

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP)

Discipline ou spécialité :

Science et Génie des Matériaux

Présentée et soutenue par :

Mme KHOULOUD JLAIEL

le mardi 29 mars 2022

Titre :

Corrélation entre signaux d'émission acoustique et mécanismes tribologiques par visualisation synchrone d'une interface acier/verre.

Ecole doctorale :

Sciences de la Matière (SDM)

Unité de recherche :

Laboratoire Génie de Production de l'ENIT (E.N.I.T-L.G.P.)

Directeur(s) de Thèse :

M. JEAN DENAPE

Rapporteurs :

MME JULIETTE CAYER-BARRIOZ, ECOLE CENTRALE DE LYON

M. YANNICK DESPLANQUES, Université de Lille

Membre(s) du jury :

MME CHRISTINE BOHER, ECOLE NLE SUP DES MINES ALBI CARMAUX, Président

M. JEAN DENAPE, ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE TARBES, Membre

M. JEAN-YVES PARIS, ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE TARBES, Invité(e)

M. MALIK YAHIAOUI, ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE TARBES, Membre

MME STÉPHANIE DESCHANEL, INSA LYON, Membre

Table des matières

Introduction Générale **1**

1 Étude bibliographique **5**
1.1 Approches tribologiques 6
1.1.1 Paramètres classiques du frottement 6
1.1.2 Concept du troisième corps 7
1.1.2.1 Le triplet tribologique 8
1.1.2.2 Mécanismes d'accommodation 9
1.1.2.3 Le circuit tribologique : 10
1.2 Fretting et glissement alternatif 12
1.2.1 Introduction générale au fretting 12
1.2.2 Conditions et régimes de glissement 14
1.2.3 L'usure en fretting ("fretting-wear") 16
1.2.4 Mécanismes classiques d'usure 20
1.2.5 La fissuration en fretting ("fretting-fatigue") 21
1.3 Émission acoustique 22
1.3.1 Généralités 22
1.3.2 Paramètres des signaux acoustiques 23
1.3.3 Caractéristiques des signaux d'émission acoustique en tribologie 25
1.3.4 Sources d'émission acoustique en tribologie 25
1.3.5 Couplage entre le signal acoustique et les paramètres tribologiques 26
1.3.6 Couplage entre le signal acoustique et les phénomènes tribologiques 27
1.3.6.1 Interactions entre aspérités et usure 27
1.3.6.2 Fissuration et rupture 28
1.3.6.3 Déformation des surfaces et interactions avec l'atmosphère . . . 28
1.3.7 Association des bandes fréquentielles acoustiques à des phénomènes tribologiques 29
1.4 Tribomètres *in situ* 30
1.5 Synthèse partielle 35

2 Dispositifs & Méthodologies **37**
2.1 Dispositif expérimental : Tribomètre 38
2.1.1 Présentation 38
2.1.2 Partie mécanique 38
2.1.3 Instrumentation 40

2.1.4 Logiciel de commande et de paramétrage . . . 41
2.1.5 Acquisition des données . . . 41
2.1.6 Étude des limites opératoires et de la rigidité du dispositif . . . 42
2.2 Dispositif d'émission acoustique . . . 44
2.2.1 Capteur et chaîne d'acquisition . . . 44
2.2.2 Analyse des données et traitement des signaux acoustiques . . . 46
2.3 Système de vision . . . 51
2.4 Matériaux utilisés . . . 52
2.5 Synthèse partielle . . . 53

3 Investigation des mécanismes d'endommagement et d'usure pour un contact acier/verre 56
3.1 Comportement tribologique du contact acier/verre . . . 57
3.1.1 Conditions expérimentales . . . 57
3.1.2 Évolution du coefficient de frottement . . . 58
3.1.3 Reproductibilité . . . 60
3.1.4 Étude de l'énergie dissipée cumulée . . . 63
3.2 Étude des mécanismes d'endommagement et d'usure activés . . . 63
3.2.1 Analyse des traces d'usure . . . 64
3.2.2 Corrélation entre observations *in situ* et signaux acoustiques . . . 67
3.2.3 Mesures et analyses complémentaires . . . 73
3.2.3.1 Caractérisation des fissures hertziennes . . . 73
3.2.3.2 Mesure de l'aire de contact . . . 75
3.2.3.3 Analyse de l'épaisseur du troisième corps . . . 76
3.2.3.4 Analyse de la hauteur du convergent . . . 78
3.2.3.5 Analyse de la composition du troisième corps . . . 80
3.3 Des essais en interrompu . . . 81
3.3.1 Résultats tribologiques . . . 81
3.3.2 Caractéristiques acoustiques de la première fissure hertzienne . . . 84
3.3.3 Géométries des surfaces d'usure . . . 86
3.4 Circuit tribologique . . . 87
3.4.1 Codification des sites et des modes d'accommodation . . . 87
3.4.2 Identification des mécanismes d'accommodation et débits de troisième corps . . . 87
3.5 Analyse des signaux d'émission acoustique . . . 90
3.5.1 Analyse en termes d'amplitude acoustique . . . 90
3.5.2 Analyse en termes de fréquence centroïde . . . 93
3.5.3 Analyse en termes de glissement et de changement de sens . . . 94
3.6 Classification et identification des salves acoustiques . . . 95
3.6.1 Étude du mécanisme d'usure associé à la création et l'évolution du troisième corps 99
3.6.2 Étude du mécanisme associé au remplissage du convergent . . . 103
3.6.3 Étude du mécanisme d'endommagement associé à la fissuration du verre . . . 105
3.7 Synthèse partielle . . . 109

4 Réponses tribo-acoustiques du contact acier/verre sous différentes conditions opératoires 112
4.1 Introduction 113
4.2 Réponses tribologiques et acoustiques 113
4.2.1 Coefficients de frottement 114
4.2.2 Réponses acoustiques 117
4.3 Étude des mécanismes d'endommagement et d'usure sous différents paramètres opératoires 121
4.3.1 Étude de la fissuration 121
4.3.2 Étude du troisième corps 125
4.3.3 Classification des mécanismes d'endommagement et d'usure 126
4.4 Synthèse partielle 129

Conclusion Perspectives 132

Bibliographie 136

Annexes 145

Table des figures

1.1 Représentation du triplet tribologique [Berthier, 1988]. 8
1.2 Mécanismes d'accommodation [Berthier *et al.*, 1998]. 9
1.3 Mécanismes d'accommodation couramment observés [Denape *et al.*, 2001]. 10
1.4 Circuit tribologique présentant les différents débits de particules circulant dans un contact. 11
1.5 Compétition entre le flux source et le flux d'usure conduisant à un équilibre de la matière pendant l'état stationnaire de glissement. 12
1.6 Différenciation entre fretting et glissement alternatif. 13
1.7 Évolution de la condition de glissement en fonction du débattement. 14
1.8 Cycle de fretting en conditions de glissement total et définition des paramètres utilisés. . 15
1.9 Évolution de la condition de glissement au cours du temps, illustration des différents régimes [Fouvry, 1997]. 16
1.10 Illustration des cartes de fretting [Fouvry *et al.*, 1995]. 17
1.11 Détermination du coefficient d'usure énergétique à partir des valeurs d'essai. 18
1.12 Illustration de l'activation du processus de dégradation des surfaces frottantes [Cartier & Kapsa, 2001]. 19
1.13 Représentation des phénomènes élémentaires d'adhésion ; a) création de la jonction entre aspérité ; b) rupture de la jonction ; c) rupture d'un des matériaux antagonistes. 20
1.14 a) usure abrasive à deux corps ; b) usure abrasive à 3 corps. 21
1.15 Schéma d'usure par oxydation. 21
1.16 Représentation d'une salve d'EA. 24
1.17 Sources d'émission acoustique dans un contact frottant. 26
1.18 Carte de corrélation des spectres de fréquence d'émission acoustique pour les phénomènes de déformation et de rupture [Hase *et al.*, 2012]. 30
1.19 Résumé des méthodes utilisées pour l'analyse des contacts lubrifiés [Cann, 2008]. 31
1.20 Représentation schématique et images du dispositif expérimental utilisé par Muratore *et al.* pour l'étude des revêtements à haute température [Muratore *et al.*, 2011]. 32
1.21 Représentation schématique du tribomètre utilisé par Krick *et al.* [Krick *et al.*, 2011]. . . 32
1.22 Schéma de principe du banc d'essai équipé d'un système d'observation optique utilisé par Euguchi *et al.* [Eguchi *et al.*, 2009]. 33
1.23 Représentation schématique du tribomètre utilisé par Descartes *et al.* (a) vue latérale, b) vue de dessus, c) vue de dessus agrandie [Descartes & Berthier, 2002]. 33
1.24 Représentation schématique du tribomètre équipé d'un caméra rapide utilisé par Yahiaoui *et al.* [Yahiaoui *et al.*, 2017]. 34

1.25 Dispositif expérimental utilisé par De Pannemaecker *et al.* [de Pannemaecker *et al.*, 2017]. 34

2.1 Vue générale du dispositif de fretting. 38
2.2 Vue générale de la nacelle mobile (à gauche) et des mâchoires (à droite). 40
2.3 Capture d'écran du logiciel de commande VibPilot™. 41
2.4 Capture d'écran du logiciel d'acquisition des données CATMAN™. 42
2.5 Variation de la fréquence d'excitation maximale en fonction du déplacement imposé. . . 43
2.6 Variation de déplacement mesuré en fonction de déplacement imposé. 43
2.7 Spectrogramme de force de frottement : les harmoniques paires (plus intenses) et les harmoniques impaires (moins intenses). 44
2.8 Montage typique d'acquisition d'EA. 45
2.9 Capteur piézoélectrique PCI2 pour l'acquisition des signaux d'émission acoustique (à gauche) et vérification du couplage par la technique de Hsu-Nielsen (à droite). 45
2.10 Exemple de résultats de comparaison des activités acoustiques des capteurs positionnés : a) du côté de l'échantillon plan inférieur, b) du côté de l'échantillon sphérique supérieur. 46
2.11 Exemple de représentation spectrale en EA. 47
2.12 Exemple de représentation temporelle en EA : nombre de salves en fonction du temps. . 47
2.13 Exemple de diagramme de corrélation représentant l'amplitude en fonction du nombre des coups. 48
2.14 Exemple de dendrogramme déterminé par la méthode d'analyse en composantes principales. 49
2.15 Comparaison des méthodes de classification et d'identification des clusters : a) méthode de k-moyennes, b) méthode manuelle. 50
2.16 Vues générales (a) de la caméra rapide, (b) de la fibre optique et (c) de l'ensemble de tubes et lentilles. 51

3.1 Image du contact initial de la bille en acier contre un plan en verre sodocalcique obtenue par caméra rapide sous une charge normale de 5 N. 57
3.2 Contact de Hertz : a) répartition de la pression dans le contact en fonction du rayon de Hertz et b) répartition des contraintes en fonction de la profondeur en contact statique. . 58
3.3 Évolution globale de la forme des signaux du déplacement et de la force tangentielle pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N). 59
3.4 Évolution de la forme des signaux du déplacement et de la force tangentielle pour le contact acier/verre sodocalcique à des différents instants de l'essai ($\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N). 59
3.5 Évolution du coefficient de frottement pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N). 60
3.6 Évolution du coefficient de frottement en fonction du temps des deux essais pour une durée de 80 s. 61
3.7 Évolution des différents coefficients de frottement pour des essais de reproductibilité. . . 61
3.8 Paramètres extraits de la courbe de coefficient de frottement en fonction du temps. 62
3.9 Évolution de l'énergie dissipée totale en fonction du temps pendant un essai de 120 s pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N). 64

3.10 Observation au microscope optique de a) bille en acier 100Cr6 et b) verre sodocalcique après 120 s d'essai ($\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N). 65
3.11 Observation au MEB de la morphologie de la couche interfaciale après 120 s d'essai : a) au centre de la trace d'usure et b) à l'extrémité de la trace. 66
3.12 Analyse EDX de la couche interfaciale après 120 s d'essai (élément Si en vert et élément Fe en violet). 67
3.13 Évolution du coefficient de frottement avec a) l'amplitude acoustique et b) l'énergie absolue cumulée durant un essai de 120 s pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm$ 50 µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N). L'échelle colorée représente la variation de la fréquence centroïde. 69
3.14 Évolution du coefficient de frottement avec les instants d'apparition des mécanismes d'endommagement de (a) à (j). 70
3.15 Images de la zone de contact extraites de la vidéo montrant l'évolution des mécanismes élémentaires durant un essai de 120 s pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm$ 50 µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N). Les images a) et b) sont pendant la première phase de l'essai. Les images de c) à h) sont pendant la deuxième phase de l'essai et les mages i) et j) sont pendant la troisième phase de l'essai. 71
3.16 Évolution synchronisée a) du coefficient de frottement et de l'ouverture des fissures et b) de l'énergie absolue cumulée acoustique et de la longueur des fissures durant un essai de 120 s pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N). . . . 74
3.17 Illustration schématique d'une coupe transversale réalisée parallèlement à la trace d'usure sur le verre. 74
3.18 Observation de la fissuration sur une coupe parallèle à la surface de l'échantillon en verre. 75
3.19 Mesure de l'aire de portance (courbe noire) et l'aire de dégradation (courbe rouge) pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N). 76
3.20 Profil d'intensité en niveau de noir de la zone de contact durant un essai de 120 s pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N). 77
3.21 a) Image topographique et b) épaisseur du troisième corps après un essai de 120 s pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N). 78
3.22 Corrélation entre le coefficient de frottement, le niveau de noir et l'épaisseur du troisième corps. 78
3.23 Schématisation de la zone d'entrée (convergent) dans le contact bille/plan. 79
3.24 Évolution de la longueur du film interfacial dans le sens de glissement durant un essai de 120 s pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N). . . . 79
3.25 Points des spectres localisés sur la surface du troisième corps et spectres EDS correspondant aux points localisés sur l'extrémité et à l'intérieur de la trace d'usure. 80
3.26 Superposition des courbes de frottement de l'essai de référence avec l'essai en interrompu. 81
3.27 Observation au microscope optique de a) bille en acier 100Cr6 et b) verre sodocalcique pour un essai interrompu à 30 s. 82
3.28 Analyse chimique de la trace d'usure sur l'échantillon de verre après 30 s d'essai. 83
3.29 Pourcentages atomiques de a) silicium, b) du fer et c) de l'oxygène pour l'essai interrompu à 30 s comparé à celui de référence. 84

3.30 Évolution de l'amplitude acoustique de l'essai interrompu après une première fissuration. 85
3.31 Image extraite de la vidéo de l'essai réalisé à 30 s montrant l'apparition d'une première fissuration. 85
3.32 Évolution expérimentale des dimensions des traces d'usure du plan et de la bille en fonction du temps. 86
3.33 Circuit tribologique pour un essai de 120 s pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N). 89
3.34 Dendrogramme des paramètres d'émission acoustique les plus pertinents : (0) paramétrique 1 de force tangentielle, (1) paramétrique 2 de déplacement, (2) temps de montée, (3) nombre de coups, (4) durée, (5) amplitude, (6) énergie absolue et (7) fréquence centroïde. 90
3.35 Répartition des salves d'émission acoustique dans les cycles en fonction de l'amplitude pour un essai à $\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N : a) l'ensemble de l'essai, b) deuxième phase de l'essai, c) troisième phase de l'essai. 92
3.36 Répartition des salves d'émission acoustique dans les cycles en fonction de la fréquence centroïde pour un essai à $\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N. 93
3.37 Distribution des salves en fonction de la fréquence centroïde pour l'essai réalisé à $\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N : a) deuxième phase de l'essai, b) troisième phase de l'essai. 94
3.38 Répartition des salves d'émission acoustique dans les cycles en fonction des plateaux de glissement et des changements de sens pour un essai à $\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N. 95
3.39 Évolution de l'énergie absolue cumulée en fonction du temps pour les deux plateaux de glissement et les deux changement de sens. 95
3.40 Dendrogramme de classification des données d'émission acoustique après le choix des composantes principales. 96
3.41 Visualisation des classes selon la représentation de deux composantes principales PC1 et PC2. 97
3.42 Évolution des signaux d'émission acoustique des trois classes pour le contact acier/verre. Classe 0 : Création du troisième corps, Classe 1 : remplissage du convergent et Classe 2 : fissuration du verre. 98
3.43 Distribution des salves en fonction de la fréquence centroïde de la classe 0. 99
3.44 Évolution des signaux d'émission acoustique du mécanisme d'usure associé à la création et l'évolution du troisième corps pour le contact acier/verre. 99
3.45 Images extraites de la vidéo et associées aux salves de la classe 0 dans la partie (a). . . . 100
3.46 Images extraites de la vidéo et associées aux salves de la classe 0 dans la partie (b). . . . 100
3.47 Images extraites de la vidéo et associées aux salves de la classe 0 dans la partie (c). . . . 101
3.48 Images extraites de la vidéo et associées aux salves de la classe 0 dans la partie (d). . . . 101
3.49 Images extraites de la vidéo et associées aux salves de la classe 0 dans la partie (e). . . . 102
3.50 Images extraites de la vidéo et associées aux salves de la classe 0 dans la partie (f). . . . 102
3.51 Images extraites de la vidéo et associées aux salves de la classe 0 dans la partie (g). . . . 103
3.52 Distribution des salves en fonction de la fréquence centroïde de la classe 1. 103
3.53 Reconstitution des salves de trois différentes classes. 104

3.54 Images extraites de la vidéo et associées aux salves de la classe 1. Les images présentées à gauche sont dans le premier changement de sens. Les images présentées à droite sont dans le deuxième changement de sens. 105
3.55 Évolution des signaux d'émission acoustique de mécanisme d'usure associé à la création et l'évolution du troisième corps pour le contact acier/verre. 106
3.56 Distribution des salves en fonction de la fréquence centroïde de la classe 2. 106
3.57 Images extraites de la vidéo et associées aux salves de la classe 2. 107
3.58 Images extraites de la vidéo montrant la stabilisation des fissures. 108
3.59 Représentation de l'accroissement de l'ouverture des fissures et de la fréquence centroïde en fonction du temps. 108

4.1 Évolution du coefficient de frottement et de l'amplitude acoustique en fonction du nombre de cycles lors des essais réalisés à différentes conditions opératoires pour le contact acier/verre. 114
4.2 Évolution des coefficients de frottement sous différentes conditions opératoires pour le contact acier/verre. 115
4.3 Évolution du coefficient de frottement et de l'amplitude acoustique en fonction du nombre de cycles lors des essais réalisés à différentes conditions opératoires pour le contact acier/verre. 118
4.4 variation de l'amplitude acoustique moyenne sur l'ensemble de l'essai dans différentes conditions opératoires pour le contact acier/verre. 120
4.5 variation de la fréquence centroïde moyenne sur l'ensemble de l'essai dans différentes conditions opératoires pour le contact acier/verre. 120
4.6 Énergie absolue cumulée en fonction de l'amplitude acoustique maximale sur l'ensemble des essais dans différentes conditions opératoires pour le contact acier/verre. 121
4.7 Évolution pendant la phase II a) de la longueur et b) de l'ouverture de la première fissure de Hertz apparue dans le contact acier/verre sous différentes conditions opératoires et c) rapport entre la longueur et l'ouverture. 122
4.8 Exemple de localisation de la première fissure dans un cycle de glissement pour un essai réalisé à a) f = 10 Hz, F_N = 5 N et b) f = 15 Hz, F_N = 5 N). 123
4.9 a) Évolution pendant la phase III de la longueur des fissures stabilisées apparues dans le contact acier/verre sous différentes conditions opératoires et b) Évolution du rapport de la longueur des fissures et le rayon de Hertz en fonction de la charge normale. 124
4.10 Évolution pendant la phase III de l'ouverture des fissures stabilisées apparues dans le contact acier/verre sous différentes conditions opératoires. 124
4.11 Évolution de l'amplitude acoustique de la salve associée à la création du tribofilm dans le contact acier/verre sous différentes conditions opératoires. 125
4.12 Évolution de l'amplitude acoustique de développement du tribofilm avant fissuration dans le contact acier/verre sous différentes conditions opératoires. 125
4.13 Visualisation de la distribution de la fréquence centroïde de a) l'essai de référence (f = 10 Hz, F_N= 5 N), b) l'essai N°3 (f = 10 Hz, F_N = 15 N) et c) l'essai N°7 (f = 20 Hz, F_N = 5 N). La classe 0 (en rouge) correspond à la création et au développement du tribofilm, la classe 1 (en bleu) au remplissage du convergent/divergent et la classe 2 (en vert) à la fissuration. 127

4.14 Variation de la fréquence centroïde minimale pour l'essai de référence (f = 10 Hz, F_N = 5 N), l'essai N°3 (f = 10 Hz, F_N = 15 N) et l'essai N°7 (f = 20 Hz, F_N = 5 N). . . 127
4.15 Variation de la fréquence centroïde maximale pour l'essai de référence (f = 10 Hz, F_N = 5 N), l'essai N°3 (f = 10 Hz, F_N = 15 N) et l'essai N°7 (f = 20 Hz, F_N = 5 N). . . 128
4.16 Variation de l'amplitude acoustique maximale pour l'essai de référence (f = 10 Hz, F_N = 5 N), l'essai N°3 (f = 10 Hz, F_N = 15 N) et l'essai N°7 (f = 20 Hz, F_N = 5 N). . . 128
4.17 Variation de l'énergie absolue minimale pour l'essai de référence (f = 10 Hz, F_N= 5 N), l'essai N°3 (f = 10 Hz, F_N = 15 N) et l'essai N°7 (f = 20 Hz, F_N = 5 N). 129
4.18 Variation de l'énergie absolue maximale pour l'essai de référence (f = 10 Hz, F_N= 5 N), l'essai N°3 (f = 10 Hz, F_N = 15 N) et l'essai N°7 (f = 20 Hz, F_N = 5 N). 129
4.19 Plan du nouveau bras porteur. 145
4.20 Plan de la nacelle mobile après modification. 145
4.21 Plan de la première mâchoire. 146
4.22 Plan de la deuxième mâchoire. 146
4.23 Caractéristique de la bande passante du capteur d'émission acoustique. 147
4.24 Illustration d'un contact élastique sphère/plan selon la théorie de Hertz. 148

Liste des tableaux

1.1 Facteurs influençant l'amplitude en émission acoustique [Baranov *et al.*, 2007]. . 25

2.1 Caractéristiques des capteurs du dispositif de fretting. 40
2.2 Composition chimique du verre sodocalcique. 52
2.3 Propriétés mécaniques et physiques du verre sodocalcique. 52
2.4 Composition chimique du 100Cr6. 52
2.5 Propriétés mécaniques et physiques du 100Cr6. 53
2.6 Conditions des essais. 53

3.1 Conditions d'essai permettant d'étudier le comportement tribologique du contact acier/verre. 57
3.2 Durées des phases issues de l'évolution du coefficient de frottement en fonction du temps dans les conditions de référence. 62
3.3 Coefficients de frottement associés aux différentes phases dans les conditions de référence. 62
3.4 Pentes des coefficients de frottement et temps du frottement maximal associés à la phase II dans les conditions de référence. 62
3.5 Résultats des largeurs des traces d'usure de la bille et du plan ($\delta = \pm$ 50 µm, f = 10 Hz, F_N = 5 N, t = 120 s). 65
3.6 Pourcentages atomiques des éléments détectés à l'extrémité et à l'intérieur de la trace d'usure. 81
3.7 Éléments détectés dans la trace d'usure sur l'échantillon de verre après 30 s d'essai. . . . 84
3.8 Tableau récapitulatif des caractéristiques de la première fissure de l'essai interrompu à 30 s comparés à celui de référence. 86
3.9 Caractéristiques acoustiques des salves associées aux interactions mécaniques. 98

4.1 Conditions d'essais permettant d'étudier l'influence des paramètres opératoires sur les mécanismes tribologiques et acoustiques du contact acier/verre. 113
4.2 Coefficients de frottement associés aux différentes phases dans différentes conditions opératoires. 115
4.3 Durées des phases issues de l'évolution du coefficient de frottement en fonction du temps dans différentes conditions opératoires. 116
4.4 Pentes des coefficients de frottement et temps du frottement maximal associés à la phase II dans différentes conditions opératoires. 117
4.5 Paramètres des réponses acoustiques dans différentes conditions opératoires pour le contact acier/verre. 119

Liste des symboles

δ	amplitude de déplacment (μm)
δ_0	demi-amplitude de glissement (ouverture de cycle) (μm)
μ	coefficient de frottement
μ_1	coefficient de frottement moyen de la phase I
μ_2	coefficient de frottement maximal de la phase II
μ_3	coefficient de frottement moyen de la phase III
ν	coefficient de poisson
ρ	densité (g.cm^{-3})
τ_1	durée de la phase I (s)
$\tau_{2'}$	durée décroissante de la phase II (s)
τ_2	durée ascendante de la phase II (s)
τ_3	durée de la phase III (s)
a	rayon de contact de Hertz (μm)
A_d	aire de dégradation (μm^2)
A_{EA}	amplitude acoustique (dB)
A_p	aire de portance (μm^2)
ACP	Analyse en Comopsantes Principales
$d1_{plan}$	dimension de la trace d'usure sur le plan dans le sens de glissement(μm)
$d2_{plan}$	dimension de la trace d'usure perpendiculairement au sens de glissement (μm)
d_{bille}	diamètre de la trace sur la bille (μm)
E	module d'Young (GPa)
$e_{3me-corps}$	épaisseur du troisième corps (μm)
E_a	énergie acoustique absolue (aJ)
E_d	énergie dissipée (J)
E_t	énergie dissipée totale (J)

EA Émission acoustique

f fréquence d'excitation (Hz)

F_a force actionneur (N)

f_c fréquence centroïde (kHz)

F_N force normale (N)

F_T force tengentielle (N)

H_0 Harmonique fondamentale

h_0 épaisseur du film interfacial (μm)

H_{2n+1} Harmoniques impaires

H_{2n} Harmoniques paires

h_{max} hauteur maximale du convergent (μm)

HDT Hit Definition Time (μs)

HLT Hit Lockout Time (μs)

K_{IC} ténacité (MPa$^{1/2}$)

K_t raideur du cycle (N/μm)

L_f longueur des fissures (μm)

L_{S_3} longueur du film interfacial (μm)

M_j modes d'accommodation

$N-c$ nombre de cycles

$N-salves$ nombre de salve

O_f ouverture des fissures (μm)

P pression de contact(MPa)

P_2' pente décroissante de la phase III (s^{-1})

P_0 pression de contact maximale(MPa)

P_2 pente ascendante de la phase II (s^{-1})

PDT Peak Definition Time (μs)

Q_s débit source

Qe débit externe

Qi débit interne

Qr débit de recirculation

Qw débit d'usure

R	rayon de la bille (μm)
Ra	rugosité (nm)
RGM	Régime de Glissement Mixte
RGP	Régime de Glissement Partiel
RGT	Régime de Glissement Total
S_i	sites d'accommodation
t_2	temps correspondant à l'établissement de $\mu_2(s)$

Introduction Générale

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans une thématique très vaste qui est la caractérisation des mécanismes d'endommagement et d'usure des matériaux par la technique d'Émission Acoustique (EA). Ces travaux ont été réalisés au sein du Groupe de Recherche Tribologie, Matériaux & Mécaniques des procédés (TM²P) du Laboratoire Génie de Production (LGP). Le finacement de cette thèse a été assuré par une bourse du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et a fait l'objet d'un contrat doctoral à plein temps en partenariat avec l'Institut National Polytechnique de Toulouse sous forme de mission d'enseignement de 64 heures par an effectué à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT).

En tribologie, il est fréquent d'étudier les relations entre le frottement et ces modifications de surface en considérant l'ensemble du tribosystème défini par le triplet "dispositif de chargement - premiers corps - éléments interfaciaux" afin d'élucider les modes d'accommodation des surfaces. Les processus interfaciaux pouvant se produire entre les premiers corps jouent un rôle clé dans les performances de frottement et d'usure des matériaux.

L'étude des interfaces glissantes, qui sont à la fois cachées à la vue et qui se déplacent les unes par rapport aux autres, constitue un grand défi en tribologie. L'essentiel de la compréhension des phénomènes tribologiques provient d'études *ex situ* de contacts séparés et figés. Cependant, de nombreux processus contrôlant la réponse tribologique d'une interface impliquent des processus dynamiques tels que la déformation, le labourage, la réactivité chimique, la rhéologie, etc. De plus, les processus interfaciaux impliquent souvent des modifications des premiers corps, de sorte que la compréhension de la structure et la caractérisation de ces matériaux ne suffisent pas pour prédire leurs performances. Pour comprendre comment les changements interfaciaux jouent un rôle dans le comportement ou l'évolution des contacts frottants, les tribologues ont appliqué une grande variété d'outils d'analyse de surface pour examiner en temps réel les interfaces confinées à des échelles allant de contacts macroscopiques à des aspérités simples. Ces techniques comprennent microscopie optique, interférométrie, vidéographie à grande vitesse et spectroscopie chimique (Raman, FTIR).

L'Émission Acoustique (EA) désigne la manifestation d'une onde mécanique générée par une source située au sein d'un matériau subissant des modifications structurales. L'EA est aussi la technique de contrôle/caractérisation non destructive consistant à mesurer et interpréter la signature acoustique des sources. Cette technique a un fort potentiel et présente de nombreux avantages car elle permet le suivi en temps réel en conditions de service des structures quels que soient leurs types et leurs tailles.

Par ailleurs, l'EA présente un intérêt en sciences des matériaux spécifiquement en tribologie car elle permet de détecter, localiser et identifier les mécanismes d'endommagement au sein d'un matériau sollicité par une contrainte extérieure (mécanique, chimique, etc). La caractérisation possible des phénomènes à l'origine des évènements d'EA mesurés repose sur des traitements statistiques raffinés. Cependant, les signaux mesurés doivent être interprétés afin d'être reliés à un mécanisme d'endommagement. Or, cette interprétation est délicate et il peut parfois être difficile de différencier la signature acoustique de signaux issus de mécanismes d'endommagement distincts quand ceux-ci apparaissent simultanément dans la zone de contact ou successivement dans le temps.

Pour s'affranchir de ces limites, il est nécessaire d'approfondir la compréhension des processus tribologiques en combinant le suivi en temps réel des phénomènes tribologiques par la technique d'EA avec l'observation *in situ* des interfaces dynamiques à travers une contreface transparente et de corréler les résultats obtenus avec les mesures habituelles utilisées en tribologie telles que les mesures de déplacement et de force tangentielle. Un dispositif innovant et original a donc été conçu pour fournir des observations instantanées et en temps réel des contacts frottants afin de mieux comprendre les mécanismes élémentaires tribologiques en

relation avec les signaux d'émission acoustique.

Pour des raisons étroitement liées au contexte du travail de thèse, c'est-à-dire en immersion permanente dans un laboratoire de recherche universitaire, le travail proposé se veut volontairement à caractère académique. Plus précisément, l'intérêt reposait sur la recherche d'une compréhension aussi fine que possible des mécanismes d'endommagement et d'usure à l'aide de la technique d'émission acoustique ainsi que de l'observation *in situ*. Ceci a conduit à adopter un schéma d'étude principalement expérimental avec des conditions d'essais souvent simplifiées.

Dans ce but, ce manuscrit s'articulera autour de quatres chapitres :

— Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique qui introduit l'ensemble des notions abordées au cours de cette étude. Il permet notamment de présenter la technique d'EA et de balayer les travaux de recherche réalisés sur l'utilisation de cette technique en tribologie. Quelques études portant sur l'utilisation des tribomètres *in situ* seront également abordées.

— Le deuxième chapitre inclut la méthodologie expérimentale décrivant les caractéristiques techniques du dispositif du LGP, les instrumentations associées à ce dispositif, les matériaux utilisés (verre sodocalcique et acier au chrome 100Cr6), le protocole d'acquisition et de traitement des données.

— Le troisième chapitre expose l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus pour des conditions opératoires fixes pour un contact semi-transparent de type acier/verre. Il apporte une vision complète et claire sur l'évolution du coefficient de frottement. L'utilisation de l'observation *in situ* synchronisée avec la technique d'émission acoustique permet d'étudier spatialement et temporellement les mécanismes d'endommagement et d'usure activés. À la suite de ces premiers résultats, des essais interrompus et des analyses complémentaires notamment la classification des signaux acoustiques selon des classes sont présentés permettant d'établir des corrélations mécanismes d'endommagement-usure/EA.

— Le quatrième chapitre met en regard l'influence des paramètres opératoires (charge normale et fréquence d'excitation) sur les réponses tribo-acoustiques du contact acier/verre. En particulier, ce chapitre expose l'évolution des caractéristiques des classes de signaux acoustiques attribuées à différents mécanismes d'endommagement et d'usure.

Finalement, une conclusion générale résume les points les plus importants autour de la caractérisation complète du contact acier/verre ainsi que les résultats obtenus pour la compréhension de la dégradation du contact en intégrant les réponses tribologiques et acoustiques.

Chapitre 1

Étude bibliographique

Ce chapitre présente les notions fondamentales du fretting et du glissement alternatif après une brève introduction du système tribologique abordée par l'approche du troisième corps. L'accent a été porté sur l'utilisation de la technique d'émission acoustique en tribologie. La corrélation entre l'émission acoustique et les paramètres et les phénomènes tribologiques est présenté en synthétisant les travaux menés par différents auteurs. Finalement, une synthèse des différentes techniques d'analyses in situ utilisées en tribologie est proposée.

1.1 Approches tribologiques

Venant du grec « τριβειν » (frotter) et « λογος » (étude), la tribologie est une science pluridisciplinaire faisant intervenir principalement des notions de mécanique, de physico-chimie et de science des matériaux. Elle permet d'étudier l'ensemble des phénomènes ayant lieu quand deux corps en contact sont mis en mouvement relatif. Elle apparaît dans de nombreux domaines industriels car elle intervient dans la production et l'utilisation de l'énergie, la fiabilité des systèmes ou même la productivité.

La tribologie s'intéresse à trois aspects distincts :
— le frottement qui est la résistance à un déplacement imposé ;
— l'usure qui traduit une perte définitive de matière résultant de la dégradation des surfaces ;
— la lubrification qui consiste à interposer un troisième corps, qui peut être liquide ou solide entre les deux corps en contact afin de contrôler à la fois le frottement et l'usure.

1.1.1 Paramètres classiques du frottement

Le frottement entre les deux surfaces dépend de nombreux paramètres répartis en deux grandes catégories, intrinsèques ou extrinsèques, évoqués ci-dessous.

D'une part, les propriétés intrinsèques concernent les propriétés mécaniques, physico-chimiques et topographiques des matériaux en contact qui vont influencer le frottement.

— Les propriétés mécaniques regroupent la dureté, les modules de Young et de cisaillement, la limite d'élasticité, la résistance limite à la rupture, les contraintes résiduelles et la ténacité.
— Les propriétés physico-chimiques de surface sont relatives à la réactivité des surfaces (réactions chimiques, adsorptions de molécules,...) qui modifierait la nature des matériaux. L'aspect oxydant de l'atmosphère peut favoriser la formation de films superficiels. La topographie est également un paramètre important comme cela a été montré par Cartier et Kapsa [Cartier & Kapsa, 2001] et Zahouani *et al.* [Zahouani *et al.*, 1998]. La rugosité de la surface a un effet immédiat sur l'aire de contact réelle dont dépend le coefficient de frottement. Des phénomènes d'imbrications et de déformations plastiques peuvent être également observés entraînant des résistances au déplacement.

D'autre part, le frottement entre deux matériaux peut également dépendre des paramètres extrinsèques liés aux conditions expérimentales (fonctionnement et environnement) du test tribologique.

— L'environnement dans lequel le glissement est effectué (température, atmosphère et taux d'humidité relative) est un des premiers paramètres affectant le frottement. En effet, l'augmentation du taux d'humidité relative entraîne la présence d'une fine pellicule d'eau qui lubrifie le contact ou peut réagir avec les matériaux. La température peut également provoquer des changements d'état (solide à liquide notamment) ou changements structuraux (changement de phase cristalline).
— Les conditions de sollicitation telles que la vitesse de glissement ou la pression de contact sont également des paramètres de premier ordre. En effet, le mouvement relatif de deux

solides en contact est associé à une dissipation d'énergie qui peut se faire sous forme de chaleur. Plus la vitesse de frottement est importante, plus l'énergie thermique dissipée augmente, ce qui peut avoir notamment une influence sur les propriétés mécaniques des matériaux en contact et donc sur leur frottement. De plus, une vitesse de glissement élevée empêche l'éventuelle reformation d'un film protecteur.

Au début du XX^{e} siècle, la tribologie s'appuyait sur une première approche qui concerne l'étude des volumes, avec une domination des concepts de la mécanique permettant d'établir des lois de comportement. L'échelle considérée dans cette approche est de l'ordre macroscopique. Au milieu du XX^{e} siècle et grâce aux concepts de la physique des surfaces, la tribologie s'est tournée vers une deuxième approche qui s'intéresse à l'étude des surfaces et vise plus spécifiquement l'étude de la physico-chimie des surfaces et donc la compréhension des comportements tribologiques à l'échelle microscopique, voire nanoscopique. Depuis un peu plus d'une trentaine d'années, la recherche en tribologie porte sur une troisième approche qui a pour objet d'étudier la dynamique des interfaces avec la prise de conscience du rôle fondamental des éléments interfaciaux dans un contact. Cela a conduit à l'introduction de la notion de contact à trois corps, qui s'articule autour des concepts de triplet tribologique, de circuit tribologique et de mécanisme d'accommodation de vitesse, et a permis une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et d'usure.

1.1.2 Concept du troisième corps

La tribologie des interfaces se distingue en matérialisant l'interphase entre les deux corps frottants et en lui affectant des propriétés différentes de celles des corps massifs qui la bordent. On appelle cette interface le troisième corps par analogie aux premiers corps en contact. Ce concept a été introduit par Godet dans les années 80 [Godet, 1984b]. Le concept du troisième corps est basée sur la transposition des concepts de la lubrification hydrodynamique au frottement à sec. Le troisième corps rassemble tous les éléments interfaciaux séparant les surfaces en contact. Le troisième corps est ainsi le volume de matière séparant les premiers corps.

Par ailleurs, le troisième corps fait référence à la zone de discontinuité de vitesse : c'est une interphase dynamique produite par des particules détachées, des débris ou des lubrifiants. Ce troisième corps peut mesurer de quelques nanomètres à plusieurs millimètres. Il fait également référence à une zone de discontinuité de composition : il comprend des films superficiels statiques, des couches adsorbées, des films d'oxyde, etc.

L'origine de ce troisième corps peut être artificielle (lubrifiants liquides ou solides) ou naturelle (produite par les corps en contact). Dans ce dernier cas, le mécanisme implique la rupture du matériau le moins cohésif conduisant à l'apparition de débris piégés dans le contact. Parmi les débris présents à l'interface, on distingue ceux qui s'éliminent hors du contact au fur et à mesure de leur formation et les débris qui restent adhérents aux surfaces après ouverture du contact. Les premiers sont à l'origine de l'usure, les seconds constituent un film de transfert plus ou moins cohésif. Pour Godet [Godet, 1990], la liste des «mécanismes d'usure» (abrasion, adhérence, fatigue, etc.) ne représente pas l'usure mais simplement des «mécanismes de détachement des particules». Par la suite, ce concept a été enrichie par Berthier [Berthier, 1988]

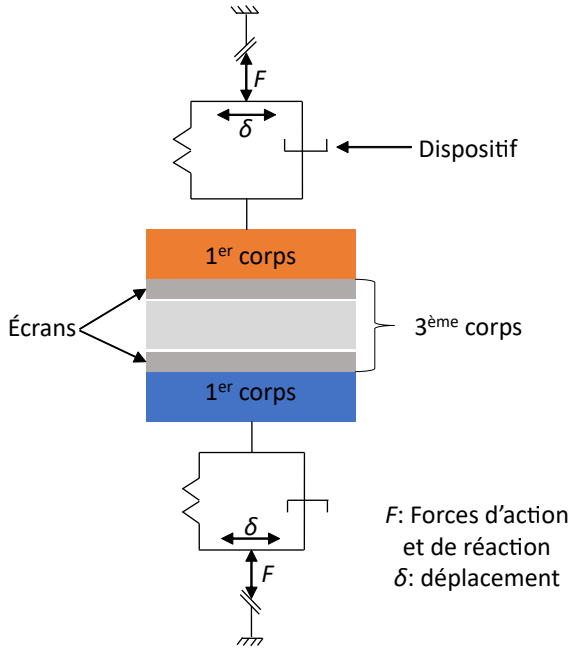


FIGURE 1.1 – Représentation du triplet tribologique [Berthier, 1988].

par des outils conceptuels comme le triplet tribologique, les mécanismes d'accommodation de vitesse et le circuit tribologique.

1.1.2.1 Le triplet tribologique

Le triplet tribologique permet de décrire les interactions entre les différents éléments qui entourent le contact. Il est constitué par le dispositif, les deux premiers corps et le troisième corps (Figure 1.1) [Berthier, 1988]. Le dispositif est l'ensemble du système mécanique contenant le contact qui impose le chargement, le déplacement ou encore l'environnement ambiant. Les premiers corps sont les matériaux antagonistes délimitant le contact et à travers lesquels les efforts sont transmis. Ils interviennent par leurs structures et leurs propriétés thermomécaniques, en induisant des déformations qui à leur tour définissent la zone de contact élémentaire. Les contraintes locales sont générées par le chargement normal et le déplacement tangentiel imposé. Des particules élémentaires sont détachées d'un ou des deux premiers corps et s'agglomèrent. Cet agglomérat de particules constitue le troisième corps et remplit plusieurs fonctions comme :

— transmettre la charge normale aux premiers corps ;
— participer à l'accommodation de vitesse entre les premiers corps ;
— séparer les surfaces en contact, évitant les interactions directe afin de contribuer à la diminution de leur dégradation.

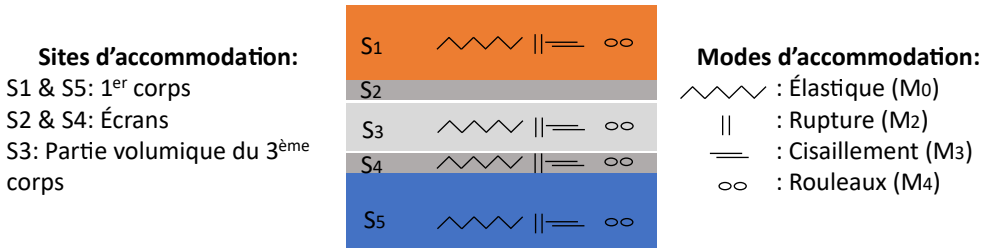


FIGURE 1.2 – Mécanismes d'accommodation [Berthier *et al.*, 1998].

1.1.2.2 Mécanismes d'accommodation

Selon Berthier *et al.* [Berthier *et al.*, 1998], le déplacement relatif des premiers corps implique des mécanismes d'accommodation de vitesse activés dans le contact ou aux interfaces. Un mécanisme d'accommodation est défini comme étant l'association d'un site et d'un mode d'accommodation (Figure 1.2). Les sites d'accommodation définis par S_i indiquent le lieu d'accommodation de vitesse et peuvent être associés aux premiers corps, à la partie volumique du troisième corps et aux écrans qui constituent la frontière entre premiers corps et troisième corps. Les modes d'accommodation M_j sont répertoriés selon quatre types de comportements mécaniques : la déformation élastique, la rupture, le cisaillement et le roulement.

Par la suite, Denape *et al.* [Denape *et al.*, 2001] complètent et affinent cette codification en introduisant un mécanisme de déformation plastique spécifique, distinct du cisaillement, et en introduisant le nombre de mécanismes d'accommodation possibles susceptibles de s'activer dans une situation tribologique réaliste. Par conséquent, dix mécanismes d'accommodation de vitesse peuvent être observés dans la pratique (Figure 1.3) :

- $(S_0 + S_1)M_0$: déformation élastique dans les solides comprenant le mécanisme et les premiers corps. Ce mécanisme joue un rôle important dans les contacts quasi statiques. Il est observé dans des conditions de fretting lorsque l'adhérence totale se produit entre les surfaces en contact. Le déplacement imposé est alors accommodé dans les échantillons et leurs supports ;
- S_1M_1 : déformation plastique superficielle ou profonde sans perte de matière ;
- S_1M_2 : fissuration superficielle de la surface fréquemment observée avec les matériaux fragiles (fissures de Hertz). Le déplacement est alors pris en compte dans le premier corps dont la rigidité est réduite par la présence de fissures ;
- S_1M_3 : cisaillement superficiel entraînant le détachement de particules ;
- S_2M_3 et S_4M_3 : cisaillement au niveau des écrans ;
- S_3M_0 : déformation élastique du troisième corps pour des déplacements extrêmement courts (quelques micromètres) observables lors d'une relaxation de la charge appliquée au contact ;
- S_3M_1 : déformation plastique de particules à l'interface ;
- S_3M_2 : fissuration des couches interfaciales ou broyage de particules ;
- S_3M_3 : cisaillement du troisième corps (e.g. lubrification) ;
- S_3M_4 : formation de rouleaux ou d'agglomérats sphériques de débris dans la zone de contact.

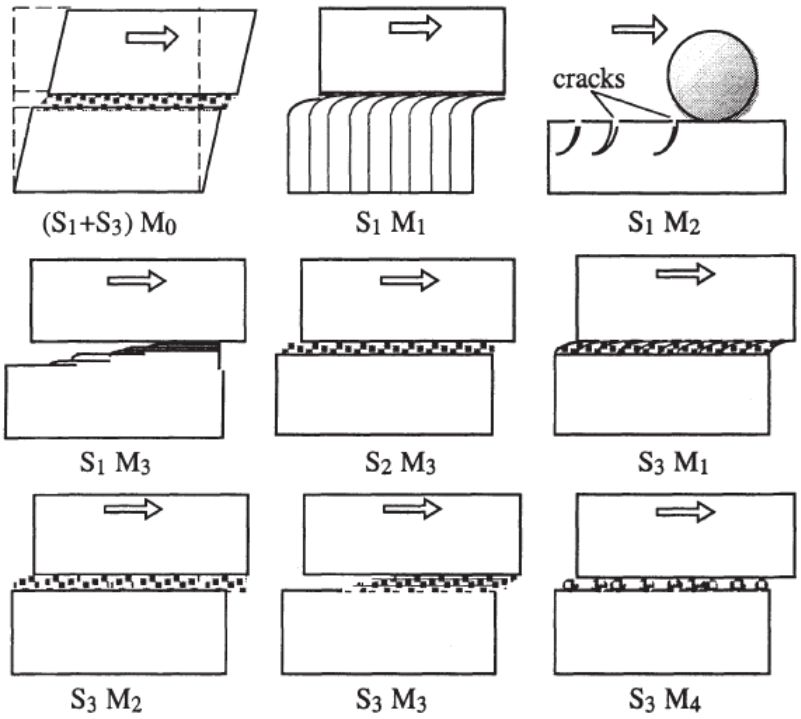


FIGURE 1.3 – Mécanismes d'accommodation couramment observés [Denape *et al.*, 2001].

1.1.2.3 Le circuit tribologique :

Le concept de circuit tribologique et de débits de troisième corps ont été introduit par Berthier *et al.* [Berthier, 1988]. Les particules de troisième corps sont soumises à des gradients de vitesse et elles s'écoulent de la même façon qu'un fluide. Le circuit tribologique est ainsi défini par (Figure 1.4) :

- Q_i^S : le débit source interne est le débit d'alimentation interne du contact en troisième corps. Il est obtenu par détachement de particules dû aux transformations tribologiques superficielles,
- Q_e^s : le débit source externe est obtenu par alimentation externe en troisième corps artificiel (cas de la lubrification liquide ou solide) ; il peut aussi s'agir d'éléments gazeux comme l'oxygène.
- Q_i : le débit de troisième corps qui est piégé dans le contact et qui circule entre les premiers corps,
- Q_e : le débit externe est l'éjection du troisième corps hors du contact. Ce débit se divise en deux : Q_r et Q_w,
- Q_r : le débit de recirculation correspond au débit des particules qui sont réintroduites dans le contact,
- Q_w : le débit d'usure correspond au débit du troisième corps définitivement éjecté hors du contact. Dans ce cas, le troisième corps ne participe plus à l'accommodation des vitesses et constitue l'usure.

D'un point de vue expérimental, il reste à ce jour difficile de quantifier les débits de troisième corps. Descartes *et al.* [Descartes & Berthier, 2002] ont réalisé des essais avec un premier corps

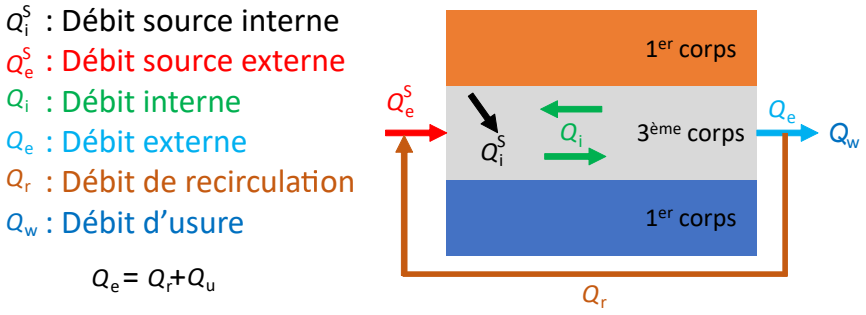


FIGURE 1.4 – Circuit tribologique présentant les différents débits de particules circulant dans un contact.

transparent qui a permis une observation directe des débits et donc une définition des caractéristiques permettant de qualifier ces débits. Ainsi, l'évolution du frottement dépend de la rhéologie du troisième corps. Cette rhéologie peut être décrite phénoménologiquement à travers les notions de cohésion et de ductilité des particules. La cohésion d'un troisième corps caractérise sa capacité de compactage ; on parlera de troisième corps avec une faible cohésion s'il s'apparente à de la poudre ou de troisième corps très cohésif s'il est très compact. En ce qui concerne la notion de ductilité, celle-ci permet de caractériser la facilité avec laquelle le troisième corps s'étale dans le contact. L'essai est réalisé avec un pion convexe et transparent (saphir), frottant sur un disque (acier) revêtu par du $MoS_{1,6}$ qui tourne à vitesse de rotation constante. En fonction de la présence du troisième corps, le contact peut être divisé en trois zones :

— Une zone frontale située à l'entrée du contact, formée par le débit de recirculation du troisième corps (Q_r) composé du troisième corps entraîné par le disque. C'est une zone d'admission du troisième corps contribuant au débit source (Q_i^S). L'existence de cette zone est fortement influencée par la géométrie du contact ainsi que la rigidité du mécanisme,

— Une zone centrale définie par la théorie de Hertz (cas d'un contact ponctuel) qui est le siège du débit interne (Q_i). Cette zone est alimentée à la fois par les particules du troisième corps issu de la zone d'admission (Q_r) ainsi que par la production de particules à l'intérieur du contact (Q_i^S),

— Les zones latérales, situées de part et d'autre de la zone interne. Elles sont alimentées par (Q_i^S) puis par (Q_r). La formation de « moustaches » produit l'écoulement (Q_e) qui augmente avec la largeur de la piste du contact et contribue à la transmission du chargement normal. Toutes les particules hors de ces trois zones sont perdues par le contact : elles constituent le débit d'usure (Q_w).

L'usure est définie comme l'éjection du troisième corps. Une compétition entre le débit source Q_s de troisième corps et le débit d'usure Q_w, ces deux entités étant reliées à la masse de troisième corps M_i dans le contact par la modélisation (Équation 1.1) donnée par Fillot *et al.* [Fillot *et al.*, 2007], :

$$\frac{dM_i}{dt} = Q_s - Q_w \tag{1.1}$$

Un contact fermé, où aucune éjection n'est possible ($Q_w = 0$), permet d'étudier le déta-

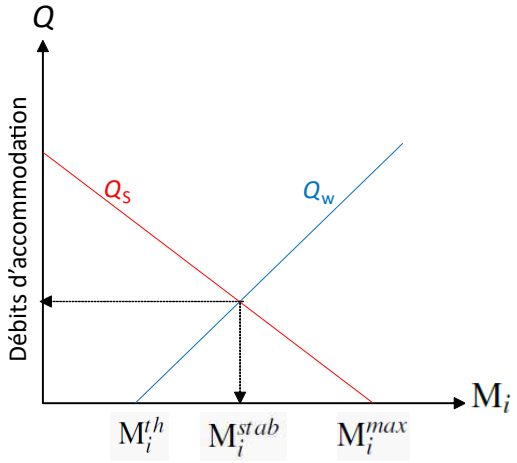


FIGURE 1.5 – Compétition entre le flux source et le flux d'usure conduisant à un équilibre de la matière pendant l'état stationnaire de glissement.

chement des particules. On postule que le débit source Q_S est inversement proportionnel à la quantité de particules M_i dans le contact (Figure 1.5). En effet, si la quantité de troisième corps augmente, les contraintes dans les premiers corps diminuent, de sorte que la quantité de troisième corps tend vers un maximum M_i^{max} jusqu'à ce que le débit source s'arrête.

Dans un contact ouvert, l'éjection réduit la quantité de troisième corps emprisonnée dans le contact, de sorte que les contraintes dans les premiers corps et le débit source augmentent jusqu'à ce que la quantité de particules se stabilise à une certaine quantité M_i^{stab} du troisième corps. Cela indique que le débit d'usure contrôle le débit source. De plus, une quantité minimale de M_i^{th} du troisième corps est nécessaire pour opérer l'éjection. L'état stable est atteint lorsque le flux d'usure est égal au flux de la source ($Q_w = Q_s$) et que la quantité du troisième corps M_i^{stab}se stabilise entre M_i^{th} et M_i^{max} .

1.2 Fretting et glissement alternatif

1.2.1 Introduction générale au fretting

Le fretting, mis en évidence dès le début du XX^{e} siècle, est une sollicitation définie comme un mouvement oscillatoire de faible amplitude entre deux surfaces en contact et associé à des phénomènes d'usure et/ou de fissuration.
Eden *et al*. [Eden *et al.*, 1911] et Tomlinson [Tomlinson & Hardy, 1927] ont été les premiers à rapporter l'observation de la formation de débris d'oxyde entre une éprouvette de fatigue en acier et un mors en acier de la machine dans un test de fatigue simple. Il en a alors été conclu que l'oxydation était la cause du phénomène. Cependant, les travaux réalisés par Halliday *et al.* [Halliday & Hirst, 1956] montrent que le processus est en réalité une sollicitation mécanique d'usure qui génère des débris qui vont ultérieurement s'oxyder. Par la suite, McDowell [McDowell, 1952] montre que le fretting favorise considérablement le processus d'amorçage des fissures. Cattaneo [Cattaneo, 1996], Mindlin *et al.* [Mindlin & Deresiewicz, 1953] et Johnson [Johnson & Johnson, 1985] étudient ensuite le fretting du point de vue mécanique pour

comprendre et prévoir la variation de la répartition des contraintes dans les matériaux. Parallèlement, Vingsbo *et al.* [Vingsbo & Söderberg, 1988] et Vincent *et al.* [Vincent *et al.*, 1992] apportent des avancées qualitatives importantes respectivement avec les concepts de cartes de fretting et de régimes de fretting. Dès lors, les recherches s'accélèrent et un large travail expérimental est effectué sur les dégradations en fretting. Enfin, un certain nombre de machines de fretting ont été développées afin de simuler les phénomènes de fretting-usure, de fretting-fatigue ou de fretting-corrosion, pour étudier respectivement l'usure, la fissuration et la corrosion. Les essais permettent de mettre en évidence l'influence d'un grand nombre de facteurs opératoires.

Le fretting est observé dans divers domaines. Il a été étudié, en particulier, dans des cas de problèmes critiques dans les composants aérospatiaux, biomédicaux, automobiles et nucléaires ([Korsunsky *et al.*, 2008, Kim *et al.*, 2013, Kim, 2018]). Il est considéré comme étant un phénomène complexe où les contacts réels y sont généralement mal définis.

Une distinction doit être établie entre le fretting et le glissement alternatif (ou reciprocating sliding) associé à de plus grandes amplitudes (Figure 1.6). En fretting, quelle que soit la géométrie du contact, il existe une zone centrale qui n'est jamais exposée à l'environnement extérieur. Afin de formaliser cette transition, Fouvry *et al.* [Fouvry *et al.*, 1996] utilisent le rapport e (Équation 1.2) entre l'amplitude de débattement δ et le rayon de contact de Hertz a. En contact sphère/plan, le domaine du fretting est alors associé à la condition $e < 1$. Dans le cadre de ces travaux de thèse, les essais concernent la frontière entre le fretting et le glissement alternatif.

$$e = \frac{\delta}{a} \tag{1.2}$$

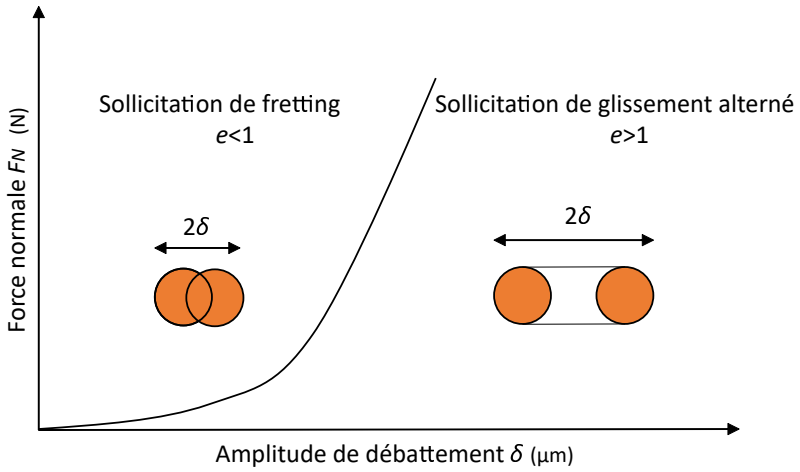


FIGURE 1.6 – Différenciation entre fretting et glissement alternatif.

1.2.2 Conditions et régimes de glissement

Le comportement instantané d'un contact se traduit par son « cycle de fretting », tracé de l'évolution de la force tangentielle F_t dans un diagramme en fonction de l'amplitude de déplacement δ. Selon les sollicitations normale et tangentielle appliquées, différentes conditions de glissement caractérisées par des formes de cycle de fretting, peuvent être observées au niveau du contact (Figure 1.7) :

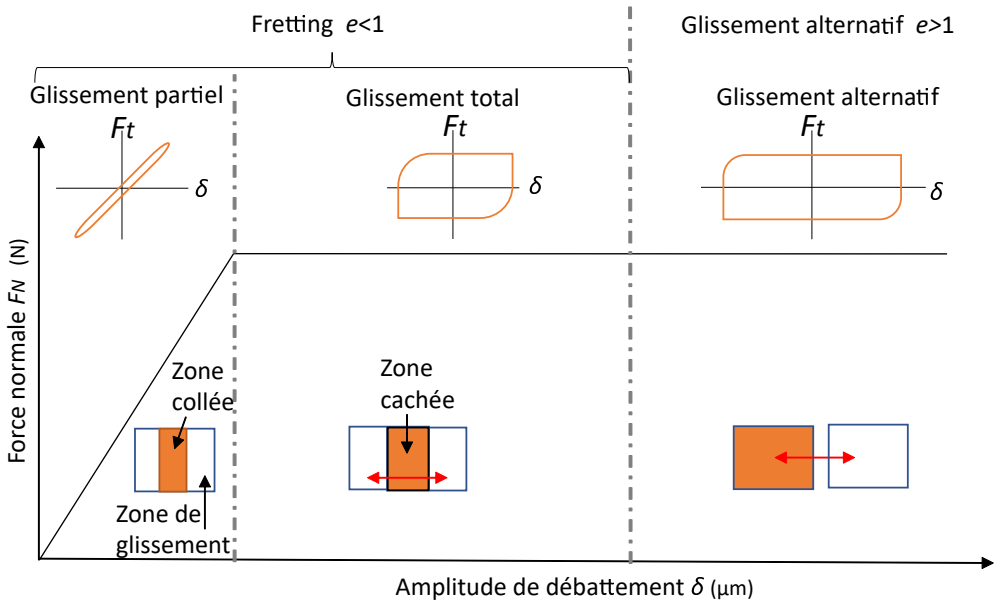


FIGURE 1.7 – Évolution de la condition de glissement en fonction du débattement.

— le collage (ou « stick condition ») où le contact reste collé et le déplacement est accommodé par des déformations élastiques par les couches superficielles des matériaux et par le dispositif. Cette condition se caractérise par un cycle fermé à pente linéaire.
— le glissement partiel (ou « stick-slip condition») où la zone centrale reste toujours collée et entourée par une zone de glissement qui apparaît lorsque l'amplitude du déplacement augmente. Cette condition de glissement partiel se caractérise par une légère ouverture du cycle, dont les parties linéaires s'incurvent légèrement aux extrémités du contact.
— le glissement total (ou « gross slip condition ») où la zone centrale collée disparaît lorsque l'amplitude de débattement est encore augmentée. Le cycle de fretting présente alors une forme quadratique très ouverte. Cette condition permet de définir un coefficient de frottement μ qui correspond au rapport de la force tangentielle F_T sur la force normale F_N.

La figure 1.8 illustre les paramètres caractéristiques du cycle de fretting qui permettent d'étudier les surfaces en contact et déterminer les conditions et les régimes de glissement. De plus, ces paramètres caractéristiques renseignent sur les endommagements en cours d'essai. Les quatre points A, B, C et D forment un cycle qui correspond à un « aller-retour ». Entre les points A et B, il n'y a pas de déplacement entre les deux échantillons mais une accommodation élastique de l'ensemble montage/contact. La raideur tangentielle du cycle (en N/µm) est définie comme la pente $K_t = {}^{dF_T}/_{d\delta}$ au changement de sens de débattement. Cette valeur tient compte

de la rigidité du dispositif de fretting, du montage et du contact. Quand l'effort tangentiel atteint une valeur critique, le glissement commence et continue jusqu'au point C, où l'amplitude de débattement imposé δ (µm) est atteinte. L'effort tangentiel maximal permet, en glissement total, de définir le coefficient de frottement µ par la relation (Équation 1.3) :

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} \tag{1.3}$$

Au point C, la vitesse est nulle et la sollicitation tangentielle change de sens. L'amplitude de glissement δ_0 est alors définie comme la valeur du débattement pour un effort tangentiel nul et correspond donc à l'amplitude du glissement réel au niveau du contact. Elle est aussi appelée ouverture de cycle. Elle est indépendante de la raideur du montage qui peut être indiquée par la pente du cycle de fretting.

L'énergie dissipée par frottement au cours du cycle de fretting E_d correspond à l'aire contenue à l'intérieur du cycle, et l'énergie totale E_T est associée à l'aire du plus petit rectangle contenant le cycle. Elle est exprimée par l'équation (Équation 1.4).

$$E_t = 4\delta F_T \tag{1.4}$$

La dissipation de l'énergie se fait au travers de nombreux mécanismes : création de débris, fissuration, déformation plastique, élévation de température, transformations physico-chimiques...

L'énergie dissipée E_d peut être approchée par la relation (Équation 1.5) :

$$E_d = 4\delta_0 F_T \tag{1.5}$$

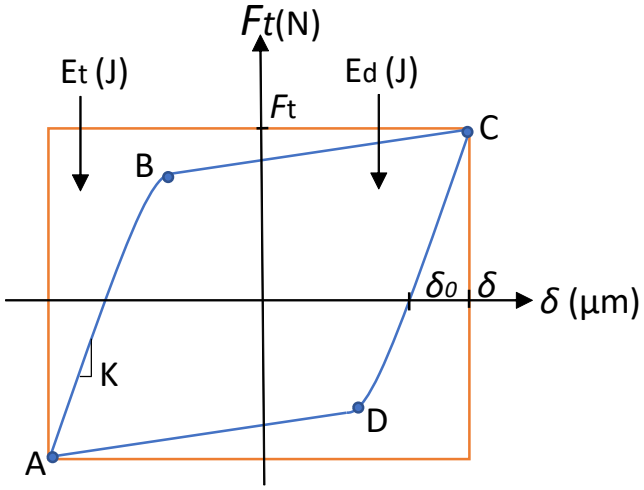


FIGURE 1.8 – Cycle de fretting en conditions de glissement total et définition des paramètres utilisés.

δo Demi-amplitude de glissement (ouverture de cycle) (µm)

La notion de conditions de glissement est une information instantanée et définie que pour un cycle donné. Afin de décrire l'évolution de la condition de glissement dans le temps, Colombié [Colombié, 1986] définit la notion de régimes de glissement et met en évidence des situations où le contact passe d'une condition de glissement vers une autre pendant l'essai. Il propose

également la représentation 3D des bûches de fretting dans lesquelles les cycles de fretting sont représentés en fonction du temps selon une échelle logarithmique. Ainsi, la figure 1.9 illustre les évolutions de la condition de glissement qui sont définies par trois régimes : Le Régime de Glissement Partiel (RGP ou PSR), Le Régime de Glissement Mixte (RGM ou MFR) et Le Régime de Glissement Total (RGT ou GSR).

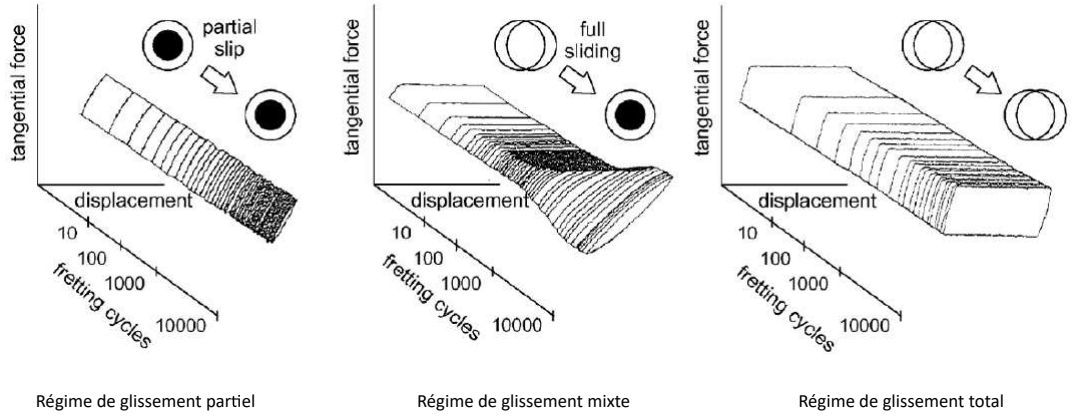


FIGURE 1.9 – Évolution de la condition de glissement au cours du temps, illustration des différents régimes [Fouvry, 1997].

Pour mieux formaliser la corrélation entre les régimes de glissement dans le cas d'un contact sphère plan, Vingsbo *et al.* [Vingsbo & Söderberg, 1988] ont proposé les premières cartes décrivant les régimes de fretting. Par la suite, Vincent *et al.* [Vincent *et al.*, 1992] ont défini les cartes d'endommagement en fonction des régimes de glissement imposés. Elles permettent une description qualitative rapide et apportent des informations sur l'origine et le type de dégradation (Figure 1.10).

1.2.3 L'usure en fretting ("fretting-wear")

La prédiction de l'usure est particulièrement complexe, car ce mécanisme d'endommagement implique de nombreux facteurs liés aux chargements mécaniques et à l'environnement. Cependant, Cartier *et al.* [Cartier & Kapsa, 2001] ont montré que sous l'effet du frottement, une surface subit des modifications et des endommagements. Ces endommagements sont résumés suivants les phénomènes mécaniques, physiques ou chimiques associés. Ils distinguent :

- des déformations plastiques, lorsque les contraintes générées dans le contact glissant dépassent la limite d'élasticité d'un des matériaux. Ces déformations plastiques induisent des modifications de la morphologie des surfaces frottantes ;
- des structures tribologiquement transformées «Tribologically Transformed Structures» ou TTS ;
- des phénomènes d'adhésion (usure par adhésion) entre les corps frottants, conduisant au transfert d'un des matériaux vers l'antagoniste.

L'approche d'Archard fait partie des premiers modèles de quantification de l'usure développés durant les années 1950-1960 [Archard, 1953]. Il s'agit d'une approche quantitative qui analyse la dégradation en termes de volumes que l'on cherche à relier à la sollicitation imposée et aux

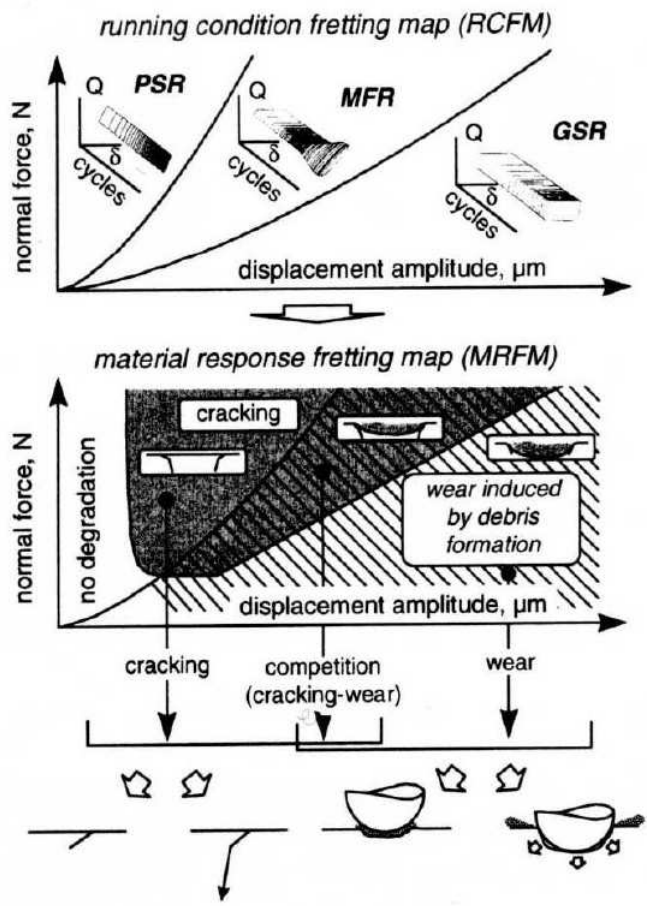


FIGURE 1.10 – Illustration des cartes de fretting [Fouvry *et al.*, 1995].

caractéristiques physique, chimique et mécanique des matériaux. Holm [Holm, 1946] montre que le volume usé V est proportionnel au rapport de la force normale F_N et de la dureté H suivant la relation (Équation 1.6) :

$$V = k.\frac{F_N}{H} \tag{1.6}$$

où k est un coefficient difficile à interpréter et H une propriété bien connue mais qui dépend de l'instrument de mesure. Archard reprend les travaux de Holm, en étudiant l'usure de matériaux mous contre un matériau dur et établit une loi d'usure en considérant comme paramètres tribologiques la charge appliquée au contact F_N et la distance de glissement d. Il montre que le volume usé V peut être donné par la relation (Équation 1.7) :

$$V = k.d.F_N \tag{1.7}$$

où k est un coefficient d'usure exprimé en $\mathrm{mm}^3/(\mathrm{N}\cdot\mathrm{m})$, défini comme la probabilité de former une particule d'usure. Cette loi permet d'analyser l'usure de façon globale. Pour quantifier l'usure, l'évolution du volume usé V peut se représenter en fonction des différents paramètres, en particulier, l'effort normal F_N et la distance de glissement d, comme le propose la loi d'Archard. On définit un taux d'usure où le produit $F_N d$ a la dimension d'une énergie (Équation 1.8) :

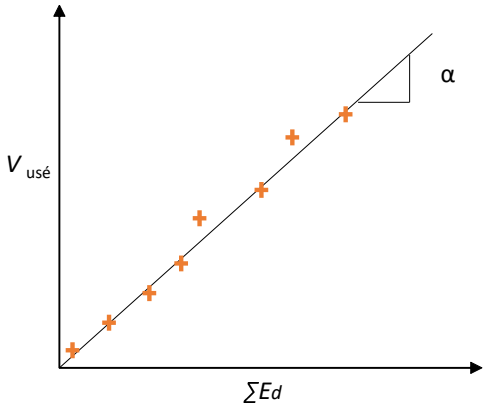


FIGURE 1.11 – Détermination du coefficient d'usure énergétique à partir des valeurs d'essai.

$$k = \frac{V}{F_N d} \tag{1.8}$$

Dans le cas du fretting, on peut exprimer la distance de glissement d comme étant la somme des glissements mesurés pour chaque cycle, on obtient donc l'expression suivante (Équation 1.9) :

$$V = k.\sum_{i=1}^{N_c} 4.\delta_0(i).F_N(i) \tag{1.9}$$

où δ_0 est l'amplitude de glissement dans l'interface et N_c le nombre de cycles de l'essai.
L'expression du volume usé (Équation 1.9) est couramment utilisée. Cependant, elle prend en compte uniquement la force normale ; la force tangentielle et le coefficient de frottement n'interviennent pas. Pour cela, une approche énergétique a été proposée par Fouvry *et al.* [Fouvry *et al.*, 2003a] basée sur le travail de la force tangentielle qui peut être assimilé à l'énergie dissipée par frottement. Cette loi dite de l'énergie dissipée cumulée, s'exprime sous la forme suivante (Équation 1.10) :

$$V = \alpha.\sum_{i=1}^{N_c} E_d(i) \tag{1.10}$$

où α, le coefficient d'usure énergétique en mm^3/J.
L'énergie dissipée E_d (i) est déterminée pour chaque cycle en calculant l'aire du cycle de fretting (Équation 1.11)

$$E_d(i) = \int_{cycle_i} \delta(t).F_T(t) \tag{1.11}$$

Le coefficient d'usure énergétique est évalué expérimentalement. Pour cela, le volume usé est mesuré et comparé à l'énergie dissipée cumulée. On place ces points (E_d, $V_{usé}$) dans un repère. Les points sont alignés le long d'une droite dont la pente est le coefficient d'usure énergétique (Figure 1.11).

Cette approche est largement validée par Fouvry *et al.* [Fouvry *et al.*, 2006], Huq *et al.* [Huq & Celis, 2002] et Mohrbacher *et al.* [Mohrbacher *et al.*, 1995], pour des systèmes non

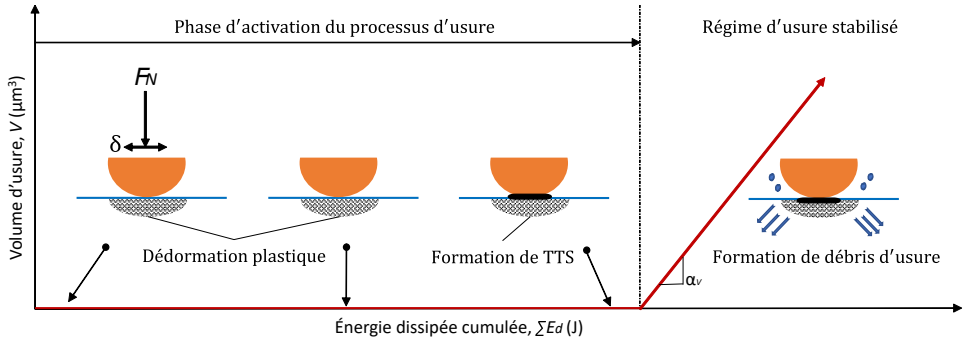


FIGURE 1.12 – Illustration de l'activation du processus de dégradation des surfaces frottantes [Cartier & Kapsa, 2001].

adhérents. Cependant, elle est difficilement adaptable à des tribosystèmes adhérents. En effet, Fridrici [Fridrici, 2002] montre qu'une part non négligeable de l'énergie dissipée est consommée dans le processus d'éjection des débris. L'influence de l'amplitude de fretting est alors prépondérante : une augmentation du débattement induit en effet une augmentation du taux d'éjection des débris et donc de la cinétique d'usure. Paulin *et al*. [Paulin *et al.*, 2005] proposent alors une formulation modifiée de l'énergie dissipée pour les contacts adhérents et une loi énergétique réduite d'usure. Cette approche permet notamment de prédire avec précision des cinétiques d'usure observées pour des sollicitations variables. Prakash *et al.* [Prakash *et al.*, 2002], Fouvry *et al.*[Fouvry *et al.*, 2003b] et Ramalho *et al*. [Ramalho & Miranda, 2006] montrent que l'énergie dissipée apparait comme l'activateur principal des processus de dégradation du système tribologique. Cela a permis de mettre en évidence des différentes étapes du processus de dégradation (Figure 1.12) : une phase incubatrice (phase d'activation) et une phase stabilisée [Prakash *et al.*, 2002].

La phase d'incubation génère fréquemment des structures tribologiquement transformées (TTS), dues à l'accumulation de déformations plastiques dans le contact, effet capable de recristalliser la microstructure. Sauger *et al.* [Sauger *et al.*, 2000] ont expliqué que la transformation des TTS est associée à une certaine quantité d'énergie pouvant correspondre à l'activation de l'oxydation des surfaces. Par exemple, dans le cas d'un contact acier rapide sur alumine, cette énergie peut être associée aux différents stades de la dégradation de l'acier : tout d'abord une accumulation de déformations plastiques puis la formation en surface d'une phase blanche très dure. Par la suite, l'énergie supplémentaire dissipée va permettre la création des premiers débris et activer la progression en sous couche de la structure modifiée.
L'apparition de TTS entraîne une modification du champ des contraintes et des déformations admissibles par le matériau, conduisant à un détachement de particules par fragilisation des surfaces du matériau (particules dont la taille varie de quelques nanomètres à quelques micromètres [Jullien *et al.*, 1996]). Les mécanismes d'usure tels que l'abrasion, l'adhésion etc., peuvent être considérés comme des réponses spécifiques alimentant le troisième corps.

1.2.4 Mécanismes classiques d'usure

Les mécanismes principaux d'usure, en référence à la tribologie classique, sont présentés ci-dessous :

— L'usure adhésive est un mécanisme qui apparaît quand les surfaces en contact sont de nature proche ou ont une forte affinité. Ceci permet aux surfaces de générer des jonctions interfaciales entre les aspérités. L'usure adhésive fait donc intervenir, dans un premier temps, les propriétés physico-chimiques des matériaux. Ensuite, selon les propriétés mécaniques des jonctions formées, les processus de rupture à l'interface se font : soit au niveau de l'interface de la jonction, soit dans les massifs, ce qui va conduire à de l'arrachement de matière et à des phénomènes de transfert. Une rupture à la jonction crée peu d'usure. En revanche, une jonction avec une forte résistance va favoriser la fissuration dans les massifs antagonistes qui entraînera un arrachement de matière en général, à partir du matériau le moins dur. C'est de ce dernier que la matière s'arrachera et viendra adhérer sur la surface la plus dure (Figure 1.13). Il arrive que les jonctions soient plus dures que le matériau initial. La matière migrera donc entre les deux surfaces en fonction des faiblesses locales des interfaces.

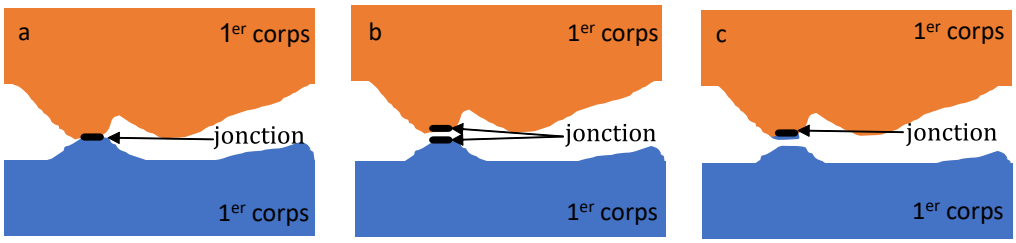


FIGURE 1.13 – Représentation des phénomènes élémentaires d'adhésion ; a) création de la jonction entre aspérité ; b) rupture de la jonction ; c) rupture d'un des matériaux antagonistes.

— L'usure abrasive est caractérisée par des rayures parallèles au sens de sollicitation. Ces dernières sont engendrées par des aspérités ou des particules dures [Cartier & Kapsa, 2001]. L'usure abrasive à deux corps (Figure1.14 a) est associée à un processus de labourage du corps le plus tendre par une aspérité du corps le plus dur. Elle est associée aux conditions pour lesquelles les débris sont rapidement éjectés. On observe alors, sur le corps le plus mou, des rayures colinéaires à la direction de glissement. L'usure abrasive à 3 corps (Figure1.14 b) fait intervenir une particule dure (ex : débris oxydé) qui va labourer les deux surfaces mises en contact.

— L'usure par oxydation est une usure chimique où l'environnement et les sollicitations favorisent l'apparition d'un film d'oxydes en surface ([Quinn, 1983], [Fouvry *et al.*, 2017]). Sous l'effet du cisaillement imposé par le contact, le film d'oxydes est fracturé en débris qui sont éliminés du contact (Figure 1.15).

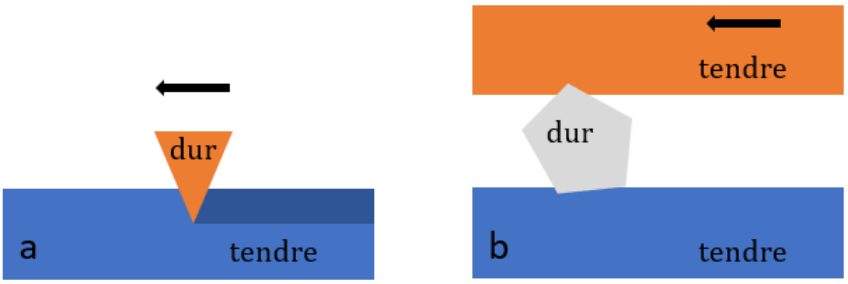


FIGURE 1.14 – a) usure abrasive à deux corps ; b) usure abrasive à 3 corps.

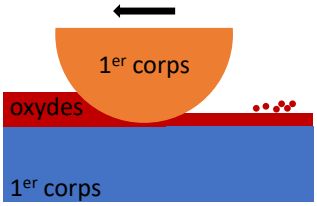


FIGURE 1.15 – Schéma d'usure par oxydation.

1.2.5 La fissuration en fretting (”fretting-fatigue”)

Un endommagement par fissuration est souvent attribué au caractère cyclique de la sollicitation de fretting ou de fretting fatigue. Il convient donc de considérer une approche "fatigue" du problème. Ce phénomène d'endommagement est dangereux car il peut conduire à une rupture brutale en fin de vie de la pièce, bien que la fissuration ait été progressive, sans déformation visible et apparente de la pièce. Plusieurs variables peuvent être utilisées pour décrire ce phénomène :

- des variables liées aux sollicitations telles que les contraintes et les déformations traduisant le chargement appliqué au composant mécanique,
- des caractéristiques mécaniques monotones (module d'élasticité, coefficient de Poisson, résistance maximale en traction monotone...) et cycliques (limite d'endurance du matériau, nombre de cycles à la rupture...). Ce sont des caractéristiques intrinsèques au matériau mais peuvent être modifiées en fonction de la nature des sollicitations,
- des paramètres de service qui traduisent les conditions de fonctionnement du composant mécanique (température, fréquence de la sollicitation, surcharge...),
- des paramètres d'influence : comme le gradient de contraintes...

L'endommagement par fretting fatigue est la modification des propriétés des matériaux consécutifs à l'apparition de cycles de chargement. La répétition de ces cycles de chargement peut conduire à la fissuration puis à la rupture des pièces. Historiquement, deux approches ont été développées pour étudier ce phénomène :

- la première, dite empirique, développée en premier par F.Wöhler dès 1860, se base sur l'expérimentation pour tracer la courbe de Wöhler (la courbe S-N). Cette courbe a permis de relier le phénomène de fatigue et la notion de durée de vie aux amplitudes des

contraintes et cycles de sollicitation.

— la deuxième, dite théorique, est liée aux théories de la mécanique (mécanique de la rupture et mécanique de l'endommagement) pour reconstruire les courbes expérimentales et prédire les phénomènes observés. Les propriétés matériaux et les bilans énergétiques servent à prédire la vitesse de propagation de l'endommagement.

1.3 Émission acoustique

1.3.1 Généralités

L'émission acoustique est un phénomène de création d'ondes élastiques transitoires résultant de micro-déplacements locaux internes à un matériau [Hartman, 1977].
En réalité l'émission acoustique est connue depuis plus d'un siècle. Les premiers phénomènes d'émission acoustique constatés sont audibles. Un exemple cité de nombreuses fois dans la littérature scientifique est le "cri" de l'étain, phénomène relié au maclage de l'étain et décrit par Mason en 1948. Le véritable démarrage de la technique de l'émission acoustique est marqué par l'étude scientifique de Kaiser [Kaiser, 1950]. Des tests de traction classique ont été utilisés pour déterminer quels bruits sont générés par l'échantillon, le mécanisme acoustique impliqué, le niveau de fréquence, et la relation entre la courbe de traction et les fréquences observées pour différentes contraintes appliquées. Le résultat le plus important, communément appelé effet Kaiser, démontre l'irréversibilité de l'EA.
Les principales caractéristiques de l'EA sont les suivantes [Scruby, 1984] :

— La source provient d'une libération d'énergie à l'intérieur ou à la surface du matériau ou de la structure. Cette libération d'énergie est créée par exemple par un mécanisme d'endommagement tel que la propagation d'une fissure.

— Les évènements générant une émission acoustique, même de faible amplitude, sont détectés en temps réel ce qui permet de retracer chronologiquement leur apparition.

— Le matériau ou la structure étudiés doivent forcément être soumis à des sollicitations (mécaniques ou physico-chimiques) pour voir l'apparition d'évènements détectables par la technique d'EA. Autrement dit, l'EA n'enregistre les données que lorsque la structure du matériau est altérée.

— La gamme de fréquences des phénomènes d'émission acoustique varie des fréquences infrasonores aux fréquences ultrasonores. Cependant, la gamme de fréquences habituelle, définie par Kaiser et utilisée aujourd'hui, est de 50 kHz à 1,5 MHz. À une fréquence plus élevée, l'émission acoustique n'est pas assez intense dans la plupart des cas et le matériau absorbe une grande partie du signal. La limite de basse fréquence est principalement définie par le bruit de fond.

Depuis 1980, la technique a été développée dans de nombreuses applications [Roget, 1990] . Ces dernières vont de l'investigation physique des matériaux à la surveillance en service de réservoirs et d'appareils sous pression [Lackner & Dusek, 2008] en passant par la surveillance de fabrication et d'usinage, la surveillance de machines tournantes et le contrôle et l'évaluation des matériaux [Skawinski *et al.*, 2008].

Lorsqu'un matériau est sollicité mécaniquement, les mécanismes d'endommagement induits par cette sollicitation génèrent de l'EA. Ces mécanismes diffèrent d'un matériau à l'autre. De nombreux phénomènes physiques et mécanismes d'endommagement des matériaux sont à l'origine de l'EA (Figure1.17) :

- déformation plastique, mouvement de dislocations, maclage, glissement aux joints de grains,
- ruptures d'inclusions ou de composés intermétalliques,
- transformation de phases (martensitique),
- amorçage et propagation de fissures (contraintes statiques, fatigues, etc.),
- fragilisation par hydrogène,
- corrosion localisée (corrosion sous contrainte, piqûre, crevasse),
- endommagement des matériaux composites et béton (micro-fissurations de la matrice, délaminage, ruptures d'interfaces, ruptures de fibres, etc.),
- frottement, impact mécanique.

L'émissivité de ces sources dépend généralement des propriétés du matériau et des conditions de sollicitation.

Quand le matériau subit une déformation irréversible, il génère des signaux de deux types ;

- un signal continu : ce type de signal correspond à un événement microscopique, peu énergétique et fréquent dans le temps, relatif à des déformations plastiques et des phénomènes ductiles.
- des signaux brefs, impulsionnels, de forte amplitude et de courte durée.

1.3.2 Paramètres des signaux acoustiques

Les signaux successifs typiques enregistrés lors d'une mesure d'émission acoustique sont appelés salves (Figure 1.16). L'acquisition d'un signal en émission acoustique nécessite au préalable de réfléchir à la méthode et surtout au résultat voulu. Le paramétrage dépend alors du type de matériau, du signal escompté et surtout de l'intérêt de la mesure. Les différents paramètres sont le seuil de déclenchement, le taux d'échantillonnage et les paramètres de fenêtrage de la salve.

Pour être enregistrée, une salve doit dépasser un seuil de déclenchement défini par l'opérateur permettant de s'affranchir le plus possible du bruit de fond tout en conservant le maximum d'information provenant du système étudié. Une salve est constituée d'un ou plusieurs coups (ou « hits »). Le nombre de coups correspond au nombre de fois où l'amplitude a dépassé le seuil choisi. Le coup de plus forte amplitude d'une salve définit l'amplitude de celle-ci. La durée d'une salve correspond au temps écoulé entre le premier et le dernier coup. Le temps de montée, ou le "Rise Time", est associé à l'intervalle de temps entre le premier dépassement du seuil de détection et l'amplitude maximale. Le "count to peak" est défini comme le nombre de coups de la salve compris entre le déclenchement et le coup de plus forte amplitude.

Le taux d'échantillonnage ou le "sample rate" est la fréquence à laquelle la carte d'acquisition de données échantillonne les formes d'onde sur une seconde. Un taux d'échantillonnage de 1 MSPS (Mega Samples per Second) signifie qu'un million de points est prélevée par seconde.

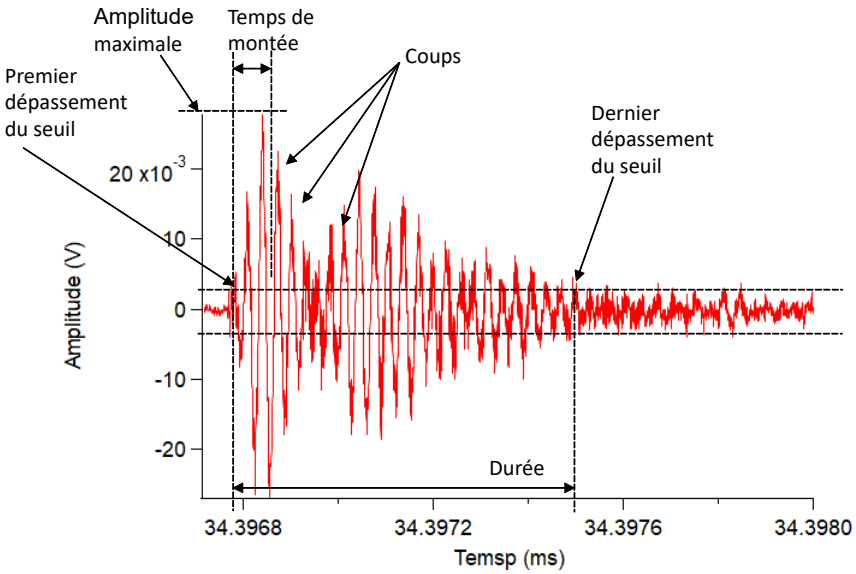


FIGURE 1.16 – Représentation d'une salve d'EA.

Les paramètres de fenetrage se caractérisent par trois termes :

— Le PDT (Peak Definition Time, exprimé en µs) permet de déterminer le maximum de la salve. Il se déclenche à partir du moment où le signal dépasse le seuil et tant qu'un maximum existe dans la fenêtre glissante.

— Le HDT (Hit Definition Time, exprimé en µs) est paramétré pour définir la durée d'un salve à partir du premier dépassement du seuil jusqu'au dernier dépassement dans la fenêtre glissante.

— Le HLT (Hit Lockout Time, exprimé en µs) définit le temps minimum entre deux salves et permet de limiter les effets d'échos renvoyés par les ondes acoustiques.

L'enregistrement de ces différents paramètres permet de calculer d'autres propriétés du signal comme l'amplitude, l'énergie absolue et la fréquence centroïde des signaux qui sont les trois caractéristiques communément utilisées lors du traitement des signaux d'émission acoustique parmi les 25 paramètres pouvant être extraits d'une salve.

— L'amplitude A_{EA} correspond à l'amplitude maximale de la salve, autrement dit la valeur absolue maximale atteinte par la tension pendant la durée de la salve.

— L'énergie acoustique absolue E_a est extraite des signaux d'émission acoustique et calculée par l'intégrale de la valeur absolue de la tension du signal s(t) pendant la durée de la salve au carré et normé par la résistance de référence R_e du dispositif d'émission acoustique, sur la période de mesure T (Équation 1.12.). Cette énergie absolue est exprimée en attojoule (1 aJ=10^{-18}J).

$$E_a = \frac{1}{R_e}\int_T s^2(t)dt \tag{1.12}$$

— Le barycentre fréquentiel (ou fréquence centroïde) f_C représente le centre de gravité spectral d'une salve (dans le domaine de Fourier) de part et d'autre duquel l'énergie du spectre est équitablement répartie.

1.3.3 Caractéristiques des signaux d'émission acoustique en tribologie

Chaque salve correspond à un événement physique dans le matériau et où la forme de la salve est directement liée aux caractéristiques de cet événement. Les paramètres classiques enregistrés en temps réel en émission acoustique sont nombreux. Parmi ceux-ci, l'amplitude acoustique est considérée comme un paramètre discriminant pour les différentes sources acoustiques. Elle correspond à l'amplitude maximale de la salve, autrement dit à la valeur absolue maximale atteinte pendant la durée de la salve. Les facteurs influençant l'amplitude acoustique ont été classés par Baranov *et al.* [Baranov *et al.*, 2007] en deux groupes (Tableau 1.1), suivant qu'ils l'augmentent ou la réduisent.

Facteurs augmentant l'amplitude acoustique	Facteurs réduisant l'amplitude acoustique
Surface rugueuse	Surface lisse
Dureté élevée	Dureté faible
Anisotropie de surface	Isotropie de surface
Inhomogénéité des propriétés de surface	Homogénéité des propriétés de surface
Grains grossiers	Grains fins
Faible ténacité	Haute ténacité
Défauts dans la couche superficielle	Absence de défauts dans la couche superficielle
Basse température	Température élevée
Vitesse de glissement élevée	Vitesse de glissement faible
Charge élevée	Charge légère
Conditions de frottement non stationnaires	Conditions de frottement stationnaires
Usure abrasive	Usure adhésive
Frottement sec	Frottement lubrifié
Présence de tensioactifs	Absence de tensioactifs
Présence d'environnement corrosif	Absence d'environnement corrosif

TABLE 1.1 – Facteurs influençant l'amplitude en émission acoustique [Baranov *et al.*, 2007].

1.3.4 Sources d'émission acoustique en tribologie

Récemment, la technique d'émission acoustique (EA) a été appliquée à l'investigation et au suivi en temps réel des caractéristiques tribologiques en raison de sa grande sensibilité aux phénomènes de fissuration, de déformation, d'usure, etc... Certains mécanismes tels que la génération de débris de matière, la collision d'aspérités et la fissuration constituent des sources d'émission acoustique pouvant générer des signatures acoustiques particulières [Ferrer *et al.*, 2010]. Baranov *et al.* [Baranov *et al.*, 2007] ont identifié différentes sources d'émission acoustique générées dans un contact glissant entre deux matériaux (Figure 1.17). Ils ont identifié ces sources

selon trois groupes principaux : impact des surfaces, endommagements des surfaces et formation de jonctions adhésives.

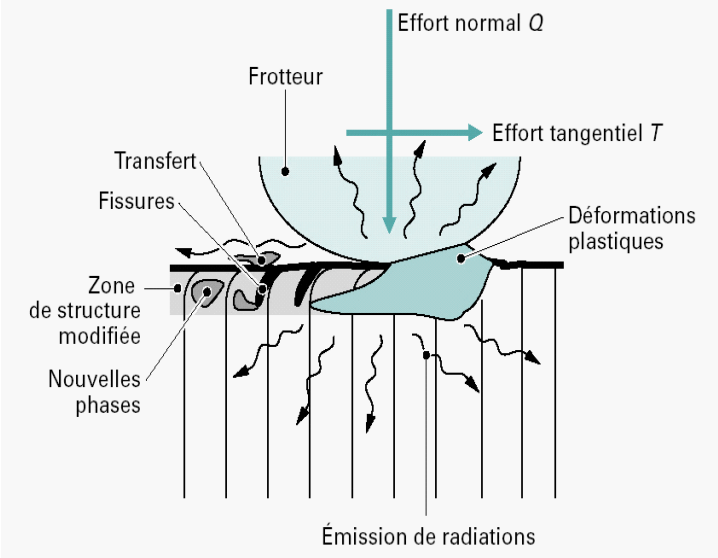


FIGURE 1.17 – Sources d'émission acoustique dans un contact frottant.

Aussi, Boness *et al.* [Boness & McBride, 1991] ont indiqué que les aspérités présentes dans le contact entre les surfaces de glissement étaient la principale source d'émission acoustique. Ensuite, Sun *et al.* [Sun *et al.*, 2005] ont défini certaines sources possibles d'émission acoustique dans un tribo-contact tels que les endommagements à la surface de contact, les micro-vibrations, la nucléation et la propagation des fissures, le changement de phase, les chocs impulsifs et la réaction chimique. En tribologie, certains mécanismes tels que l'adhérence et le labourage des aspérités [Yahiaoui *et al.*, 2019], la génération de débris de matériaux ([Hase *et al.*, 2008], [Hase *et al.*, 2009]) et la fissuration ([Johnson *et al.*, 2012], [Mastrogiannis *et al.*, 2015], [Deschanel & Weiss, 2019]) sont des sources pouvant générer des signatures acoustiques spécifiques. En revanche, la présence des débris et leur circulation est rarement prise en considération.

1.3.5 Couplage entre le signal acoustique et les paramètres tribologiques

D'un point de vue méthodologique, un certain nombre d'études expérimentales ont été menées en émission acoustique permettant de mieux diagnostiquer et analyser le comportement tribologique d'un contact frottant. De plus, ces études ont pu établir une relation entre les caractéristiques d'un signal acoustique et les paramètres tribologiques (rugosité de surface, coefficient de frottement, lubrification, etc...).
Feng *et al.* [Feng *et al.*, 2019] ont étudié les relations pouvant exister entre l'émission acoustique, le frottement et l'usure. Ils ont établi des relations empiriques entre les caractéristiques tribologiques (le régime de lubrification et le mode de contact) et les paramètres d'émission acoustique (l'amplitude, l'énergie, la fréquence, le nombre d'évènements, etc...). Ils ont montré que les signaux d'émission acoustique sont liés aux changements de rugosité de surface, de coefficient de frottement et d'épaisseur du film lubrifiant. En plus, les paramètres de fonctionne-

ment telles que la vitesse de glissement et la charge normale qui affectent les couplages entre les conditions de surface et l'évolution de la dégradation de surface influencent les signaux d'émission acoustique. De même, une étude réalisée par Mills-Dadson *et al.* [Mills-Dadson *et al.*, 2013] a montré que les transitions de faible vitesse de glissement à vitesse moyenne et de vitesse moyenne à élevée sont marquées par une augmentation de l'énergie cumulée pour un contact sec de type pion-disque. En étudiant les caractéristiques des signaux acoustiques au début du glissement, Taura *et al.* [Taura & Nakayama, 2018], ont montré que le signal acoustique variait de manière similaire à la vitesse de glissement et que l'énergie acoustique était fortement proportionnelle au travail de frottement pendant le glissement. Une relation linéaire et positive entre la rugosité de surface et l'amplitude acoustique a été trouvée dans l'analyse expérimentale du fretting réalisée par Asamene *et al.* [Asamene *et al.*, 2011], c'est-à-dire que l'amplitude moyenne générée à partir de surfaces lisses est inférieure à celle générée à partir de surfaces rugueuses. Ces résultats ont été aussi prouvés par Baranov *et al.* [Baranov *et al.*, 2007].

1.3.6 Couplage entre le signal acoustique et les phénomènes tribologiques

Plusieurs études expérimentales ont pu établir une relation entre le signal acoustique et les paramètres expérimentaux mais aussi coupler les paramètres d'émission acoustique à des phénomènes tribologiques pouvant se produire dans le contact. La production d'usure, l'interaction entre aspérités et la fissuration comptent parmi les principaux mécanismes d'endommagement et d'usure identifiés par la technique d'émission acoustique. Également, la déformation plastique et la formation d'oxyde ont été détectées par émission acoustique.

1.3.6.1 Interactions entre aspérités et usure

En ce qui concerne l'initiation et la production d'usure et l'interaction entre aspérités, McBride *et al.* [McBride, 1989] ont montré qu'un pic d'amplitude élevée avec un temps de montée court est lié à une phase de rodage et à une production d'usure initiale. Lingard *et al.* [Lingard *et al.*, 1993] ont constaté une relation systématique entre le nombre de coups cumulé d'émission acoustique et le taux d'usure dans plusieurs régimes de lubrification. Cela signifie que le nombre de coups cumulé augmente avec l'augmentation du taux d'usure. Ils ont également montré que le taux des coups d'émission acoustique était sensible aux conditions de contact pour les tests avec deux disques glissants l'un contre l'autre et que le taux des coups pouvait être lié au régime de lubrification. Dans une autre étude, Benitez *et al.* [Benítez *et al.*, 2016] ont montré qu'une augmentation de l'amplitude des coups aux extrémités du cycle de fretting peut se produire lors d'un RGT par l'action de labourage du contact. Rastegaev *et al.* [Rastegaev *et al.*, 2018] ont expliqué qu'une sévérité croissante de l'usure s'accompagne d'une augmentation concomitante de l'énergie acoustique, qui se produit parallèlement à la diminution de la fréquence médiane de la densité spectrale. Haas *et al.* [Haas *et al.*, 2020] ont identifié des gammes de fréquences acoustiques distinctives dans les événements de labourage et de coupe. Wang *et al*. [Wang & Wood, 2009] ont montré une corrélation entre la moyenne quadratique du signal acoustique et le coefficient de frottement dans une étude expérimentale sur le frottement lubrifié dans des contacts céramique/métal. L'augmentation du signal acoustique

était due aux mécanismes d'usure et au transfert de matière sur les surfaces en contact. Par ailleurs, les expériences menées par Jibiki *et al.* [Jibiki *et al.*, 2001] ont montré que l'amplitude augmente avec la distance et la fréquence de glissement (c.-à-d. la vitesse de glissement). Ils ont également indiqué que le bruit de frottement se produisait toujours pendant un demi-cycle de fretting (processus de tension), mais jamais pendant l'autre demi-cycle (processus de compression). La génération de bruit de fretting peut également être liée à la génération de débris de matière sur les surfaces lors du fretting. De plus, Merhej *et al.* [Merhej *et al.*, 2009]ont constaté que les accumulations locales et les débris adhérents au contact peuvent entraîner une augmentation de l'amplitude des signaux acoustiques. Asamene *et al*. [Asamene & Sundaresan, 2012] ont constaté que le changement d'amplitude en émission acoustique est lié à la variation de la charge normale. En parallèle, ils ont souligné que l'augmentation de la fréquence moyenne pouvait être liée à l'augmentation de la vitesse de glissement. La majorité des évènements acoustiques étant attribuée aux interactions entre aspérités. Ito *et al.* [Ito *et al.*, 2009] ont indiqué que des pics apparaissent au niveau de l'amplitude des signaux acoustiques se produisant dans le RGT et étant associés à une fracture soudaine des aspérités en contact.

1.3.6.2 Fissuration et rupture

En ce qui concerne la fissuration, Meriaux *et al.* [Meriaux *et al.*, 2010] ont identifié trois étapes successives dans le processus de propagation de fissure dans un essai de fretting fatigue. Ils ont démontré que les fissures courtes et inclinées s'amorcent et se propagent d'abord en raison du processus de cisaillement (mode II). Ainsi, l'activité d'EA cumulée augmente progressivement. Ensuite, les fissures se propagent dans un mode mixte de cisaillement et de tension où l'activité acoustique cumulée se stabilise. Enfin, les fissures de fatigue se propagent par traction dans un processus de mode I pur où l'activité cumulée atteint sa valeur maximale. De même, Cadario *et al.* [Cadario & Alfredsson, 2006] ont utilisé l'emplacement des salves pour déterminer le temps d'amorçage des fissures de frottement. De plus, Jlaiel *et al*. [Jlaiel *et al.*, 2020] ont observé un changement des signaux acoustiques associé à un faible frottement, à la formation de fissures hertziennes ainsi qu'à la formation d'un troisième corps entre les deux surfaces frottantes. Plus récemment, Yahiaoui *et al.* [Yahiaoui *et al.*, 2021] ont pu établir une relation entre la caractérisation des fissures transgranulaires des carbures cémentés et l'émission acoustique. Ils ont montré que l'énergie acoustique et les fréquences acoustiques sont associés à la tailles des fissures granulaires.

1.3.6.3 Déformation des surfaces et interactions avec l'atmosphère

Pour ce qui est de la déformation plastique et de la formation d'oxyde, McBride *et al.* [McBride, 1989] ont montré qu'une faible amplitude avec un temps de montée plus élevé correspond à de la déformation plastique interne au contact. Une relation entre les signaux d'émission acoustique et le rapport d'énergie de fretting a été examinée par Wade *et al.* [Wade *et al.*, 2019]. Ils ont montré que l'augmentation de l'amplitude des salves était due à la transition d'un régime de glissement partiel (RGP) à un régime de glissement total (RGT) provoquant une libération rapide de l'énergie de déformation élastique. Benabdallah *et al.* [Benabdallah & Aguilar, 2008]

ont révélé une relation entre la tension des signaux d'émission acoustique et le coefficient de frottement en cas de contact sec de type bille-cylindre. Ils ont constaté que la diminution du coefficient de frottement due à la formation d'oxydes à l'interface de contact génère une diminution du signal.

1.3.7 Association des bandes fréquentielles acoustiques à des phénomènes tribologiques

Plusieurs études expérimentales ont pu associé des bandes fréquentielles en émission acoustique à des phénomènes tribologiques. Une carte de corrélation (Figure 1.18) des spectres de fréquence acoustique et de plusieurs phénomènes associés à la déformation et à la fracture a été construite par Hase *et al.* [Hase *et al.*, 2012]. Par exemple, ils ont souligné que pour des signaux provenant de collisions d'aspérités de surface, la bande de fréquences de glissement est située entre 0,08 MHz et 0,2 MHz et le pic de fréquence se produit à 0,1 MHz. Ils exposent aussi que le roulement et la collision des particules d'usure entre les surfaces, observés par Chung *et al*. [Chung *et al.*, 2004], se produisent dans une bande de fréquences de 0,05 MHz à 0,35 MHz avec un pic de fréquence situé à 0,2 MHz. Sur ce large spectre de fréquences, ils indiquent que chaque mode d'usure peut être caractérisé par sa propre bande de fréquences. Ainsi, l'usure adhésive (c.-à-d. le détachement et le transfert de matière consécutif à une interaction adhésive et à des déformations plastiques) est associée à des signaux acoustiques situés dans une bande de fréquences plus élevée que l'usure abrasive (c.-à-d. une combinaison de microcoupures, de labourages et de fragmentation par des aspérités relativement fortes). Sinon, Alam *et al.* [Alam & Sundaresan, 2010] ont expliqué que la rugosité de surface avait une relation inverse avec la fréquence d'émission acoustique et ont montré que les signaux générés à partir de surfaces lisses avaient une plage de fréquences plus large (0-1 MHz) que ceux obtenus à partir de surfaces plus rugueuses (0-200 kHz).

Ces larges bandes de fréquences regroupent plusieurs mécanismes d'accommodation élémentaires du tribosystème difficiles à distinguer lors de l'essai et en analyse *post mortem* des surfaces usées. Cependant, plusieurs bandes fréquentielles se chevauchent ce qui rend difficile l'interprétation des phénomènes. L'association d'une signature spécifique à un phénomène tribologique bien défini nécessite alors une grande rigueur d'interprétation en raison des gammes qui se chevauchent. D'où le principal objectif de cette thèse est d'associer une signature acoustique à un phénomène tribologique bien précis.

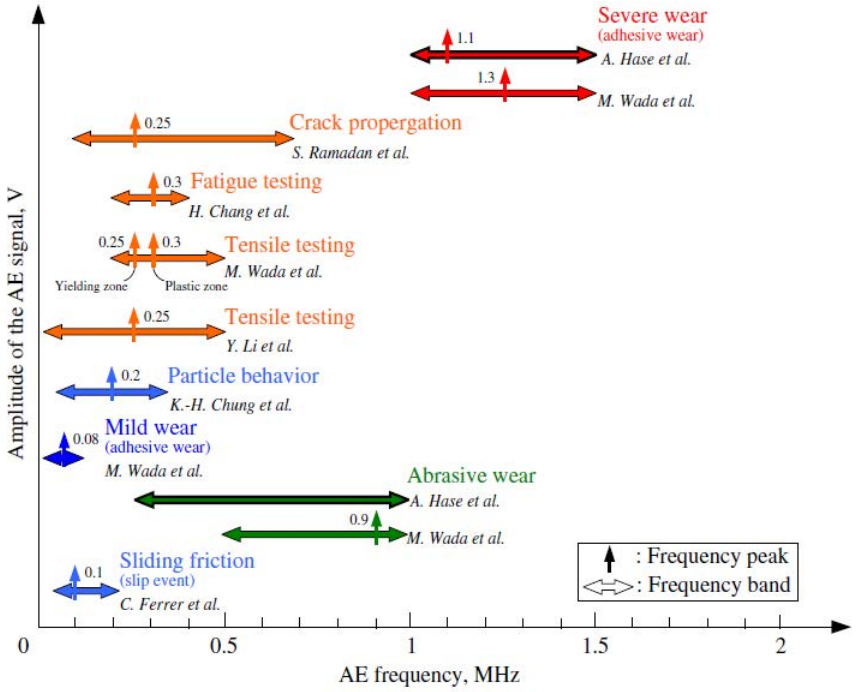


FIGURE 1.18 – Carte de corrélation des spectres de fréquence d'émission acoustique pour les phénomènes de déformation et de rupture [Hase *et al.*, 2012].

1.4 Tribomètres *in situ*

L'amélioration des performances tribologiques requiert une bonne compréhension des mécanismes de frottement et d'usure. Cependant, en raison du confinement de l'interface entre les deux matériaux en contact, l'examen des phénomènes d'endommagement et d'usure constitue un défi constant. Historiquement, la majorité des informations est déterminée par des méthodes *ex situ* (*post mortem*), où les contacts doivent être séparés et l'interface détruite avant observation. Cela complique le fait d'établir une corrélation directe entre les propriétés tribologiques et l'évolution structurelle et chimique au cours des essais. L'importance de comprendre la nature des contacts glissants avec les méthodes *in situ* a été illustrée au début des années 1980 lorsque Godet [Godet, 1984b] a proposé le concept du troisième corps. Pour cela, la recherche a adopté plusieurs approches au cours des dernières décennies dans le but d'observer les processus tribologiques.

Des tribomètres *in situ* ont été largement utilisés en temps réel pour l'étude du contact frottant. Des techniques d'analyse ont été utilisées pour observer la dynamique de glissement, identifier les changements mécanique et/ou chimiques proches de la surface et mieux comprendre le comportement du troisième corps pour des contacts secs ainsi que lubrifiés en utilisant les techniques de suivi global (résistance électrique, température) ou même les techniques d'observation à travers les surfaces en contact (microscopie optique, par spectroscopie Raman et par caméra rapide).

De nature indirecte, la détermination de la résistance électrique a été abordée par plusieurs auteurs (Le Gall [Le Gall, 1995], Fouvry *et al.* [Fouvry *et al.*, 2011], Noël *et al.* [Noël *et al.*, 2012]

et Benitez [Benitez, 2016]) qui ont pu étudier le comportement électrique des matériaux et le corréler à des mécanismes de dégradation lors des essais tribologiques. La connaissance des températures de contact est une technique utilisée dans plusieurs travaux de recherche pour l'étude du comportement tribologique des matériaux en contact glissant soit par des techniques de thermocouples soit par des techniques de détecteur infrarouge ou pyrométrie optique. Denape *et al.* [Denape & Laraqi, 2000] ont exposé ces principales techniques utilisées dont le choix repose sur le type d'information désiré (températures du contact, points chauds, températures éclairs), l'accessibilité du contact, la nature des matériaux ou encore l'agressivité du milieu. Comme exemple de ces méthodes, Kennedy *et al.* [Kennedy *et al.*, 1997] ont réalisé des mesures de température à l'aide de thermocouples et ont montré que les mesures des températures de contact ont permis de déterminer la variation de l'aire réelle de contact et également la variation de pression au sein de l'aire de contact.

En ce qui concerne les méthodes d'observation, une revue a été établie par Cann [Cann, 2008] présentant l'ensemble des méthodes utilisées pour l'expérimentation de systèmes lubrifiés. L'utilisation d'un contre-corps transparent a permis d'étudier les propriétés de lubrification par interférométrie optique et par spectroscopie Raman (Figure 1.19).

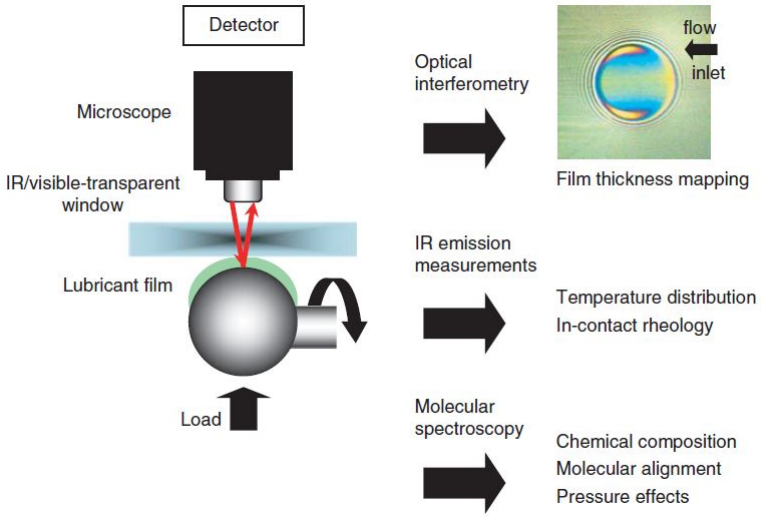


FIGURE 1.19 – Résumé des méthodes utilisées pour l'analyse des contacts lubrifiés [Cann, 2008].

De même, Gohar *et al.* [Gohar & Cameron, 1963] ont utilisé des tribomètres *in situ* pour effectuer des mesures d'interférométrie du contact d'un disque transparent et de la bille afin de mesurer l'épaisseur du film d'un contact lubrifié dans des conditions élastohydrodynamiques et hydrodynamiques. Dvorak *et al.* [Dvorak *et al.*, 2007] et Stoyanov *et al.* [Stoyanov *et al.*, 2012] ont utilisé la microscopie optique et l'analyse Raman pour étudier les processus de formation de films de transfert tels que le MoS_2 en se basant sur des contrefaces transparentes. Chromik *et al.* [Chromik *et al.*, 2008] ont utilisé des contrefaces transparentes pour étudier les performances des revêtements en diamant nanocristallin à l'aide de la microscopie optique et la microscopie Raman. Muratore *et al.* [Muratore *et al.*, 2011] ont utilisé un tribomètre équipé de la microscopie Raman afin d'étudier les comportement des revêtement en MoS_2et VN-Ag à haute température (Figure 1.20).

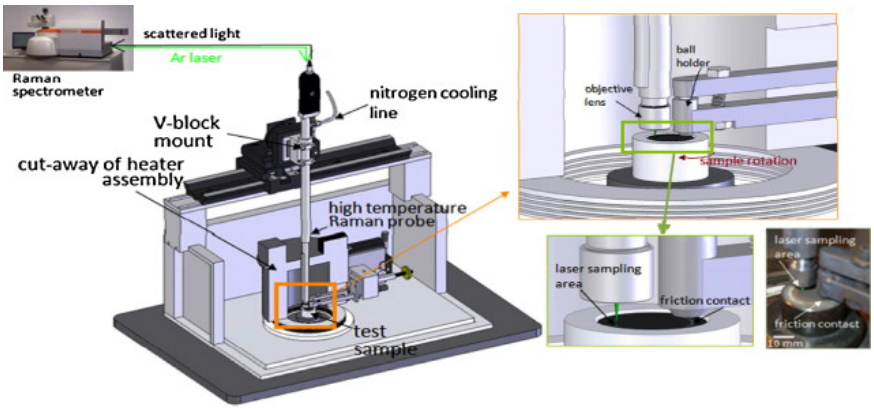


FIGURE 1.20 – Représentation schématique et images du dispositif expérimental utilisé par Muratore *et al.* pour l'étude des revêtements à haute température [Muratore *et al.*, 2011].

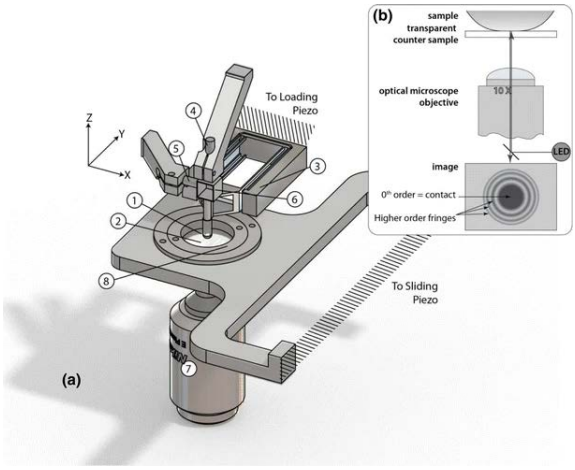


FIGURE 1.21 – Représentation schématique du tribomètre utilisé par Krick *et al.* [Krick *et al.*, 2011].

Krick *et al.* [Krick *et al.*, 2011] ont par exemple étudié le glissement ainsi que le comportement en charge/décharge des polymères à l'aide d'une observation directe des interfaces. En plaçant une caméra CCD sous l'interface (Figure 1.21), ils ont étudié la zone de contact entre un hémisphère en caoutchouc nitrile et du verre poli.
Teng et Sato [Teng & Sato, 2004] ont étudié le comportement en fretting d'un échantillon plan en PMMA en contact avec une bille en acier. L'observation *in situ* de la zone en contact leur a permis d'analyser la formation de débris et l'initiation et la propagation des fissures en temps réel des tests. Euguchi *et al.* [Eguchi *et al.*, 2009] ont réalisé des mesures de la zone de contact réelle entre un hémisphère en caoutchouc et une plaquette de verre et ont analysé la zone de stick/slip *in situ* en utilisant la microscopie optique à balayage (Figure 1.22).

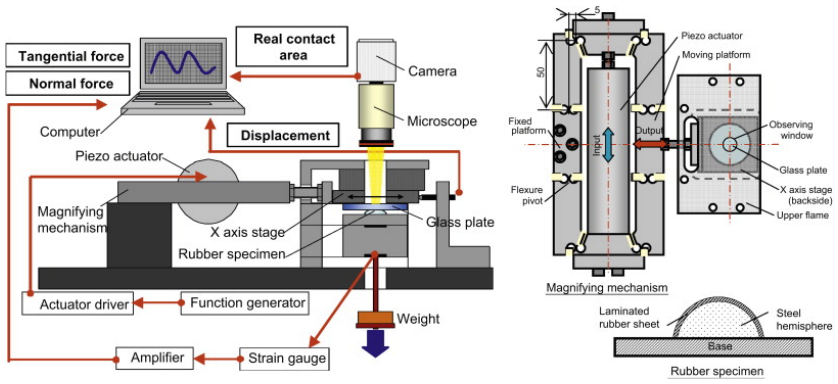


FIGURE 1.22 – Schéma de principe du banc d'essai équipé d'un système d'observation optique utilisé par Euguchi *et al.* [Eguchi *et al.*, 2009].

Descartes *et al.* [Descartes & Berthier, 2002] ont réalisé des essais avec un premier corps transparent qui a permis une observation directe des débits (Figure 1.23).

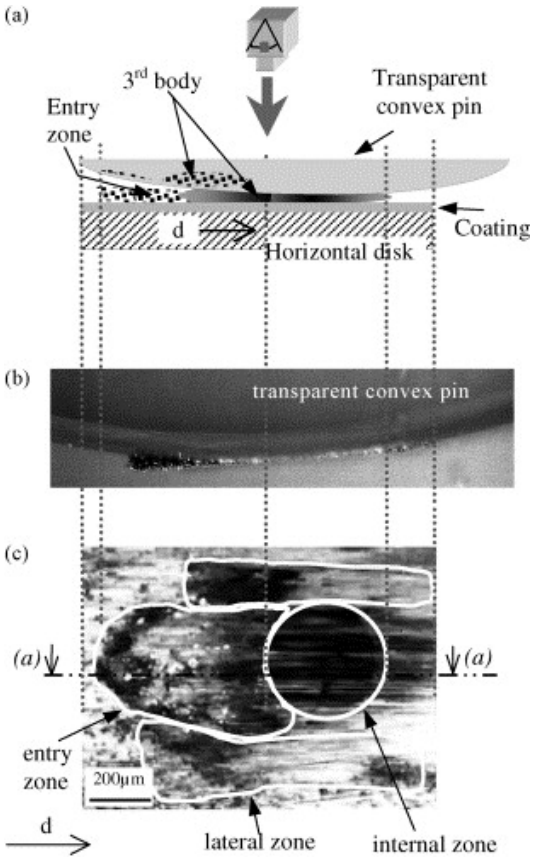


FIGURE 1.23 – Représentation schématique du tribomètre utilisé par Descartes *et al.* (a) vue latérale, b) vue de dessus, c) vue de dessus agrandie [Descartes & Berthier, 2002].

Plus récemment, des tribomètres *in situ* ont été utilisés pour observer directement le comportement du troisième corps lors du glissement non lubrifié saphir/aluminium [Shockley *et al.*, 2014] ainsi que les revêtements Cd et Zn-Ni [Sriraman *et al.*, 2012] et le comportement du troisième corps a été corrélé aux évènements de frottement et d'usure.

Des expériences ont été aussi réalisées par Yahiaoui *et al.* [Yahiaoui *et al.*, 2017] permet-

tant de représenter des signaux temporels synchronisés avec le déplacement, le frottement et l'évolution de l'épaisseur du film lubrifiant à l'aide d'un tribomètre équipé d'une caméra rapide (Figure 1.24).

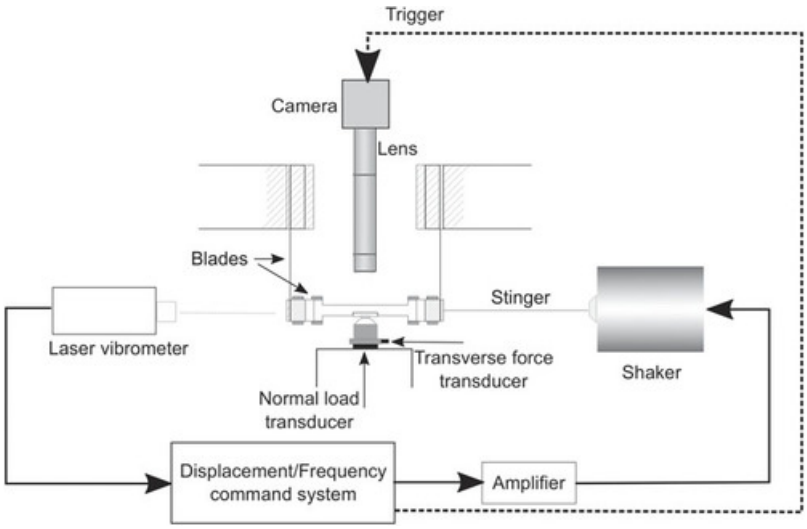


FIGURE 1.24 – Représentation schématique du tribomètre équipé d'un caméra rapide utilisé par Yahiaoui *et al.* [Yahiaoui *et al.*, 2017].

De Pannemaecker *et al.* [de Pannemaecker *et al.*, 2017] ont étudié l'initiation et la propagation des fissures de fatigue lors d'essais de fretting dans des conditions de glissement partiel. Ils ont développé un dispositif expérimental qui leur a permis de comparer le comportement en fatigue de fretting à des expériences conventionnelles de croissance de fissures en fatigue (Figure 1.25).

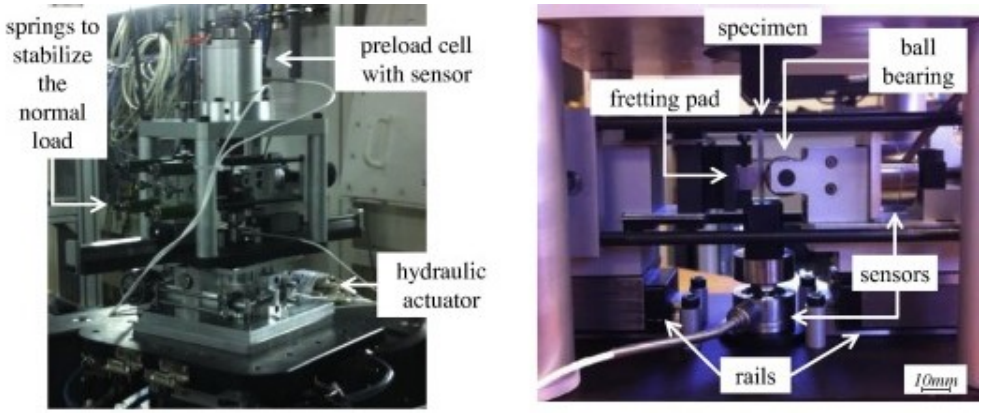


FIGURE 1.25 – Dispositif expérimental utilisé par De Pannemaecker *et al.* [de Pannemaecker *et al.*, 2017].

Bien que les méthodes d'observation *in situ* ont été beaucoup utilisées en tribologie avec une grande variété de technique, l'investigation des processus tribologiques en temps réel corrélés à de l'observation *in situ* de l'interface et la synchronisation de ces processus avec des signatures de l'émission acoustique restent des questions toujours ouvertes.

1.5 Synthèse partielle

Après avoir introduit et défini les notions générales du système tribologique, de fretting et de glissement alternatif, cette revue bibliographique a permis de détailler la technique d'émission acoustique (EA) ainsi que ses nombreuses applications scientifiques. Cette méthode de caractérisation a permis d'identifier et de suivre l'évolution de nombreux systèmes, qu'ils soient sollicités mécaniquement ou non. La majorité des travaux répertoriés dans cette revue bibliographique a montré que la technique d'émission acoustique est principalement utilisée pour identifier les différents mécanismes élémentaires d'endommagement de plusieurs types de matériaux.
En revanche, le traitement des signaux recueillis est parfois très compliqué. Cela est dû au fait que les signatures acoustiques de mécanismes d'endommagement distincts qui apparaissent simultanément ou successivement dans le temps, ne peuvent pas être différencier aisément. Les interprétations sont ainsi très intéressantes mais loin d'être suffisantes pour fournir des conclusions convaincantes.
Comme indiqué dans l'introduction de cette thèse, l'ambition de ce projet de recherche est de s'affranchir de ce problème et de développer une démarche expérimentale permettant de suivre l'apparition et l'évolution des endommagements dans un contact semi-transparent. Pour cela, le travail a été focalisé sur un couplage entre la technique d'émission acoustique et la visualisation *in situ* du contact.
Cette étude vise à obtenir une meilleure compréhension des mécanismes d'endommagement et d'usure d'un contact semi-transparent à travers la corrélation des résultats tribologiques et acoustiques et la visualisation en temps réel du contact.
Le chapitre suivant présente alors les matériels et les méthodes utilisés dans ce travail expérimental.

Chapitre 2

Dispositifs & Méthodologies

Ce chapitre présente d'abord les caractéristiques du tribomètre du LGP. Afin de s'affranchir de la complexité de différencier la signature acoustique de signaux issus de mécanismes d'endommagement distincts quand ceux-ci apparaissent simultanément ou successivement dans le temps, des nouvelles instrumentations ajoutées à ce dispositif sont ainsi décrites. Enfin, une présentation des matériaux et des techniques de caractérisation utilisés est abordée.

2.1 Dispositif expérimental : Tribomètre

2.1.1 Présentation

Un tribomètre original conçu pour simuler les conditions de fretting et de glissement alternatif dans des contacts de type sphère-plan, a été construit par le LGP de l'ENIT. Après sa première mise en service, ce dispositif a subi plusieurs évolutions, vis-à-vis des besoins des travaux de recherche menés ([G. R. Yantio, 2007], [Ural, 2011], [Benitez, 2016]).
Le dispositif, pour cette étude (Figure 2.1), répond aux spécificités techniques suivantes :

- Configuration du contact : bille-plan
- Capacité de charge normale : 1 à 100 N
- Type de signal de pilotage : sinusoïdal
- Force d'actionneur maximale (crête sinus) : 98 N
- Fréquence d'excitation : comprise entre 5 et 600 Hz
- Étendue du débattement : comprise entre 5 et 500 µm
- Ambiance de frottement : milieu liquide et air du laboratoire.

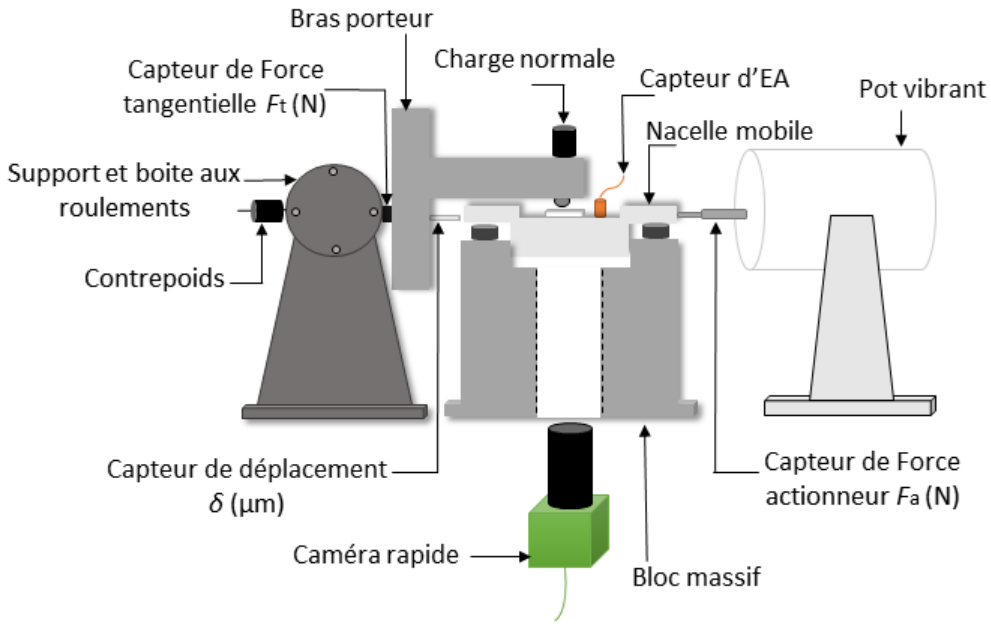


FIGURE 2.1 – Vue générale du dispositif de fretting.

Cette machine est constituée de deux parties principales : une partie mécanique qui assure les fonctions de mouvements de charge et une partie électronique qui comprend l'instrumentation pour la commande et l'acquisition des données.

2.1.2 Partie mécanique

La partie mécanique du dispositif est constituée d'un bâti suffisamment rigide pour limiter les vibrations parasites au niveau des échantillons pendant l'essai. Les dimensions de l'ensemble sont de l'ordre de 40 cm × 150 cm × 80 cm. Le bâti supporte un plateau fixe (plan de réfé-

rence) où sont fixés trois modules : le module actionneur, le module mobile et le module de positionnement.

Le module actionneur est constitué d'un générateur de vibrations appelé communément pot vibrant. Cet excitateur, de marque *LDS*, fonctionne sur le principe d'un électroaimant en générant des mouvements de translation alternatifs dont l'amplitude de déplacement et la fréquence peuvent être contrôlées. La force mécanique tangentielle maximale délivrée par le pot vibrant est d'environ 100 N.

Le module mobile est composé d'une plate-forme (nacelle), de quatre tampons élastiques et d'un bloc support. Une vis sert de liaison entre la nacelle et l'axe du pot vibrant en garantissant la transmission du mouvement alternatif.

- La nacelle joue le rôle de porte-échantillons et supporte les échantillons à l'aide de deux mâchoires, tout en assurant une position horizontale sensiblement constante du plan de frottement. L'une des deux mâchoires est en forme de V permettant un meilleur serrage de l'échantillon plan. La plate-forme a été réalisée en alliage d'aluminium anodisé. Sa forme en U permet d'éliminer les couples perturbateurs en alignant les forces en présence sur le plan de contact (Figure 2.2).
- Les tampons élastiques permettent d'isoler mécaniquement le système en absorbant les mouvements de petites amplitudes. Disposés aux quatre coins de la nacelle, ces supports élastiques assurent également le mouvement alternatif uniaxial imposé par le pot vibrant en se déformant par cisaillement. De plus, la hauteur du plan de frottement h est maintenue car le déplacement δ est toujours inférieur à la flèche maximale de cisaillement qui est de 1,5 mm.
- Le bloc support a pour rôle de soutenir les composants en mouvement. En fonte, il joue un rôle de massif limitant toutes déformations parasites. Ce bloc contient un trou longitudinal permettant d'insérer la caméra rapide.

Le module de positionnement permet la mise en place du frotteur (bille) et une manipulation aisée des échantillons entre essais. Ce module est composé d'un bras-porteur du frotteur, de roulements et d'un contrepoids et d'un système de charge.

- Le bras-porteur assure la mise en place de l'échantillon supérieur. Il est directement fixé au capteur de force dont l'alignement dans le plan de frottement supprime ainsi les couples perturbateurs.
- Les roulements coniques utilisés permettent la rotation du bras. Ces roulements sont supportés par deux équerres et un support en acier positionne l'axe du pivot dans le plan de frottement.
- La charge normale est appliquée par gravité sur le contact, où une tige au-dessus de l'extrémité du bras-porteur permet d'empiler des masses marquées.
- Le contrepoids sert à équilibrer le bras porte-bille de manière à maîtriser la charge appliquée.

Nomenclature	Paramètres	Type de capteur
Force d'actionneur	F_a (N)	À jauge extensométrique UB9
Force de frottement	F_T (N)	À jauge extensométrique UB9
Déplacement	δ (µm)	Courant de Foucault (sans contact)
Force normale	F_N (N)	Chargement des masses mortes
Émission acoustique	EA	Piézoélectrique PCI2

TABLE 2.1 – Caractéristiques des capteurs du dispositif de fretting.



FIGURE 2.2 – Vue générale de la nacelle mobile (à gauche) et des mâchoires (à droite).

2.1.3 Instrumentation

Ce dispositif de fretting est fortement instrumenté. Plusieurs capteurs permettent de récupérer toutes les informations concernant :

- les efforts tangentiels de l'actionneur (fournis par le pot vibrant),
- les efforts tangentiels de frottement produit lors de la mise en contact,
- les déplacements relatifs entre le frotteur et l'échantillon-plan
- la charge normale est appliquée manuellement avant chaque essai,
- l'activité acoustique (EA).
- La localisation de tous les capteurs est illustrée dans la figure 2.1 et les caractéristiques des capteurs sont résumées dans le tableau et précisées au paragraphe suivant.

Deux capteurs HBM™ U9B à jauges extensométriques permettent de mesurer les efforts tangentiels fournis par le pot électrodynamique F_a et la force tangentielle de frottement F_T. Le premier capteur est vissé sur l'axe de la bobine du pot vibrant et le deuxième sur le bras-porteur (aligné sur l'axe horizontal du contact). Les caractéristiques de ces capteurs sont les suivantes :

- Force nominale de 0,5 kN,
- Sensibilité de 0,002 mV/N,
- Tolérance sur la sensibilité $\leq 1\%$ en traction et $\leq 2\%$ en compression,
- Fréquence propre 6,3 kHz.

Le capteur de déplacement permet d'enregistrer les micro-mouvements relatifs de l'échantillon-plan. Le capteur de déplacement est un capteur de mesure sans contact (courant de Foucault) de marque KAMAN™, modèle 5U, avec une étendue de mesure de 1 mm et une résolution statique de 0,1 µm. Il est fixé sur le bras porte-échantillon avant le capteur de force de manière à mesurer en continu le déplacement relatif de l'échantillon plan sans que la déformation du

capteur de force n'influe sur la mesure du déplacement.

2.1.4 Logiciel de commande et de paramétrage

La commande du dispositif de fretting est assurée par le logiciel VibPilot™ qui exécute deux fonctions essentielles : une fonction de commande du dispositif et une fonction de paramétrage du dispositif (Figure 2.3). La fonction de commande du dispositif permet l'émission d'un signal sinusoïdal asservi en fréquence au pot vibrant. L'asservissement en temps réel du pot vibrant se fait à partir d'un signal de pilotage appelé *drive* et amplifié par l'amplificateur de puissance avant d'être communiqué à la bobine du pot (signal de vibration). Un algorithme d'asservissement calcule la fonction de transfert de la boucle et compense le signal de sortie (drive) de telle sorte que le signal de vibration soit conforme à la consigne prédéfinie en fréquence et en niveau. Tous les signaux délivrés par les capteurs sont d'abord reçus par le frontal d'acquisition QUANTUM MX840A™. Ce module synchronise et retransmet en mode analogique toute l'information vers le frontal QUANTUM MX878™. A partir de ce point, 4 voies (choisies par l'utilisateur) sont retransmises avec une cadence de 2400 Hz vers le frontal de pilotage VibPilot™. Une interface Ethernet et une autre USB connectent les modules d'acquisition et de pilotage aux logiciels CATMAN™ et VibControl™ dans un ordinateur dédié.

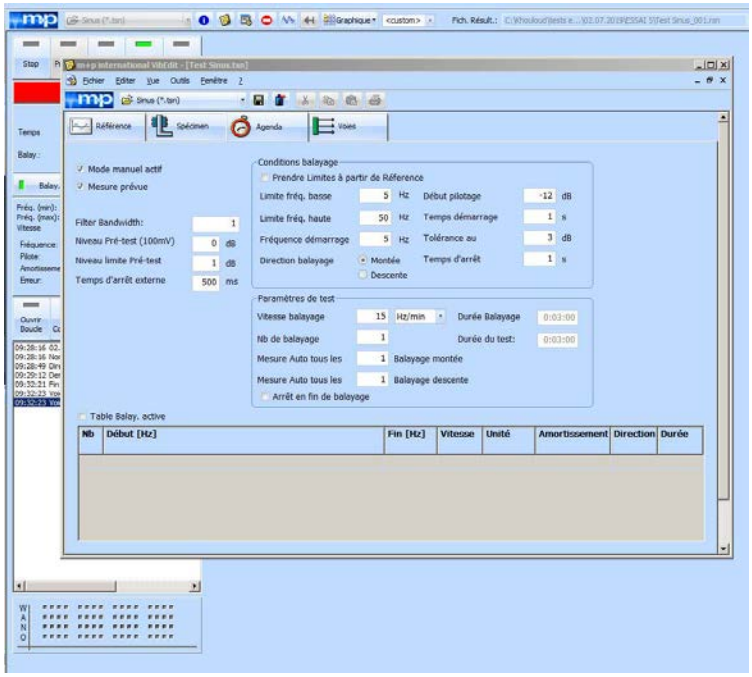


FIGURE 2.3 – Capture d'écran du logiciel de commande VibPilot™.

2.1.5 Acquisition des données

Les mesures de déplacement δ et de force tangentielle (F_T et F_a) sont visualisées en temps réel par le logiciel CATMAN™ à travers des fenêtres glissantes configurées par l'utilisateur (Figure 2.4). La représentation de la force de frottement en fonction du déplacement permet de tracer les cycles de fretting en continu. L'enregistrement de toutes les voies de mesure est réalisé à la fin de chaque essai.

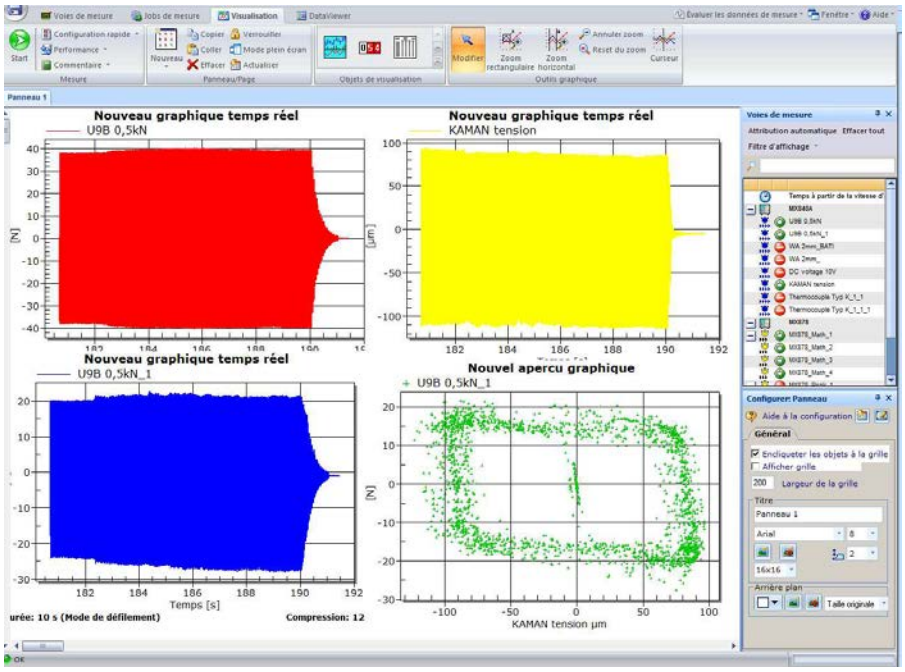


FIGURE 2.4 – Capture d'écran du logiciel d'acquisition des données CATMAN^{TM}.

Pour choisir une vitesse d'échantillonnage adéquate, un nombre suffisant de points est nécessaire pour reconstituer avec une certaine fidélité les signaux sinusoïdaux de mesure, tout en trouvant un compromis avec la taille des fichiers afin de faciliter la phase de traitement de données. Par exemple, pour un essai effectué à une fréquence d'excitation de 10 Hz, une fréquence d'échantillonnage de 2400 Hz permet de disposer de 240 points par cycle. En considérant que la plupart des essais a été faite à une fréquence de 10 Hz et une durée maximale de 25.10^3 cycles, une fréquence d'échantillonnage de 2400 Hz permet d'avoir des fichiers de quelques centaines de mégabytes.
Les signaux bruts acquis sont traités par un programme créé sur le logicile IGOR PRO. L'évolution des principaux paramètres de fretting mesurés, comme les signaux de force de frottement, de force d'actionneur, de débattement, peuvent être présentées indifféremment en fonction du temps ou du nombre de cycles.

2.1.6 Étude des limites opératoires et de la rigidité du dispositif

Les limites opératoires du dispositif ont été déterminées à vide c'est-à-dire sans mise en place des échantillons supérieur et inférieur. La fréquence d'excitation minimale pouvant être générée par le dispositif est égale à 5 Hz. La fréquence maximale atteinte dépend de l'amplitude de déplacement imposé (Figure 2.5). Le dispositif peut imposer une amplitude de déplacement jusqu'à 5 µm avec une grande précision (Figure 2.6).
Pour assurer la validité des mesures et la stabilité des conditions de fonctionnement du dispositif, une étude de sa rigidité a été privilégiée puisqu'il constitue le premier élément du tribosystème. L'étude de la rigidité se base sur une analyse temps-fréquence des vibrations qui est une technique très utilisée en dynamique des systèmes et en diagnostic des machines. Elle se base sur l'application de la transformée de Fourier (FFT). Le test a été réalisé sous les condi-

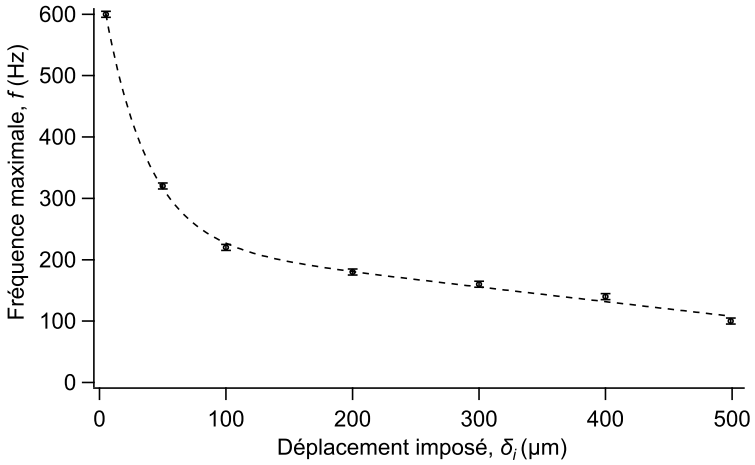


FIGURE 2.5 – Variation de la fréquence d'excitation maximale en fonction du déplacement imposé.

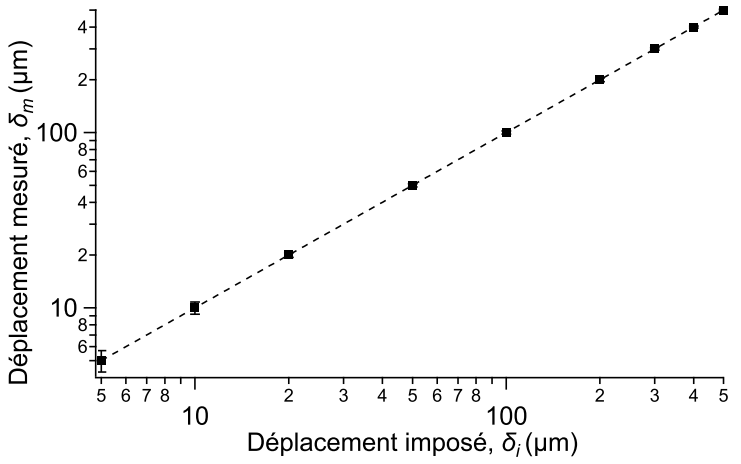


FIGURE 2.6 – Variation de déplacement mesuré en fonction de déplacement imposé.

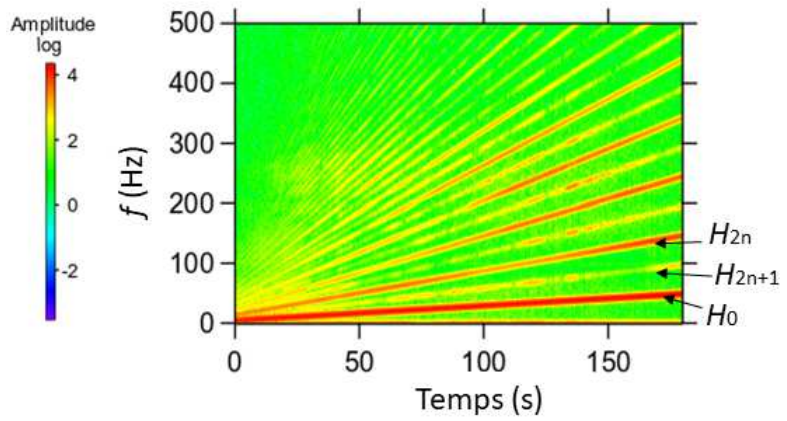


FIGURE 2.7 – Spectrogramme de force de frottement : les harmoniques paires (plus intenses) et les harmoniques impaires (moins intenses).

tions suivantes : un couple de matériaux constitué d'une bille en acier 100Cr6 sur une plaquette de verre standard, une amplitude de déplacement de 200 µm, une force normale appliquée égale à 15 N et une fréquence d'excitation qui augmente de 5 à 50 Hz avec un incrément constant de 0,25 Hz/s.

Le résultat obtenu est présenté sous forme d'un spectrogramme (Figure 2.7) qui est une représentation tridimensionnelle où le temps est porté en abscisse, la fréquence en ordonnée et l'intensité de la fréquence en couleur. Sur le spectrogramme de force de frottement, des harmoniques sont présentées. La frange rouge la plus intense (en position basse) correspond à la fréquence fondamentale H_0, c'est-à-dire la fréquence d'excitation à laquelle le test a été effectué qui correspond à une évolution de 5 à 50 Hz. Les harmoniques impaires H_{2n+1} sont moins intenses que les harmoniques paires H_{2n}, qui correspondent à un signal de frottement tendant à une forme carrée commune dans les contacts secs. Le frottement est faiblement dépendant de la vitesse de glissement en respectant la loi d'Amontons-Coulomb. De plus, ce spectrogramme montre que les harmoniques sont très claires et distinctes et ne montrent pas de grandes perturbations ou d'interférences avec les modes horizontaux. En d'autres termes, les modes de vibration de l'appareil n'ont pas interféré avec le signal de frottement, ce qui implique que le dispositif a une rigidité appropriée évitant toute vibration ou perturbation du contact.

2.2 Dispositif d'émission acoustique

2.2.1 Capteur et chaîne d'acquisition

La figure 2.8 montre un montage typique d'acquisition d'émission acoustique. L'équipement utilisé a été développé et commercialisé par l'entreprise Euro Physical Acoustique (Mistras Group Ltd.). Il permet de transformer un phénomène physique (génération d'ondes élastiques) en un signal exploitable via le capteur. Son intérêt est d'améliorer le signal émis en un signal retravaillé pour faire ressortir ses caractéristiques.

La partie conditionnement regroupe le préamplificateur, le filtre et l'amplificateur. Le pré-

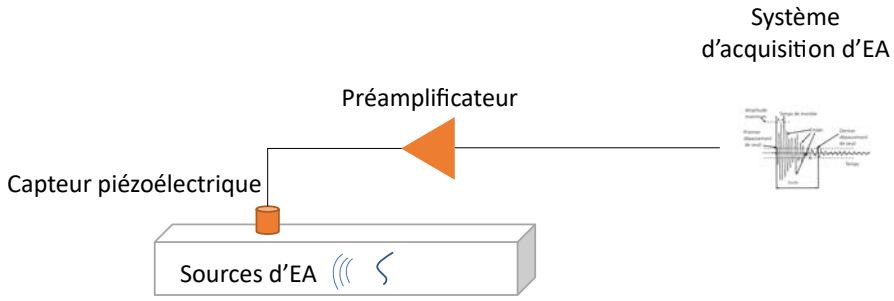


FIGURE 2.8 – Montage typique d'acquisition d'EA.

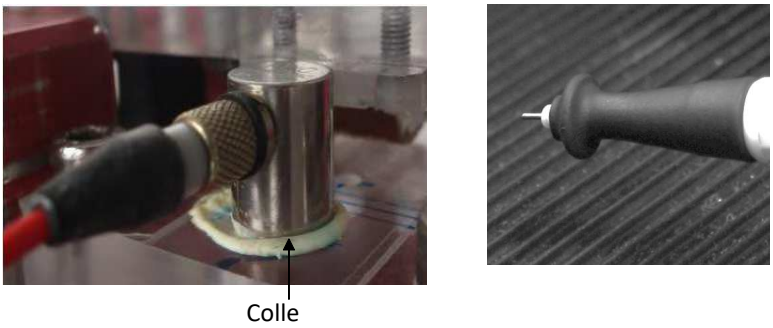


FIGURE 2.9 – Capteur piézoélectrique PCI2 pour l'acquisition des signaux d'émission acoustique (à gauche) et vérification du couplage par la technique de Hsu-Nielsen (à droite).

amplificateur se trouve à proximité du capteur. Il permet d'effectuer une première amplification du signal et de convertir les ondes élastiques reçues par le capteur piézoélectrique en un signal électrique. Le filtre permet d'améliorer le signal relevé en le dissociant du bruit de fond relevé lors de la mesure. Un filtre passe-haut va permettre d'éliminer les bruits de fonctionnement de l'installation. L'amplificateur permet de préparer le signal pour qu'il puisse être traité par la suite. La chaîne d'acquisition idéale devra assurer la conversion des ondes mécaniques en ondes électriques en conservant au mieux les informations contenues dans le signal d'origine.

Le capteur piézoélectrique PCI2 permet d'acquérir les signaux d'EA avec une très grande dynamique (> 85 dB et bande passante comprise entre 20 kHz et 3 MHz à – 3 dB) et une très haute vitesse d'acquisition (100 kHz à 40 MHz). Il est fixé au plus près du contact frottant, sur le porte échantillon plan, grâce à une pâte adhésive (Figure 2.9a). Cette pâte permet d'optimiser la transmission des ondes mécaniques entre la surface de l'échantillon et le capteur garantissant un niveau de couplage adéquat. La qualité du couplage est évaluée à l'aide d'une mine spécifique de critérium de 0,5 mm de diamètre et de dureté 2H, permettant de générer des sources normalisées et répétables d'émission acoustique du type Hsu-Nielsen (norme NF EN 1330). Le test consiste en des cassés de mines près de la zone du contact frottant (Figure 2.9b). Le couplage est optimal lorsque l'amplitude des signaux enregistrés est supérieure à 90 dB.

Le positionnement des capteurs sur la surface de l'échantillon a une influence sur la forme du signal mesuré. Ce paramètre doit être étudié en fonction des capacités d'atténuation du matériau mais également en fonction de la localisation de l'endommagement. Dans ce cadre, une configuration de positionnement des capteurs a été testé. Un premier capteur est positionné du coté de l'échantillon supérieur sphérique et le deuxième capteur est positionné sur l'échantillon in-

férieur plan à proximité du contact. Les résultats obtenus en utilisant cette configuration montre que les deux capteurs enregistrent la même allure de l'évolution de l'activité acoustique (Figure 2.10). Cette configuration de positionnement des capteurs a été validée pour tous les essais réalisés dans le cadre de cette thèse.

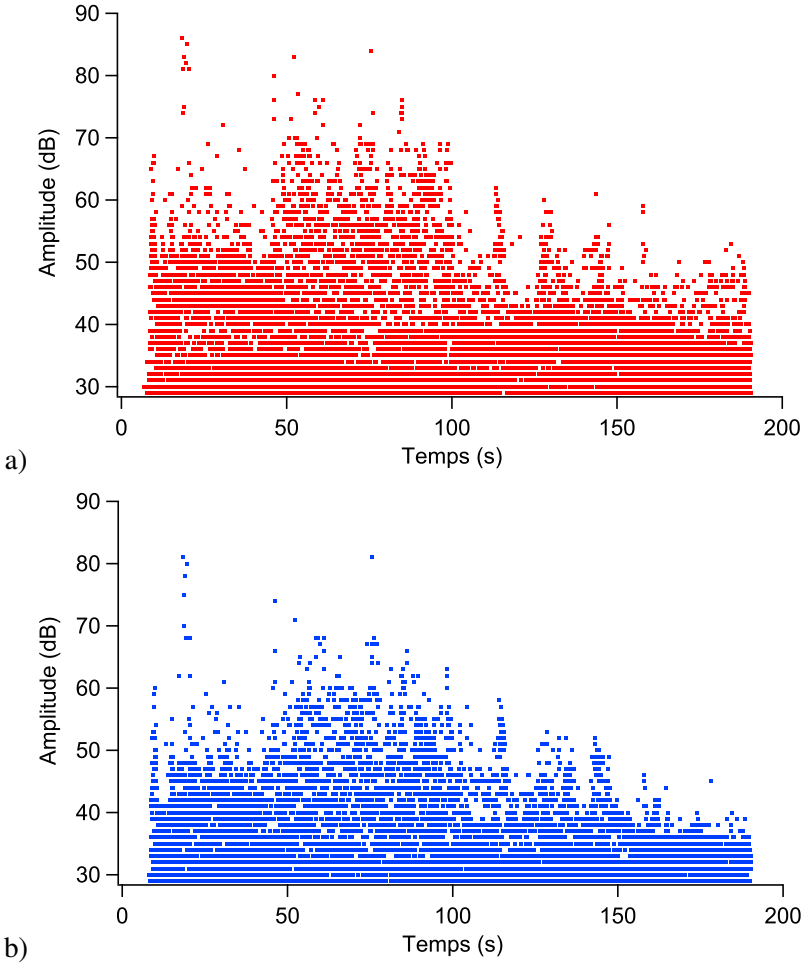


FIGURE 2.10 – Exemple de résultats de comparaison des activités acoustiques des capteurs positionnés : a) du côté de l'échantillon plan inférieur, b) du côté de l'échantillon sphérique supérieur.

2.2.2 Analyse des données et traitement des signaux acoustiques

Les signaux acoustiques mesurés comportent différents paramètres caractéristiques à prendre en compte lors de l'analyse des essais. Ils sont directement traités en utilisant le logiciel NOESIS (Mistras Group Ltd.). L'objectif de l'analyse des signaux d'EA est d'associer un signal à un mécanisme source. En effet, la démarche d'identification des sources d'EA repose sur une hypothèse fondamentale : chaque signal d'EA enregistré possède des propriétés liées aux caractéristiques de la source l'ayant créé. Le signal mesuré est relié au mécanisme source en se basant sur la valeur des paramètres acoustiques calculés sur le signal. Pour ce faire, dans le contexte de l'étude de l'endommagement des matériaux, deux démarches sont adoptées en se basant sur trois méthodes de base : l'analyse spectrale, l'analyse multiparamétrique et l'exploration avancée des données.

— Le traitement des données du signal d'émission acoustique peut être effectué à l'aide

d'**une analyse spectrale** basée sur la transformation de Fourier (Figure 2.11). Le domaine fréquentiel peut être corrélé avec les mécanismes pouvant se produire au sein d'un contact.

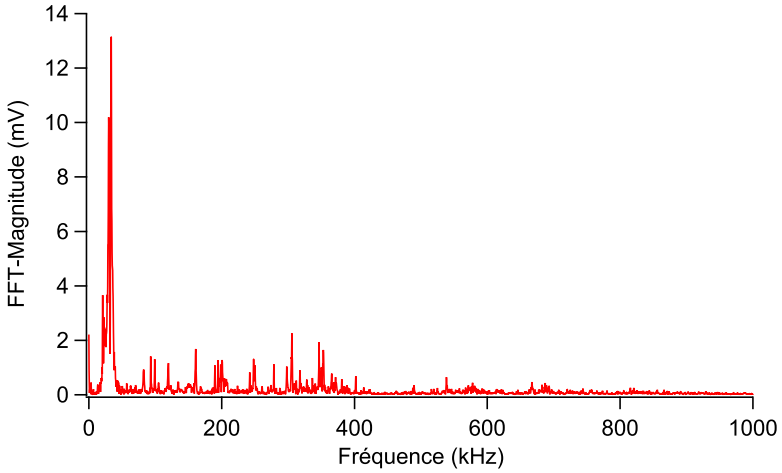


FIGURE 2.11 – Exemple de représentation spectrale en EA.

— **L'analyse multiparamétrique** est la méthode la plus couramment utilisée pour l'extraction et l'analyse des données des signaux d'EA. La première étape de cette approche est l'analyse temporelle qui se fait en traçant un des paramètres d'émission acoustique en fonction du temps : nombre cumulé d'évènements, fréquence, énergie, etc (Figure 2.12). La deuxième étape de l'analyse des données est l'analyse paramétrique. Le but est de trouver et de montrer une corrélation entre plusieurs paramètres différents. L'observation de ces corrélations et la comparaison avec les paramètres tribologiques (dans cette étude : force tangentielle et déplacement) permet d'identifier plusieurs phénomènes tribologiques.

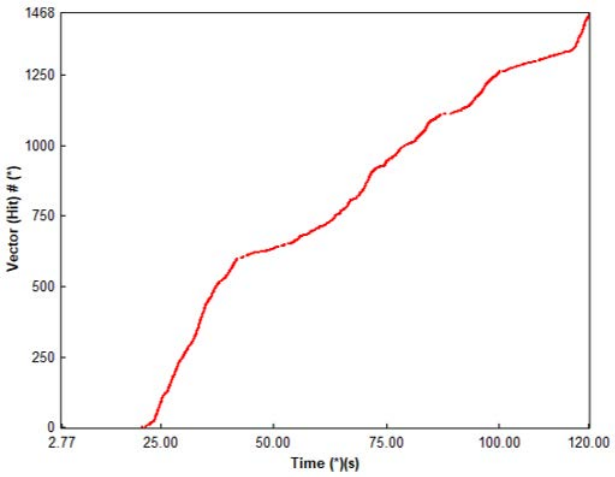


FIGURE 2.12 – Exemple de représentation temporelle en EA : nombre de salves en fonction du temps.

Dans la technique d'EA, ainsi que dans plusieurs autres domaines, **un diagramme de corrélation** peut être utilisé afin d'obtenir des informations sur l'activité acoustique et sur les phénomènes générés. La figure 2.13 représente un diagramme de corrélation de l'amplitude acoustique en fonction du nombre de coups. L'idée de cette approche est que tout signal correspondant à une perturbation électromagnétique ou mécanique externe à l'essai entrera dans les zones 1 et 2 du diagramme de corrélation. Une autre possibilité consiste à tracer l'énergie absolue en fonction de la durée.

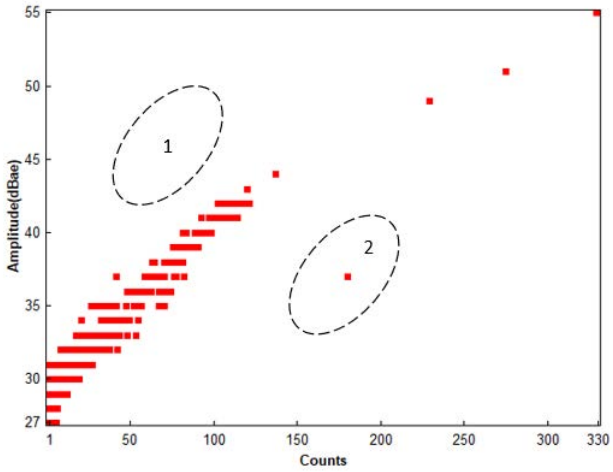


FIGURE 2.13 – Exemple de diagramme de corrélation représentant l'amplitude en fonction du nombre des coups.

— Enfin, **l'analyse avancée** concerne l'identification et la classification des phénomènes physiques à l'origine de l'EA. Cette analyse utilise plusieurs techniques statistiques : analyse en composantes principales (en anglais Pattern Recognition Analysis, PRA), clustering, etc. L'analyse de composantes principales est une technique qui détermine des classes de signaux similaires. C'est un processus numérique donnant la possibilité de regrouper un ensemble de données en un nombre de sous-groupes appelés classes. Le vecteur qui décrit chaque signal doit être composé d'éléments permettant de faire une discrimination entre les différentes sources acoustiques. Chaque vecteur est représenté dans un espace multidimensionnel faisant apparaître autant de dimensions que le nombre de paramètres considérés. Chaque paramètre est initialement considéré comme une variable indépendante. Les deux descripteurs de corrélation sont fusionnés en un seul et un nouveau cluster est formé, suivi de la mise à jour de la matrice de corrélation. Le processus de fusion continue jusqu'à ce que touts les descripteurs soient placés dans le même groupe. Les résultats sont présentés sous forme de dendrogrammes (Arbre hiérarchique), montrant la séquence de fusion à chaque niveau de corrélation (Figure 2.14). L'analyse en composantes principales est appliquée sur les paramètres acoustiques sélectionnés. Comme les caractéristiques ne sont pas mesurés dans la même gamme ou avec les mêmes unités, ils doivent être normalisés dans une plage de -1 à 1 afin d'avoir le même poids et afin d'éviter que certains d'entre eux dominent le processus de classification. Les données d'origine sont projetées sur un ensemble d'axes orthogonaux (PCA,

Principal Component Axis) où la variance maximale des données est atteinte.

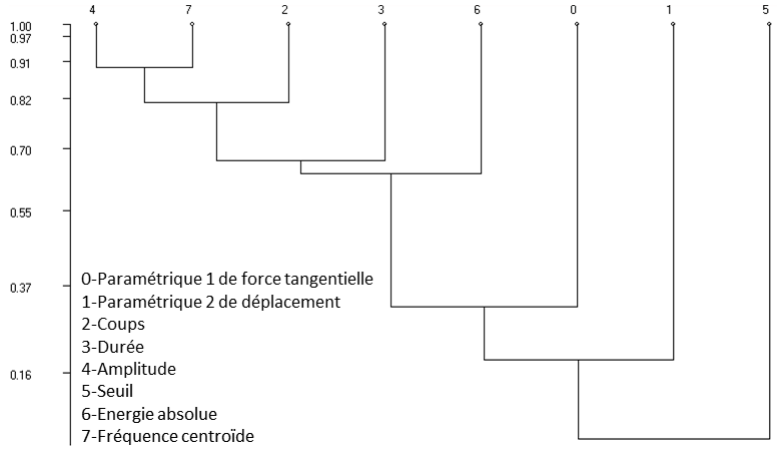


FIGURE 2.14 – Exemple de dendrogramme déterminé par la méthode d'analyse en composantes principales.

Dans la littérature, de nombreux travaux se sont intéressés à l'utilisation des classificateurs par les données d'EA dans le but d'identifier la signature acoustique des mécanismes sources se produisant lors de l'endommagement des matériaux soumis à des sollicitations mécaniques. Les techniques de classification reposent sur des méthodes de classification supervisée et non-supervisée par la segmentation des salves d'EA. Parmi ces méthodes, la méthode des k-moyennes est généralement utilisée. Elle permet d'étiqueter les modes d'endommagement bien spécifiques en se basant sur une connaissance préalable du comportement temporel des signaux. Une approche de classification manuelle pourrait être aussi utilisée directement sur les données pour isoler les signaux provenant visuellement de la même classe. Les deux approchent donnent des résultats assez semblables (Figure 2.15).

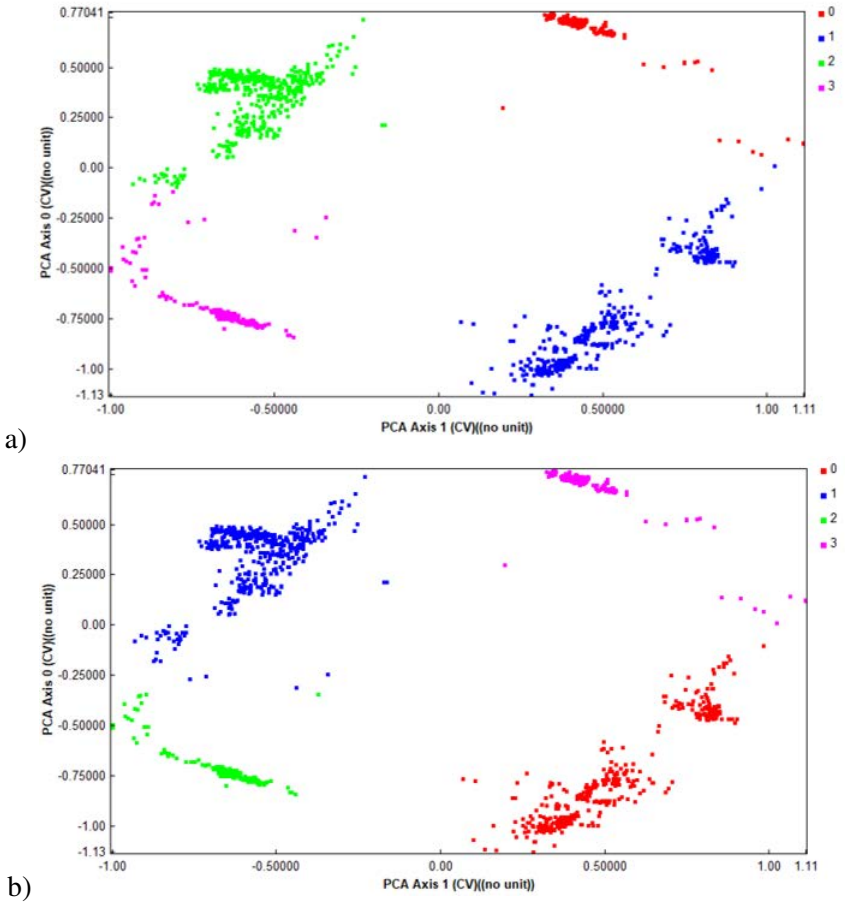


FIGURE 2.15 – Comparaison des méthodes de classification et d'identification des clusters : a) méthode de k-moyennes, b) méthode manuelle.

Ces techniques de classification sont beaucoup plus utilisées pour l'analyse des matériaux composites. Par exemple, Li *et al*. [Li *et al.*, 2016] ont appliqué une analyse de cluster basée sur l'algorithme de k-moyennes pour analyser les signaux acoustiques reçus lors d'essais de traction sur des composites de fibre de carbone/époxy. Ils ont montré que la fréquence et l'amplitude acoustiques étaient les deux paramètres dominants pour l'analyse de cluster et que différents clusters correspondent à différents modes d'endommagement de ces composites. Une méthode similaire a été mise en œuvre par Zhao *et al*. [Zhao & Zhou, 2019] qui ont appliqué un algorithme de classification à l'analyse des signaux acoustiques générés lors d'un processus de traction de composite de fibres de carbone/verre. Ils ont conclu qu'il existe trois groupes qui sont corrélés à trois mécanismes d'endommagement différents : la fissuration de la matrice, le décollement fibre/matrice et la rupture des fibres. Ativitavas *et al. [Ativitavas* et al*., 2004]* ont étudié l'endommagement des composites Verre/Époxy lors d'essais de traction. Les signaux acoustiques collectés par analyse d'amplitude et d'énergie correspondent aux quatre types d'endommagement présentés pendant la période d'essai expérimental. La rupture de la matrice est d'abord produite pendant le test, suivie d'un délaminage fibre/matrice, et enfin d'un délaminage interfacial et d'une rupture de fibre. Farhidzadeh *et al.* [Farhidzadeh *et al.*, 2014] ont utilisé la méthode de classification pour la discrimination des deux modes de fissuration (en traction et

en cisaillement) sur des matériaux béton.

La méthode de classification des signaux acoustiques a fait ainsi ses preuves pour l'identification des mécanismes d'endommagement pour plusieurs types de matériaux. Cependant, cette méthode reste très limitée dans le domaine de la tribologie. Pour cela, il est intéressant de focaliser une partie des travaux de cette thèse sur l'utilisation des méthodes de classification durant les essais de frottement pour un couple de matériaux acier/verre.

2.3 Système de vision

Pour interpréter les mesures des efforts normal et tangentiel appliqués sur un contact, la visualisation optique directe de l'interface est un outil de choix, qui a fait ses preuves dans la littérature. La partie optique du montage utilisé dans ces travaux est composé généralement d'une caméra rapide de type JAI GO-5100C-USB (Figure 2.16a) placée du côté de l'échantillon plan et passée au travers le bloc massif du tribomètre. Une cadence d'acquisition maximale de 74 Hz est obtenue à la résolution maximale de la caméra de 1000 pixels × 1056 pixels avec une fréquence d'images de 500 fps (images par seconde).
Pour permettre la visualisation *in situ* du contact sphère plan, l'interface transparente (verre) est éclairée par le bas et guidée avec une fibre optique (Figure 2.16b) fixée sur le système optique. S'il y a contact entre l'échantillon de verre et l'échantillon en acier, la lumière est transmise au niveau de l'interface : elle traverse entièrement l'échantillon, jusqu'à atteindre un fond destiné à absorber les rayons lumineux. Notons que cette visualisation ne perturbe en rien l'état mécanique de l'interface, ce qui nous permettra, par analyse d'image, de réaliser des mesures après essai. Un zoom modulaire (grossissement × 12) qui peut être configuré pour s'adapter à la zone de contact est aussi fixé sur la caméra rapide. Des tubes adaptateurs sont également ajoutés à la caméra aux grossissements ×1 et ×2 (Figure 2.16c).

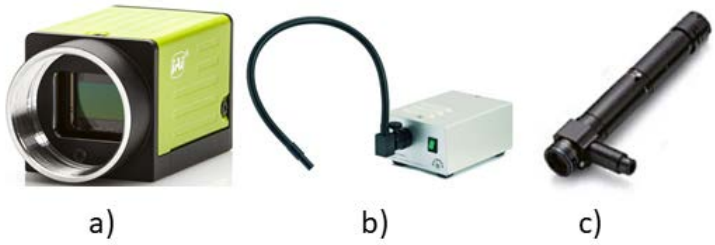


FIGURE 2.16 – Vues générales (a) de la caméra rapide, (b) de la fibre optique et (c) de l'ensemble de tubes et lentilles.

Le pilotage de la caméra se fait via un logiciel PF eBus Player 2.50 de la société Pleora Technologies Inc.. Le logiciel permet de régler directement la fréquence d'acquisition, le temps d'exposition, le gain et l'offset de la caméra. La caméra attend le signal externe de déclenchement de l'acquisition d'image. Les images enregistrées au format BMP sont par la suite traitées et transformées en vidéo à l'aide du logiciel ImageJ.

2.4 Matériaux utilisés

Les matériaux candidats ont été choisis en prenant en compte le principal critère qui est la transparence afin d'accéder à la zone de contact via la caméra rapide. Parmi les candidats transparents, on peut citer : le verre sodocalcique, le saphir, le plexiglas et le polycarbonate. Durant toute cette étude, le choix du matériau plan est basé sur le verre sodocalcique afin de favoriser certains mécanismes d'accommodation.
Le verre sodocalcique est un matériau dur, fragile et très sensible aux défauts de surface. C'est un matériau transparent à la lumière dans le visible et il possède une bonne durabilité chimique. La composition chimique du verre sodocalcique est donnée dans le tableau 2.2 et ses principales propriétés sont listées dans le tableau 2.3

SiO_2	Na_2O	CaO	MgO	Al_2O_3
71 %	14%	10%	4%	1%

TABLE 2.2 – Composition chimique du verre sodocalcique.

H (GPa)	E (GPa)	ν	ρ (g.cm^{-3})	K_{IC} (MPa$^{1/2}$)
6	72	0,21	2,55	0,75

TABLE 2.3 – Propriétés mécaniques et physiques du verre sodocalcique.

Soumis à un effort de traction, le matériau suit une déformation réversible proportionnelle à la contrainte appliquée. Cette déformation réversible peut aller jusqu'à une valeur de contrainte qui représente la valeur limite de la déformation élastique réversible. Dans le cas des verres, la phase de plasticité n'existe pas et le matériau passe d'une déformation réversible à la rupture autrement dit, la résistance élastique est égale à la résistance à la rupture. Par ailleurs, la mise en contact d'une bille antagoniste rigide et en glissement avec la surface du verre engendre la formation de fissures en bordure du contact connues sous le nom de fissures de Hertz. Cette mécanique s'intéresse à l'étude des fissures macroscopiques.

Le frotteur est une bille en acier 100Cr6 de 6 mm de diamètre correspondant aux caractéristiques d'un acier martensitique généralement utilisé pour les roulements. La composition chimique est donnée dans le tableau 2.4 et ses caractéristiques mécaniques sont résumées dans le tableau 2.5.

	C	Si	Mn	P	Cr
Min	0,95	0,15	0,25	-	1,35
Max	1,05	0,35	0,45	0,025	1,65

TABLE 2.4 – Composition chimique du 100Cr6.

H (Hv)	E (GPa)	ν	Ra (nm)	ρ (g.cm^{-3})
850	210	0,27	32	7,85

TABLE 2.5 – Propriétés mécaniques et physiques du 100Cr6.

Avant chaque essai, les échantillons sont préparés et nettoyés. Le nettoyage se fait à l'aide d'un détergent industriel pendant 15 min. Les échantillons sont par la suite rincés à l'eau déminéralisée, et enfin nettoyés aux ultrasons pendant 10 min à l'éthanol avant séchage en étuve à 60 °C pendant 15 min.

Les conditions d'essai pour cette étude sont résumées dans le tableau 2.6. L'amplitude de déplacement, la fréquence d'excitation, la charge normale et la durée d'essai sont des paramètres variables. Les essais sont réalisés dans des conditions de fretting. L'objectif des essais à paramètres variables est de pouvoir déterminer l'activation des mécanismes développés à l'intérieur du contact et ainsi de définir la vie du contact étape par étape. Les essais sont réalisés à sec et à température ambiante.

δ (µm)	± 50
f (Hz)	10, 15 et 20
F_N (N)	5, 10 et 15
durée (s)	30, 60, 80, 100, 120 et 180

TABLE 2.6 – Conditions des essais.

L'ensemble des traces d'usure sur la bille et sur le plan est d'abord observé systématiquement en microscopie optique sans nettoyage à l'issue de chaque essai. Le microscope optique numérique utilisé est de type Keyence VHX-6000 à haute résolution en grande profondeur de champ.

Les surfaces des échantillons sont observées après essai au Microscope Electronique à Balayage Zeiss (MEB) afin de déterminer et caractériser l'évolution du troisième corps ainsi que d'identifier les mécanismes d'accommodation activés. En ce qui concerne les échantillons en verre, les surfaces étant non conductrices, l'observation est réalisée en mode vide dégradé sous une pression contrôlée. Ces observations sont couplées à des analyses EDS (spectroscopie à dispersion d'énergie) pour identifier la nature des particules observées.

2.5 Synthèse partielle

Ce chapitre a permis de présenter le dispositif expérimental développé au sein du LGP permettant d'étudier les sollicitations en glissement alternatif ainsi qu'en fretting. Ce banc d'essai possède à la base une instrumentation très intéressante (deux capteurs de force et un capteur de déplacement sans contact). Il a été par la suite, optimisé pour pouvoir insérer des instrumentations supplémentaires telle que l'émission acoustique (EA) et réaliser des essais pour des contacts de type semi-transparents. Les modifications du dispositif ont été validées en détermi-

nant ses limites opératoires et en analysant la stabilité de ses conditions de fonctionnement à travers l'étude de sa rigidité.
Le traitement des données d'EA par analyse conventionnelle, basée sur l'étude des paramètres classiques extraits d'un signal acoustique, sont soit des analyses temporelles, soit des analyses de corrélation entre les paramètres, soit par l'attribution des classes de signaux. Toutefois, l'utilisation d'un ou deux paramètres d'EA pour suivre la cinétique d'endommagement est simple mais bien souvent insuffisante pour la discrimination de certains mécanismes. Face à cette problématique, la réponse de ce travail de thèse consiste à utiliser une combinaison de méthode *in situ* en plus de l'EA. Pour cela, l'utilisation d'un suivi en temps réel par caméra rapide des mécanismes d'endommagement est présenté.
Dans le chapitre suivant vont maintenant être présentés les différents résultats obtenus après essais tribologiques et acoustiques.

Chapitre 3

Investigation des mécanismes d'endommagement et d'usure pour un contact acier/verre

---

Ce chapitre expose l'ensemble des résultats expérimentaux qui englobent l'évolution du coefficient de frottement et les phénomènes observés dans un contact semi-transparent permettant d'étudier les mécanismes d'endommagement et d'usure activés. De plus, les résultats de l'émission acoustique et ceux issus de l'observation en direct du contact frottant permettent de définir un scénario des phénomènes activés dans un contact de type acier/verre. Des essais et des analyses complémentaires ont été réalisés dans le but de valider ce scénario mais également pour caractériser les phénomènes activés. Afin de mener à bien cette étude, le comportement tribologique du contact, est tout d'abord présenté en s'appuyant sur les données relatives à la globalité du contact. Ensuite, l'étude du contact est réalisée à travers les différentes observations présentées en seconde partie.

3.1 Comportement tribologique du contact acier/verre

3.1.1 Conditions expérimentales

Tous les essais de ce chapitre ont été menés selon les mêmes conditions opératoires (Tableau 3.1) et constituent des conditions de référence pour ce travail. Le choix de ces conditions a principalement été fixé par des considérations de capacité du tribomètre et de l'évolution des dégradations dans le contact. Ainsi, il s'est avéré qu'à partir de 120 s, l'observation en direct de la zone du contact n'était plus possible suite à l'accroissement et à l'élargissement d'une couche interfaciale entre les deux premiers corps. Pour cela, la durée a été réduite à 120 s qui est une durée suffisante pour que la majorité des phénomènes tribologiques se stabilisent.

échantillon supérieur (Site S_2)	bille	100Cr6
échantillon inférieur (Site S_1)	plan	verre sodocalcique
déplacement imposé	δ (µm)	100 (± 50)
fréquence d'excitation	f (Hz)	10
charge normale	F_N (N)	5
durée	Temps (s)	120

TABLE 3.1 – Conditions d'essai permettant d'étudier le comportement tribologique du contact acier/verre.

La figure 3.1 montre le contact initial entre la bille en acier et le plan en verre sodocalcique. Le centre circulaire gris représente la zone du contact hertzien. Les anneaux colorés dus à la différence de marche et qui sont autour de cette zone sont des franges d'interférence appelées aussi anneaux de Newton. Ils sont obtenus par la divergence de la bille en acier par rapport à la surface du verre.



FIGURE 3.1 – Image du contact initial de la bille en acier contre un plan en verre sodocalcique obtenue par caméra rapide sous une charge normale de 5 N.

Suivant la théorie de Hertz (en Annexe) et pour une charge appliquée de 5 N et une bille de rayon égal à 3 mm, le rayon de contact calculé est de 58 µm. La taille du contact correspond parfaitement aux mesures obtenues expérimentalement par caméra. La distribution de la pression de Hertz est calculée selon l'équation 3.1 :

$$P(r) = P_0\sqrt{1-\frac{r^2}{a^2}} \tag{3.1}$$

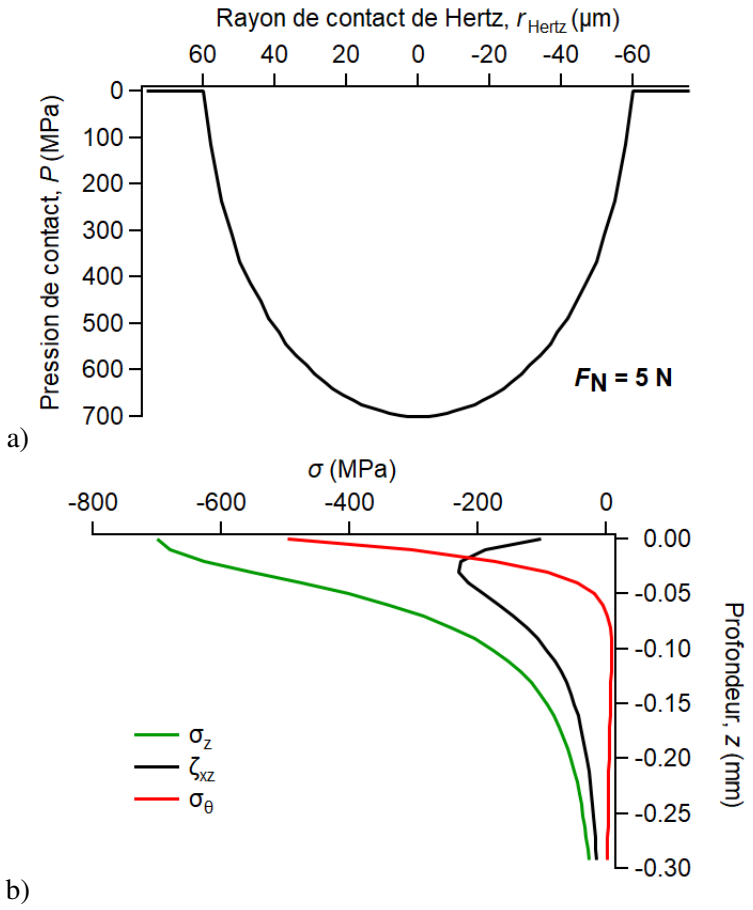


FIGURE 3.2 – Contact de Hertz : a) répartition de la pression dans le contact en fonction du rayon de Hertz et b) répartition des contraintes en fonction de la profondeur en contact statique.

avec P_0 la pression maximale et a le rayon de contact. La figure 3.2a présente la distribution de la pression en fonction du rayon de contact avec une pression maximale atteinte au centre du contact de l'ordre de 700 MPa. La figure 3.2b présente la distribution des contraintes en fonction de la profondeur.

La figure 3.3 représente respectivement une vue globale de l'évolution des signaux temporels de la force tangentielle et du déplacement pour un essai réalisé dans les conditions de référence. Une observation précise des signaux est aussi présentée à différents instants de l'essai (Figure 3.4).

D'après ces résultats, on constate que la force tangentielle maximale générée oscille autour de $F_T = \pm 5$ N. Le signal de la force tangentielle forme des crêtes trapézoïdes tout au long de l'essai. Quant au signal enregistré en déplacement, il forme une sinusoïde assez bien définie sur toute la durée de l'essai. De plus, la valeur consigne du déplacement imposé est atteinte sans aucune perturbation et reste constante durant l'essai.

3.1.2 Évolution du coefficient de frottement

La figure 3.5 présente l'allure de l'évolution du coefficient de frottement $|\mu|$ en fonction du temps (courbe noire). Dans le but de faciliter la lecture de cette courbe une moyenne mobile $<\mu>$

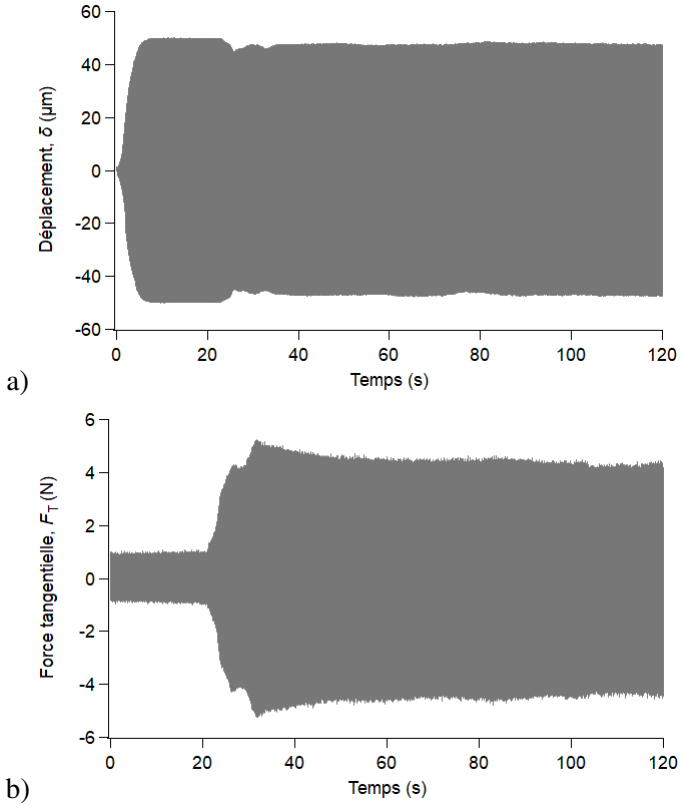


FIGURE 3.3 – Évolution globale de la forme des signaux du déplacement et de la force tangentielle pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm$ 50 µm, f = 10 Hz, F_N = 5 N).

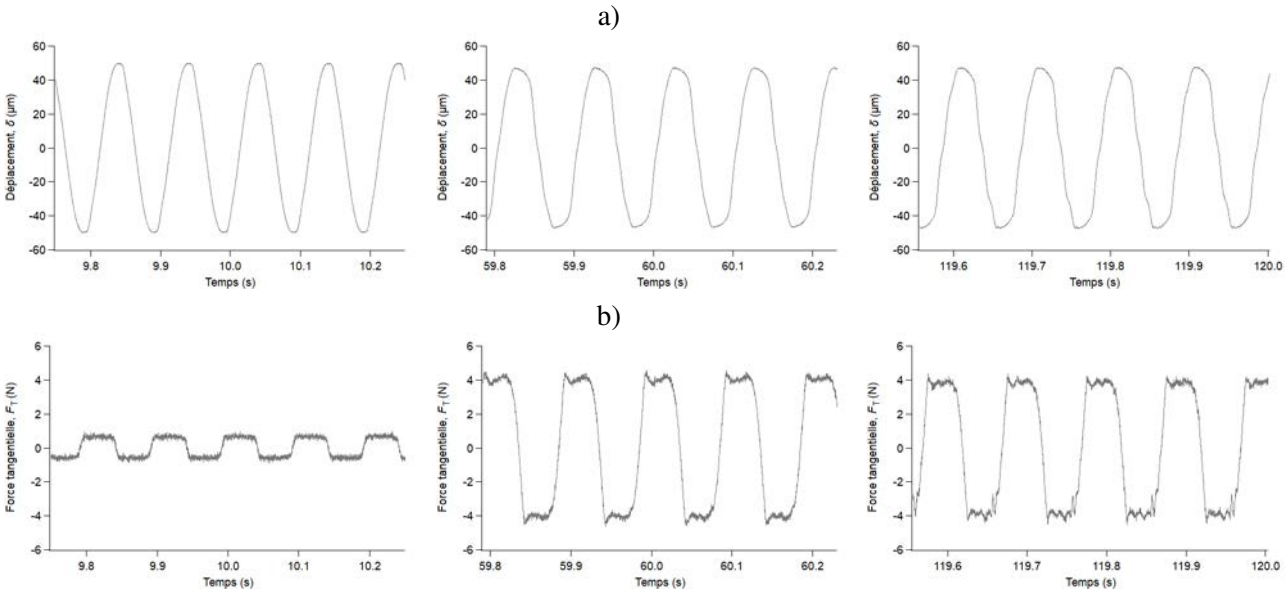


FIGURE 3.4 – Évolution de la forme des signaux du déplacement et de la force tangentielle pour le contact acier/verre sodocalcique à des différents instants de l'essai ($\delta = \pm$ 50 µm, f = 10 Hz, F_N = 5 N).

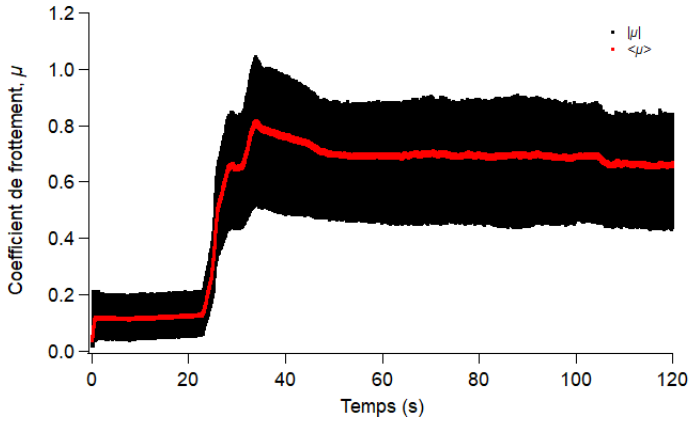


FIGURE 3.5 – Évolution du coefficient de frottement pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm$ 50 µm, f = 10 Hz, F_N = 5 N).

a été calculée (courbe rouge). Cette courbe peut être partagée en trois phases suivant l'évolution du coefficient de frottement.

— Une première phase, correspondant à un régime de frottement bas d'une durée de 20 s, pendant laquelle le coefficient de frottement est très faible (environ 0,12).
— Une deuxième phase, entre 20 s et 48 s correspondant à un régime transitoire, où le coefficient de frottement augmente rapidement jusqu'à atteindre une valeur maximale d'environ 0,8. Cette partie se prolonge par une faible décroissance du coefficient de frottement.
— Une troisième phase correspond à un coefficient de frottement stable aux alentours de 0,68 jusqu'à la fin de l'essai. Cette dernière partie correspond à l'installation d'un régime permanent.

3.1.3 Reproductibilité

Après avoir réalisé un essai de 120 s et compte-tenu de l'évolution du coefficient de frottement, un essai de 80 s a été réalisé, durée pendant laquelle toutes les variations du coefficient de frottement semblent se produire. Sur la figure 3.6, il est constaté que la première phase de l'essai réalisé à 80 s (courbe rouge) est équivalente à celle observée pour l'essai réalisé à 120 s (courbe noire). Le coefficient de frottement est égal à 0,12. Cependant, la durée de la première partie de la courbe rouge est plus courte que celle de la courbe noire (environ 6 s de différence). En ce qui concerne la deuxième phase, il y a une similitude pour la durée des deux essais (environ 22 s). Cependant, la valeur maximale atteinte pour le coefficient de frottement est différente. En effet, la courbe noire atteint un premier pic de l'ordre de 0,65 ensuite un pic maximal à environ 0,8. Or la seconde courbe représentée atteint un premier pic d'environ 0,89 suivi d'un pic maximal d'une valeur plus élevée (environ 0,91). Pour ce qui est de la troisième phase, elle commence à 48 s pour la courbe noire et à 38 s pour la courbe rouge. Cette partie met en évidence la superposition des deux courbes où le coefficient de frottement enregistre une stabilisation à environ 0,7 ± 0,02.

Une analyse plus systématique de la reproductibilité a été conduite sur quatre autres essais menés dans ces mêmes conditions opératoires. Différentes courbes du coefficient de frottement

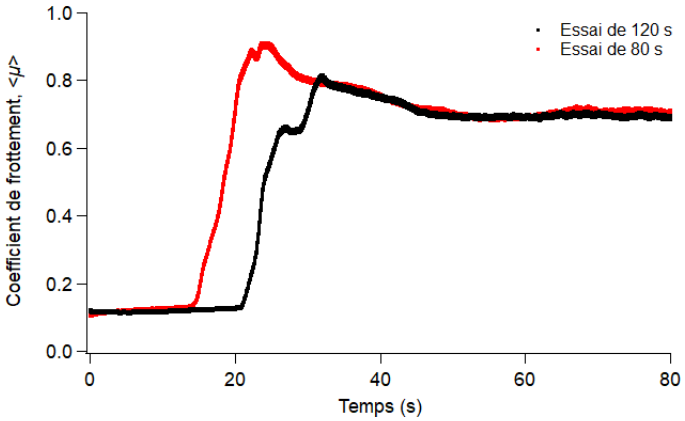


FIGURE 3.6 – Évolution du coefficient de frottement en fonction du temps des deux essais pour une durée de 80 s.

sont représentées ci-dessous (Figure 3.7). Ces courbes ont des allures générales similaires. Les quatre différents essais présentés montrent une bonne reproductibilité en termes de coefficient de frottement, ce qui laisse supposer que les phénomènes se produisant dans le contact sont identiques. Seuls, leurs temps de mise en place diffèrent légèrement.

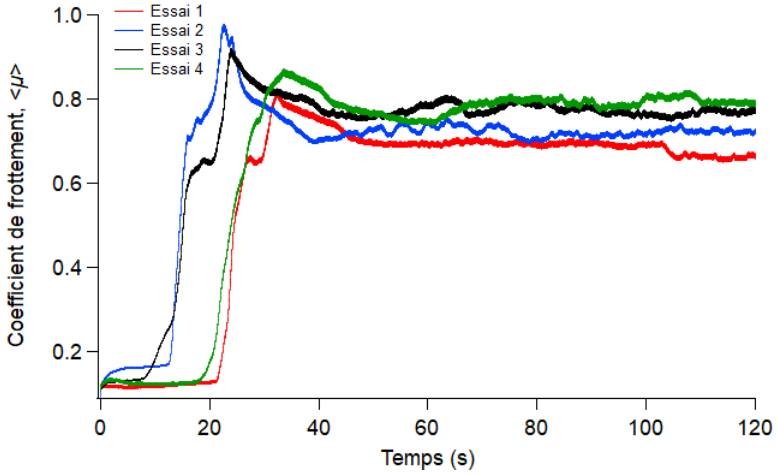


FIGURE 3.7 – Évolution des différents coefficients de frottement pour des essais de reproductibilité.

Ces courbes peuvent ainsi être partagées en trois grandes phases suivant l'évolution de ce coefficient de frottement (Figure 3.8) dont la deuxième phase est divisée en deux parties suivant la croissance et la décroissance du coefficient de frottement. Pour cela, une courbe exemple, présentée dans la figure 3.8, montre les différentes phases avec les différents paramètres calculés. Ces paramètres sont définis comme :

— μ_1 : coefficient de frottement moyen de la phase I
— μ_2 : coefficient de frottement maximal durant la phase II
— μ_3 : coefficient de frottement moyen de la phase III
— τ_1 : durée de la phase I
— τ_2 : durée ascendante de la phase II
— t_2 : temps correspondant à l'établissement de μ_2

— τ'_2 : durée décroissante de la phase II
— τ_3 : durée de la phase III
— P_2 : pente ascendante de la phase II
— P'_2 : pente décroissante de la phase II

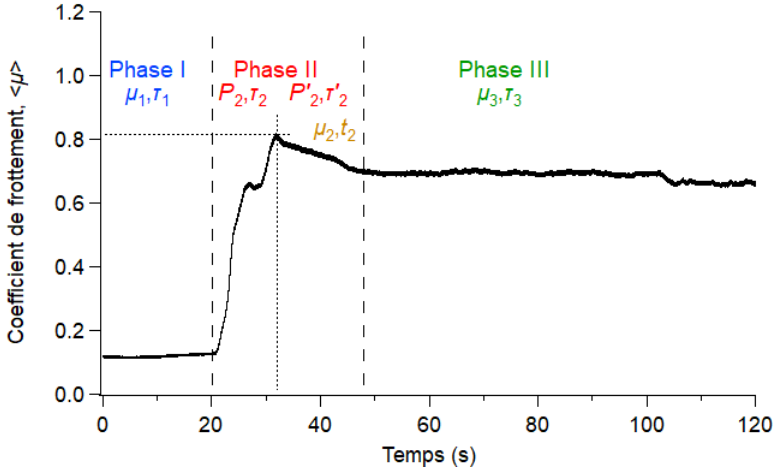


FIGURE 3.8 – Paramètres extraits de la courbe de coefficient de frottement en fonction du temps.

Les valeurs, mesurées à partir de la figure 3.7 et associées à leur incertitude (écart-types), sont regroupées dans les tableaux 3.2, 3.3 et 3.4. Les incertitudes relatives sur les durées des phases passent de 30 % dans la phase I, à 20 % dans la phase II et 10 % dans la phase III. En revanche, l'incertitude relative sur les coefficients de frottement reste stable entre 6 % et 8 % sur toute la durée d'un essai. Enfin, l'incertitude relative sur les pentes des coefficients de frottement passent de 16 % dans la pente ascendante à 50 % dans la pente décroissante de la phase II.

δ (µm)	f (Hz)	F_N (N)	τ_1(s)	τ_2(s)	τ'_2(s)	τ_3(s)
± 50	10	5	16 ± 5	13 ± 3	20 ± 4	73 ± 7

TABLE 3.2 – Durées des phases issues de l'évolution du coefficient de frottement en fonction du temps dans les conditions de référence.

δ (µm)	f (Hz)	F_N (N)	μ_1	μ_2	μ_3
± 50	10	5	0,13 ± 0,01	0,88 ± 0,05	0,75 ± 0,04

TABLE 3.3 – Coefficients de frottement associés aux différentes phases dans les conditions de référence.

δ (µm)	f (Hz)	F_N (N)	P_2 (s^{-1})	t_2	P'_2 (s^{-1})
± 50	10	5	0,06 ± 0,01	28,03 ± 5,5	-0,02 ± 0,01

TABLE 3.4 – Pentes des coefficients de frottement et temps du frottement maximal associés à la phase II dans les conditions de référence.

3.1.4 Étude de l'énergie dissipée cumulée

Dans un contact frottant, l'énergie dissipée peut être calculée à partir de l'évolution du coefficient de frottement à l'aide de l'équation suivante :

$$E_d = \int \delta F_T f dt \tag{3.2}$$

avec δ le déplacement, F_T la force tangentielle et f la fréquence d'excitation.

L'intérêt de l'étude de cette énergie dissipée permet d'exploiter la courbe de coefficient de frottement d'une autre façon. Cela permet de caractériser l'évolution des interfaces et l'activation des phénomènes tribologiques en considérant l'énergie dissipée comme une conséquence des processus d'accommodation des systèmes tribologiques.

La figure 3.9 présente l'évolution de l'énergie dissipée cumulée dans le contact acier/verre pour un essai d'une durée de 120 s réalisé à une fréquence d'excitation de 10 Hz et à une charge normale de 5 N. D'après cette courbe, il est constaté que cette énergie dissipée augmente pendant toute la durée de l'essai. Cependant, elle est subdivisée en trois phases :

— Une première phase où l'énergie dissipée est très faible pendant une durée de 20 s. Elle est de l'ordre de 10 J. La puissance dissipée dans le contact, correspondant à la pente de l'évolution de l'énergie, est de l'ordre de 0,5 W.

— Une deuxième phase où l'énergie progresse exponentiellement pendant 28 s d'essai. L'énergie consommée pendant la durée de cette phase est de l'ordre de 230 J. La puissance dissipée dans cette phase est de l'ordre de 8,2 W. Cette énergie qui dépend de la durée de la phase et cette puissance sont très importantes par rapport à celles calculées pendant la première phase. Ceci montre l'ampleur des phénomènes dissipatifs se produisant dans cette phase intermédiaire.

— Une troisième phase plus longue où l'énergie augmente linéairement jusqu'à la fin de l'essai soit pendant 72 s. L'énergie dissipée est trois fois supérieure à celle calculée pendant la deuxième phase. Cette valeur est de l'ordre de 634 J. Cependant, la puissance dissipée dans le contact est de l'ordre de 8,8 W. Cette valeur légèrement supérieure à celle de la deuxième phase montre que les phénomènes dissipatifs pouvant se produire dans cette phase sont du même ordre de grandeur.

Cette énergie est principalement dissipée sous forme de chaleur. Une part de cette énergie est normalement dissipée à travers les mécanismes d'accommodation dans le contact acier/verre sodocalcique.

3.2 Étude des mécanismes d'endommagement et d'usure activés

À partir des courbes de frottement et d'évolution des signaux temporels de la force tangentielle et du déplacement, le comportement tribologique du contact acier/verre sodocalcique a pu être étudié. Afin de mieux expliquer et comprendre cette évolution, des observations en temps réel de la zone de contact ont été effectuées par caméra rapide. Enfin, après chaque essai, tous les échantillons du verre sodocalcique et de l'acier 100Cr6 ont été observés systématiquement au

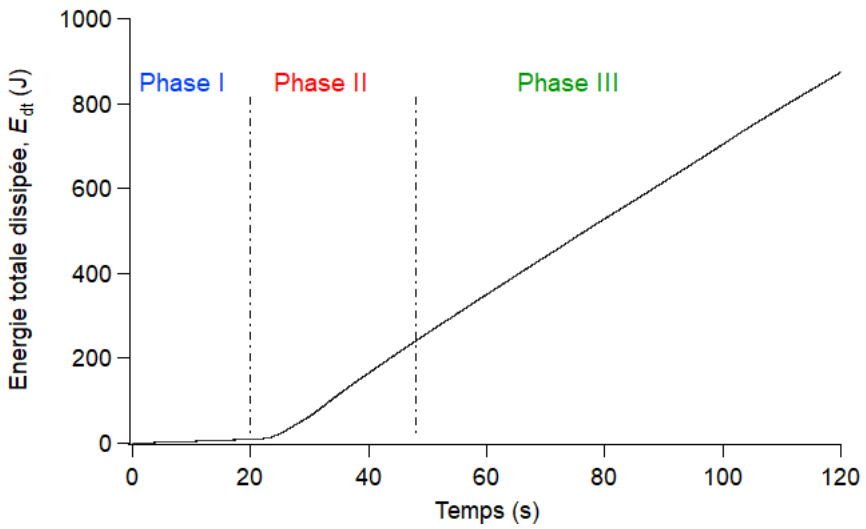


FIGURE 3.9 – Évolution de l'énergie dissipée totale en fonction du temps pendant un essai de 120 s pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm$ 50 µm, f = 10 Hz, F_N = 5 N).

microscope optique. Dans un premier temps, l'analyse sera d'abord focalisée sur l'échantillon en verre, puis sur l'antagoniste c'est-à dire la bille en acier. Dans un second temps, l'étude portera sur les corrélations entre évènements observés simultanément en caméra rapide et signaux acoustiques.

3.2.1 Analyse des traces d'usure

Les surfaces usées des échantillons du verre sodocalcique et de l'acier 100Cr6 ont été systématiquement observées au microscope optique sans nettoyage après l'essai (Figure 3.10). La trace d'usure sur le verre présente une forme elliptique dont le plus petit axe correspond au diamètre de la trace d'usure observée sur la bille (environ 178 ± 1 µm) et le plus grand axe est orienté dans le sens de déplacement. Le grand axe dépend essentiellement de l'amplitude de déplacement. Dans cet essai, une aire de recouvrement permanente du contact est repérée jusqu'à la fin de la sollicitation. L'ensemble des mesures des largeurs des traces d'usure sur la bille et le plan ainsi que le volume d'usure de la bille sont présentés dans le tableau 3.5. Ces mesures montrent que l'amplitude de déplacement reste strictement inférieure au diamètre du cercle de contact sur toute la durée de l'essai, indiquant que la condition de fretting est établie. Le tableau 3.5 comporte aussi une estimation du volume d'usure du verre. Les détails de calcul seront présentés dans le paragraphe 3.3.3. Il résulte de ces calculs que le volume d'usure de la bille est équivalente à celle du verre.

Diamètre de la trace d'usure sur la bille	176,7 ± 6 µm
Largeur longitudinale (horizontale) de la trace d'usure sur le plan	221,5 ± 2 µm
Largeur transversale (verticale) de la trace d'usure sur le plan	178 ± 1 µm

TABLE 3.5 – Résultats des largeurs des traces d'usure de la bille et du plan (δ = ± 50 µm, f = 10 Hz, F_N = 5 N, t = 120 s).

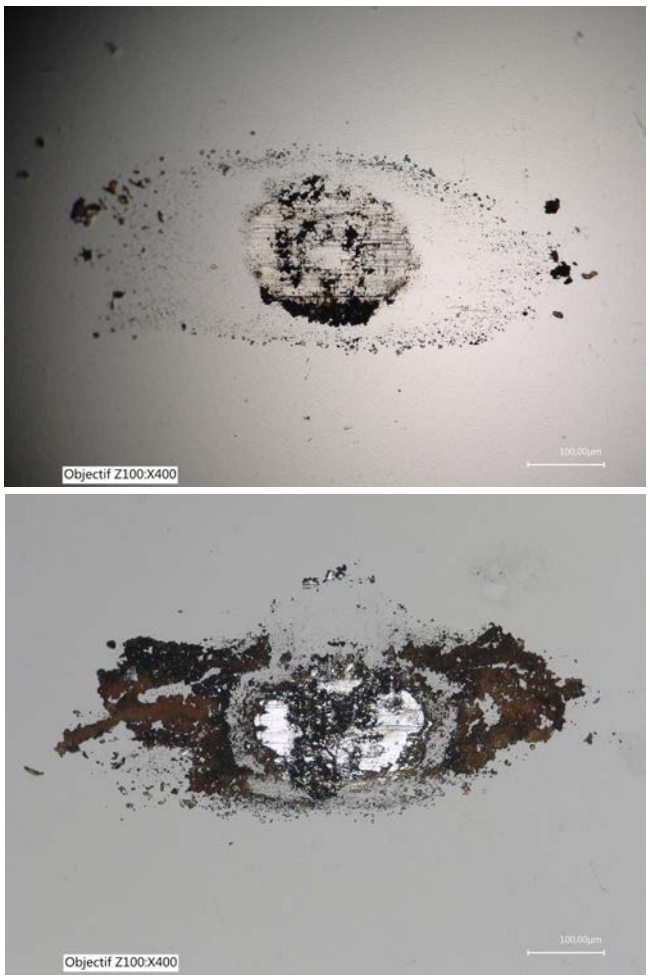


FIGURE 3.10 – Observation au microscope optique de a) bille en acier 100Cr6 et b) verre sodocalcique après 120 s d'essai (δ = ± 50 µm, f = 10 Hz, F_N = 5 N).

Selon l'approche du troisième corps, les zones centrales correspondent à l'interface générant des débris associés au débit source et au débit interne. Les débris sont préférentiellement agglomérés sur l'échantillon plan et éjectés à l'extrémité de la zone de contact expliquant l'allongement de la trace d'usure dans le sens de glissement. Ces débris représentent alors le débit d'usure. La figure 3.10a montre que la trace d'usure sur la bille est entourée par des débris de matière formant une ellipse dont la largeur et la longueur correspondent à la trace d'usure observée sur le verre. En réalité et sous l'effet de l'existence d'un gradient de pression dans le sens de glissement, ceci correspond au remplissage du convergent (zone d'entrée) suite à la formation de la couche interfaciale entre les deux premiers corps.

La figure 3.11 montre une observation typique, par microscopie électronique à balayage,

d'un troisième corps formé lors de l'essai après séparation des deux échantillons. Il est constaté que les débris de matière sont compactés et adhérents à la surface de l'échantillon verre pour former une couche interfaciale cohésive.

Lorsque le contact est ouvert et que la bille est retirée, la rupture de la couche interfaciale se produit inévitablement sous l'effet de la contrainte de traction inhérente à la séparation du contact (Figure 3.11a). À l'extrémité de la trace d'usure (Figure 3.11b), les débris éjectés se présentent sous forme de fines particules de diamètre moyen d'environ 1 ± 0,5 µm et aussi de particules plus grandes de diamètre moyen d'environ 8,5 ± 0,5 µm.

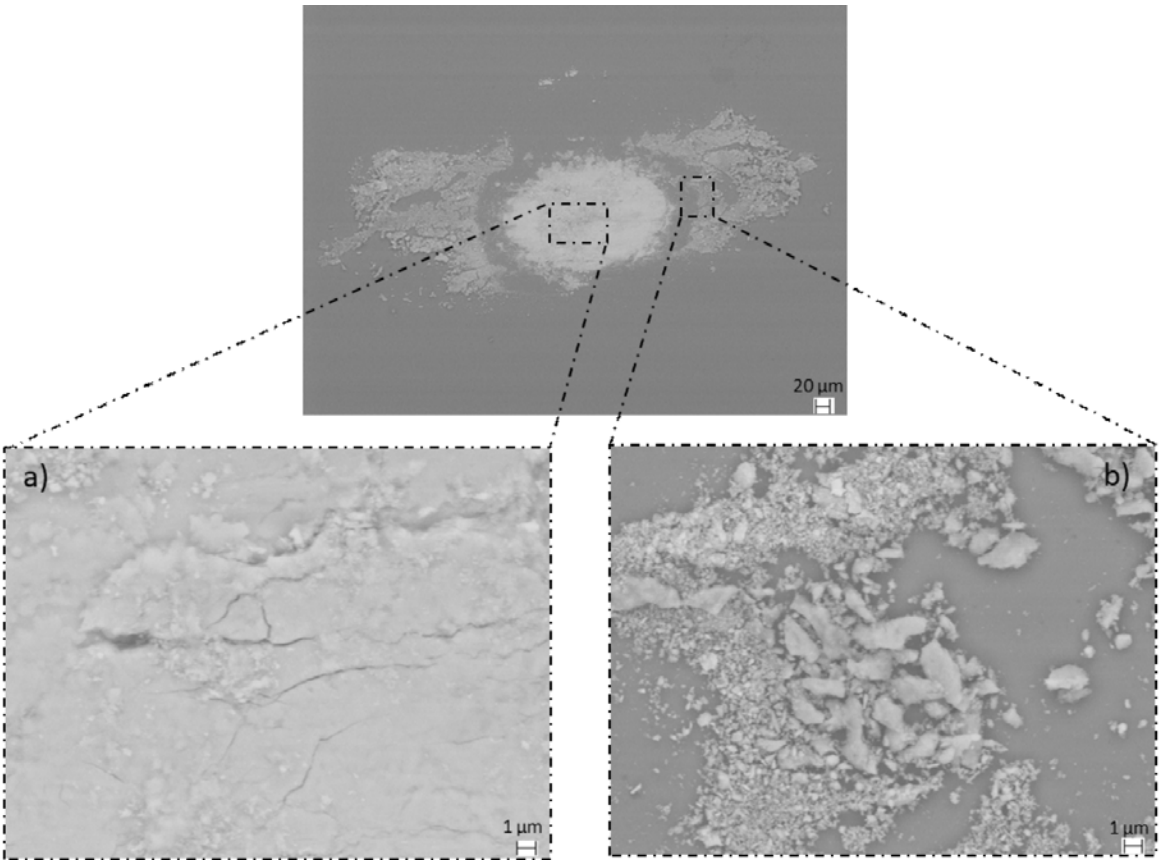


FIGURE 3.11 – Observation au MEB de la morphologie de la couche interfaciale après 120 s d'essai : a) au centre de la trace d'usure et b) à l'extrémité de la trace.

Une analyse EDX réalisée au niveau de la surface de l'échantillon de verre (Figure 3.12) montre que l'élément fer (Fe) a été transféré de la bille en acier 100Cr6 à la surface du verre sodocalcique. Cet élément est plus présent au centre qu'aux extrémités de la trace d'usure.

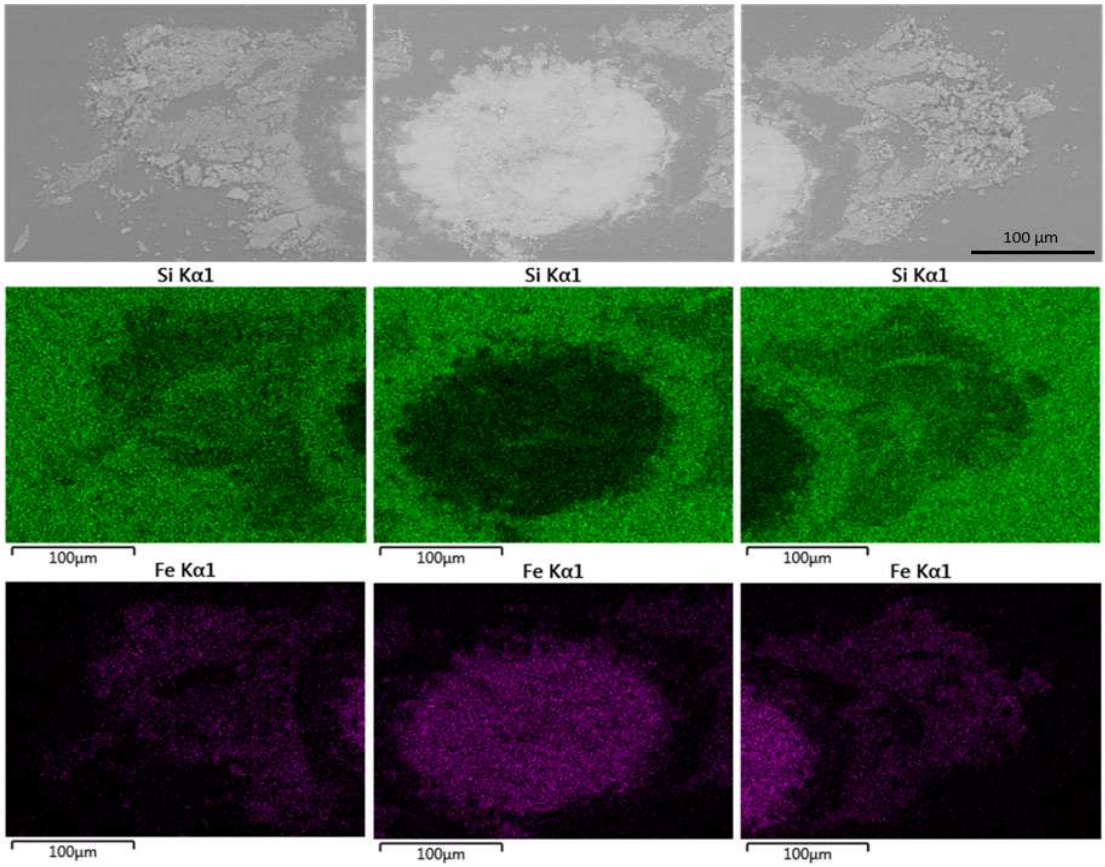


FIGURE 3.12 – Analyse EDX de la couche interfaciale après 120 s d'essai (élément Si en vert et élément Fe en violet).

3.2.2 Corrélation entre observations *in situ* et signaux acoustiques

Au vu des résultats tribologiques et des observations de l'état initial et final du contact exposés précédemment, les questions, très pragmatique, peuvent être formulées de la façon suivante :

— Peut-on identifier les processus interfaciaux pouvant se produire au cours de l'essai et les situer dans le temps et dans le contact ?
— Peut-on associer une signature acoustique bien précise aux mécanismes élémentaires mis en jeu ?

Pour répondre à ces questions, les résultats obtenus par caméra rapide et par émission acoustique seront présentés simultanément dans ce paragraphe.

Plusieurs paramètres caractéristiques des signaux d'émission acoustique ont été calculés et extraits des formes d'onde enregistrées. Pour cette étude, seules l'amplitude acoustique (A_{EA}), l'énergie absolue (E_{abs}) et la fréquence centroïde (f_c) sont les paramètres les plus représentatifs.

— L'amplitude acoustique représente l'amplitude maximale du signal pendant l'essai.
— L'énergie absolue représente l'intégrale du signal au carré sur la durée de la salve.
— La fréquence centroïde représente le centre de masse du spectre fréquentiel des signaux acoustique, c'est-à-dire qu'elle caractérise le contenu global en fréquence d'un signal.

La figure 3.13 présente les variations de l'amplitude, de la fréquence centroïde et de l'énergie absolue cumulée pendant l'essai. Les trois étapes déjà identifiées sont synchronisées avec l'évolution du coefficient de frottement :

— Au cours de la première phase (c'est-à-dire jusqu'à 20 s d'essai), le coefficient de frottement est faible et aucun signal acoustique n'a été détecté au-delà du niveau du seuil de détection expérimental choisi (27 dB).

— Au cours de la deuxième phase (de 20 s à 48 s d'essai) où le coefficient de frottement augmente brusquement, des signaux d'émission acoustique (salves) sont enregistrés. Ils représentent environ 90% de l'énergie acoustique totale émise et sont caractérisés par une large gamme de fréquences (360 - 700 kHz) et d'amplitudes (29 - 55 dB).

— Au cours de la troisième phase (à partir de 48 s jusqu'à la fin de l'essai) où le coefficient de frottement est à nouveau relativement stable mais beaucoup plus élevé par rapport à la première étape, les signaux acoustiques sont de faible énergie (environ 10 % de l'énergie acoustique totale émise). Ils sont caractérisés également par de faibles amplitudes (29 - 35 dB) mais par des fréquences élevées (500 - 700 kHz) par rapport à la deuxième phase de l'essai.

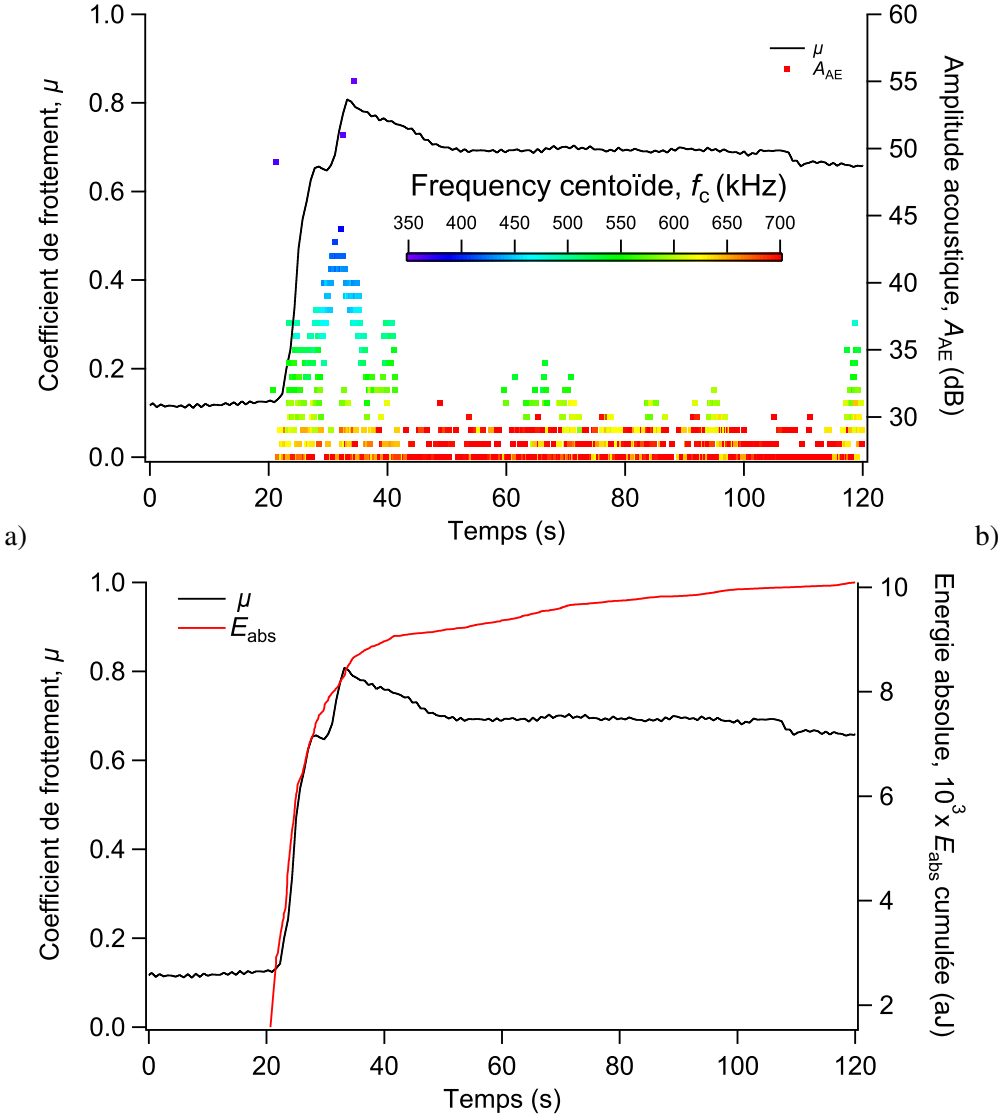


FIGURE 3.13 – Évolution du coefficient de frottement avec a) l'amplitude acoustique et b) l'énergie absolue cumulée durant un essai de 120 s pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N). L'échelle colorée représente la variation de la fréquence centroïde.

Afin de mieux comprendre les phénomènes qui se produisent pendant l'essai, une représentation du coefficient de frottement (Figure 3.14) est accompagnée d'images extraites de la vidéo montrant l'évolution des processus d'endommagement (Figure 3.15) à des moments spécifiques, notés avec des lettres de (a) à (j). L'ensemble des images obtenues par caméra rapide sont présentées en annexe.

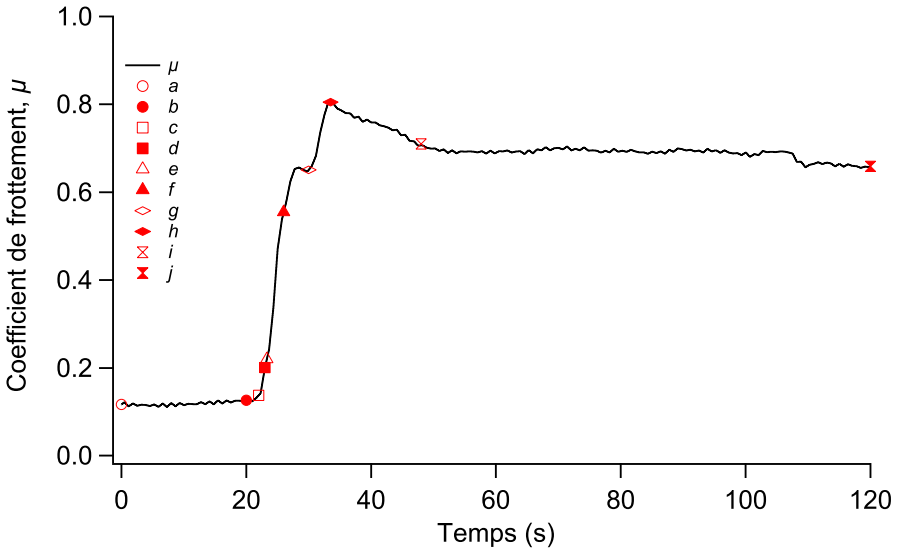


FIGURE 3.14 – Évolution du coefficient de frottement avec les instants d'apparition des mécanismes d'endommagement de (a) à (j).

Première phase

Dans la première phase (jusqu'à 20 s), le coefficient de frottement reste très faible (environ 0,12) et aucun signal acoustique n'a été enregistré au-dessus du seuil expérimental. De plus, l'observation de la zone de contact à 20 s d'essai montre qu'aucune dégradation n'est observée au niveau des surfaces en acier ou en verre (Figure 3.15b). Cette période d'accommodation a lieu par cisaillement des écrans naturels des surfaces des premiers corps. Il s'agit d'une contamination naturelle non maîtrisée de la surface (impuretés) malgré la réalisation d'une procédure de nettoyage avant la mise en place de l'essai. Ces écrans jouent le rôle de séparateurs car ils empêchent l'adhérence des surfaces en contact et donc réduisent le frottement ce qui limite ici les dégradations des premiers corps.

Deuxième phase

Après 20 s (soit 200 cycles), les écrans naturels ont atteint leur limite d'endurance en frottement notamment dans la zone médiane de la trace où la contrainte générée par la bille est maximale. Une interaction directe entre les surfaces du verre et de l'acier se produit et l'adhérence augmente localement. Elle entraîne la création et/ou la rupture des jonctions adhésives se traduisant par une augmentation du coefficient de frottement. Durant cette phase, les premiers débris, alimentant le contact (activation des débits sources Q_s) sont observés. Ce mécanisme génère des signaux acoustiques caractérisés par une amplitude acoustique proche de 49 dB et

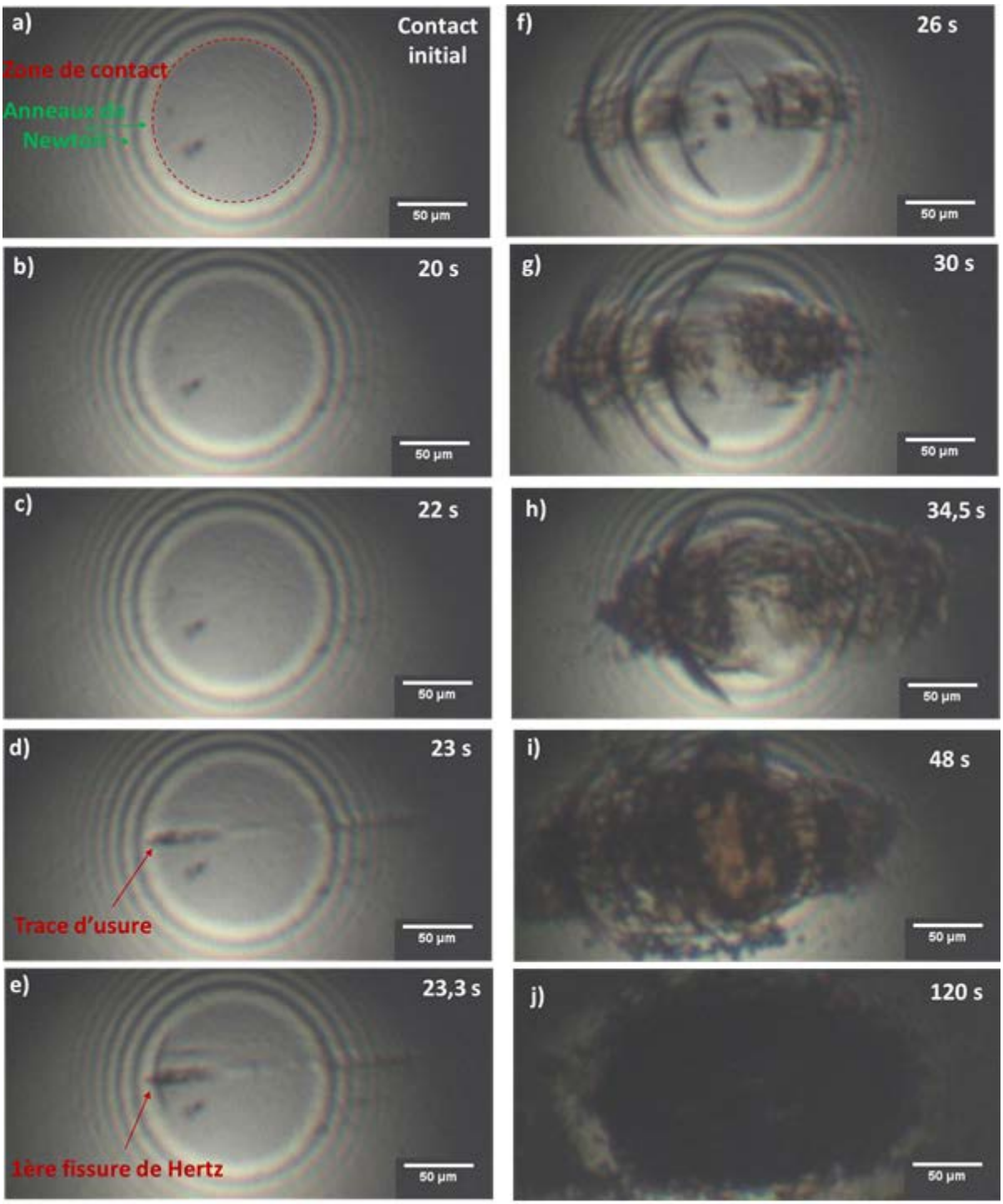


FIGURE 3.15 – Images de la zone de contact extraites de la vidéo montrant l'évolution des mécanismes élémentaires durant un essai de 120 s pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N). Les images a) et b) sont pendant la première phase de l'essai. Les images de c) à h) sont pendant la deuxième phase de l'essai et les mages i) et j) sont pendant la troisième phase de l'essai.

une fréquence centroïde de 366 kHz. Ces résultats sont similaires à ceux observés par Kolubaev *et al.* [Kolubaev *et al.*, 2010]. Ils montrent que lorsque le contact réel se produit entre les surfaces antagonistes, le coefficient de frottement et l'amplitude du signal acoustique augmentent. La fréquence acoustique correspondante, dans ce cas, est d'environ 340 kHz. En outre, Hase *et al.* [Hase *et al.*, 2012] associent le mécanisme de création/rupture des jonctions à une bande de fréquence acoustique très large comprise entre 50 et 350 kHz.

À 22 s (Figure 3.15c), après plusieurs aller-retour, un transfert de matière s'établit à la surface du verre suite à la rupture de jonctions au niveau des aspérités métalliques. Ces particules sont piégées et circulent à l'intérieur de la zone de contact pour initier le débit interne Q_i. Une couche interfaciale commence à se former dans l'interface glissante en privilégiant son extension dans la direction de glissement dans un premier temps (Figure 3.15d). Ce processus se caractérise par une amplitude acoustique proche de 35 dB. Ces observations sont en accord avec plusieurs études. Ces dernières ont montré que les signaux acoustiques sont sensibles à la génération de débris d'usure. Geng *et al.* [Geng *et al.*, 2019] ont montré que l'énergie acoustique pouvait démontrer la génération de débris d'usure, qui émet un signal très énergétique. De plus, selon Sun *et al.* [Sun *et al.*, 2005], dès que le contact glissant est effectif, beaucoup de débris peuvent facilement être générés, ce qui conduit à une augmentation de la moyenne quadratique du signal acoustique, paramètre indiquant le niveau d'énergie acoustique.

À 23,3 s, une première fissure hertzienne est observée sur l'échantillon de verre (Figure 3.15e). La fissure a une forme semi-circulaire dont le côté concave indique la direction dans laquelle le glissement se produit. Ce type de fissure est généralement observé sur les matériaux fragiles tels que les verres et les céramiques. La fissuration provient de la répartition des contraintes dans l'échantillon plan, qui est induite par le déplacement de la bille. Pour un contact glissant de type bille/plan, une contrainte de traction apparaît à l'arrière du contact et conduit à une rupture. À ce stade, la fréquence centroïde est d'environ 500 kHz et l'amplitude acoustique est à 37 dB.

Lorsque la bille se déplace, le nombre de fissures augmente. La figure 3.15f montre une série de trois fissures consécutives à l'arrière du contact. De plus, quand la bille change de sens de déplacement, des fissures peuvent également apparaître totalement ou partiellement dans le sens de glissement opposé. Ces fissures sont équidistantes. Une distance d'environ 36 ± 1 µm apparaît entre deux fissures consécutives. Comme montré par Hills *et al.* [Hills *et al.*, 1994] et Geng *et al.* [Geng *et al.*, 2010], cet espacement entre les fissures est généralement lié au coefficient de frottement et à la ténacité du verre. Le frottement produit également une contrainte de compression à l'avant du contact qui ferme les fissures générées lorsque le déplacement se fait dans la direction opposée. Donc, ces fissures ne sont plus visibles sur la vidéo. De telles fissures sont à nouveau visibles lorsqu'elles sont réouvertes par tension derrière le contact lorsque le glissement est à nouveau dans le sens approprié.

La figure 3.15g montre que les particules détachées s'accumulent et produisent un lit de poudre interfacial adhérent qui réduit les interactions superficielles des premiers corps. Cette couche interfaciale continue à progresser en termes de largeur. Une partie des particules détachées est également éjectée hors de la zone de contact et crée le flux d'usure Q_w.

À 34,5 s (Figure 3.15h), l'augmentation brutale du coefficient de frottement jusqu'à 0,8 s'accompagne de l'augmentation de l'amplitude acoustique jusqu'à 55 dB. Cela est, en réalité, dû à l'apparition de la plus large fissure hertzienne sur la surface du verre.

La détection de l'initiation et de la propagation des fissures, lors du contact glissant, a été étudiée par Cadario et Alfredsson [Cadario & Alfredsson, 2005]. Ils ont montré qu'une augmentation des événements acoustiques et une variation de la pente du signal acoustique correspondant à l'évolution du nombre de salves cumulées sont liées à la croissance des fissures. De plus, Ramadan *et al.* [Ramadan *et al.*, 2008] ont étudié l'émission acoustique provenant de l'initiation et de la propagation des fissures dans un acier. La bande de fréquence associée à ces phénomènes varie entre 50 à 700 kHz. L'amplitude acoustique attribuée à l'amorçage de la fissure est comprise entre 23 et 30 dB. Après cela, l'amplitude acoustique comprise entre 30 et 40 dB est associée à la croissance des fissures. L'amplitude acoustique supérieure à 55 dB est associée à la rupture de l'acier.

Troisième phase

Dans la dernière étape, à partir de 48 s (Figure 3.15i et figure 3.15j), le coefficient de frottement commence à se stabiliser à 0,68. La couche interfaciale continue de croître jusqu'à ce qu'elle s'étende sur toute la zone de contact. Les anneaux de Newton et les fissures ne sont plus visibles car masqués par les débris. Les amplitudes des signaux acoustiques sont faibles par rapport à la deuxième phase de l'essai. Ce résultat est similaire à ceux obtenus par Ito *et al.* [Ito *et al.*, 2009] qui ont montré qu'en régime permanent, l'accumulation de débris d'usure entre les surfaces en contact conduit à des valeurs relativement faibles de l'amplitude des signaux acoustiques malgré un coefficient de frottement élevé. Durant cette phase, le cisaillement dans la couche interfaciale, qui se produit entre les deux premiers corps lors de l'essai, devient prépondérant.

3.2.3 Mesures et analyses complémentaires

3.2.3.1 Caractérisation des fissures hertziennes

Dans l'étape intermédiaire de l'essai (Phase II), la longueur L_f et l'ouverture O_f des fissures sont mesurées à partir de l'observation *in situ*. La valeur maximale de l'ouverture de fissure atteint 10,8 ± 0,2 µm et suit l'évolution du coefficient de frottement (Figure 3.16a). En revanche, la longueur des fissures augmente de façon monotone de 44 µm à 155 ± 5 µm et suit l'évolution de l'énergie absolue cumulée (Figure 3.16b). Cette courbe d'évolution de la longueur des fissures montre qu'il existe deux stades d'évolution. Le premier stade est une phase de propagation à grande vitesse jusqu'à 40 s d'essai (7,33 ± 0,5 µm/s). Le deuxième stade est une phase de propagation lente (0,43 ± 0,3 µm/s), autrement dit stable. De la même manière, la longueur et l'ouverture des fissures commencent à se stabiliser pendant la troisième phase de l'essai, respectivement, autour de 160 ± 5 µm et 6 ± 0,2 µm.

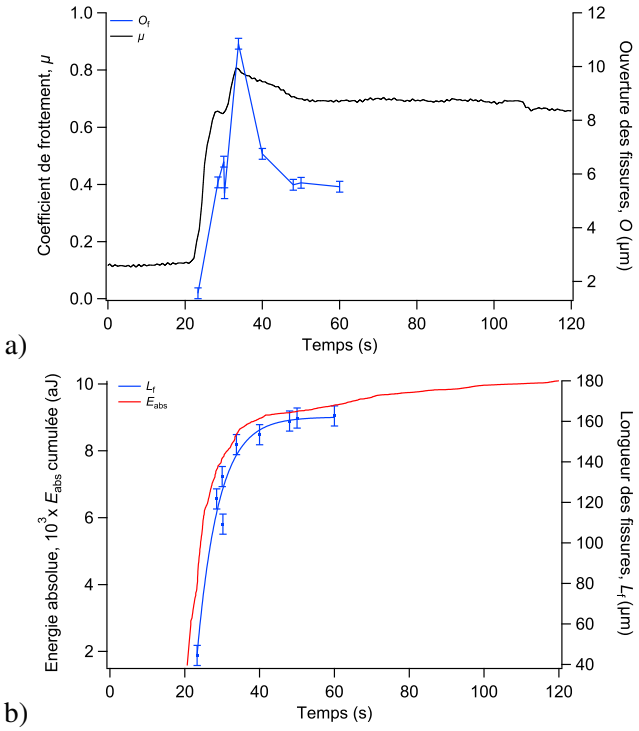


FIGURE 3.16 – Évolution synchronisée a) du coefficient de frottement et de l'ouverture des fissures et b) de l'énergie absolue cumulée acoustique et de la longueur des fissures durant un essai de 120 s pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm$ 50 µm, f = 10 Hz, F_N = 5 N).

Après la réalisation de l'essai, une caractérisation *post mortem* des fissures est réalisée. Elle consiste à faire une découpe parallèle à la trace d'usure sur l'échantillon de verre, réaliser un polissage de surface et observer les fissures hertziennes. Une illustration schématique de la découpe est présentée dans la figure 3.17. L'observation permet de caractériser la fissuration tant vis-à-vis de l'ouverture des fissures que de l'angle de propagation. L'ensemble des mesures (Figure 3.18) confirme une ouverture des fissures de l'ordre de 5 ± 0,5 µm, une valeur proche de celle mesurée directement via la caméra rapide (6 ± 0,2 µm). L'angle de propagation des fissures est compris entre 73° et 78° par rapport à la surface. Les fissures semblent être parallèles. Cependant, il est difficile de différencier les fissures selon la direction de glissement à la surface du verre car parfois elles se croisent et se rejoignent. Par conséquent, la distance entre les fissures ne peut pas être mesurées comme cela été fait à partir de l'observation *in situ*. En ce qui concerne la densité de fissures, cette coupe montre un nombre moyen de 11 fissures sur 100 µm de longueur.

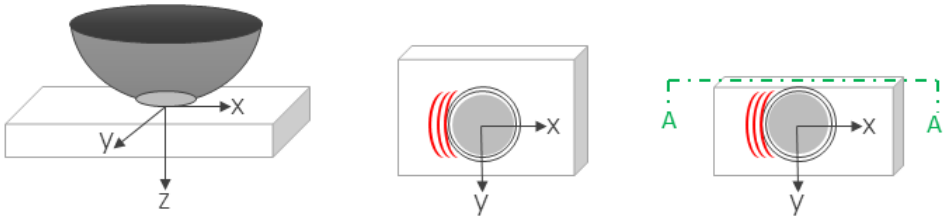


FIGURE 3.17 – Illustration schématique d'une coupe transversale réalisée parallèlement à la trace d'usure sur le verre.

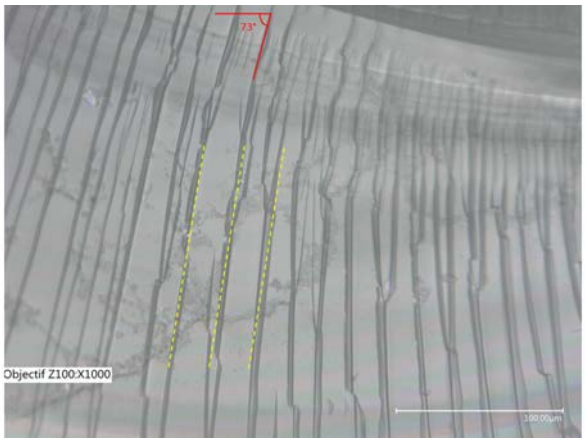


FIGURE 3.18 – Observation de la fissuration sur une coupe parallèle à la surface de l'échantillon en verre.

3.2.3.2 Mesure de l'aire de contact

La visualisation de l'interface de contact est nécessaire pour mesurer l'évolution de l'aire de contact lors de l'essai de frottement. En effet, la visualisation *in situ* a permis d'identifier deux aires différentes :

— Une aire de portance, A_p, correspondant à l'évolution de l'aire de la zone centrale grise entourée par les anneaux de Newton.

— Une aire de dégradation, A_d, correspondant à l'aire du troisième corps.

La figure 3.19 présente l'évolution de l'aire de portance mesurée par l'analyse d'images jusqu'à seulement une période inférieure à 40 s. Cela est dû au fait que la couche interfaciale continue à progresser et à s'étendre jusqu'à ce qu'elle cache totalement la zone de contact, ce qui rend les mesures en direct compliquées. Pendant cette période, deux phases peuvent être distinguées.

— La première phase correspond à la phase initiale de l'essai de frottement sans dégradation d'où une aire de portance qui reste constante. En parallèle, l'aire de dégradation est nulle par absence de transfert de matière.

— La deuxième étape correspond à la phase où les dégradations commencent à apparaître dans l'interface de contact (création de la couche interfaciale et fissuration). Ainsi, l'aire de portance diminue. Les images extraites de la visualisation à 10 s et 30 s montrent la différence de l'aire de portance avant et après la formation du troisième corps. Cependant, l'aire de dégradation augmente progressivement suite à l'évolution de la longueur (dans le sens du glissement) et la largeur (dans le sens perpendiculaire au glissement) du troisième corps.

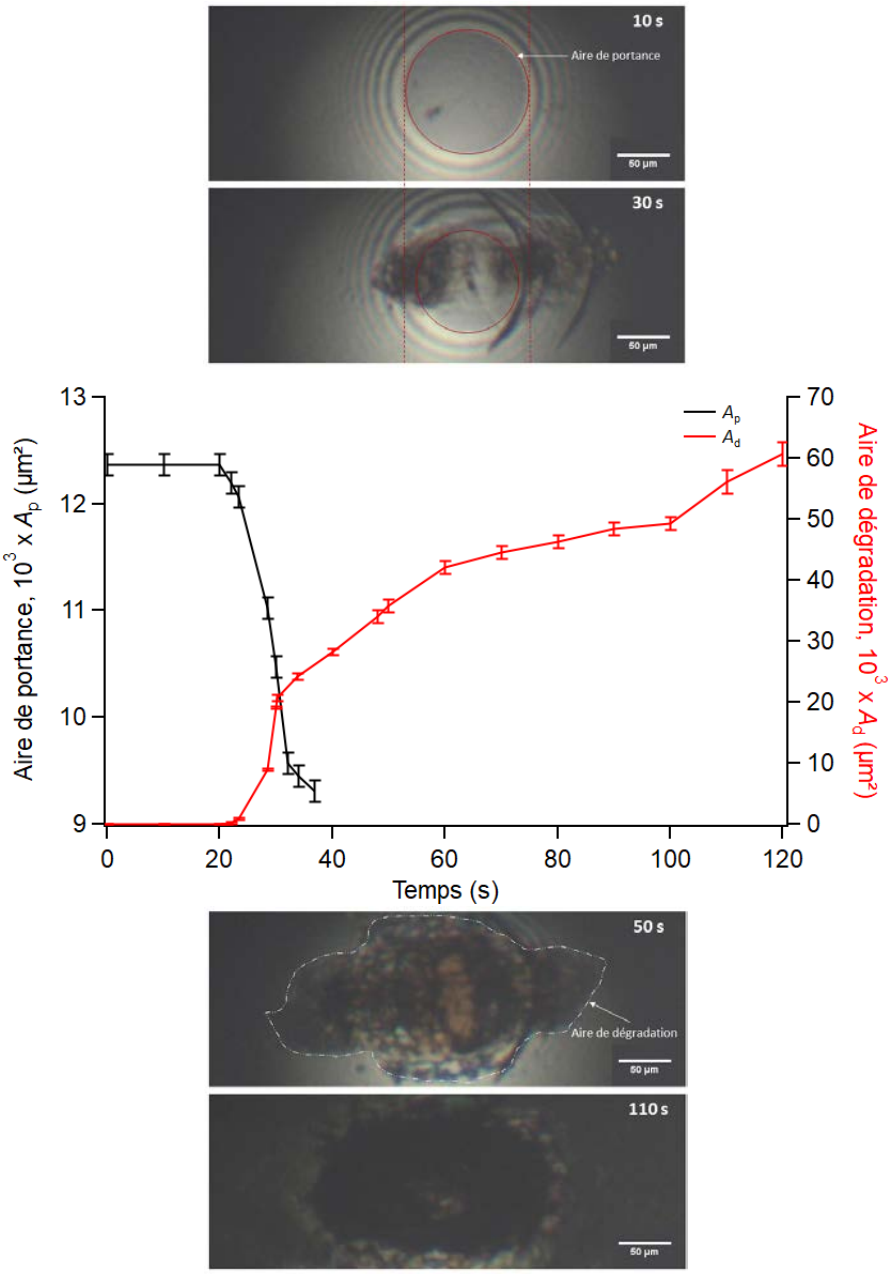


FIGURE 3.19 – Mesure de l'aire de portance (courbe noire) et l'aire de dégradation (courbe rouge) pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm$ 50 µm, f = 10 Hz, F_N = 5 N).

3.2.3.3 Analyse de l'épaisseur du troisième corps

Au regard de ces observations, il peut être utile de mesurer le niveau de noir de la zone de contact à travers une analyse des images obtenues par la caméra rapide. Les résultats peuvent donner une idée sur l'évolution de l'épaisseur de la couche interfaciale entre les deux premiers corps en contact.

Ainsi, le profil de niveau de noir est présenté en parallèle du coefficient de frottement durant l'essai (Figure 3.20). Pour calculer le niveau de noir, l'image RGB (R : rouge, G : vert et B : bleue) est convertie en HSL (Hue Saturation Lightness). Le niveau du noir est le complémentaire à la valeur de L qui représente la luminosité. Donc, le niveau de noir est égal à la valeur de la

différence entre la valeur de luminance maximale (255) et la valeur de la luminosité L.

D'après ces résultats, et comme observé au niveau de la variation de coefficient de frottement, trois phases différentes sont distinguées.

— Une première phase où le niveau de noir est faible et reste stable.
— Une deuxième phase où il augmente d'une façon monotone.
— Une troisième phase qui correspond à la stabilisation de niveau du noir.

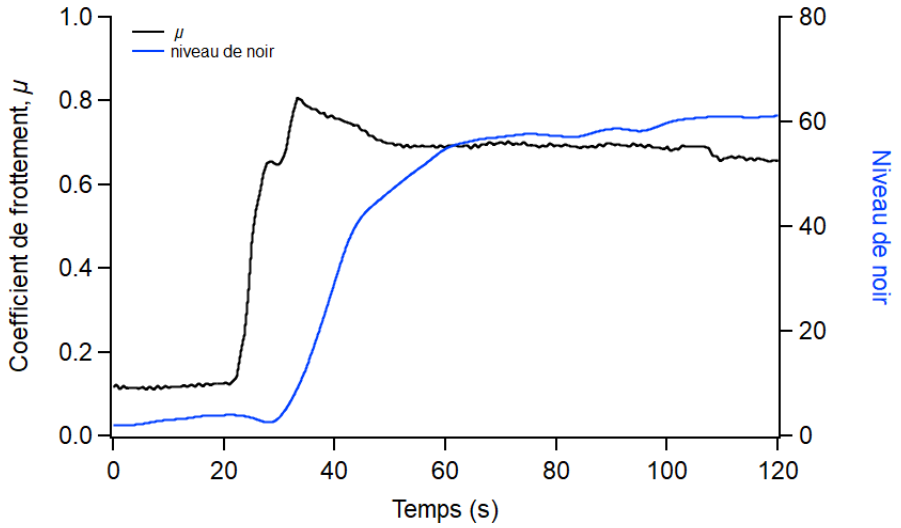


FIGURE 3.20 – Profil d'intensité en niveau de noir de la zone de contact durant un essai de 120 s pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm$ 50 µm, f = 10 Hz, F_N = 5 N).

Raisonnablement, cette variation du niveau de noir explique la création et l'évolution de la couche interfaciale en termes d'épaisseur.

Pour quantifier l'évolution de cette couche interfaciale, une caractérisation de la topographie de la surface de l'échantillon de verre par AFM (Microscopie à Force Atomique ou Atomic Force Microscopy), a été réalisée après l'essai de frottement. L'analyse de la surface a permis de déterminer l'épaisseur finale du film interfacial (Figure 3.21). Cette épaisseur $e_{3ème-corps}$ est de l'ordre de 1,4 ± 1 µm.

En se basant sur ce résultat, une estimation de l'épaisseur du troisième corps au long de l'essai a été réalisée (Figure 3.22) en rapportant le niveau de noir maximal à l'épaisseur du troisième corps mesurée par AFM. Cette figure révèle une forte corrélation entre le coefficient de frottement et l'épaisseur calculée.

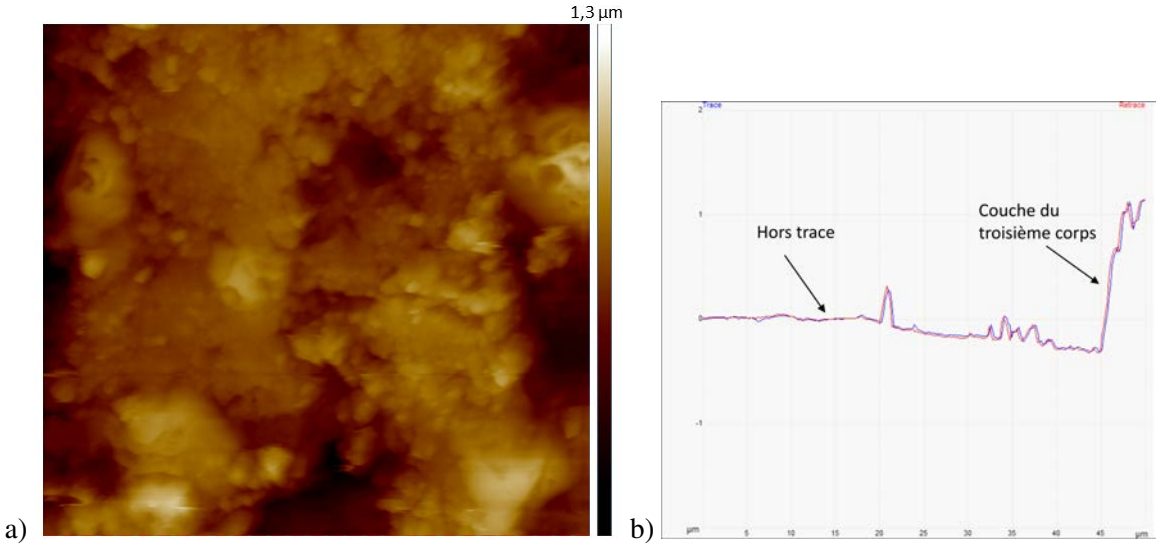


FIGURE 3.21 – a) Image topographique et b) épaisseur du troisième corps après un essai de 120 s pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N).

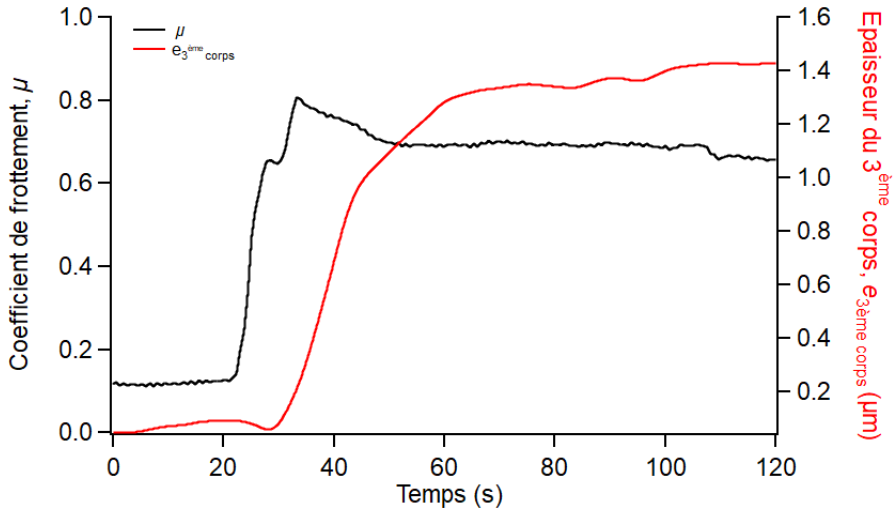


FIGURE 3.22 – Corrélation entre le coefficient de frottement, le niveau de noir et l'épaisseur du troisième corps.

3.2.3.4 Analyse de la hauteur du convergent

Dans le contact acier/verre de type bille/plan, la distribution de pression est maximale au centre du contact (selon la théorie de Hertz). Lorsque les surfaces en contact sont en mouvement, la distribution de la pression de Hertz est modifiée, en particulier à l'entrée et à la sortie du contact. La zone d'entrée peut aussi être appelée « convergent ». C'est la zone où la pression commence à augmenter. La zone de sortie, où la pression chute, est appelée « divergent ». Une schématisation de ces zones est présentée dans la figure 3.23.

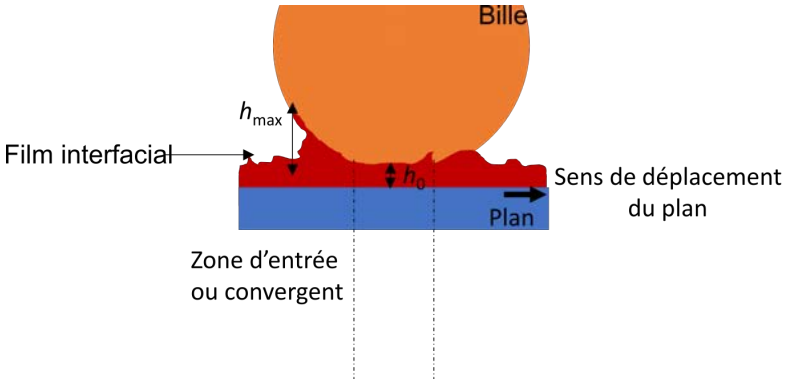


FIGURE 3.23 – Schématisation de la zone d'entrée (convergent) dans le contact bille/plan.

Ainsi, quand le remplissage du convergent s'effectue (débit de recirculation), la détermination de la hauteur maximale de ce remplissage peut être calculée selon l'équation 3.3 :

$$h_{max} = \frac{a^2}{\pi R}\left[\sqrt{\frac{L_{S_3}^2}{a^2} - 1} - (2 - \frac{L_{S_3}^2}{a^2}).arccos(\frac{a}{L_{S_3}})\right] + h_0 \tag{3.3}$$

Avec a le rayon de contact de Hertz, R le rayon de la bille, h_0 l'épaisseur du film interfacial et L_{S_3} la longueur du film interfacial dans le sens du glissement présentée dans la figure 3.24.

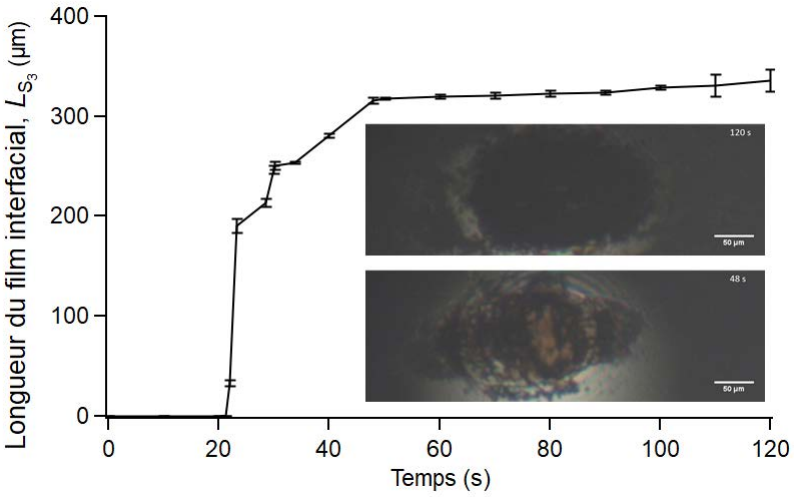


FIGURE 3.24 – Évolution de la longueur du film interfacial dans le sens de glissement durant un essai de 120 s pour le contact acier/verre sodocalcique (δ = ± 50 µm, f = 10 Hz, F_N = 5 N).

Ainsi trois cas peuvent se présenter :

— Durant la première phase de l'essai, lorsqu'aucune dégradation n'a été observée sur les deux premiers corps, la longueur du troisième corps est considérée nulle. La hauteur maximale du remplissage du convergent est aussi considérée nulle.

— Durant la deuxième phase de l'essai, le troisième corps commence à se former et évolue rapidement. Sa longueur atteinte en fin de cette phase est égale à 281 ± 3 µm. L'épaisseur du film interfacial h_0 est négligeable. Donc, la hauteur maximale du remplissage du convergent h_{max} est égale à 2,4 ± 1 µm.

— Durant la troisième phase de l'essai, la longueur du film interfacial tend à se stabiliser vers une valeur finale de l'ordre de 363 ± 11 µm. L'épaisseur du film interfacial correspond ainsi à la valeur déterminée par AFM (h_0 = 1,43 ± 1 µm). Donc, la hauteur maximale du remplissage du convergent h_{max} est de l'ordre de 6 ± 1 µm.

3.2.3.5 Analyse de la composition du troisième corps

Une analyse EDS a été réalisée sur la surface du troisième corps afin de déterminer sa composition chimique. Pour cela, cinq spectres ont été établis dans différentes zones de la trace d'usure (Figure 3.25) :

— Spectres 1 et 2 : positionnés aux deux extrémités de la trace d'usure, plus précisément sur les débris éjectés en dehors de la trace.

— Spectres 3, 4 et 5 positionnés au centre de la trace.

Les résultats obtenus sont présentés dans les figures 3.25. Ils indiquent qu'aux extrémités de la trace, les particules éjectées sont très riches en oxygène et en silicium avec une concentration en fer moindre. Quant au centre de la trace, l'analyse révèle un pic d'oxygène. Une concentration en fer probablement sous forme d'oxydes apparaît avec un pic plus important que celui observé aux extrémités de la trace ce qui confirme l'usure de la bille pendant l'essai de frottement. L'ensemble des résultats rassemblés dans le tableau 3.6 montre que le rapport des éléments silicium et fer par rapport à l'oxygène présente des valeurs très proches sur tous les spectres à l'exception du spectre 1. Ce qui permet de conclure qu'un même type d'oxyde est présent à l'intérieur et à l'extérieur de la trace après 120 s d'essai.

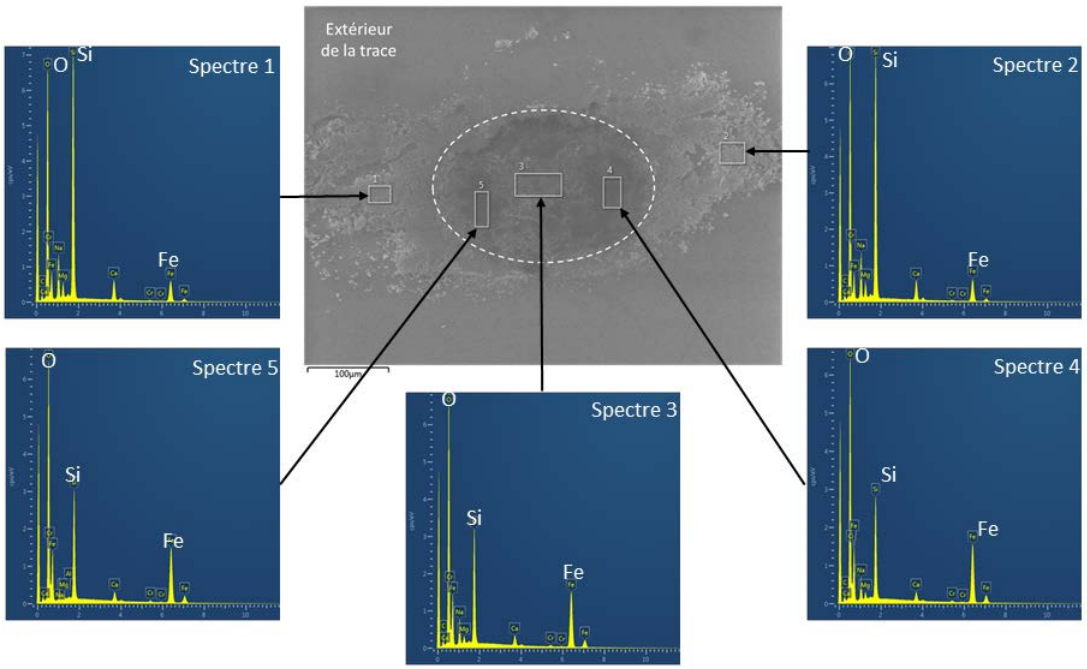


FIGURE 3.25 – Points des spectres localisés sur la surface du troisième corps et spectres EDS correspondant aux points localisés sur l'extrémité et à l'intérieur de la trace d'usure.

Éléments	Si	Fe	O	Si+Fe/O
Spectre 1	21,3	7,39	60,62	0,47
Spectre 2	20,47	7,62	61,15	0,6
Spectre 3	11,97	21,94	57,95	0,58
Spectre 4	11,01	23,53	57,9	0,6
Spectre 5	11,71	22,08	58,5	0,58

TABLE 3.6 – Pourcentages atomiques des éléments détectés à l'extrémité et à l'intérieur de la trace d'usure.

3.3 Des essais en interrompu

Afin de mieux cerner les signaux d'émission acoustique associés aux étapes de dégradation, des essais interrompus ont été réalisés. La démarche suivie est d'expertiser les caractéristiques des traces d'usure sur la bille et le plan en fonction de l'établissement du contact. Cela permet d'analyser les mécanismes d'endommagement et d'usure observés suivant l'évolution du coefficient de frottement et ainsi de comparer les résultats obtenus aux valeurs mentionnées dans les précédents paragraphes. Les conditions opératoires de référence sont maintenues.

3.3.1 Résultats tribologiques

Dans un premier temps, un essai a été interrompu à l'issue de la formation de la première fissuration sur le plan de verre. L'essai est de durée totale d'environ 30 s (Figure 3.26). La courbe de frottement de l'essai en interrompu présente une évolution identique à l'essai de référence. Autrement dit, une première phase de frottement bas est retrouvée suivie d'une évolution brusque du coefficient de frottement.

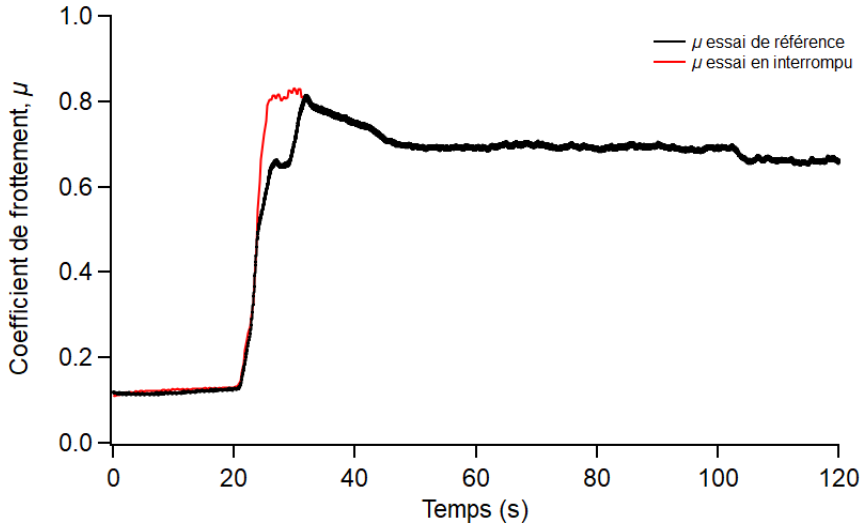


FIGURE 3.26 – Superposition des courbes de frottement de l'essai de référence avec l'essai en interrompu.

L'augmentation très brutale du coefficient de frottement est associée au contact acier/verre

et au début de création d'un film de débris entre les deux premiers corps. L'observation optique de ces premières secondes de dégradation montre que le centre de la trace de la bille présente peu de débris à l'intérieur de la trace avec des débris plus sombres aux extrémités de la trace (Figure 3.27a). La trace d'usure sur le plan présente une forme symétrique (Figure 3.27b). Le centre présente peu de débris. En revanche, une surface plus sombre apparaît entre le centre et les particules éjectées hors de la trace. Cette surface fait apparaître des transferts de matière. La composition de ce transfert sera présentée ci-dessous. L'ensemble des débris éjectées se compose de particules sombres proche de la trace et de particules ayant une couleur brillante plus loin de la trace. Cette organisation spatiale des débris d'usure montre que ces particules brillantes ont été les premières à être éjectées de la trace et que la variation de leur coloration suivant leur orientation tend à indiquer qu'il s'agit de débris majoritairement issu du plan de verre.

a)

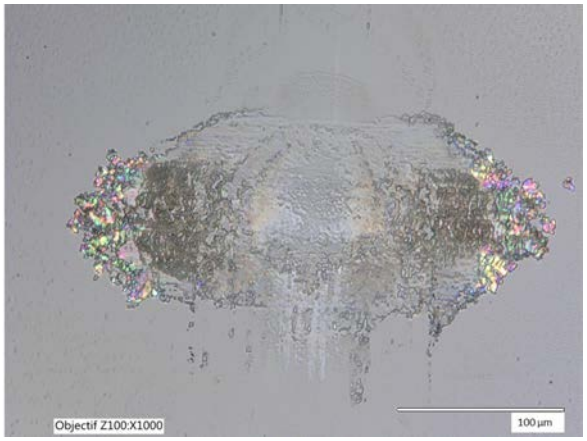

b)


FIGURE 3.27 – Observation au microscope optique de a) bille en acier 100Cr6 et b) verre sodocalcique pour un essai interrompu à 30 s.

Une observation au MEB de la trace d'usure de l'échantillon en verre a été réalisée accompagnée par une analyse EDX pour affiner la composition des débris (Figure 3.28). Les zones analysées sont représentés en couleur :

— La couleur rouge présente les analyses au centre de la trace d'usure.
— La couleur verte présente les analyses à l'extrémité de la trace.
— La couleur orange présente les analyses des particules éjectées.

Les deux zones orange et verte sont mesurées sur une même image.

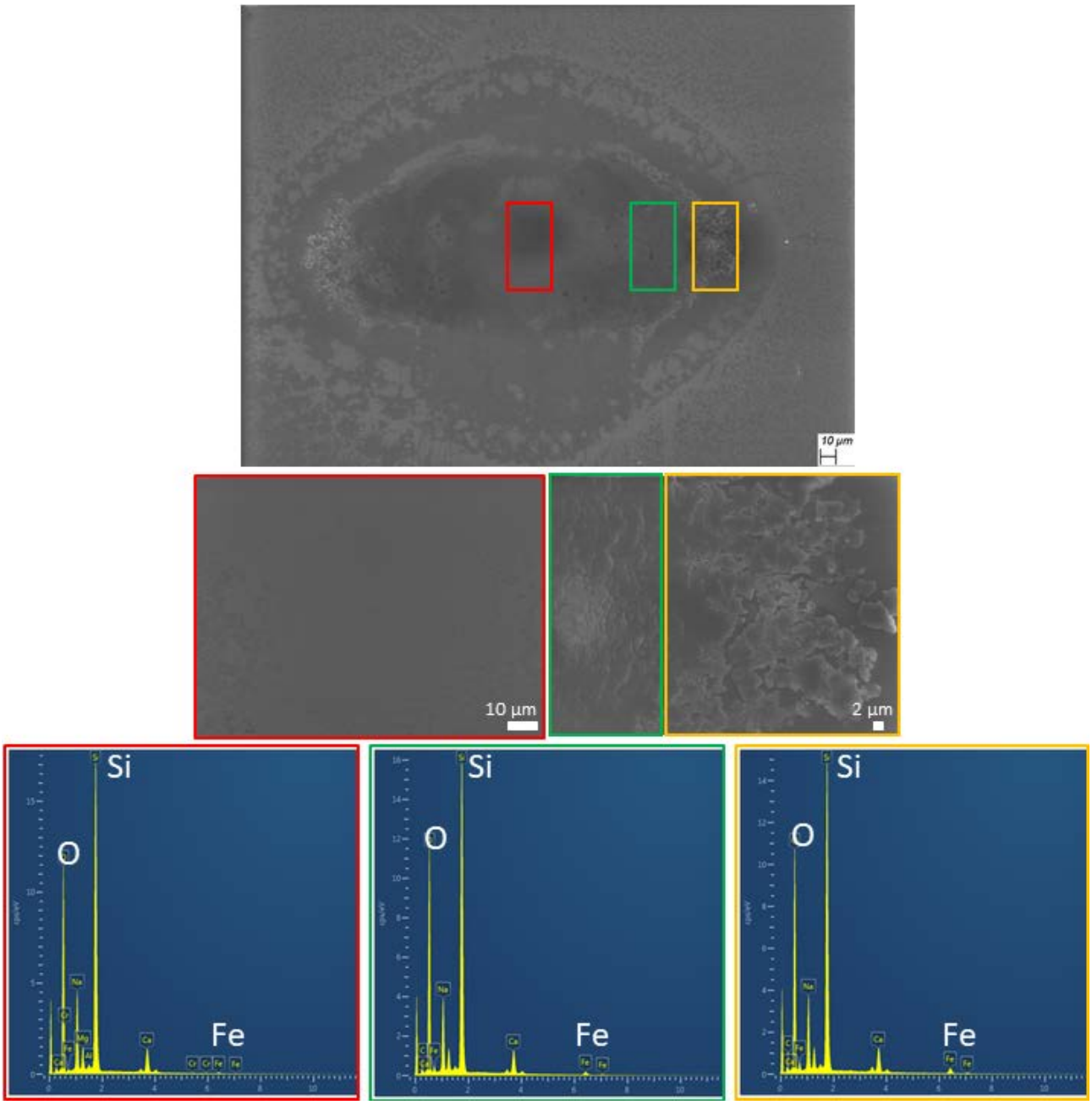


FIGURE 3.28 – Analyse chimique de la trace d'usure sur l'échantillon de verre après 30 s d'essai.

Les principaux éléments détectés dans les trois différentes zones sont présentés dans le tableau 3.7 en pourcentage atomique. Ces résultats ont été comparés avec les analyses chimiques réalisées sur l'essai de référence. Il est ainsi intéressant de noter que la teneur en silicium reste pratiquement aux alentours de 25 % partout dans la trace pour l'essai de 30 s (Figure 3.29a). En augmentant la durée de l'essai, cette teneur en silicium diminue tout en restant plus importante au niveau des particules éjectées par rapport au centre et à l'extrémité de la trace. En ce qui concerne le fer et après 30 s d'essai, il est plus présent dans les particules éjectées mais tout en restant sur de faibles teneurs (Figure 3.29b). Cependant, à la fin de l'essai de référence, le centre et l'extrémité de la trace d'usure deviennent beaucoup plus riches en cet élément. Enfin,

l'oxygène est présent en plus grande teneur dans toute la trace d'usure (Figure 3.29c). Cependant, il est beaucoup plus présent à la fin de l'essai de référence au niveau des particules éjectées comparé à l'essai interrompu à 30 s.

Élément	% atomique au centre	% atomique à l'extrémité	% atomique sur les particules éjectées
Si	25,4	24,8	24,8
Fe	0,3	0,8	1,4
O	59,5	60,3	59,7
(Si +Fe)/O	0,43	0,42	0,44

TABLE 3.7 – Éléments détectés dans la trace d'usure sur l'échantillon de verre après 30 s d'essai.

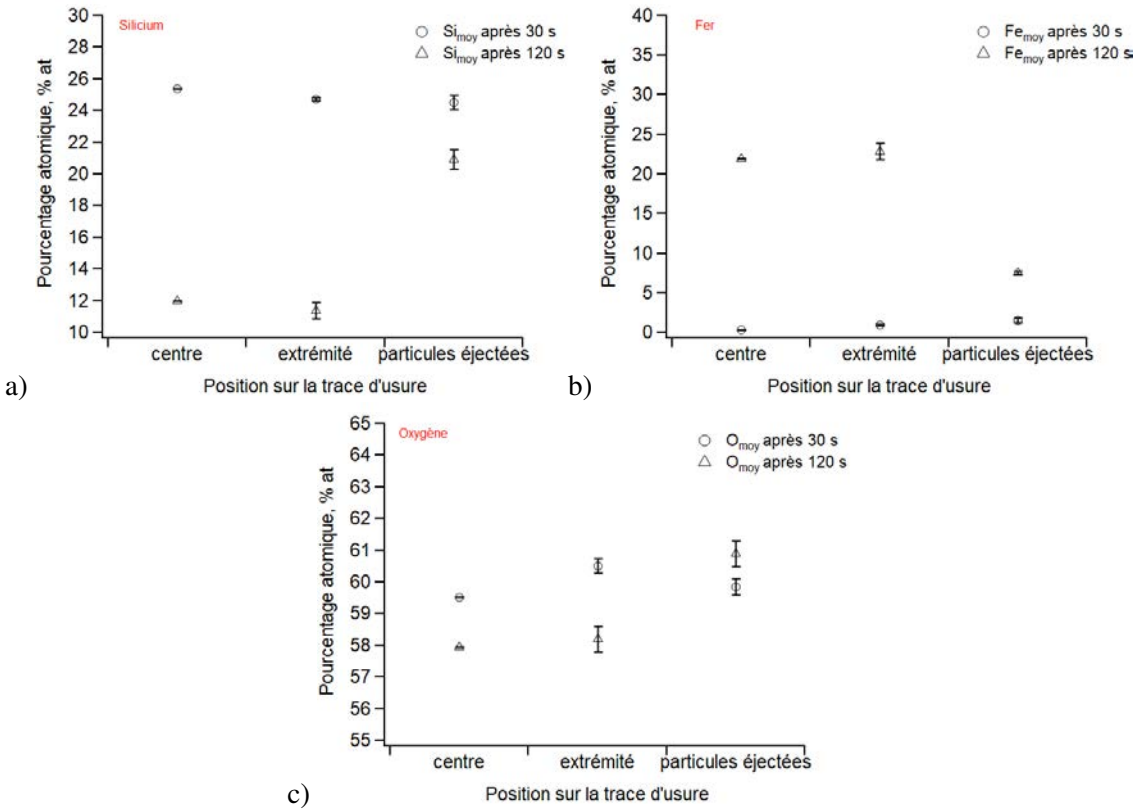


FIGURE 3.29 – Pourcentages atomiques de a) silicium, b) du fer et c) de l'oxygène pour l'essai interrompu à 30 s comparé à celui de référence.

3.3.2 Caractéristiques acoustiques de la première fissure hertzienne

L'enregistrement en émission acoustique de l'essai interrompu a permis de mieux séparer les salves associées à la fissuration du verre. Les signaux enregistrés pendant l'essai de 30 s sont représentés dans la figure 3.30. Les résultats confirment que, pendant la phase de frottement bas, aucune salve d'émission acoustique n'est enregistrée en dessus du seuil expérimental de 27 dB. Ensuite, le nombre de salves enregistrées est très faible. Il s'agit au total de 11 salves. En analysant l'observation *in situ* et l'enregistrement acoustique, il est judicieux d'attribuer les

9 premières salves à la création et l'évolution du troisième corps avant fissuration. Par conséquence, les deux dernières salves sont associées à l'initiation et au début de propagation de la fissuration. La figure 3.31 montre l'apparition de la fissure pour l'essai interrompu après 30 s.

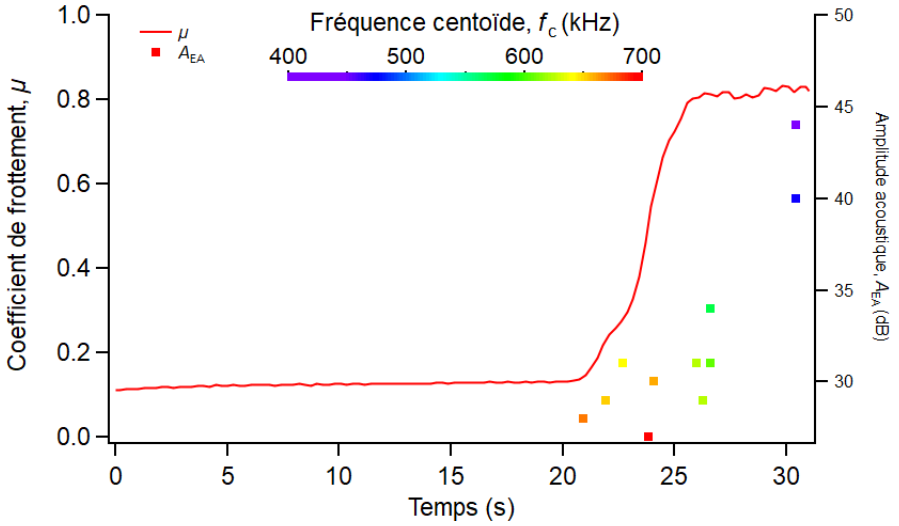


FIGURE 3.30 – Évolution de l'amplitude acoustique de l'essai interrompu après une première fissuration.



FIGURE 3.31 – Image extraite de la vidéo de l'essai réalisé à 30 s montrant l'apparition d'une première fissuration.

Si l'amplitude acoustique peut apparaître au premier abord très élevée par rapport à celle enregistrée pendant l'essai de référence, il est possible de trouver un rapport entre les propriétés de la première fissure hertzienne et les paramètres acoustiques les plus pertinents. La comparaison entre la longueur et l'ouverture de la première fissure de deux essais ainsi que les valeurs acoustiques associées est représentée dans le tableau 3.8. Il est constaté que les rapports des mesures des fissures par rapport aux résultats acoustiques présentent des valeurs très proches (pour la fréquence centroïde) voire des valeurs identiques (pour l'amplitude acoustique et l'énergie absolue). Ce qui signifie qu'une très bonne corrélation existe entre les signatures acoustiques et les mécanismes d'endommagement observés.

	Les caractéristiques	L'essai en interrompu	L'essai de référence
Observation *in situ*	Longueur de la fissure, L_f (µm)	52	44
	Ouverture de la fissure, O_f (µm)	1,8	1,6
Émission acoustique	Amplitude acoustique, A_{EA} (dB)	44	37
	Fréquence centroïde, f_c (kHz)	448	501
	Énergie absolue, E_{abs} (aJ)	62,7	52,8
Rapports	L_f /A_{EA}	1,19	1,19
	O_f /A_{EA}	0,04	0,04
	L_f / f_c	0,11	0,09
	O_f / f_c	0,004	0,003
	L_f / E_{abs}	0,83	0,83
	O_f / E_{abs}	0,03	0,03

TABLE 3.8 – Tableau récapitulatif des caractéristiques de la première fissure de l'essai interrompu à 30 s comparés à celui de référence.

3.3.3 Géométries des surfaces d'usure

Les géométries des surfaces d'usure sur le plan (S_1) et sur la bille (S_2) ont été relevés pour des essais interrompus à 30 s, 60 s, 80 s, 100 s et 120 s (Figure 3.32). Les dimensions de la trace sur le plan dans le sens de glissement $(d1_{plan})$ et perpendiculairement au sens de glissement sont respectivement $(d2_{plan})$ de l'ordre de 84 ± 1 µm et 80 ± 2 µm à l'issue de l'essai de 30 s. Ces dimensions s'accroissent respectivement à 221 ± 5 µm et 178 ± 1 µm après 120 s d'essai. Le diamètre de la trace sur la bille (d_{bille}) après 30 s d'essai est de l'ordre de 103 ± 5 µm et atteint177 ± 6 µm en fin d'essai.

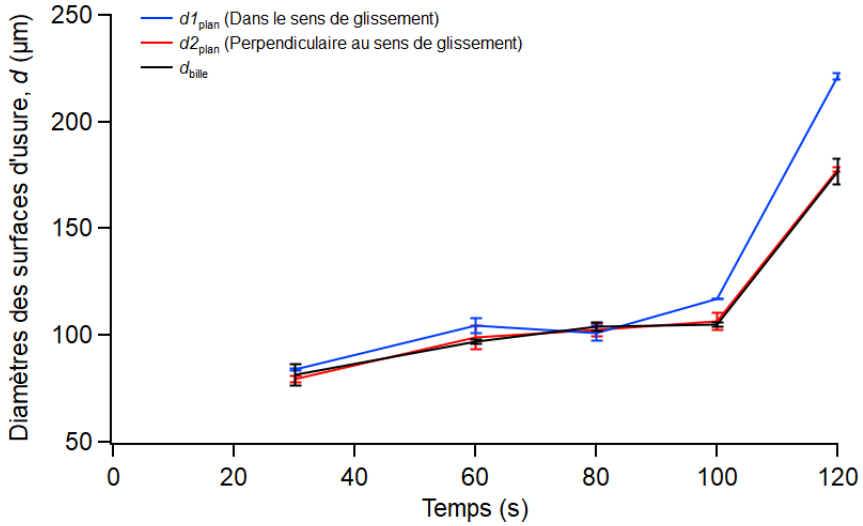


FIGURE 3.32 – Évolution expérimentale des dimensions des traces d'usure du plan et de la bille en fonction du temps.

3.4 Circuit tribologique

3.4.1 Codification des sites et des modes d'accommodation

Comme vu dans le premier chapitre, le système tribologique peut être décrit comme un ensemble de sites d'accommodation : le dispositif expérimental (S_0), l'échantillon plan en verre (S_1), la bille en acier (S_2), les éléments interfaciaux (S_3), les écrans sur le verre (S_4) et sur la bille (S_5). Ces sites d'accommodation sont associés à des modes d'accommodation : élastique (M_0), plastique (M_1), rupture (M_2), cisaillement (M_3) ou rouleaux (M_4).

Grâce à cette codification et sur la base des observations précédentes, un modèle phénoménologique de circulation du troisième corps dans un contact de type bille en acier 100Cr6 sur un plan en verre sodocalcique peut être proposé. Chaque phénomène décrit précédemment est le résultat de l'activation d'un mécanisme d'accommodation, qui va être maintenant défini pour chacune des étapes se produisant lors de l'essai. En complément de ces mécanismes, le circuit tribologique va être exprimé à partir des débits de troisième corps. L'association des mécanismes, des débits et de la durée des phénomènes va permettre de construire le modèle phénoménologique de circulation des particules de troisième corps. Pour rappel, les débits permettant de définir le circuit tribologique sont le débit source (Q_S), le débit interne (Q_i), le débit d'usure (Q_u) et le débit de recirculation (Q_r).

3.4.2 Identification des mécanismes d'accommodation et débits de troisième corps

À partir des observations *in situ* et des analyses supplémentaires, un scénario de circulation du troisième corps peut être déterminé. Les différentes étapes constituant ce scénario seront décrites dans un ordre chronologique au niveau de l'échantillon plan (Figure 3.33).

Première phase : régime de frottement bas

Au moment de la mise en contact, les deux premiers corps sont séparés par les écrans naturels, qui empêchent leur adhérence. Au cours des premiers incréments de déplacements relatifs des premiers corps, le mécanisme d'accommodation activé est $S_{4,5}M_3$. À ce stade, le coefficient de frottement est faible et les surfaces des premiers corps ne peuvent se dégrader.

Deuxième phase : régime transitoire

Quand les écrans sont détruits par frottement et qu'ils n'ont plus la capacité d'accommoder le déplacement, un contact direct entre les deux premiers corps intervient localement. Les jonctions adhésives ainsi créées subissent un cisaillement selon le mécanisme d'accommodation $S_{1,2}M_3$. Quand la fissuration superficielle apparaît dans le contact, le mécanisme d'accommodation S_1M_2 est ainsi activé. Le coefficient de frottement augmente alors très rapidement. Lorsque des particules de matière se détachent des premiers corps et restent au niveau du contact, elles constituent les débits sources Q_{S_1} et Q_{S_2}. Plus la matière s'arrache de S_1 et S_2, plus la trace d'usure devient importante au fur et à mesure des aller-retour. Ceci conduit à la formation du

troisième corps qui s'étale et réduit les interactions directes entre les premiers corps en entraînant une légère atténuation du coefficient de frottement. Ce troisième corps dynamique constitue alors le débit interne Q_i.

Troisième phase : régime permanent

Le troisième corps atteint l'extrémité de la trace d'usure et les bords latéraux sous forme de particules agglomérées. Ceci constitue alors le débit d'usure Q_u. Quand le troisième corps interne devient stable, c'est ce film interfacial qui accommode la différence de vitesse selon un mécanisme S_3M_3 et donc qui pilote le comportement tribologique.

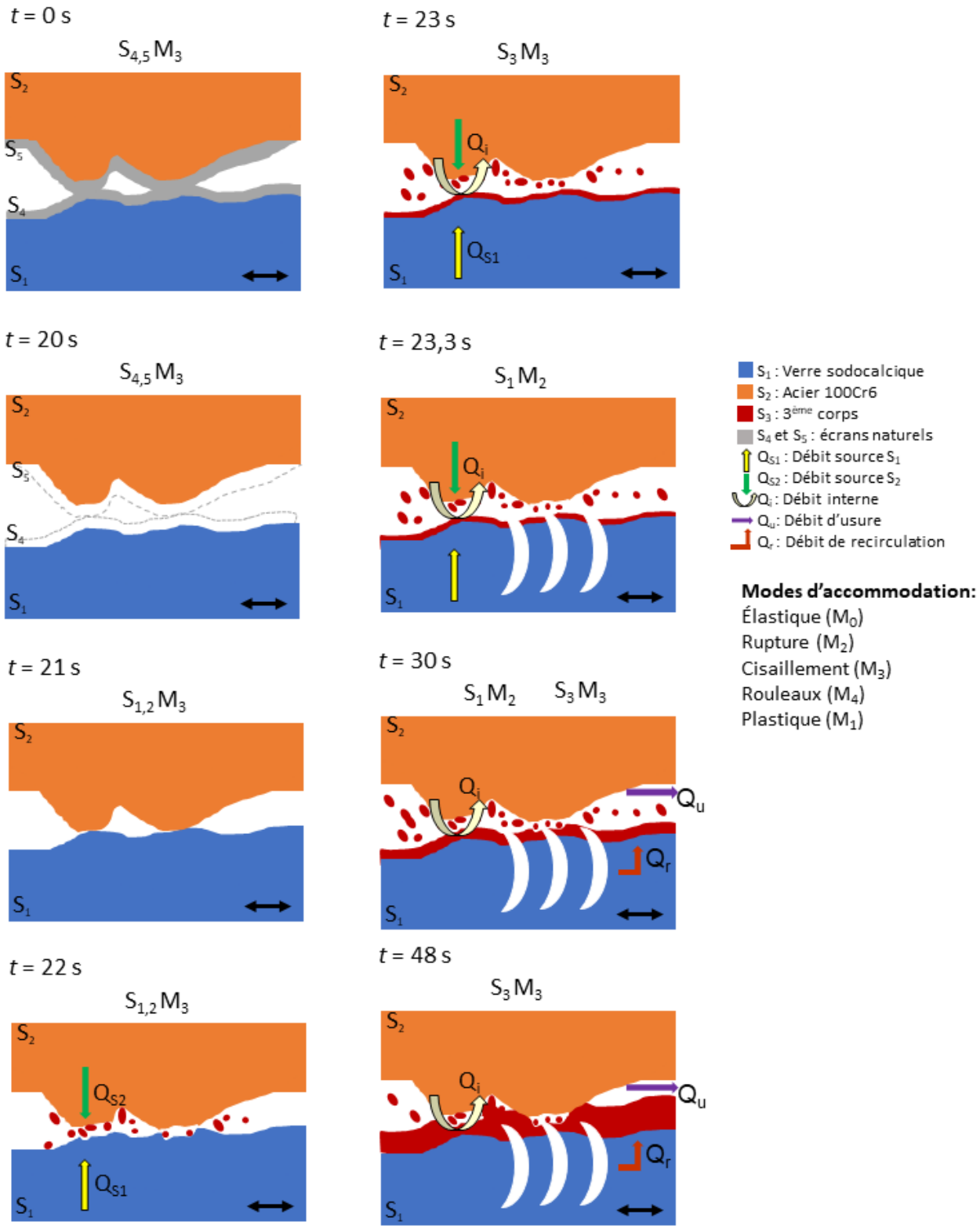


FIGURE 3.33 – Circuit tribologique pour un essai de 120 s pour le contact acier/verre sodocalcique ($\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N).

3.5 Analyse des signaux d'émission acoustique

L'analyse d'une salve acoustique permet d'extraire jusqu'à 24 paramètres acoustiques. L'analyse de l'évolution de ces paramètres permet de renseigner sur l'évolution des mécanismes d'endommagement et d'usure. Mais il peut y avoir redondance d'informations entre certains paramètres. Il est ainsi intéressant de distinguer quels sont les paramètres les plus porteurs d'information. La figure 3.34 présente un dendrogramme des descripteurs acoustiques les plus pertinents dans cette analyse. Pour cela, la suite de l'analyse des signaux acoustiques sera basée sur ces paramètres acoustiques en commençant par l'amplitude acoustique et la fréquence centroïde.

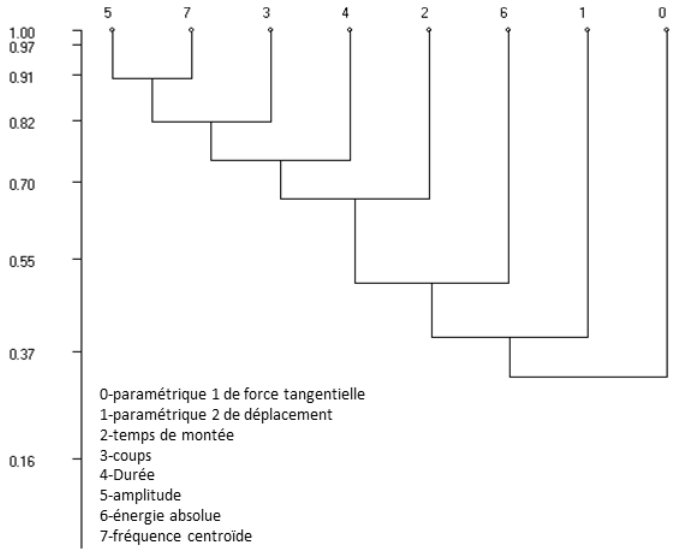


FIGURE 3.34 – Dendrogramme des paramètres d'émission acoustique les plus pertinents : (0) paramétrique 1 de force tangentielle, (1) paramétrique 2 de déplacement, (2) temps de montée, (3) nombre de coups, (4) durée, (5) amplitude, (6) énergie absolue et (7) fréquence centroïde.

3.5.1 Analyse en termes d'amplitude acoustique

L'amplitude des signaux acoustiques est l'un des paramètres temporels les plus discriminants. La figure 3.35a présente l'ensemble des cycles reconstitués à partir des signaux acoustiques paramétrés en déplacement et en force tangentielle avec une échelle en couleur pour représenter l'amplitude acoustique. L'activité acoustique est présente pendant les phases de glissement (plateaux horizontaux) où elle suit le comportement décroissant de la force tangentielle. L'activité acoustique est légèrement présente pendant les parties verticales du cycle, correspondant la phase de changement de sens.

Pour avoir une vision claire, les salves ont été séparées selon les deux phases d'activité acoustique observées durant l'essai. Plus précisément, durant la phase II (Figure 3.35b), l'activité acoustique est plus localisée durant la période de glissement. Cette activité est donc probablement associée aux évènements très énergétiques associés à la fissuration (couleur verte pour des amplitudes de l'ordre de 40 dB). Durant la phase III (Figure 3.35c), cette activité acoustique est

plus accentuée lors du changement de sens et plutôt répartie d'une façon plus homogène sur le plateau de glissement. Elle pourrait être alors associée au mécanisme d'accommodation intervenant dans la couche interfaciale et au remplissage du convergent, donc au changement de sens. Durant cette phase III, la couche interfaciale est globalement en place et les différents débits sont activés notamment les débits interne (circulation de la matière) et d'usure (éjection de la matière), ce qui explique probablement cette répartition plus homogène de l'activité d'émission acoustique sur l'ensemble du cycle. Les amplitudes acoustiques moyennes pour la phase II et la phase III sont respectivement de l'ordre de 32,9 ± 4,2 dB et 28,3 ± 1,3 dB.

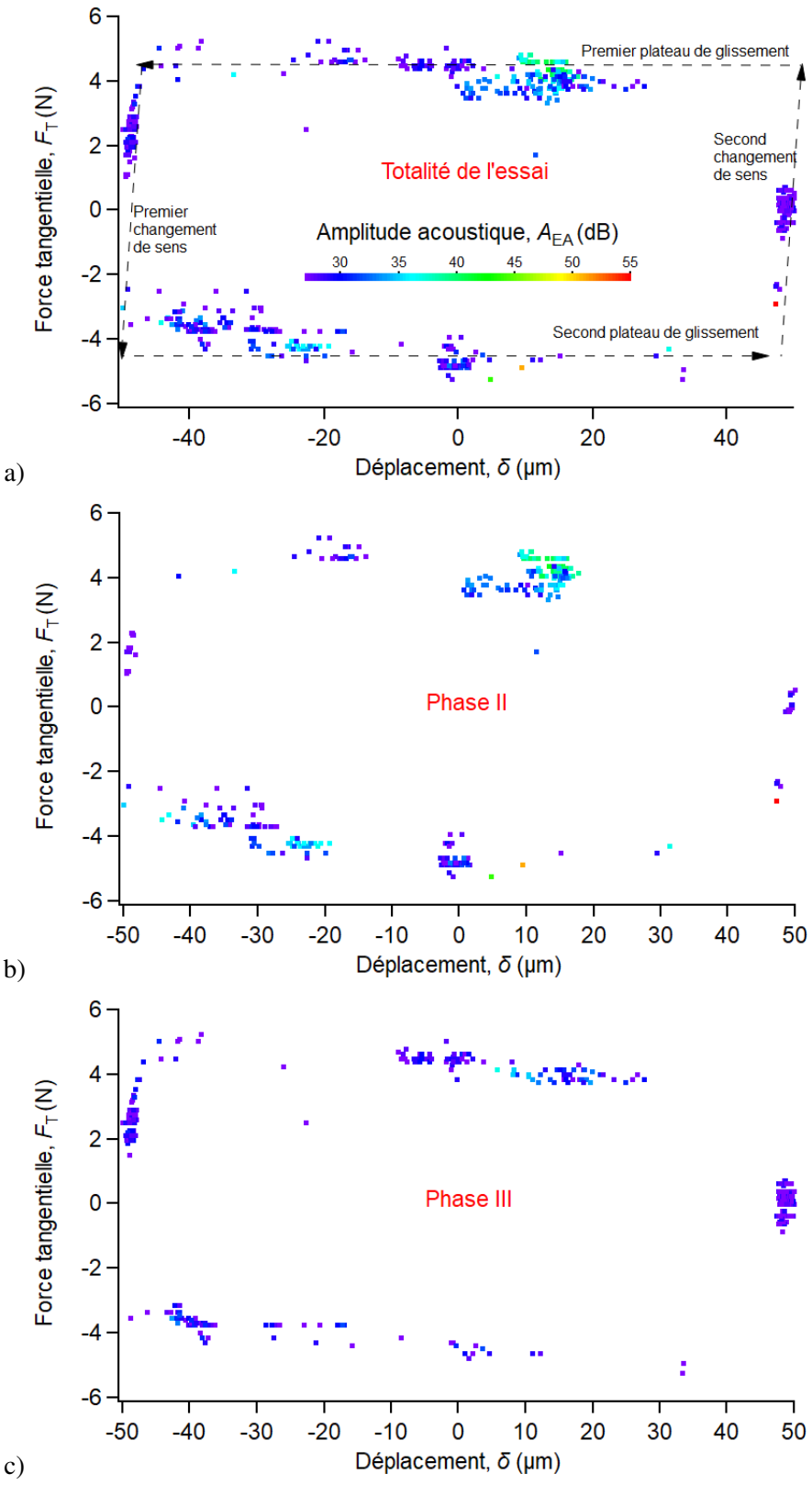


FIGURE 3.35 – Répartition des salves d'émission acoustique dans les cycles en fonction de l'amplitude pour un essai à $\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N : a) l'ensemble de l'essai, b) deuxième phase de l'essai, c) troisième phase de l'essai.

3.5.2 Analyse en termes de fréquence centroïde

L'évolution et la répartition des salves acoustiques en fonction de l'amplitude suggère l'activation de plusieurs phénomènes tribologiques et peut être corrélée avec différentes phases de l'essai. Néanmoins, il est important d'analyser les fréquences centroïdes associées à ces salves acoustiques pendant l'essai. Ces fréquences renseignent aussi sur le type de mécanisme au sein du contact. La figure 3.36 montre la répartition des salves acoustiques dans le cycle avec une échelle de couleurs qui représente la variation de la fréquence centroïde. Celle-ci varie entre 350 kHz et 750 kHz.

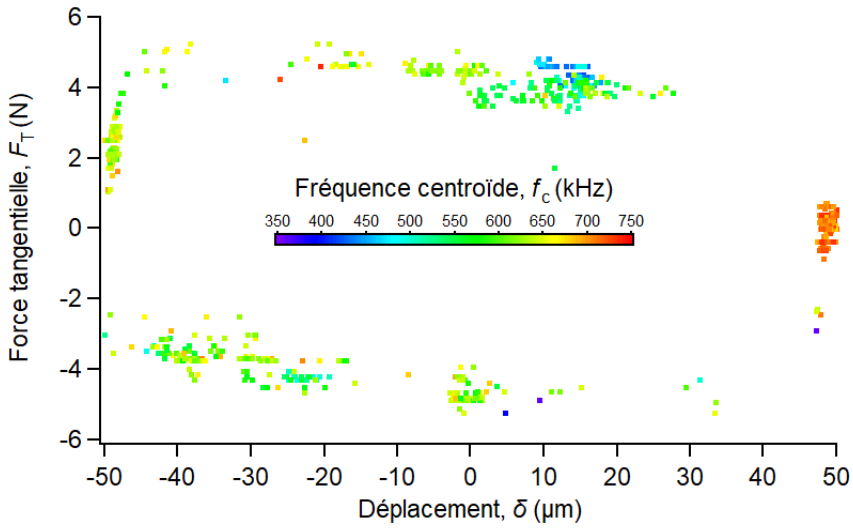


FIGURE 3.36 – Répartition des salves d'émission acoustique dans les cycles en fonction de la fréquence centroïde pour un essai à $\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N.

Par ailleurs, la figure 3.37 présente la distribution des salves acoustiques en fonction de la fréquence centroïde pendant la phase II et la phase III.

— Pendant la phase II (Figure 3.37a) la fréquence centroïde s'étale sur un large domaine de 365 à 740 kHz. Plusieurs pics de fréquence centroïde sont présents. Comme cette phase correspond à l'étape transitoire de l'essai où plusieurs phénomènes ont lieu, son domaine fréquentiel ne peut pas à cette étape d'analyse être aisément divisé en bande fréquentielle associée à des mécanismes d'endommagement ou d'usure à cause du chevauchement des ondes acoustiques issues de sources différentes et émises en même temps.

— Pendant la phase III, la distribution des salves (Figure 3.37b), montre un domaine fréquentiel moins largement étalé entre 487 kHz et 750 kHz. Il est remarquable que la distribution des salves enregistre un décalage de la fréquence centroïde. En effet, une population des salves est supprimée par rapport à la phase II et correspond au plage de fréquence entre 350 kHz et 480 kHz.

Pour pouvoir distinguer plus clairement des bandes fréquentielles et les attribuer à des mécanismes d'endommagement et d'usure, une analyse des salves acoustiques est effectuée dans le paragraphe suivant en s'appuyant sur une analyse en composantes principales (ACP).

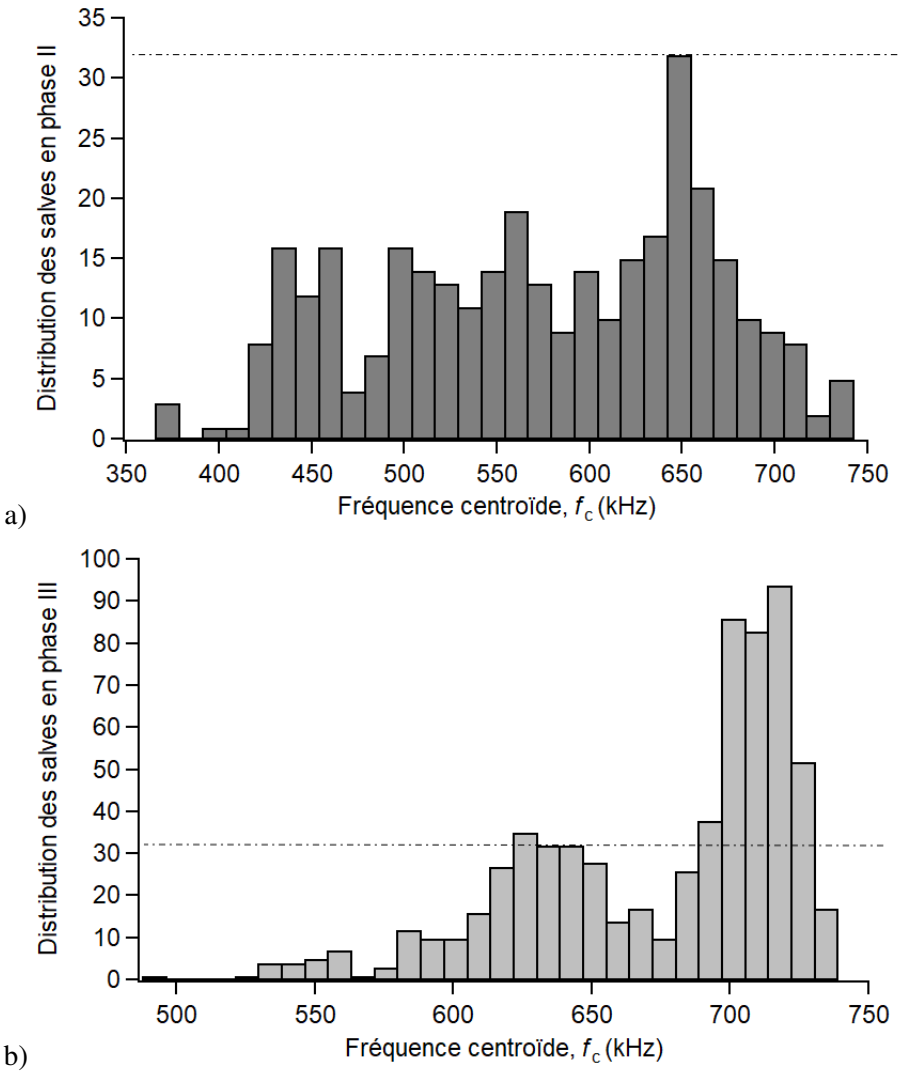


FIGURE 3.37 – Distribution des salves en fonction de la fréquence centroïde pour l'essai réalisé à $\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N : a) deuxième phase de l'essai, b) troisième phase de l'essai.

3.5.3 Analyse en termes de glissement et de changement de sens

À partir de la répartition des salves dans les cycles paramétrés en force tangentielle et en déplacement, quatre classes de salves peuvent être distinguées visuellement (Figure 3.38). Le choix de ce classement est basé sur la présence des salves dans :

— Deux parties horizontales correspondant au premier et au second plateau de glissement.

— Deux parties verticales correspondant au premier et au second changement de sens.

La comparaison des différentes classes montre une évolution énergétique importante des salves appartenant au premier et au second plateau de glissement et moins énergétique pour les salves des deux changements de sens (Figure 3.39).

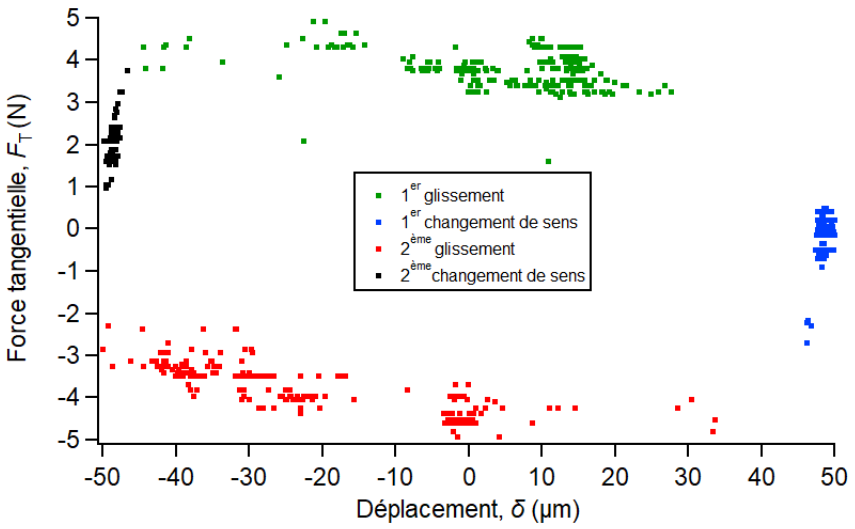


FIGURE 3.38 – Répartition des salves d'émission acoustique dans les cycles en fonction des plateaux de glissement et des changements de sens pour un essai à $\delta = \pm 50$ µm, $f = 10$ Hz, $F_N = 5$ N.

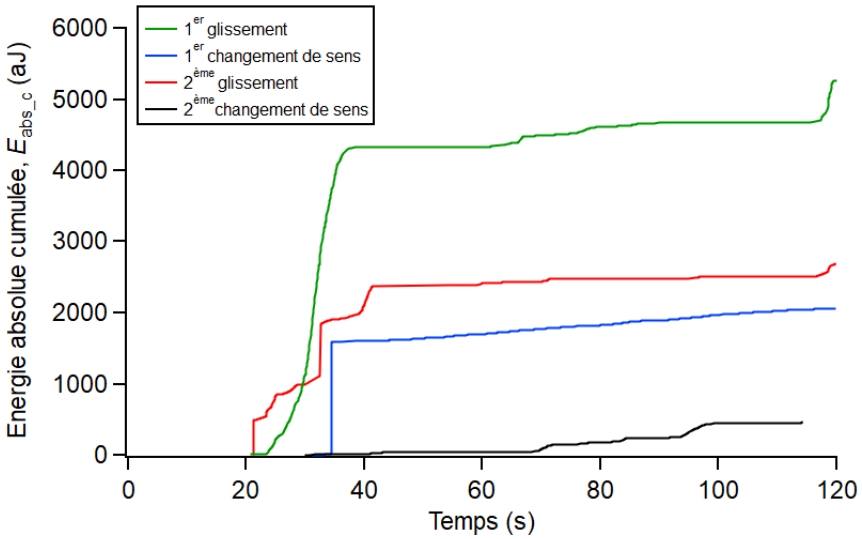


FIGURE 3.39 – Évolution de l'énergie absolue cumulée en fonction du temps pour les deux plateaux de glissement et les deux changement de sens.

3.6 Classification et identification des salves acoustiques

Les données d'émission acoustique sont généralement complexes, et cela d'autant plus lorsque plusieurs mécanismes d'endommagement et d'usure de signatures acoustiques différentes interviennent simultanément. L'analyse temporelle réalisée dans la partie précédente a permis de fournir des indices suffisants pour dissocier les différents mécanismes d'endommagement et d'usure. Cependant, certaines signatures acoustiques peuvent se chevaucher. Pour cela, la technique de reconnaissance de forme représente une alternative intéressante permettant de dissocier les différents mécanismes d'endommagement et d'usure. Cette technique permet en effet de regrouper les signaux similaires dans des classes. Chaque classe peut être reliée à un mécanisme

spécifique. Dans cette étude, le logiciel Noesis a été utilisé pour la classification des signaux à l'aide de plusieurs méthodes. Le choix s'est porté sur la méthode manuelle (présenté dans le chapitre 2) puisque sa mise en œuvre est assez aisée et qu'elle fournit des résultats très proches des résultats obtenus par la méthode de k-moyenne qui est, à son tour, largement utilisée dans la littérature pour la classification des signaux acoustiques.

La méthodologie décrite dans ce paragraphe est mise au point à partir des résultats obtenus pendant l'essai de 120 s pour le contact acier/verre sodocalcique (δ = ± 50 µm, f = 10 Hz, F_N = 5 N). L'analyse des résultats est réalisée, tout d'abord, en utilisant une analyse en composantes principales (ACP). Cette méthode est associée à un algorithme de réduction des données. Elle consiste à rechercher les directions de l'espace qui représentent le mieux les corrélations entre plusieurs variables. Ainsi, l'ACP permet d'analyser la répartition graphique des classes. En effet, dans le cas où les données expérimentales se recouvrent fortement, une projection dans un espace de petite dimension facilite la visualisation des données. Cette visualisation, faisant ressortir les similitudes entre les salves, va permettre d'interpréter et de valider la classification obtenue. Afin de choisir judicieusement les descripteurs, un dendrogramme de classification est déterminé après avoir supprimé les paramètres redondants ne donnant aucune information supplémentaire de la nature physique des signaux (Figure 3.40).

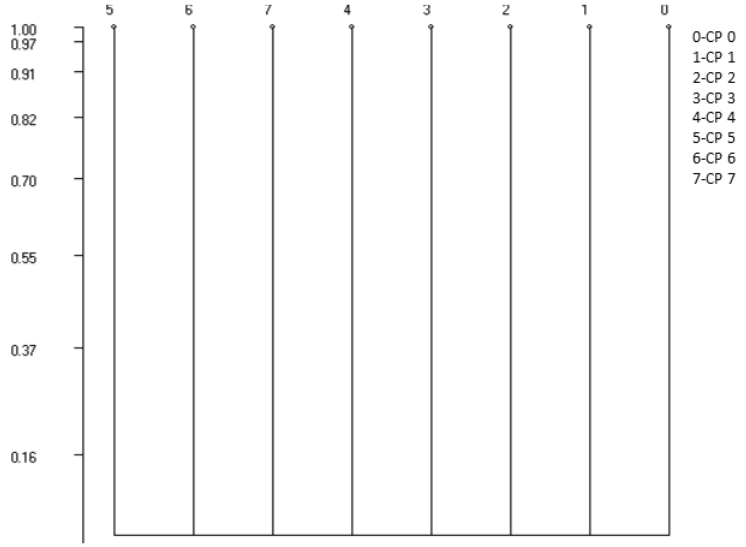


FIGURE 3.40 – Dendrogramme de classification des données d'émission acoustique après le choix des composantes principales.

Afin d'exploiter au maximum les paramètres des signaux d'émission acoustique, les résultats de l'analyse en composantes principales ont été combinés à la visualisation temporelle des mécanismes à travers la vidéo pour une meilleure discrimination des signaux. Trois classes ont été ainsi retenues pour le contact acier/verre (Figure 3.41). Il est à noter que l'attribution de chaque mécanisme d'endommagement et d'usure à une classe de salves sera justifiée par la suite avec des images extraites de la vidéo.

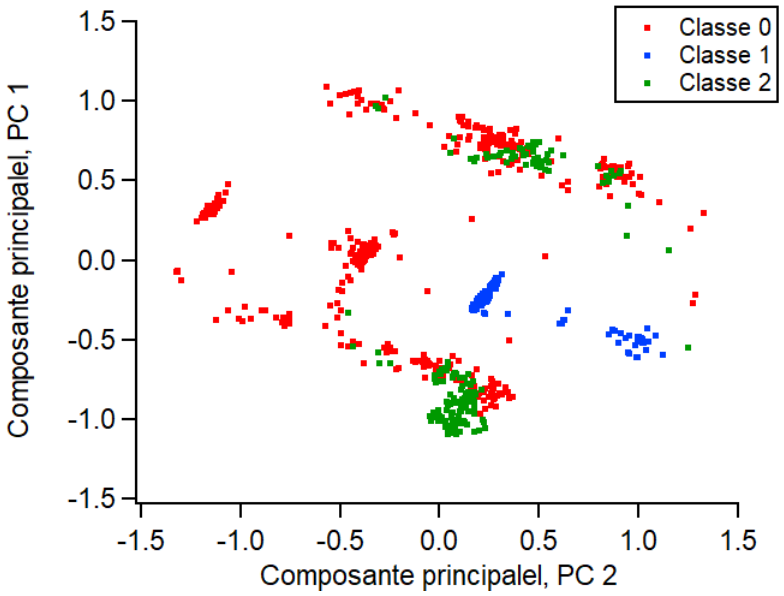


FIGURE 3.41 – Visualisation des classes selon la représentation de deux composantes principales PC1 et PC2.

La figure 3.42 présente la classification des salves selon les trois classes notées respectivement classe 0, classe 1 et classe 2 (Figure 3.42) :

— La classe 0 (rouge) est la première qui apparaît dans la chronologie. Cette classe de salves, d'énergie acoustique moyenne, continue à progresser sur toute la durée de l'essai.

— La classe 2 (verte) apparaît en deuxième, juste après la classe 0 et se produit pendant une vingtaine de secondes puis disparaît (plus de salves détectées). L'énergie acoustique de cette classe est très importante par rapport aux deux autres classes et est associée à la fréquence centroïde la plus faible.

— La classe 1 (bleue) apparaît en dernier. Elle est caractérisée par une énergie acoustique faible et une fréquence centroïde élevée. Dès son apparition, cette classe (comme la classe 0) maintient son activité jusqu'à la fin de l'essai.

Les différentes caractéristiques acoustiques de ces trois classes sont représentées dans le tableau 3.9.

À travers ces résultats ainsi que les résultats présentés dans le paragraphe 3.2.2 :

— La classe 0 sera attribuée au mécanisme mis en jeu dans la création et l'évolution du troisième corps.

— La classe 1 représente le mécanisme du remplissage du convergent par les débris de matière.

— La classe 2 est associée au mécanisme d'endommagement lié à la fissuration du verre.

Pour justifier cette labellisation, les trois différentes classes seront présentées séparément avec des images extraites de la visualisation de l'interface du contact.

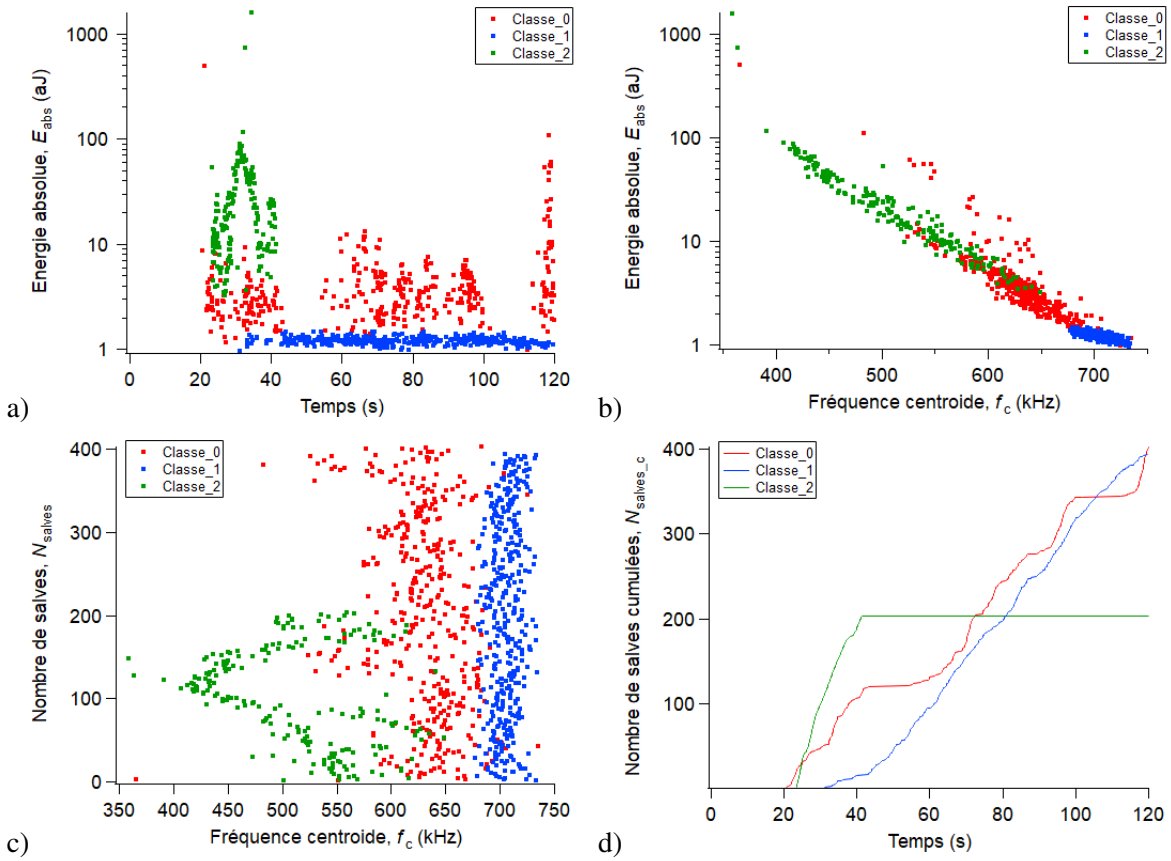


FIGURE 3.42 – Évolution des signaux d'émission acoustique des trois classes pour le contact acier/verre. Classe 0 : Création du troisième corps, Classe 1 : remplissage du convergent et Classe 2 : fissuration du verre.

Caractéristiques acoustiques	Classe 0	Classe 1	Classe 2
Amplitude acoustique, A_{EA} (dB)	27 - 49	27 - 31	27 - 55
Énergie absolue, E_{abs}(aJ)	1 - 496	1 - 1,5	3,3 -1580
Fréquence centroïde, f_c (kHz)	366 - 735	677 - 734	359 - 649
Durée de salve (µs)	0 - 4065	0 - 1893	192 - 2707
Temps de montée (µs)	0 - 1269	0 - 885	0 - 549

TABLE 3.9 – Caractéristiques acoustiques des salves associées aux interactions mécaniques.

3.6.1 Étude du mécanisme d'usure associé à la création et l'évolution du troisième corps

La représentation de l'activité acoustique de la classe 0 associée à la création et à l'évolution du troisième corps en fonction du temps a permis de monter que les salves de cette classe sont réparties sur une gamme de fréquence centroïde comprise entre 366 kHz et 735 kHz avec un pic de fréquence situé à environ 642 ± 2 kHz (Figure 3.43). La représentation de l'énergie absolue en fonction du temps montre que ces salves apparaissent d'une manière discontinue (Figure 3.44).

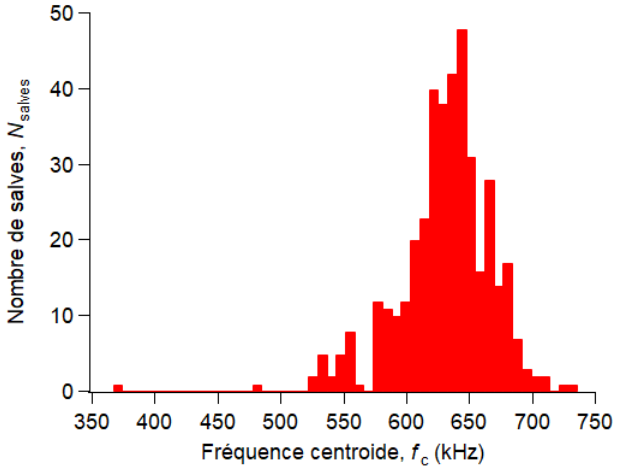


FIGURE 3.43 – Distribution des salves en fonction de la fréquence centroïde de la classe 0.

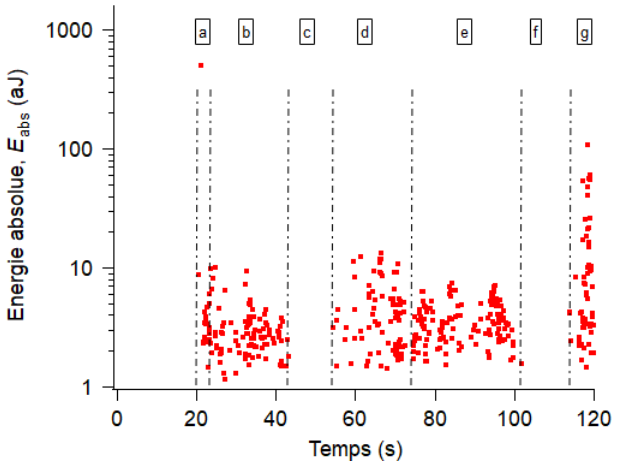
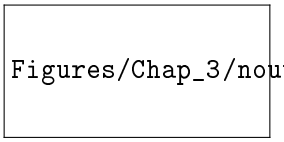


FIGURE 3.44 – Évolution des signaux d'émission acoustique du mécanisme d'usure associé à la création et l'évolution du troisième corps pour le contact acier/verre.

L'analyse simultanée de ce mécanisme d'usure et de l'activité acoustique a permis d'identifier la différence entre chaque groupe de salves. Ces résultats indiquent, que lorsque des interactions directes entre les surfaces des échantillons d'acier et du verre se produisent, entraînant la création/rupture de jonctions entre premiers corps, des salves acoustiques sont générées. Ces

salves sont mentionnées sur la figure 3.44 par la lettre (a). Ces salves ne sont pas denses mais elles représentent une énergie absolue importante. La figure 3.45 montre l'état de la surface du contact associé à ces salves avant apparition du mécanisme de fissuration du verre. Ensuite, le groupe de salves mentionné par la lettre (b) apparaît en même temps que la fissuration avec une énergie absolue maximale de l'ordre de 10 aJ. La visualisation en direct a montré que le film interfacial constitué des débris du troisième corps évolue (Figure 3.46). Cependant, ce film interfacial est discontinu. Une zone centrale, entourée par un cercle blanc en pontillé sur les images, se montre au début appauvrie en débris et par la suite elle commence à s'alimenter jusqu'à l'obtention d'un film continu.



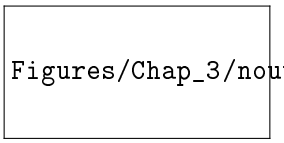
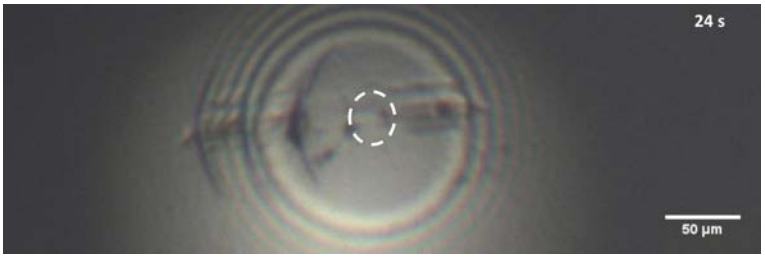
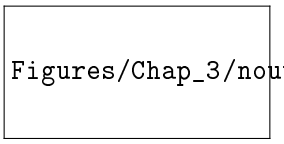
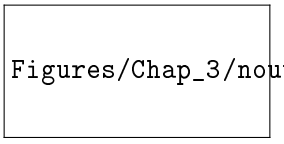


FIGURE 3.45 – Images extraites de la vidéo et associées aux salves de la classe 0 dans la partie (a).







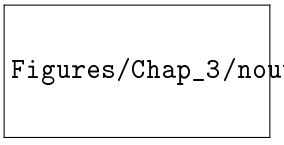
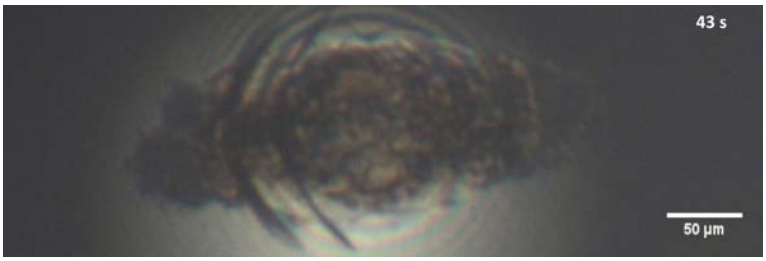


FIGURE 3.46 – Images extraites de la vidéo et associées aux salves de la classe 0 dans la partie (b).

La classe 0 présente une discontinuité dans la partie mentionnée par la lettre (c). La visualisation de la vidéo montre que la zone centrale observée dans la partie (b) est totalement couverte par les débris de matière formant ainsi le film interfacial continu (Figure 3.47). Malgré la présence d'une zone marron (entourée en blanc) au centre du contact qui ne semble pas avoir la même épaisseur que le reste, ce film jour le rôle d'une couche protectrice. Ainsi, aucune salve

n'est générée. Il est noté aussi que cette zone marron conserve approximativement sa forme patatoïdale pendant ce temps là.

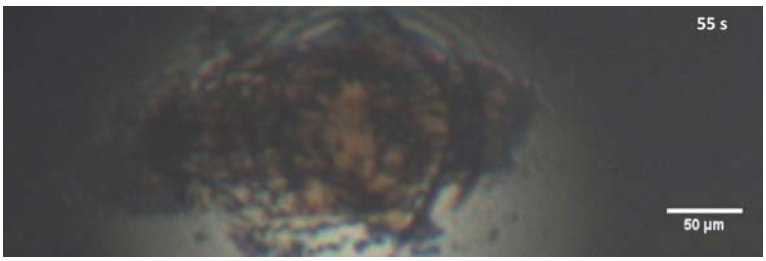
Après la discontinuité en (c), des salves apparaissent dans la zone (d). L'observation de la vidéo montre que la zone marron localisée dans la partie (c) commence à se recouvrir de débris (Figure 3.48) jusqu'à disparaître totalement. Les salves générées dans cette zone sont caractérisées par une énergie absolue maximale de l'ordre de 14 aJ. Ces salves pourraient ainsi correspondre à la recirculation des débris dans le contact.



Figures/Chap_3/nouveaux clusters/cluster 0/50 s_c.png

Figures/Chap_3/nouveaux clusters/cluster 0/54_s_c.png

FIGURE 3.47 – Images extraites de la vidéo et associées aux salves de la classe 0 dans la partie (c).



Figures/Chap_3/nouveaux clusters/cluster 0/57 s _d.png

Figures/Chap_3/nouveaux clusters/cluster 0/74 s_d.png

FIGURE 3.48 – Images extraites de la vidéo et associées aux salves de la classe 0 dans la partie (d).

Un groupe de salve apparaît dans la zone (e) avec une énergie absolue plus faible par rapport

à celle des salves de la zone (d). L'énergie absolue maximale est de l'ordre de 8 aJ. La visualisation indique qu'une zone du film interfacial devient moins sombre (Figure 3.49). Les débris de matière circulent dans le contact. Autrement dit, le film interfacial redevient discontinu et ne joue plus totalement le rôle de couche protectrice d'où la génération des salves acoustiques. Ensuite, une deuxième discontinuité des salves apparaît dans la zone (f). Les images extraites de la vidéo montrent encore une fois un film interfacial continu (Figure 3.50). Enfin, des salves apparaissent à nouveau durant les dernières secondes d'essai (dans la zone g). À cet instant d'essai, la visualisation montre un film interfacial continu similaire à celui observé précédemment (Figure 3.51). Cependant, les salves acoustiques sont très énergétiques. L'énergie absolue atteint les 100 aJ. Ceci laisse supposer qu'une circulation de débris de grande taille dans le contact génère ces salves. En effet, les images au MEB réalisées sur l'échantillon du verre après la durée de l'essai a montré la présence de débris de taille très importantes éjectés hors du contact (Figure 3.11).

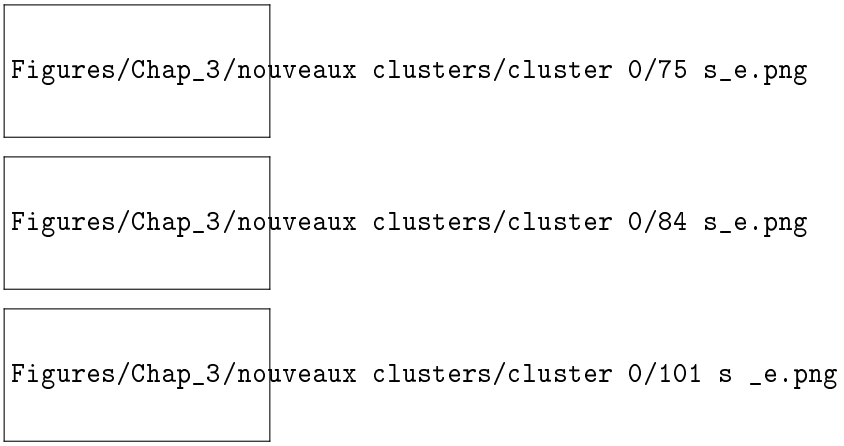


FIGURE 3.49 – Images extraites de la vidéo et associées aux salves de la classe 0 dans la partie (e).

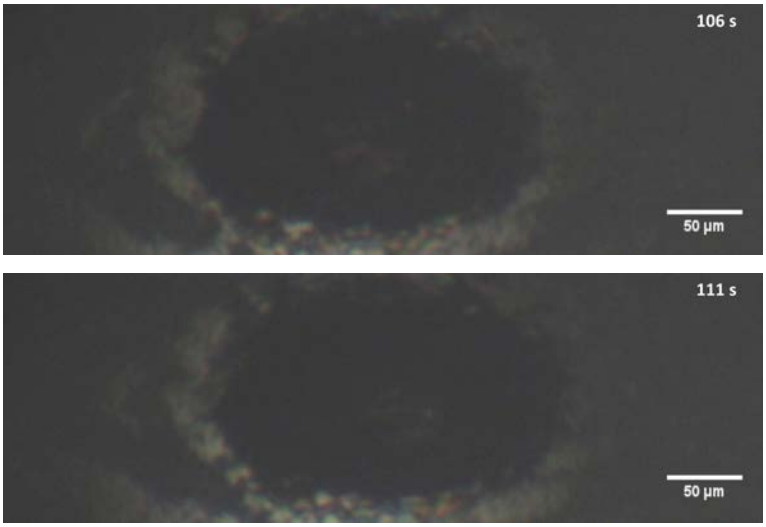


FIGURE 3.50 – Images extraites de la vidéo et associées aux salves de la classe 0 dans la partie (f).



FIGURE 3.51 – Images extraites de la vidéo et associées aux salves de la classe 0 dans la partie (g).

3.6.2 Étude du mécanisme associé au remplissage du convergent

La classe 1 apparaît dès 31 s d'essai et évolue jusqu'à 120 s. Ces salves sont caractérisées par une énergie absolue très faible d'une valeur maximale de l'ordre de 1,5 aJ. Leur fréquence centroïde est répartie sur une gamme de fréquence comprise entre 677 kHz et 734 kHz (Figure 3.52). La représentation des salves sur les cycles reconstitués en force tangentielle et en déplacement montre que ce groupe de salves fait son apparition lors d'un seul changement de sens (Figure 3.53).

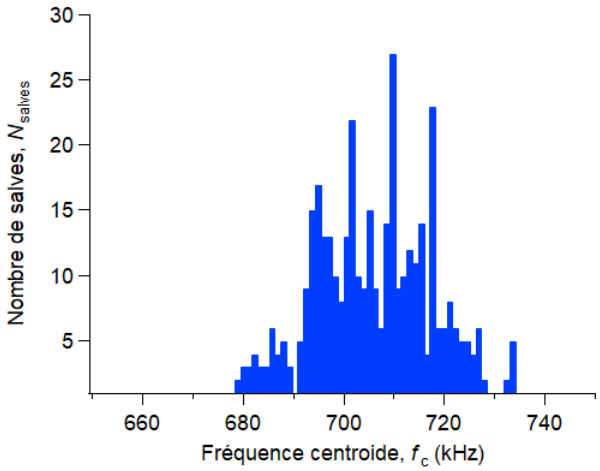


FIGURE 3.52 – Distribution des salves en fonction de la fréquence centroïde de la classe 1.

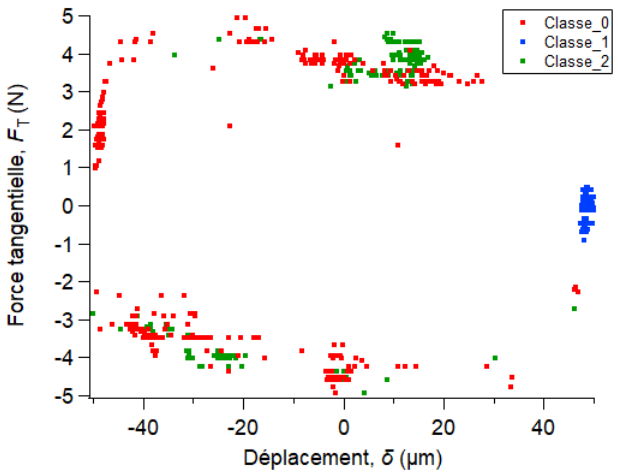


FIGURE 3.53 – Reconstitution des salves de trois différentes classes.

Pour justifier leur présence dans un seul changement de sens, une série d'images extraites de la vidéo est présentée dans la figure 3.54. Les images à gauche présentent l'état du contact dans le changement de sens où les salves apparaissent alors que les images à droite présentent l'état du contact dans l'autre changement de sens de glissement. L'ensemble des images a été pris entre 31 s et 38 s permettant ainsi de mieux observer le film interfacial avant que son extension cache la totalité de la surface du contact à partir de 48 s d'essai.

De premier abord, il est à noter que lorsque le glissement se fait de gauche à droite et lorsque les fissures apparaissent à gauche à l'arrière du contact, une quantité de débris de matière semble se déplacer pour s'incruster entre les fissures constituant ainsi une zone très sombre dans le film interfacial (Ces zones sont entourées par des cercles pointillés en blanc dans les images de la colonne de gauche de la figure 3.54). Or, lorsque le glissement sa fait dans le sens contraire, c'est-à-dire de droite à gauche, et que les fissures apparaissent à droite à l'arrière du contact, les débris de matière ne semblent pas se déplacer pour se piéger entre les fissures et former une couche sombre (Ces parties concernées sont entourées par des cercles pointillés en vert dans les images de la colonne de droite de la figure 3.54) d'où l'attribution de la classe 1 au remplissage du convergent de débris de matière.

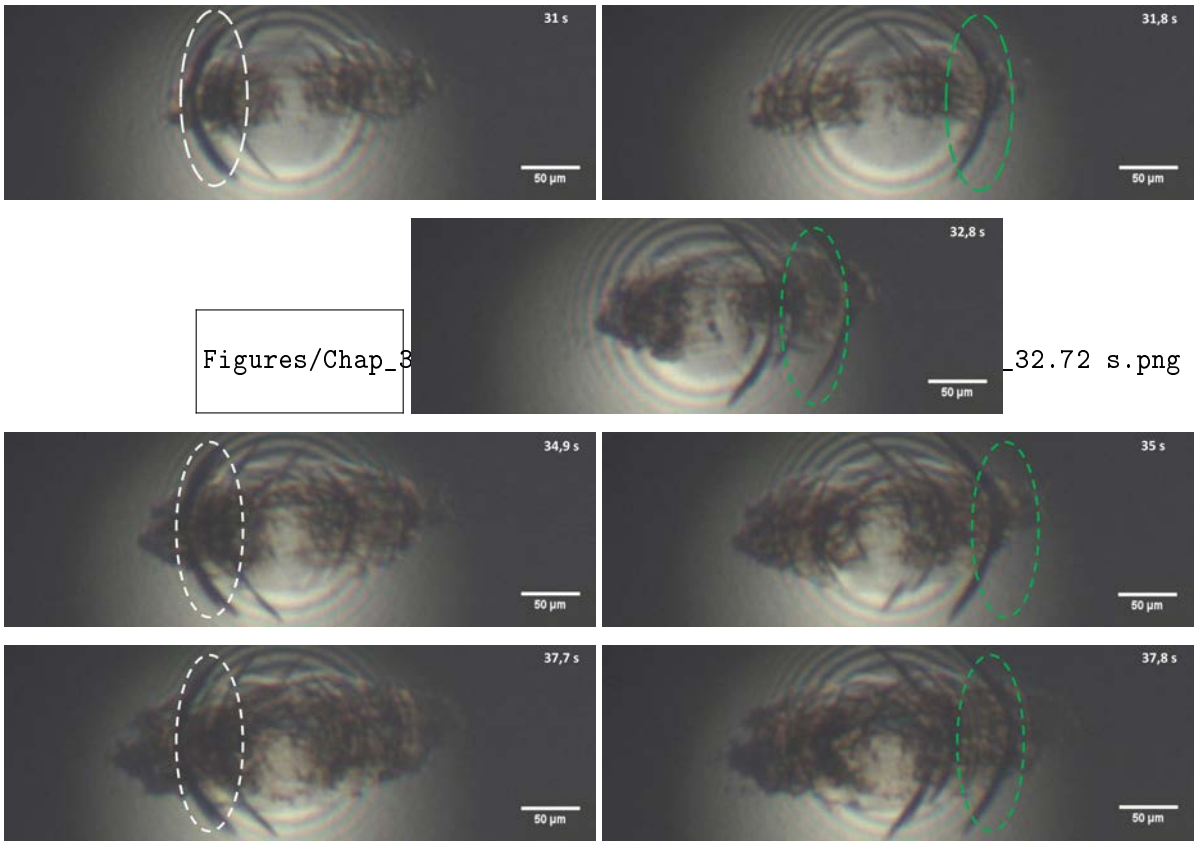


FIGURE 3.54 – Images extraites de la vidéo et associées aux salves de la classe 1. Les images présentées à gauche sont dans le premier changement de sens. Les images présentées à droite sont dans le deuxième changement de sens.

3.6.3 Étude du mécanisme d'endommagement associé à la fissuration du verre

Il a été précédemment montré que la fissuration s'initie pendant la deuxième phase de l'essai. La longueur et l'ouverture de ces fissures évoluent progressivement jusqu'à 42 s pour suivre par la suite une stabilisation pendant la troisième phase de l'essai (Figure 3.16). Ainsi, la classe 2 associée à la fissuration du verre est représentée dans la figure 3.55. L'énergie absolue maximale atteinte par cette classe est de l'ordre de 1600 aJ. Leurs fréquences centroïdes varient entre 359 kHz et 649 kHz (Figure 3.56). Les images présentées dans la figure 3.57 montrent l'évolution de la taille des fissures entre 20 s et 40 s d'essai

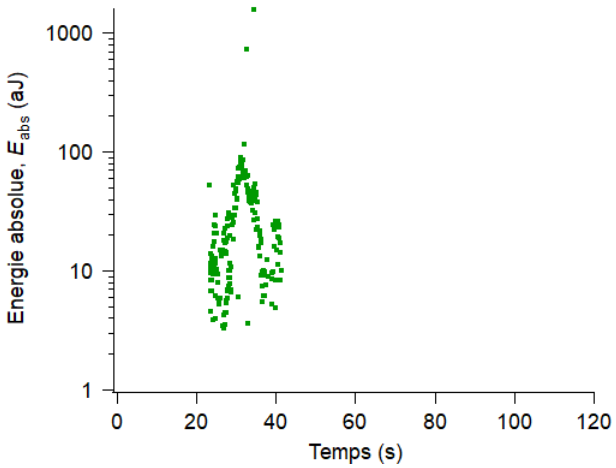


FIGURE 3.55 – Évolution des signaux d'émission acoustique de mécanisme d'usure associé à la création et l'évolution du troisième corps pour le contact acier/verre.

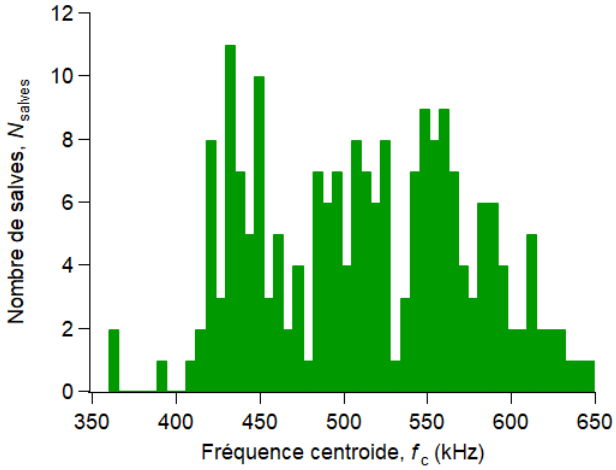


FIGURE 3.56 – Distribution des salves en fonction de la fréquence centroïde de la classe 2.

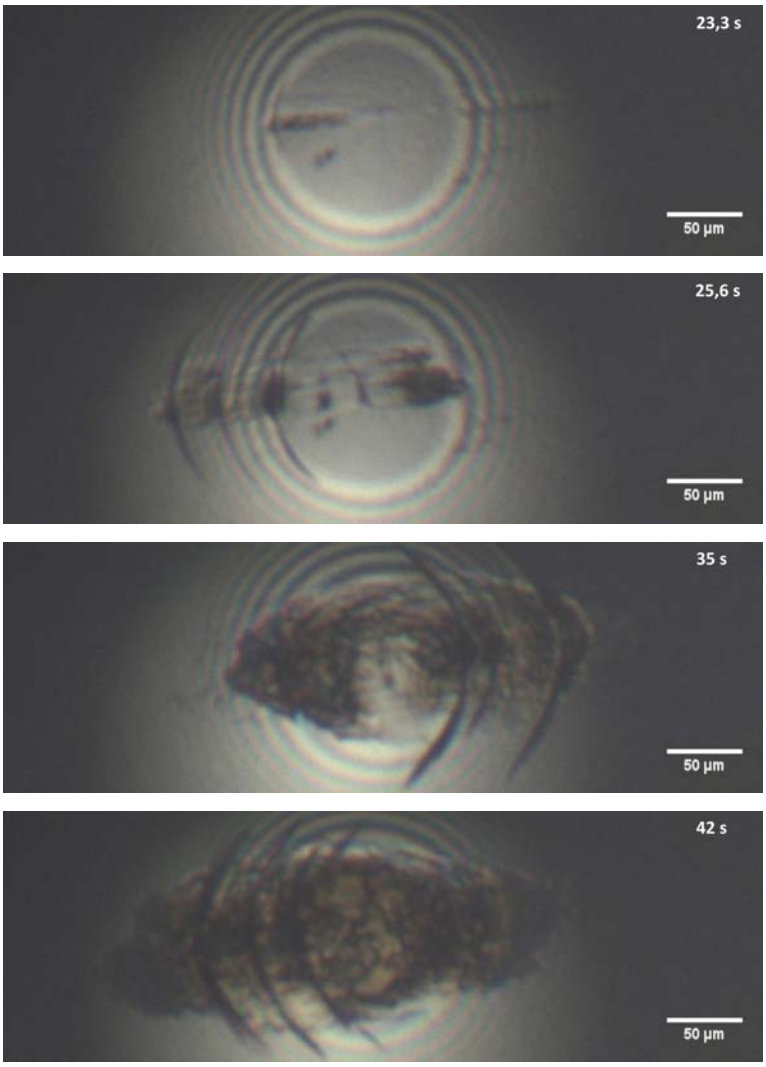


FIGURE 3.57 – Images extraites de la vidéo et associées aux salves de la classe 2.

La série d'images dans la figure 3.58 montre la stabilisation de la fissuration. Les fissures ne se propagent plus parallèlement à la surface du contact. Les mêmes fissures semblent apparaître à l'arrière du contact tout en conservant la même position et les mêmes caractéristiques. Ce qui laisse supposer que les fissures continuent à s'ouvrir dans la direction de glissement et à se fermer dans le sens inverse. L'activité acoustique ainsi générée est très faible. Elle n'est pas détectée en dessous du seuil expérimental fixé en début d l'essai.

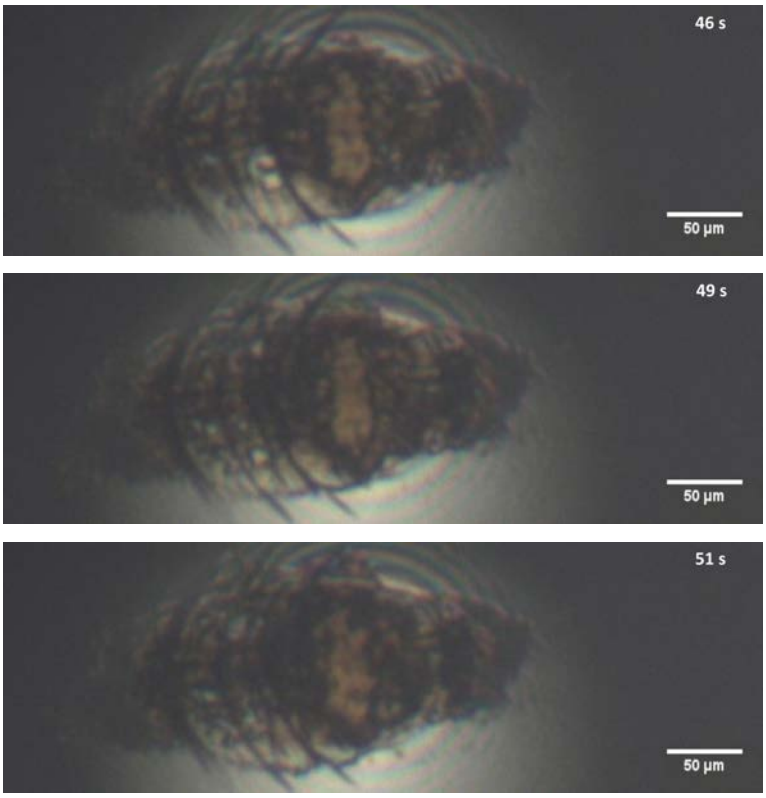


FIGURE 3.58 – Images extraites de la vidéo montrant la stabilisation des fissures.

La figure 3.59 présente l'évolution de l'accroissement des ouvertures des fissures et la fréquence centroïde en fonction du temps. L'accroissement des fissures correspond à l'évolution de l'ouverture en passant d'un instant de mesure à un autre. Ces résultats montrent que l'accroissement le plus important de l'ouverture des fissures (à un temps d'essai de 33,8 s représenté par un trait en pointillé) correspond à la valeur de la fréquence centroïde la plus basse (359 kHz).

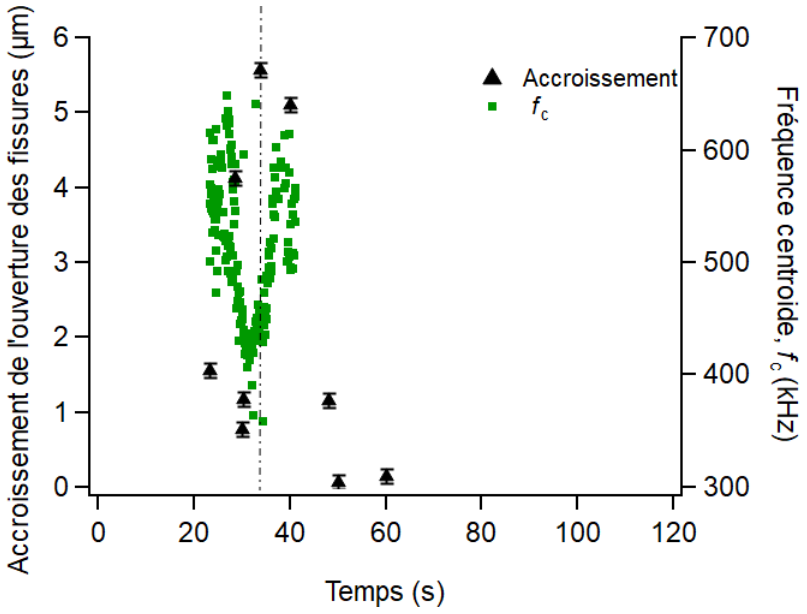


FIGURE 3.59 – Représentation de l'accroissement de l'ouverture des fissures et de la fréquence centroïde en fonction du temps.

3.7 Synthèse partielle

Les travaux exposés dans cette partie comprennent l'étude du comportement tribologique de l'échantillon en verre sodocalcique contre une bille en acier 100Cr6 dans des conditions d'essai constantes en déplacement (δ = ± 50 µm), en fréquence d'excitation (f = 10 Hz) et en charge normale (F_N = 5 N). L'évolution temporelle du coefficient de frottement a montré l'existence de trois différentes phases en cours d'essai correspondant à un régime de frottement bas, un régime transitoire et un régime permanent. Une campagne d'essai de reproductibilité a permis de confirmer l'allure générale des courbes de frottement dont :

— Le régime de frottement bas présente un coefficient de frottement moyen de l'ordre de 0,13 ± 0,01.
— Le régime transitoire conduit à un coefficient de frottement maximal moyen de l'ordre de 0,88 ± 0,05.
— Le régime permanent présente un coefficient de frottement stabilisé moyen de l'ordre de 0,75 ± 0,04.

L'observation en direct des surfaces glissantes a permis de conclure sur un scénario plus précis pour décrire l'évolution des mécanismes d'endommagement et d'usure.

— Le premier régime correspond à un glissement dans des écrans naturels ne provoquant aucune dégradation des surfaces.
— Le régime transitoire voit la création des premiers contacts intimes entre premiers corps et occasionne l'apparition de défauts en surface du verre avec la formation des premiers débris, l'apparition concomitante des fissures hertziennes, puis la constitution d'un tribofilm de plus en plus épais.
— Le régime permanent s'établit lorsqu'un tribofilm continu et compact à envahit tout le contact et commence à s'évacuer à l'extérieur.

La technique d'émission acoustique, synchronisée avec de l'observation *in situ*, a permis de détecter une activité en concordance avec les résultats tribologiques ce qui a permis de mieux identifier les mécanismes d'endommagement et d'usure. Certaines corrélations ont pu être identifiées :

— L'amplitude acoustique augmente lorsque le coefficient de frottement augmente et lorsque les fissures enregistrent une ouverture plus importante.
— L'énergie acoustique absolue cumulée suit la variation du coefficient de frottement ainsi que la variation des longueurs des fissures hertziennes.

De plus, des signatures acoustiques ont été associées aux mécanismes élémentaires mis en jeu :

— L'apparition des fissures de Hertz correspond à une fréquence centroïde de 474 ± 37 kHz.
— L'accommodation dans le troisième corps correspond à une fréquence centroïde autour de 650 ± 1 kHz.

En utilisant la méthode d'identification et de classification des phénomènes à travers l'analyse en composantes principales et la visualisation de la vidéo, trois différentes classes de salves ont été identifiées :

— Une classe correspondant à la création et au développement du troisième corps.
— Une classe correspondant au phénomène de remplissage du convergent par des débris de

matière.

— Une classe associée à l'initiation et la propagation des fissures.

Le chapitre suivant est dédié à l'étude de l'influence des conditions opératoires (charge normale, fréquence d'excitation et amplitude de déplacement) sur les réponses tribologiques et acoustiques tout en permettant un suivi des mécanismes d'endommagement et d'usure.

Chapitre 4

Réponses tribo-acoustiques du contact acier/verre sous différentes conditions opératoires

---

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'influence des paramètres opératoires sur la réponse tribologique et acoustique du contact acier/verre. Pour cela, une première partie porte sur l'étude de l'influence de la charge normale ainsi que de la fréquence d'excitation sur l'évolution des paramètres tribologiques. Une deuxième partie est consacrée à l'étude de l'évolution globale de l'activité acoustique en fonction des paramètres opératoires. Une troisième partie présente l'évolution des caractéristiques acoustiques des classes de salves attribuées à l'établissement du troisième corps, à l'apparition de fissures hertziennes et à un phénomène de remplissage du convergent associé à la recirculation et/ou l'éjection des débris de matière.

4.1 Introduction

Les travaux présentés dans ce dernier chapitre visent par l'analyse des données tribologiques et d'émission acoustique à préciser la manifestation de la fissuration et la création et l'évolution du troisième corps en particulier lors des phases transitoires. Pour cela, une campagne d'essais a été réalisée en utilisant le même couple de matériaux acier 100Cr6/verre sodocalcique afin de connaître l'influence des paramètres opératoires telles que la charge normale, la fréquence d'excitation et l'amplitude de déplacement sur les réponses tribo-acoustiques. Les conditions opératoires pour cette campagne sont définies dans le tableau 4.1. Ce tableau montre un total de neuf essais effectués à 1800 cycles (soit une distance totale parcourue identique de 0,36 m). Il s'agit d'une durée de 180 s pour une fréquence d'excitation de 10 Hz, 120 s pour une fréquence d'excitation de 15 Hz et 90 s pour une fréquence d'excitation de 20 Hz. Le rayon de contact de Hertz ainsi que la pression hertzienne maximale au centre du contact sont aussi présentés. Pour plus de précision des réponses tribo-acoustiques, les essais ont été répétés trois fois avec respect des conditions de manipulation telles que le nettoyage des échantillons, l'application de la charge normale ou encore la mise en route des essais. Cette campagne d'essai a été réalisée sur des périodes de l'année et des plages horaires très différentes. Cependant, l'influence des conditions environnementales a été considérée comme peu significative.

δ (µm)	f (Hz)	F_N (N)	R_{Hertz} (µm)	$P_{contact}$ (MPa)	N_c
± 50	10	5	58	700	1800
		10	74	882	
		15	84	1010	
	15	5	58	700	
		10	74	882	
		15	84	1010	
	20	5	58	700	
		10	74	882	
		15	84	1010	

TABLE 4.1 – Conditions d'essais permettant d'étudier l'influence des paramètres opératoires sur les mécanismes tribologiques et acoustiques du contact acier/verre.

4.2 Réponses tribologiques et acoustiques

La figure 4.1 compile les résultats expérimentaux obtenus pour les neuf essais. Chaque figure est un essai représentatif dans les conditions choisies. Elle présente l'évolution du coefficient de frottement superposée à l'évolution globale de l'amplitude acoustique en fonction du nombre de cycles. Ces évolutions présentent les trois phases bien identifiées précédemment :

— La phase initiale (I) est une phase de frottement bas où aucune dégradation des surfaces n'est observée et aucune activité acoustique n'est enregistrée en dessus du seuil expé-

rimental. Cette phase est liée à l'accommodation dans les écrans naturels des premiers corps. Il est noté que la durée de cette phase est très variable mais ne parait pas dépendre de la charge normale dans la gamme appliquée. En revanche, pour une charge donnée, celle-ci est réduite lorsque la fréquence d'excitation augmente. L'endurance de ces écrans naturels semble donc sensible à l'accroissement de la vitesse.

— La phase transitoire (II) est une phase de variation du coefficient de frottement liée à la création du troisième corps ainsi qu'à l'initiation de la fissuration.

— La phase stabilisée (III) correspondant à la stabilisation du coefficient de frottement. Cette phase est liée à l'accommodation dans le troisième corps.

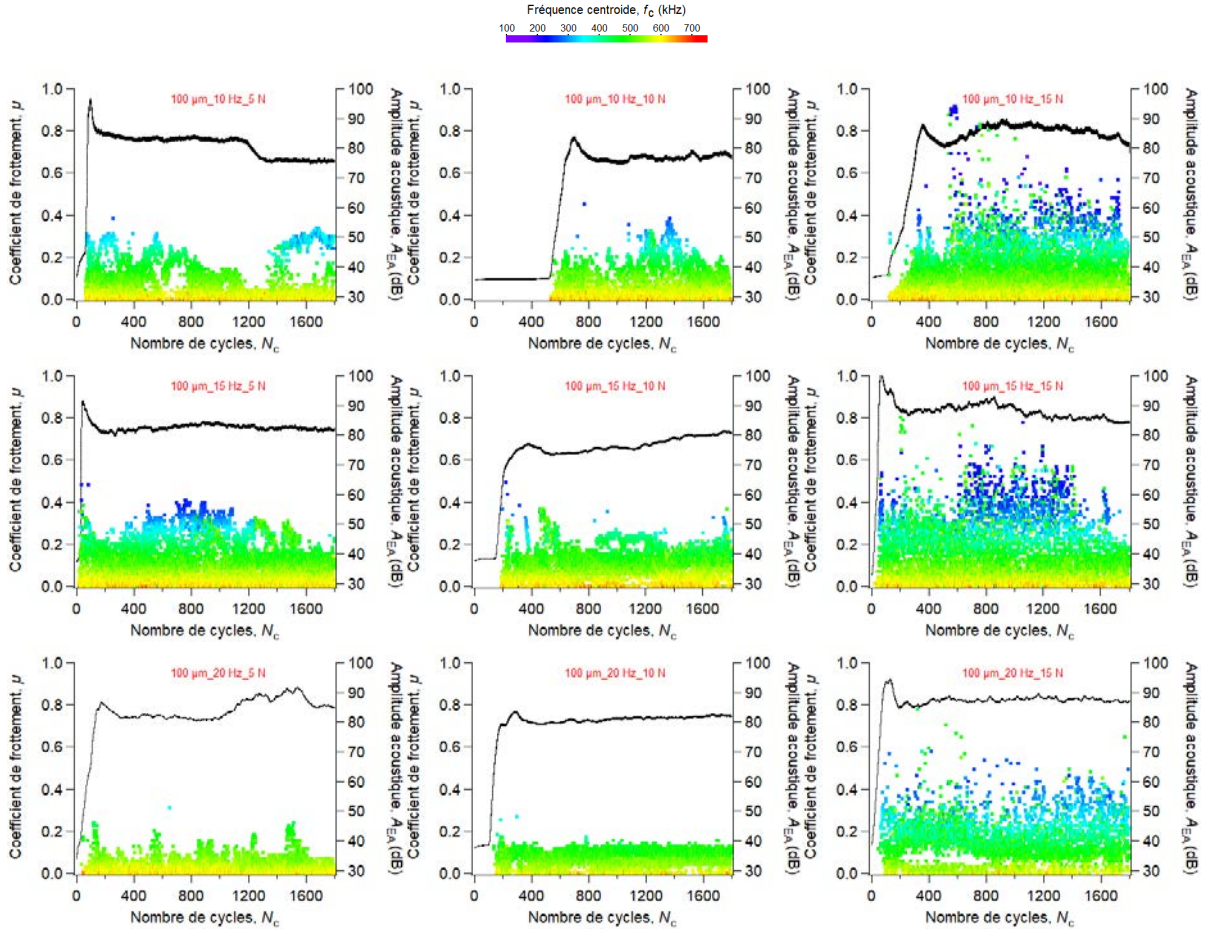


FIGURE 4.1 – Évolution du coefficient de frottement et de l'amplitude acoustique en fonction du nombre de cycles lors des essais réalisés à différentes conditions opératoires pour le contact acier/verre.

4.2.1 Coefficients de frottement

Le comportement tribologique a été d'abord évalué à partir des coefficients de frottement répertoriés dans le paragraphe 3.1.3. Les coefficients de frottement bas de la phase I (μ_1), maximal pendant la phase II (μ_2) et haut dans la phase III (μ_3) sont présentés dans le tableau 4.2 avec leurs incertitudes illustrant l'instabilité de la mesure pendant la durée de l'essai. La figure 4.2 reprend ces mêmes valeurs pour une meilleure lisibilité des résultats. L'essai numéro 1 est un essai réalisé dans les mêmes conditions opératoires que l'essai de référence présenté dans le

chapitre 3 mais avec un nombre de cycles plus important (1800 cycles au lieu de 1200 cycles).

N°	δ (µm)	f (Hz)	F_N (N)	N_c	μ_1	μ_2	μ_3
1	± 50	10	5	1800	0,11 ± 0,01	0,96 ± 0,03	0,73 ± 0,05
2			10		0,09 ± 0,01	0,77 ± 0,03	0,67 ± 0,02
3			15		0,10 ± 0,01	0,83 ± 0,02	0,80 ± 0,03
4		15	5		0,12 ± 0,01	0,88 ± 0,02	0,75 ± 0,01
5			10		0,12 ± 0,01	0,74 ± 0,03	0,67 ± 0,03
6			15		0,06 ± 0,01	1,01 ± 0,03	0,83 ± 0,03
7		20	5		0,07 ± 0,01	0,81± 0,04	0,78 ± 0,05
8			10		0,12 ± 0,01	0,76 ± 0,03	0,73 ± 0,02
9			15		0,13 ± 0,01	0,92 ± 0,02	0,82 ± 0,01
moyenne					0,10 ± 0,03	0,85 ± 0,10	0,75 ± 0,06

TABLE 4.2 – Coefficients de frottement associés aux différentes phases dans différentes conditions opératoires.

Le coefficient de frottement bas (μ_1) est calculé en prenant la valeur moyenne durant cette phase. Quand la phase I est absente, le coefficient μ_1 représente la valeur minimale en début d'essai. Il est constaté que les valeurs de ce coefficient de frottement sont très proches pendant la phase I pour l'ensemble des essais, présentant une moyenne globale de l'ordre de 0,10 ± 0,03.

Les coefficients de frottement maximal (μ_2) et stabilisé (μ_3) enregistrent des valeurs sensiblement plus élevés à des charges normales appliquées de 5 N et 15 N par rapport à 10 N pour les trois différentes fréquences d'excitation. Par ailleurs, la fréquence d'excitation a une relativement faible influence sur les coefficients de frottement. Cependant, le coefficient de frottement maximal est légèrement inférieur à plus haute fréquence.

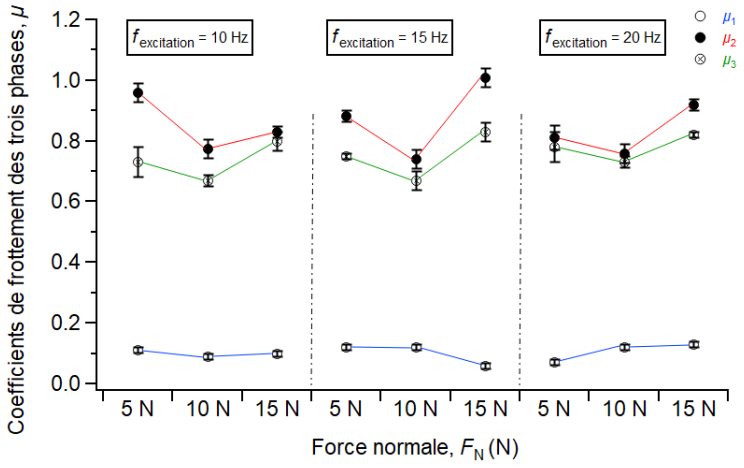


FIGURE 4.2 – Évolution des coefficients de frottement sous différentes conditions opératoires pour le contact acier/verre.

Les différentes durées des phases associées à l'évolution des coefficients de frottement sont présentées dans le tableau 4.3. Les pentes des parties ascendantes et descendantes du coefficient

de frottement ainsi que le temps d'apparition du coefficient maximal dans la phase II sont présentés dans le tableau 4.4. Au regard de ces résultats, une tendance de l'évolution du coefficient de frottement peut être exprimée en deux équations 4.1 et 4.3 :

— La première regroupe l'évolution du coefficient de frottement dans la phase I ainsi que la partie ascendante dans la phase II selon l'équation 4.1 :

$$\mu_{I-II}(N_c) = \mu_{1_{moy}} + A_1(exp(\frac{1}{\tau_{1_{moy}}}N_c) - 1) \tag{4.1}$$

avec

$$A_1 = \frac{\mu_{2_{moy}} - \mu_{1_{moy}}}{exp(\frac{N_{cmax}}{\tau_{1_{moy}}}) - 1} \tag{4.2}$$

— La deuxième regroupe l'évolution du coefficient de frottement dans la partie descendante de la phase II ainsi que la phase III selon l'équation 4.3 :

$$\mu_{II-III}(N_c) = \mu_{3_{moy}} + (\mu_{2_{moy}} - \mu_{3_{moy}}).exp(\frac{-1}{\tau'_{2_{moy}}}t) \tag{4.3}$$

avec

$\mu_{1_{moy}}$: le coefficient de frottement de la phase I moyenné sur les 9 essais.

$\mu_{2_{moy}}$: le coefficient de frottement maximal durant la phase II moyenné sur les 9 essais.

$\mu_{3_{moy}}$: le coefficient de frottement de la phase III moyenné sur les 9 essais.

$N_{c_{max}}$: le nombre de cycles correspondant à μ_2 moyenné sur les 9 essais.

$\tau_{1_{moy}}$: le nombre de cycles de la phase I moyenné sur les 9 essais.

$\tau'_{2_{moy}}$: le nombre de cycles de la partie décroissante de la phase II moyenné sur les 9 essais.

N°	δ (µm)	f (Hz)	F_N (N)	N_c	τ_1 (cycles)	τ_2 (cycles)	τ'_2 (cycles)	τ_3 (cycles)
1			5		60	35	85	1620
2		10	10		525	175	150	950
3			15		115	243	142	1300
4			5		26	19	180	1575
5	± 50	15	10	1800	147	228	150	1275
6			15		0	64	190	1545
7			5		0	172	128	1628
8		20	10		100	180	160	1520
9			15		0	130	62	1608
moyenne					190 ± 103	138 ± 82	137 ± 42	1447 ± 228

TABLE 4.3 – Durées des phases issues de l'évolution du coefficient de frottement en fonction du temps dans différentes conditions opératoires.

N°	δ (µm)	f (Hz)	F_N (N)	N_c	P_2	$N_c max$	P'_2
1	± 50	10	5	1800	0,02	95	- 0,002
2			10		0,004	700	- 0,0007
3			15		0,003	358	- 0,0007
4		15	5		0,04	45	- 0,001
5			10		0,0003	375	- 0,0006
6			15		0,01	64	- 0,001
7		20	5		0,09	172	- 0,0005
8			10		0,005	280	- 0,0003
9			15		0,005	130	- 0,001
moyenne					0,03 ± 0,02	247 ± 210	- 0,0009 ± 0,0005

TABLE 4.4 – Pentes des coefficients de frottement et temps du frottement maximal associés à la phase II dans différentes conditions opératoires.

Ces équations permettent la modélisation de la courbe de frottement pour extrapoler à d'autres situations lorsque les paramètres opératoires changent. Ainsi, les expressions obtenues sont présentées par les équations 4.4 et 4.5 :

$$\mu_{I-II}(N_c) = 0,10 + 0,28.(exp(\frac{1}{18}N_c) - 1) \tag{4.4}$$

$$\mu_{II-III}(N_c) = 0,75 + 0,1.exp(\frac{-1}{137}N_c) \tag{4.5}$$

4.2.2 Réponses acoustiques

Le tableau 4.5 regroupe l'ensemble des résultats acoustiques enregistrés et la figure 4.3 présente l'activité acoustique globale lors des essais où la répartition des salves acoustiques a été paramétrée en déplacement et en force tangentielle en fonction du nombre de cycles.

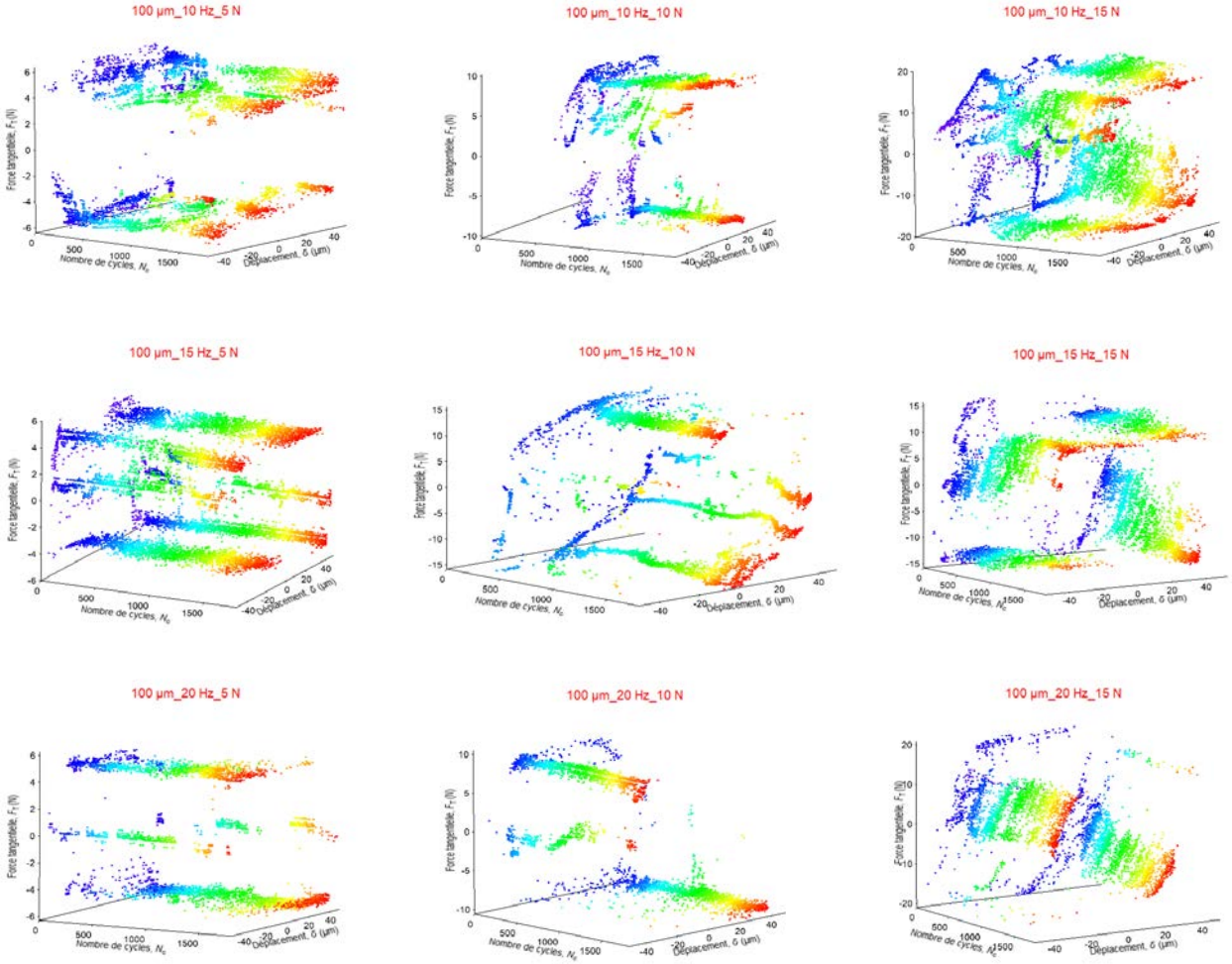


FIGURE 4.3 – Évolution du coefficient de frottement et de l'amplitude acoustique en fonction du nombre de cycles lors des essais réalisés à différentes conditions opératoires pour le contact acier/verre.

N°	δ (µm)	f (Hz)	F_N (N)	$N_{salve-c}$	A_{EA-moy} (dB)	A_{EA-max} (dB)	f_{c-moy} (kHz)	E_{abs-c} (10^6aJ)
1	± 50	10	5	3004	34 ± 6	56	557 ± 69	4
2			10	5260	34 ± 5	61	560 ± 80	0,4
3			15	7583	38 ± 6	94	530 ± 80	180
4		15	5	7225	36 ± 5	63	540 ± 70	2,8
5			10	6466	37 ± 4	64	520 ± 60	2,3
6			15	7805	40 ± 8	86	500 ± 96	23
7		20	5	5000	32 ± 2	51	580 ± 30	0,1
8			10	4247	34 ± 2	48	519 ± 37	0,4
9			15	4460	40 ± 6	84	453 ± 76	6,9

TABLE 4.5 – Paramètres des réponses acoustiques dans différentes conditions opératoires pour le contact acier/verre.

Ces résultats montrent que :

— **Le nombre cumulé de salves $\mathbf{N}_{salves-c}$** varie entre 3004 salves et 7805 salves. La fréquence d'excitation influe également sur la distribution des salves dans les cycles. L'activité acoustique, à haute fréquence et en particulier à 20 Hz, est moins présente sur les plateaux de glissement. Cependant, elle enregistre une apparition tout au long de l'essai quand le plan change de sens de glissement contre la bille. L'effet de la charge normale est différent selon la fréquence d'excitation. Le nombre cumulé de salves enregistre une augmentation marquée à 10 Hz en passant de 5 N (3004 salves) à 15 N (7583 salves).

— **L'amplitude acoustique moyenne $\boldsymbol{A_{EA-moy}}$** varie très peu entre 32 ± 2 dB (pour l'essai réalisé à 20 Hz et 5 N) et 40 ± 8 dB (pour l'essai réalisé à 15 Hz et 15 N) (Figure 4.4). Une augmentation est observée avec l'augmentation de la charge normale pour les trois différentes fréquences. De plus, les amplitudes acoustiques les plus importantes sont enregistrées à la charge normale de 15 N aux hautes fréquences (15 Hz et 20 Hz), ce qui est en accord avec le classement des facteurs influençant l'amplitude acoustique, proposé par Baranov *et al.* [Baranov *et al.*, 2007]. Ces résultats ont montré que l'amplitude acoustique moyenne enregistrée pour les neuf essais varie très faiblement.

— **L'amplitude acoustique maximale $\boldsymbol{A_{EA-max}}$** varie entre 48 dB (pour l'essai réalisé à 20 Hz et 10 N) et 94 dB (pour l'essai réalisé à 10 Hz et 15 N). Une augmentation est observée avec l'augmentation de la charge normale et la fréquence d'excitation pour les trois différentes fréquences. De plus, les amplitudes acoustiques les plus importantes sont enregistrées à la charge normale de 15 N.

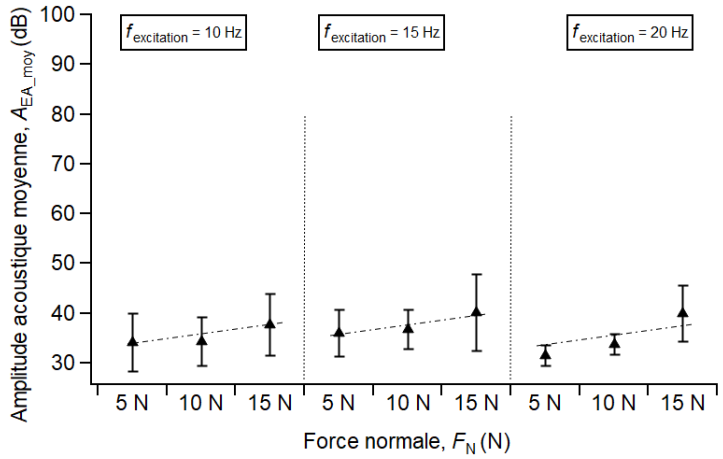


FIGURE 4.4 – variation de l'amplitude acoustique moyenne sur l'ensemble de l'essai dans différentes conditions opératoires pour le contact acier/verre.

— **La fréquence centroïde moyenne f_{c-moy}** est plus élevée à faible charge normale (Figure 4.5). Cependant, la fréquence d'excitation semble avoir un effet peu marqué sur la fréquence centroïde.

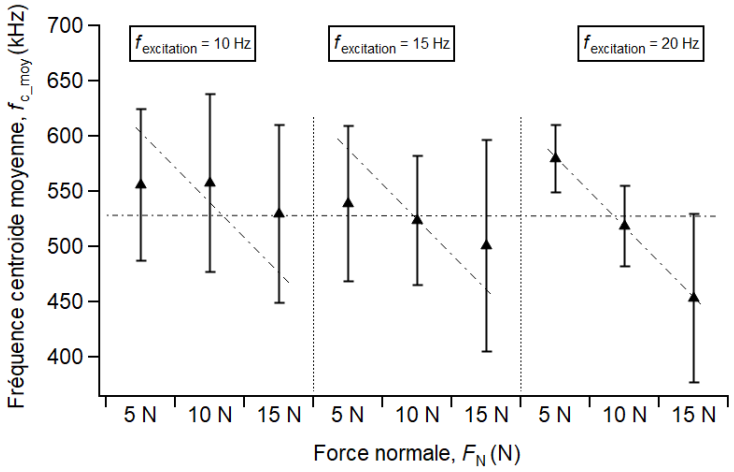


FIGURE 4.5 – variation de la fréquence centroïde moyenne sur l'ensemble de l'essai dans différentes conditions opératoires pour le contact acier/verre.

— **L'énergie absolue cumulée $E_{abs-cum}$** varie entre 0,1.10^6 aJ et 180.10^6 aJ sur l'ensemble des essais. Il est noté que les salves acoustiques sont d'autant plus énergétiques que la charge normale augmente. La figure 4.6 montre une évolution exponentielle de l'énergie absolue cumulée en fonction de l'amplitude acoustique maximale. Les essais réalisés à une charge normale de 5 N et 10 N représentent une énergie faible et une amplitude acoustique maximale inférieure à 70 dB. Les essais réalisés à 15 N montrent une amplitude acoustique élevée supérieure à 80 dB et une énergie absolue qui augmente fortement à basse fréquence d'excitation (les trois points à droite sur la figure 4.6 correspondent par ordre croissant d'amplitude acoustique aux fréquences de 20 Hz, 15 Hz et 10 Hz pour l'énergie la plus élevée).

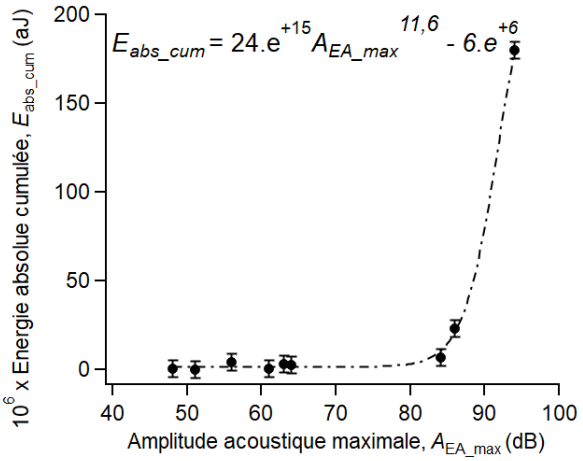


FIGURE 4.6 – Énergie absolue cumulée en fonction de l'amplitude acoustique maximale sur l'ensemble des essais dans différentes conditions opératoires pour le contact acier/verre.

4.3 Étude des mécanismes d'endommagement et d'usure sous différents paramètres opératoires

4.3.1 Étude de la fissuration

L'enregistrement en émission acoustique ainsi que l'observation en direct de la surface frottante a permis de déterminer les moments d'apparition des premières fissures hertziennes pendant les phases II des neuf essais décrits précédemment. La figure 4.7a montre la longueur initiale en surface de la première fissure. Cette longueur présente des valeurs très proches pour les essais réalisés à faible fréquence d'excitation (10 Hz) pour toutes les charges normales appliquées (soit 5, 10 et 15 N). Pour les autres essais, la longueur de la première fissure augmente lorsque la charge normale augmente. Ce résultat est bien notable pour les fréquences d'excitation de 15 Hz et 20 Hz. Quant à l'ouverture de la première fissure, elle semble être aléatoire et ne dépend d'aucun paramètre opératoire (Figure 4.7b). Cependant le rapport entre la longueur et l'ouverture de la première fissure calculé pour les neuf essais montre que celui-ci est fortement lié à la charge normale appliquée plus qu'à la fréquence d'excitation (Figure 4.7c). Autrement dit, les essais réalisés à plus haute fréquence et à plus grande charge normale présentent le rapport le plus important.

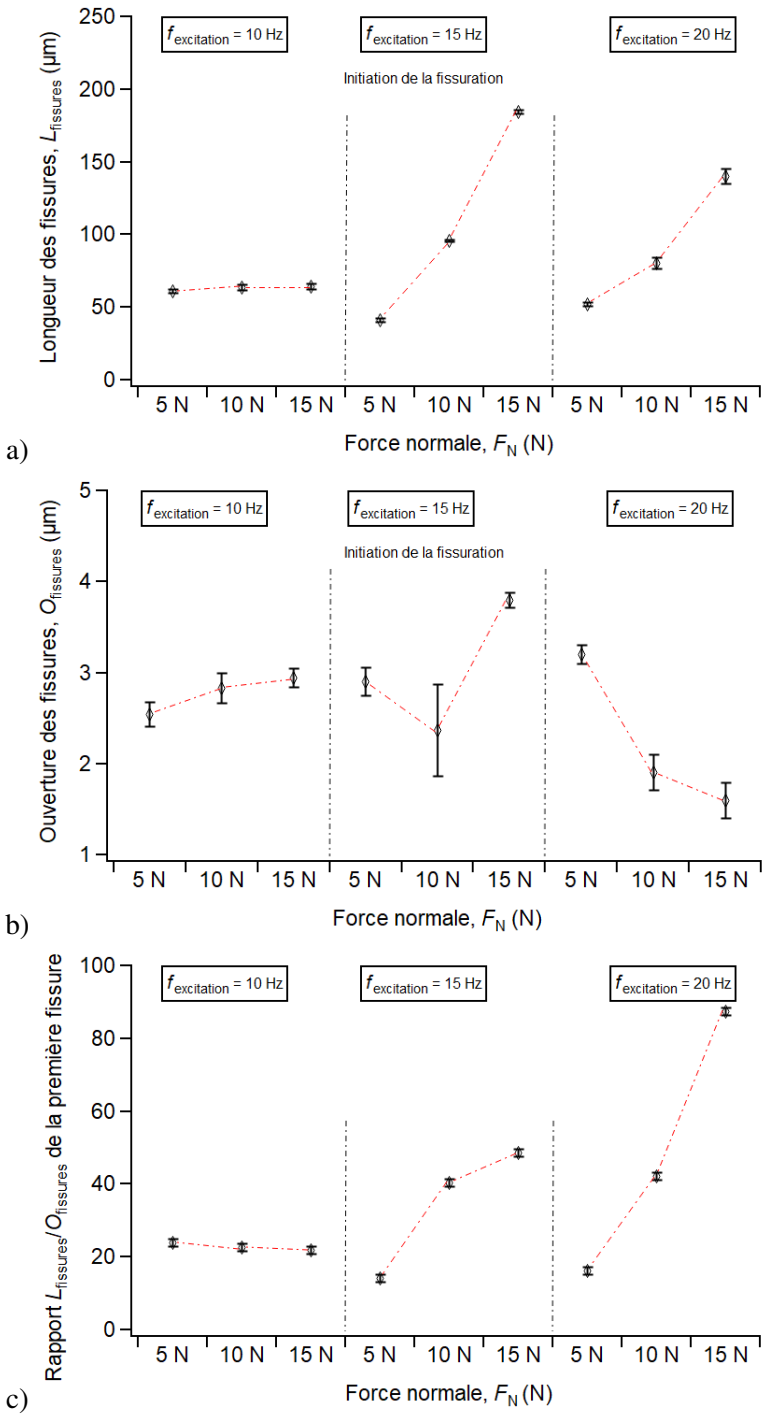


FIGURE 4.7 – Évolution pendant la phase II a) de la longueur et b) de l'ouverture de la première fissure de Hertz apparue dans le contact acier/verre sous différentes conditions opératoires et c) rapport entre la longueur et l'ouverture.

La répartition des salves acoustiques paramétrées en déplacement et en force tangentielle permet de localiser la salve associée à la première fissuration du verre. La figure 4.8 présente deux exemples d'essais à 5 N réalisés respectivement à des fréquences d'excitation de 10 Hz et 15 Hz. Le cercle rouge montre la localisation de la salve liée à la première fissure. Celle-ci intervient au changement de sens, juste avant l'établissement de la phase de glissement.

L'observation en direct des surfaces frottantes montre que les caractéristiques des fissures

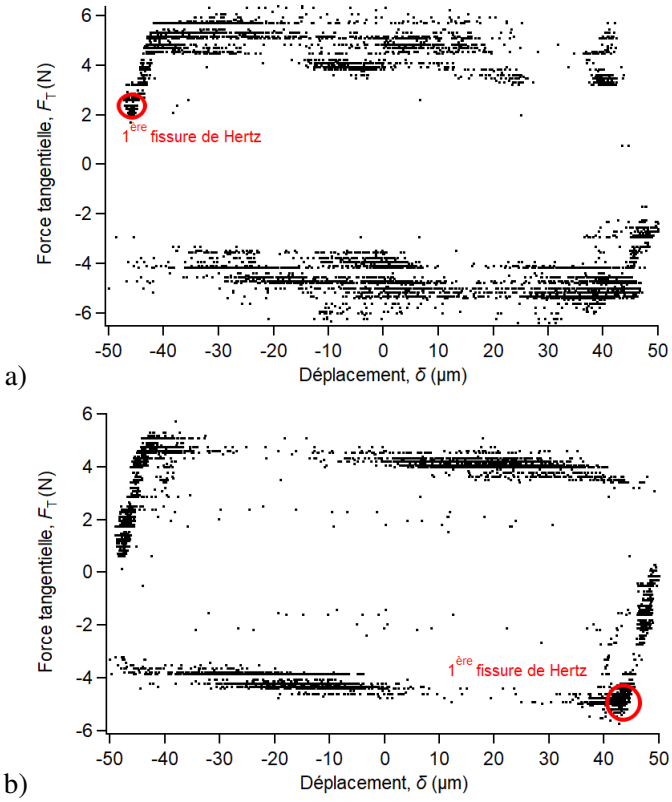


FIGURE 4.8 – Exemple de localisation de la première fissure dans un cycle de glissement pour un essai réalisé à a) f = 10 Hz, F_N = 5 N et b) f = 15 Hz, F_N = 5 N).

se stabilisent en début de la phase III des essais. La figure 4.9a montre que la longueur de ces fissures est fortement liée à la charge normale appliquée. Il est noté que plus la charge normale augmente plus les fissures se propagent en longueur pour atteindre une valeur de l'ordre de 347 ± 8 µm, soit une valeur égale à quatre fois le rayon de Hertz (Figure 4.9b). La fréquence d'excitation semble avoir un effet sur la longueur des fissures pour les essais réalisés à 5 N et 10 N. Ces deux paramètres opératoires montrent la même conséquence sur l'ouverture des fissures (Figure 4.10). En effet, plus la charge normale augmente plus les fissures se stabilisent à une ouverture plus importante. Néanmoins, les valeurs restent très proches en passant de 10 Hz à 20 Hz.

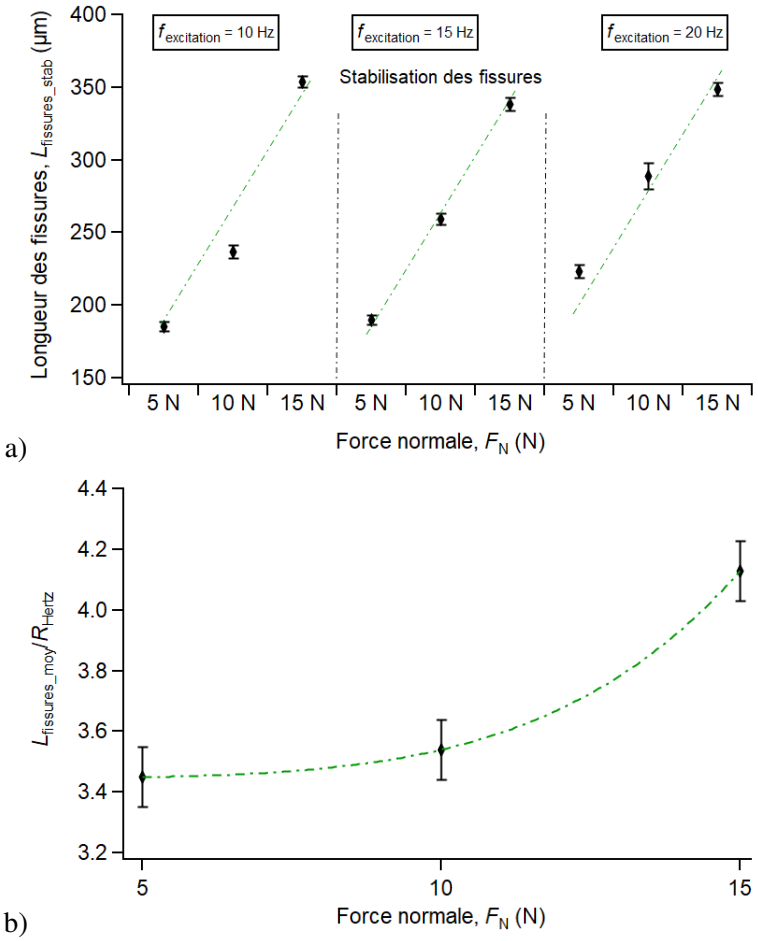


FIGURE 4.9 – a) Évolution pendant la phase III de la longueur des fissures stabilisées apparues dans le contact acier/verre sous différentes conditions opératoires et b) Évolution du rapport de la longueur des fissures et le rayon de Hertz en fonction de la charge normale.

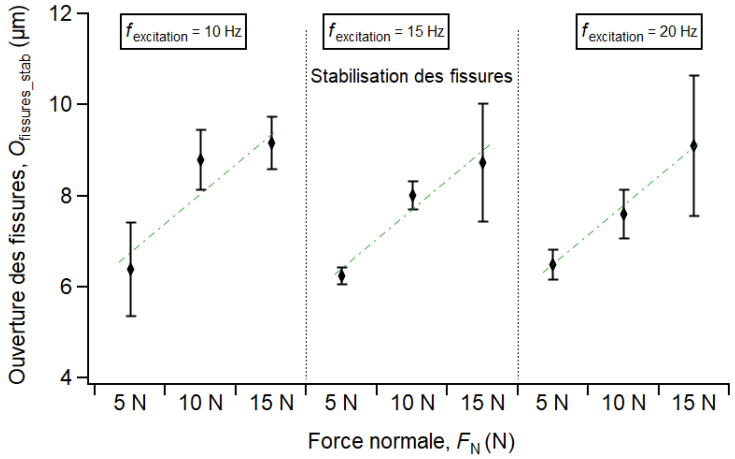


FIGURE 4.10 – Évolution pendant la phase III de l'ouverture des fissures stabilisées apparues dans le contact acier/verre sous différentes conditions opératoires.

4.3.2 Étude du troisième corps

La synchronisation de l'observation en direct des surfaces frottantes avec l'enregistrement en émission acoustique a permis de détecter les premiers instants de la dégradation de la surface frottante pendant la phase II conduisant ainsi à l'initiation et au développement du tribofilm. Ce dernier continue à progresser tout au long des essais jusqu'à s'étendre sur toute la zone du contact.

La figure 4.11 montre les valeurs de l'amplitude acoustique associées à la première salve de création du tribofilm. D'une manière générale, l'amplitude varie entre 31 dB et 41 dB. Ces amplitudes acoustiques sont faibles par rapport à celles enregistrées lors de l'initiation de la fissuration. L'effet de la charge normale ainsi que de la fréquence d'excitation sur ce paramètre acoustique ne permet pas d'établir une tendance. Toutefois, l'ensemble des salves enregistrées lors du développement de ce tribofilm avant l'initiation de la fissuration montre que la fréquence d'excitation a un effet sur l'amplitude acoustique.

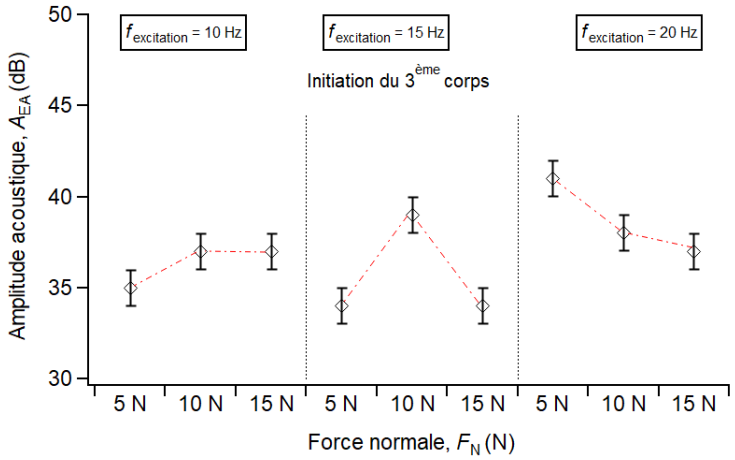


FIGURE 4.11 – Évolution de l'amplitude acoustique de la salve associée à la création du tribofilm dans le contact acier/verre sous différentes conditions opératoires.

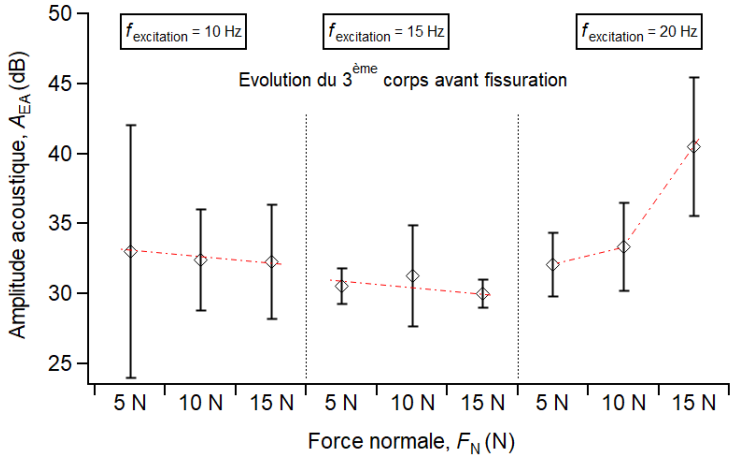


FIGURE 4.12 – Évolution de l'amplitude acoustique de développement du tribofilm avant fissuration dans le contact acier/verre sous différentes conditions opératoires.

La figure 4.12 montre que l'amplitude acoustique moyenne liée au développement du tribofilm reste stable pour les essais réalisés à 10 Hz et 15 Hz. Pour la fréquence d'excitation la plus importante (20 Hz), l'amplitude acoustique augmente avec la charge normale. Ainsi, le tout dernier essai (à 20 Hz et 15 N) enregistre l'amplitude acoustique la plus élevée.

4.3.3 Classification des mécanismes d'endommagement et d'usure

Afin de mener une interprétation objective, la classification des signaux d'émission acoustique a été effectuée en se basant sur la même méthode utilisée dans le paragraphe 3.6, soit la méthode d'analyse en composantes principales combinée à la visualisation de l'interface. Le but de cette partie est de distinguer l'effet des conditions opératoires sur la signature correspondant aux différents mécanismes d'endommagement et d'usure. Ainsi trois essais ont été comparés :

- Le premier essai correspond à l'essai de référence (f = 10 Hz, F_N = 5 N) présenté précédemment.
- Le deuxième essai correspond à une augmentation de la charge normale à la plus haute valeur. Il s'agit de l'essai N°3, dans le tableau 4.5, réalisé à une fréquence d'excitation f = 10 Hz et une charge normale de F_N = 15 N.
- Le troisième essai est l'essai N°7 dans le tableau 4.5 correspond à une augmentation de la fréquence d'excitation à une valeur extrême par rapport à l'essai de référence, soit à une fréquence d'excitation f = 20 Hz et une charge normale de F_N = 5 N.

Les résultats de la classification des mécanismes sont présentés dans la figure 4.13. Les trois classes correspondant respectivement à la création et au développement du tribofilm (classe 0 en rouge), au phénomène de remplissage du convergent (classe 1 en bleu) et à la fissuration du verre (classe 2 en vert) ont été détectées.

- La classe 0 est caractérisé par des signaux de fréquence centroïde qui varient globalement entre 100 kHz et 735 kHz.
- La classe 1 a une gamme de plus forte fréquence comprise majoritairement enter 547 kHz et 734 kHz.
- La classe 2 s'étend sur une large bande fréquentielle allant jusqu'à des faibles fréquences centroïdes, soit de 123 kHz à 649 kHz.

La courbe de tendance de la distribution de la fréquence centroïde montre un décalage de pic des trois essais en comparant classe par classe. Ce pic présente la valeur moyenne de la gamme fréquentielle. Les figures 4.14 et 4.15 montrent que plus la charge normale augmente plus la fréquence centroïde diminue. Cependant, quand la fréquence d'excitation augmente, la fréquence centroïde des classes diminue mais très légèrement.

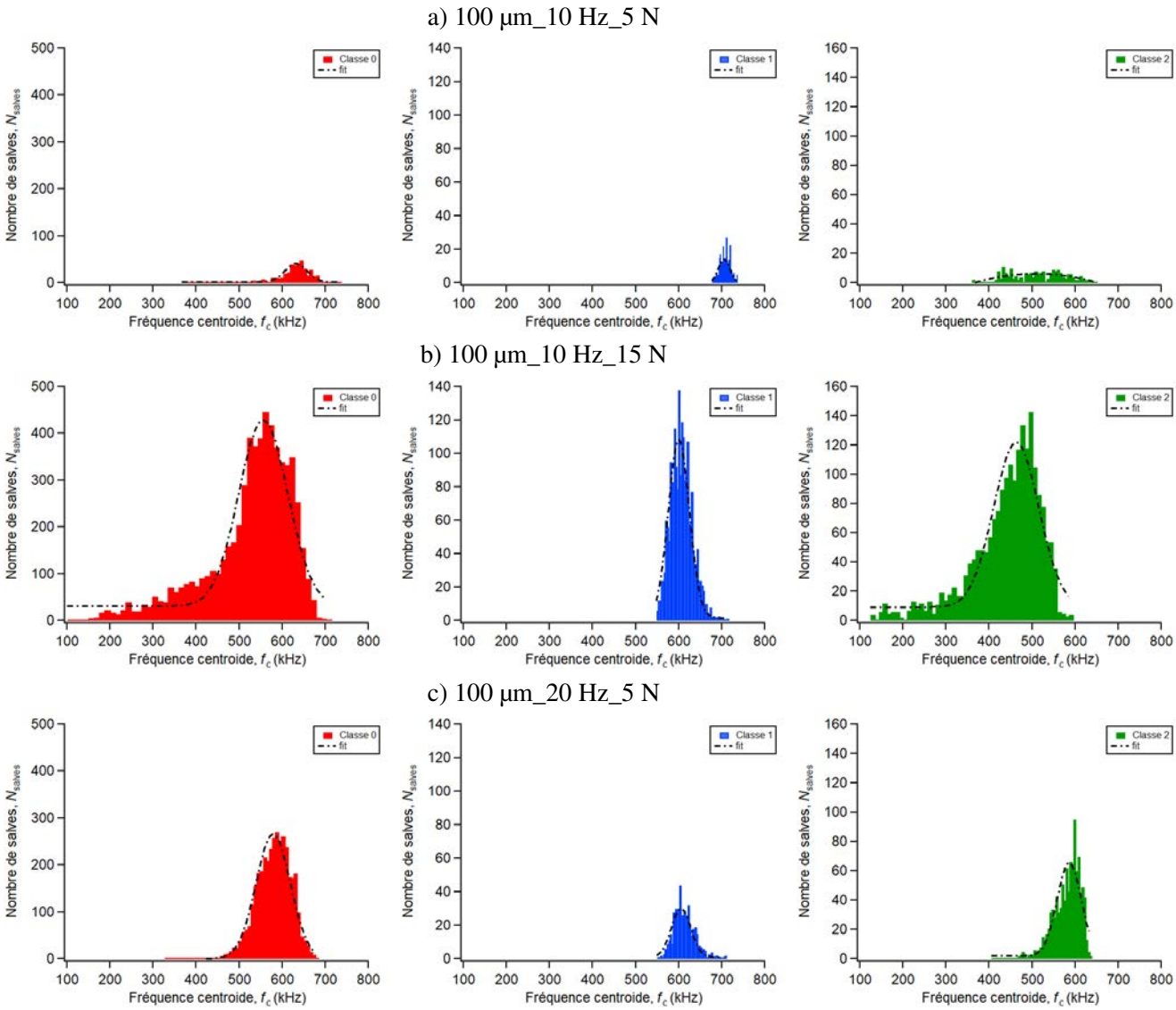


FIGURE 4.13 – Visualisation de la distribution de la fréquence centroïde de a) l'essai de référence (f = 10 Hz, F_N= 5 N), b) l'essai N°3 (f = 10 Hz, F_N = 15 N) et c) l'essai N°7 (f = 20 Hz, F_N = 5 N). La classe 0 (en rouge) correspond à la création et au développement du tribofilm, la classe 1 (en bleu) au remplissage du convergent/divergent et la classe 2 (en vert) à la fissuration.

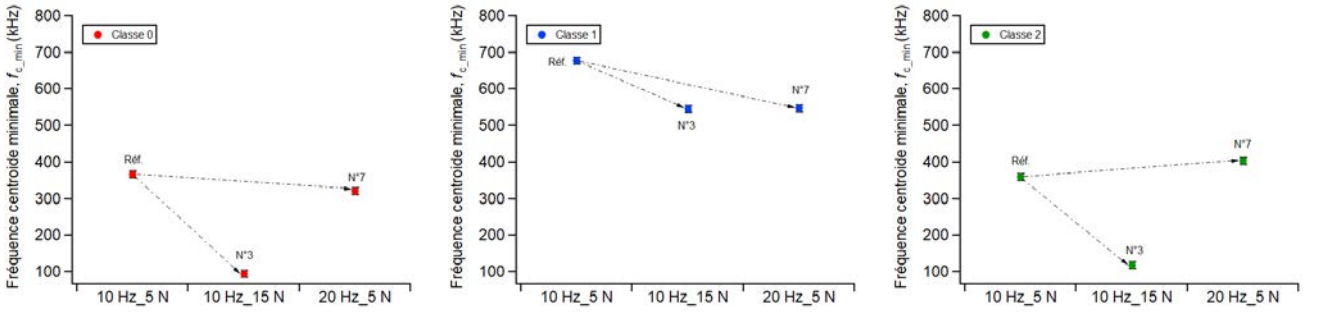


FIGURE 4.14 – Variation de la fréquence centroïde minimale pour l'essai de référence (f = 10 Hz, F_N = 5 N), l'essai N°3 (f = 10 Hz, F_N = 15 N) et l'essai N°7 (f = 20 Hz, F_N = 5 N).

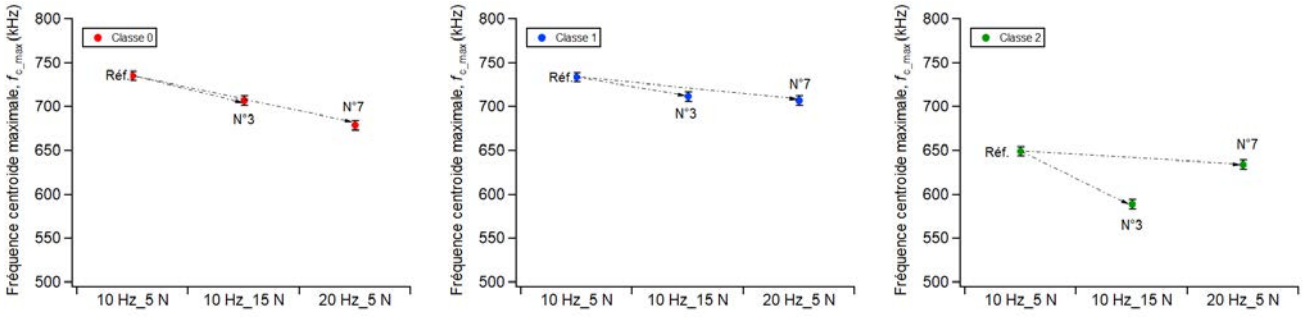


FIGURE 4.15 – Variation de la fréquence centroïde maximale pour l'essai de référence (f = 10 Hz, F_N = 5 N), l'essai N°3 (f = 10 Hz, F_N = 15 N) et l'essai N°7 (f = 20 Hz, F_N = 5 N).

L'amplitude acoustique maximale atteinte durant les trois classes est représentée dans la figure 4.16 en comparant les trois essais. Il est à noter que quand la charge normale augmente, l'amplitude maximale de la classe augmente. Cet effet est observé pour la création du tribofilm et la fissuration (Classes 0 et 2). Cependant, le remplissage du convergent (Classe 1) semble peu affecté par l'augmentation de la charge normale. Quand la fréquence d'excitation augmente, l'amplitude maximale des trois classes enregistre des valeurs proches.

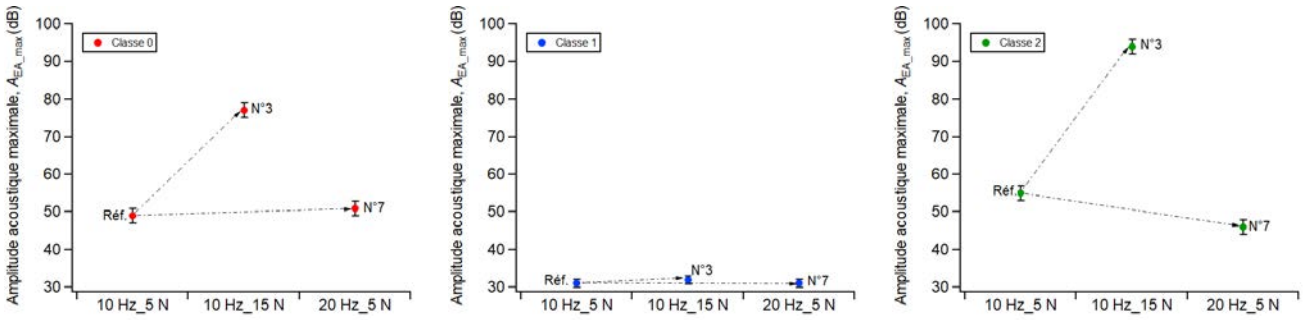


FIGURE 4.16 – Variation de l'amplitude acoustique maximale pour l'essai de référence (f = 10 Hz, F_N = 5 N), l'essai N°3 (f = 10 Hz, F_N = 15 N) et l'essai N°7 (f = 20 Hz, F_N = 5 N).

La figure 4.17 présente la variation de l'énergie absolue minimale des trois classes. Ceci confirme que l'enregistrement d'émission acoustique est capable de détecter des phénomènes de très faible énergie. Les énergies absolues minimales des deux premières classes présentent des valeurs très proches. Ces énergies augmentent avec la charge normale et la fréquence d'excitation. Cet effet est observé pour la fissuration qui est caractérisée par une énergie minimale supérieur à celles des classes 0 et 1 mais seulement quand la charge normale augmente. La fréquence d'excitation affecte légèrement l'énergie absolue minimale.

La figure 4.18 présente la variation de l'énergie absolue maximale des trois classes. Il est à noter que les deux classes 0 et 1 ont des énergies maximales très différentes contrairement à ce qui a été observé pour les énergies minimales. La classe 1 possède l'énergie maximale la plus faible (de l'ordre de 102 ± 5 aJ). Cependant, la fissuration du verre présente la classe la plus énergétique. Quand la charge normale augmente, l'énergie absolue maximale enregistre des valeurs très élevées allant jusqu'à $1{,}4.10^7$ aJ pour la fissuration du verre. Quand la fréquence

d'excitation augmente, l'énergie absolue maximale varie légèrement.

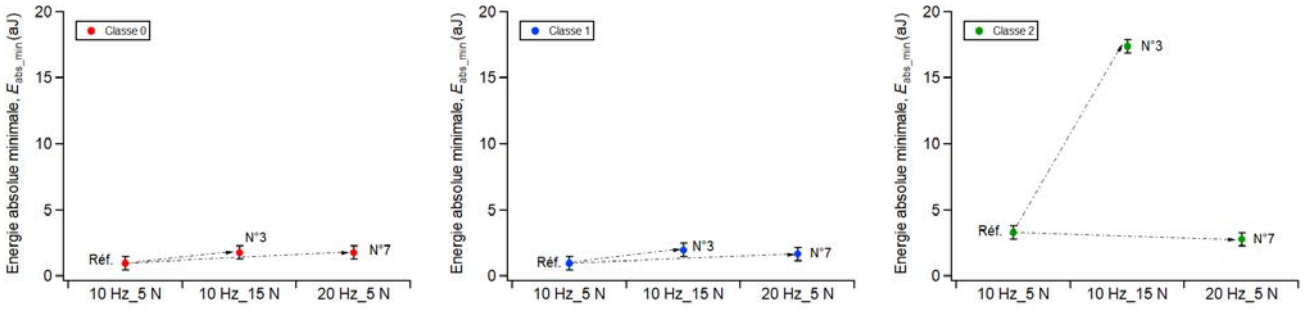


FIGURE 4.17 – Variation de l'énergie absolue minimale pour l'essai de référence (f = 10 Hz, F_N= 5 N), l'essai N°3 (f = 10 Hz, F_N = 15 N) et l'essai N°7 (f = 20 Hz, F_N = 5 N).

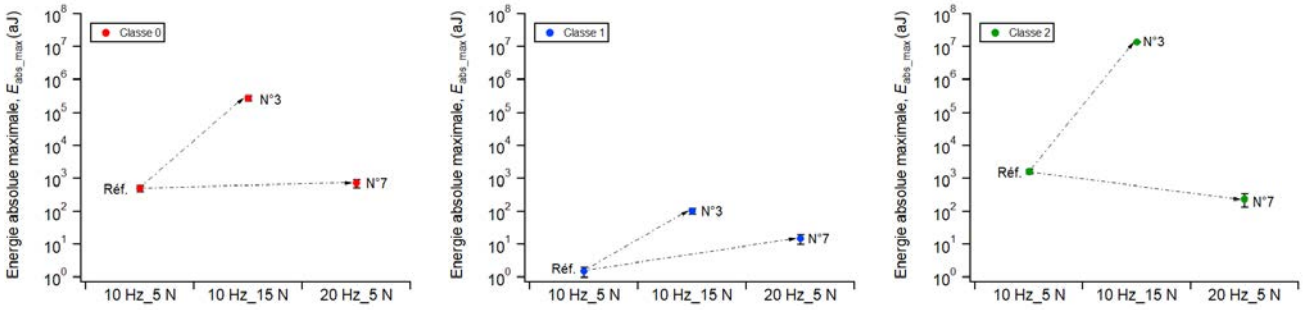


FIGURE 4.18 – Variation de l'énergie absolue maximale pour l'essai de référence (f = 10 Hz, F_N= 5 N), l'essai N°3 (f = 10 Hz, F_N = 15 N) et l'essai N°7 (f = 20 Hz, F_N = 5 N).

4.4 Synthèse partielle

Dans ce chapitre, deux paramètres opératoires ont été modifiés afin d'évaluer leur influence sur les mécanismes d'endommagement et d'usure dans le contact de type acier/verre. Il s'agit de la charge normale appliquée F_N et de la fréquence d'excitation f. Les paramètres acoustiques étudiés sont l'amplitude acoustique A_{EA}, l'énergie absolue E_{abs}, la fréquence centroïde f_c et le nombre cumulé de salves.

En utilisant la méthode d'identification et de classification des phénomènes à travers l'analyse en composantes principales et la visualisation de la vidéo, les trois différentes classes de salves établies dans le chapitre précédent ont de nouveau été identifiées :

— Une classe correspondant à la création et au développement du troisième corps.
— Une classe correspondant au phénomène de remplissage du convergent de débris de matière.
— Une classe associée à l'initiation et la propagation des fissures.

L'augmentation de la charge normale a montré globalement un effet très visible sur les résultats tribo-acoustiques. Ces résultats ont montré que :

— Le coefficient de frottement bas (μ_1) pendant la phase I liée au cisaillement dans les écrans reste stable.
— Les coefficients de frottement maximal μ_2 (pendant la phase II) et stabilisé μ_3 (pendant la phase III) augmentent.
— Les amplitudes acoustiques moyenne A_{EA-moy} et maximale A_{EA-max} augmentent. Les amplitudes acoustiques les plus importantes sont enregistrées à la charge normale la plus enlevée.
— La fréquence centroïde moyenne f_{c-moy} diminue.
— L'énergie absolue cumulée $E_{abs-cum}$ augmente.
— Les caractéristiques des fissures évoluent telles que la longueur des premières fissures (pendant la phase II) ainsi que la longueur et l'ouverture des fissures stabilisées (pendant la phase III).
— Les fréquences centroïdes minimales et maximales des classes associées aux mécanismes d'endommagement et d'usure diminuent.
— Les amplitudes maximales des classes augmentent.
— Les énergies minimales et maximales des classes augmentent.

L'augmentation de la fréquence d'excitation a montré un effet peu marqué sur les résultats tribo-acoustiques. Ces résultats ont montré que :
— Le coefficient de frottement bas (μ_1) pendant la phase I liée au cisaillement dans les écrans reste stable.
— Les coefficients de frottement maximal μ_2 (pendant la phase II) et stabilisé μ_3 (pendant la phase III) varie très faiblement.
— L'amplitude acoustique moyenne A_{EA-moy} varie légèrement contrairement à l'amplitude maximale A_{EA-max} qui augmentent.
— La fréquence centroïde moyenne f_{c-moy} enregistre un effet peu marquée.
— L'énergie absolue cumulée $E_{abs-cum}$ diminue à forte charge normale.
— La longueur des premières fissures est très proche à faible fréquence d'excitation.
— La longueur des premières fissures augmente à haute fréquence d'excitation.
— Les caractéristiques des fissures stabilisées enregistrent peu de changement.
— Les fréquences centroïdes minimales et maximales des classes associées aux mécanismes d'endommagement et d'usure diminuent légèrement.
— Les amplitudes maximales et les énergies minimales et maximales des classes enregistrent un effet très peu marqué.

Conclusions & Perspectives

Conclusions

L'étude des interfaces glissantes constitue un défi constant en tribologie en raison du caractère masqué et dynamique des phénomènes qui s'y déroulent. En effet, l'essentiel de la compréhension des phénomènes tribologiques en frottement sec provient d'études ex situ de contacts séparés et figés. Pour observer directement l'évolution des éléments interfaciaux circulant dans un contact frottant, un tribomètre a été modifié afin d'assurer une synchronisation du suivi en temps réel à travers l'observation in situ des interfaces dynamiques par caméra rapide couplée à la technique d'émission acoustique (EA). L'étude des signaux d'EA a montré, lors d'études antérieures, qu'ils sont sensibles non seulement aux différents modes d'accommodation interfaciaux mais également aux différents débits de matière susceptibles de contribuer à la portance du contact. Le couple de matériaux acier 100Cr6/verre sodocalcique (transparent) a été étudié dans une configuration de contact bille/plan et en conditions de glissement réciproque.

La première partie de cette étude expose l'ensemble des résultats expérimentaux englobant l'évolution du coefficient de frottement, l'observation directe des phénomènes dans le contact à travers le verre et l'identification des mécanismes d'endommagement et d'usure activés dans des conditions d'essai constantes en déplacement, en fréquence d'excitation et en charge normale.

L'évolution temporelle du coefficient de frottement a montré l'existence de trois phases différentes en cours d'essai. La synchronisation de l'activité acoustique a confirmé l'existence de ces trois régimes à travers les paramètres acoustiques les plus pertinents à savoir l'amplitude acoustique, l'énergie absolue et la fréquence centroïde. Ces régimes correspondent ainsi à :

- Un régime de frottement bas où le coefficient de frottement est faible et aucun signal acoustique n'a été détecté au-delà du niveau du seuil de détection expérimental.
- Un régime transitoire où le coefficient de frottement augmente rapidement pour atteindre un pic maximal. L'amplitude acoustique et l'énergie absolue montrent une évolution importante. La fréquence centroïde s'étend sur une large gamme de fréquences.
- Un régime permanent où le coefficient de frottement se stabilise. L'amplitude acoustique et l'énergie absolue enregistrent des valeurs moins importante par rapport au régime transitoire. La bande de fréquence centroïde est ainsi moins étendue.

L'observation directe du contact frottant a permis de relier les signaux acoustiques avec l'évolution spatiale et temporelle des mécanismes d'endommagement et d'usure. Ces résultats ont

mis en lumière trois principaux mécanismes qui apparaissent dès le début du régime transitoire de l'essai. Ils correspondent :

— À la création et au développement d'un troisième corps.
— À l'initiation et à la propagation des fissures hertziennes.
— Au remplissage du convergent par des débris de matière (zone d'entrée du contact) pour partie recirculés dans le contact ou repoussés hors du contact (débit d'usure).

Ces mécanismes ont été corrélés à des classes de salves d'EA (*clusters*), c'est-à-dire selon leur signature acoustique, notamment grâce à des identifications synchrones (temporelles et spatiales) directes sur les signaux mécaniques et l'observation *in situ* ou à l'aide d'une analyse en composantes principales.

La synchronisation de l'observation a aussi permis de décrire quantitativement l'évolution de ces mécanismes par des mesures en continu de l'aire de portance du contact, des dimensions du tribofilm et de la hauteur maximale du remplissage du convergent ainsi que du nombre et de la taille des fissures apparaissant à l'arrière du contact.

La deuxième partie de l'étude a porté sur l'influence des paramètres opératoires, telles que la charge normale et la fréquence d'excitation, sur la réponse tribologique et acoustique du contact acier/verre. Les différents essais ont montré que les coefficients de frottement dans le régime de frottement bas sont peu sensibles à la variation des paramètres opératoires. En revanche, les coefficients de frottement dans le régime transitoire et permanent sont influencés par la charge normale appliquée.

La variation des paramètres opératoires a permis d'établir une tendance de l'évolution du coefficient de frottement permettant la modélisation de la courbe de frottement pour extrapoler à d'autres situations lorsque les paramètres opératoires changent.

L'observation directe du mécanisme de fissuration a montré que les dimensions des fissures hertziennes, initiées en régime transitoire et stabilisées en régime permanent, sont grandement influencées par la charge normale appliquée et la fréquence d'excitation.

Enfin, la classification des salves acoustiques a confirmé l'existence des trois mécanismes identifiés dans la première partie de l'étude (établissement d'un film interfacial, fissuration du verre et remplissage du convergent/divergent). Les caractéristiques acoustiques de ces classes sont fortement liées au développement des modes d'accommodation et à la taille des sites d'accommodation qui représentent les sources d'émission acoustique.

Perspectives

Les résultats obtenus, dans cette étude, montrent le potentiel de la technique d'émission acoustique pour la détection des différents mécanismes d'endommagement et d'usure ayant lieu dans l'interface acier/verre. Ainsi, ce travail laisse entrevoir de nombreuses perspectives.

Il sera intéressant de réaliser des essais permettant d'isoler le mécanisme d'endommagement attribué à la fissuration du verre afin de pouvoir localiser les fissures dans le contact, par exemple en introduisant un défaut contrôlé à la surface du verre (indentation) dans la zone de de pression de Hertz maximale. Il serait également intéressant de pouvoir contrôler la formation

du tribofilm, par exemple encore en introduisant des poudres calibrées de verre ou d'un autre matériau et relier la taille des débris à l'activité acoustique.

Les essais en interrompu présentent une piste pour identifier le chemin de propagation des fissures hertziennes dans le volume du matériau. En outre, au niveau de la classification des slaves acoustiques, il sera intéressant de travailler sur un algorithme qui permettra de différencier et d'isoler les salves acoustiques associées à la propagation longitudinale ou transversale des fissures.

De plus, les même mécanismes d'endommagement et d'usure peuvent être provoqués dans un autre type de matériau (exemple : le saphir qui est un matériau plus dur que le verre sodocalcique) sous différentes sortes de contraintes dans le but de voir la différence de la signature acoustique de l'établissement du troisième corps, de la fissuration et du remplissage du convergent.

Bibliographie

[Alam & Sundaresan, 2010] Alam, Md Tariqul, & Sundaresan, Mannur. 2010. Characterization of Fretting Related Acoustic Emission Signals. *Page 76500J of : Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2010*, vol. 7650. International Society for Optics and Photonics.

[Archard, 1953] Archard, J. F. 1953. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *Journal of Applied Physics*, **24**(8), 981–988.

[Asamene & Sundaresan, 2012] Asamene, Kassahun, & Sundaresan, Mannur. 2012. Analysis of Experimentally Generated Friction Related Acoustic Emission Signals. *Wear*, **296**(1), 607–618.

[Asamene *et al.*, 2011] Asamene, Kassahun, Williams, Wesley, & Sundaresan, Mannur. 2011. Experimental Analysis of Fretting Related Acoustic Emission Signals. *Page 79813V of : Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2011*, vol. 7981. International Society for Optics and Photonics.

[Ativitavas *et al.*, 2004] Ativitavas, Nat, Fowler, Timothy J., & Pothisiri, Thanyawat. 2004. Identification of Fiber Breakage in Fiber Reinforced Plastic by Low-Amplitude Filtering of Acoustic Emission Data. *Journal of Nondestructive Evaluation*, **23**(1), 21–36.

[Baranov *et al.*, 2007] Baranov, Victor, Kudryavtsev, Evgeny, Saryche, Gennady, & Schavelin, Vladimir. 2007. *Acoustic Emission in Friction*. Elsevier edn. Vol. 53.

[Benabdallah & Aguilar, 2008] Benabdallah, H. S., & Aguilar, D. A. 2008. Acoustic Emission and Its Relationship with Friction and Wear for Sliding Contact. *Tribology Transactions*, **51**(6), 738–747.

[Benítez *et al.*, 2016] Benítez, A., Denape, J., & Paris, J. Y. 2016. Interaction between Systems and Materials in Fretting. *Wear*, **368–369**(Dec.), 183–195.

[Benitez, 2016] Benitez, Alberto. 2016. *Dynamique En Fretting : Influence Du Type d'asservissement et Apport de La Technique d'émission Acoustique*. Ph.D. thesis.

[Berthier *et al.*, 1998] Berthier, Y, Kapsa, P., & Vincent, L. 1998. Matériaux et contacts : une approche tribologique. Presses polytechniques et universitaires romandes diff. Tec & doc.

[Berthier, 1988] Berthier, Yves. 1988 (Jan.). *Mécanismes et Tribologie*. Thesis, Lyon, INSA.

[Boness & McBride, 1991] Boness, R. J., & McBride, S. L. 1991. Adhesive and Abrasive Wear Studies Using Acoustic Emission Techniques. *Wear*, **149**(1), 41–53.

[Cadario & Alfredsson, 2005] Cadario, A., & Alfredsson, B. 2005. Fretting Fatigue Crack Growth for a Spherical Indenter with Constant and Cyclic Bulk Load. *Engineering Fracture Mechanics*, **72**(11), 1664–1690.

[Cadario & Alfredsson, 2006] Cadario, A., & Alfredsson, B. 2006. Fretting Fatigue Experiments and Analyses with a Spherical Contact in Combination with Constant Bulk Stress. *Tribology International*, **39**(10), 1248–1254.

[Cann, 2008] Cann, P. M. 2008. In-Contact Molecular Spectroscopy of Liquid Lubricant Films. *MRS Bulletin*, **33**(12), 1151–1158.

[Cartier & Kapsa, 2001] Cartier, Michel, & Kapsa, Philippe. 2001. Usure des contacts mécaniques - Maîtrise de l'usure et du frottement. 21.

[Cattaneo, 1996] Cattaneo, C. 1996. Sul contatto de due corpi elastici : Distribuzione locale deglisforzi. *Rendiconti dell' Accademia Nazionale dei Lincei*, **6**, 342–349.

[Chromik *et al.*, 2008] Chromik, Richard. R., Winfrey, A. Leigh, Lüning, Jan, Nemanich, Robert J., & Wahl, Kathryn J. 2008. Run-in Behavior of Nanocrystalline Diamond Coatings Studied by in Situ Tribometry. *Wear*, **265**(3), 477–489.

[Chung *et al.*, 2004] Chung, Koo-Hyun, Oh, Jin-Kyu, Moon, Jae-Taek, & Kim, Dae-Eun. 2004. Particle Monitoring Method Using Acoustic Emission Signal for Analysis of Slider/Disk/Particle Interaction. *Tribology International*, **37**(10), 849–857.

[Colombié, 1986] Colombié, C. 1986. *Usure Induite Sous Petits Débattements*. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon.

[de Pannemaecker *et al.*, 2017] de Pannemaecker, A., Buffiere, J. Y., Fouvry, S., & Graton, O. 2017. In Situ Fretting Fatigue Crack Propagation Analysis Using Synchrotron X-Ray Radiography. *International Journal of Fatigue*, **97**(Apr.), 56–69.

[Denape & Laraqi, 2000] Denape, Jean, & Laraqi, Najib. 2000. Aspect thermique du frottement : mise en évidence expérimentale et éléments de modélisation. *Mécanique & Industries*, **1**(6), 563–579.

[Denape *et al.*, 2001] Denape, Jean, Berthier, Yves, & Vincent, Léo. 2001. Wear Particle Life in Sliding Contact under Dry Conditions : Third Body Approach. *Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap Between Macro, Micro and Nanoscale, Nano Science Series II*, **10**, 393–411.

[Descartes & Berthier, 2002] Descartes, S, & Berthier, Y. 2002. Rheology and Flows of Solid Third Bodies : Background and Application to an MoS1.6 Coating. *Wear*, **252**(7), 546–556.

[Deschanel & Weiss, 2019] Deschanel, Stéphanie, & Weiss, Jérôme. 2019. Contrôle de la fatigue des matériaux par émission acoustique. *Étude et propriétés des métaux*, Jan.

[Dvorak *et al.*, 2007] Dvorak, Susanne, Wahl, Kathryn J., & Singer, Irwin L. 2007. In Situ Analysis of Third Body Contributions to Sliding Friction of a Pb–Mo–S Coating in Dry and Humid Air. **28**, 263–274.

[Eden *et al.*, 1911] Eden, E. M., Rose, W. N., & Cunningham, P. L. 1911. The Endurance of Metals : Experiments on Rotating Beams at University College, London. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, **81**(1), 839–974.

[Eguchi *et al.*, 2009] Eguchi, Masao, Shibamiya, Takashi, & Yamamoto, Takashi. 2009. Measurement of Real Contact Area and Analysis of Stick/Slip Region. *Tribology International*, **42**(11-12), 1781–1791.

[Farhidzadeh *et al.*, 2014] Farhidzadeh, Alireza, Mpalaskas, Anastasios C., Matikas, Theodore E., Farhidzadeh, Hamidreza, & Aggelis, Dimitrios G. 2014. Fracture Mode Identification in Cementitious

Materials Using Supervised Pattern Recognition of Acoustic Emission Features. *Construction and Building Materials*, **67**, 129–138.

[Feng *et al.*, 2019] Feng, Peipei, Borghesani, Pietro, Smith, Wade A., Randall, Robert B., & Peng, Zhongxiao. 2019. A Review on the Relationships between Acoustic Emission, Friction and Wear in Mechanical Systems. *Applied Mechanics Reviews*, **72**(2).

[Ferrer *et al.*, 2010] Ferrer, C., Salas, F., Pascual, M., & Orozco, J. 2010. Discrete Acoustic Emission Waves during Stick–Slip Friction between Steel Samples. *Tribology International*, **43**(1-2), 1–6.

[Fillot *et al.*, 2007] Fillot, N., Iordanoff, I., & Berthier, Y. 2007. Wear Modeling and the Third Body Concept. *Wear*, **262**(7), 949–957.

[Fouvry *et al.*, 1995] Fouvry, S., Kapsa, Ph., & Vincent, L. 1995. Analysis of Sliding Behaviour for Fretting Loadings : Determination of Transition Criteria. *Wear*, **185**(1), 35–46.

[Fouvry *et al.*, 2003a] Fouvry, S., Liskiewicz, T., Kapsa, Ph., Hannel, S., & Sauger, E. 2003a. An Energy Description of Wear Mechanisms and Its Applications to Oscillating Sliding Contacts. *Wear*, **255**(1-6), 287–298.

[Fouvry *et al.*, 2003b] Fouvry, S., Kapsa, P., & Vincent, L. 2003b. A Global Methodology to Quantify Fretting Damages. *Fretting Fatigue : Advances in Basic Understanding and Applications*, Jan.

[Fouvry *et al.*, 2006] Fouvry, S., Fridrici, V., Langlade, C., Kapsa, Ph, & Vincent, L. 2006. Palliatives in Fretting : A Dynamical Approach. *Tribology International*, **10**(39), 1005–1015.

[Fouvry *et al.*, 2017] Fouvry, S., Arnaud, P., Mignot, A., & Neubauer, P. 2017. Contact Size, Frequency and Cyclic Normal Force Effects on Ti–6Al–4V Fretting Wear Processes : An Approach Combining Friction Power and Contact Oxygenation. *Tribology International*, **113**(Sept.), 460–473.

[Fouvry, 1997] Fouvry, Siegfried. 1997 (Jan.). *Etude Quantitative Des Dégradations En Fretting*. Thesis, Ecully, Ecole centrale de Lyon.

[Fouvry *et al.*, 1996] Fouvry, Siegfried, Kapsa, Philippe, & Vincent, Leo. 1996. Quantification of Fretting Damage. *Wear*, **200**(1), 186–205.

[Fouvry *et al.*, 2011] Fouvry, Siegfried, Jedrzejczyk, Pawel, & Chalandon, Pierre. 2011. Introduction of an Exponential Formulation to Quantify the Electrical Endurance of Micro-Contacts Enduring Fretting Wear : Application to Sn, Ag and Au Coatings. *Wear : an international journal on the science and technology of friction lubrication and wear*, **271**, 1524–1534.

[Fridrici, 2002] Fridrici, Vincent. 2002 (Jan.). *Fretting d'un Alliage de Titane Revêtu et Lubrifié : Application Au Contact Aube/Disque*. Thesis, Ecully, Ecole centrale de Lyon.

[G. R. Yantio, 2007] G. R. Yantio. 2007. Comportement tribologique d'un alliage de titane traité et/ou revetu en fretting à débattement libre. 205.

[Geng *et al.*, 2010] Geng, X., Zhang, Z., Barthel, E., & Dalmas, D. 2010. Mechanical Behavior of Stiff Coating on Glass under Sliding Contact. *Wear*, **269**(5), 351–361.

[Geng *et al.*, 2019] Geng, Zhe, Puhan, Debashis, & Reddyhoff, Tom. 2019. Using Acoustic Emission to Characterize Friction and Wear in Dry Sliding Steel Contacts. *Tribology International*, **134**(June), 394–407.

[Godet, 1984b] Godet, Maurice. 1984b. The Third-Body Approach : A Mechanical View of Wear. *Wear*, **100**(1), 437–452.

[Godet, 1990] Godet, Maurice. 1990. Third-Bodies in Tribology. *Wear*, **136**(1), 29–45.

[Gohar & Cameron, 1963] Gohar, R., & Cameron, A. 1963. Optical Measurement of Oil Film Thickness under Elasto-Hydrodynamic Lubrication. *Nature*, **200**(4905), 458–459.

[Haas *et al.*, 2020] Haas, Michael, El Syaad, Karim, Cihak-Bayr, Ulrike, Pauschitz, Andreas, & Gröschl, Martin. 2020. Examination of Undisturbed Acoustic Emission Generated by Experimentally Modelled Two-Body Abrasive Wear Events. *Tribology International*, **141**(Jan.), 105912.

[Halliday & Hirst, 1956] Halliday, J. S., & Hirst, W. 1956. The Fretting Corrosion of Mild Steel. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **236**(1206), 411–425.

[Hartman, 1977] Hartman, WF. 1977. Towards Standards for Acoustic Emission Technology. *Pages 138–145 of :* Berger, H. (ed), *Nondestructive Testing Standards—A Review*. West Conshohocken, PA : ASTM International.

[Hase *et al.*, 2008] Hase, Alan, Wada, Masaki, & Mishina, Hiroshi. 2008. The Relationship between Acoustic Emissions and Wear Particles for Repeated Dry Rubbing. *Wear*, **5–6**(265), 831–839.

[Hase *et al.*, 2009] Hase, Alan, Mishina, Hiroshi, & Wada, Masaki. 2009. Acoustic Emission in Elementary Processes of Friction and Wear : In-Situ Observation of Friction Surface and AE Signals. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, **3**(4), 333–344.

[Hase *et al.*, 2012] Hase, Alan, Mishina, Hiroshi, & Wada, Masaki. 2012. Correlation between Features of Acoustic Emission Signals and Mechanical Wear Mechanisms. *Wear*, **292–293**(July), 144–150.

[Hertz, 1882] Hertz, Heinrich. 1882. Ueber die Berührung fester elastischer Körper. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, **92**, 156–171.

[Hills *et al.*, 1994] Hills, D A, Munisamy, R L, Nowell, D, & Atkins, A G. 1994. Brittle Fracture from a Sliding Hertzian Contact. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science*, **208**(6), 409–415.

[Holm, 1946] Holm, Heijne A. v. Ragnar. 1946. *Electric Contacts.* Stockholm : H. Geber.

[Huq & Celis, 2002] Huq, M. Z., & Celis, J. P. 2002. Expressing Wear Rate in Sliding Contacts Based on Dissipated Energy. *Wear*, **252**(5), 375–383.

[Ito *et al.*, 2009] Ito, Satoshi, Shima, Masayuki, Jibiki, Tatsuhiro, & Akita, Hideki. 2009. The Relationship between AE and Dissipation Energy for Fretting Wear. *Tribology International*, **42**(2), 236–242.

[Jibiki *et al.*, 2001] Jibiki, T., Shima, M., Akita, H., & Tamura, M. 2001. A Basic Study of Friction Noise Caused by Fretting. *Wear*, **251**(1), 1492–1503.

[Jlaiel *et al.*, 2020] Jlaiel, Khouloud, Yahiaoui, Malik, Paris, Jean-Yves, & Denape, Jean. 2020. Tribolumen : A Tribometer for a Correlation between AE Signals and Observation of Tribological Process in Real-Time-Application to a Dry Steel/Glass Reciprocating Sliding Contact. *Lubricants*, **8**(4), 47.

[Johnson & Johnson, 1985] Johnson, K. L., & Johnson, Kenneth Langstreth. 1985. *Contact Mechanics*. Cambridge University Press.

[Johnson *et al.*, 2012] Johnson, Michael B., Ozevin, Didem, Washer, Glenn A., Ono, Kanji, Gostautas, Richard S., & Tamutus, Terry A. 2012. Acoustic Emission Method for Real-Time Detection of Steel Fatigue Crack in Eyebar. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, **2313**(1), 72–79.

[Jullien *et al.*, 1996] Jullien, A., Meurisse, M. H., & Berthier, Y. 1996. Determination of Tribological History and Wear through Visualisation in Lubricated Contacts Using a Carbon-Based Composite. *Wear*, **194**(1), 116–125.

[Kaiser, 1950] Kaiser, Joseph. 1950. *Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch*. Ph.D. thesis.

[Kennedy *et al.*, 1997] Kennedy, Francis E, Frusescu, Dan, & Li, Jiaying. 1997. Thin Film Thermocouple Arrays for Sliding Surface Temperature Measurement. *Wear*, **207**(1), 46–54.

[Kim, 2018] Kim, Kyungmok. 2018. Fretting Studies on Electroplated Brass Contacts. *International Journal of Mechanical Sciences*, **140**(May), 306–312.

[Kim *et al.*, 2013] Kim, Kyungmok, Geringer, Jean, Pellier, Julie, & Macdonald, Digby D. 2013. Fretting Corrosion Damage of Total Hip Prosthesis : Friction Coefficient and Damage Rate Constant Approach. *Tribology International*, **60**(Apr.), 10–18.

[Kolubaev *et al.*, 2010] Kolubaev, E. A., Kolubaev, A. V., & Sizova, O. V. 2010. Analysis of Acoustic Emission during Sliding Friction of Manganese Steel. *Technical Physics Letters*, **36**(8), 762–765.

[Korsunsky *et al.*, 2008] Korsunsky, Alexander M., Torosyan, Aghasi R., & Kim, Kyungmok. 2008. Development and Characterization of Low Friction Coatings for Protection against Fretting Wear in Aerospace Components. *Thin Solid Films*, **516**(16), 5690–5699.

[Krick *et al.*, 2011] Krick, Brandon, Vail, J., & Persson, Bo. 2011. Optical In Situ Micro Tribometer for Analysis of Real Contact Area for Contact Mechanics, Adhesion, and Sliding Experiments. *Tribology Letters*, **45**(Jan.), 1–10.

[Lackner & Dusek, 2008] Lackner, Gerald, & Dusek, Rene. 2008. SEMI-AUTOMATIC TESTING OF GAS CYLINDERS. 6.

[Le Gall, 1995] Le Gall, Claire. 1995 (Jan.). *Etude Des Phenomenes de Degradation Dans Les Contacts Electriques Bas Niveau Soumis a Des Micro-Vibrations*. These de Doctorat, Paris 11.

[Li *et al.*, 2016] Li, Li, Swolfs, Yentl, Straumit, Ilya, Yan, Xiong, & Lomov, Stepan V. 2016. Cluster Analysis of Acoustic Emission Signals for 2D and 3D Woven Carbon Fiber/Epoxy Composites. *Journal of Composite Materials*, **50**(14), 1921–1935.

[Lingard *et al.*, 1993] Lingard, S., Yu, C. W., & Yau, C. F. 1993. Sliding Wear Studies Using Acoustic Emission. *Wear*, **162–164**(Apr.), 597–604.

[Mastrogiannis *et al.*, 2015] Mastrogiannis, D., Antsygina, T. N., Chishko, K. A., Mavromatou, C., & Hadjicontis, V. 2015. Relationship between Electromagnetic and Acoustic Emissions in Deformed Piezoelectric Media : Microcracking Signals. *International Journal of Solids and Structures*, **56–57**(Mar.), 118–125.

[McBride, 1989] McBride, S. L. 1989. Acoustic Emission from Lubricated and Unlubricated Rubbing Surfaces. *J. Acoustic Emission*, **8**(1), 192–197.

[McDowell, 1952] McDowell, J. 1952. Fretting Corrosion Tendencies of Several Combinations of Materials. *Symposium on Fretting Corrosion*, Jan.

[Merhej *et al.*, 2009] Merhej, R, Béguin, D, J, Paris, J.-Y, & Denape, J. 2009. ACOUSTIC EMISSION FOR INVESTIGATIONS ON FRETTING WEAR OF CERAMIC-METAL CONTACTS. 7.

[Meriaux *et al.*, 2010] Meriaux, J., Boinet, M., Fouvry, S., & Lenain, J. C. 2010. Identification of Fretting Fatigue Crack Propagation Mechanisms Using Acoustic Emission. *Tribology International*, **43**(11), 2166–2174.

[Mills-Dadson *et al.*, 2013] Mills-Dadson, B., Islam, Abm I., Asamene, K., & Sundaresan, M. 2013 (Apr.). Monitoring Friction Related Surface Degradation Using Acoustic Emission Technique. *Page 86940V of :* Yu, Tzu Yang, Gyekenyesi, Andrew L., Shull, Peter J., Diaz, Aaron A., Wu, H. Felix, & Aktan, A. Emin (eds), *SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*.

[Mindlin & Deresiewicz, 1953] Mindlin, Raymond David, & Deresiewicz, Herbert. 1953. Elastic Spheres in Contact Under Varying Oblique Forces. *J Appl Mech 75*, 327–344.

[Mohrbacher *et al.*, 1995] Mohrbacher, H., Celis, J. P., & Roos, J. R. 1995. Laboratory Testing of Displacement and Load Induced Fretting. *Tribology International*, **28**(5), 269–278.

[Muratore *et al.*, 2011] Muratore, C., Bultman, J. E., Aouadi, S. M., & Voevodin, A. A. 2011. In Situ Raman Spectroscopy for Examination of High Temperature Tribological Processes. *Wear*, **270**(3), 140–145.

[Noël *et al.*, 2012] Noël, S., Alamarguy, D., Baraton, L., & Laurat, P. 2012. Influence of Contact Interface Composition on the Electrical and Tribological Properties of Nickel Electrodeposits during Fretting Tests. *Pages 221–227 of : 26th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2012)*.

[Paulin *et al.*, 2005] Paulin, C., Fouvry, S., & Deyber, S. 2005. Wear Kinetics of Ti–6Al–4V under Constant and Variable Fretting Sliding Conditions. *Wear*, **259**(1), 292–299.

[Prakash *et al.*, 2002] Prakash, Balakrishnan, Ftikos, Christos, & Celis, Jean Pierre. 2002. Fretting Wear Behavior of PVD TiB2 Coatings. *Surface and Coatings Technology*, **154**(2-3), 182–188.

[Quinn, 1983] Quinn, T. 1983. Review of Oxidational Wear : Part I : The Origins of Oxidational Wear.

[Ramadan *et al.*, 2008] Ramadan, S., Gaillet, L., Tessier, C., & Idrissi, H. 2008. Detection of Stress Corrosion Cracking of High-Strength Steel Used in Prestressed Concrete Structures by Acoustic Emission Technique. *Applied Surface Science*, **254**(8), 2255–2261.

[Ramalho & Miranda, 2006] Ramalho, A., & Miranda, J.C. 2006. The Relationship between Wear and Dissipated Energy in Sliding Systems. *Wear*, **260**(4-5), 361–367.

[Rastegaev *et al.*, 2018] Rastegaev, I. A., Merson, D. L., Danyuk, A. V., Afanasyev, M. A., & Vinogradov, A. 2018. Using Acoustic Emission Signal Categorization for Reconstruction of Wear Development Timeline in Tribosystems : Case Studies and Application Examples. *Wear*, **410–411**(Sept.), 83–92.

[Roget, 1990] Roget, James. 1990. Émission acoustique. 13.

[Sauger *et al.*, 2000] Sauger, E, Fouvry, S, Ponsonnet, L, Kapsa, Ph, Martin, J. M, & Vincent, L. 2000. Tribologically Transformed Structure in Fretting. *Wear*, **245**(1), 39–52.

[Scruby, 1984] Scruby, C. B. 1984. Quantitative Acoustic Emission Techniques. **8**, 141–208.

[Shockley *et al.*, 2014] Shockley, Michael, Descartes, S., Irissou, E., Legoux, J.-G., & Chromik, R. 2014. Third Body Behavior During Dry Sliding of Cold-Sprayed Al-Al2O3 Composites : In Situ Tribometry and Microanalysis. *Tribology Letters*, **54**(2), 191–206.

[Skawinski *et al.*, 2008] Skawinski, Olivier, Hulot, Patrice, Binétruy, Christophe, & Rasche, Christian. 2008. STRUCTURAL INTEGRITY EVALUATION OF CNG COMPOSITE CYLINDERS BY ACOUSTIC EMISSION MONITORING. 6.

[Sriraman *et al.*, 2012] Sriraman, K. R., Strauss, H. W., Brahimi, S., Chromik, R. R., Szpunar, J. A., Osborne, J. H., & Yue, S. 2012. Tribological Behavior of Electrodeposited Zn, Zn–Ni, Cd and Cd–Ti Coatings on Low Carbon Steel Substrates. *Tribology International*, **56**(Dec.), 107–120.

[Stoyanov *et al.*, 2012] Stoyanov, Pantcho, Strauss, Holger W., & Chromik, Richard R. 2012. Scaling Effects between Micro- and Macro-Tribology for a Ti–MoS2 Coating. *Wear*, **274–275**(Jan.), 149–161.

[Sun *et al.*, 2005] Sun, Jun, Wood, R. J. K., Wang, L., Care, I., & Powrie, H. E. G. 2005. Wear Monitoring of Bearing Steel Using Electrostatic and Acoustic Emission Techniques. *Wear*, **259**(7), 1482–1489.

[Taura & Nakayama, 2018] Taura, Hiroo, & Nakayama, Kazuki. 2018. Behavior of Acoustic Emissions at the Onset of Sliding Friction. *Tribology International*, **123**(July), 155–160.

[Teng & Sato, 2004] Teng, Jinbing, & Sato, Kenkichi. 2004. In Situ Observations of Fretting Wear Behavior in PMMA/Steel Model. *Materials & Design*, **25**(6), 471–478.

[Tomlinson & Hardy, 1927] Tomlinson, G. A., & Hardy, William Bate. 1927. The Rusting of Steel Surfaces in Contact. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, **115**(771), 472–483.

[Ural, 2011] Ural, Aydemir Güralp. 2011. *Performance En Frottement de Composites Alumine-Métal Avec Ou sans Nanotubes de Carbone Densifiés Par Frittage Flash : Identification Des Conditions de Grippage et Des Mécanismes d'usure*. Ph.D. thesis.

[Vincent *et al.*, 1992] Vincent, L., Berthier, Y., Dubourg, M. C., & Godet, M. 1992. Mechanics and Materials in Fretting. *Wear*, **153**(1), 135–148.

[Vingsbo & Söderberg, 1988] Vingsbo, Olof, & Söderberg, Staffan. 1988. On Fretting Maps. *Wear*, **126**(2), 131–147.

[Wade *et al.*, 2019] Wade, A., Copley, R., Clarke, B., Alsheikh Omar, A., Beadling, A. R., Liskiewicz, T., & Bryant, M. G. 2019. Real-Time Fretting Loop Regime Transition Identification Using Acoustic Emissions. *Tribology International*, **145**(Dec.).

[Wang & Wood, 2009] Wang, L., & Wood, R. J. K. 2009. Acoustic Emissions from Lubricated Hybrid Contacts. *Tribology International*, **42**(11), 1629–1637.

[Yahiaoui *et al.*, 2021] Yahiaoui, M., Marconnet, M., Jlaiel, K., Paris, J.-Y., & Denape, J. 2021. Acoustic Emission Characterization of Transgranular Cracks in WC–Co Cemented Carbides During a One-Way Scratch. *Tribology Letters*, **69**(4), 133.

[Yahiaoui *et al.*, 2017] Yahiaoui, Malik, Rigaud, Eric, Mazuyer, D., & Cayer-Barrioz, J. 2017. Forced Oscillations Dynamic Tribometer with Real-Time Insights of Lubricated Interfaces. *Review of Scientific Instruments*, **88**(3), 1–8.

[Yahiaoui *et al.*, 2019] Yahiaoui, Malik, Chabert, France, Paris, Jean-Yves, Nassiet, Valérie, & Denape, Jean. 2019. Friction, Acoustic Emission, and Wear Mechanisms of a PEKK Polymer.

[Zahouani *et al.*, 1998] Zahouani, H., Vargiolu, R., & Loubet, J. L. 1998. Fractal Models of Surface Topography and Contact Mechanics. *Mathematical and Computer Modelling*, **28**(4), 517–534.

[Zhao & Zhou, 2019] Zhao, Wen-zheng, & Zhou, Wei. 2019. Cluster Analysis of Acoustic Emission Signals and Tensile Properties of Carbon/Glass Fiber–Reinforced Hybrid Composites. *Structural Health Monitoring*, **18**(5-6), 1686–1697.

Annexe A : Modification du tribomètre

Un tribomètre original conçu pour simuler les conditions de fretting et de glissement alternatif dans des contacts de type sphère-plan, a été construit par le LGP de l'ENIT. Ce dispositif a été modifié pour l'adapter à cette étude. Pour cela un nouveau bras porteur a été usiné (Figure 4.19) . La nacelle mobile a été modifiée (Figure 4.20). Enfin deux mâchoires ont été fabriquées permettant un meilleur serrage de l'échantillon plan dans la nacelle mobile (Figures 4.21 et 4.22).

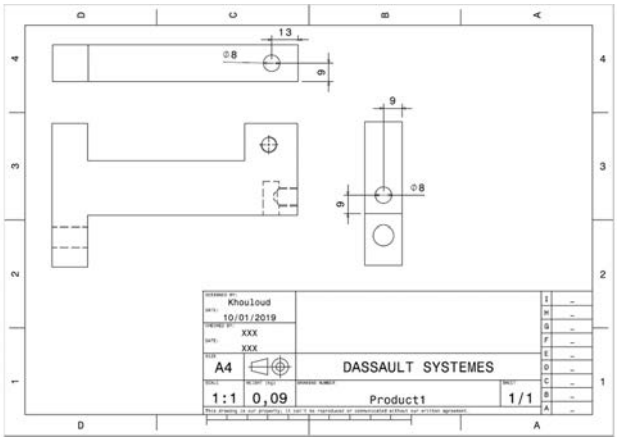


FIGURE 4.19 – Plan du nouveau bras porteur.

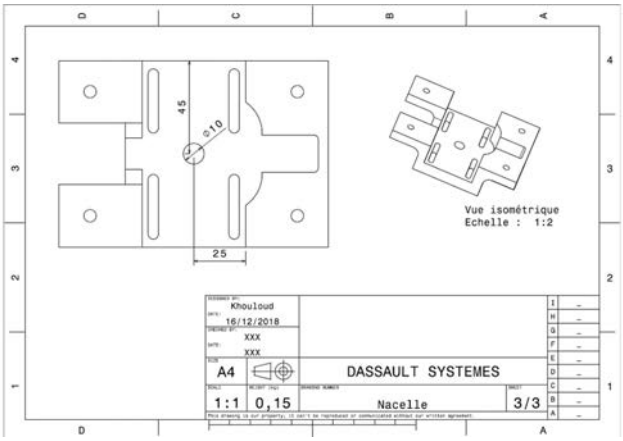


FIGURE 4.20 – Plan de la nacelle mobile après modification.

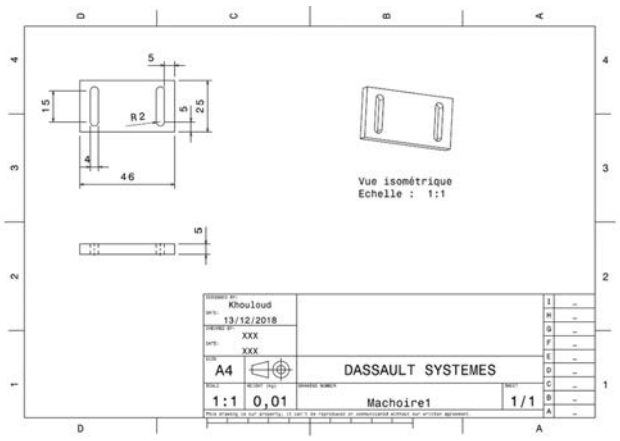


FIGURE 4.21 – Plan de la première mâchoire.

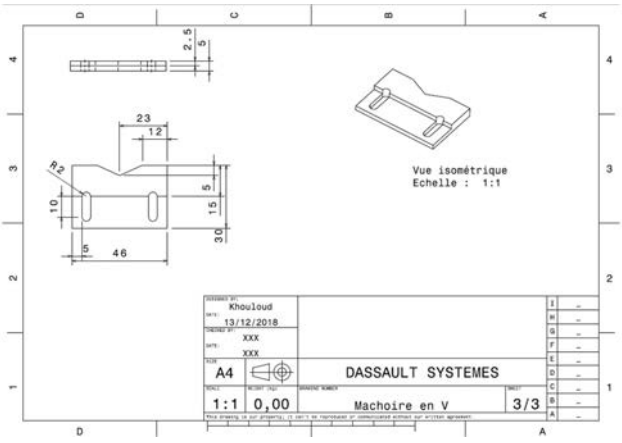


FIGURE 4.22 – Plan de la deuxième mâchoire.

Annexes B : Capteur d'émission acoustique

Capteur d'émission acoustique

Le capteur d'émission acoustique possède une sensibilité optimale sur une plage de fréquence de 0,1 à 1 MHz (Figure 4.23).

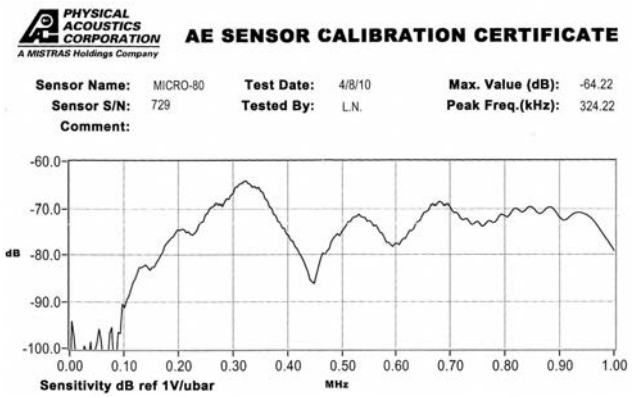


FIGURE 4.23 – Caractéristique de la bande passante du capteur d'émission acoustique.

Annexes C :Théorie de Hertz

Théorie de Hertz

Hertz [Hertz, 1882] décrit les contraintes et déformations des contacts sphère/plan et cylindre/plan en indentation pour un comportement linéaire élastique. Si l'on considère un contact entre une sphère rigide et un plan infini (Figure 4.24) la géométrie du contact et la répartition des contraintes peuvent être calculées par la théorie de Hertz.

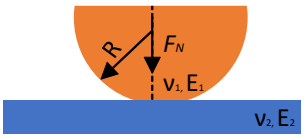


FIGURE 4.24 – Illustration d'un contact élastique sphère/plan selon la théorie de Hertz.

Le rayon de contact est donnée par la formule suivante (Équation 4.6) :

$$a = \left[\frac{3F_N R}{4E^*}\right]^{1/3} \tag{4.6}$$

Le rayon a dépend du module élastique E, du module effectif E^* calculé à partir des propriétés des deux corps en contact et du coefficient de Poisson ν (Équation 4.7). Le rayon de contact est proportionnel à la force normale F_N.

$$\frac{1}{E^*} = \left[\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right] \tag{4.7}$$

La répartition de la contrainte de compression à la surface est donnée par la relation (Équation 4.8) :

$$P(r) = \frac{3}{2}\frac{F_N}{\pi a^2}\left[1 - \frac{r^2}{a^2}\right]^{1/2} \tag{4.8}$$

Titre de la thèse : Corrélation entre signaux d'émission acoustique et mécanismes tribologiques par visualisation synchrone d'une interface acier/verre.

Résumé : L'étude des interfaces glissantes constitue un défi constant en tribologie en raison du caractère masqué et dynamique des phénomènes qui s'y déroulent. En effet, l'essentiel de la compréhension des phénomènes tribologiques en frottement sec provient d'études ex situ de contacts séparés et figés. Pour observer directement l'évolution des éléments interfaciaux circulant dans un contact frottant, un tribomètre a été modifié afin d'assurer une synchronisation du suivi en temps réel à travers l'observation *in situ* des interfaces dynamiques par caméra rapide couplée à la technique d'émission acoustique (EA). L'étude des signaux d'EA a montré, lors d'études antérieures, qu'ils sont sensibles non seulement aux différents modes d'accommodation interfaciaux mais également aux différents débits de matière susceptibles de contribuer à la portance du contact. Le couple de matériaux acier 100Cr6/verre sodocalcique (transparent) a été étudié dans une configuration de contact bille/plan et en conditions de glissement réciproque.

La première partie de cette étude expose l'ensemble des résultats expérimentaux englobant l'évolution du coefficient de frottement, l'observation directe des phénomènes dans le contact à travers le verre et l'identification des mécanismes d'endommagement et d'usure activés dans des conditions d'essai constantes en déplacement, en fréquence d'excitation et en charge normale. L'évolution temporelle du coefficient de frottement a montré l'existence de trois phases différentes en cours d'essai correspondant à un régime de frottement bas, un régime transitoire et un régime permanent. La synchronisation de l'activité acoustique a confirmé l'existence de ces trois régimes à travers les paramètres acoustiques les plus pertinents à savoir l'amplitude acoustique, l'énergie absolue et la fréquence centroïde. L'observation directe du contact frottant a permis de relier les signaux acoustiques avec l'évolution spatiale et temporelle des mécanismes d'endommagement et d'usure. Ces résultats ont mis en lumière trois principaux mécanismes : l'établissement d'un troisième corps, l'apparition de fissures hertziennes et un phénomène de remplissage du convergent par des débris de matière (zone d'entrée du contact) pour partie recirculés dans le contact ou repoussés hors du contact (débit d'usure). Ces mécanismes ont été corrélés à des groupes de salves d'EA (clusters), c'est-à-dire selon leur signature acoustique, notamment grâce à des identifications synchrones (temporelles et spatiales) directes sur les signaux mécaniques et l'observation *in situ* ou à l'aide d'une analyse en composantes principales. La synchronisation de l'observation a aussi permis de décrire quantitativement l'évolution de ces mécanismes par des mesures en continu de l'aire de portance du contact, des dimensions du tribofilm et de la hauteur maximale du remplissage du convergent ainsi que le nombre et la taille des fissures apparaissant à l'arrière du contact.

La deuxième partie de l'étude a porté sur l'influence des paramètres opératoires sur la réponse tribologique et acoustique du contact acier/verre. Les différents essais ont montré que le coefficient de frottement et les dimensions des fissures hertziennes sont grandement influencés par la charge normale appliquée et la fréquence d'excitation. La classification des salves acoustiques a confirmé l'existence des trois mécanismes identifiés dans la première partie de l'étude (établissement d'un film interfacial, fissuration du verre et remplissage du convergent/divergent). Les caractéristiques acoustiques de ces classes sont fortement liées au développement des modes d'accommodation et à la taille des sites d'accommodation sources d'émission acoustique.

Mots clés : Glissement réciproque, émission acoustique, observation *in situ*, fissures de Hertz, tribofilm, mécanismes d'endommagement et d'usure.

Title of thesis : Correlation between acoustic emission signals and tribological mechanisms by synchronous visualization of a steel/glass interface.

Abstract : The study of sliding interfaces is a constant challenge in tribology because of the hidden and dynamic character of the phenomena they enclose. Indeed, most of the understanding of tribological mechanisms in dry friction comes from ex-situ studies performed on split contacts. To observe the dynamic of interfacial elements circulating in a sliding contact, a tribometer was designed to ensure real-time synchronization among friction measurement, *in situ* observations of the interfaces using a high-speed camera and acoustic emission (AE) acquisition. Previous studies already indicated that AE signals are sensitive not only to the different interfacial accommodation modes but also to the different material flow rates that may contribute to the contact lift. The model semi-transparent material pair 100Cr6 steel/soda-lime glass was set here in a ball-on-flat contact configuration and under reciprocating sliding conditions.

The first part of this study presents all the experimental results including the friction coefficient evolution, the direct observation of the contact through the glass, and the identification of the damage and wear mechanisms activated under constant test conditions such as displacement, excitation frequency, and load. The friction coefficient curves showed the existence of three different phases during the test corresponding to a low friction regime, a transient regime, and a steady-state regime. The synchronized acoustic activity confirmed the relevance of these three regimes through the most sensitive acoustic parameters, namely the acoustic amplitude, the absolute energy, and the centroid frequency. The direct observation of the rubbing contact led to clear correlations between the AE signal and the spatial and temporal evolution of the damage and wear mechanisms. These results highlighted three main mechanisms : the establishment of a third body, the occurrence of Hertzian cracks, and a well-identified phenomenon of convergent filling by material debris (contact entry zone) partly recirculating in the contact or definitely pushed out from the contact (wear flow). These mechanisms were associated to AE hits clusters, i.e. according to their AE signature, notably through direct synchronous identifications (temporal and spatial) on the mechanical signals coupled with *in situ* observations or through principal component analysis (PCA). The synchronous observations also gave a quantitative description of these mechanisms' evolution with a decrease of the bearing contact area, the increase of the tribofilm thickness and the convergent particle filling height as well as the number and size of the cracks appearing at the back of the contact.

The second part of the study focused on the repeatability and the developments of the mechanisms identified earlier with different operating conditions. The first result is that the friction coefficient and the dimensions of the Hertzian cracks are obviously greatly influenced by the normal load applied and the excitation frequency. The acoustic hits clusters defined were confirmed as well as the existence of the major mechanisms identified in the first part of this study (establishment of an interfacial film, Hertzian glass cracks and filling of the convergent/divergent). The AE characteristics of the clusters were strongly related to the development of these accommodation modes and to the size of the accommodation sites which are sources of acoustic emission.

Keywords : Reciprocating sliding, acoustic emission, *in situ* observation, Hertzian cracks, tribofilm, damage and wear mechanisms.