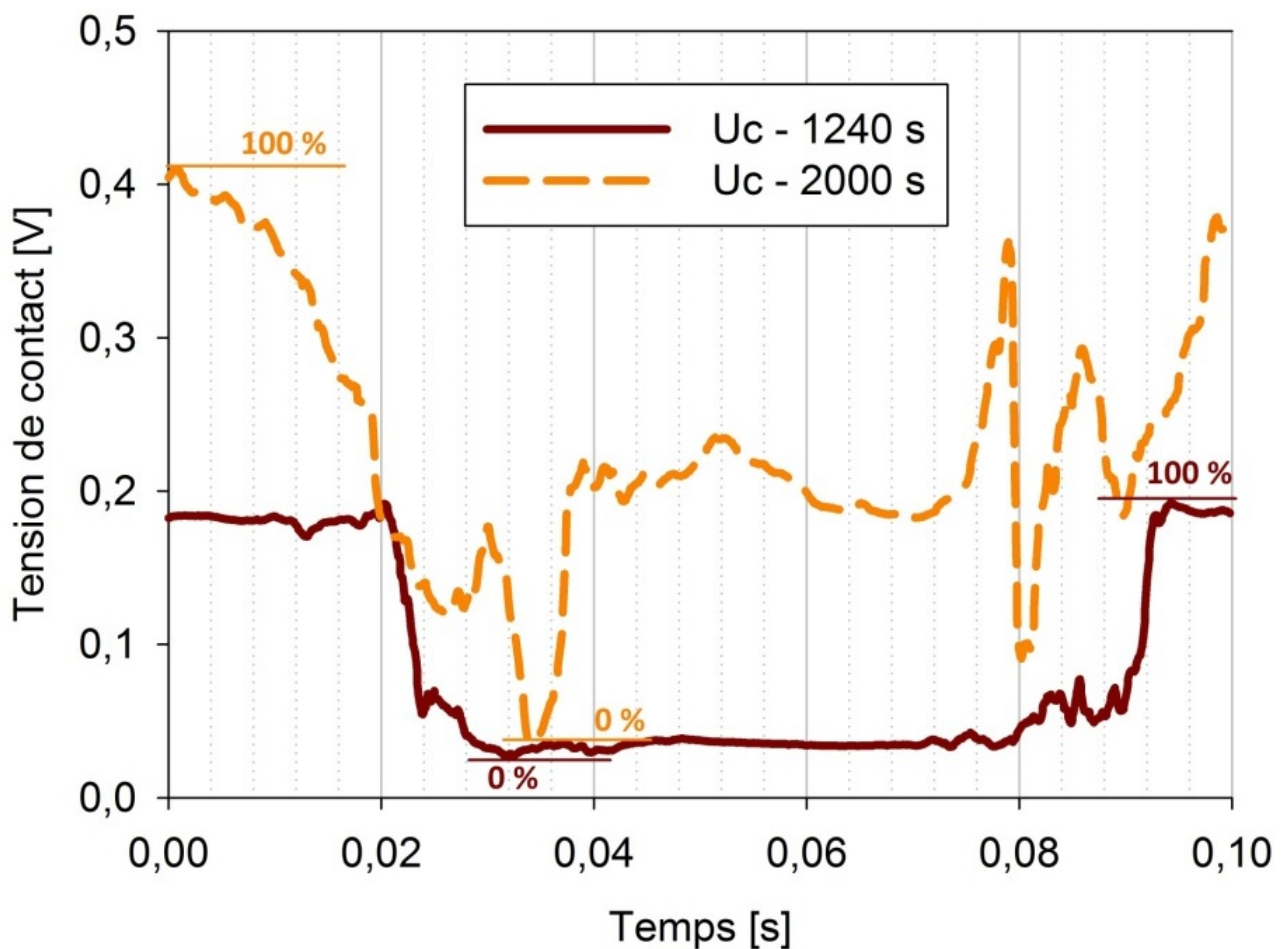


FIGURE 4.32 – Tension de contact mesurée en temps réel à deux instants 1240s et 2000s avec leur valeur respective de 100 % et 0%.

La figure 4.33 représente une cartographie en pourcentage avec des zones de bonnes et mauvaises conductions au cours du temps de l'expérience n°1. Les observations faites entre 1375s et 3000s sont identiques à la figure 4.31 ; c'est pourquoi seule la première partie, entre 0 et 1375s, est étudiée.

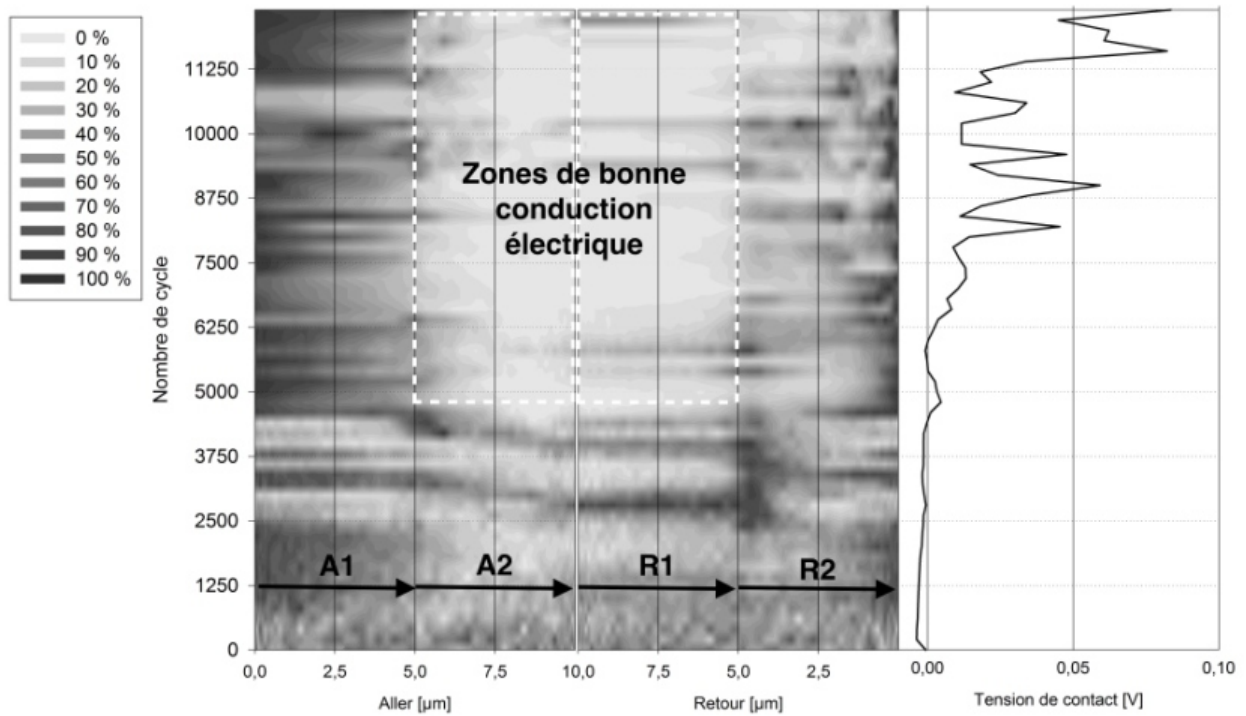


FIGURE 4.33 – Cartographie aller et retour en fonction du pourcentage (100 % représente le maximum et 0% représente le minimum de la tension de contact).

Les observations sont les suivantes :

- Jusqu'à 250s (2500 cycles), il n'existe pas de zone de bonne et mauvaise conduction électrique. En effet, la tension de contact est proche de zéro. A ce stade, l'interface est composée exclusivement d'étain pur.
- Entre 250s (2500 cycles) et 450s (4500 cycles), on distingue les premières zones plus ou moins conductrices. Leurs positions ne sont pas stables. Par ailleurs, les zones deviennent moins conductrices lorsque l'accélération est positive.
- A partir de 450s, la tension de contact est plus importante sur la première moitié de l'aller et la seconde moitié du retour. Ces passages correspondent à la même zone. Le temps d'apparition des zones de bonnes et de mauvaises conductions électriques est donc égal à 450s.

Au début des perturbations, la tension de contact est faible. Sa valeur maximale est d'ailleurs égale à 0,2V. L'étain est toujours présent en temps que revêtement. Ce matériau est malléable ce qui implique un comportement différent lorsque le degré de dégradation est avancé.

La figure 4.34 représente la cartographie de la tension de contact avec les conditions expérimentales n°2 : $25 \mu\text{m}$, 50 Hz , $(2,46 \text{ m.s}^{-2})$, 500mA . Les résultats mettent en avant cette même tendance que la cartographie précédente i.e. des valeurs de la tension de contact plus importantes sur les zones A1 et R1 que les zones A2 et R2. Ces phénomènes identiques sont observés sur une distance de déplacement plus importante.

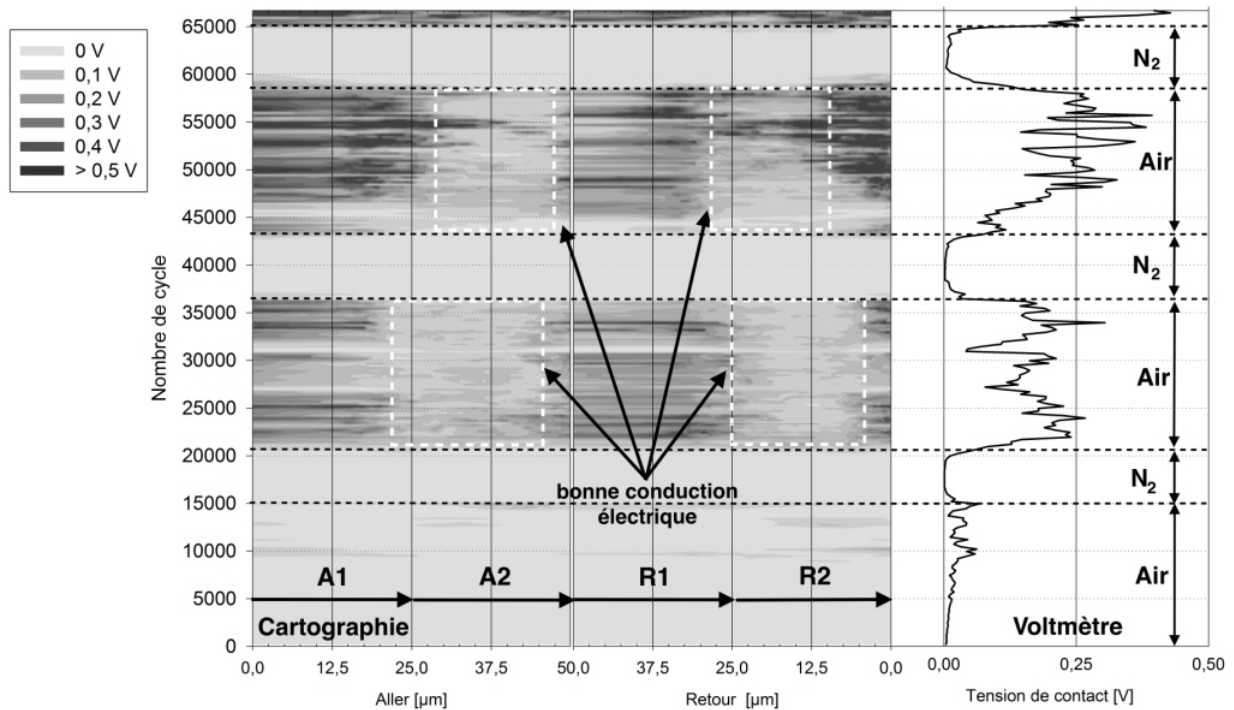


FIGURE 4.34 – Cartographie aller et retour en fonction de l’accélération et du temps indiquant les zones de fortes fluctuations pour une valeur de tension de contact maximale égale à 500 mV de l’expérience 3. La courbe de la tension de contact mesurée par voltmètre est disposée à droite pour faire la comparaison.

Conclusion sur l’analyse spatio-temporelle du signal électrique

Il subsiste des zones de bonnes et de mauvaises conceptions électriques tout au long de l’expérience malgré les fluctuations de la tension de contact. Le degré de dégradation de l’état de surface est donc différent suivant la position du clip et la languette entre l’aller et le retour. Ce comportement électrique ne dépend pas de l’amplitude, ni de la fréquence de la vibration imposée. D’ailleurs, les cartographies issues des deux expériences ont permis d’identifier un résultat similaire lorsque les fluctuations de la tension de contact sont importantes :

- Des zones de bonne conduction électrique sur A2 et R2.
- Des zones de mauvaise conduction électrique sur A1 et R1.

La proportion d’oxyde est plus importante sur A1 et R1. Il s’agit également des zones où l’accélération est positive. L’hypothèse de perturbation électrique serait la rencontre entre les oxydes de l’interface et le clip. Tout d’abord, l’accélération positive du clip sur la languette impliquerait un passage sur ces oxydes. Cela provoquerait des perturbations électriques. Ensuite l’accélération négative (zones A2 et R2) impliquerait une évacuation des oxydes hors de la zone de contact. Le nettoyage de la zone de fretting serait donc continu.

L’utilisation des cartographies a permis de mettre en avant la dynamique de la tension de contact en fonction du temps. Les perturbations de la tension de contact sont complexes et nécessitent donc d’être analysées en fonction de la position du clip sur la languette.

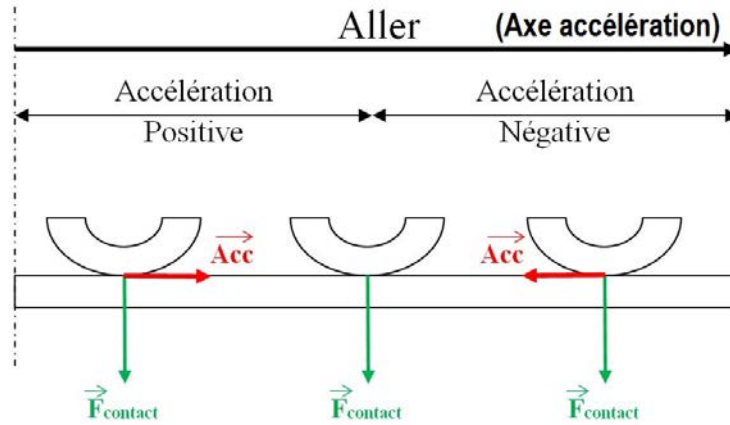


FIGURE 4.35 – Schéma des forces lors du fretting-corrosion.

Conclusion sur l'étude du comportement électrique d'un contact étamé sous sollicitation vibratoire

La dégradation d'une zone de contact étamé par fretting-corrosion a pour conséquence de former un troisième corps à l'interface. De ce fait, la conduction du courant est fortement perturbée avec notamment des fluctuations de la tension de contact. L'objectif est donc d'étudier la dynamique qui s'opère autour de cette dégradation par fretting-corrosion et sa conséquence sur l'état de surface.

Tout d'abord, l'utilisation d'une atmosphère chimiquement inerte a notamment mis en évidence la dynamique d'évacuation des débris du troisième corps à l'interface. En effet, les débris ne s'accumulent pas à l'interface si le clip possède une force suffisante pour les éjecter hors de la zone de contact. Leur évacuation est donc continue sous sollicitation vibratoire. Ensuite, l'analyse de la tension de contact en fonction du temps et de la position du clip sur la languette confirme ce phénomène avec des zones d'accélération de dé-accelération qui correspondent respectivement à des zones de perturbation électrique et de nettoyage de la zone de contact. Enfin, l'analyse d'un état de surface dégradé à la micro-sonde nucléaire a permis de quantifier la proportion en oxygène. Cela a notamment mis en évidence deux types d'oxydes dont la proportion n'est pas uniforme le long de la trace de fretting. En effet, il existe plusieurs régions à l'interface de contact dont les proportions en oxygène sont différentes. Les résultats mettent d'ailleurs en évidence la présence des composés CuO et Cu_2O .

L'utilisation d'une technique d'analyse de surface peu utilisée en contact électrique et l'étude de la tension de contact (cartographie et par alternance d'atmosphère) apportent de nouvelles informations sur les conséquences du fretting-corrosion. En perspectives, il faudrait étudier des cartographies en fonction de la force de contact et de différents matériaux ainsi que des analyses de surface à la micro-sonde nucléaire à différents stades de dégradation.

Conclusion Générale

L'enjeu de cette thèse est de comprendre le comportement vibratoire d'un connecteur soumis à des sollicitations vibratoires. De là, il est possible de préconiser son utilisation en fonction de son emplacement au sein d'un véhicule. En effet, les vibrations, issues d'un véhicule en fonctionnement, induisent des déplacements relatifs entre d'une part le clip et d'autre part la languette. Au delà d'une amplitude de déplacement relatif de plusieurs micro-mètres, l'interface de contact électrique se dégrade par fretting-corrosion. Par conséquent, l'aire de contact électrique diminue jusqu'à être inexistante. la conduction du courant devient impossible, le connecteur est alors inutilisable. C'est pourquoi il est nécessaire de connaître le comportement vibratoire des composants internes d'un connecteur afin de prédire son comportement électrique.

Le clip et la languette ne sont pas accessibles visuellement, il est donc impossible d'estimer leur déplacement relatif. C'est pourquoi, il a été nécessaire de mettre au point un banc d'essai qui comporte d'une part une source vibratoire capable d'appliquer une vibration et d'autre part un moyen de mesure adéquat pour accéder au déplacement du clip et de la languette. De plus, un système d'analyse de données a été mis au point afin de mettre en évidence les valeurs suivantes :

- des amplitudes de vibration absolue des composants (porte-clip, clip, languette, porte-languette).
- des déphasage entre composants du connecteur afin d'en déduire les déplacements relatifs.

De là, il a été possible de mettre en place les caractéristiques vibratoires spécifiques des connecteurs étudiés (RH-PCPL et PMH-GTS) :

- les fonctions de transfert entre deux composants. Ceci permet d'appliquer le type de vibration pour prédire la réponse vibratoire du connecteur.
- un modèle numérique basé sur un système masse-ressort-amortissement. cela permet de quantifier les caractéristique de raideur et d'amortissement suivant les trois directions.

Les résultats ont apportés de nombreuses informations sur le comportement vibratoire des connecteurs étudiés. Celles-ci sont résumés selon les points suivants :

- Les mesures des amplitudes de vibration du porte-clip indiquent qu'elles sont plus importantes par rapport au porte-languette. Par conséquent, cela induit des déplacements relatifs entre le porte-clip et le porte-languette (ou la capteur). Toutefois, l'amplitude de ce déplacement relatif ne correspond pas au déplacement relatif entre le clip et la languette. En effet, une diminution de l'amplitude de déplacement entre les composants extérieurs et intérieur est observée dans le cas des deux connecteurs étudiés. En résumé, les mouvements du porte-clip influence celui du clip mais à un degré moins important.
- La source vibratoire est mono-axiale toutefois les vibrations induites sur le porte-clip sont multi-axiales. C'est pourquoi le mouvement du clip est également multi-axial. Par conséquent, les déplacements relatifs entre le clip et la languette sont également multi-axiaux. Or, la structure du connecteur peut empêcher certain mouvement avec notamment une système à trois points de contact entre le clip et la languette qui empêche un mouvement relatif selon un axe. C'est pourquoi, il est nécessaire de réaliser une analyse de la structure du connecteur pour prédire les mouvements internes de ce dernier. Les vibrations induites au sein d'un connecteur sont donc complexes, leurs analyses doivent prendre en compte de nombreux phénomènes.
- Les mesures ont été réalisées en suivant un profil vibratoire défini par le cahier des charges Renault. L'analyse des déplacements relatifs dépendent directement du type de profil. Changer de profil vibratoire aura pour conséquence de changer les résultats obtenus. C'est pourquoi une analyse

par les fonctions de transfert permet de généraliser le comportement vibratoire du connecteur et constitue un apport pour préconiser l'utilisation d'un connecteur suivant son emplacement.

- L'analyse des fonction de transfert ont mis en valeurs des phénomènes de résonances. Ces dernières ont pour conséquence d'augmenter l'amplitude des vibrations induites au sein du connecteur. Une dégradation rapide de l'interface de contact put avoir lieu en fonction de la fréquence de la vibration. Un modèle de type masse-ressort-amortisseur basé sur les fonctions de transfert a été mis en place pour quantifier les résonances. De là, ces caractéristiques sont complémentaires aux comportement vibratoire du connecteur.

Auparavant, les mesures du comportement vibratoire d'un connecteur sont réalisées avec un accéléromètre, un laser de déplacement ou une caméra rapide comme moyen de mesure. De ce fait, il est impossible d'accéder au mouvement entre le clip et la languette. Seul les mesures électriques permettent de déterminer le comportement électrique d'un connecteur soumis à des sollicitations vibratoires. Or les résultats de cette thèse mettent en évidence la nécessité de connaître le mouvement interne d'un connecteur en fonction du type de vibration imposé. Par conséquent, une caractérisation vibratoire générale d'un connecteur doit être mise en place (fonction de transfert et modélisation) pour préconiser son utilisation en fonction de son emplacement. L'objectif est de définir de manière précise le comportement vibratoire entre le clip et la languette car il s'agit de ce mouvement relatif qui induit des dégradations électriques.

En appliquant le profil vibratoire 15G, on sait que la dégradation électrique intervient dans le cas ou la connecteur RH-PCPL est positionné en position vertical sur la plage fréquentielle comprise entre 100 et 600 Hz. En effet, des études précédentes ont démontré qu'une amplitude de déplacement relatif supérieur à $5 \mu m$ entre le clip et la languette, pour une connectique étamée, entraîne des dégradations électriques par fretting-corrosion. Qu'en est-il pour des amplitudes de vibration qui induisent des mouvements multiples d'amplitudes différentes et de formes non-rectilignes? Les études menées auraient donc nécessité des tests longues durées sur plusieurs heures pour évaluer les dégradations électriques sur les connecteurs en réalisant d'une part des mesures électriques et d'autre part des analyses de surface au MEB et à la micro-sonde nucléaire. Ce type de résultats permettrait d'apporter une idée précise sur le comportement électrique en lien avec le comportement vibratoire.

D'autre part, ces travaux ont mis en place les bases d'une analyse qui nécessite d'être approfondie. En perspective, il faudrait :

- Réaliser des mesures avec les fils tendus. En effet, nous avons vu que le comportement vibratoire du clip dépend fortement de celui du porte-clip. Toutefois, le clip est relié à un fil dont la force de tension et le poids influence fortement son comportement vibratoire.
- Prendre en compte les effets de la température sur la dilatation des matériaux du connecteur. En effet, l'augmentation du volume de deux matériaux en polymère en contact induit une augmentation de la force de frottement entre ces deux surfaces. De là, la vibration induite entre le porte-languette et le porte clip serait modifiée. La température au prêt du moteur est comprise entre la température extérieur et de celle du moteur. La prise en compte de ces changements de température est donc un facteur important dans l'étude du comportement vibratoire d'un connecteur. Il serait notamment possible de rentrer ces nouvelles données dans le modèle numérique pour préconiser le comportement électrique du connecteur.
- Les directions des vibrations induites au sein d'un connecteur sont multi-axiales et cela, malgré la direction de la source vibratoire mono-axiale. Or, les travaux concernant la connectique se font exclusivement selon l'axe de la languette. Afin de se rapprocher au mieux d'un cas réel, il serait judicieux d'utiliser des sources multi-axiale afin d'étudier le comportement électrique sur un mouvement de type ellipsoïdale sur un contact de type clip-languette.

Dans la connectique automobile, on utilise le déplacement relatif entre le clip et la languette pour définir s'il y aura des dégradations électriques. Toutefois, la dégradation par fretting-corrosion ne dépend pas que de ce seul facteur mais aussi de nombreux facteurs physico-chimiques. Les résultats du dernier chapitre ont notamment mis en évidence une dynamique d'évacuation des débris et une dégradation mécanique qui dépend de l'accélération sur une trace de fretting. Ces résultats apportent de nouvelles informations sur la compréhension du phénomène de dégradation par fretting-corrosion. Elle nécessite d'être approfondie en réalisant des analyses de surfaces, ceci à différents stades de dégradation. En perspective, il serait

très intéressant de mettre en place un système d'analyse optique en temps réel. Cela permettrait de mettre en valeur l'éjection des débris à l'interface de contact. Pour cela, il pourrait être mis en place un système optique dont le grossissement serait suffisant pour observer l'éjection des débris sur un système clip/languette.

Pour conclure, l'étude du comportement vibratoire des connecteurs par un moyen de mesure qui permet d'accéder au déplacement des connectiques est primordiale pour préconiser l'utilisation d'un connecteur sur une source vibratoire en accédant directement au mouvement entre le clip et la languette.

Bibliographie

- [1] J.B.P. Williamson. The micro world of the contact spot. *27th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 1–10, 1981.
- [2] R.Holm. *Electric contacts, theory and applications*. Berlin, Springer-Verlag, 2000.
- [3] H. Hertz. Über die berührung fester elastischer körper. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 92 :156–171, 1882.
- [4] A.C. Fischer-Cripps. *Introduction to contact mechanics*. Springer, 2007.
- [5] J.A.Greenwood. Contact of nominally flat surfaces. *Proceeding Royal Society A*, 295 :300–319, 1966.
- [6] J.A.Greenwood. Constriction resistance and the real area of contact. *Brit. J. Appl. Phys.*, 17 :1621–1632, 1966.
- [7] M.Nakamarua. Computer simulation for the constriction resistance depending on the form of conducting spots. *IEEE Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 18 :382–384, 1995.
- [8] L.Boyer. Contact resistance calculations : generalizations of greenwood’s formula including interface films. *IEEE Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 24 :50–58, 2001.
- [9] *Electrical contacts, principle and applications*. Ed. P.G. Salde, 2014.
- [10] Y.V.Sharvin. Contact resistance calculations : generalizations of greenwood’s formula including interface films. *Sov Phys, JETP* 21 :655, 1965.
- [11] A.Mikrajuddin. Size dependant electrical constriction for contacts of arbitrary size : from sharvin to holm limits. *IEEE Materials Science in Semiconductor Processing*, 2 :321–327, 1999.
- [12] S.Tsukiji, S.Sawada, T.Tamai, Y.Hattori, and K.Iida. Direct observations of current density distribution in contact area by using light emission diode wafer. *57th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 62–68, 2011.
- [13] K.Mashimo, Y.Saita, and Y.Ishimaru. Automatic construction of a computational model for a three dimensional resistance network. *56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 334–339, 2010.
- [14] M.Antler. Gold-plated contacts : effect of thermal aging on contact resistance. *43rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 121–131, 1997.
- [15] P.Guiraldenq. La diffusion dans les métaux. *Techniques de l’ingénieur*, 1994.
- [16] T.Hammam and R.Sundberg. Heat-treatment of tin-coated copper base alloy and the subsequent effect on friction, wear and electric properties. *20th International Conference on Electrical Contacts ICEC*, pages 291–296, 2000.
- [17] K.N.Tu. Interdiffusion and reaction in bimetallic cu-sn thin film. *Acta Metallurgica*, 21 :347–354, 1973.
- [18] M.Bordignon. *Limite des revêtements d’étain en connectique automobile*. PhD thesis, Mines ParisTech, 2010.
- [19] R.J.Fields, S.R.Low, and G.K.Lucey. Physical and mechanical properties of intermetallic compounds commonly found in solder joints. *The Minerals, Metals and Material Society*, pages 165–174, 1992.
- [20] T.Ito, K.Takata, Y.Yasuhiro, K.Iida, and Y.Saitoh. Microscopy study of fretting corrosion of tin plated contacts. *53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 216–221, 2007.
- [21] M.Antler and M.H.Drodzdowicz. Wear of gold electrodeposits : effect of substrate and of nickel underplate. *Bell System Technology*, J(58)2 :323–349, 1979.

- [22] M.R.Pinnel, H.G.Tompkins, and D.E.Heath. Oxidation of copper in controlled clean air and standard laboratory air at 50 degree celcius to 150 degree celcius. *Applications of Surface Science*, 2-4 :558–577, 1979.
- [23] C.L.Rodekohr, G.T.Flowers, J.C.Suhling, and M.J.Bozack. Auger electron spectroscopic (aes) measurements on high aspect ratio tin whiskers. *54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 232–2378, 2008.
- [24] T.Tamai, Y.Nabeta, S.Sawada, and Y.Hattori. Property of tin oxide film formed on tin-plated connector contacts. *56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 295–302, 2010.
- [25] E.R.Crandall, G.T.Flowers, P.Lall, and M.J.Bozack. Whisker growth under controlled humidity exposure. *57th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 49–54, 2011.
- [26] T.Tamai. Growth of oxide films on the surface of cu contact and its effect on the contact resistance property. *Electronics and Communications in Japan*, part.2, Vol.72, No.7 :87–93, 1989.
- [27] T.Tamai. Effect of humidity on growth of oxide film on surface of copper contacts. *24th International Conference on Electrical Contacts ICEC*, pages 378–383, 2006.
- [28] S.Sawada, K.Shimizu, Y.Hattori, T.Tamai, and K.Iida. Analysis of contact resistance behavior for electric contacts with plating layer. *56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 65–72, 2010.
- [29] N.Ben Jemaa, X.Hernot, A.El Manfalouti, A.Senouci, and R.El Abdi. Theoretical and experimental investigation of contact resistance under low and medium force indentations for common and for new coated material. *21st International Conference on Electrical Contacts ICEC*, pages 212–216, 2002.
- [30] A.Lee. Fretting corrosion of tin-plated copper alloy. *IEEE Transaction on Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, 10 :63–67, 1987.
- [31] R.S.Timsit. On the evaluation of contact temperature from potential-drop measurements. *IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology*, 6(1) :115–121, 1983.
- [32] M.Braunovic and N.Alexandrov. Intermetallic compounds at aluminium to copper electrical interfaces : effect of temperature and electric current. *IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology*, 1984.
- [33] R.D.Malucci. The effect of current density variations in power contact interfaces. *57th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 55–61, 2011.
- [34] M.Rokni and Y.Levinson. Joule heat in point contacts. *Physical review. B, Condensed Matter*, 52(3) :14–20, 1995.
- [35] R.S.Timsit. Electrical conduction through small contacts spots. *IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology*, 29(4) :727–734, 2006.
- [36] J.A.Greenwood and J.B.P.Williamson. Electrical conduction in solids, ii. theory of temperature-dependent conductors. *Proceedings of The Royal Society : A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 246 :13–31, 1958.
- [37] F.Kohlrausch. Juber das problem eines elektrisch erwarmten leiters. *Ann. Phys.*, Leipzig 1 :312, 1900.
- [38] M.Braunovic. Fretting damage in tin-plated aluminum and copper connectors. *IEEE Components, Hybrids and Manufacturing*, 12 :215–223, 1989.
- [39] I.M.Feng and B.G.Rightmire. The mecanism of fretting. *Lubrication Engr.*, 9 :134–136, 1953.
- [40] M.Antler and M.H.Drozdzowicz. Fretting corrosion of gold plated connector contacts. *Wear*, 74 :27–50, 1981-1982.
- [41] S.Fouvry, P.Jedrzejczyk, and P.Chalandon. Introduction of an exponential formulation to quantify the electrical endurance of micro-contacts enduring fretting wear application to sn, ag and au coatings. *Wear*, 271 :1524–1534, 2011.
- [42] N.Ben Jemaa and E.Carvou. Electrical behavior of power connector during fretting vibration. *52nd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, 42 :263–266, 2006.
- [43] N.Sato, Y.Saitoh, T.Tamai, K.Iida, T.ito, and Y.Hattori. Study of behavior of contact resistance of fretting corrosion. *24th International Conference on Electrical Contacts ICEC*, pages 307–312, 2008.

- [44] Cahier des charges. Electrical connections and connectors. 36-05-019/-J, 2010.
- [45] A.Bouzera. *Fiabilité de la connectique sous sollicitation de vibrations mécaniques*. PhD thesis, université de Rennes 1, 2012.
- [46] Y.W.Park, G.N.K.R.Bapu, and K.Y.Lee. The influence of current load on fretting of electrical contacts. *Tribology International*, 42 :682–689, 2009.
- [47] A.Bouzera, E.Carvou, N.Ben Jemaa, R.El Abdi, L.Tristani, and E.M.Zindine. Minium fretting amplitude in medium force for connector coated material and pure material. *56th IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts*, pages 101–107, 2010.
- [48] P.Jedrzejczyk, S.Fouvry, and O.Alquier. Quantification of the electrical contact endurance of thin plated silver coatings subjected to fretting wear :influence of coating thickness. *26th International Conference on Electrical Contacts ICEC*, pages 205–212, 2012.
- [49] J.Laporte, S.Fouvry, O.Perrinet, G.Blondy, and O.Alquier. Influence of large periodic sliding sequences on the electronical endurance of contacts subjected to fretting wear. *59th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 40–48, 2013.
- [50] P.Jedrzejczyk, S.Fouvry, and P.Chalandon. Quantitative description of the electrical contact endurance under fretting condition : comparison between tin and silver coatings. *24th International Conference on Electric Contacts ICEC*, pages 272–277, 2008.
- [51] Y.W.Park. Fretting corrosion of tin-plated contacts. *Tribology International*, 41 :616–628, 2008.
- [52] Y.W.Park, T.S.N.Sankara, and K.Y.Lee. Effect of fretting amplitude and frequency on the fretting corrosion behaviour of tin plated contacts. *Surface and Coatings Technology*, 201(6) :2181–2192, 2006.
- [53] T.Ueno, N.Wakatsuki, and I.Senshu. Influence od surface roughness on voltage drop of sliding contacts under various gases environment. *49th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 242–253, 2003.
- [54] Site internet du CMEBA. cmeba/univ-rennes1.fr.
- [55] Site internet. <http://iramis.cea.fr/nimbe/leel/>.
- [56] P.Berger and G.Revel. Microsonde nucléaire - principe et appareillage. *Techniques de l'ingénieur*, 2005.
- [57] P.Berger and G.Revel. Microsonde nucléaire - application. *Techniques de l'ingénieur*, 2005.
- [58] K.Mashimo and Y.Ishimaru. Computational modeling and analysis of a contact pair for the prediction of fretting dependent electrical contact resistance. *57th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 161–166, 2011.
- [59] Y.Shibata, S.Oohira, S.Masui, S.Sawada, K.Iida, T.Tamai, and Y.Hattori. Detailed analysis of contact resistance of fretting corrosion track for the tin plated contacts. *26th International Conference on Electric Contacts ICEC*, pages 228–232, 2012.
- [60] H.Yang anf G.Flowers. Threshold of axial vibration induced fretting in electrical connectors. *59th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 215–224, 2013.
- [61] G.T.Flowers, F.Xie, and M.Bozack. Vibration thresholds for fretting corrosion in electrical connectors. *48th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 133–139, 2002.
- [62] G.T.Flowers, F.Xie, M.Bozack, X.Hai, B.I.Rickett, and R.D.Malucci. A study of the physical characteristics of vibration-induced fretting corrosion. *48th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 133–139, 2002.
- [63] C.Chen, G.T.Flowers, M.Bozack, and J.Suhling. Modeling and analysis of a connector system for prediction of vibration induced fretting degradation. *55th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 129–135, 2009.
- [64] S.Sawada, Y.Saitoh, and K.Iida. Deterioration mechanism of connectors used in long driven vehicles. *61st IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pages 141–147, 2015.
- [65] Site internet de Brüel and Kjaer. www.bksv.fr/products/shakers-exciter/lds-vibration-test/shakers/permanent-magnet/v455.
- [66] L.Féchant. *Le contact électrique : phénomènes physique et matériaux*. Hermes, 1997.

- [67] W.H.Abbott. The development and performance characteristics of mixed flowing gas test environments. *33rd IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts*, pages 63–78, 1987.
- [68] Y.W.Park, H.G.Joo, and K.Y.Lee. Effect of intermittence fretting on corrosion behavior in electrical contact. *Wear*, 268 :353–360, 2010.
- [69] S.Fouvry, Ph.Kapsa, and L.Vincent. An elastic-plastic shakedown analysis of fretting wear. *Wear*, 247 :41–54, 2001.
- [70] S.El Mossouess, N.Ben Jemaa, E.Carvou, and R.El Abdi. Fretting corrosion in power contacts : electrical and thermal analysis. *60th IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts*, pages 297–301, 2014.
- [71] E.Carvou and N.Ben Jemaa. Time and level analysis of contact voltage intermittences induced by fretting in power connector. *53rd IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts*, pages 211–215, 2007.
- [72] L.Tristan. *Fiabilisation des connecteurs électriques soumis à des vibrations*. PhD thesis, Université Paris-Sud, 2000.

Table des figures

1.1	Photographie d'un clip et d'une languette de type Sicma 2 associés au porte-clip et un capteur PMH.	5
1.2	Schéma d'un contact métallique par deux points. La force de contact F_c assure le maintien d'une zone de contact entre le clip et languette. Ces derniers sont généralement composés d'un substrat recouvert d'un revêtement protecteur.	5
1.3	Contact apparent/mécanique de rayon r et spots de contact de rayons a selon le modèle de Holm [2].	6
1.4	Schéma de contact sphère/plan et sphère/sphère avec les caractéristiques géométriques et mécaniques (E : module d'Young et ν : coefficient de Poisson).	7
1.5	Schéma d'un contact selon le modèle de Greenwood et Williamson en prenant en compte la rugosité seulement sur la surface 2.	7
1.6	Schéma du rétrécissement des lignes de courant à travers un spot de contact caractéristique d'une résistance de constriction entre deux matériaux.	9
1.7	Observation de la conduction électrique à travers un contact indium-SC sous une force de (a) 4N ,(b) 7N et (c) 9N. Les zones claires correspondent aux fortes densités de courant [12].	11
1.8	Observation de la conduction électrique entre un semi-conducteur (type p) et une sonde en indium (a) sans un film oxydé et (b) avec un film oxydé. (c) Simulation numérique de la densité de courant en fonction de la position sur la trace de contact avec et sans film d'oxyde [12].	12
1.9	Courbe comparative entre la simulation numérique et les résultats théoriques de la densité de courant en fonction de la position sur le rayon d'un spot de contact [13]	12
1.10	(a) Image MEB (BSE) d'un revêtement en étain brillant sur substrat en coupe transversale ($\times 7000$, vieillissement 100h à 125°C pour favoriser l'inter-diffusion). (b) Image MEB (BSE) en électrons secondaires après fractographie d'un étain brillant vieilli 100h à 150°C pour favoriser l'inter-diffusion [18].	14
1.11	(a) Image MEB (BSE) d'un revêtement en étain mat sur substrat en coupe transversale ($\times 10000$). (b) Image MEB (BSE) en électrons secondaires après fractographie d'un étain mat vieilli durant 200h à 125°C pour favoriser l'inter-diffusion [18].	14
1.12	Croissance du film d'oxyde d'étain exposé à des températures de 25, 50, 80, 120, et 150 °C [24]	15
1.13	Images AFM de la surface d'un revêtement d'étain exposé durant 168 heures pour des températures de 25, 80, 120 et 150 °C [24].	16
1.14	Composition du ratio oxygène-étain en surface et à l'intérieur du film pour deux températures : 25 °C et 120 °C [24]	16
1.15	Identification des composés SnO et SnO ₂ par analyse TEM [24].	16
1.16	Résultats expérimentaux de la mesure de la résistance de contact en fonction de la force de contact pour un revêtement en étain ou en argent [28].	18
1.17	Mesure de la résistance de contact en fonction de la force de contact pour les matériaux suivant : or, argent, palladium et nickel [29].	18
1.18	Mesure de (a) la température de la zone de contact (b) du rayon de l'aire de contact et (c) la tension de contact en fonction du courant [31].	19
1.19	Modélisation de la densité de courant des spots de contact en fonction du temps. $J(0)$ représente le point central et $J(6)$ le point en périphérique [33].	19

1.20	Analyse SEM (a) et image au microscope optique (b) d'un revêtement étain de $1\mu m$ d'épaisseur sur cuivre suite à l'application d'un contact statique par une bille de 1mm de rayon dont la force de contact est de 40N. Coupe transversale d'une zone dégradée(c) et d'une zone non dégradée (d) [38]	21
1.21	Mesure de la résistance de contact en fonction de l'épaisseur d'oxyde étain à 25 °C pour des forces de contact égales à 0.01N, 0.1N et 1N [24]	22
1.22	Schémas en trois étapes de formation du troisième corps et des débris à l'interface d'une zone de contact [39].	23
1.23	Schéma de la dégradation de deux contacts en composés inter-métalliques (IMC) soumis à une sollicitation vibratoire [18].	24
1.24	Schéma d'un contact électrique de type clip/languette soumis à un mouvement relatif sinusoïdal d'amplitude A , de fréquence f . Un courant continu de valeur I est imposé aux bornes du contact. La mesure de la tension/résistance de contact V est réalisée selon la méthode 4 fils.	24
1.25	Évolution de la résistance de contact en fonction du nombre de cycles d'un contact Sn-Sn ($50\mu m$, 1 Hz, 3 N, 100 mA) [43].	25
1.26	Photographie MEB des zones de contact du clip et de la languette et schématisation du processus de dégradation (A) avant les contraintes vibratoires et (D) au bout de 30 cycles (conditions expérimentales : $50\mu m$, 1 Hz, 3 N, 100 mA) [43].	26
1.27	Photographies MEB des zones de contact du clip et de la languette et schématisation du processus de dégradation au bout de (E) 60, (F) 350 cycles (conditions expérimentales : $50\mu m$, 1 Hz, 3 N, 100 mA) [43].	26
1.28	Photographies MEB des zones de contact du clip et de la languette et schématisation du processus de dégradation au bout de (G) 900 et (H) 2500 cycles (conditions expérimentales : $50\mu m$, 1 Hz, 3 N, 100 mA) [43].	27
1.29	Histogramme des événements pour quatre valeurs de tensions limites : 2, 4, 11 et 500mV en fonction du nombre de cycles d'un contact étain-étain ($50\mu m$, 100 Hz, 3 A, 20 V).[45]	28
1.30	(a) Observation SEM,(b) observation de l'élément oxygène par EDX (c) cartographie de la résistance de contact [46].	29
1.31	Schémas des 3 types de glissement (a) partiel ($F_T \ll \mu F_N$), (b) mixte ($F_T \leq \mu F_N$) et (c) total ($F_T = \mu F_N$).	29
1.32	Évolution de la résistance de contact R_C en fonction du nombre de cycles et de l'amplitude de déplacement A_{CC} [47].	30
1.33	Mesure de la force tangentielle pour trois amplitudes de déplacement : 2, 4 et 6 μm (10 Hz, $F_C = 2,5$ N, $I = 100$ mA) [47].	30
1.34	(a) Courbe de la force tangentielle en fonction du déplacement, (b) détermination du type de contact en fonction de l'allure de la courbe [48].	31
1.35	Résultats de la mesure du coefficient de friction f et du rapport A [41].	31
1.36	Évolution de la conduction électrique en fonction de l'amplitude de déplacement et du nombre de cycles pour 3 types de revêtements : or, argent et étain [41]. Pour chaque cas, l'épaisseur du revêtement est de $1,3\mu m$, la sous-couche de nickel est de $2\mu m$, le substrat est un alliage en cuivre.	32
1.37	Observation et analyse EDX de la distribution des éléments cuivre, étain, oxygène et nickel sur la trace de fretting d'un contact Sn-Sn pour (a) un glissement partiel et (b) un glissement total [49]	33
1.38	Observation et analyse EDX de la distribution des éléments présents sur la trace de fretting d'un contact Ag-Ag pour (a) un glissement partiel et (b) un glissement total [49].	33
1.39	Mesure du temps pour atteindre une résistance de contact égale à $100\text{ m}\Omega$ pour une amplitude de déplacement de $5\mu m$ et $25\mu m$, fréquence de 3, 10 et 20 Hz. La force de contact est égale à 0.5 N, le courant imposé est de 100 mA [51].	34
1.40	Profils de concentration des éléments cuivre, étain et oxygène par analyse EDX. L'axe du profil est orthogonal à l'axe de vibration. Les conditions expérimentales sont les suivantes (a) $5\mu m$ -3 Hz, (b) $25\mu m$ -3 Hz, (c) $5\mu m$ -20 Hz, (d) $25\mu m$ -20 Hz. La force de contact est de 0,5 N. [46]	35

1.41	Profils de l'état de surface par mesure de la rugosité suivant l'axe de vibration. Les conditions expérimentales sont les suivantes (a) 5 μm -3 Hz, (b) 25 μm -3 Hz, (c) 5 μm -20 Hz, (d) 25 μm -20 Hz . La force de contact est de 0,5 N [46].	36
1.42	Mesure de la résistance de contact en fonction de la force de contact pour des contacts Sn-Sn, Cu-Sn, Cu-Cu et Ni-Ni pour une fréquence de vibration égale à 10 Hz. Les droites théoriques sont tracées en suivant la formule théorique de Mindlin [45].	37
1.43	Endurance maximale d'un contact Ag-Ag en fonction de son épaisseur soumis à une sollicitation vibratoire (25 μm , 30 Hz) [48].	37
1.44	Analyse de la tension de contact d'un contact glissant dans deux atmosphères différentes (a) 80% Argon et 20% O ₂ et (b) 100% Argon [53].	38
1.45	Mesure de la résistance de contact en fonction du nombre de cycles pour un contact étain-étain à des courants de (a) 1 A, (b) 2 A et (c) 3 A [46].	39
1.46	Observation des débris sur le centre et en dehors de la trace de fretting pour différents courants : 1A, 2A et 3A [46].	40
1.47	Graphique du rendement énergétique d'une analyse EDX en fonction du numéro atomique de l'élément considéré [54].	41
1.48	Photographies du dispositif expérimental de la micro-sonde nucléaire	42
1.49	Schéma du dispositif expérimental de la micro-sonde nucléaire	42
1.50	Réseau de résistance en trois dimensions pour la modélisation de la résistance de contact lors de la dégradation par fretting-corrosion [58].	44
1.51	Modélisation de la résistance de contact en fonction de la concentration de SnO. (a) 20% d'air et SnO ₂ , (b) 20% d'air, 1% de Sn et SnO ₂ [13].	44
1.52	Comparaison entre la modélisation du fretting-corrosion et des résultats expérimentaux de la résistance de contact en fonction du nombre de cycles pour un contact étain-étain [49] .	45
1.53	Photographies du dispositif expérimental [60].	46
1.54	Résultats expérimentaux du comportement mécanique du connecteur. (a) Fonction de transfert en fonction de la fréquence pour deux types de mesures. (b) Déphasage en fonction de la fréquence [60].	46
1.55	Résultats expérimentaux sur le comportement mécanique d'un connecteur avec fil tendu. (a) Amplitude de déplacement (b) Fréquence de résonance en fonction de la longueur de fil [60].	47
1.56	Exemple du type de mouvement entre le clip et la languette et le type de modélisation [60].	47
1.57	(a) Photographie du dispositif expérimental (b) fonction de transfert des trois types de connectiques.	48
1.58	Mesure électrique de la résistance de contact en fonction du nombre de cycles pour plusieurs accélérations à 36 Hz ($1g = 9,81 m.s^{-2}$) [61].	49
1.59	Mesure du seuil minimal d'accélération en fonction de la fréquence [61].	49
1.60	Résultats du comportement électrique temporel à différentes fréquences en fonction d'une part de l'accélération et d'autre part de la longueur de fil (a) 3 inches (76mm) (b) 8 inches (203 mm) [62] ($1 g = 9,81 m.s^{-2}$)	50
1.61	Distribution des tensions de contact mesurées en fonction du nombre de cycles de vibrations [45].	50
1.62	Mesure de la tension de contact pour deux types de connecteurs (a) fils attachés et (b) fils libres. [64].	51
1.63	Analyse SEM de l'état de surface des clip et languette des connecteurs PMH vieillis sur véhicule [64]. (a) et (c) : fils attachés. (b) et (d) : fils libres.	51
1.64	(a) Mesures des accélérations sur les deux types de connecteurs et (b) corrélation entre la taille des débris et le nombre d'oscillations subit par les connecteur [64].	52
2.1	Schéma de l'échantillon RH-PCPL. Dans ce cas, l'axe vibratoire est orthogonal à celui de la languette. L'axe des vibration est donc selon l'axe Z. Le type du système de fixation porte-échantillon/porte-languette est caractéristique d'une fixation sur véhicule.	56
2.2	Photographie de l'échantillon RH-PCPL.	56
2.3	Schéma de l'échantillon PMH-GTS en position verticale vu de coté. Dans ce cas, l'axe de vibration est parallèle à l'axe de la languette. L'axe des vibration est donc selon l'axe X. Le système de fixation porte-échantillon/capteur est caractéristique d'une fixation sur véhicule	57

2.4	Photographie de l'échantillon PMH-GTS	58
2.5	Schémas du clip et de la languette en lien avec le repère orthonormé. L'unité des longueurs est le millimètre.	58
2.6	Schéma de principe de l'actionneur piézo-électrique	59
2.7	Schéma de principe du pot vibrant.	60
2.8	Schéma de principe de la mesure de l'amplitude de déplacement grâce à un capteur de déplacement de type laser.	60
2.9	Schéma de principe de la vibrométrie pour une mesure orthogonale au déplacement.	61
2.10	Résolution de vibromètre 1D dont la valeur dépend de la fréquence. La correspondance en amplitude de déplacement est valide si la vibration est de type sinusoïdal.	62
2.11	schéma de la méthode de la mesure par 4 fils et la méthode de la mesure par 4 fils approché	62
2.12	(a) Graphique des amplitudes de mouvement mesurées par un laser de déplacement et un vibromètre sur l'actionneur piézo-électrique. (b) Graphique des amplitudes mesurées par le vibromètre pour différentes amplitudes de commande.	63
2.13	Schéma du banc d'essai avec les mesures de déplacement et vitesse sur les différents composants du connecteur suivant les trois axes.	64
2.14	Mesure des déplacements selon l'axe X correspondant à l'axe de vibration mesuré par vibrométrie des différents composants du connecteur RH-PCPL avec le porte-échantillon 1.	64
2.15	Mesure des déplacements du porte-clip du connecteur RH-PCPL suivant les trois axes : X, Y et Z.	65
2.16	Mesure électrique pour un connecteur RH-PCPL avec des connectiques étamées (consigne de $5 \mu m$, 205 Hz ($12,7 m.s^2$), 200 mA).	65
2.17	Analyse SEM de la languette RH après 24h de test à 205 Hz.	66
2.18	Analyse EDX de la zone de contact au bout de piste d'insertion après 24h de test à 205 Hz. Les résultats indiquent la présence de l'étain et du composé inter-métallique cuivre-étain en surface.	66
2.19	Schéma du banc d'essai avec les mesures de déplacement et de vitesse sur un connecteur.	67
2.20	Mesures selon l'axe X avec le nouveau porte-échantillon sur un échantillon RH-PCPL.	67
2.21	Profil vibratoire utilisé lors des essais sur pot vibrant et défini selon le cahier des charges Renault. Correspondance entre les amplitudes d'accélération et les amplitudes de mouvement [44].	69
2.22	Schéma du connecteur RH-PCPL avec les différents points de visée. Les vibrations sont parallèles à l'axe de la languette.	70
2.23	Schéma du connecteur RH-PCPL avec les différents points de visée. Les vibrations sont orthogonales à l'axe de la languette.	70
2.24	Amplitudes absolues de déplacement du connecteur RH-PCPL. Résultats suivant (a) l'axe X, (c) l'axe Y et (e) l'axe Z avec une vibration imposée parallèle à l'axe de la languette. Résultats suivant (b) l'axe X, (d) l'axe Y et (f) l'axe Z avec une vibration imposée orthogonale à l'axe de la languette.	71
2.25	Schéma du capteur PMH avec le porte-clip GTS. La vibration est parallèle à l'axe de la languette.	73
2.26	Schéma du capteur PMH avec le porte-clip GTS. La vibration est orthogonale à l'axe de la languette.	73
2.27	Amplitudes absolues de déplacement du connecteur PMH-GTS. Résultats suivant (a) l'axe X, (c) l'axe Y et (e) l'axe Z avec une vibration imposée parallèle à l'axe de la languette. Résultats suivant (b) l'axe X, (d) l'axe Y et (f) l'axe Z avec une vibration imposée orthogonale à l'axe de la languette	74
2.28	Mesure du déplacement en amplitude et de la tension de contact à la fréquence de 100 Hz.	77
2.29	Mesures électriques du connecteur PMH-GTS en position horizontale durant 11h.	77
2.30	Mesures électriques du connecteur PMH-GTS en position verticale durant 16h.	78
2.31	Mesures électriques du connecteur PCPL-RH en position verticale durant 16h.	78
2.32	Analyse à la loupe binoculaire de la zone de contact sur le clip et la languette du connecteur PMH-GTS.	79
2.33	Analyse MEB et physico-chimique d'une trace de contact d'un clip revêtu d'or et de nickel sur cuivre d'un porte-clip GTS sur capteur PMH après 11h de vibration en appliquant le profil 15g (cahier des charges Renault).	79

2.34	Analyse MEB et physico-chimique d'une trace de contact d'une languette revêtue d'or et de nickel sur cuivre d'un capteur PMH connecté à un porte-clip GTS après 11h de vibrations en appliquant le profil 15g (cdc Renault).	80
2.35	Photographies MEB (a) du clip et (b) de la languette du porte-clip GTS et du capteur PMH après 16h de test. L'axe de vibration correspond à l'axe de la languette.	81
2.36	Photographie MEB du clip, de la languette et du plancher du connecteur RH-PCPL en position verticale après 16h de test	81
2.37	Photographie MEB de la zone de contact clip du connecteur PCPL-RH en position verticale et analyse physico-chimique au centre (point1) et au bord de la trace de fretting (points 2 et 3).	82
3.1	Graphique de deux signaux correspondant à des mouvements sinusoïdaux mettant en évidence l'amplitude mesurée et le déphasage. Le mouvement 1 est la référence. La mesure des déphasages $\Phi_{2 \rightarrow 1}$ et $\Phi_{3 \rightarrow 1}$ permet d'en déduire le déphasage $\Phi_{3 \rightarrow 2}$	88
3.2	Déphasage entre le porte-languette et les autres composants du connecteur RH-PCPL. Dans le premier cas, les résultats sont suivant (a) l'axe X, (c) l'axe Y et (e) l'axe Z avec une vibration parallèle à la languette. Dans le deuxième cas, les résultats sont suivant (b) l'axe X, (d) l'axe Y et (f) l'axe Z avec une vibration orthogonale à la languette.	89
3.3	Mesure des déplacements relatif entre (a)(c) le porte-languette et le porte-clip puis (b)(d) la languette et le clip suivant que la vibration soit (a)(b) parallèle ou (c)(d) orthogonale à la languette	90
3.4	Vue en coupe du contact clip-languette avec une photographie des points de contact du clip.	91
3.5	Déphasage entre le capteur et les autres composants du connecteur PMH-GTS. Dans le premier cas, les résultats sont suivants (a) l'axe X, (c) l'axe Y et (e) l'axe Z avec une vibration parallèle à la languette. Dans le deuxième cas, les résultats sont suivants (b) l'axe X, (d) l'axe Y et (f) l'axe Z avec une vibration orthogonale à la languette.	93
3.6	Mesure des déplacements relatifs entre (a)(b) le capteur et le porte-clip puis (c)(d) la languette et le clip suivant que la vibration soit (a)(c) parallèle ou (b)(d) orthogonale à la languette.	94
3.7	Schéma de la connectique métallique du connecteur PMH-GTS	95
3.8	Fonctions de transfert en amplitude de la languette, du clip, du porte-clip et du fil par rapport au porte-languette RH. Dans le premier cas, les résultats sont suivant (a) l'axe X, (b) l'axe Y et (c) l'axe Z avec une vibration parallèle à l'axe de la languette. Dans le deuxième cas, les résultats sont suivant (b) l'axe X, (d) l'axe Y et (f) l'axe Z avec une vibration orthogonale à l'axe de la languette.	98
3.9	Fonctions de transfert des mouvement orthogonaux à l'axe de vibration : H' . Dans le premier cas, il s'agit des déplacements suivant les axes (a) Y et (c) Z sur celui selon l'axe X. Dans le deuxième cas, il s'agit des déplacements suivant les axes (b) X et (d) Y sur celui selon l'axe Z.	99
3.10	Fonctions de transfert en amplitude de la languette, du clip, du porte-clip et du fil par rapport au capteur PMH. Dans le premier cas, les résultats sont suivant (a) l'axe X, (c) l'axe Y et (e) l'axe Z avec une vibration parallèle à l'axe de la languette. Dans le deuxième cas, les résultats sont suivant (b) l'axe X, (d) l'axe Y et (f) l'axe Z avec une vibration orthogonale à l'axe de la languette.	100
3.11	Fonctions de transfert des mouvement orthogonaux à l'axe de vibration : H' . Dans le premier cas, il s'agit des déplacements suivant les axes (a) Y et (c) Z sur celui selon l'axe X. Dans le deuxième cas, il s'agit des déplacements suivant les axes (b) X et (d) Y sur celui selon l'axe Z.	102
3.12	Schéma du mécanisme ressort-amortisseur avec le coefficient d'amortissement B et la constante de raideur K.	104
3.13	Simulations numériques des pics caractéristiques des fonctions de transferts suivant les axes (a) X, (b) Y et (c) Z. Pour cela, l'équation 3.12 est utilisée.	106
3.14	Simulations numériques des pics caractéristiques des fonctions de transferts suivant les axes (a) X, (b) Y et (c) Z. Pour cela, l'équation 3.12 est utilisée.	107
3.15	Processus de calcul pour définir les déplacements relatifs entre le clip et la languette.	108
3.16	Fonction de transfert entre le porte-languette et la languette du connecteur RH-PCPL.	109

3.17	Fonction de transfert et modélisation numérique des pics caractéristiques de la fonction de transfert entre la languette et le clip suivant l'axe X	109
3.18	Déplacements relatifs entre le clip et la languette : résultats expérimentaux et résultats basés sur les fonctions de transfert en appliquant deux profils vibratoires.	110
3.19	Déplacements relatifs entre le clip et la languette : résultats expérimentaux, résultats basés sur les fonctions de transfert et les résultats basés sur une modélisation.	111
4.1	Photographie illustrant la position des régions 1 à 5 le long de la piste de fretting.	118
4.2	Schéma de la piste de fretting associé aux cartographies brutes des régions 1 à 5.	119
4.3	(a) Spectres RBS et (b) NRA liés aux cinq régions analysées en échelle linéaire.	120
4.4	Spectres DRX liés aux cinq régions analysées.	121
4.5	Cartographies des éléments étain, cuivre, oxygène et carbone pour les régions 1 à 5	122
4.6	(a) Cartographie générale de la région 1. (b) Cartographie de la région 1 liée uniquement au signal RBS de l'étain définissant les sous-régions 1A, 1B, 1C et 1D. (c) Spectres associés aux sous-régions en échelle linéaire. (d) Spectres associés aux sous-régions en échelle logarithmique.	123
4.7	Simulations numériques de deux cas correspondant à une zone peu dégradée et non-dégradée. Ces spectres sont similaires aux spectres observés sur la figure 4.6	124
4.8	(a) Cartographie brute de la région 1 avec les sous-régions 1A et 1B. (b) Cartographie brute de la région 4 avec les sous-régions 4A, 4B et 4C.	125
4.9	Spectres RBS et NRA associés aux sous-régions 1A, 1B, 4A, 4B et 4C.	125
4.10	(a) Cartographie de la région 2 avec les sous-régions 2A et 2B. (b) Cartographie de la région 3 avec les sous-régions 3A, 3B et 3C.	126
4.11	Spectres RBS et NRA associés aux sous-régions 2A, 2B, 2C, 3A, 3B et 3C.	127
4.12	Schéma du test expérimental avec la languette fixée à une console et le clip fixé à un actionneur piézo-électrique sous une enceinte avec l'arrivée du di-azote. L'étude sous air est réalisée dans les mêmes conditions sans imposer un flux de di-azote.	129
4.13	Schéma du test expérimental avec la languette fixée à une console et le clip fixé à un actionneur piézo-électrique, le di-azote est introduit par un flux de gaz dirigé vers le contact.	130
4.14	Courbes de la tension de contact en fonction du temps sous d'une atmosphère d'air et une atmosphère de di-azote. Les conditions expérimentales sont 10 μm , 20 Hz, 200 mA.	130
4.15	Courbe de la tension de contact en fonction du temps sous une atmosphère de di-azote. Les conditions expérimentales sont 10 μm , 20 Hz, 200 mA.	131
4.16	Caractéristiques I-V relevées à différents moments entre un clip et une languette soumis à un déplacement relatif de 10 μm , 20 Hz sous une atmosphère d'air.	132
4.17	Caractéristiques I-V relevées à différents moments entre un clip et une languette soumis à un déplacement relatif de 10 μm , 20 Hz sous une atmosphère de di-azote.	132
4.18	Mesure de la tension de contact en fonction du temps. L'atmosphère est entièrement composée d'air jusqu'à 500s puis le di-azote est introduit. La zone hachurée 1 correspond à des fluctuations importantes de la tension de contact. Les zones hachurées 2 et 3 correspondent à l'absence de fluctuations de la tension de contact. Les conditions expérimentales sont 25 μm , 50 Hz (2,46 $m.s^{-2}$), 200 mA.	133
4.19	Photographie MEB d'une zone de contact sur la languette sous une atmosphère de di-azote (a) et sous une atmosphère d'air où se trouvent deux points de contact (b).	134
4.20	Analyse MEB des languettes des échantillons sous une atmosphère air et diazote (condition : 10 μm , 10 Hz) et sous une atmosphère transitoire air \rightarrow di-azote (condition : 25 μm , 50 Hz).	135
4.21	Mesure de la tension de contact en fonction du temps sous une atmosphère d'air, un flux d'air comprimé et un flux de di-azote. Les conditions expérimentales sont 10 μm , 20 Hz, 200 mA.	136
4.22	Mesure de la tension de contact par alternance d'atmosphères. Les zones grises correspondent à l'injection du flux d'azote.	137
4.23	Points de mesures des caractéristiques I-V.	137
4.24	Caractéristiques I-V à quatre instants différents : avant, début, durant et après la deuxième injection de di-azote.	138
4.25	Mesure de la tension de contact en alternant le flux d'azote et l'atmosphère d'air (10 μm - 10 Hz).	139

4.26	Mesure de la tension de contact en alternant le flux d'azote et l'atmosphère d'air ($25 \mu m$ -50 Hz).	139
4.27	Diminution de la tension de contact par introduction du di-azote suivant les conditions expérimentales suivantes : $10 \mu m$ -20 Hz. Chaque courbe est extrapolée.	140
4.28	Diminution de la tension de contact par introduction du di-azote suivant les conditions expérimentales suivantes : $25 \mu m$ -50 Hz. Chaque courbe est extrapolée.	140
4.29	Plusieurs mesures de tension de contact en temps réel relevées à 1000, 2000 et 3000 s pour un contact étain-étain suivant les conditions expérimentales suivantes : $10 \mu m$, 10 Hz, 500 mA.	142
4.30	Chemin parcouru par le clip sur la languette sur un aller-retour ($10 \mu m$, 10 Hz). Les zones A1, A2, R1 et R2 correspondent aux moitiés de l'aller et retour.	143
4.31	Cartographie aller et retour en fonction de la localisation sur la piste de fretting et du nombre de cycle. Les zones de fortes fluctuations sont indiquées pour une valeur de tension de contact maximale égale à 0,5 V. La courbe de la tension de contact située à droite est mesurée par voltmètre. Les conditions expérimentales sont $10 \mu m$, 10 Hz ($39,4 \cdot 10^{-3} m \cdot s^{-2}$). Les points (1) à (5) indiquent différents stades de fluctuations de la tension de contact. . .	144
4.32	Tension de contact mesurée en temps réel à deux instants 1240s et 2000s avec leur valeur respectives de 100 % et 0%.	145
4.33	Cartographie aller et retour en fonction du pourcentage (100 % représente le maximum et 0% représente le minimum de la tension de contact).	146
4.34	Cartographie aller et retour en fonction de l'accélération et du temps indiquant les zones de fortes fluctuations pour une valeur de tension de contact maximale égale à 500 mV de l'expérience 3. La courbe de la tension de contact mesurée par voltmètre est disposée à droite pour faire la comparaison.	147
4.35	Schéma des forces lors du fretting-corrosion.	148

Liste des tableaux

1.1	Exemple de calcul de la résistance de contact pour un spot de $100 \mu m^2$ suivant différentes formes [9].	10
1.2	Caractéristiques mécaniques, électriques et thermiques du cuivre et de ses alliages [9].	13
1.3	Caractéristiques mécaniques, électriques et thermiques du cuivre, de l'étain, l'argent, l'or et le nickel [9].	13
1.4	Mesure de la résistivité électrique et de la dureté Vickers du cuivre, de l'étain et des composés inter-métalliques [19] [20].	14
1.5	Valeurs de la tension V et de la température associées aux changements de phase de l'étain, cuivre, or et argent.	20
1.6	Caractéristiques des zones de contact en fonction de l'amplitude et de la fréquence (Ra : rugosité).	36
1.7	Caractéristiques énergétiques des éléments cuivre, étain, oxygène et carbone en lien avec les techniques des analyses RBS, NRA et PIXE.	43
2.1	Résumé de l'analyse des mesures absolues en amplitude des composantes des connecteurs RH-PCPL et PMH-GTS soumis à une vibration parallèle à la languette	75
2.2	Résumé de l'analyse des mesures absolues en amplitude des composantes des connecteurs RH-PCPL et PMH-GTS soumis à une vibration orthogonale à la languette	75
3.1	Résumé de l'analyse des déplacement relatifs entre le porte-languette et le porte-clip au sein des connecteurs RH-PCPL et PMH-GTS soumis à une vibration parallèle ou orthogonale à la languette.	96
3.2	Résumé de l'analyse des déplacements relatifs au sein des connecteurs RH-PCPL et PMH-GTS soumis à une vibration parallèle ou orthogonale à la languette.	103
3.3	Ensemble des coefficients caractérisant les pics de résonance issus des fonctions de transfert suivant les trois axes. f_0 [Hz], K [$N.m^{-1}$] et B [$kg.s^{-1}$] représentent respectivement la fréquence de résonance, la constante de raideur et le facteur d'amortissement.	105
3.4	Ensemble des coefficients caractérisant les pics de résonances issus des fonctions de transfert suivant les trois axes. f_0 [Hz], K [$N.m^{-1}$] et B [$kg.s^{-1}$] représentent respectivement la fréquence de résonance, la constante de raideur et le facteur d'amortissement.	107
3.5	Ensemble des coefficients caractérisant les deux pics de résonances issus de la fonction de transfert suivant l'axe X. f_0 [Hz], K [$N.m^{-1}$] et B [$kg.s^{-1}$] représentent respectivement la fréquence de résonance, la constante de raideur et le facteur d'amortissement.	109
4.1	Tableau des quantités de rayonnements reçues pour les régions analysées [Coulomb] et la taille de la zone.	119
4.2	Compositions chimiques obtenues à l'aide des simulations numériques effectuées avec SIMNRA des sous-régions 1A, 1B, 4A et 4B.	126
4.3	Compositions chimiques obtenues grâce aux simulations numériques des sous-régions 2A, 2B, 2A, 3A, 3B et 3C.	127
4.4	Coefficients des décroissances exponentielles composés avec des décroissances linéaires dans la cas d'une sollicitation vibratoire sinusoïdale de $10 \mu m$, 10 Hz sous un flux de di-azote.	141
4.5	Coefficients des décroissances exponentielles composés avec des décroissances linéaires dans la cas d'une vibration sinusoïdale de $25 \mu m$, 50 Hz sous un flux de di-azote.	141
4.6	Conditions expérimentales des deux expériences.	143