

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

Année 2011

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MAGISTER

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA STABILITE DU BANC DE SIMULATION DE
FRETTEING

Option : Mécanique de la rupture

Par

Karima KECHOUT

DIRECTEUR DE MEMOIRE : Nassereddine ZEGHIB Pr Université de Annaba

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : HAMADACHE Hamid Dr Université de Annaba

EXAMINATEURS : KHELIF Rabia Dr Université de Annaba

HAMMANI Mohamed Seghir Dr Université de Annaba

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Mécanique des Matériaux et Maintenance Industrielle (LR3MI). Je remercie les membres du laboratoire qui m'ont fait l'honneur de m'intégrer dans cette équipe de recherche.

J'ai tiens à remercier mon directeur de thèse Pr Zeghib Nassereddine où j'ai apprécié la liberté et la confiance, que m'a laissé dans la conduite de ma recherche. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude. En outre, j'ai beaucoup appris en observant sa grande classe.

Mes remerciements vont aussi à Mr Abdelaziz Belhamzaoui et Mr Rachid Laissaoui pour leurs disponibilités et leurs précieux conseils concernant le déroulement des essais.

Je tiens également à remercier Dr Hamid Hamadache pour s'être intéressé à ce travail et d'avoir accepté de présider mon jury.

Je suis particulièrement reconnaissant à Dr Khelif Rabia et Dr Hamani Mohamed Seghir pour avoir accepté d'être examinateurs de ce travail.

Mes remerciements vont également à mes collègues du laboratoire qui m'ont aidé durant ce travail.

Enfin, je tiens à remercier vivement mes professeurs qui ont contribué à ma formation de près ou de loin et particulièrement ceux de l'Ecole Nationale Doctorale de Mécanique de Construction des treize pôles.

*Je dédie ce travail :
A mon mari Mounir, paix pour son âme*

A mon père et ma mère, en témoignage d'un grand amour

A mes frères et mes sœurs,

A mes amis et mes collègues,

A tous ceux que j'aime ...

Résumé

De nombreux assemblages mécaniques sont soumis à des sollicitations de chargement vibratoire occasionnant des déplacements de très faibles amplitudes entre les pièces en contact (conditions dites de « fretting »). Les microglissements générés entre les surfaces provoquent des dégradations susceptibles d'altérer fortement la fiabilité et la durabilité des structures dans lesquelles ces organes sont impliqués. Ce type d'avarie se rencontre dans toutes les liaisons quasi statiques. Les mécanismes d'endommagement par fretting sont bien connus : fissuration et rupture, corrosion ou transformations structurales, usure avec formation de débris, usure adhésive pouvant conduire au grippage, suivant les conditions opératoires.

Dans un essai de fretting le principe est de reproduire un milieu vibratoire dans une zone où une machine tournante à palier de roulements est à l'arrêt (en redondance) à proximité d'une autre machine tournante ; mais lors de la simulation on a rencontré plusieurs problèmes en passant par des fréquences (fréquences de résonnance) qui perturbent l'essai (avoir deux types de fretting : radial et tangentiel, au lieu d'un fretting radial) et influent sur les résultats. Pour cela on a proposé de faire une étude de la stabilité et une analyse vibratoire qui nous permet de détecter ces fréquences et les éviter et pour vérifier la fiabilité du banc de simulation de fretting réalisé au niveau du laboratoire de recherche (*LR3MI*) et assurer la reproductibilité des essais.

Dans cette étude nous avons simulé un contact d'un roulement à bille (sphère-plan) sous les conditions du fretting radial où la sphère est une bille à roulement en contact avec une surface plane d'un échantillon cylindrique en matériau 100Cr6 traité. L'essai de fretting se fait sous une charge constante de 650N, la fréquence est maintenue à 34.9 Hz pour tous les essais, le nombre de cycles varie entre 25000 et 1500000 cycles. L'essai se fait à la température ambiante (air de laboratoire) à sec et avec lubrification.

On a commencé l'étude par une amélioration du banc qui était instable : on a changé la table par une autre plus rigide et modifié plusieurs éléments de la machine, puis une préparation des échantillons, et finalement l'application d'un essai de fretting accompagné d'un analyseur de vibrations pour contrôler la stabilité du dispositif et avant pour déterminer ses fréquences propres et les éviter au cours de l'essai et une confirmation par une simulation par le logiciel de CAO (SolidWorks).

Mots clés : fretting, usure, analyse vibratoire, endommagement des roulements, acier 100Cr6.

Abstract

Many mechanical assemblies are subjected to stresses resulting loading vibratory displacement of very low amplitudes between pieces (conditions known as "fretting"). Microslipping generated between the surfaces causing damage that could affect significantly the reliability and durability of structures in which these organs are involved. This type of damage occurs in almost all static routes. The damage mechanisms are well known by fretting: cracking and fracture, corrosion or structural transformations, with the formation of wear debris, adhesive wear can lead to galling, as the operating conditions.

The principle in a fretting test is to reproducing a vibratory environment in an area where a rotating machine is stationary (redundantly) in the vicinity of another rotating machine, but in the simulation we met several problems through the frequencies (resonant frequencies) that disrupt the test of fretting (have two types of fretting-radial and tengentiell-instead of the radial fretting) and influence the results. For it has been proposed to vibration analysis that allows us to detect and avoid these frequencies and to verify the reliability of the bench simulation of fretting constructed at the research laboratory (LR3MI) and ensure the reproducibility of tests.

In this study we simulated a contact of a bearing ball (sphere-plane) under the conditions of the radial fretting where the sphere is a ball bearing against a flat surface of a cylindrical sample material 100Cr6 Treaty. The fretting test is done under a constant load of 650N, the frequency is maintained at 34.6 Hz for all tests, and the number of cycles varies between 25,000 and 1,500,000 cycles. The test is done under ambient temperature (laboratory air) without and with lubrication.

We started the study with improving the bench that was unstable: the table was changed and modified many components of the machine (holder of masses, ball-holder and the higher specimen-holder), then a sample preparation, and finally the application of a fretting test with a vibration analyzer and confirmed by simulation with software (logiciel) for CAO (solidworks).

Keywords: fretting, wear, vibration analysis, bearing damage, steel 100Cr6.

ملخص

تتعرض العديد من التجميعات الميكانيكية بمساهمة تحميل اهتزازي ذو سعة منخفضة للغاية للإزاحة بين القطع المتماسمة "التثلم بسبب الاحتكاك". تتسبب الإزاحات المجهرية الناشئة بين سطوح التماس في أضرار وتردي موثوقية ومتانة الهياكل التي تشترك فيها العناصر. هذا النوع من الضرر يحدث بشكل تقريبا ثابت وآلية التلف بسبب هذا التثلم يبدأ بتشققات متنامية تنتهي بالكسر، صدأ أو تحول بنية المادة، تثلم مع تكوين الفتات وتثلم لاصق يمكن أن يؤدي إلى التحام العناصر المتماسمة حسب ظروف التشغيل.

يكون المبدأ في اختبار التثلم الاحتكاكي هو إعداد وسط اهتزازي في منطقة ارتكاز لكرسي دوران أو مدرجة لآلة دورانية أثناء التوقف بشكل متكرر قريبا من آلة دورانية أخرى. ولكن عند المحاكاة تم مواجهة عدة صعوبات بداية بالترددات "الترددات والصدى" التي تسبب اضطرابا للاختبار "الحصول على نوعين من التثلم: شعاعي ومماسي، عند موضع التثلم الاحتكاكي" التي تؤثر على النتائج. ولهذا تم وضع فرضية استقرار وتحليل الاهتزاز التي تسمح بتعيين الترددات وتلافيتها والتحقق من محاكاة التثلم الاحتكاكي المنجز في مخبر بحث ميكانيكا المواد والصيانة الصناعية وضمان إعادة انجاز الاختبارات.

تم محاكاة تماس مدرجة ذات كريات "كرة-سطح" تحت ظروف التثلم الاحتكاكي الشعاعي بحيث يكون التماس بين كرية مدرجة وسطح مستوي لعينة اسطوانية من مادة 100Cr6 المعالجة، وأنجز اختبار التثلم الاحتكاكي بتأثير حمل ثابت بـ 650 نيوتن وبتردد مستقر 34.9 هيرتز لجميع الاختبارات، ويتراوح عدد الدورات بين 25.000 و 1.5000.000 دورة، وتم انجاز الاختبار في درجة حرارة الغرفة "المحيط الداخلي للمخبر" على الجاف وباستعمال المزلق.

بدأت الدراسة بتحسين وسائل الاختبار التي كانت غير مستقرة بتغيير الطاولة بأخرى أكثر صلابة وتعديل العديد من عناصر الآلة، ثم إعداد العينات وأخيرا تطبيق اختبار التثلم الاحتكاكي مرفقا بمحلل الاهتزازات لمراقبة التجميعية وتحديد تردداتها الصحيحة وتجنبها خلال الاختبار ثم التحقق بالمحاكاة باستخدام برنامج الرسم المدعم بالحاسوب "SolidWorks".

كلمات مفاتيح: التثلم الاحتكاكي، محلل اهتزازات، إتلاف مدرجات، فولاذ 100Cr6.

SOMMAIRE

Remerciements et dédicace

Nomenclature

Liste des figures et liste des tableaux

Sommaire

Résumé

Introduction..... 1

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 INTRODUCTION..... 3

I.1.1 Bref historique..... 3

I.1.2 Configurations de contacts..... 4

I.1.3 Origines du fretting..... 5

I.1.4 Endommagements causés en fretting..... 6

I.2 ANALYSE DES DEGRADATIONS INDUITES PAR LE FRETTING..... 8

I.2.1 Analyse de la fissuration..... 8

I.2.1.1 Amorçage des fissures..... 8

I.2.1.2 Propagation des fissures..... 9

I.2.2 Analyse de l'usure..... 9

I.2.2.1 Analyse qualitative de l'usure 10

I.2.2.2 Définition du volume de l'usure..... 11

I.2.3 Analyse du grippage..... 12

I.3 DEFEAULTS DE MACHINES..... 13

I.3.1.Introduction..... 13

I.3.2 Principaux défauts dans la machine..... 13

I.3.3 Constituants des roulements..... 14

I.3.4 Description du contact d'un roulement à billes..... 14

I.3.5 Introduction à la fatigue de contact de roulement 15

I.3.6 Contact normal de solides élastiques..... 16

I.3.6.1 Cas du contact ponctuel..... 17

I.3.6.2 Cas du contact linéique..... 18

I.3.7 Charges supportées par les roulements.....	19
I.3.7.1 Roulements supportant des charges radiales pures.....	20
I.3.7.2 Roulements supportant des charges combinées.....	20
I.3.7.3 Roulements supportant des charges axiales pures.....	21
I. 4 ENDOMMAGEMENT DE ROULEMENT	21
I. 4.1 Écaillage de fatigue (flaking)	21
I.4.2 Écaillage superficiel (peeling)	22
I.4.3 Grippage (smearing).....	23
I.4 Empreintes par déformation (indentation).....	24
I. 4.5 Incrustation de particules étrangères.....	24
I. 4.6 Corrosion.....	24
I. 4.7 Corrosion de contact (fretting corrosion).....	24
I.4.8 Faux effet Brinell (false brinnelling).....	25
I.4.9 Cratérisation (electrical pitting).....	25
I.4.10 Cannelures (fluting).....	26
I.4.11 Criques (cracks).....	26
I.4.12 Usure par abrasion (wear).....	26
I.4.13 Coloration.....	27

CHAPITRE II : DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI ET DE L'ANALYSEUR DE VIBRATIONS

II.1DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI.....	28
II.1.1 INTRODUCTION	28
II.1.1.1 Définition.....	28
II.1.1.2 Modes de fretting	28
II.1.1.3 Types de fretting.....	29
II.1.2 CLASSIFICATION DES BANCS D'ESSAI DU FRETTING	31
II.1.2.1 Selon le mode de fretting	31
II.1.2.1.1 Dispositif de fretting radial	31
II.1.2.1.2 Dispositif de fretting composé	39
II.1.2.1.3 Dispositif de fretting tangentiel.....	32
II.1.2.1.4 Le Vibro-Cryo-Tribomètre	33
II.1.2.1.5 Dispositif de fretting torsionnel	34

II.1.2.2 Selon le type de fretting.....	35
II.1.2.2.1 Fretting Wear.....	35
II.1.2.2.2 Fretting Fatigue.....	37
II.1.2.2.3 Fretting corrosion.....	37
II.1.3 LE BANC D’ESSAI DE FRETTEING RADIALE.....	38
II.1.3.1 Description générale.....	38
II.1.3.1.1 Partie mécanique	38
II.1.3.1.2 Partie mesure	47
II.1.3.2 Amélioration du bâti	40
II.2 DESCRIPTION DE L’ANALYSEUR DE VIBRATIONS.....	42
II.2.1 INTRODUCTION.....	42
II.2.2 L’ANALYSEUR DE VIBRATIONS.....	44
II.2.2.1 Définition.....	44
II.2.2.2 Détermination des fréquences propres.....	45
 CHAPITRE III : PREPARATION DU MATERIEL EXPERIMENTAL POUR L’APPLICATION DE L’ESSAI DE FRETTEING	
III.1 MODIFICATION DU BANC D’ESSAI DE FRETTEING	46
III.1.1 Changement de la table	46
III.1.2 Modification du porte tares	47
III.1.3 Modification du porte-éprouvette inférieure.....	49
III.1.4 Modification du porte-éprouvette supérieure.....	50
III.1.5 Protection par la peinture	50
III.1.6 Réglage du jeu de la barre d’articulation.....	51
III.1.7 Description du banc de simulation du fretting après modification.....	52
III.2 APPLICATION D’UN ESSAI DE FRETTEING.....	54
III.2.1 Présentation de l’essai de fretting.....	54
III.2.2 Caractéristiques et préparation des échantillons de l’essai.....	55
III.2.2.1 Caractéristiques échantillons.....	55
III.2.2.1 Préparation des échantillons.....	56
III.2.2.2.1 Traitements thermiques.....	56
III.2.2.2.2 L’enrobage.....	58

III.2.2.2.3 Le polissage.....	59
III.2.2.2.4 L'attaque chimique.....	60
III.2.2.2.5 Observation microscopique.....	60
III.2.3 Gamme de chargement et conditions d'essai.....	62
III.2.4 Observation microscopique après essai.....	62
III.2.5 Pesage des éprouvettes.....	64
III.3 DETERMINATION DES FREQUENCES PROPRES DU SYSTEME.....	65
III.3.1 A l'aide de l'analyseur de vibration.....	65
III.3.2 A l'aide du logiciel SolidWorks.....	66
 CHAPITRE IV : ETUDE ET ANALYSE DE LA STABILITE DU BANC D'ESSAI DE FRETTEING	
IV.1 INTRODUCTION.....	68
IV.2 EFFET DU NOMBRE DE CYCLE SUR LES DIMENSSIONS DES TRACES D'USURE PAR FRETTEING.....	68
IV.3 COMPARAISON DES TRACES D'USURE AVEC DES RESULTATS BIBLIOGRAPHIQUES.....	69
IV.3.1 Aspect général des traces de fretting (allure).....	69
IV.3.2 Comparaison des traces de fretting.....	72
IV.3.3 Description de profil d'usure.....	74
IV.3.4 Comparaison de profil d'usure.....	75
IV.3.5 Evolution de l'aire de contact.....	75
IV.3.5.1 Evolution de l'aire de contact en fonction du nombre de cycles	75
IV.3.5.2 Evolution de l'aire de contact en fonction de la nature de l'interface	76
IV.4 ANALYSE VIBRATOIRE.....	78
IV.4.1 Introduction.....	78
IV.4.2 Analyse des spectres.....	78

Conclusions et perspectives

Références bibliographiques

Annexes

LISTE DES FIGURES

Nº de figure	Titre	Page
CHAPITRE I		
I.1	Configurations de contacts.	5
I.2	Cas de liaisons quasi statiques soumises au fretting: assemblage par emmanchement pour aubes de soufflante des turboréacteurs.	6
I.3	Cas de mécanismes assurant une transmission de puissance soumis au fretting : turbopompe hydrogène du moteur Vinci.	6
I.4	Fretting dans des contacts électriques : a) câbles de ligne haute tension et b) coupe transversale d'un câble.	6
I.5	Fissuration des structures en fretting : a) Fissuration de câbles électriques ; b) Fissuration d'un assemblage par rivetage d'une structure d'avion ; c) Destruction d'un système de transmission de puissance soumis au fretting ; d) Destruction d'un contact aubes/disque de soufflante d'un turboréacteur soumis au fretting.	7
I.6	Quelques cas d'usure en fretting de pièces assemblées : a) Cannelures détruites et portées usées d'un arbre de rotor d'hélicoptère ; b) Usure d'un boîtier de transmission de puissance d'avion.	8
I.7	Schématisation de l'endommagement par fretting fatigue d'un contact plan-plan.	9
I.8	Propagation de fissure en deux étapes en condition de fretting.	10
I.9	Transformation tribologique superficielle en fretting (coupe transversale).	12
I.10	Pourcentage des défauts.	14
I.11	Constitution d'un roulement à bille.	14
I.12	Description du contact avec lignes de glissement .	15
I.13	Exemples d'avaries du type RCF : a) Fissures et piqûres sur un rail de train ; b) Ecaillage sévère sur un palier de butée.	15
I.14	Schéma représentatif des axes principaux de la RCF.	16
I.15	Contact ponctuel.	17
I.16	Contact linéique.	18
I.17	Charges supportées par un roulement.	19

I.18	Ecaillage sévère sur une bague extérieure de roulement.	22
I.19	Le Micro écaillage et Ecaillage.	23
I.20	Le grippage.	23
I.21	Exemple de dégradation par fretting avec la corrosion de la zone de contact.	25
I.22	Faux effet Brinell sur une bague de butée.	25
I.23	Les cannelures : a)Cannelures ; b) Cannelures, détail.	26
I.24	L'usure.	27
CHAPITRE II		
II.1	Schéma général du modèle : Sphère/Plan.	28
II.2	Les quatre modes de base du fretting.	29
II.3	Dispositif de fretting radial (mode II).	31
II.4	Dispositif de fretting composé.	32
II.5	Dispositif de fretting tangentiel.	33
II.6	Le Vibro-Cryo-Tribomètre.	34
II.7	Dispositif de fretting de torsion (mode IV).	35
II.8	Bancs d'essai du fretting wear.	35
II.9	Fretting Wear sous environnement contrôlé.	36
II.10	Fretting Wear sous faibles charges [connectique].	36
II.11	Bancs d'essai du fretting fatigue.	37
II.12	Bancs d'essai du fretting corrosion.	37
II.13	Vue générale du dispositif de simulation.	38
II.14	Variateur de vitesse utilisé.	41
II.15	Moteur électrique utilisé.	41
II.16	Vue d'ensemble de l'ancien et le nouveau prototype de simulation : a) banc de simulation de fretting à bâti mécano-soudé, b) banc de simulation de fretting à bâti monobloc.	41
II.17	Apparition des défauts sur les spectres.	42
II.18	Analyseur de vibrations utilisé.	44
II.19	Représentation des fréquences dans une liste.	45
II.20	Equipements utilisés pour la détermination des fréquences propres.	45

CHAPITRE III		
III.1	Montage des éprouvettes.	46
III.2	Changement de la table a) banc posé sur une table en bois, b) banc soudé sur une table métallique.	47
III.3	Traces de fretting observées sur une éprouvette en acier 100C6 avant modification du banc: a) Photo de la trace, b) Vue microscopique de la trace de fretting (x10); c) Deux traces au lieu d'une seule après coupure de courant ; b) Observation d'une fissure sur l'éprouvette.	48
III.4	Modification du porte tares : a) Avant modification, b) Après modification.	49
III.5	Porte éprouvette inférieure modifiée.	49
III.6	Porte éprouvette supérieure : a) Avant modification, b) Après modification.	50
III.7	Vue d'ensemble du banc de simulation de simulation de fretting: a) Avant modification ; b) Après modification.	51
III.8	Zone des jeux au niveau des extrémités de la bague.	52
III.9	Schéma général détaillé du banc de simulation de simulation de fretting.	53
III.10	Vue d'ensemble du dispositif de simulation.	53
III.11	Représentation d'un essai de fretting radial.	54
III.12	Echantillons d'essai	55
III.13	Eprouvette d'essai	56
III.14	Vues de face et de profil du four électrique utilisé	57
III.15	Vue montrant l'enlèvement des pièces du four pour immersion dans un bain d'huile.	57
III.16	Vue générale des pièces en acier 100C6 après revenu.	58
III.17	Vue globale des éprouvettes enrobées.	58
III.18	Polisseuse monoplateau utilisée lors de la préparation des éprouvettes	59
III.19	Echantillons trempés polis.	60
III.20	Vue du microscope optique utilisé.	61
III.21	Microstructure de l'acier 100C6 :a) Pour lot 2 ; b) Pour lot 3, après traitement thermique (x1200)	61
III.22	Microscope optique utilisé : a) vue d'ensemble du microscope utilisé, b) copie d'écran d'une phase de mesure.	63

III.23	Micrographie des traces de fretting : a) Localisation de la trace, b) Mesure des diamètres et, c) Etat de bordure.	64
III.24	Relevés 2D et 3D d'une trace de fretting.	64
III.25	Pesage des éprouvettes : a) Pesage de l'échantillon plan, b) Pesage de la bille.	65
III.26	Fréquences propres obtenues et la cohérence présentées par des spectres.	66
III.27	Fréquences propres obtenues présentées dans une liste.	66
III.28	Types de vibrations rencontrés : a), b) Vibrations provoquent un déplacement transversal et, c) Vibrations provoquent un déplacement longitudinal	67
CHAPITRE IV		
IV.1	Exemple de traces de fretting sur le plan obtenues dans les mêmes conditions: a) Pour 250000cycles ; b) Pour 500000cycles ; et c) Pour 1000000cycles.	69
IV.2	Formation de la zone de contact en fonction de la charge dynamique.	70
IV.3	Vue au microscope optique d'une trace d'usure de fretting: a) allure de la trace d'usure sur le plan (x10), b) trace laissée sur la bille.	71
IV.4	Mesure de la dureté.	70
IV.5	Morphologie des traces de fretting (contact 100Cr6/100Cr6, F=540N, f=34Hz pour 10 ⁶ cycles): a) Trace de fretting observée sur l'éprouvette plane, b) Trace de fretting observée sur la bille ; c) Bordure d'une trace de fretting sans graisse ; c) Bordure d'une trace de fretting avec lubrification.	72
IV.6	Comparaison de la morphologie des traces de fretting pour le cas des aciers : a) Pour le cas de l'acier 100Cr6; b) Pour le cas de l'acier 1045 (Fn=500N, fréquence=5Hz, N=10000 cycles, D=5 µm) [60] c) Pour le cas de l'acier revêtu (Fe-Mn-C) (N= 5000 cycles; Fn=300 N et D=30 µm), d) Pour le cas d'un acier S355 (p=20N, D=50µm), e) Pour le cas d'un acier faiblement allié sur le plan (p=1250N, Q=460N, N=10 ⁶ cycles), et e') Sur la bille.	73
IV.7	Comparaison de la morphologie des traces de fretting pour d'autres matériaux : a) Pour le cas du CuNiSi face à un pion grenailé (P = 6 N, δc = ± 50µm), b) sur le 2618A-AS ; c) Force normale 300 N, amplitude 60 µm, frequency 5 Hz, et 10000 cycles: TiN.	73

IV.8	Comparaison de la morphologie des traces de fretting dans un contact électrique après 4000 cycles: a) dans la bille, b) dans le plan.	74
IV.9	Comparaison des topographies de la surface: a) topographie 3D pour une éprouvette d'un essai réalisé dans notre banc de simulation de fretting ; b) topographie 3D du disque (CuNiSi face à un pion grenailé, $P = 6 \text{ N}$, $\delta_c = \pm 50\mu\text{m}$)	74
IV.10	Profil d'usure: a) profil d'usure d'une l'éprouvette plane; b) Aspect général d'un profil d'usure.	75
IV.11	Comparaison des profils d'usure: a) Profil d'usure pour un acier X30Cr13 non traité ; b) profil d'usure (CuNiSi $P = 6 \text{ N}$, $\delta_c = \pm 50\mu\text{m}$).	75
IV.12	Evolution de l'air de contact de fretting en fonction du nombre de cycles : a) acier 100Cr6 (250000, 500000, 10^6 cycles) ; b) 2618A (5000, 50000 cycles); c) contact électrique (30, 4000, 5000 cycles).	76
IV.13	Trace d'usure par fretting d'une bille en acier d'un contact lubrifié.	78
IV.14	Spectres représentent le début, le milieu et la fin de l'essai pour l'axe1 : a) début, b) au milieu, c) fin, de l'essai.	79
IV.15	Spectres représentent le début, le milieu et la fin de l'essai pour l'axe1 : a) début, b) au milieu, c) fin, de l'essai.	80
IV.16	Spectres représentent le début, le milieu et à la fin de l'essai pour l'axe3 : a) début, b) milieu, c) fin, de l'essai.	81

LISTE DES TABLEAUX

Nº de tableau	Titre	Page
CHAPITRE II		
II.1	Fréquences identifiantes des défauts dans les machines tournantes.	43
CHAPITRE III		
III.1	Caractéristique des échantillons d'essai.	55
III.2	Les résultats de la microdureté Vickers et leurs conversions.	61
III.3	Compositions chimiques de d'acier utilisé	62
CHAPITRE IV		
IV.1	Variation des diamètres des traces de fretting avec le nombre de cycles.	70
IV.2	Evolution de l'aire de contact en fonction de la nature de l'interface	77

Nomenclature

a: le rayon du disque de contact [mm]

a: rayon de la zone de glissement

a' : la demi-largeur de contact [mm]

c : rayon de la zone de collage

D : débattement

d : diamètre de la bille (mm)

D_p : diamètre de l'échantillon plan (mm)

E : module d'Young

E* : le module d'Young équivalent [MPa]

F : force normale

f : fréquence de rotation du moteur

h : Longueur de l'échantillon plan (mm)

m_b : masse de la bille (grs)

m_p : masse de l'échantillon plan (grs)

P₀: la pression dans l'aire de contact [MPa]

P_{0'} : la pression dans le contact [MPa]

P : la charge normale [N]

P' : la charge normale (charge linéique) [N/mm]

R* : rayon équivalent [mm]

r: le rayon en coordonnées polaires $r^2 = (x^2 + y^2)$ d'un point du disque [mm]

z : profondeur de Hertz

δ: l'enfoncement des corps [mm]

τ : contrainte de cisaillement

ν : coefficient de Poisson

Introduction

Généralement le vocable " fretting " désigne un processus de dégradation superficielle qui apparaît entre deux surfaces en contact animées d'un mouvement oscillatoire de faibles amplitudes. Ce mode de dégradation est présent dans toute liaison mécanique (liaisons par boulons, cannelures, assemblages par rivets, ...) soumise à un champ de vibrations.

Les conséquences de cette dégradation superficielle peuvent prendre diverses formes entraînant dans certains cas un blocage des systèmes mécaniques, dans d'autres l'apparition de jeux qui pourrait entraîner des défaillances de fonctionnalité plus au moins dangereuses selon l'usure. D'autre part, elle se traduit bien souvent par un amorçage et une propagation des fissures qui, non contrôlées, peuvent induire une rupture brutale et catastrophique des pièces.

La réalisation d'un banc de simulation de fretting dans notre laboratoire de recherche (*LR3MI*) était une ouverture très importante sur une étude très vaste du phénomène de fretting permettant ainsi de contribuer à la compréhension des mécanismes générant ce genre d'usure et pour mieux cerner le rôle des différents paramètres gouvernant ce phénomène, à savoir ; la charge appliquée, le type de contact, les matériaux en contact, le lubrifiantetc.

Ce travail contribue à l'analyse de la stabilité du banc pour vérifier sa fiabilité et pour bien savoir la compatibilité des résultats des essais réalisés dans ce banc.

Notre étude s'articule autour de quatre chapitres :

Le *chapitre 1* est consacré à une synthèse bibliographique sur le fretting en insistant sur les aspects "endommagement", l'endommagement par fretting et puis les défauts rencontrés dans une machine tournante, et d'une manière plus détaillée l'endommagement des roulements.

Dans le *chapitre2*, les études faites sur le dispositif de fretting radial, en mis en évidence les machines du fretting existantes selon le mode et le type de fretting ainsi qu'une description de l'analyseur de vibrations utilisé et leurs emplois.

Le *Chapitre 3* s'intéresse à la préparation du matériel utilisé pour l'application d'un essai de fretting, une présentation de l'amélioration qui a été faite au niveau du dispositif pour pouvoir faire l'essai de fretting dans une large gamme et dans un milieu plus stable. Ainsi

qu'une présentation du matériau utilisé, de la procédure suivie pour la préparation des échantillons de l'essai et du matériel utilisé pour la quantification des résultats.

Le choix de la gamme de chargement de l'essai a été montré dans ce chapitre et la détermination de la fréquence utilisée a été faite au sein du laboratoire de recherche *LR3MI* par deux procédés : à l'aide de l'analyseur de vibrations et en utilisant le logiciel de CAO SolidWorks.

Enfin, au *chapitre 4*, on a fait une analyse de la stabilité du banc de simulation de fretting en traitant les endommagements du matériau sollicité en fretting par l'analyse de la trace d'usure et l'évolution de l'air du contact en fonction du nombre de cycles et de la nature de l'interface (présence ou absence de la lubrification). Le contrôle de la stabilité était fait aussi au niveau de laboratoire *LRMI* à l'aide de l'analyseur de vibrations.

I.1 INTRODUCTION

D'après la définition donnée par la société américaine de mécanique (SAM), le fretting est un mouvement alterné de faible amplitude qui peut se produire entre deux surfaces en contact.

I.1.1 Bref historique

Cette sollicitation a été étudiée pour la première fois au début du XXème siècle par Eden [1] lors de la mise en évidence de la présence de débris d'oxyde de fer entre une éprouvette de fatigue en acier et un mors en acier de la machine. La cause du phénomène a été attribuée à tort, à des mécanismes de corrosion, ce qui conduira par la suite à la dénomination de «fretting corrosion». De même, Tomlinson [2] a observé la formation d'oxyde de fer lors de la rotation d'une sphère sur un plan tous deux en acier et l'oxydation des débris d'usure par l'environnement ambiant. Warlow-Davies [3] envisage le premier, l'effet du fretting sur les propriétés de fatigue. Progressivement, les travaux de McDowell [4] montreront que l'oxydation est une conséquence et non pas la cause du phénomène et que la formation des débris est induite par le frottement des surfaces et non l'effet de l'oxydation. Parallèlement, Johnson [5] décrit les sollicitations cycliques de cisaillement imposées en surface de contact et aide à mieux comprendre les mécanismes de la propagation de fissures en glissement partiel. Enfin, le fretting accélère grandement le processus d'amorçage des fissures et l'étude de l'action conjointe du fretting et de la fatigue conduit à un facteur d'abattement de 2 à 5 sur la limite d'endurance suivant les conditions de contact [6].

Le fretting est donc une sollicitation néfaste pour les assemblages en général et présente un problème économique évident. Eurocopter France indique que 60% des rebuts ou réparations liés aux surfaces ont pour cause le fretting [7]. On trouve des proportions importantes dans d'autres secteurs industriels comme les travaux publics, les transports, le secteur énergétique, la construction, le biomédical. La sécurité des individus peut dépendre du fretting : citons, les crashes de l'avion d'Amsterdam en 1991 [7] et celui de l'hélicoptère PUMA de vira Gambarogno en 1997 attribués au fretting [8].

Les endommagements occasionnés par le fretting ont conduit progressivement à la mise en place de trois domaines de recherche menés respectivement par :

- La communauté mécanicienne se préoccupe de l'influence du fretting sur la fissuration et utilise pour cela des essais de fretting développés sur des machines de fatigue.
- Les chercheurs en sciences des matériaux développent de nouveaux traitements superficiels et revêtements permettant de minimiser les dégradations induites par le fretting.
- Les tribologues tentent de comprendre les mécanismes d'action des couches interfaciales de débris et de déterminer leur couplage avec le système étudié.

I.1.2 Configurations de contacts

Les contacts réels sont généralement complexes et mal définis. Pour modéliser les mécanismes de dégradation en fretting, les chercheurs ont rapidement choisi des géométries simplifiées et plus faciles à étudier, on trouve les trois configurations suivantes (Figure I.1):

- le contact plan/plan
- le contact cylindre/plan
- le contact sphère/plan

La configuration plan-plan permet de maintenir des surfaces de frottement constantes quelle que soit l'usure des interfaces. Cependant, l'analyse mécanique montre que la distribution de pression et surtout de cisaillement se caractérise par une discontinuité indéterminée en bordure de contact. L'analyse est alors très complexe et il est difficile d'évaluer correctement le chargement qui est imposé au matériau. De plus, la mise en glissement engendre des mésalignements qui accentuent encore les effets de bords. A cette configuration sont donc préférées les contacts cylindre-plan et sphère-plan.

Tous deux sont décrits par l'analyse de Hertz en indentation normale en appliquant les principes de l'élasticité linéaire. Les distributions des contraintes dans le plan du contact cylindre-plan glissant sont données [9] pour des conditions de déformation plane (analyse élastique). Les distributions des chargements élastiques dans le plan du contact sphère-plan glissant sont introduites puis explicitées sous une forme sympathique [10]. Des informations plus complètes sur la mécanique des contacts peuvent être trouvées dans [11].

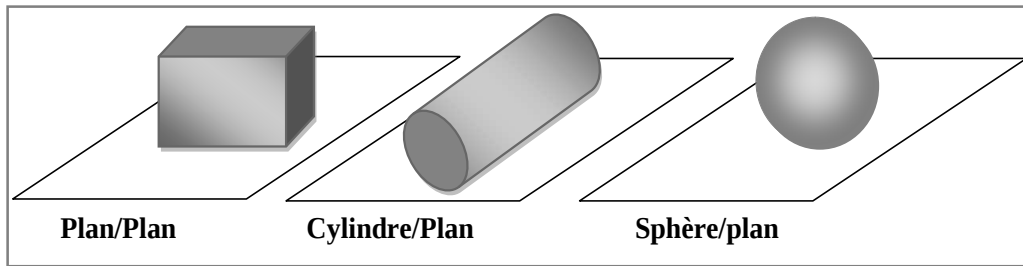


Figure I.1: Configurations de contacts.

L'étude de l'usure, essentiellement expérimentale, utilise très souvent le contact sphère-plan.

I.1.3 Origines du fretting

Le fretting apparaît dans tout assemblage mécanique. Deux cas sont distingués dans la littérature :

- Les pièces assemblées soumises à un environnement vibratoire susceptible d'induire des microglissements entre les surfaces en contact. Ces microglissements peuvent aller de quelques micromètres jusqu'à quelques centaines de micromètres. C'est le cas de toutes les liaisons quasi statiques à l'instar des assemblages par rivetage, des assemblages par boulonnage ou des assemblages emmanchés (figure I.2) dont les pièces en contact ne sont pas censées subir un déplacement relatif. C'est aussi le cas des mécanismes assurant une transmission de puissance tels que les systèmes d'engrenages ou les roulements à billes lorsqu'ils ne fonctionnent pas (figure I.3).
- Les pièces assemblées soumises directement à des contraintes variables (figure I.4). Dans cette situation, les microglissements résultent de la déformation des pièces. C'est le cas par exemple des câbles de pont, des câbles électriques, les câbles d'ascenseur...

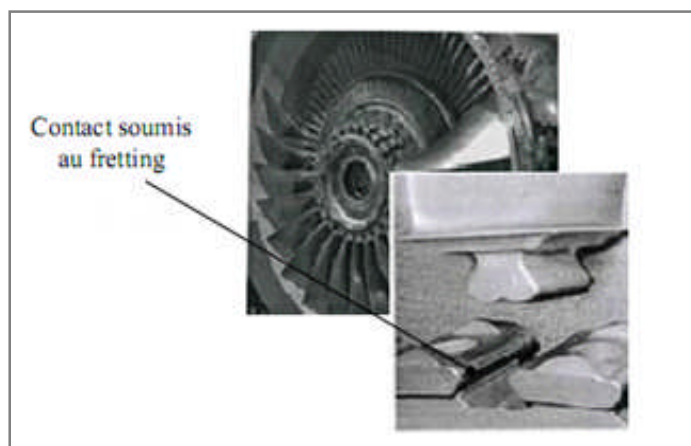


Figure I.2: Cas de liaisons quasi statiques soumises au fretting : assemblage par emmanchement pour aubes de soufflante des turboréacteurs [12].

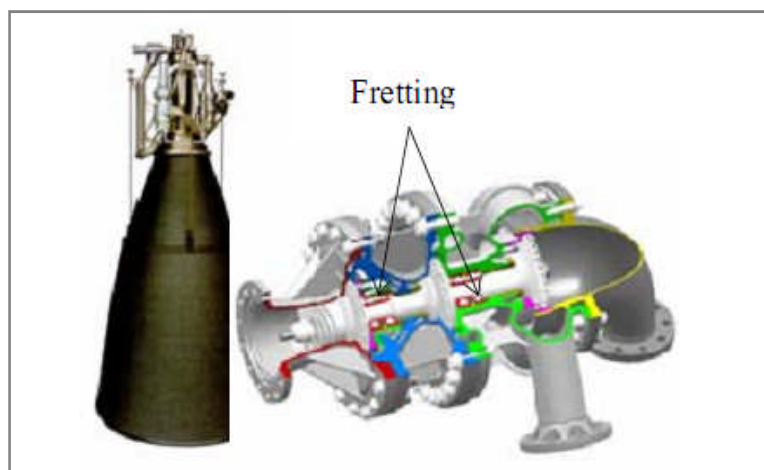


Figure I.3 : Cas de mécanismes assurant une transmission de puissance soumis au fretting : turbopompe hydrogène du moteur Vinci [13].

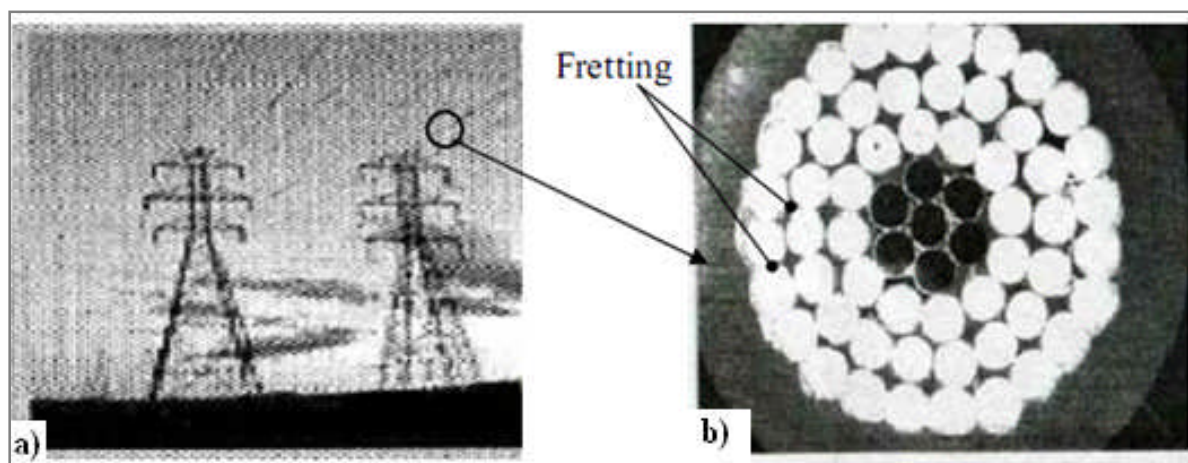


Figure I.4: Fretting dans des contacts électriques [14] :
a) Câbles de ligne haute tension ; b) Coupe transversale d'un câble.

I.1.4 Endommagements causés en fretting

La sollicitation de fretting est à l'origine de nombreuses avaries, de pertes de fonctionnalité et dans le cas extrême de ruptures catastrophiques. Elle est considérée comme une dégradation critique dans de nombreux secteurs industriels. En effet, le fretting peut conduire à trois types d'endommagement :

- Le grippage se traduit par le blocage du mécanisme résultant de l'adhésion des matériaux en contact ou du comblement du jeu de fonctionnement par les débris.
- La fissuration qui, non contrôlée, peut entraîner une rupture brutale et catastrophique du mécanisme par fatigue du contact (figure I.5). La prise en compte de la chute de la résistance à la fatigue des matériaux due au fretting est considérée comme indispensable par les industriels en particulier dans l'aéronautique.
- L'usure avec formation de débris qui conduit à une perte de cote entraînant un remplacement des pièces ou un blocage des liaisons (figure I.6).

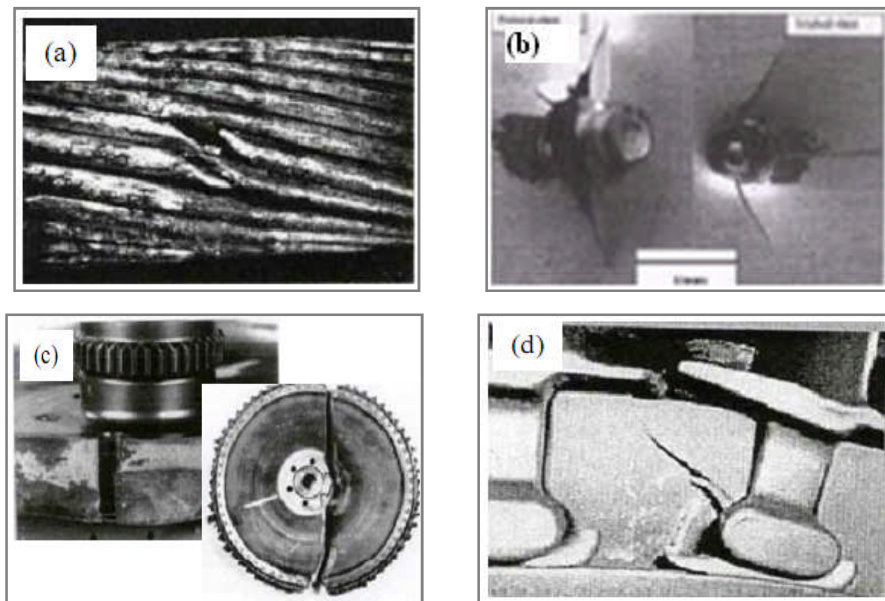


Figure I.5: Fissuration des structures en fretting.

a) Fissuration de câbles électriques [14]; b) Fissuration d'un assemblage par rivetage d'une structure d'avion [15]; c) Destruction d'un système de transmission de puissance soumis au fretting [16] d) Destruction d'un contact aubes/disque de soufflante d'un turboréacteur soumis au fretting [14].

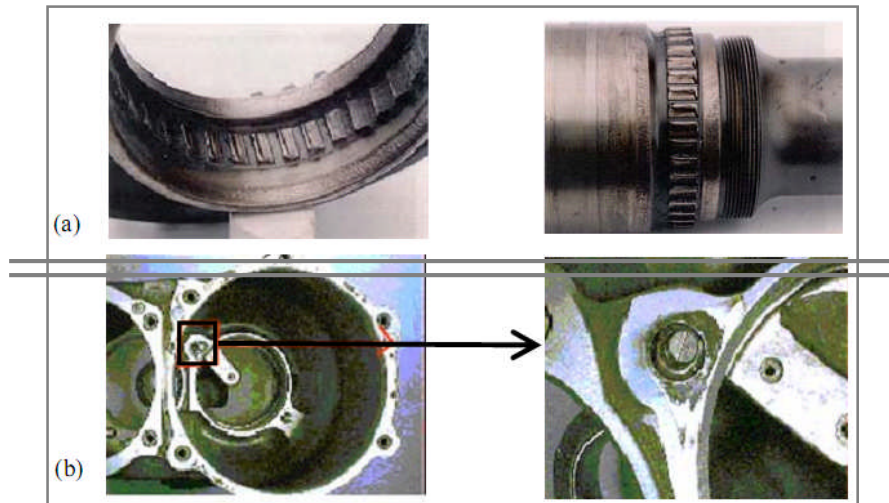


Figure I.6 : Quelques cas d'usure en fretting de pièces assemblées :

- a) Cannelures détruites et portées usées d'un arbre de rotor d'hélicoptère [8]; b) Usure d'un boîtier de transmission de puissance d'avion [17].

Trois types d'endommagement peuvent être analysés en fretting : la fissuration, l'usure et le grippage.

I.2 ANALYSE DES DEGRADATIONS INDUITES PAR LE FRETTING

I.2.1 Analyse de la fissuration

L'étude de la fissuration est conduite à la fois sur des essais de fretting-fatigue et sur des essais de fretting-wear en régime de glissement partiel. Une approche fretting-wear permet caractériser l'amorçage des fissures tandis qu'une approche fretting-fatigue permet de déterminer les lois de propagation des fissures.

I.2.1.1. Amorçage des fissures

L'étude de la fissuration conduite à partir d'essai de fretting-wear débouche généralement sur l'analyse quantitative de l'amorçage des fissures. Le tracé de la courbe de Wöhler est irréalisable à cause de la non rupture des échantillons pendant l'essai. Cependant, l'analyse de l'amorçage de fissure est généralement qualitative, uniquement fondée sur l'expertise du site d'amorçage et de la direction de la première propagation.

L'amorçage des fissures se produit en bordure de contact, là où les contraintes de traction sont les plus élevées (figure I.7). Il se produit une déformation plastique locale [6] [18].

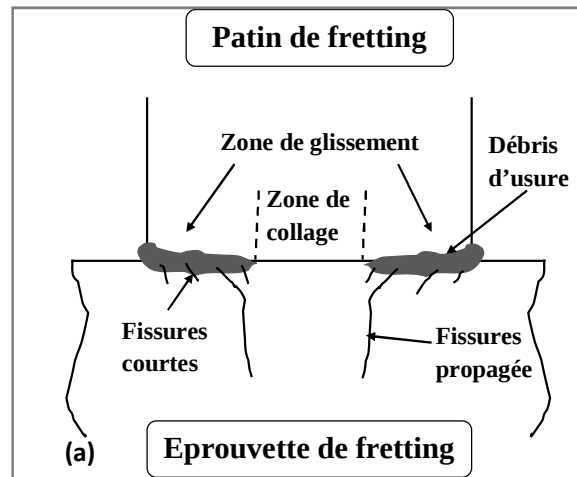


Figure 1.7: Schématisation de l'endommagement par fretting fatigue d'un contact plan-plan [18].

I.2.1.2 Propagation des fissures

Un endommagement par fissuration est souvent attribué au caractère cyclique de la sollicitation de fretting, c'est-à-dire au phénomène de fatigue. La tenue en fatigue d'un matériau est généralement déterminée à l'aide des courbes d'endurance pour des essais de fatigue uniaxiale. Ces courbes de Wöhler ont permis de déterminer la limite d'endurance du matériau, définie comme la contrainte de tension maximale que peut supporter le matériau sans se rompre au bout d'un grand nombre de cycle (10^7 à 10^9 cycles). Les essais de fretting-fatigue ont permis ainsi de déterminer des coefficients d'abattement à partir du tracé de courbes de Wöhler [4] [19] [20]. Ces coefficients d'abattement de durée de vie et de limite d'endurance ont permis de quantifier l'influence du fretting sur la fatigue des matériaux.

Waterhouse [21] résume la fissuration en deux stades (figure I.8) :

- **Stade I** : après amorçage, la fissure se développe sous un angle de l'ordre de 45° par rapport à la surface correspondant ainsi au plan de cisaillement maximal. La longueur de la fissure dépend des sollicitations imposées mais surtout du matériau et de sa sensibilité au cisaillement.-

- **Stade II** : la propagation est dominée par la contrainte de traction en tête de fissure. La fissure, s'oriente alors de façon à présenter un facteur d'intensité de contrainte maximal, soit une orientation perpendiculaire à la contrainte principale. A ce stade, la sollicitation de fatigue influence plus le comportement de la fissure que la sollicitation de contact.

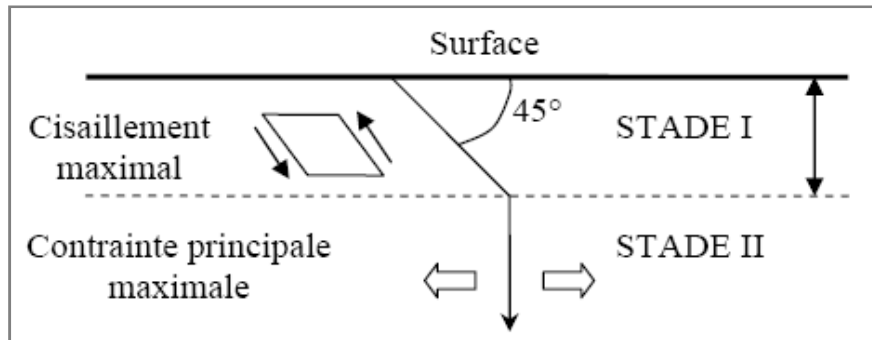


Figure I.8: Propagation de fissure en deux étapes en condition de fretting.

I.2.2 Analyse de l'usure

Cartier et Kapsa [22] ont montré que sous l'effet du frottement, une surface subit des modifications et des endommagements et ont résumé ces endommagements 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 transformations physicochimiques de surface concernant soit des transformations tribologiques superficielles (Tribologically Transformed Structures ou TTS) sans intervention de l'environnement soit des réactions (tribo) chimiques entre les corps frottants et cet environnement.
- des phénomènes d'adhésion entre les corps frottants, conduisant au transfert d'un des matériaux vers l'antagoniste.

Par conséquent, les paramètres à prendre en compte pour étudier l'usure sont extrêmement nombreux. La principale difficulté à surmonter dans l'analyse de l'usure réside dans la phase de hiérarchisation de ces paramètres et à la définition des facteurs prépondérants, pour la situation de frottement concernée. L'usure demeure alors difficile à

modéliser compte tenu des différents aspects à prendre en compte lors du frottement, tels que :

- la modification importante de l'interface et de la géométrie du contact due à l'usure ;
- la formation d'une couche interfaciale ;
- le flux de débris ;
- le couplage des aspects mécaniques, thermodynamiques et physicochimiques.

L'absence d'un modèle d'usure universel a donc conduit à deux approches :

- une approche qualitative plus générale développée par Godet [23] et basée sur l'analyse des différentes étapes associées à l'évolution des couches interfaciales (troisième corps) formées dans un contact frottant : création, circulation et éjection des débris.
- une approche quantitative basée sur le modèle d'Archard [24] qui propose une analyse de la dégradation en termes de volume usé qu'il cherche à relier à la sollicitation imposée et aux caractéristiques physiques, chimiques et mécanique des matériaux pour chaque cas étudié.

I.2.2.1 Analyse qualitative de l'usure

Godet [23] stipule que l'usure est gouvernée par trois phénomènes à savoir : la création, la circulation et l'élimination des particules détachées des premiers corps. Sous l'effet des sollicitations mécaniques et thermiques, les premiers corps subissent des modifications de leurs propriétés superficielles conduisant au TTS (figure I.9) [25]. Les TTS sont des changements de phase ou de structure qui conduisent par fragmentation au détachement de particules d'une taille élémentaire comprise entre le nanomètre et quelques micromètres. Dans le cas des métaux, elles pourraient être définies à partir de l'une de leurs caractéristiques qui est la diminution de la taille des grains initiaux jusqu'à un état nanométrique. Cependant, la physique de formation des TTS doit toujours être précisée, de même que leur définition.

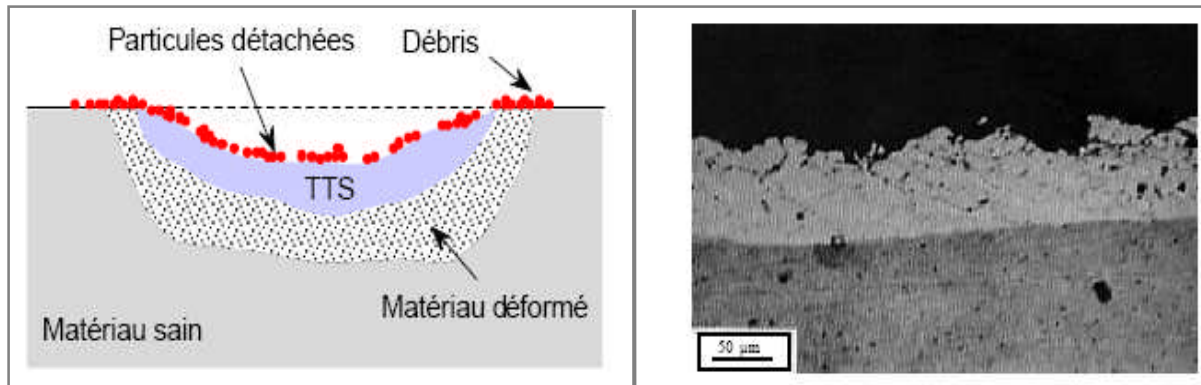


Figure I.9 : Transformation tribologique superficielle en fretting (coupe transversale) [25].

I.2.2.2 Définition du volume de l'usure

Les premiers modèles de quantification de l'usure ont débuté depuis les années 50. Holm [26] a montré que le volume usé est proportionnel au rapport de la charge normale et de la dureté.

Archard [24] 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, la pression de plastification locale du matériau, et la distance de glissement.

I.2.3 Analyse du grippage

Le grippage se définit comme un arrêt du mouvement relatif entre deux matériaux en contact soumis à des forces de frottement

Le grippage dépend des propriétés des matériaux, de la géométrie du contact, du lubrifiant ainsi que des conditions de sollicitation et souligne que les origines majeures sont une généralisation des interactions adhésives entre les surfaces frottantes et le blocage des surfaces frottantes par des débris.

Le grippage est considéré comme une dégradation catastrophique des tribosystèmes concerne exclusivement des sollicitations aux déplacements relativement grands dans les contacts secs ou lubrifiés. Pour le cas du fretting radial où il n'y a que des microdéplacements, le grippage ne se manifeste pas. Pour cela la bibliographie n'offre presque pas des études pour ce cas.

Le phénomène de fretting est un mode d'endommagement localisé au sein des zones de contact dans les structures mécaniques (roulement) soumises à des chargements auxquels s'ajoutent des micro-déplacements dus à des vibrations.

Ces sollicitations engendrent l'usure, la corrosion et la fissuration des interfaces ce qui implique une maintenance coûteuse des systèmes de liaison par contact. Notre travail étudie ce phénomène et en particulier l'endommagement par fretting des roulements au niveau du contact billes-bague.

I.3 DEFEAULTS DE MACHINES

I.3.1 Introduction

Le banc de simulation de fretting comme toute les machines tournantes produit des vibrations lorsqu'il fonctionne. La mise en place d'une maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire permet d'obtenir une disponibilité accrue de ce banc et d'éviter des arrêts non planifiés dus aux pannes. Elle permet notamment de détecter et d'identifier tous les défauts en particulièrement les défauts de roulements, l'un des éléments importants des machines tournantes et l'élément étudié dans cette thèse. Il peut s'agir d'un défaut de cage, de bille ou de piste sur la bague intérieure ou extérieure. Ces défauts se traduisent par des chocs périodiques.

Dans le cas d'une identification des défauts de machines, des études ont montré que l'analyse du contenu fréquentiel (spectre, cepstre, détection d'enveloppe...) est un outil essentiel pour les localiser avec précision [27].

I.3.2 Principaux défauts dans la machine

Une étude statistique menée par IEEE nous révèle que certaines pannes sont plus fréquentes que d'autres; à savoir : défauts de roulement, stator, rotor,...

La (Figure I.10) représente les pourcentages des défauts dans la machine, où on remarque que les roulements ont la portion la plus grande.

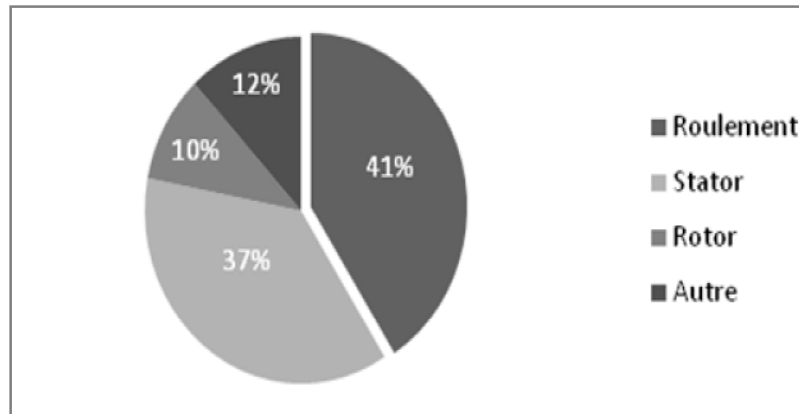


Figure. I.10: Pourcentage des défauts [28].

I.3.3 Constituants des roulements

Les principaux éléments d'un roulement sont présentés sur la (figure I.11).

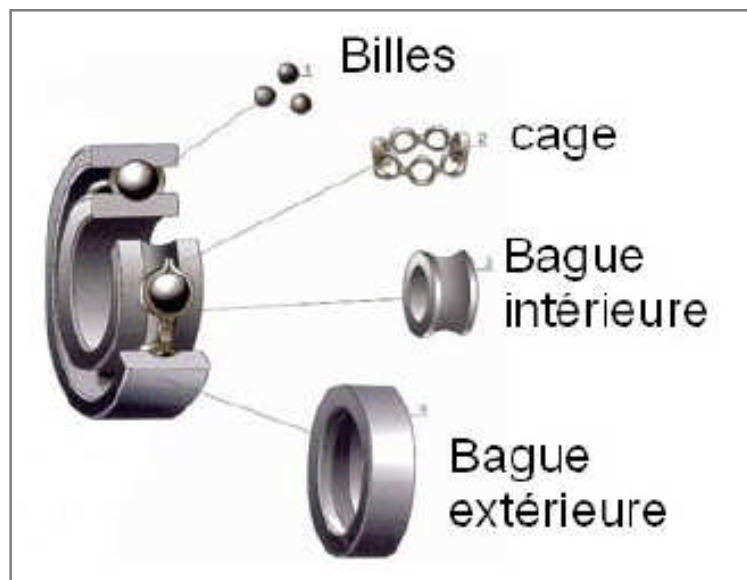


Figure. I.11 : Constitution d'un roulement à bille.

I.3.4 Description du contact d'un roulement à billes

Sous une charge radiale pure le roulement à billes fonctionne en roulement pur, c'est à dire en roulement sans glissement. Ceci reste vrai théoriquement pour un contact ponctuel, mais n'est pas réalisé pour un contact réel. La figure (figure I.12) décrit la distribution des forces de frottement dans le contact ainsi que le positionnement des lignes de glissement nul. Le frottement de roulement a donc une valeur non nulle.

En outre celle-ci peut devenir non négligeable dans le cas d'apparition de glissement au contact billes bagues.

Notons que seul un des deux contacts fonctionne en roulement pur (contact menant), l'autre fonctionnant en roulement avec glissement (contact mené) [29].

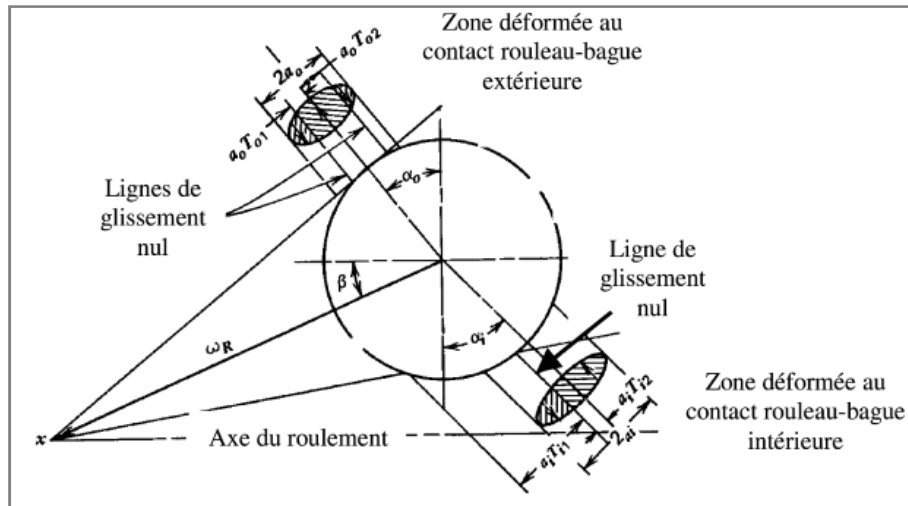


Figure I.12 : Description du contact avec lignes de glissement nul [29].

I.3.5 Introduction a la fatigue de contact de roulement

Les avaries telles que les fissures, piquûres, écaillages etc. (figure I.13), qui se manifestent sur la surface des pièces en contact hertzien roulant, (engrenages, pièces de roulements, roues et rails de train, etc.) sont dues en partie à la fatigue de contact de roulement (Rolling Contact Fatigue ou RCF).

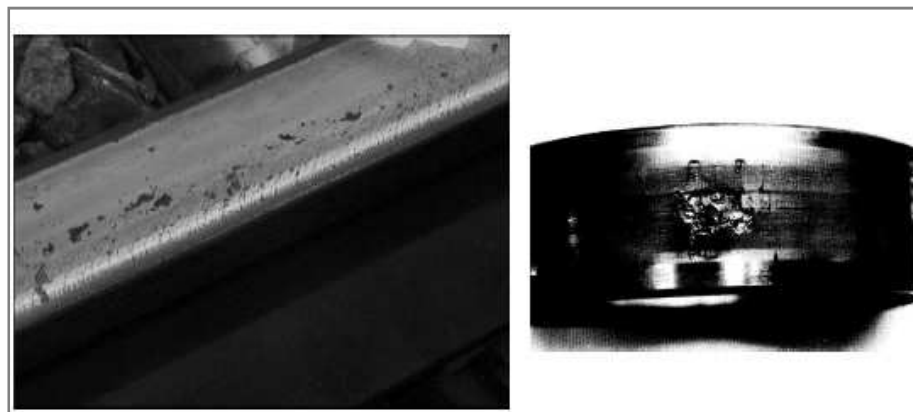


Figure I.13: Exemples d'avarie du type RCF :

- a) Fissures et piquûres sur un rail de train [30] ; b) Ecaillage sévère sur un palier de butée [31].

Le contact entre solides, localisé autour d'un point ou d'une ligne est dit contact Hertzien. Quand ce contact est roulant, il se traduit par une sollicitation normale et tangentielle répétée, et par des zones d'adhérence et de micro-glissement dans l'aire de contact. Sous l'influence de cette sollicitation répétée, de petites fissures (~50 micromètres) peuvent apparaître en surface ou sous la surface de contact.

On considère que la fatigue de contact de roulement se situe à l'intersection de trois domaines principaux de la physique. Ce sont, la mécanique du Contact, la mécanique de la Fatigue et la mécanique de la Rupture.

H. Abbouchi [32] a schématisé le RCF par le schéma suivant (figure I.14) :

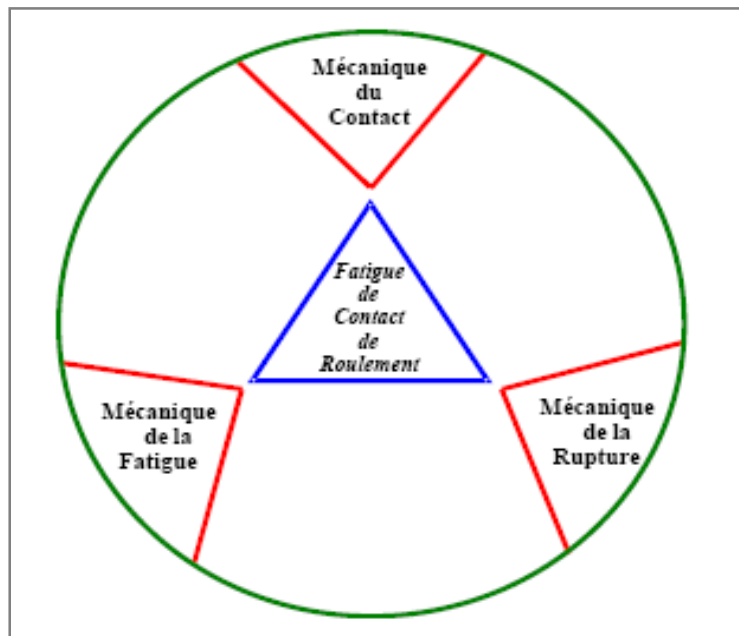


Figure I.14: Schéma représentatif des axes principaux de la RCF [32].

I.3.6 Contact normal de solides élastiques

D'après la théorie d'Hertz, on peut localement représenter le contact élastique entre deux pièces mécaniques par un contact de type :

- Ponctuel, le plus souvent sphère – plan (3D), 'ellipsoïde – plan était le cas le plus général'.
- Linéique, cylindre – plan (2D).

Sous l'action d'une charge, les solides se déforment aux alentours du contact, en créant une zone de contact dont les dimensions restent petites par rapport à celles des corps. Le but de la mécanique du contact élastique est de déterminer la forme de l'aire de contact, la distribution surfacique des contraintes normales et tangentielles dans le contact, en fonction de la charge et des caractéristiques géométriques et physiques des corps afin de calculer les contraintes et les déformations dans les corps.

La théorie de Hertz [33] répond à ces besoins à partir des hypothèses suivantes:

- Les dimensions de la zone de contact sont petites par rapport aux dimensions des corps.
- La limite élastique des matériaux n'est pas dépassée
- Les corps en contact peuvent être assimilés à des massifs semi-infinis, parfaitement élastiques, homogènes et isotropes.
- Les surfaces peuvent être assimilées géométriquement à des surfaces elliptiques du second ordre au voisinage du point de contact et les rayons de courbures sont connus.
- Il n'y a pas de frottement à l'interface et par conséquent les réactions mutuelles se réduisent à des efforts normaux.

I.3.6.1 Cas du contact ponctuel [34]

Soit (figure I.15):

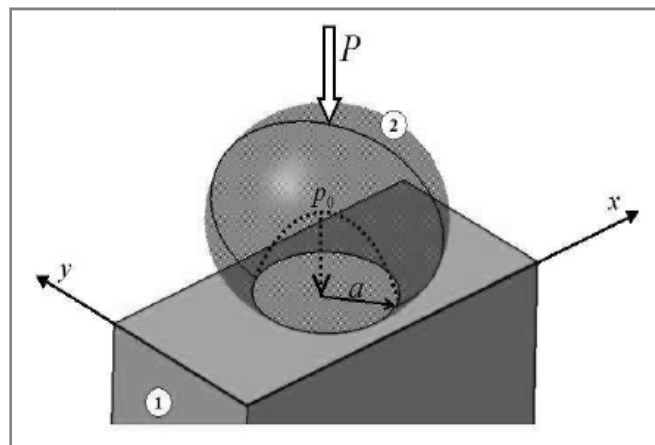


Figure I.15: Contact ponctuel [32].

Pour déterminer l'air de contact et la pression on a :

$$a = \left(\frac{3PR^*}{4E^*} \right)^{1/2} \quad (1.1)$$

$$P_o = \frac{3P}{2\pi a^2} = \left(\frac{6PE^{*2}}{\pi^3 R^{*2}} \right)^{1/3} \quad (1.2)$$

Où

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1.3)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (1.4)$$

I.3.6.2 Cas du contact linéique [34]

Soit (figure I.16):

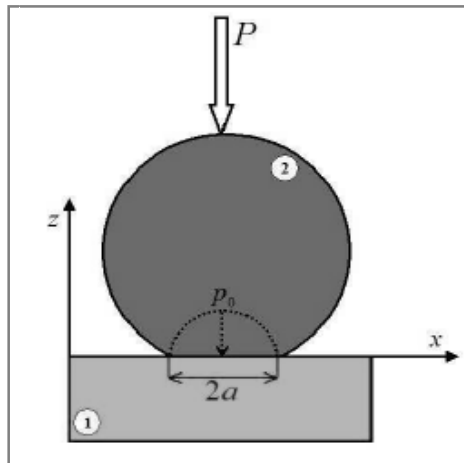


Figure I.16: Contact linéique [33].

On a pour ce cas :

$$a' = 2 \left(\frac{P' R^*}{\pi E^*} \right)^{1/2} \quad (1.5)$$

$$p'_o = \frac{2P'}{\pi a'} = \left(\frac{P' E^*}{\pi R^*} \right)^{1/2} \quad (1.6)$$

où :

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1.7)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (1.8)$$

La contrainte de cisaillement pour les deux cas atteint une valeur maximale $\tau \approx 0.30 P_0$ à une profondeur $z = 0.48a$ pour le cas du contact ponctuel, et à $z=0.78a$ pour le contact linéique.

I.3.7 Charges supportées par les roulements

Les actions mécaniques de contact exercées par les éléments roulants sur l'une ou l'autre bague sont en général schématisées par des forces ou des charges. [35]

On observe trois cas (figure I.17):

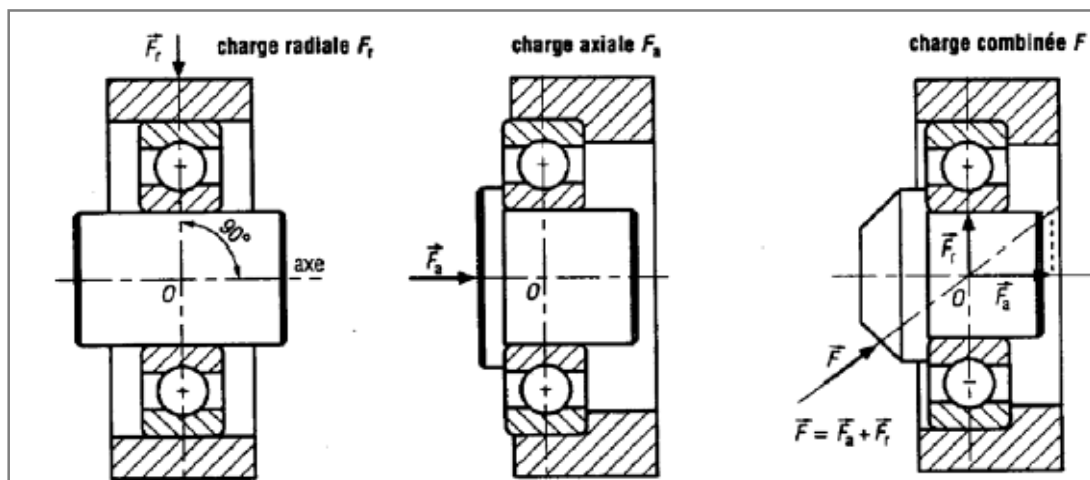


Figure I.17 : Charges supportées par un roulement [35].

I.3.7.1 Roulements supportant des charges radiales pures

- Roulements à rouleaux cylindriques: supportent des charges plus élevées que les roulements à billes. Ils sont conseillés en cas de chocs, vibrations et surcharges possibles. Ils conviennent aux gros paliers fortement chargés. Les vitesses autorisées sont plus faibles que dans le cas de roulement à billes. Seuls les roulements munis d'épaulements supplémentaires acceptent des charges axiales faibles (de l'ordre du 1/10 de la charge radiale).

- Roulements à aiguilles: comparables aux précédents, les roulements à aiguilles ont des éléments roulants cylindriques (aiguilles) de grande longueur par rapport à leur diamètre, et sont donc moins encombrants que les roulements à rouleaux cylindriques.

Les roulements à aiguilles conviennent particulièrement pour les montages où l'espace radial est limité.

I.3.7.2 Roulements supportant des charges combinées

Roulements à billes. Il en existe trois types :

- Roulements à billes à gorges profondes: supportent tous les types de charges (modérées à moyennes). Ils conviennent parfaitement aux petits paliers fonctionnant à grande vitesse.

- Roulements à contact oblique: supportent tous les types de charge mais uniquement des charges axiales dans un seul sens. Ils doivent être montés au minimum par paire et en opposition. La version à deux rangées peut être utilisée seule (cas d'arbre court). Leurs chemins de roulements sont inclinés d'un angle de 15°, 30° ou 45°.

- Roulements à rotule sur billes: supportent tous les types de charges, mais faiblement les charges axiales. Dans les roulements à rotule sur billes, la bague extérieure possède un chemin de roulement sphérique. La bague intérieure et les billes peuvent osciller autour du centre du roulement. Cet angle d'oscillation peut varier de 1,5 à 38°, autorisent les défauts d'alignement des portées de paliers et des flexions d'arbres élevées. Ils sont utilisés où il y a des défauts d'alignement appréciables et des flexions importantes de l'arbre.

- Roulements à rouleaux coniques: présentent les mêmes principes que les billes à contact oblique. La bague extérieure est séparable. Ils n'acceptent, comme les roulements à

billes à contact oblique, des charges axiales que dans un seul sens. Ils sont montés par paire en opposition. Ces roulements supportent des charges axiales et radiales très importantes. Ils sont utilisés dans de nombreuses transmissions: automobiles, camions, hélicoptères, avions, bateaux.

I.3.7.3 Roulements supportant des charges axiales pures

- Butées à billes: supportent uniquement des charges axiales dans un seul sens. Les vitesses de rotation sont limitées à cause de la force centrifuge sur les billes. Ne réalisant aucun centrage arbre/moyeu, elles doivent être montées avec d'autres types de roulements.
- Butées à aiguilles : Elles peuvent supporter de fortes charges axiales et sont peu sensibles aux chocs. Les montages obtenus sont très rigides et d'un encombrement réduit.

De nombreux roulements subissent lors de leurs fonctionnements des endommagements provoquent des perturbations dans les machines tournantes.

I.4 ENDOMMAGEMENT DES ROULEMENTS

Les principales causes d'endommagement et avaries de roulements se résument en 13 causes :

I.4.1 Écaillage de fatigue

Le fonctionnement élastohydrodynamique crée, par dépassement de la limite d'élasticité, des microdéformations permanentes et des criques qui cheminent vers la surface et provoquent l'élimination de particules de métal. La dégradation cyclique de la martensite crée des « papillons », amas lenticulaires de carbures parallèles à la direction du cisaillement maximal, sous l'effet des déformations qui produisent un échauffement à la température d'austénisation. Il se forme par la suite, toujours par décomposition de la martensite sous la surface de roulement, des bandes blanches de ferrite très écrouie (figure I.18).



Figure I.18 : Ecaillage sévère sur une bague extérieure de roulement.

Les mécanismes de la fatigue par roulement sont à la fois très étudiés et très mal connus.

Toutes les études confirment cependant l'influence très néfaste sur la fatigue des roulements des inclusions non métalliques ou autres phases dispersées dans l'acier : carbures non dissous, précipités d'oxydes et de sulfures, débris de produits réfractaires et de laitiers entraînés lors de la coulée, silicoaluminates de calcium ...

L'écaillage est un processus continu qui s'accélère plus ou moins après l'apparition des premières fissures. L'écaillage localisé et prématuré résulte d'anomalies caractérisées telles que mauvais montage, surcharge, défaut d'alignement, mauvaise forme de logement [36].

I.4.2 Écaillage superficiel

L'écaillage superficiel est un enlèvement superficiel de métal, plus ou moins étendu, sous forme de paillettes très fines. Il est attribué à une épaisseur de lubrifiant trop faible par rapport à la rugosité, ce qui provoque des contacts métal sur métal (figure I.19) [37].



Figure I.19 : Le Micro écaillage et Ecaillage [37].

I.4.3 Grippage

Le grippage est un transfert de matière arrachée sur les surfaces et redéposée par micro-soudure (figure I.20). On voit, au début, des zones mates où les stries de rectification ont disparu et des traces brunes indicatrices d'échauffement. Plus tard, il y a déformation des éléments roulants par arrachement de matière, fusion localisée, les éléments roulants et les cages sont plus ou moins détruits ou laminés, voire totalement soudés.

Le grippage est fréquent dans les roulements à rouleaux coniques si le frottement de glissement entre le collet de la bague intérieure et la grande base des rouleaux est défectueux : il survient souvent dès les premiers tours si l'on n'a pas pris soin d'assurer une bonne lubrification dès le démarrage.



Figure I.20 : Le grippage [37].

I.4.4 Empreintes par déformation

Les empreintes par déformation (fretting) sont très fréquentes : des traces de coups, des fissures, ou des cassures traduisent généralement un manque de précautions : chute accidentelle, montage par percussion ou en transmettant les efforts par l'intermédiaire des éléments roulants, surcharge.

Les déformations plastiques des bagues donnent des dépressions sans enlèvement de matière, avec des bourrelets de métal refoulé ou des arrachements. Ces avaries ne sont pas toujours immédiatement visibles, des fêlures peuvent éventuellement donner une destruction différée.

I.4.5 Incrustation de particules étrangères

L'incrustation de particules étrangères résulte d'un manque de propreté au montage ou de l'entrée accidentelle d'impuretés. Elle se traduit par des empreintes, un rodage marqué des bagues avec des sillons longitudinaux continus ou non.

I.4.6 Corrosion

La corrosion se manifeste par des taches colorées allant du rougeâtre au noir, puis par des zones attaquées avec élimination de matière. Elle peut être chimique, sous l'effet du lubrifiant acidifié par oxydation, de produits agressifs ayant pénétré grâce à un défaut d'étanchéité ..., ou électrochimique avec formation de rouille par entrée d'eau ou condensation excessive.

I.4.7 Fretting corrosion

La corrosion de contact ou le fretting corrosion (figure I.21) se manifeste par des taches roses, brunes ou noires plus ou moins étendues sur les zones d'appui extérieures du roulement. Elle provient de petits mouvements de rotation ou de vibration des bagues par rapport à leurs portées ; l'attention avait été attirée sur ce phénomène dès 1930 quand on constata que les roulements de véhicules transportés sur des wagons avaient subi des avaries graves.

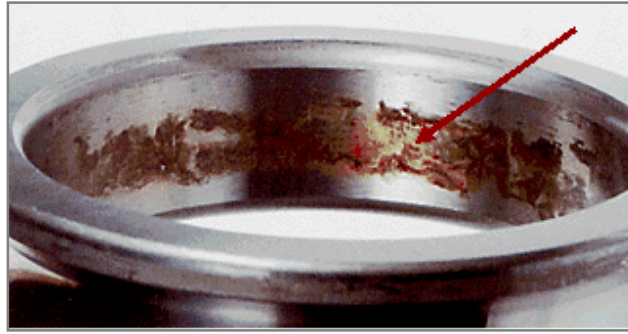


Figure I.21 : Exemple de dégradation par fretting avec la corrosion de la zone de contact.

I.4.8 Faux effet Brinell

Le faux effet Brinell est une variante de la corrosion de contact (figure I.22) entre, cette fois, les éléments roulants et les bagues qui portent des dépressions plus ou moins brillantes, écartées à intervalles réguliers comme le sont les corps roulants. Il ne faut pas confondre ces marques avec de simples empreintes, la matière étant érodée puis éliminée par le lubrifiant et non repoussée pour former des bourrelets.



Figure I.22: Faux effet Brinell sur une bague de butée.

I.4.9 Cratérisation

La cratérisation provoque des cavités microscopiques relativement profondes. Elle est due à des courants électriques intenses qui traversent le roulement et créent de petits arcs accompagnés d'une fusion locale et d'une trempe. En général, le défaut provient de ce que l'on a utilisé l'arbre comme masse lors d'une opération de soudage.

I.4.10 Cannelures

Les cannelures (figure I.23) se forment par action simultanée de courants relativement faibles et de vibrations. Ce phénomène bien plus fréquent qu'on ne le croit concerne les groupes électrogènes, les machines-outils, les locomotives électriques ou encore des machines qui reçoivent des charges électrostatiques de la part de courroies ou de produits en bandes (films plastiques ...).

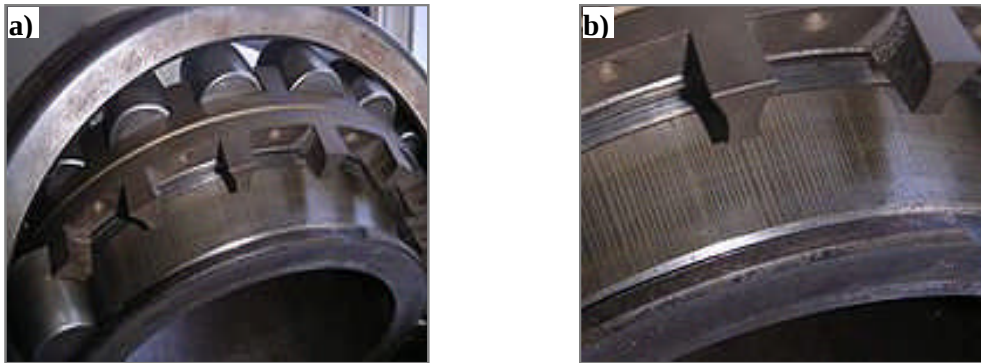


Figure I.23: les cannelures :

a) Cannelure, b) Cannelures, détail.

I.4.11 Criques

Les criques, les fissures étroites ou autres amorces de cassures que l'on rencontre parfois ont pour causes possibles des contraintes exagérées au montage ou au démontage, ou encore des tapures de rectification ou de trempe.

I.4.12 Usure par abrasion

L'usure par abrasion (figure I.24) donne aux roulements un aspect gris, givré. Elle relève d'un fonctionnement en milieu abrasif, d'une lubrification insuffisante [37].

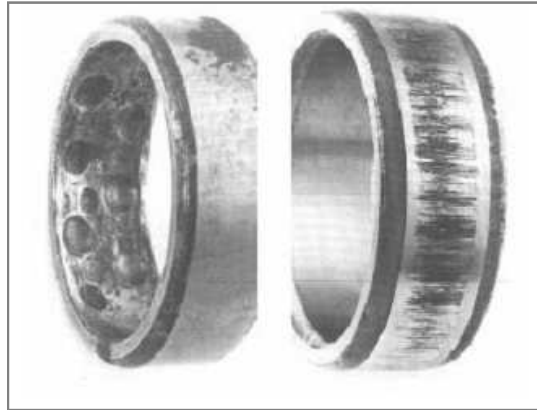


Figure I.24: L'usure [37].

I.4.13 Coloration

La coloration en brun, bleuâtre ou noirâtre est due à une oxydation superficielle en présence d'un lubrifiant polymérisé à haute température. L'échauffement anormal peut être d'origine interne, excès de lubrifiant par exemple, ou externe.

II.1 DESCRIPTION DU BANC DE SIMULATION

II.1.1 INTRODUCTION

II.1.1.1 Définition

Le fretting est défini comme étant un mouvement oscillatoire de faible amplitude; appliqué à deux surfaces en contact. Le fretting est souvent présenté comme l'une des avaries de surfaces les plus critiques des applications industrielles. IL se retrouve dans toutes les liaisons quasi-statiques. Les exemples de fretting ne manquent pas, on peut le retrouver dans les systèmes suivants : les liaisons (cannelures, liaisons par axe, pieds d'aube de turbine...), les empilages multiples (arbres de transmissions), les assemblages rivés (boulonnés), les câbles, les conduits flexibles... ; et concernant toutes les industries : constructions mécaniques, aéronautique, biomédicales, industrie nucléaire, génie civil...

Lorsque les faibles débattements résultent de vibrations externes appliquées à des surfaces qui ne sont pas soumises à des déplacements imposés, on parle de fretting-wear. Si le déplacement est la conséquence de la déformation de l'une des deux structures en contact soumise à une sollicitation cyclique, il s'agit du fretting-fatigue. Quand les produits de la dégradation sont des oxydes, on utilise le terme fretting-corrosion.

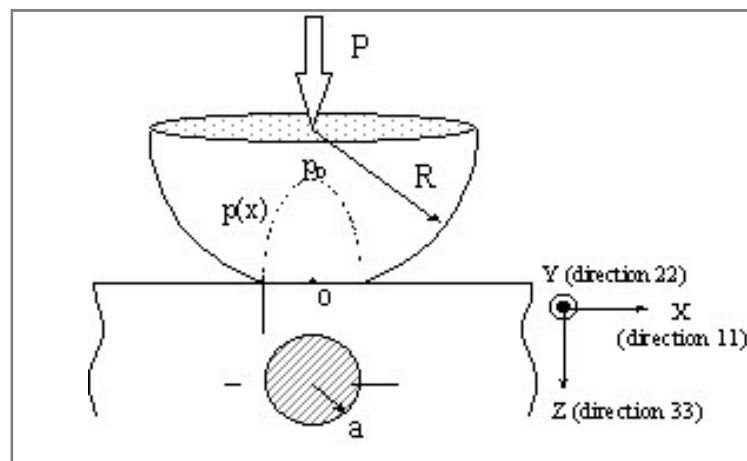


Figure II.1: Schéma général du modèle : Sphère/Plan [17].

II.1.1.2 Modes de fretting

Les vibrations de contact sont souvent induites par des accélérations cycliques, un chargement cyclique, bruit acoustique, ou par variation cyclique de température. Si le contact

a plus d'un degré de liberté, ces vibrations se produisent avec une trajectoire complexe au contact.

Cependant, chaque trajectoire de déplacement sur plan peut être décomposé en quatre composantes de base qui sont ; une trajectoire de déplacement linéaire, radial, rotationnel et torsionnel, par conséquent, il peut y avoir quatre modes de base du fretting [38], qui sont équivalents à ce déplacement complexe, ces quatre modes sont schématisés ci-dessous (Figure II.2).

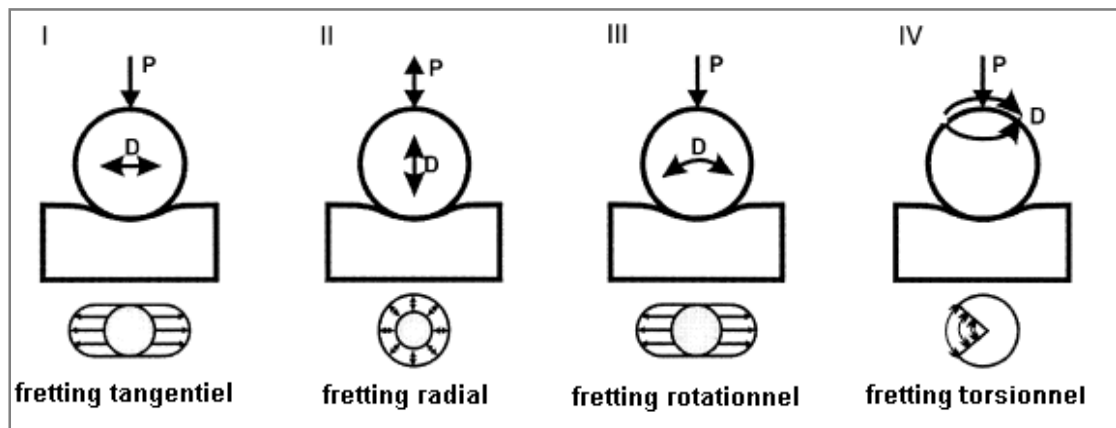


Figure II.2: Les quatre modes de base du fretting [39].

II.1.1.3 Types de fretting

Le fretting est une forme d'usure qui est propre aux mécanismes soumis à de petits déplacements tangentiels rapides ou à des vibrations sous forte charge. Il se produit entre deux surfaces en contact. Le phénomène concerne les matériaux métalliques et non-métalliques. Pendant que les surfaces frottent, de fins oxydes abrasifs se forment, et contribuent ainsi à rayer les surfaces [40]. Ce phénomène peut provoquer plusieurs sortes de détériorations :

- le fretting corrosion : la corrosion est une conséquence de l'endommagement et non sa cause. Des oxydes dus à la dégradation, et appelés « poudres rouges » pour les pièces en aciers apparaissent à l'interface,
- le fretting wear : il s'agit d'usure lors de vibrations externes (déplacements de très faible amplitude environ 10nm) appliquées aux surfaces en contact qui ne sont pas soumises à des déplacements imposés,

- le fretting fatigue : ce terme est employé lorsque des phénomènes de fatigue se produisent au niveau des contacts soumis au fretting.

Les endommagements occasionnés par ces phénomènes observés sont le plus souvent : fissures, oxydes, débris, rayures, transferts, déformation plastique, cratères, fissurations en sous-couche et en surface, etc. Selon les cas, l'usure par petits débattements provoque une prise de jeu des pièces en contact conduisant à une rupture en fatigue. Le fretting peut accélérer l'apparition du processus de fissuration ou provoquer une prise de jeu des pièces en contact conduisant à une rupture en fatigue.

Les principaux paramètres qui influencent le comportement des matériaux en fretting sont les suivants :

- amplitude des déplacements relatifs entre les surfaces,
- charge appliquée,
- température au niveau du contact,
- environnement,
- type de matériau en contact,
- type de vibrations,
- fréquences des oscillations,
- nombre de cycles,
- état et traitement des surfaces.

De nombreuses études actuelles se penchent sur ces phénomènes encore mal maîtrisés et qui pourtant conditionnent de plus en plus le fonctionnement des machines. Il demeure aujourd'hui impératif de maîtriser ces phénomènes afin d'améliorer la durée de vie des mécanismes puisque le fretting peut se manifester dans tous les assemblages mécaniques soumis à des vibrations.

II.1.2 MACHINES DE FRETTING EXISTANTES

II.1.2.1 Selon le mode de fretting

Pour étudier le phénomène de fretting, les chercheurs à travers le monde ont mis au point plusieurs dispositifs simulant ce genre d'avarie, commençant par celui de Kennedy [41], qui est le premier à avoir simulé le fretting radial, jusqu'à ceux qui existent aujourd'hui dans les laboratoires de recherche, on représente ci-dessous quelques uns.

II.1.2.1.1 Dispositif de fretting radial

Le schéma ci-dessous (Figure II.3) montre un dispositif de fretting radial (mode II) [42] qui a été développé à partir d'une machine hydraulique de traction-compression, ce dispositif a été conçu pour une configuration de contact sphère sur plan, les conditions expérimentales principales sont: l'amplitude de la charge normale de 200 à 800 N, le nombre de cycles de 1 à 10^5 cycles et la vitesse de déplacement du piston de 20 à 200 $\mu\text{m/s}$. Le plan (1) (éprouvette supérieure) est fixé sur le support supérieur à la cellule de charge (3), la sphère (2) (éprouvette inférieure) de diamètre 100 mm est fixée, à son tour, sur le piston (4) qui est soumis au mouvement oscillatoire. La déformation cyclique entre les deux surfaces en contact est mesurée par l'extensomètre (5), le processus de fretting entier est automatisé et la variation de la charge normale en fonction de la déformation peut être enregistrée en fonction des cycles.

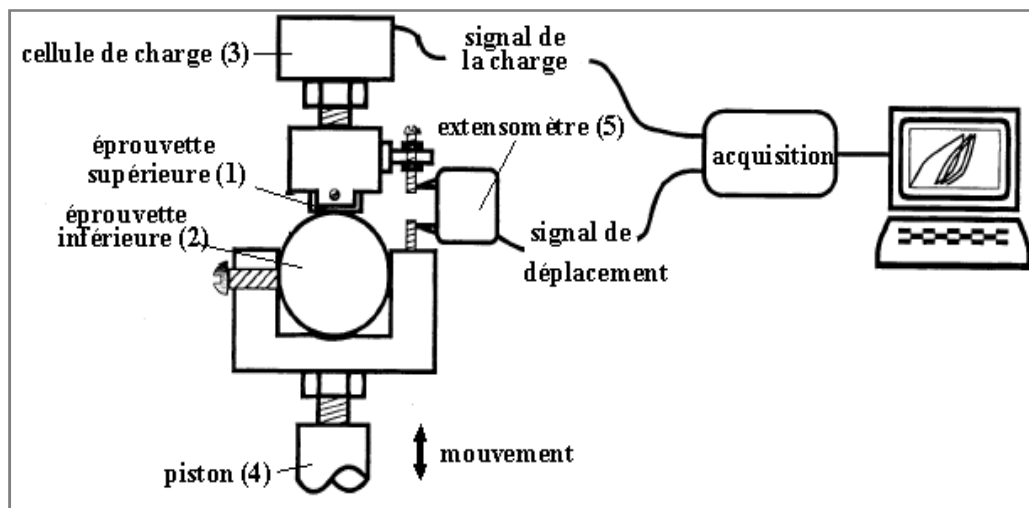


Figure II.3 : Dispositif de fretting radial (mode II) [42]

II.1.2.1.2 Dispositif de fretting composé

La figure ci-dessous est un dispositif de fretting composé (mode I et mode II) [39] (Figure II.4), les conditions expérimentales sont les mêmes que le dispositif précédent, la surface (de contact) entre les corps en contact n'est pas perpendiculaire à la direction du mouvement du piston, mais peut être inclinée par rapport à cette direction avec de différents angles.

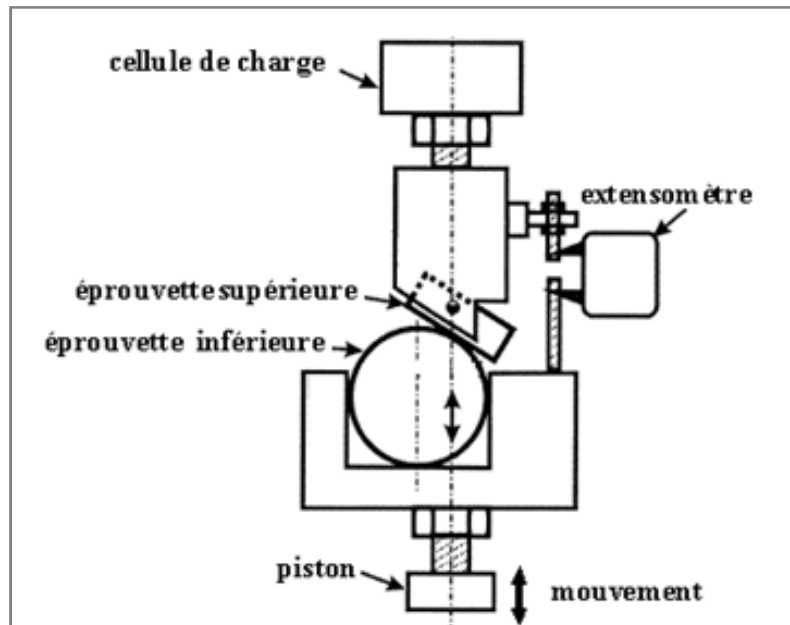


Figure II.4 : Dispositif de fretting composé.

II.1.2.1.3 Dispositif de fretting tangentiel

Le schéma (Figure II.5) montre un dispositif de fretting tangentiel (mode I) [43]. Cette machine d'essai emploie un électro-déclencheur pour un déplacement entre les spécimens d'essai, ces derniers peuvent être de formes et de dimensions variées. La valeur maximale de la course de fretting dépend de la fréquence d'essai et de l'amplitude de la force de frottement (la valeur maximale utilisée sur ce dispositif est de 200 μm à 200 Hz).

L'éprouvette inférieure peut être chauffée par des réchauffeurs à résistance pour permettre les essais à hautes températures. Ce dispositif se compose de trois unités principales : L'unité de commande, le banc de simulation et l'acquisition avec le traitement de données. La charge normale est appliquée à l'éprouvette supérieure à l'aide d'un ressort comprimé par un axe soutenu par une armature rigide, le système qui applique la charge normale comporte un capteur de force pour mesurer cette charge, une chambre d'isolement

qui permet d'imposer des atmosphères différents d'essai y compris la commande de l'humidité relative. L'unité d'acquisition de données permet l'acquisition en temps réel des paramètres de fretting mesurés.

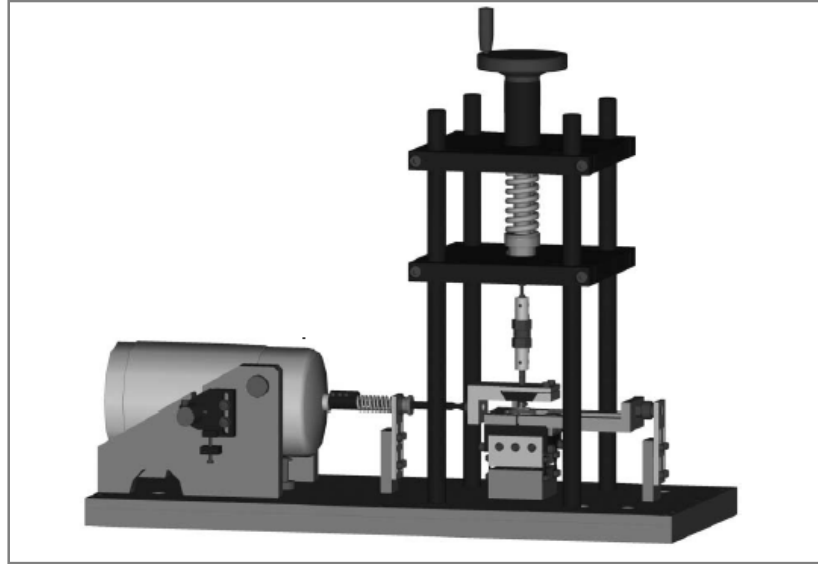


Figure II.5 : Dispositif de fretting tangentiel.

II.1.2.1.4 Le Vibro-Cryo-Tribomètre

Le schéma ci- dessous (Figure II.6) montre un Vibro-Cryo-Tribomètre (V.C.TM) [44], la configuration de contact utilisée est sphère sur plan, ce dispositif applique une force normale ; à l'aide de poids (0,5à 5 kg), et une force tangentielle à l'éprouvette plan, reproduisant ainsi le phénomène de fretting (en mode I). Cela par un servomécanisme qui peut engendrer ; soit une force tangentielle (mesurée par un capteur piézoélectrique), soit un mouvement oscillatoire (mesuré par un capteur de déplacement) ou encore une force accélérée. Les spécimens en contact peuvent être mis dans un milieu d'air, d'eau distillée ou bien du liquide de Nitrogène, l'étude de différents lubrifiants est possible par l'ajout d'une goutte du lubrifiant à étudier avant l'essai.

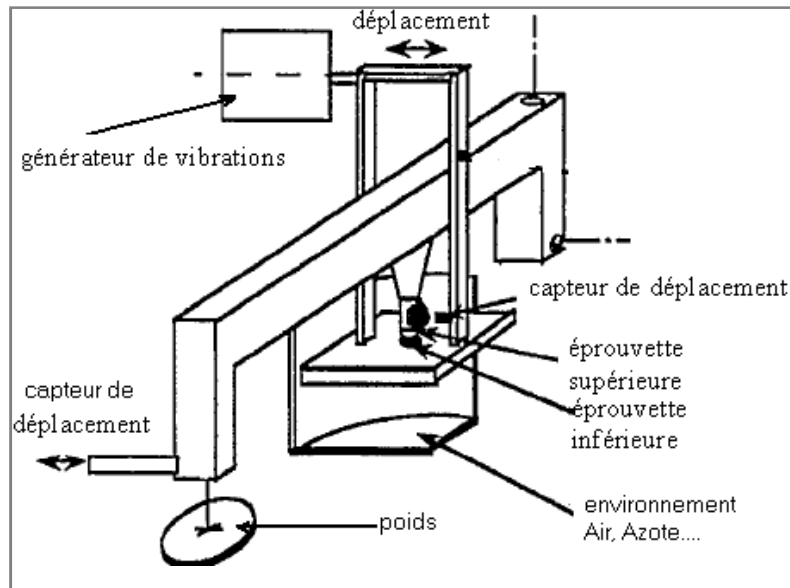


Figure II.6 : Le Vibro-Cryo-Tribomètre.

II.1.2.1.5 Dispositif de fretting torsionnel

Le schéma (Figure II.7) montre un dispositif de fretting de torsion (mode IV) [45], la configuration des spécimens de contact utilisée est sphère sur plan, ce dernier est chargé contre la sphère, à travers le bras de levier (a), à l'aide des poids (e). Un moteur électrique pas à pas permet d'engendrer une rotation angulaire (θ) transmise à la sphère par l'arbre (b). Un capteur (f) permet de mesurer le déplacement angulaire en contactant le plat (g) attaché à la sphère par l'intermédiaire de l'arbre (b). L'angle (α) entre le spécimen plan et l'axe de rotation de la sphère peut être varié.

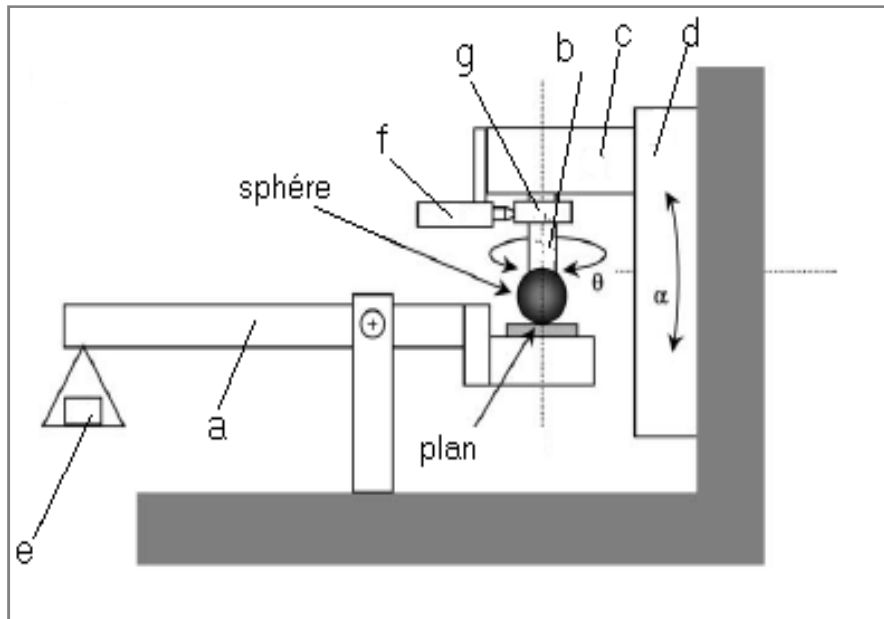


Figure II.7 : Dispositif de fretting de torsion (mode IV).

II.1.2.2 Selon le type de fretting

Un certain nombre de machines de fretting ont été développées à travers le monde afin de simuler les phénomènes de fretting-wear (figure II.8) (figure II.9) (figure II.10) ; de fretting-fatigue (figure II.11) ou de fretting-corrosion (figure II.12), pour étudier respectivement l'usure ; la fissuration et la corrosion.

II.1.2.2.1 Fretting Wear

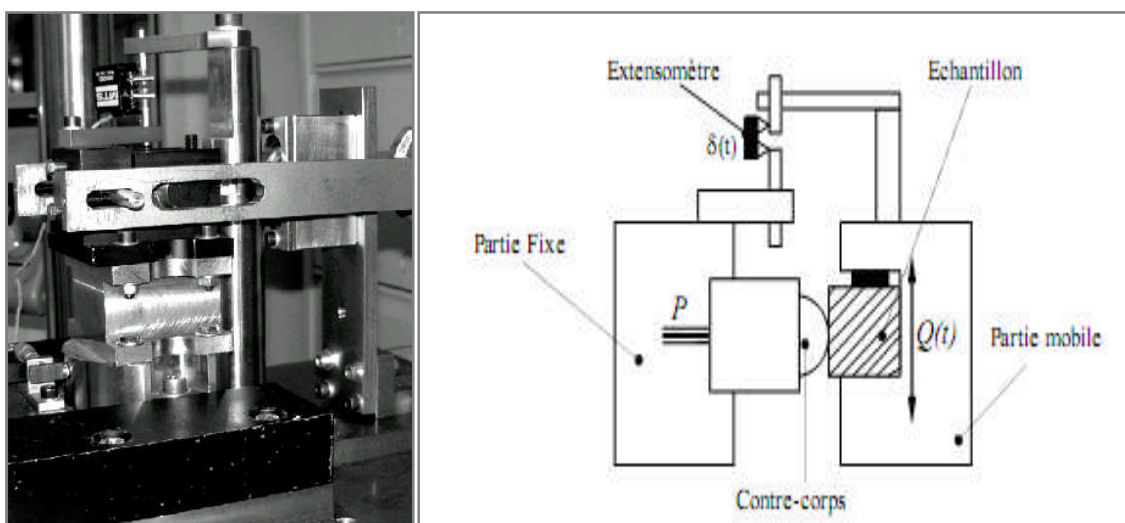


Figure II.8 : Bancs d'essai du fretting wear [46] [47].

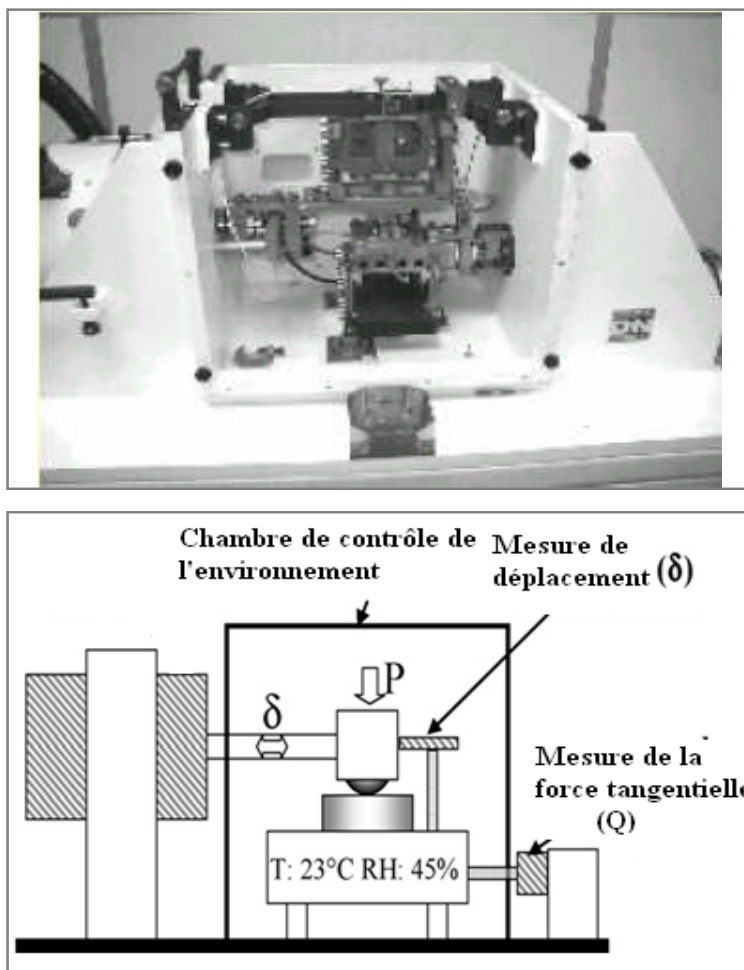


Figure II.9 : Fretting Wear sous environnement contrôlé [48].

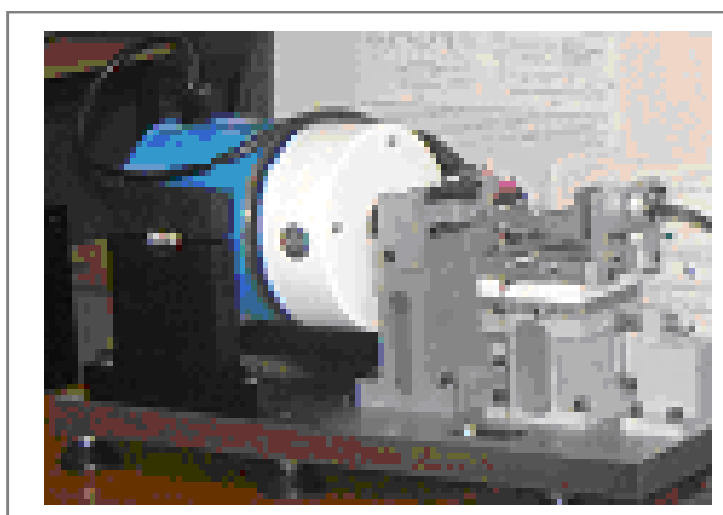


Figure II.10 : Fretting Wear sous faibles charges [connectique] [49].

II.1.2.2.2 Fretting Fatigue

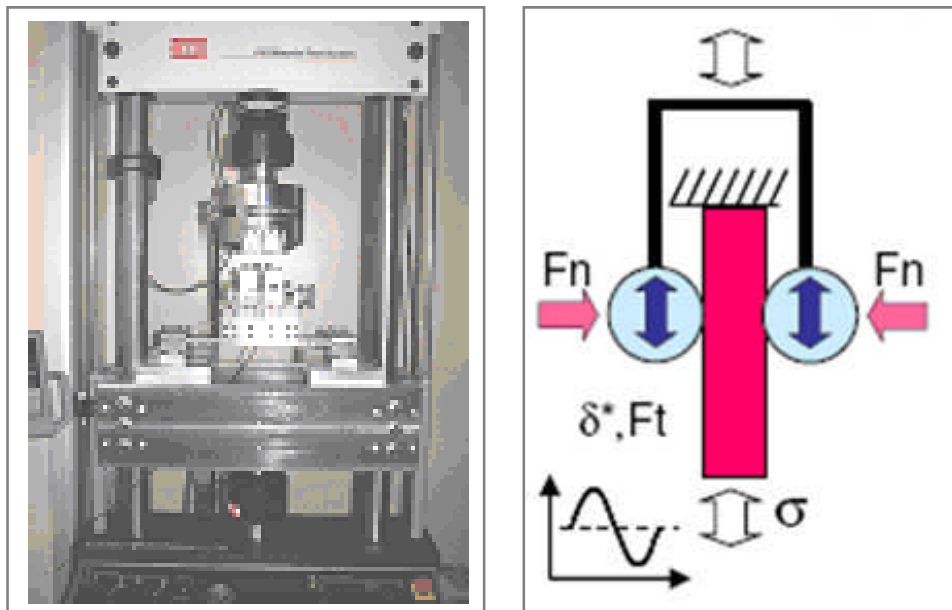


Figure II.11 : Bancs d'essai du fretting fatigue [50].

II.1.2.2.3 Fretting corrosion

C'est un frottement sous petits débattements (quelques μm à quelques centaines μm) entre deux surfaces en contact dans un milieu corrosif.

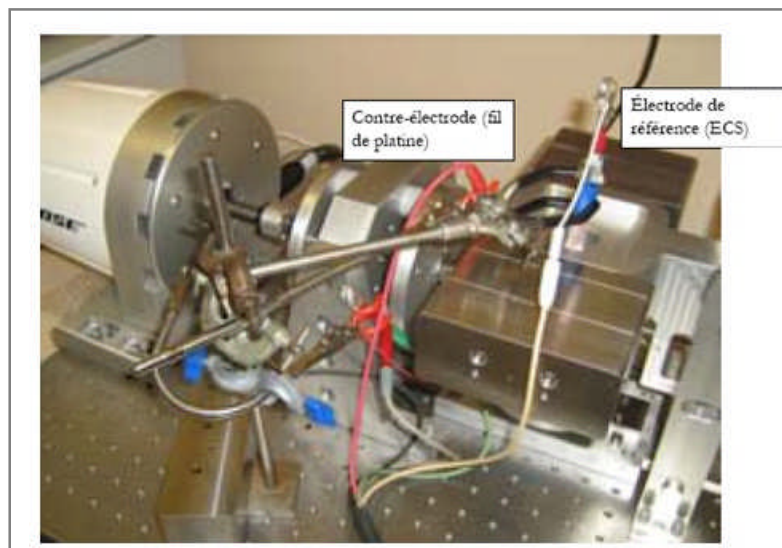


Figure II.12: Tribocorrosimètre [51].

II.1.3 LE BANC DE SIMULATION DE FRETTING RADIALE

Le banc de simulation de fretting a été réalisé dans sa première version au niveau du laboratoire de mécanique *LR3MI* faisant l'étude expérimentale d'un mémoire de Magister [52], lui-même inspiré d'un banc d'essai du laboratoire de contrôle à l'INSA de Lyon.

II.1.3.1 Description générale

Le banc de simulation est constitué de deux parties principales : une partie mécanique et une partie mesure.

II.1.3.1.1 Partie mécanique

Cette partie se compose d'un bras articulé autour d'un axe de rotation. Ce bras supporte à son extrémité un moteur électrique muni de masselottes excentrées, placées sur deux volants symétriques montés en bout d'arbre du moteur et cela dans le but de créer une charge normale cyclique au contact. Si le contact entre les éprouvettes, supérieure et inférieure, est établi, c'est ainsi que la charge statique est appliquée (position horizontale du bras d'articulation). En dynamique, on obtient un effort normal au contact qui est sinusoïdal et qui dépend de la fréquence de rotation du moteur électrique ainsi que des masselottes.

Les organes principaux composant notre dispositif sont (Figure II.13) :

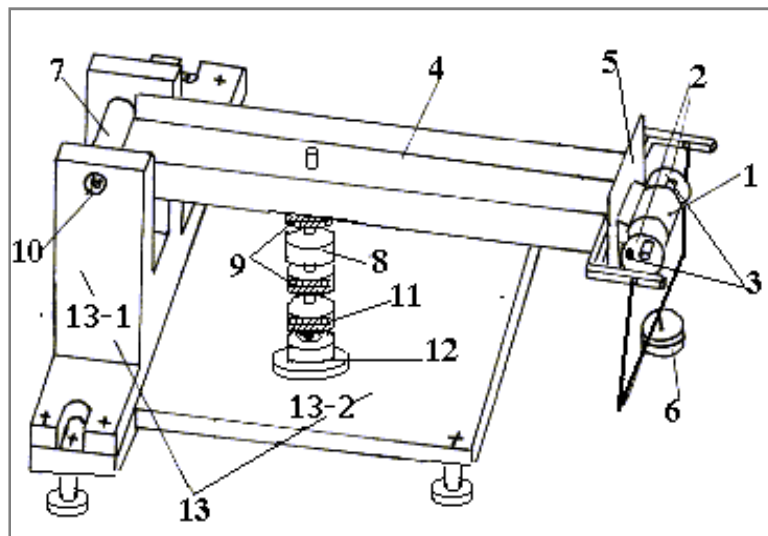


Figure II.13 : Vue générale de l'ancien dispositif de simulation de fretting.

- Moteur électrique: C'est un moteur asynchrone triphasé à cage (1), sur lequel deux volants (2) sont fixés symétriquement sur les deux bouts de son arbre de rotation. Sur ces volants deux petites masses (masselottes) (3) excentriques par rapport à l'axe de l'arbre du moteur électrique sont fixées (une masse par volant). Ainsi deux forces centrifuges prennent naissance dès que le moteur électrique tourne. On note que la commande du nombre de tours du moteur électrique se fait à l'aide d'un variateur de vitesse fréquentiel.

- Bras d'articulation: C'est un profilé (4) en I sur le quel on fixe sur l'une de ses deux extrémités et par soudage le porte-tares (5), sur ce dernier on fixe le moteur électrique et on suspend les tares (6) qui sont des masses ajoutées à l'extrémité de ce bras afin de charger statiquement le contact. A son autre extrémité, il est articulé autour d'un axe à l'aide d'une bague (7) soudée (sur ce bras). A une distance L_1 de cette dernière extrémité est fixé le capteur de force (8), qui permet la mesure de la charge normale au contact, et ceci par son extrémité supérieure à l'aide d'un raccord. On note que durant l'essai le contact doit être permanent sans qu'il s'annule (martèlement de l'éprouvette inférieure par l'éprouvette supérieure à l'aide de ce bras) [53], cette situation correspond à une fréquence de rotation du moteur électrique qu'on doit déterminer.

- Raccords: Ce sont deux pièces de révolution identiques (9), montées sur les des deux bouts filetés, du capteur de force, ces raccords servent à préserver le filetage du capteur.

- Les Portes-épreuves: Ils servent à la fixation des éprouvettes d'essai. On distingue le porte-épreuve supérieur (11) (pour bille), lié au capteur de force au capteur à travers l'un des raccords et Le porte-épreuve inférieur (12) (pour plan) qui est fixé au bâti, pour une configuration de contact bille sur plan. On notera qu'ils peuvent être adaptés pour d'autres configurations de contact.

- .Axe d'articulation : C'est une pièce de révolution (10), sur la quelle s'articule le bras d'articulation à travers d'un couple de roulements à billes.

- Bâti: C'est un corps rigide (13) et suffisamment lourd pour s'opposer aux sollicitations de fonctionnement. Il se compose de deux pièces assemblées par des boulons, qui sont : le porte-axe d'articulation (13-1) (pièce rigide mécano-soudée) et la plaque-support (13-2), sur la quelle on fixe par boulons le porte-épreuve inférieur et le porte-axe d'articulation.

En plus de ces organes principaux, on trouve :

- Les roulements : Pour le guidage angulaire de l'axe d'articulation dans l'alésage du porte-axe d'articulation ; l'emploi de ces roulements a pour but de diminuer le frottement dans les paliers.
- Les appuis : Pour la mise en position du bâtis sur une surface d'appui on a prévu quatre appuis disposés symétriquement par rapport au plan de symétrie du dispositif, deux en avant et deux en arrière, reposant sur la surface d'appuis par l'intermédiaire de plots élastiques et cela pour amortir les vibrations dues au fonctionnement du dispositif.
- Les boulons : Pour la fixation des différents organes (le moteur électrique, le porte éprouvette inférieur le porte-axe d'articulation et les masselottes). En plus d'un écrou et d'un contre-écrou pour la fixation du capteur de force, à travers le raccord, sur le bras d'articulation.
- Une petite vis (de pression) : Pour la fixation de la bague sur l'axe d'articulation.
- Une vis : Pour la fixation de l'éprouvette inférieure dans son porte-éprouvette.
- Des contrepoids : Pour éviter le basculement du bâti.
- Les éprouvettes d'essai : Une éprouvette supérieure représentée par une bille et une inférieure plane.

II.1.3.1.2 Partie mesure

Pour enregistrer l'effort appliqué au contact, le porte-éprouvette supérieur est lié, par un raccord, au capteur de force (équipé de jauges de contraintes) qui est à son tour relié à un indicateur conditionneur pour pont de jauges permettant la lecture de la valeur de la charge appliquée [52].



Figure II.14 : Variateur de vitesse utilisé.

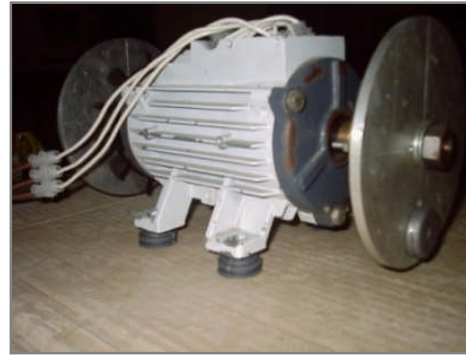


Figure II.15 : Moteur électrique utilisé.

II.1.3.2 Amélioration du bâti

Ce banc de simulation a été modifié pour éliminer son basculement vers l'avant; le bâti mécano-soudé en acier a été remplacé par un bâti monobloc en fonte grise [54].

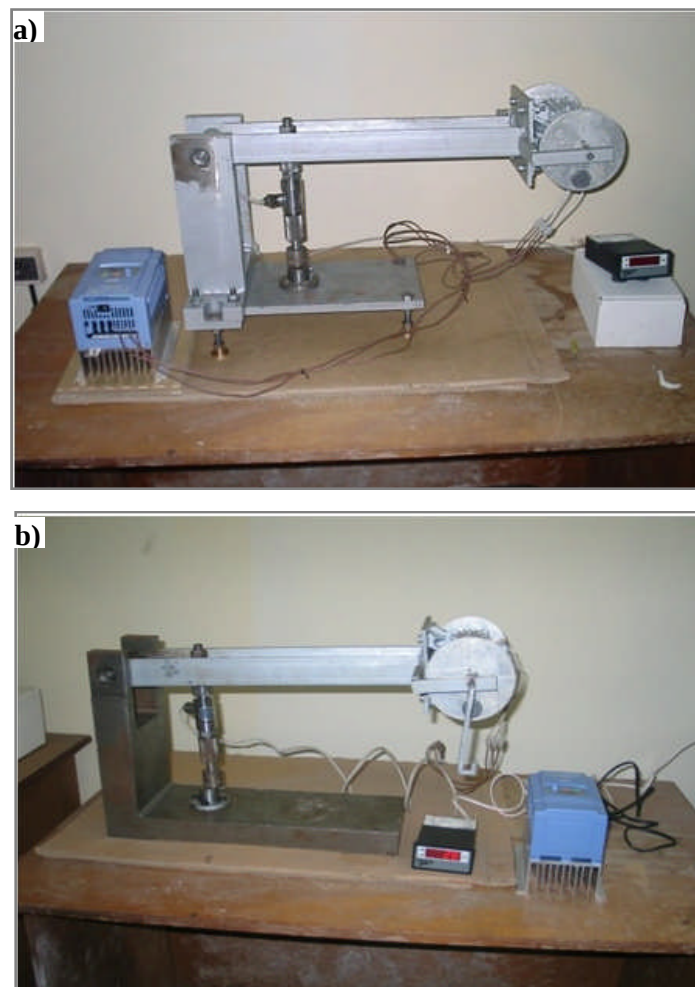


Figure II.16: Vue d'ensemble de l'ancien et le nouveau prototype de simulation :

a) Banc de simulation de fretting à bâti mécano-soudé, b) Banc de simulation de fretting à bâti monobloc.

Malgré le changement du bâti, le banc de simulation de fretting reste instable et n'est pas prêt pour l'application d'un essai de fretting dans une large gamme et dans les conditions voulues, pour cela nous avons étudié sa stabilité à l'aide d'un analyseur de vibrations.

II.2 DESCRIPTION ET ANALYSE DE L'ANALYSEUR DE VIBRATIONS

II.2.1 INTRODUCTION

Pour prévenir les défaillances, il existe des outils de surveillance puissants, tels que l'analyse vibratoire, la thermographie ou l'analyse des lubrifiants; l'analyse vibratoire est la plus connue et la plus largement employée. Il faut dire qu'elle permet à elle seule de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Un balourd, un jeu, un défaut d'alignement, un roulement usé ou endommagé... se traduisent par une variation des efforts internes que subit la machine, et donc à une modification de son comportement vibratoire.

Le principe de l'analyse spectrale en vibrations est le fait que chaque composante de la machine induit une fréquence caractéristique fonction de la vitesse de rotation (Figure II.17). Chaque défaut possède sa propre composante fréquentielle qui le distingue d'un autre et permet sa détection facilement sur le spectre. Ainsi les signatures fréquentielles des différents défauts qui peuvent survenir sur une machine tournante ont été définies (tableau II.1). Interpréter un pic sur un spectre nécessite donc le maximum d'informations sur la cinématique ainsi que les différents organes constitutifs.

Pic correspond à un défaut

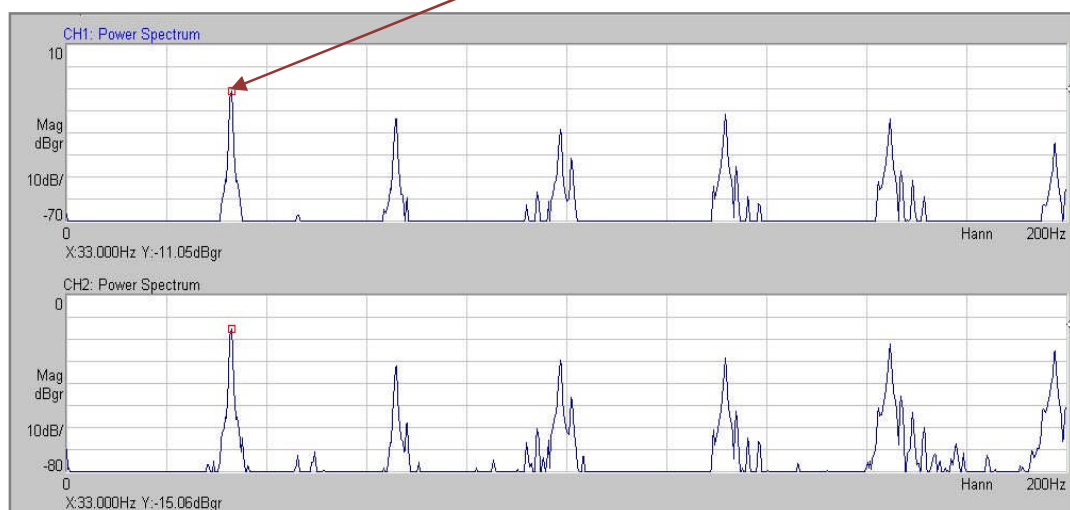


Figure II.17 : Apparition des défauts sur les spectres

Tableau II.1 : Fréquences identifiantes des défauts dans les machines tournantes

Cause	Vibration		Remarque
	Fréquence	Direction	
Tourbillon d'huile	De 0.42 à 0.48 x FR	Radiale	Uniquement sur paliers lisses hydrodynamique à grande vitesse
Balourd	1 x FR	Radiale	Intensité proportionnelle à la vitesse de rotation
Défaut de fixation	1, 2, 3, 4 x FR	Radiale	
Défaut d'alignement	2 x FR	Radiale et axiale	Vibration axiale généralement plus importante si le défaut d'alignement comporte un écart angulaire
Excitation électrique	1, 2, 3, 4 x 50Hz	Radiale et axiale	Disparaît dès coupure de l'alimentation
Vitesse critique de rotation	Fréquence critique du rotor	Radiale	Apparaît en régime transitoire et s'atténue ensuite
Courroie en mauvais état	1, 2, 3, 4 x FR	Radiale	
Engrenages endommagés	Fréquence d'engrènement $F = N_{\text{dent}} \times \text{FR arbre}$	Radiale et axiale	Bande latérale autour de la fréquence d'engrènement
Faux-rond pignon	F x FR pignon	Radiale et axiale	Bande latérale autour de la fréquence d'engrènement due aux faux-rond
Excitation hydrodynamique	Fréquence de passage des aubes	Radiale et axiale	
Détérioration de roulement	Hautes fréquences	Radiale et axiale	Ondes de choc dues aux écaillages

II.2.2 L'ANALYSEUR DE VIBRATIONS

II.2.2.1 Définition

On a utilisé pour l'analyse vibratoire un analyseur de vibrations de spectre de modèle ViaXys CF-3600 (Figure II.18), équipé d'un système 4 voies tout en un enregistreur et analyseur, une Sortie pour génération de signaux, et un écran 15'' tactile couleur, une télécommande fournie en standard. Il se fonctionne en AC, DC ou batterie interne garantissant l'intégralité des données en cas de coupure de courant, et a pour caractéristiques: des convertisseurs 24 bit "N", un échantillonnage maximum de 101,4 kHz par voies, des analyses spectrales de 4 mHz à 40kHz. Il a des enregistrements longue durée (87 minutes pour 4 voies à 40 kHz), des fonctions avancées de traitement du signal: analyse FFT, analyse en octave, analyse d'ordre et des logiciels dédiés : Puissance et intensité acoustique, analyse modale.

Cet appareil de mesure de vibration ne contient pas un ventilateur qui perturbe les mesures acoustiques.

En (Annexe A) plus de détail sur les caractéristiques générales et spécifiques et même sur les outils logiciels de l'analyseur de vibrations.



Figure II.18: Analyseur de vibrations utilisé.

On peut tirer les fréquences du système directement à partir d'une liste détectant les pics sur l'analyseur (Figure II.19).

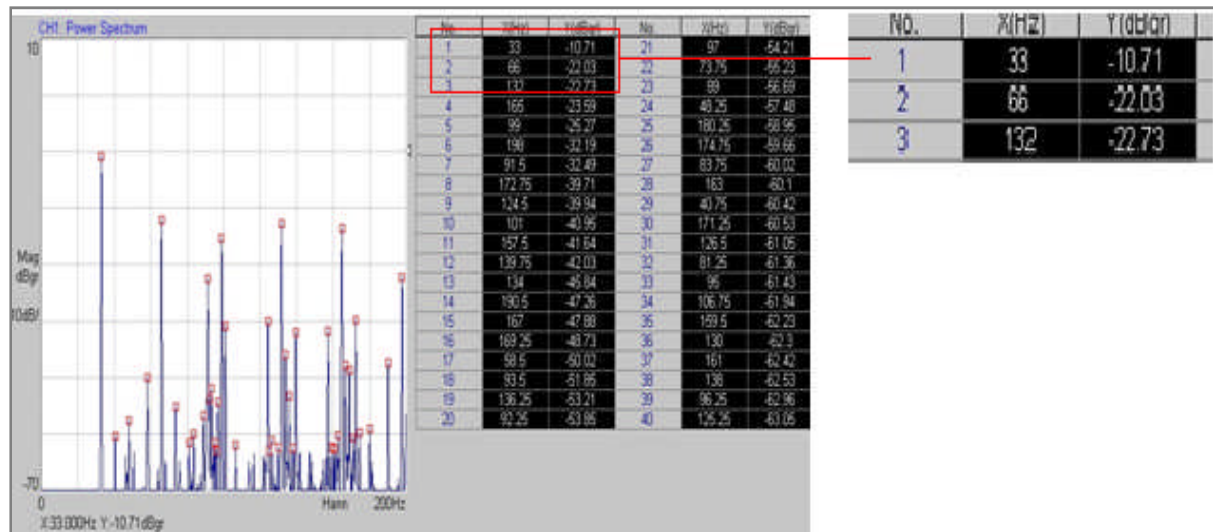


Figure II.19: Représentation des fréquences dans une liste.

II.2.2.2 Détermination des fréquences propres

On a utilisé le marteau de choc qui fait partie de l'équipement de vibration (Figure II.20) pour déterminer les fréquences propres de la machine.

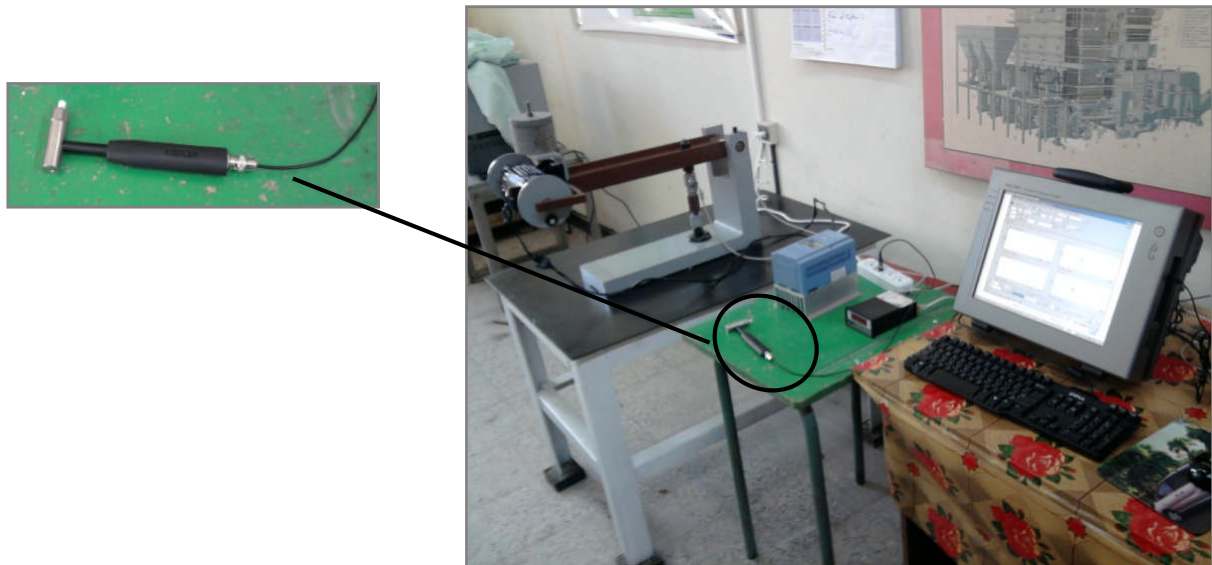


Figure II.20 : Equipements utilisés pour la détermination des fréquences propres.

III.1 MODIFICATION DU BANC DE SIMULATION DE FRETTING

Afin d'étudier la stabilité du banc de simulation de fretting, on a réalisé un essai témoin de fretting. Pour cela on a utilisé un couple de contact en acier 100Cr6 : une bille de roulement montée sur un porte-éprouvette supérieur "ou porte-bille" et une éprouvette plane non traitée montée sur un porte-éprouvette inférieur (figure III.1).

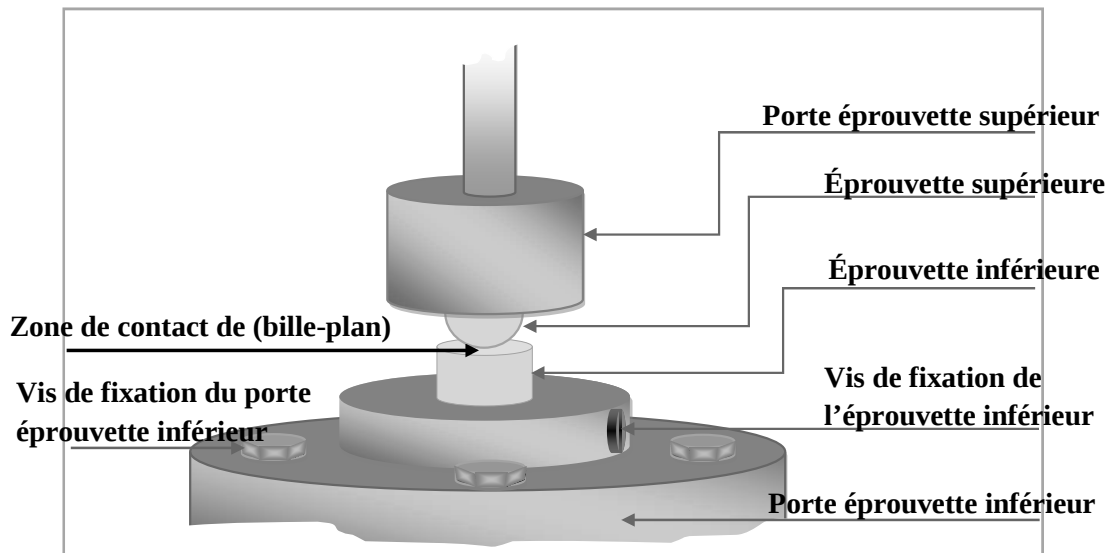


Figure III.1: Montage des éprouvettes.

Lors du démarrage de ces essais et surtout avec l'ajout des tares, des vibrations sévères rendent l'essai difficile et parfois impossible. Cela nous a amené à faire des modifications au niveau du banc de simulation de fretting pour améliorer sa stabilité en tenant compte d'une étude (de conception, du mouvement, du choix du matériau et du calcul de résistance) menée précédemment [52].

III.1.1 Changement de la table

Pour assurer la stabilité de la machine, on a remplacé la table en bois par une table métallique lourde et plus rigide avec des supports amortisseurs de vibrations. Des points de soudures sur la base du banc assurent sa fixation permanente sur la table (figure III.2).

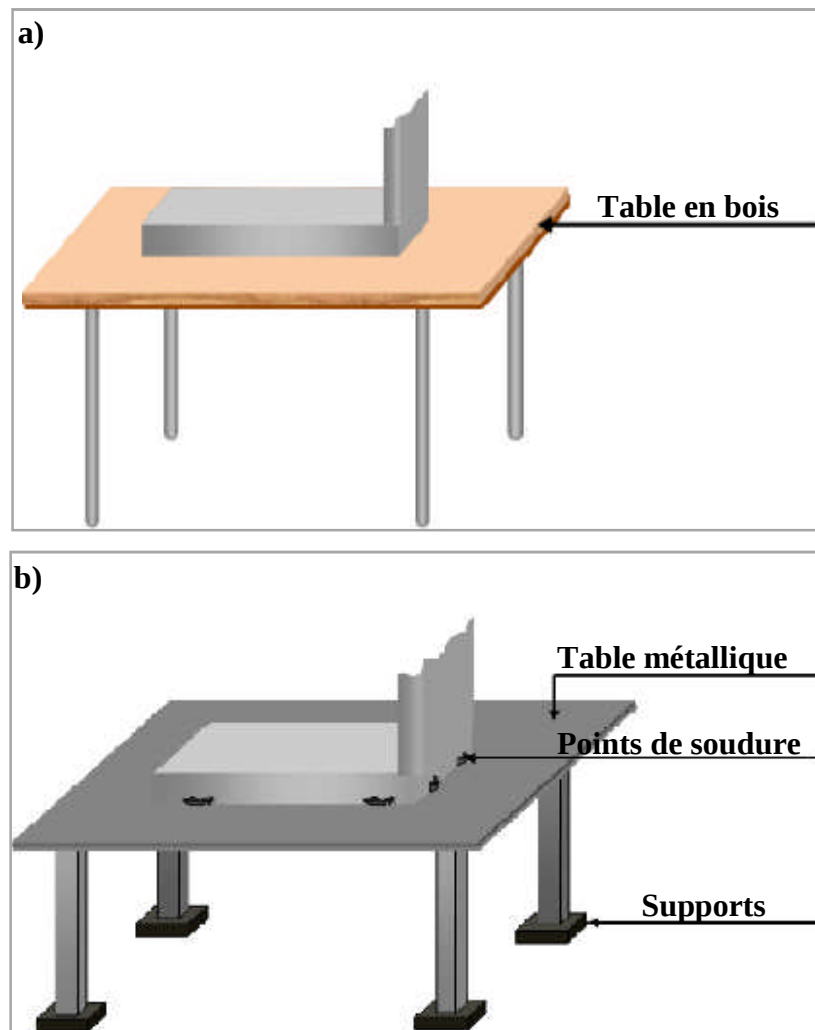


Figure III.2 : Changement de la table :

a) banc posé sur une table en bois, b) banc soudé sur une table métallique.

III.1.2 Modification du porte-tares

Après les changements précédents on a obtenu les résultats suivants:

- Fretting tangentiel et fretting radial au lieu du fretting radial seulement (figure III.3a).
- Une trace d'usure par fretting non circulaire et excentrée (figure III.3b).
- Des résultats “malheureusement” non reproductibles.
- Une faible fréquence de rotation (<20 Hertz).

- Deux traces obtenues au lieu d'une seule (non retour à la position initiale) après une coupure accidentelle de courant électrique (figure III.3c).

Parfois des fissures (figure III.3.d) au niveau du plan de contact de l'éprouvette inférieure (la pièce cylindrique).

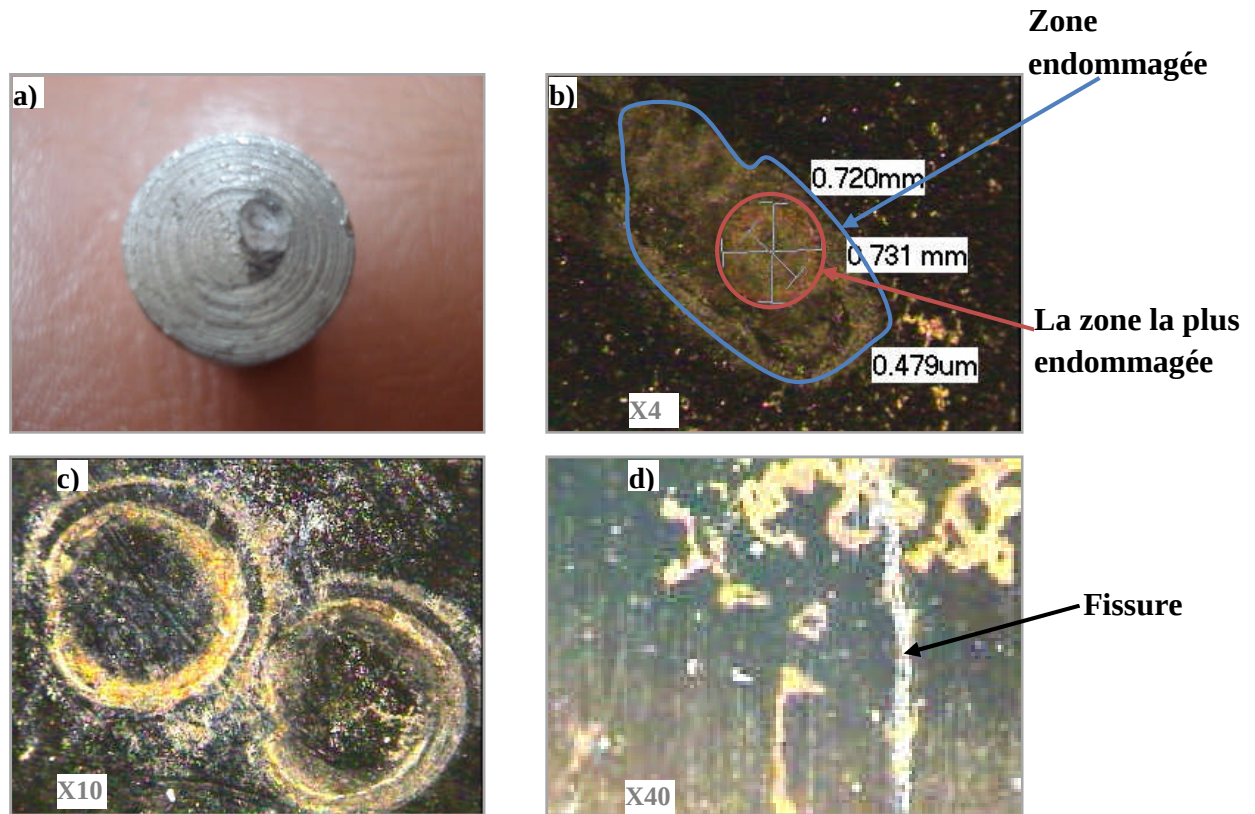


Figure III.3: Traces de fretting observées sur une éprouvette en acier 100Cr6 avant modification du banc: a) Photo de la trace, b) Vue microscopique de la trace de fretting (x10); c) Deux traces au lieu d'une seule après coupure de courant électrique; d) Observation d'une fissure sur l'éprouvette.

Le fretting tangentiel non souhaité pour l'objectif de cette étude est dû probablement au balancement des tares (suspendues initialement par une chaîne) (Figure III.4a). Pour éliminer ce balancement, on a proposé de changer le porte-tares par un autre plus stable et qui sera solidaire de la plaque support moteur. La nouvelle configuration (Figure III.4b) est constituée d'une cornière percée au centre pour permettre de superposer les tares et de les fixer par une tige filetée pour permettre la variation de la charge.

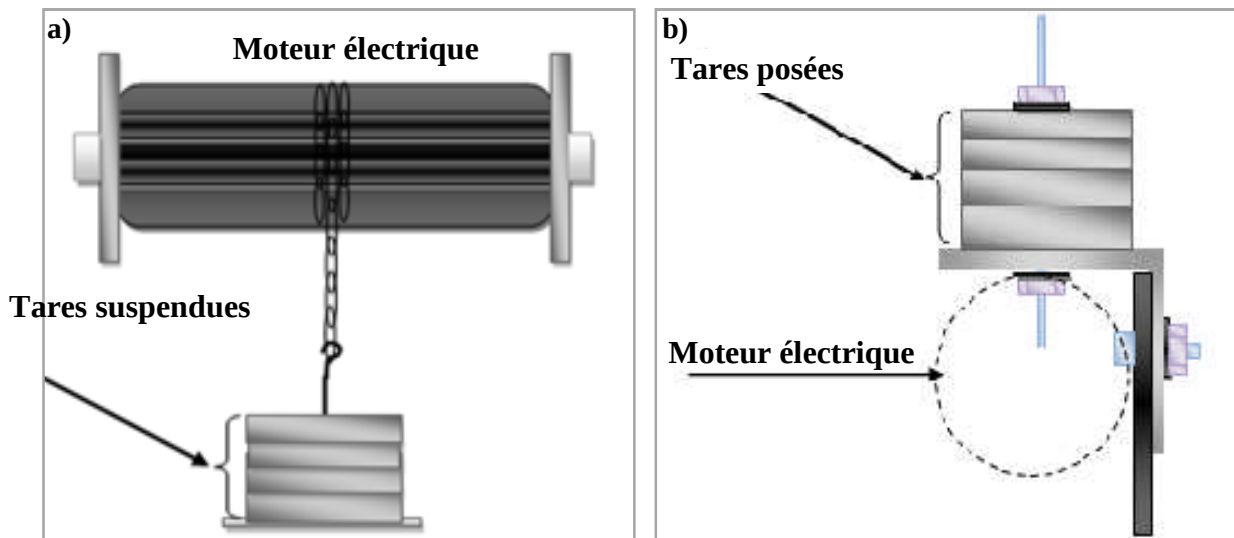


Figure III.4 : Modification du porte-tares :

a) Avant modification, b) Après modification.

III.1.3 Modification du porte-éprouvette inférieur

L'excentricité de la trace d'usure par fretting est due à la non perpendicularité de l'axe portant l'éprouvette supérieure, ceci nous a posé des difficultés lors de l'analyse après essai. Cette non perpendicularité dépend de la variation de la longueur des échantillons ainsi que du montage et démontage répétés du capteur, du porte-bille et des raccords.

Pour résoudre ce problème sans changer les données de la machine; on a choisit de modifier le porte-éprouvette inférieur en remplaçant les trous circulaires par des trous oblongs (de forme elliptique) (figure III.5) afin d'avoir la possibilité de régler le porte-éprouvette et de le mettre dans la meilleure position.

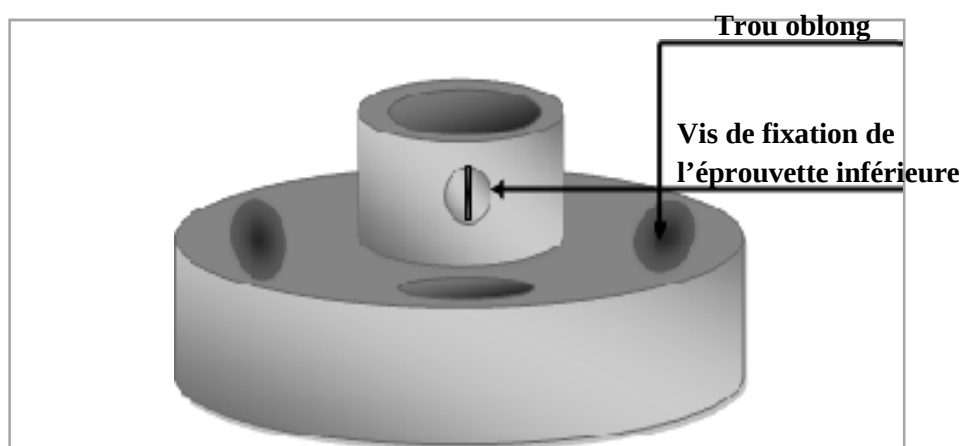


Figure III.5: Porte-éprouvette inférieur modifié.

III.1.4 Modification du porte-éprouvette supérieur

A cause de son état de surface lisse il était difficile de monter et démonter le porte-éprouvette supérieur après chaque essai. C'est pour cette raison qu'on a réalisé un méplat qui permettra une bonne prise du porte-bille par la clé de serrage.

Pour augmenter les caractéristiques mécaniques du matériau du porte-bille, on a fait un traitement thermique pour avoir un meilleur contact entre ce dernier et la bille ainsi que pour obtenir une bonne résistance à la déformation du trou du porte-bille. Surtout qu'il va subir plusieurs opérations de montage et démontage.

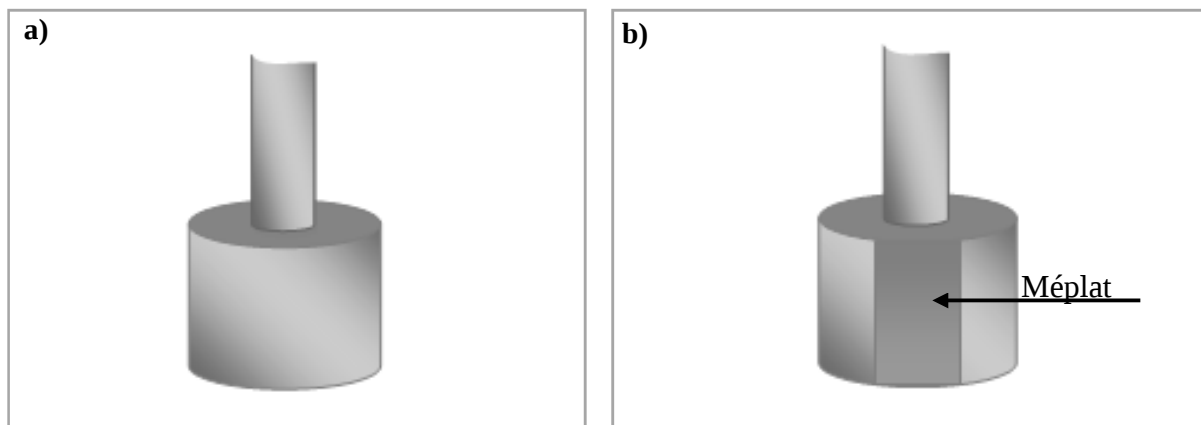


Figure III.6: Porte-éprouvette supérieur:
a) Avant modification, b) Après modification.

III.1.5 Protection par la peinture

On a protégé le banc de simulation contre la corrosion en utilisant une peinture anti-corrosion et finissant par différentes couleurs pour mieux distinguer ses éléments.

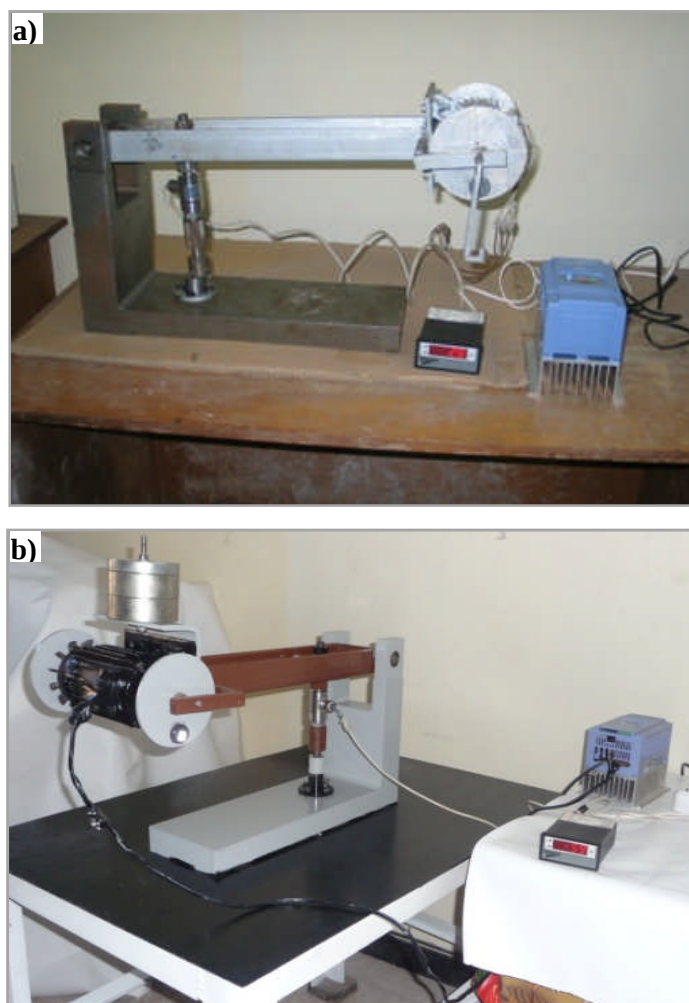


Figure III.7: Vue d'ensemble du banc de simulation de fretting:

a) Avant modifications ; b) Après modifications.

III.1.6 Réglage du jeu de la barre d'articulation

Nous avons remarqué qu'en cas de coupure du courant, la poursuite de l'essai risque d'avoir une double trace. Cela est dû au jeu au niveau de la bague et de l'axe d'articulation et au martèlement de la bille sur le plan avant l'arrêt (figure III.8).

On a procédé au réglage du jeu manuellement lors de la mise de la bille sur le plan, et ceci et en le ramenant à une position déjà repérée au début de l'essai.

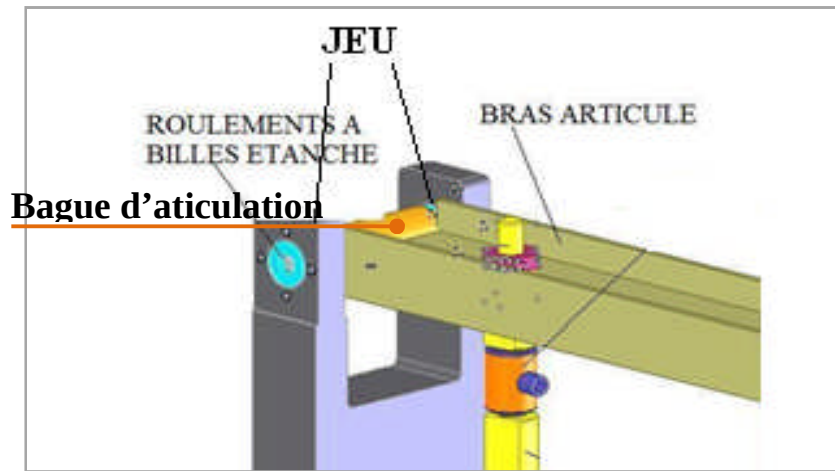


Figure III.8: Zone des jeux au niveau des extrémités de la bague.

III.1.7 Description du banc de simulation du fretting après modification

Le banc de simulation dans sa nouvelle configuration (figure III.9) est constitué d'une partie mécanique agencée en deux parties. L'une mobile illustrée par un bras pivotant autour d'un palier de roulement, supportant à son extrémité un moteur électrique asynchrone (piloté par un variateur fréquentiel), sur lequel on a monté deux volants munis de masselottes excentrées, créant ainsi des charges cycliques sinusoïdales (engendrant un débattement radial D mesurées à l'aide d'un capteur de force inductif dont la lecture se fait sur un afficheur digital. On notera que le porte-bille est solidaire du capteur de force, par le biais d'un raccord, qui est à son tour boulonné sur le bras articulé. Une tare de 5 Kilogrammes, est placée juste au-dessus du moteur, dans l'optique de créer une charge statique conséquente. L'autre partie est composée du bâti fixe (placé sur une table métallique), sur lequel est vissé le porte-éprouvette plane, en l'occurrence l'échantillon cylindrique de 10mm de diamètre et 11mm de longueur.

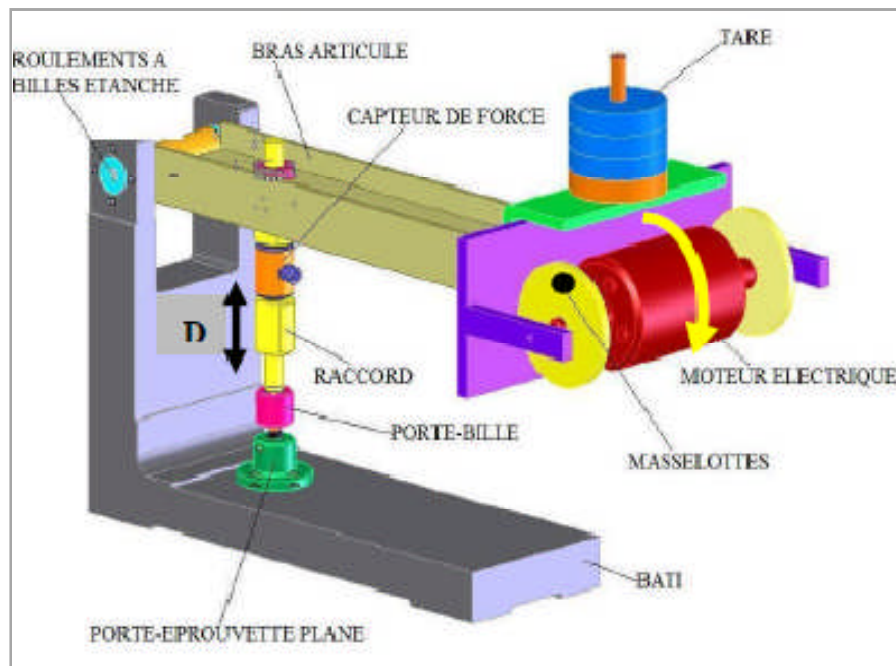


Figure III.9: Schéma général détaillé du banc de simulation de fretting.

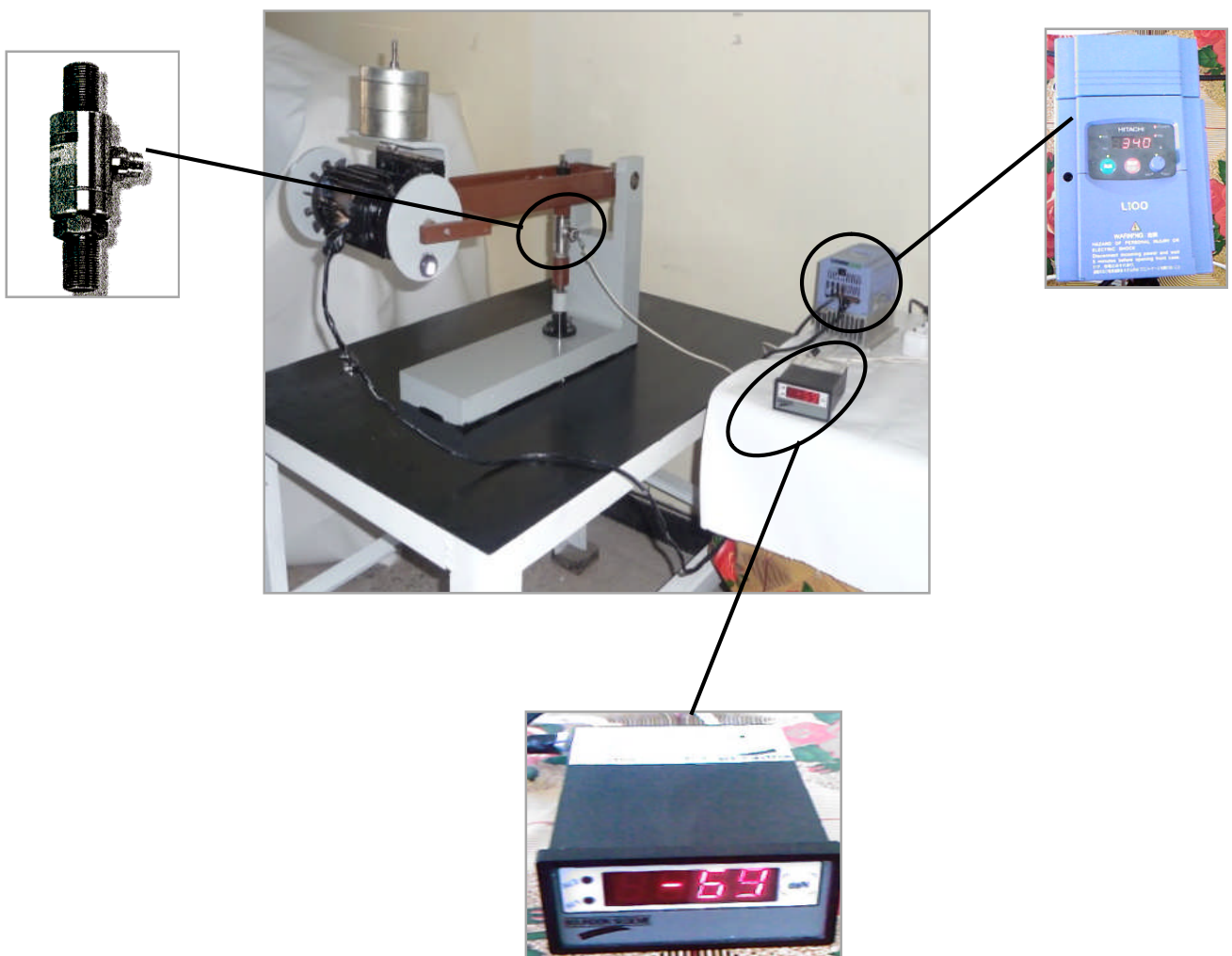


Figure III.10: Vue d'ensemble du dispositif de simulation.

Pour vérifier le comportement du banc de simulation de fretting, on a utilisé un analyseur de vibrations “récemment acquis au notre laboratoire” lors de la réalisation de l'essai.

III.2 APPLICATION D'UN ESSAI DE FRETTING

L'essai de fretting consiste à imposer un déplacement alternatif de faible amplitude entre deux antagonistes en contact. Ce mouvement cyclique introduit à l'échelle du contact une sollicitation cyclique qui va provoquer un endommagement (après un certain nombre de cycles) des surfaces dans notre cas par le mécanisme d'usure.

III.2.1 Présentation de l'essai de fretting

L'essai de fretting est un essai de frottement en petits débattements. Il consiste à maintenir en contact deux antagonistes par l'intermédiaire d'une force normale (F) constante puis à solliciter l'ensemble par un débattement alternatif (D). Au cours de l'essai, l'essentiel que les surfaces en contact restent en permanence et ne sont jamais exposées à l'air ambiant. C'est en fait, une reproduction simplifiée de plusieurs systèmes réels subissant le même type de sollicitation

Plusieurs configurations de contacts peuvent être envisagées (plan/plan, sphère/plan et cylindre/plan). Dans un but d'avoir des configurations de contact localisé, s'approchant de la réalité industrielle (contact entre billes et bagues de roulement) nous avons choisi un contact de type sphère / plan. Le principe de l'essai du fretting est présenté ci-dessous (figure III.11).

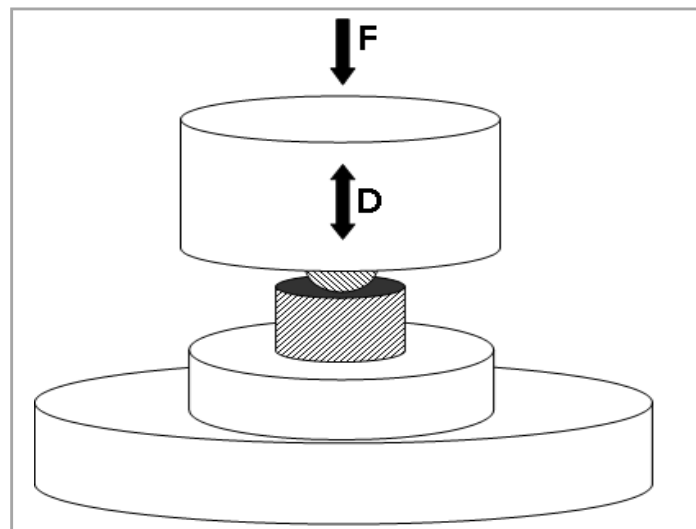


Figure III.11: Représentation d'un essai de fretting radial.

III.2.2 Caractéristiques et préparation des échantillons

III.2.2.1 Caractéristiques échantillons

La sphère est représentée par une bille de roulement en acier 100Cr6 et le plan par un échantillon cylindrique coupé d'une barre en acier 100Cr6 traité (figure III.12); les caractéristiques des échantillons sont montrées dans le (tableau III.1).

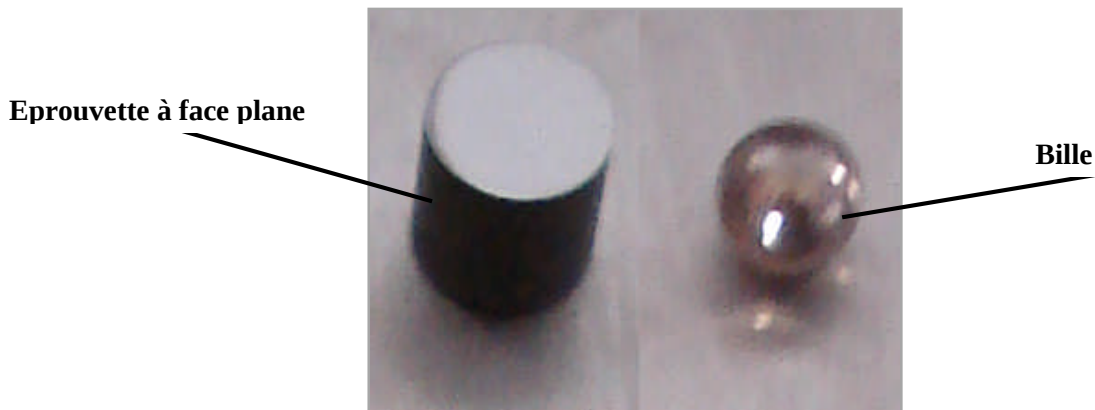
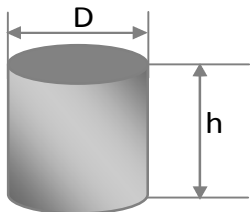
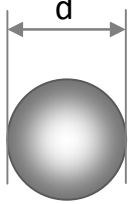


Figure III.12 : Échantillons utilisés pour l'essai.

Tableau III.1 : Caractéristique des échantillons d'essai

CARACTERISTIQUES DES ECHANTILLONS		
Eprouvette plane		Matériau 100Cr6 traité. $h=11\text{mm}$ $D_p=10\text{mm}$ $m_p \approx 8.04\text{Grs}$
Bille		Bille à roulement (Matériau 100Cr6) $d=10\text{mm}$ $m_b \approx 4.49\text{Grs}$

Les échantillons cylindriques ont été obtenus à partir de deux barres laminées de diamètres et longueurs respectifs $\varnothing 30 \times 200$ et $\varnothing 20 \times 160$. La barre d'acier 100Cr6 est découpée sous la forme et les dimensions voulues à l'aide d'une scie mécanique, puis elles ont été usinées sur un tour parallèle, pour le dressage des faces et la mise en longueur des

échantillons (figure III.13). Les échantillons sont découpés et usinés au niveau de notre département.



Figure III.13 : Epreuve d'essai.

III.2.2.2 Préparation des échantillons

La préparation des échantillons est faite, au niveau du laboratoire de mécanique *LR3MI* faisant l'étude expérimentale d'un mémoire de Master [55], selon les étapes suivantes :

III.2.2.2.1 Traitements thermiques

Les traitements thermiques réalisés dans notre étude ont pour but de conférer à l'acier une dureté élevée, qui lui assure une bonne résistance à l'usure et une meilleure stabilité dimensionnelle, comme cela est une caractéristique des roulements en acier 100Cr6.

Afin d'augmenter la dureté des matériaux, on a appliqué une trempe dans un four de modèle Barnstead/Thermolyne Benchtop Muffle Furnaces, Type 48000, Thermo Scientific. C'est un four à moufle compacts de table de fonctions avancées de contrôle électronique. L'isolant en céramique offre efficacité énergétique maximale. La température maximale est de 1200°C. Il offre une protection de surchauffe et affichage numérique, ou de l'économie numérique de contrôle avec la protection de rupture du capteur seulement, de dimensions : 34W x 49H x 49.5D cm³.



Figure III.14 : Vues de face et de profil du four électrique utilisé



Figure III.15: Vue montrant l'enlèvement des pièces du four pour immersion dans un bain d'huile.

Le cycle de la trempe est comme suit :

- Chauffage lent jusqu'à 850°C , correspondant à la phase d'austénisation. On a choisi les températures de trempe des échantillons à partir du diagramme d'équilibre Fe-C. On a chauffé chaque type d'échantillon à une température supérieure à ces points de transformation critiques. Concernant l'acier à roulement 100Cr6, dans la plupart des cas, on a choisi une température de trempe de 850°C .
- Maintien en chauffe à cette température, pendant 30 minutes. Cette phase est utile, pour permettre une austénisation complète. La durée de maintien dépend du volume de la pièce, l'expérience montre qu'une minute est nécessaire pour chaque millimètre d'épaisseur de la pièce.

- Refroidissement rapide à l'eau (pour le lot 2) et à l'huile (pour le lot 3).

Le processus opératoire du revenu est le suivant

- Chauffage vers 200°C.
- Maintien en température.
- Refroidissement lent (à l'air libre).



Figure III.16 : Vue générale des pièces en acier 100Cr6 après revenu.

III.2.2.2.2 L'enrobage

L'enrobage des pièces s'est fait à froid (figure III.17), par le biais d'une résine à 2 composants (poudre et sirop) auto-polymérisante (résine Mecaprex KM-T, type acrylique). Avant la coulée de la résine. Une fois l'enrobage terminé, la phase de polissage sur une polisseuse monoplateau (figure III.18) peut alors commencé

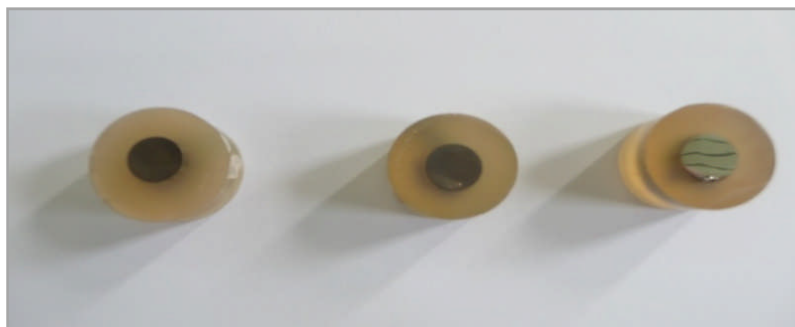


Figure III.17: Vue globale des éprouvettes enrobées.

III.2.2.2.3 Le polissage

Le polissage dans notre cas est obtenu manuellement, il vise à rendre les surfaces lisses et polies comme un miroir, pour faciliter la réflexion des faisceaux lumineux lors de la microscopie. Il consiste à abraser la surface sous une charge constante, à l'aide de papiers abrasifs revêtus de carbure de silicium (SiC) à indice de granulation progressif jusqu'au papier de finition. Ces papiers abrasifs sont montés sur des tourets de polissage dont la vitesse est de 300 tr/min, équipés d'un système d'arrosage à l'eau courante, pour éviter l'échauffement des échantillons.



Figure III.18: Polisseuse monoplateau utilisée lors de la préparation des éprouvettes.

La diminution de la taille des grains d'abrasif d'un papier à l'autre permet d'affiner progressivement l'état de surface et de diminuer la rugosité moyenne, compte tenu de la différence de dureté existant entre le carbure et la matrice métallique, la surface à polir se couvre de rayures de plus en plus fines.



Figure III.19 : Echantillons trempés polis.

III.2.2.2.4 L'attaque chimique

Le but de l'attaque chimique est de révéler la microstructure entière, afin de mettre en évidence les différentes phases constituant notre alliage, caractérisé par les grains et les joints de grains. On a utilisé un réactif spécifique à notre éprouvette, qui n'est autre que du Nital à 4%, composé de 0,96% d'alcool et de 0,04 % d'acide nitrique (HNO_3). Le temps d'application du réactif chimique, doit être très court, afin d'éviter la détérioration de la surface à observer.

III.2.2.2.5 Observation microscopique

L'observation microscopique des échantillons est effectuée au niveau du département métallurgie par un microscope optique de marque LIECA DM.LM (Figure III.20).



Figure III.20: Vue du microscope optique utilisé.

Après traitement thermique on a obtenue les résultats suivants :

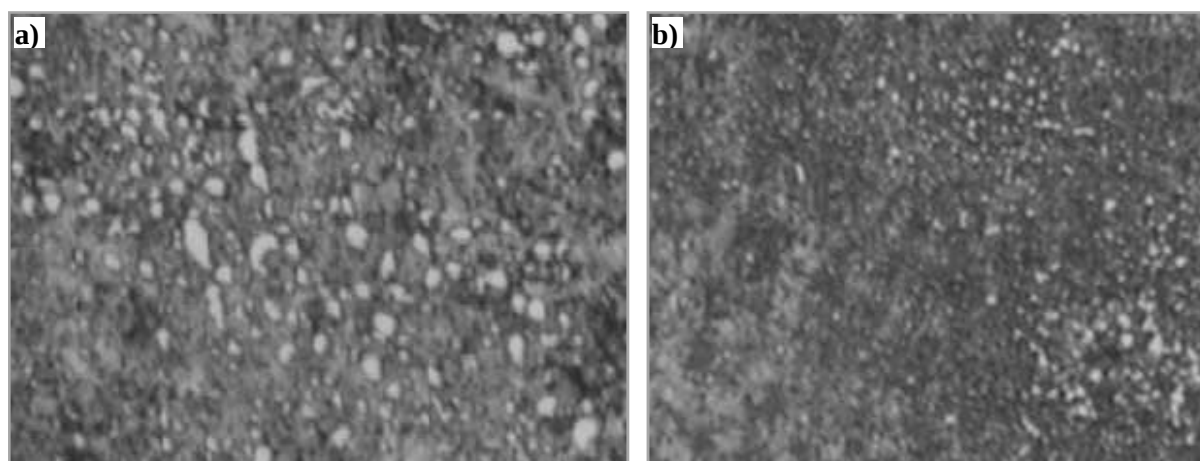


Figure III.21 : Microstructure de l'acier 100Cr6 :

a) Pour lot 2 ; b) Pour lot 3, après traitement thermique (x1200)

La mesure de la dureté nous donne les valeurs suivantes :

Tableau III.2 : Les résultats de la microdureté Vickers et leurs conversions

Lot 2		Lot 3	
HV10	HB	HV10	HB
780,66	63,3	766,8	62,6

Le tableau suivant donne les résultats de l'analyse chimique du matériau 100Cr6

Tableau III.3 : Compositions chimiques de d'acier utilisé

C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	V	Cu
1.082	0.252	0.35	< 0.000	< 0.000	0.077	1.382	0.017	0.005	0.150

III.2.3 Gamme de chargement et conditions d'essai

Nous cherchons à reproduire un niveau de chargement représentatif de la situation industrielle avec une géométrie approchée, tenant compte des dimensions du banc.

L'essai se fait sous une charge constante de 650N, le nombre de cycles varie entre 250000 et 1000000 cycles et avec un débattement constant. L'essai se fait sous la température ambiante (air de laboratoire) une fois à sec et une fois lubrifié, la fréquence est maintenue à 34.9 Hz pour tous les essais après la détermination des fréquences propres du système à l'aide de l'analyseur de vibrations et en le confirmant par le logiciel de CAO SolideWorks (**cf III.3**)

L'analyseur de vibrations accompagne à chaque fois l'essai de fretting pour contrôler la stabilité du banc.

III.2.4 Observation microscopique après essai

Pour mesurer et photographier la micrographie des traces d'usure par fretting, nous avons utilisé un microscope optique (Motic) équipé d'une caméra. L'acquisition des données se fait à l'aide d'un logiciel Motic Images 2000 (figure III.22). Ce dernier permet de mesurer les diamètres de la trace sur la surface des éprouvettes planes ainsi que sur les billes. Les agrandissements possibles sont: X4, X10, X40, X100.

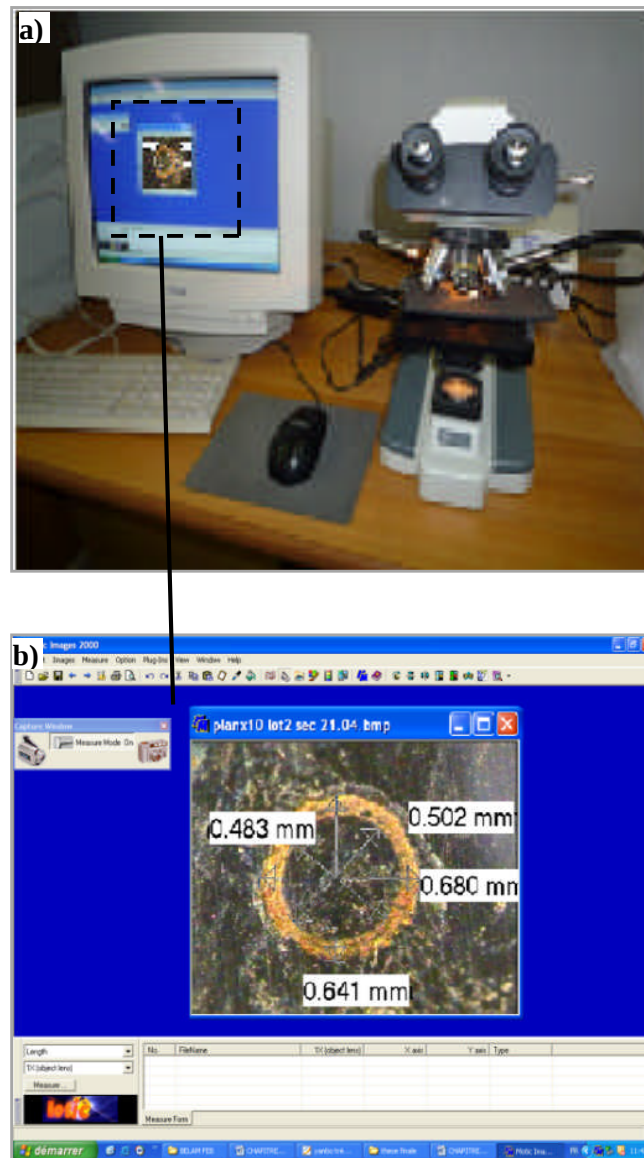


Figure III.22: Microscope optique utilisé :

a) Vue d'ensemble du microscope utilisé, b) Copie d'écran d'une phase de mesure.

On a utilisé l'agrandissement (X4) pour avoir une vue globale sur la trace de fretting laissée soit sur la bille ou sur le plan et la dégradation sur toute la surface (figure III.23.a), l'agrandissement (X10) pour mieux voir la forme de la trace de fretting et de prendre les mesure des dimensions de cette dernière(figure III.23.b) et l'agrandissement (X40) pour suivre l'état de la bordure (la corrosion) en cas d'un essai à sec ou avec lubrification(figure III.23.c).

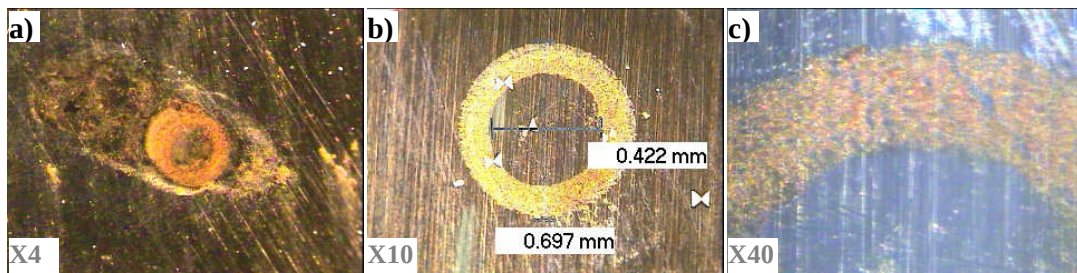


Figure III.23 : Micrographie des traces de fretting :

a) Localisation de la trace, b) Mesure des diamètres et, c) Etat de bordure.

La détermination des relevés profilométriques bidimensionnels et tridimensionnels des traces d'usure dans le laboratoire de recherche au niveau de INSA de Strasbourg , s'est faite sur un interféromètre optique 3D (Annexe B), qui réalise des mesures de topographie des surfaces en contact (figure III.24).

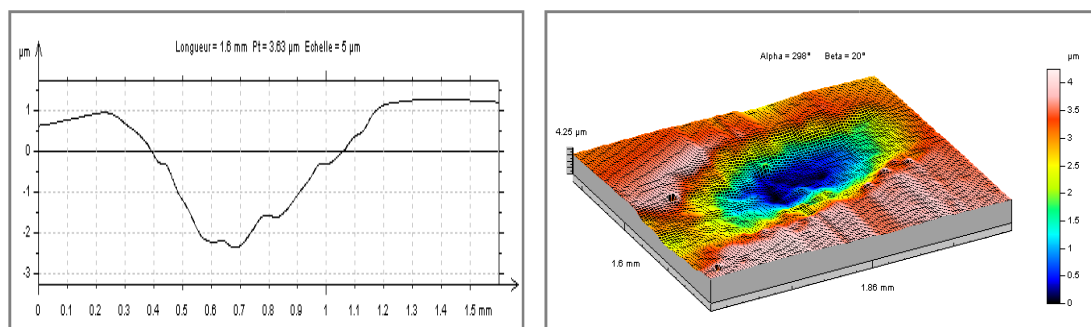


Figure III.24 : Relevés 2D et 3D d'une trace de fretting.

III.2.5 Pesage des éprouvettes

Pour la détermination de la perte de la matière on a utilisé pour la pesée des éprouvettes (la bille et l'échantillon cylindrique) une balance (Denver INSTRUMENT) (figure III.25) où la mesure peut atteindre 2000gr avec une précision égale à 0.01gr. Les mesures sont en Gramme et en Kilogramme.

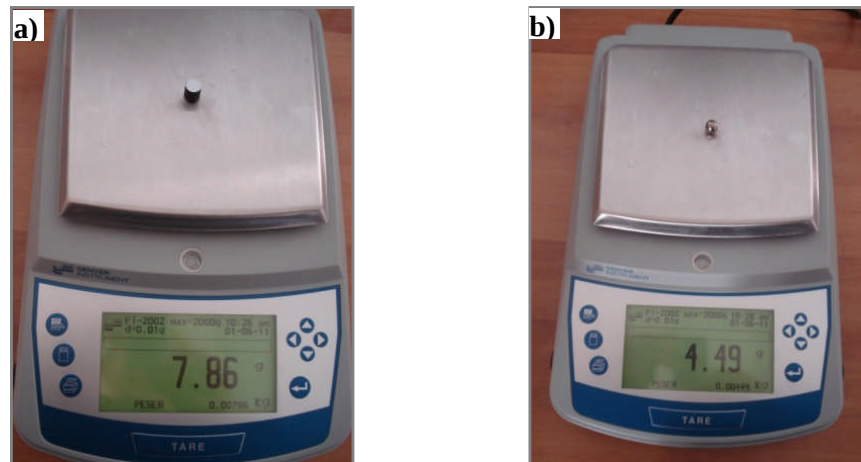


Figure III.25 : Pesage des éprouvettes.
a) Pesage de l'échantillon plan, b) Pesage de la bille.

A noter que la pesée des éprouvettes en fin d'essai, que ce soit la bille ou le plan n'a révélé aucune perte de matière, cela est peut être due à la précision assez limitée de la balance utilisée, car n'ayant pas pût déceler la très faible perte de poids de l'échantillon cylindrique.

III.3 DETERMINATION DES FREQUENCES PROPRES DU SYSTEME

L'étude de la stabilité du système par l'analyse vibratoire passe nécessairement par la détermination des fréquences propres et ceci afin d'éviter les fréquences de résonnance.

III.3.1 A l'aide de l'analyseur de vibration

Pour déterminer les fréquences propres du banc de simulation de fretting on utilise le marteau de choc, l'application est répétée trois fois pour avoir des résultats relativement fiable et proche de la réalité industrielle.

La (figure III.26) montre les fréquences propres obtenues par l'analyseur de vibration et la cohérence entre les trois essais.

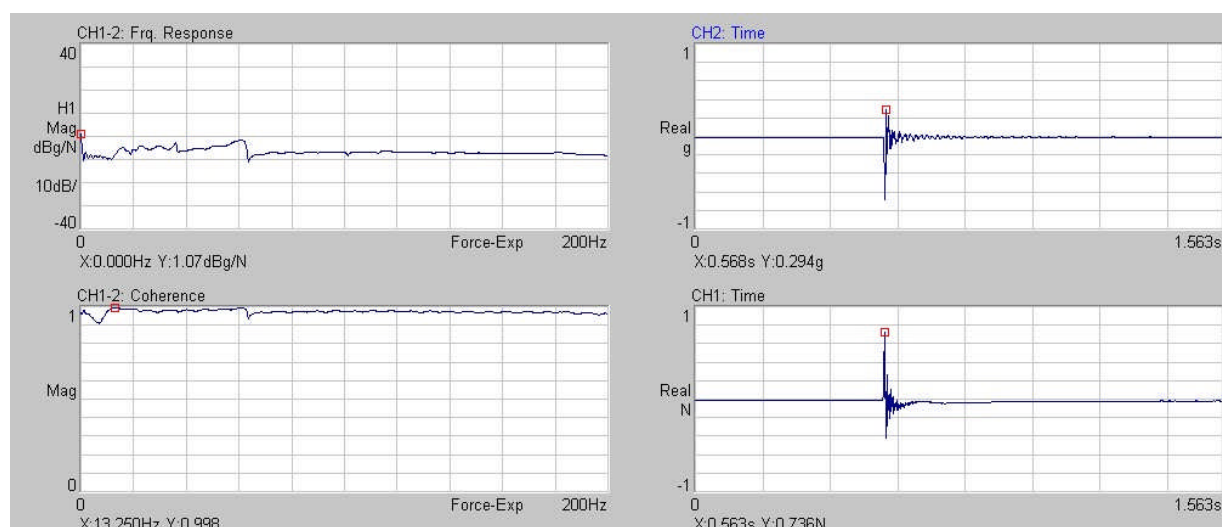


Figure III.26 : Fréquences propres obtenues et la cohérence présentées par des spectres.

Les résultats ont aussi présentés sous forme d'une liste (figure III.27)

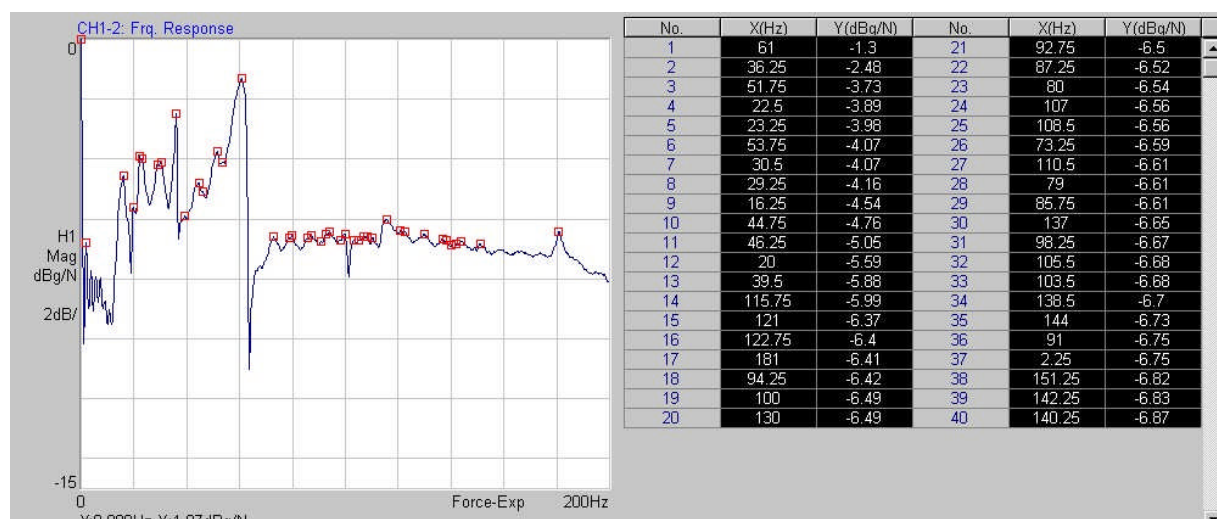


Figure III.27 : Fréquences propres obtenues présentées dans une liste.

III.3.2 A l'aide du logiciel SolidWorks

On a procédé à une simulation numérique par le logiciel de CAO SolidWorks afin de confirmer les résultats obtenus par l'analyseur de vibrations pour déterminer les fréquences propres du banc de simulation de fretting. Ceci en respectant les caractéristiques de chaque élément de la machine (dimensions, caractéristiques des différents matériaux, types de liaisons entre les éléments...etc).

Les résultats obtenus par SolidWorks montrent que seul trois principaux types de vibrations (figure III.28) peuvent influencer les essais de fretting et peuvent provoquer des déplacements indésirables (transversal et longitudinal) peuvent perturber le mouvement de la machine ce qui introduit dans la forme et les dimensions de la trace de fretting.

Les autres résultats de la simulation numérique sont en (Annexe c).

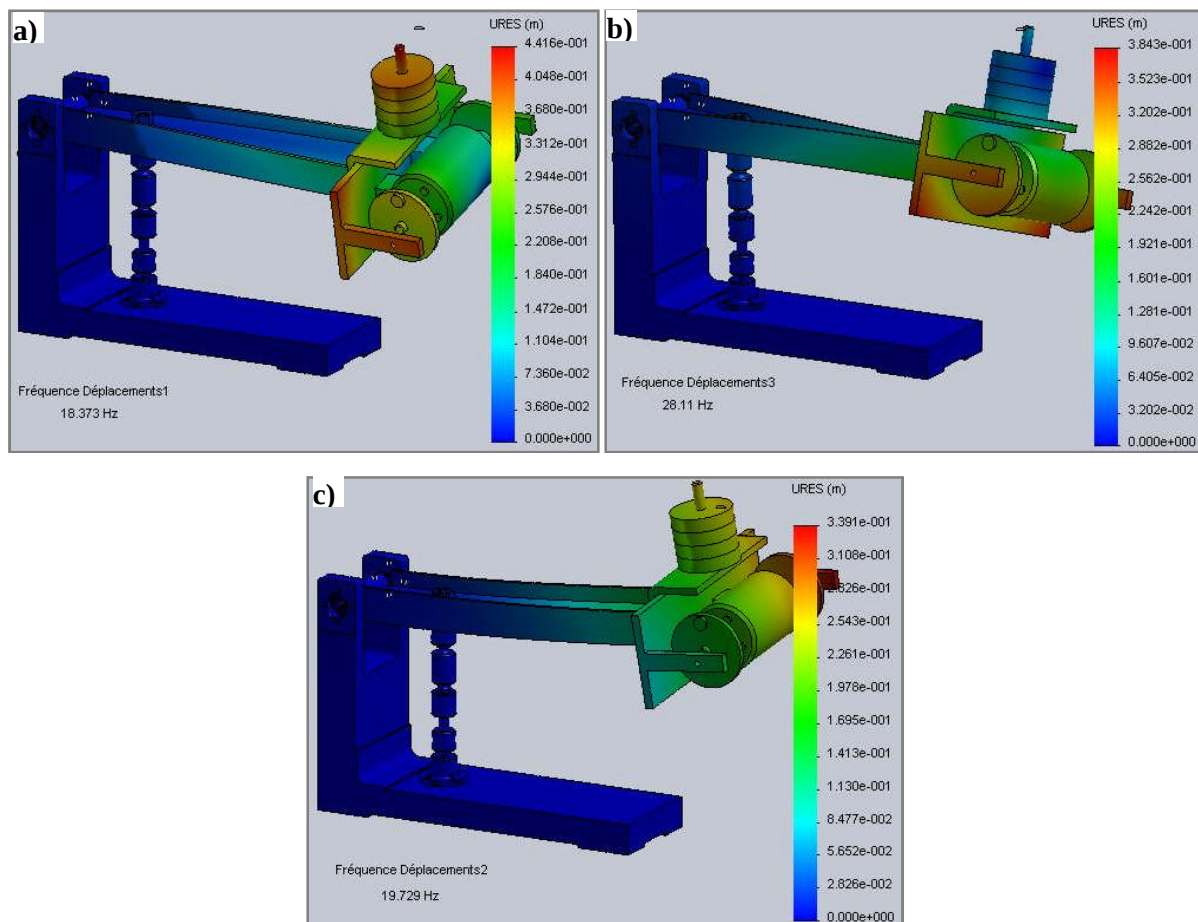


Figure III.28 : Types de vibrations probables :

a), b) Vibrations provoquent des déplacements transversaux et, c), Vibrations provoquent un déplacement longitudinal

D'après les résultats des fréquences propres obtenus par l'analyse vibratoire et après confirmation par la simulation numérique (par SolidWorks), on a choisi de travailler avec une fréquence de rotation loin de ces fréquences, et répondant aux conditions de l'essai et à la capacité de la machine et qui est égale à $f = 34.9\text{Hz}$. Ceci pour éviter les fréquences de résonance qui provoquera des martellements et même le décollement du banc de simulation de fretting.

IV.1 INTRODUCTION

Pour vérifier la compatibilité de l'essai de fretting dans notre banc de simulation on a choisi les procédures suivantes:

1. Une comparaison des diamètres des traces d'usure par fretting entre plusieurs essais avec le même nombre de cycle pour vérifier la reproductibilité des résultats.
2. Une comparaison des traces de fretting obtenues dans notre banc avec des résultats bibliographiques.
3. Un contrôle de la stabilité du banc par un analyseur de vibrations.

IV.2 EFFET DU NOMBRE DE CYCLE SUR LES DIMENSIONS DES TRACES D'USURE PAR FRETTING

Les essais de fretting sont réalisés dans les mêmes conditions (même fréquence, même charges et à l'aire ambient) en variant le nombre de cycles entre 250000 et 10^6 cycles.

En partant de la comparaison des résultats on a constaté que les diamètres des traces de fretting varient dans un intervalle court de 0,595 mm à 0,645 mm pour un nombre de cycles égale à 250000 cycles (figure IV.1.a); de 0,668 mm à 0,684 mm pour un nombre de cycle égale à 500000 (figure IV.2.b); et entre 0,697 mm et 0,738 mm pour 1000000 de cycles (figure IV.3.c).

Tableau IV.1 : Variation des diamètres des traces de fretting avec le nombre de cycles

Nombre de cycles	Diamètre (mm)						Diamètre moyen (mm)	
	$\varnothing_{\text{ext}}$	$\varnothing_{\text{int}}$	$\varnothing_{\text{ext}}$	$\varnothing_{\text{int}}$	$\varnothing_{\text{ext}}$	$\varnothing_{\text{int}}$	$\varnothing_{\text{moy.ext}}$	$\varnothing_{\text{moy.int}}$
250000	0.596	0.448	0,623	0,469	0,641	0.465	0,620	0,461
500000	0,668	0,422	0,674	0.442	0.684	0.410	0,675	0,424
1000000	0,697	0,422	0.701	0,427	0,738	0,376	0,712	0,408

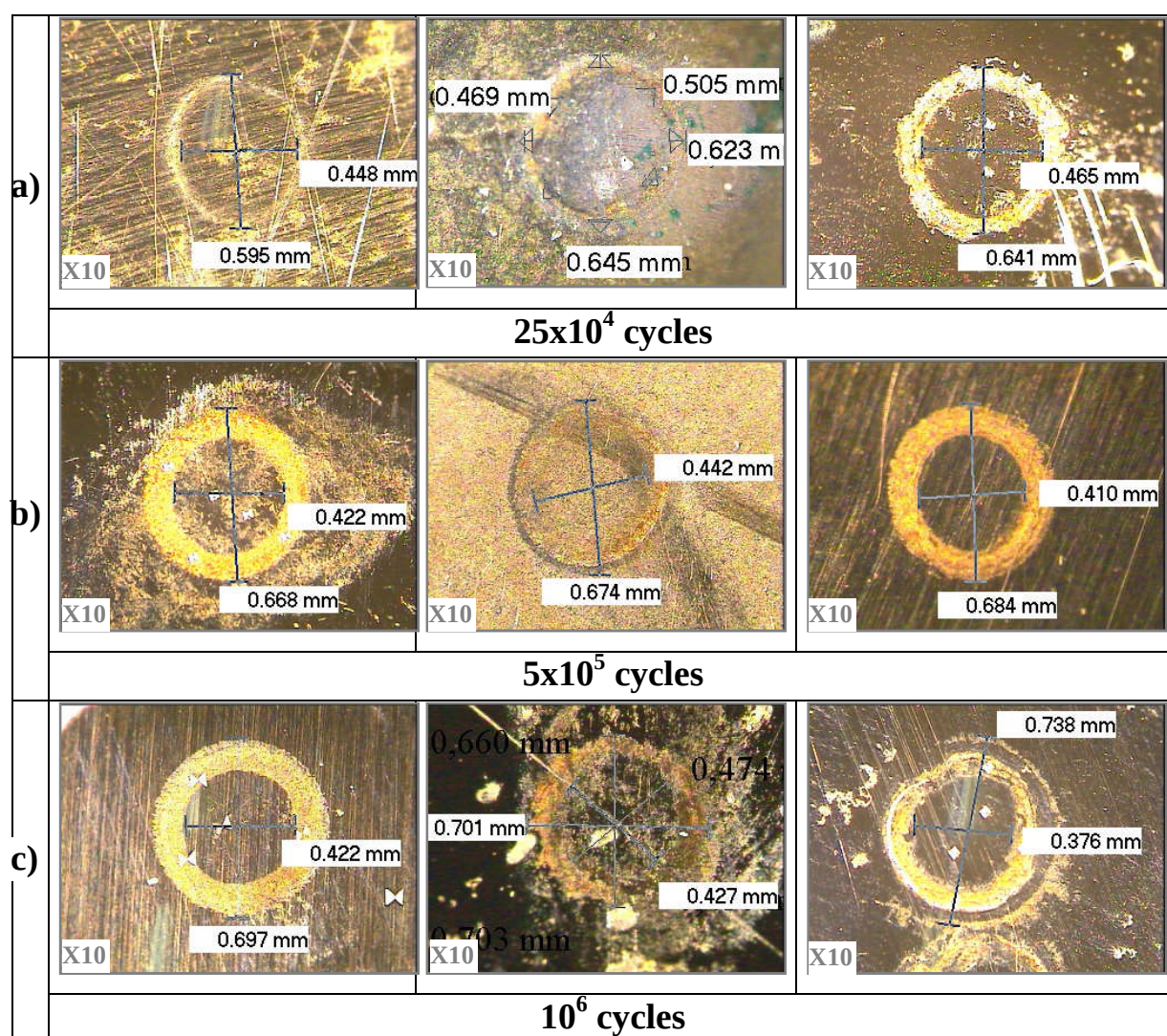


Figure IV.1 : Exemple de traces de fretting sur le plan obtenues dans les mêmes conditions :

a) Pour 250000 cycles ; b) Pour 500000 cycles ; et c) Pour 1000000 cycles.

IV.3 COMPARAISON DES TRACES D'USURE AVEC DES RESULTATS BIBLIOGRAPHIQUES

IV.3.1 Description des traces de fretting (allure)

L'aire de contact se présente sous forme de deux zones distinctes, illustrés par deux cercles concentriques (voir figure VI.2), appelées respectivement zone de collage ou d'adhérence (stick zone) de rayon c , et zone de glissement ou microglissement (slip zone) de rayon a . Par conséquent, même en l'absence d'une force tangentielle appliquée ou imposée au contact [56], [57], comme le cas de notre configuration expérimentale, il existe des

microglissements relatifs sur l'aire de contact qui induisent une contrainte de cisaillement à l'interface, donc un frottement de microglissement.

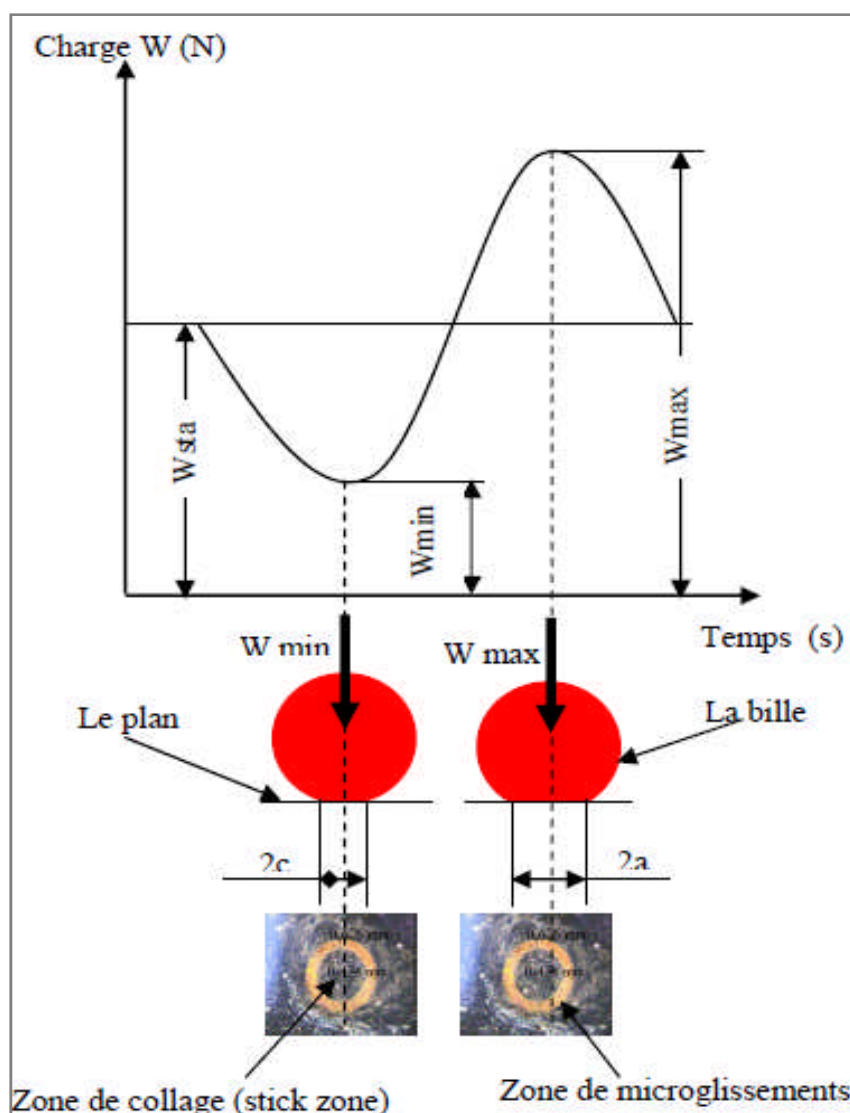
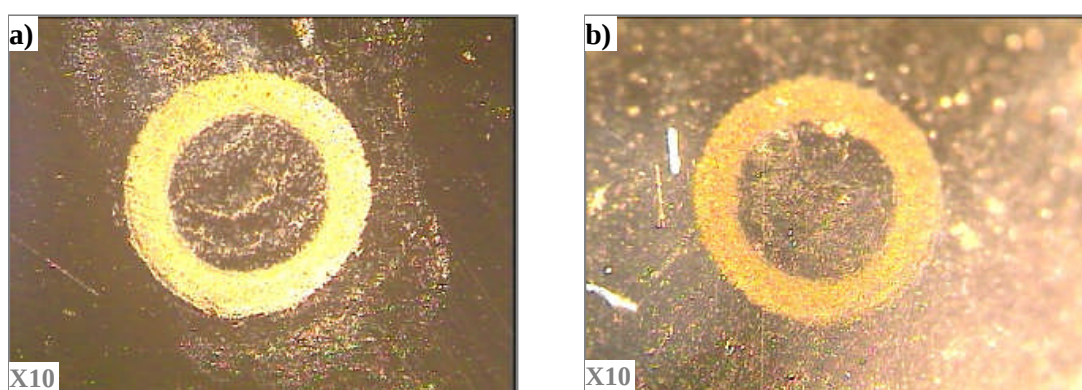


Figure VI.2 : Formation de la zone de contact en fonction de la charge dynamique.

Les observations microscopiques des traces laissées par les billes sur les plans révèlent l'existence de deux cercles concentriques (correspondant aux traces de Hertz calculées respectivement pour les charges normales maximales et minimales[58]), sur lesquelles on constate (figures VI.3.a) que la zone de collage (le plateau) paraît avoir un aspect brillant (poli), alors que la bande annulaire (zone des microglissements) semble être érodée et dégradée accompagnée d'un dépôt de poudre rouge, caractéristique de l'usure induite par fretting, nous sommes dans les conditions de glissement partiel [47]. Les mêmes constatations, mais à un degré moindre ont été observées sur les billes, comme cela est montré (figure VI.3.b).



Figures VI.3: Vue au microscope optique d'une trace d'usure de fretting :
a) Allure de la trace d'usure sur le plan (x10), b) Trace laissée sur la bille.

La constatation de l'existence de trois zones sur l'éprouvette a été réaffirmée par la mesure de la dureté dans celles-ci (figure VI.4) où on a eu trois différentes valeurs pour les zones intérieure, extérieure ainsi que celle de l'anneau. La valeur de la dureté mesurée sur l'anneau est très grande par rapport aux autres.

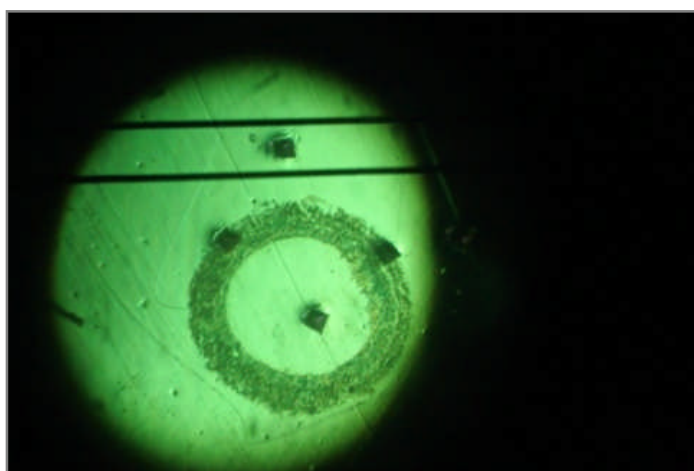


Figure IV.4: Mesure de la dureté.

A noter que la pesée des éprouvettes en fin d'essai, que ce soit la bille ou le plan n'a révélé aucune perte de matière, cela est peut être due à la précision assez limitée de la balance utilisée, car n'ayant pas pût déceler la très faible perte de poids de l'échantillon cylindrique.

IV.3.2 Comparaison des traces de fretting

En comparant les traces de fretting obtenues des essais réalisés dans notre banc (figure IV.5) et d'autres différentes traces en acier [59][60][61][62] (figure VI.6) et d'autres matériaux [47][17][63] (figure VI.7) on a trouvé qu'ont la même morphologie.

Le fretting électrique [64] représente la même morphologie (figure VI.8).

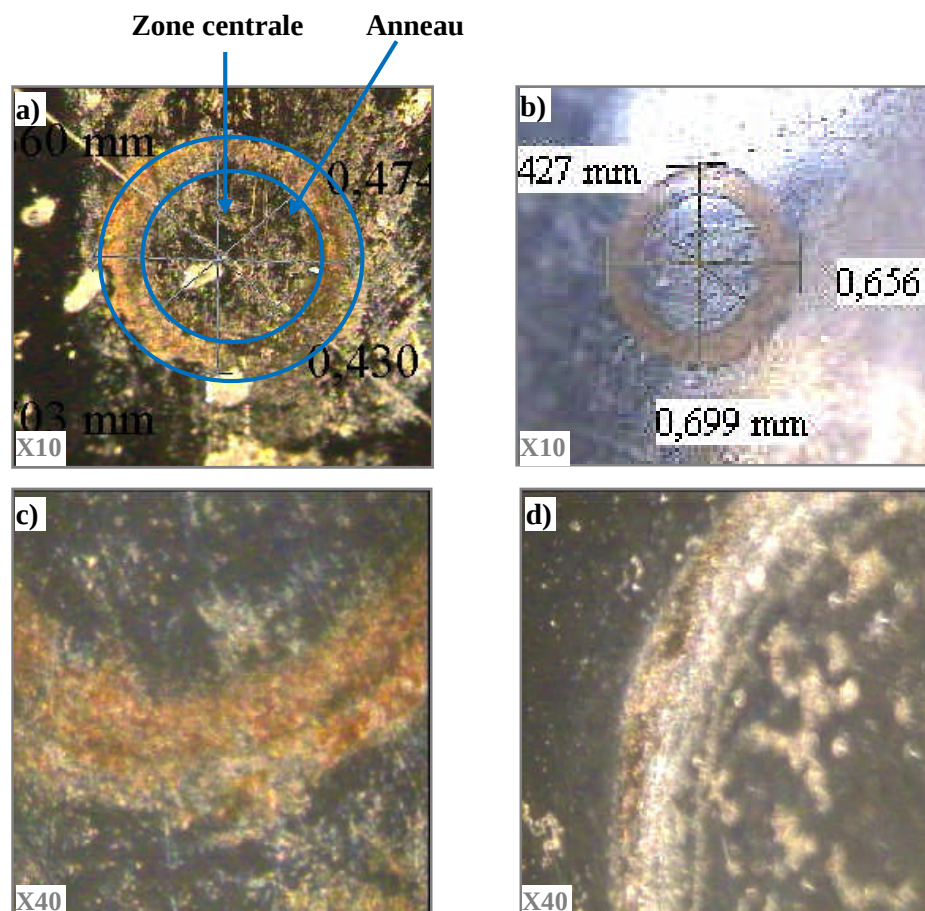


Figure IV.5: Morphologie des traces de fretting (contact 100Cr6/100Cr6, $F=650\text{N}$, $f=34.9\text{Hz}$ pour 10^6 cycles): a) Trace de fretting observée sur l'éprouvette plane, b) Trace de fretting observée sur la bille ; c) Bordure d'une trace de fretting sans graisse ; d) Bordure d'une trace de fretting avec lubrification.

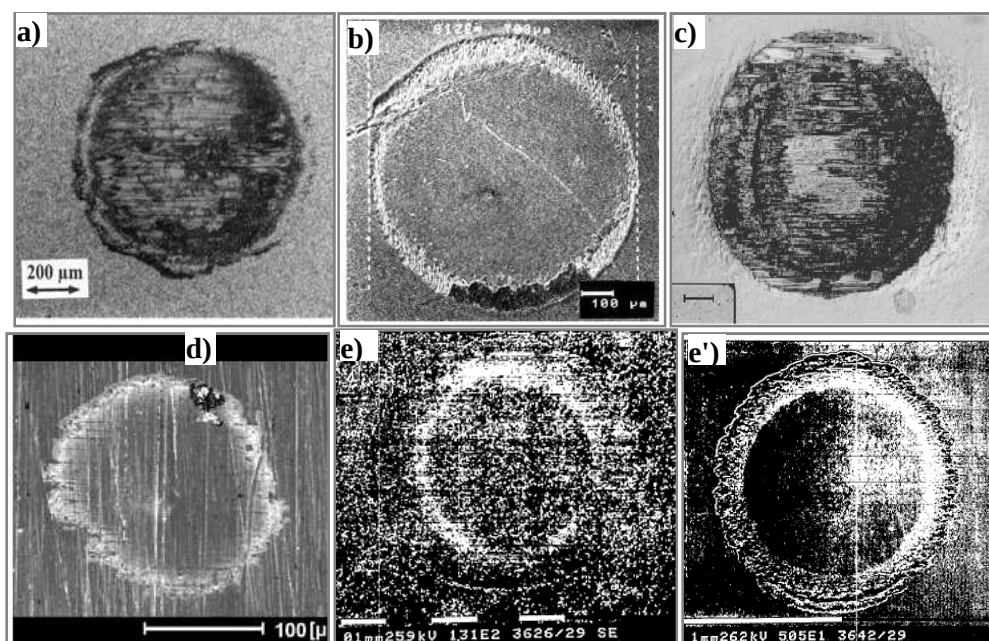


Figure IV.6: Comparaison de la morphologie des traces de fretting pour le cas des aciers :

- a) Pour le cas de l'acier 100Cr6 [59]; b) Pour le cas de l'acier 1045 ($F_n=500\text{N}$, fréquence=5Hz, $N=10000$ cycles, $D=5\text{ }\mu\text{m}$) [60] c) Pour le cas de l'acier revêtu (Fe-Mn-C) ($N=5000$ cycles; $F_n=300\text{ N}$ et $D=30\text{ }\mu\text{m}$) [61], d) Pour le cas d'un acier S355 ($p=20\text{N}$, $D=50\text{ }\mu\text{m}$) [43], e) Pour le cas d'un acier faiblement allié sur le plan ($p=1250\text{N}$, $Q=460\text{N}$, $N=10^6$ cycles), et e') Sur la bille [62].

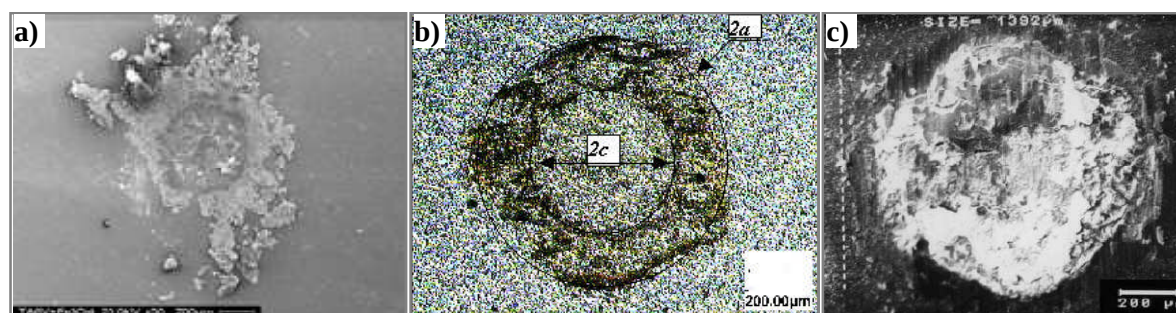


Figure IV.7: Comparaison de la morphologie des traces de fretting pour d'autres matériaux :

- a) Pour le cas du CuNiSi face à un pion grenailé ($P=6\text{ N}$, $\delta c = \pm 50\text{ }\mu\text{m}$) [47]
b) sur le 2618A-AS [17] ; c) Force normale 300 N, amplitude 60 μm , frequency 5 Hz, et 10000 cycles: TiN [63].

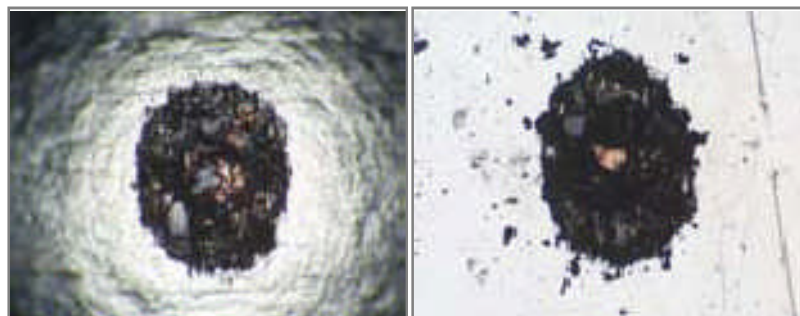


Figure IV.8 : Comparaison de la morphologie des traces de fretting dans un contact électrique après 4000 cycles [64] : a) dans la bille, b) dans le plan.

L'observation microscopique en 3D été faite -malheureusement- sur une éprouvette non traitée et dans le banc de simulation de fretting avant modification (trace de fretting non circulaire) ; malgré ça on a obtenu une morphologie proche de la morphologie définie comme on peut le constater sur la (Figure IV.9), on remarque que le plan a subit une indentation importante, caractérisée par une déformation plastique conséquente.

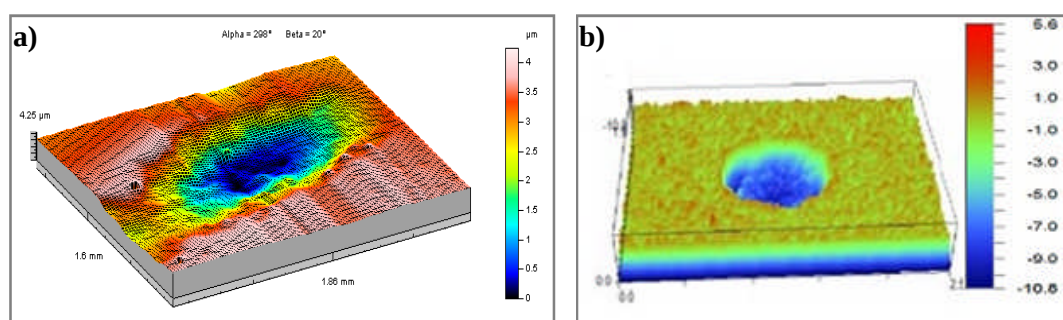


Figure IV.9 : Comparaison des topographies de la surface: a) topographie 3D pour une éprouvette d'un essai réalisé dans notre banc de simulation de fretting ; b) topographie 3D du disque (CuNiSi face à un pion grenailé, $P = 6 \text{ N}$, $\delta_c = \pm 50 \mu\text{m}$) [47]

IV.3.3 Description de profil d'usure

Le même cas pour le profil d'usure pour la même éprouvette où il représente deux zones : centrale représente le volume usé, et un refoulement de matière sur la bordure de la trace de fretting (Figure IV.10).

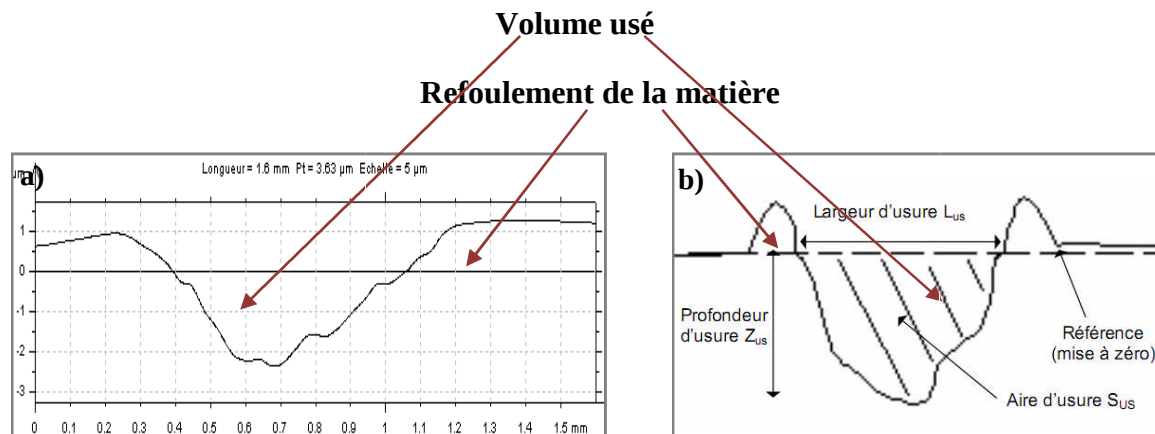


Figure IV.10: Profil d'usure: a) profil d'usure d'une l'éprouvette plane; b) Aspect général d'un profil d'usure.

IV.3.4 Comparaison de profil d'usure

La comparaison de profil d'usure par fretting obtenu dans notre banc et d'autres profils pour le cas d'un acier [47] et un autre matériau [47], nous montre qu'ont la même allure (figure VI.11).

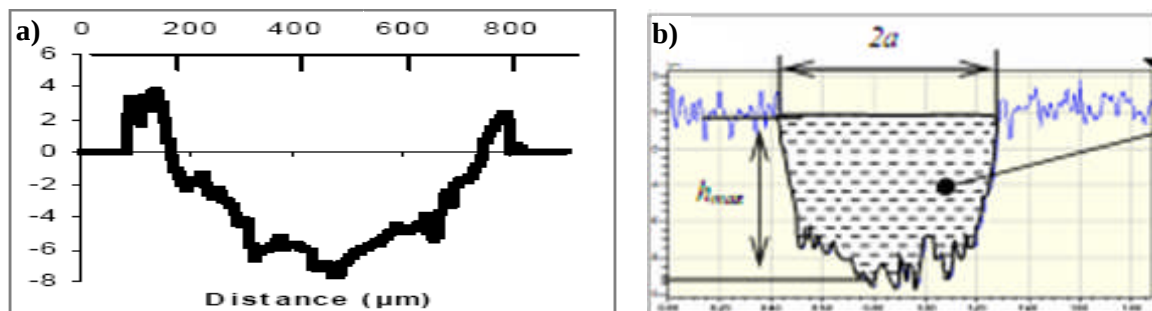


Figure IV.11 : Comparaison des profils d'usure: a) Profil d'usure pour un acier X30Cr13 non traité ; b) profil d'usure (CuNiSi P = 6 N, $\delta c = \pm 50 \mu\text{m}$) [47].

IV.3.5 Evolution de l'aire de contact

IV.3.5.1 Evolution de l'aire de contact en fonction du nombre de cycles

Lorsque le nombre de cycles de fretting augmente, nous constatons une évolution importante de l'aire de contact. A titre d'exemple, la (Figure IV.8) montre l'évolution du rayon de l'aire de contact (100Cr6/100Cr6) en fonction du nombre de cycles pour les mêmes conditions.

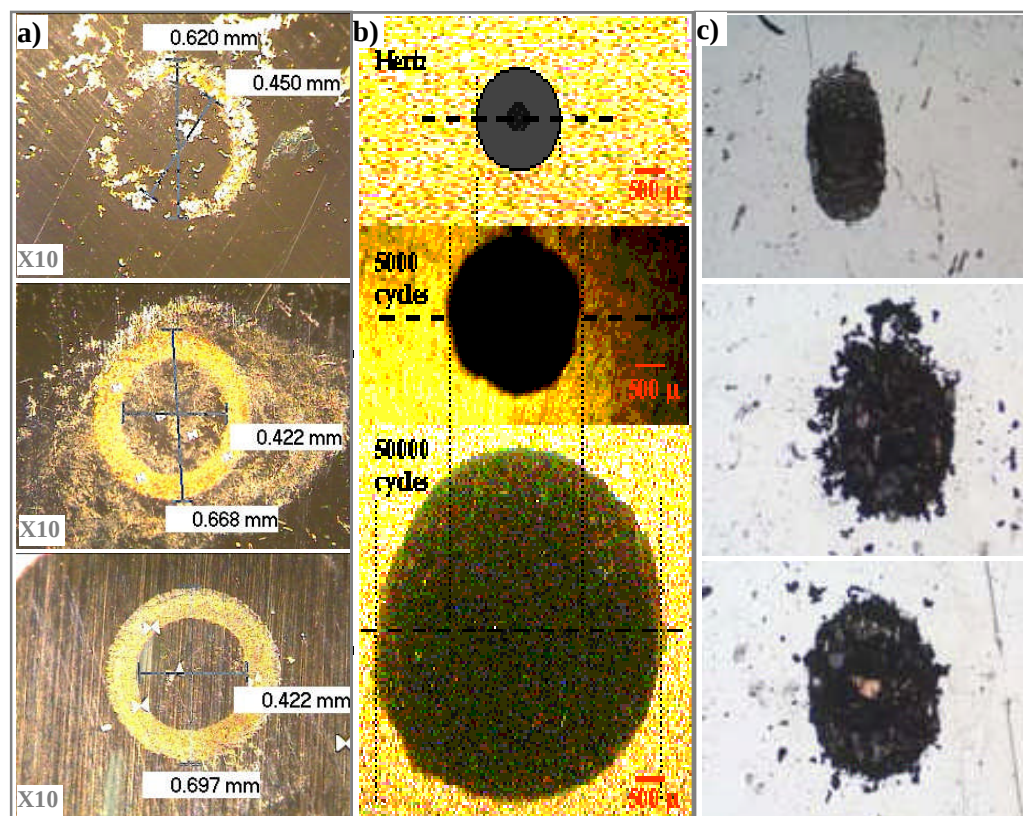


Figure IV.12 : Evolution de l'aire de contact de fretting en fonction du nombre de cycles :
a) acier 100Cr6 (250000, 500000, 10^6 cycles) ; b) 2618A (5000, 50000 cycles) [17] ; c)
contact électrique (30, 4000, 5000 cycles) [64].

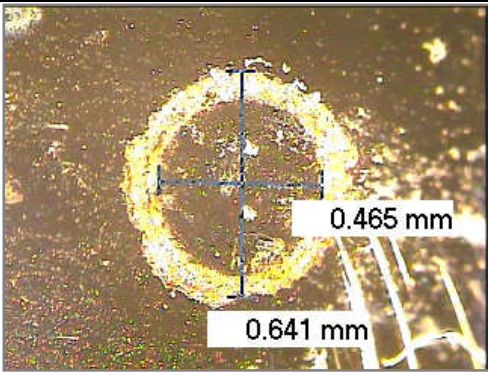
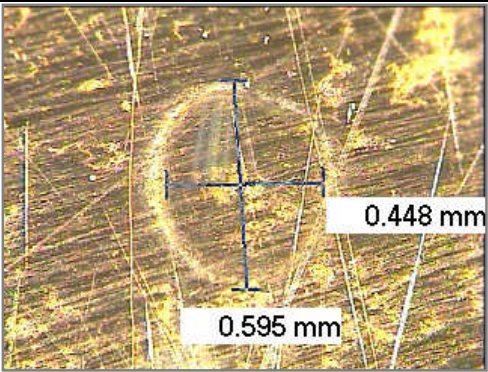
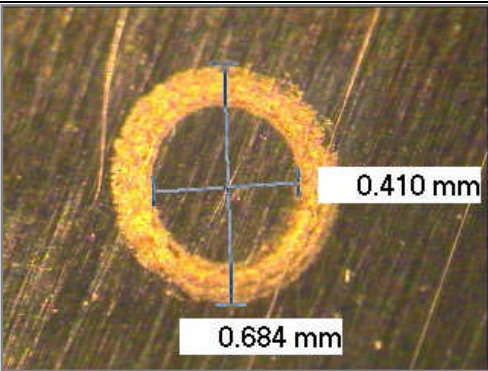
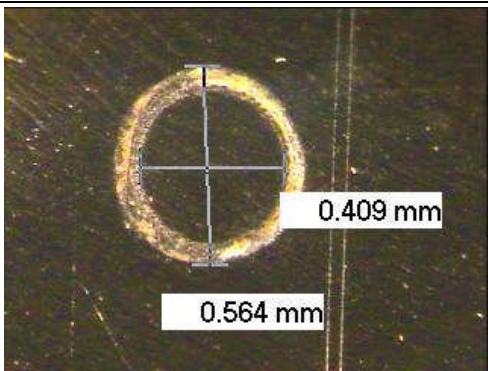
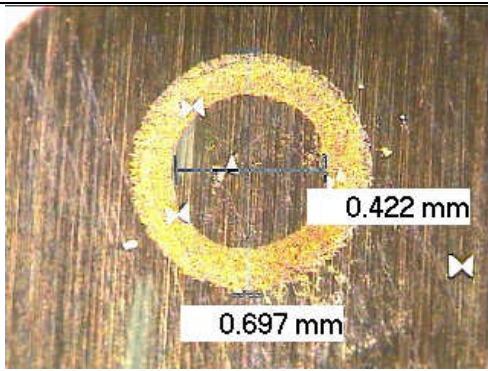
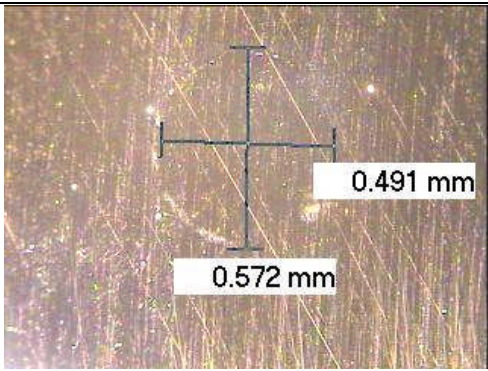
IV.3.5.2 Evolution de l'aire de contact en fonction de la nature de l'interface

L'essai de fretting été fait sous les mêmes conditions cités avant en variant la nature de contact (présence ou absence de la lubrification), et on a suivi la variation des diamètres de la trace de fretting correspondants à chaque nombre de cycles entre 250000 et 10^6 cycles

La trace d'usure par le fretting semble plus affectée en cas d'un contact à sec qu'un contact lubrifié, celui-là est vrai pour les différents nombre de cycles (250.000, 500.000 et 10^6 cycles).

Le tableau suivant (tableau IV.2) présente l'évolution de l'aire de contact en cas de la présence et l'absence de la lubrification.

Tableau IV.2 : Evolution de l'aire de contact en fonction de la nature de l'interface

	Contact sec	Contact lubrifié
250000 cycles		
500000 cycles		
10^6 cycles		

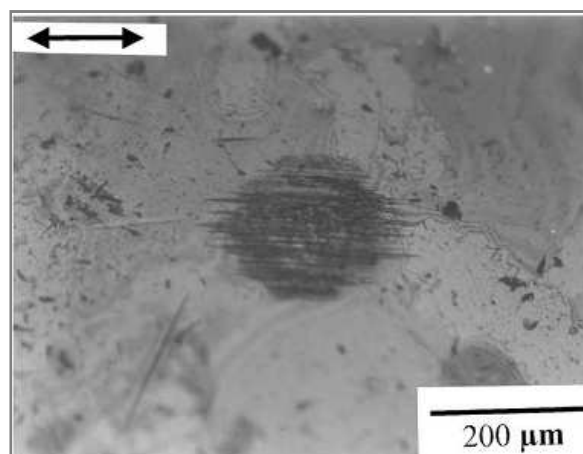


Figure IV.13: Trace d'usure par fretting d'une bille en acier d'un contact lubrifié [65].

IV.4 ANALYSE VIBRATOIRE

IV.4.1 Introduction

A l'heure actuelle, de plus en plus l'industriels se tournent vers l'analyse vibratoire afin d'obtenir une disponibilité accrue de leurs machines : ils contrôlent l'état réel de leurs équipements (machines tournantes) afin d'éviter des arrêts non planifiés dus aux pannes.

L'analyse vibratoire est un outil puissant de détection de défauts des machines tournantes: elle permet notamment de détecter les défauts se manifestant dans les différents éléments. Il peut s'agir d'un défaut de roulement, balourd, désalignement...

Tout changement dans un spectre représente un défaut ou une perturbation dans le mouvement de la machine et toute perturbation dans le mouvement de la machine apparait sur le spectre.

IV.4.2 Analyse des spectres

Pour vérifier la stabilité du banc de simulation de fretting on a fait une comparaison des spectres dans les différents temps (début, milieu et fin de l'essai) et suivants les différents axes (axe1, axe2 et axe3)

On a étudié le changement dans les spectres au début, au milieu et à la fin de l'essai pour l'axe1 (Figure IV.11), pour l'axe2 (Figure IV.12) et pour le 3^{eme} axe (Figure IV.13)

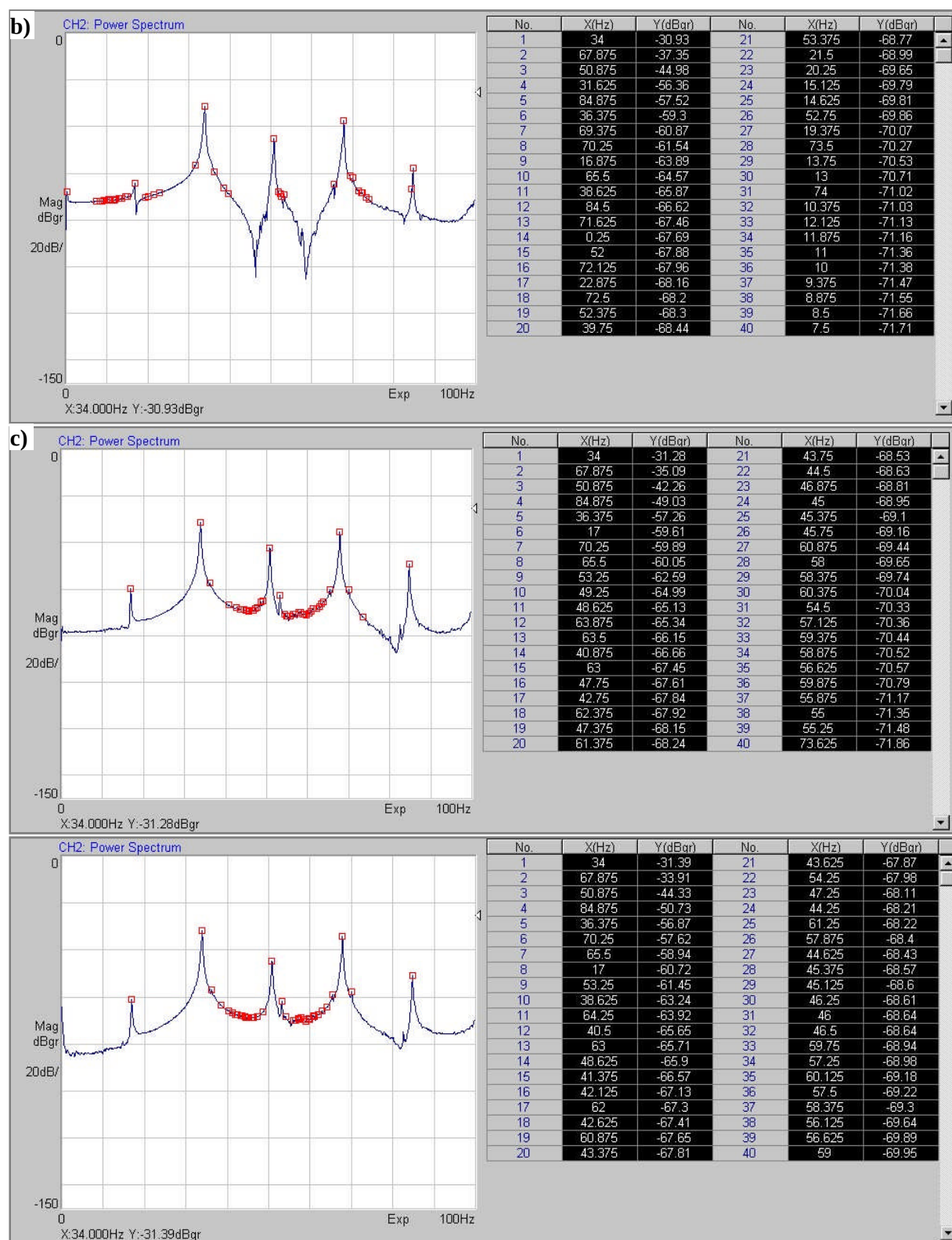


Figure IV.14 : Spectres représentent le début, le milieu et la fin de l'essai pour l'axe1 : a) début, b) au milieu, c) fin, de l'essai.

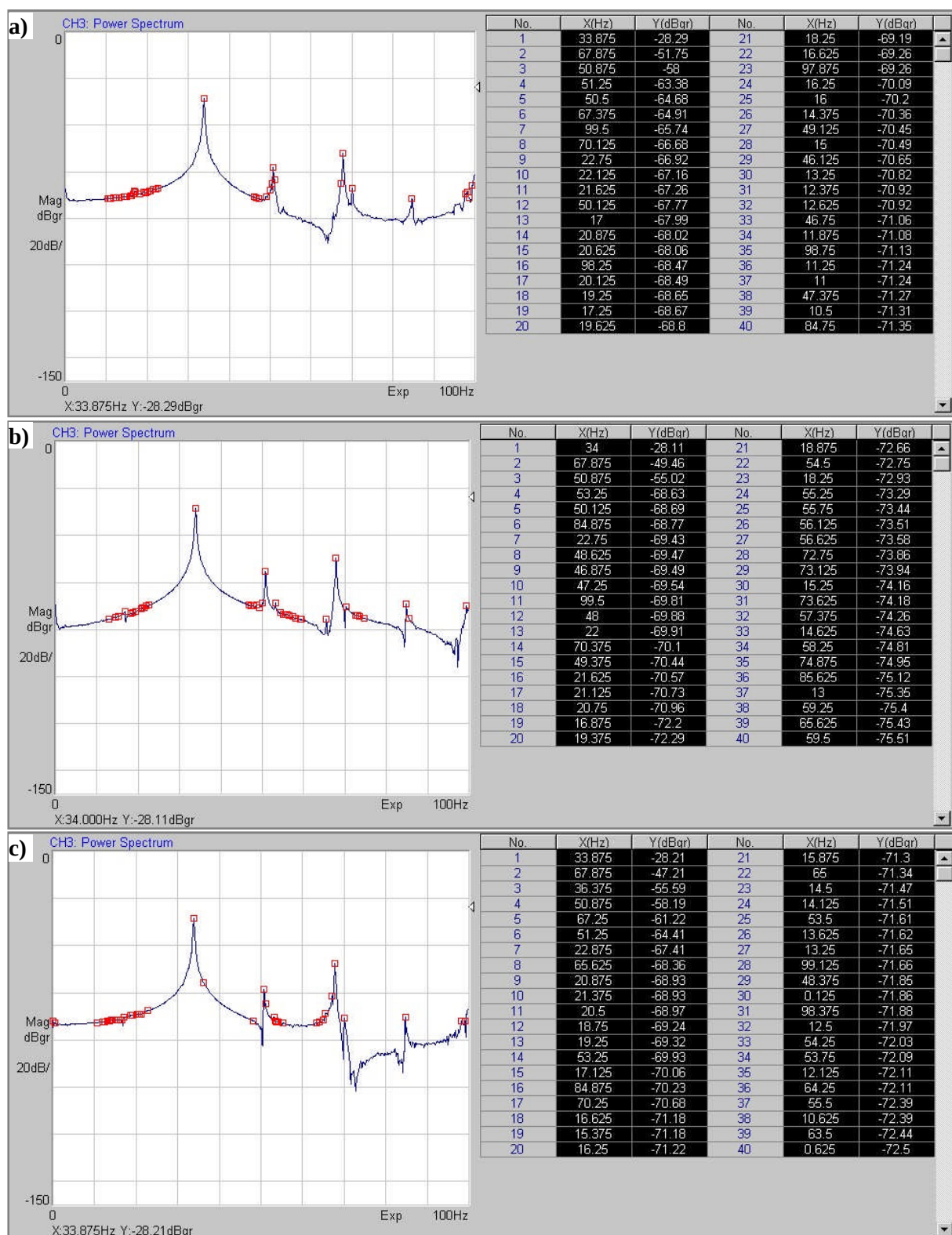


Figure IV.15: Spectres représentant le début le milieu, et à la fin de l'essai pour l'axe2 : a) début, b) milieu, c) fin, de l'essai.

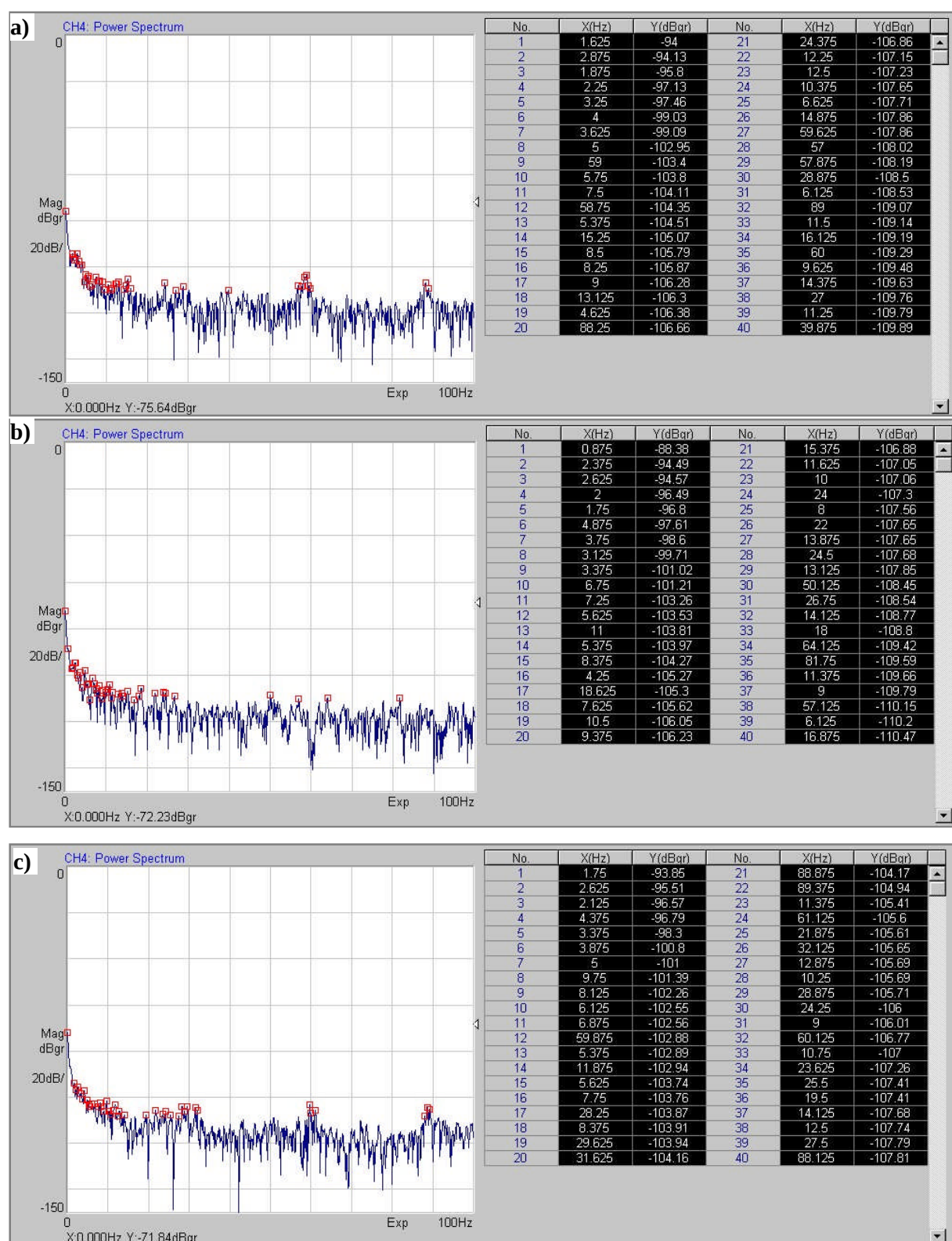


Figure IV.16 : Spectres représentent le début, le milieu et à la fin de l'essai pour l'axe3 : a) début, b) milieu, c) fin, de l'essai.

D'après les résultats de des essais de fretting et l'analyse vibratoire, on a constaté que le banc de simulation de fretting est stable et apte de fonctionner en toute sécurité.

Conclusions

L'analyse de la stabilité du banc de simulation de fretting nous a fait déduire les conclusions suivantes:

- L'étude de l'endommagement par fretting et ses conséquences, est indispensable.
- La modification du banc de simulation de fretting radial nous a permis de confirmer que l'essai de fretting peut se faire en toute sécurité et dans une large gamme.
- L'utilisation de l'acier 100Cr6 traité comme exemple de validation, nous a donné une idée sur le comportement en fretting d'un acier à roulement (le composant le plus sensible dans la machine).
- La variation de nombre de cycles et la présence ou non du lubrifiant nous permet d'analyser les traces de fretting et les comparer avec les résultats d'autres études et d'étudier alors la fiabilité du banc de simulation de fretting, la reproductibilité et par conséquence la confirmation les résultats réalisés dans ce banc.
- L'utilisation d'un analyseur de vibration nous permet de calculer la stabilité du banc de simulation de fretting et d'identifier la meilleure gamme d'utilisation.
- Les résultats de l'étude vibratoire obtenus pour la simulation qui sont proches des résultats obtenus par l'analyseur de vibration nous prouvent qu'on peut utiliser la simulation pour confirmer les résultats réels mais pas les remplacer à cause de l'infinité des données à injecter et la sensibilité de l'étude (une variation très petite des données : dimensions, identification des matériaux... influe sur les résultats)
- Le seul problème qui reste à régler au niveau du banc de simulation de fretting c'est le jeu aux extrémités de la bague d'articulation(le but est d'assurer le retour au même point de contact en cas de coupure de courant et pouvoir arrêter l'essai dans un nombre de cycles X afin d'étudier le contact et puis continuer l'essai pour atteindre le nombre de cycles voulu sans avoir plus d'une trace sur l'échantillon).

Perspectives

Nous avons de bons espoirs que cette étude fasse l'objet de prochains travaux concernant :

- L'étude des différents types de fretting dans le banc de simulation en variant les conditions de l'essai (ajout des forces dans autres directions, lubrification dans la zone de contact, variation de la température...), est probable.
- L'étude des différents types de contacts dans le fretting : contacts plan/plan et cylindre/plan, peut se faire d'adaptant d'autres dispositifs.
- Application des méthodes de quantification du fretting en identifiant tous les facteurs : installation d'un capteur de déplacement pour la mesure de débattement, mesure de rugosité en 3D pour quantifier le volume usé.
- Elargir le domaine de l'étude de fretting en utilisant différents matériaux, des revêtements, des polymères et des composites.
- Elargir le domaine d'utilisation de l'analyseur de vibration en l'enrichant d'autres logiciels.
- Utiliser la simulation par logiciels de CAO plus sophistiqué pour étudier la déformation dans la zone de contact.
- Caractériser la zone endommagée par des essais de dureté et d'indentation dans le plan des coupes transversales.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Eden E.M., Rose W.N.,** Cunnigham F.L., The endurance of metals, Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers 4 (1911), pp. 839 - 974.
- [2] **Tomlinson G.A.,** The rusting of steel surfaces in contact, Proceedings of the royal Society, Series A 115 (1927), pp. 472 - 483.
- [3] **Warlow-Davies E.J.,** Fretting corrosion and fatigue strength: brief results of preliminary experiments, Proc. Inst. Mech. Eng., (1941), pp. 32 – 38.
- [4] **McDowell O. J.,** Fretting corrosion tendencies of several combinations of material, Symposium on fretting corrosion, ASTM STP 144 (1953), p24 – 39.
- [5] **Johnson K.L;** Surface interaction between elastically loaded bodies under tangential forces. (1955). Proc. R. Soc., Ser.A230, 531-548.
- [6] **Waterhouse R.B.,** A historical introduction to fretting fatigue in Standardization of fretting fatigue test methods and equipment., ASTM STP 1159 (1992), pp. 8 - 9.
- [7] **Fouvry S.,** Etude quantitative des dégradations en fretting, Thèse Ecole Centrale Lyon, N° 97- 04 (1997).
- [8] **BEAA** (Bureau d’Enquête sur les Accidents d’Avion), Rapport final concernant l’accident de l’hélicoptère SA 330 Puma HB – XVI, Département fédéral de l’environnement, des transports, de l’énergie et de la communication, n° 1780 (2003), 17 p.
- [9] **M'Evan, E.** Stresses in elastic cylinders in contact along a generatrix. Phil. Mag., (1949), 40, 454-459.
- [10] **Hamilton, G. M.** Explicit equations for the stresses beneath a sliding spherical contact. Proc. Instn. Engrs., (1983), 197C, 53-59.
- [11] **Hills, D. A., & Nowell, D.** Mechanics of fretting fatigue. Solid mechanics and its applications, (1994), 30, 236p.
- [12] **Fridrici V.,** Fretting d’un alliage de titane revêtu et lubrifié : application au contact aube/disque, Thèse Ecole Centrale de Lyon, N° 2002 – 22, (2002).
- [13] **Ganne T.,** Fretting, Proceeding of the Association du titane, Nantes France, 13 -14 Mai (2004), pp. 123 132.
- [14] **Lindley T.C.,** Component Integrity in the Presence of Fretting, 4th Symposium of Fretting Fatigue, 26 - 28 Mai (2004).
- [15] **Han L., Chrysanthou A., O’Sullivan J.M.,** Fretting behaviour of self-piercing riveted aluminium alloy joints under different interfacial conditions, Materials and design, 27 (2006), pp. 200 - 208.

- [16] **Hoeppner D.W.**, Fretting fatigue case studies of engineering components, Tribology International, 39 (2006), pp. 1271 - 1276.
- [17] **Elleuch K.**, Comportement en fretting d'alliages d'aluminium – Effet de l'anodisation, Thèse Ecole Centrale de Lyon, N° 2002 – 06 (2002).
- [18] **Nakazawa K., Sumita M., Maruyama N.**, Effect of contact pressure on fretting fatigue of high strength steel and titanium alloy in Standardization of fretting fatigue test methods and equipment, ASTM STP 1159 (1992) pp. 115 - 125.
- [19] **Bleuzen C.**, Evaluation de la susceptibilité au fretting d'alliages aéronautiques, Le fretting corrosion, Senlis, (1988), pp. 39 - 57.
- [20] **Ramakrishna Naidu N.K., Ganesh Sundara Raman S.**, Effect of shot blasting on plain fatigue and fretting fatigue behaviour of Al-Mg-Si alloy AA6061, International Journal of Fatigue, (2005), pp. 323 - 331.
- [21] **Waterhouse R. B.**, Fretting fatigue, Edited by Waterhouse, Applied Science Publishers, UK, (1981)
- [22] **Cartier M., Kapsa P.**, Usure des contacts mécaniques. Manifestation de l'usure, Techniques de l'ingénieur, Traité de génie mécanique, BM 5067, (2001).
- [23] **Godet M.**, The third body approach, a mechanical view of wear, Wear, 100 (1984), pp. 437 – 452.
- [24] **Archard J.F.**, Contact and rubbing of flat surfaces, J. Appl. Phys. 24 (1953), pp. 981 - 988.
- [25] **Sauger E., Fouvry S., Ponsonnet L., Kapsa Ph., Martin J.M., Vincent L.**, Tribologically transformed structure in fretting, Wear, 245 (2000), pp. 39 - 52.
- [26] **Holm R.**, Electric contacts, Almqvist & Wiksells Boktryckeri, Uppsala (1946).
- [27] **M. Boumahdi, J.P. Dron, S. Rechak et O. Cousinard**, Revue Internationale sur l'Ingénierie des Risques Industriels (JI-IRI), Vol 2, No 1(2009).
- [28] **F. Taffinine, K. Mokrani, J. Antoni, A. Kabla, and Z. Asradj**, Introduction des SVM en MCSA, 4th International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, SETIT (2007) – TUNISIA.
- [29] **Lamagnère Pierre**, Etude et modélisation de l'amorçage des fissures de fatigue de roulement au voisinage des microhétérogénéités dans l'acier M50 (80MoCrV42), Thèse INSA Lyon. , (1996)
- [30] **S. Grassie, P. Nilson, K. Bjurstrom, A. Frick, L ; G. Hansson**. Alleviation of Rolling Contact Fatigue on Sweden's Heavy Haul Railway. Wear, 253, (2002), pages 42 – 53

- [31] **P.J.L.Fernandes**. Contact Fatigue in Rolling-Element Bearing. Engineering failure Analysis, 4-2, (1997), pages 155 – 160
- [32] **Houssein Abbouchi**, Etude de la fatigue de contact de roulement. Approche expérimentale dans un matériau fragile et modélisation numérique, Thèse de Doctorat Université de Poitiers, (2006).
- [33] **H. Hertz**. Über die Berührung fester elastischer Körper. Journal für die reine und angew Mathemat, 92, (1881), pages 156 – 171.
- [34] **K. L. Johnson**. Contact Mechanics. Cambridge University Press, (1985), 452 pages
- [35] **Jean-Louis Fanchon**, Guide de mécanique, Nathan, 2001, 543 pages
- [36] **Berthe, D., Flamand, L., Foucher, D., Godet, M.**, Micropitting in hertzian contact, ASME.lub.Tech. 102, Oct. (1980), Page 478-489.
- [37] **Benlali, Y., Hadjadj, A.E.**, Diagnostic des défauts des roulements par analyse vibratoire, 1^{ère} séminaire International d'Electronique (2010).
- [38] **L. Gallego, D. Nélisa, S. Deyber** ; A fast and efficient contact algorithm for fretting problems applied to fretting modes I, II and III, Wear 268 (2010) 208–222
- [39] **M. .H Zhu, Z. R. Zhou, Ph. Kapsa., L. Vincent**. An experimental investigation on composite fretting mode, Tribology International 34 (2001) 733-738.
- [40] **Gedeon, M.** Fretting Corrosion. Technical Tidbits, Brushwellman engineering materials, (2002). vol. 4(3).
- [41] **Belhamzaoui. A.** Etude et simulation des mécanismes d'usure par petits débattements (cas des roulements)..Mémoire de magister, Annaba (1996).
- [42] **M. .H Zhu , Z. R. Zhou**. An experimental study on radial fretting behaviour, Tribology International 34 (2001) 321-326.
- [43] **M. C. Gaspar. A. Ramalho**. Fretting behaviour of galvanised steel, wear (252) 199-209.
- [44] **A. Koenen, Ph. Virmoux, R. Gras, J. Blouet, J.M. Dewulf, J. M. Monicault**. A machine for fatigue and fretting wear testing in cryotechnical and normal environment, wear 197 (1996) 192-196.
- [45] **B.J. Briscoe A. Chateauminois**. Measurements of friction- induced surface strains in a steel / polymer contact, Tribology International 35 (2002) 245-254.
- [46] **S. Fouvry, Ph. Kapsa, C. Langlade, A.B. Vannes, J.M. Vernet, L. Vincent**, fretting usure & fretting fissuration, (2006).
- [47] **G.Yantio**, Comportement tribologique d'un alliage de titane traite et / ou revetu en fretting a débattement libre, Thèse doctorat (2007)

- [48] **T. Kolodziejczyk, R. Toscano, S. Fouvry, G. Morales-Espejel**, Artificial intelligence as efficient technique for ball bearing fretting wear damage prediction, *Wear* 268 (2010) 309-315
- [49] Fretting Fatigue & Fretting Wear, Ecole Centrale de Lyon (<http://ltds.eclyon.fr>)
- [50] Étude de la propagation de fissuration sous chargement de Fretting sur Éprouvette précontrainte, École Centrale Lyon – LTDS, (2009).
- [51] **Julie Pellier, Jean Geringer, Bernard Forest**, Tribocorrosimètre pour l'étude du fretting-corrosion, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne Cedex 02.
- [52] **Hamdi Yacine**, Contribution à l'étude des dégradations induites sous petits débattements par la conception d'un banc d'essai de simulation, (2003)
- [53] **Etsuo Marui, Hiroki Endo, Norihiko Hasegawa , Hidetoshi Misuno**. Prototype fretting wear machine and some experimental results, *wear* 214 (1998) 221-230.
- [54] **N.Zeghib, A .Belhamzaoui, A.Othmani, Z.Oualia**, Conception et réalisation d'un prototype de simulation pour l'étude de l'usure (cas des petits débattements), CNDPRU, J2301 / 03 / 03 / 04, (2006)
- [55] **M.Zebila, A.Amiar**, Etude de la caractérisation de l'acier 100 Cr6 à roulement (éprouvette de fretting), Mémoire de master, Annaba (2010).
- [56] **Buciumeanu. M**, «Prediction of fretting fatigue life», thèse de Doctorat, Université de Minho, Portugal, (2009).
- [57] **Remescul.B.I**, «Déplacement relatif et frottement à l'interface d'un contact élastique», thèse de Doctorat, INSA de Lyon, France, (2002).
- [58] **A.Belhamzaoui, R.Laissaoui, K.Kechout, N.Zeghib** ; Caractérisation de l'usure par fatigue de l'acier à roulement 100Cr6 par la cartographie de la rugosité 3D ; CSM7 ; Beirut – Lebanon ; (2010)
- [59] **J. Vleugels, B. Basu, K.C. Hari Kumar, R.G. Vitchev, O. Van Der Biest**; Unlubricated Fretting Wear of TiB2-Containing Composites against Bearing Steel; Volume 33a, December (2002)—3853.
- [60] **Gui Zhen Xu, Jia Jun Liu, Zhong Rong Zhou**, Prediction of the fretting fatigue resistance of various surface-modification layers on 1045steel: the role of fretting maps, *Tribology International* 34 (2001)569–575.

- [61] **J. M. Pelletier; E. Sauger, Y. Gachon, A. B. Vannes;** Mechanical and tribological properties of Hadfield steel coatings manufactured by laser processing; JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 34 (1999) 2955 – 2969.
- [62] **M.C.Gaspar, A.Ramalho,** Fretting behavior of galvanized steel, Wear 252 (2002) 199–209.
- [63] **Gui-Zhen Xu, Jia-Jun Liu, and Zhong-Rong Zhou .**The Effect of the Third Body on the Fretting Wear Behavior of Coatings; JMEPEG (2002) 11:288-293
- [64] **Rahma Belakhdar;** Etude des mécanismes de fretting dans les contacts électriques étamés : Effet de la fréquence des vibrations, Une analyse tribologique et électrique JCGE'08 LYON, 16 et 17 décembre (2008).
- [65] **B.Basu, J.Vleugels, O.Van Der Biest,** Fretting wear behavior of TiB₂-based materials against bearing steel under water and oil lubrication, Wear 250 (2001) 631–641.

ANNEXE A

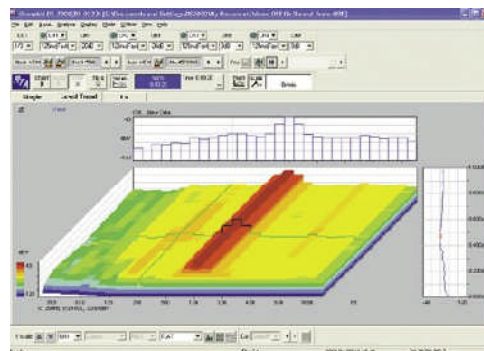


Analyseur de spectre/enregistreur 4 voies

CF-3600

A.1 Caractéristiques générales

- Système 4 voies tout en un enregistreur et analyseur
- 1 Sortie pour génération de signaux
- Ecran 15'' tactile couleur
- Télécommande fournie en standard
- Fonctionnement en AC, DC ou batterie interne
- Batterie interne garantissant l'intégralité des données en cas de coupure de courant
- Aucun ventilateur venant perturber les mesures acoustiques
- Convertisseurs 24 bit "N"
- Echantillonnage maximum de 101,4 kHz par voies
- Analyses spectrales de 4 mHz à 40 kHz.
- Enregistrements longue durée (87 minutes pour 4 voies à 40 kHz)
- Fonctions avancées de traitement du signal: analyse FFT, analyse en octave, analyse d'ordre.
- Logiciels dédiés : Puissance et Intensité acoustique, Analyse Modale



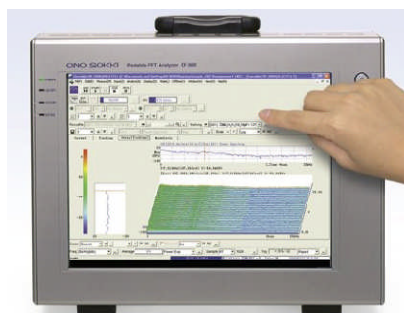
A.2 Ergonomie



Boutons de commande



Télécommande avec fonctions raccourcis

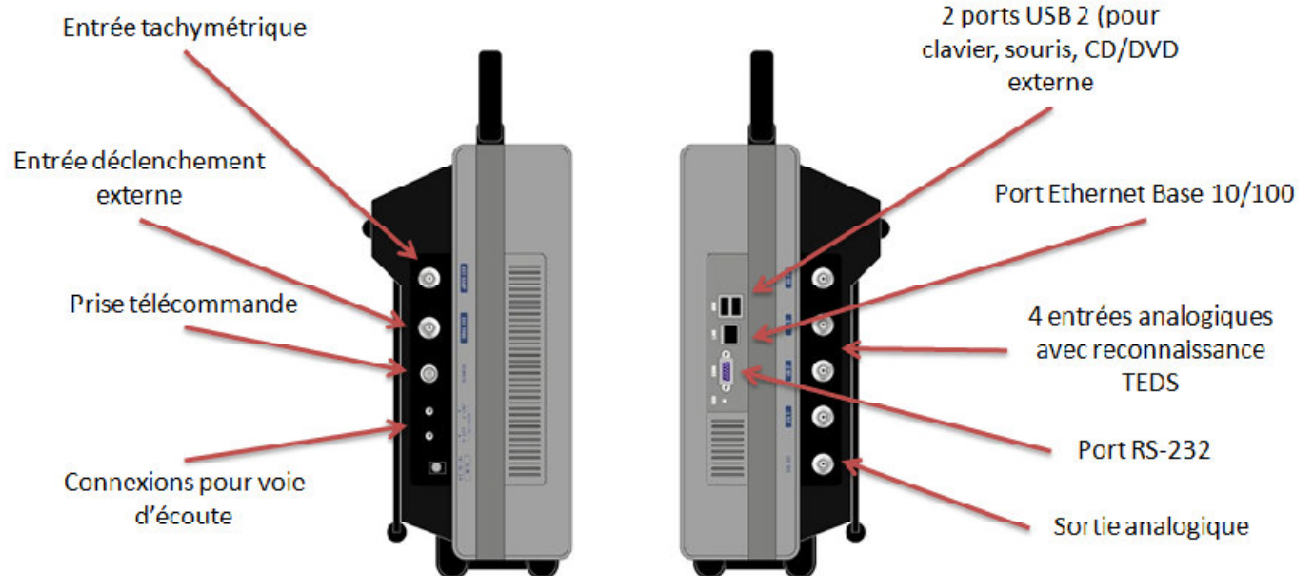


Ecran tactile



Protection écran

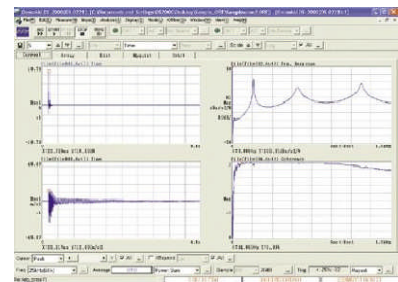
A.3 Connectivité



A.4 Fonctionnalités logicielles

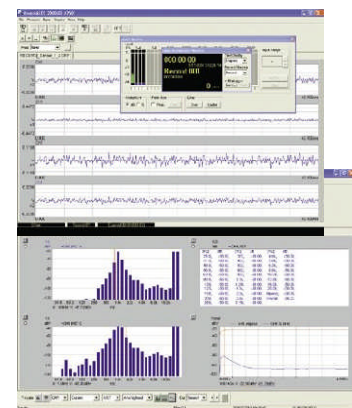
Analyse en bandes fines (standard)

- Bande passante : 40 kHz
- Résolution : 6 400 lignes
- Fonction zoom
- Pondération : Hanning, Rectangulaire, Force, Exponentiel et configurable sur mesure
- Acquisition de fonction de transfert et calcul de cohérence



Enregistrement et export de fichiers (standard)

- Format .wav, .txt, DaDisp, Matlab, .uff



Analyse en Octave et 1/3 d'Octaves (option DS-0223)

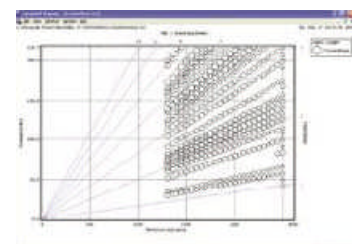
Analyses en ordres (option DS-0222)

- Suivi de ratio constant
- Suivi de bandes constantes
- Suivi de la phase



Représentation sous forme de diagramme de Campbell (option DS-0244)

- Abscisse : rpm
- Ordonnées : fréquences
- Lignes inclinées : ordres
- Diamètres des cercles : proportionnels aux amplitudes



Pilotage d'une sortie analogique (option CF-0371)



A.5 Logiciels dédiés

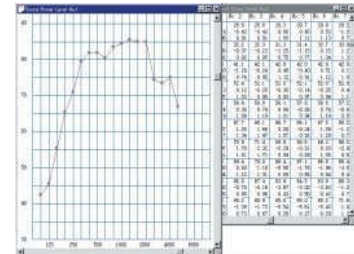
Intensité acoustique (option DS-0226)

- Représentation 3D possible avec sonde tridimensionnelle
- Représentation de contours
- Vecteur intensité



Puissance acoustique (option DS-0231)

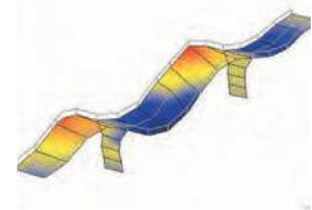
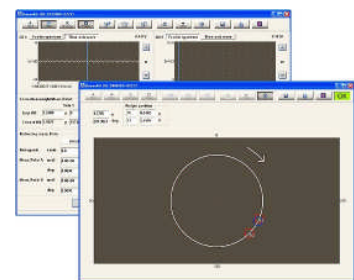
- Conforme aux normes ISO 3741 à 3748



Equilibrage 2 plans (option DS-0227)

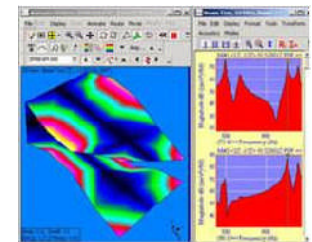
Observation de déformées opérationnelles (option ME-ODS)

- Edition de géométrie
- Observation à l'aide des signaux
- Observation à l'aide des FRF



Analyse modale (option ME-MOD)

- Suivi de ratio constant
- Suivi de bandes constantes
- Suivi de la phase



A.6 Outils logiciels complémentaires

XN-8000

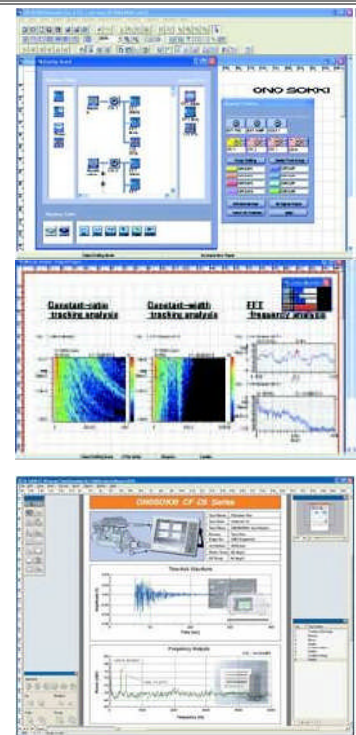
- Outil dédié au post-traitement de données issues des analyseurs CF-7200, CF-3600 et DS-2000
- Concept de mesures intégrées à un rapport
- Outil avancés de création de rapports
- Visualisation schématisée des analyses à réaliser



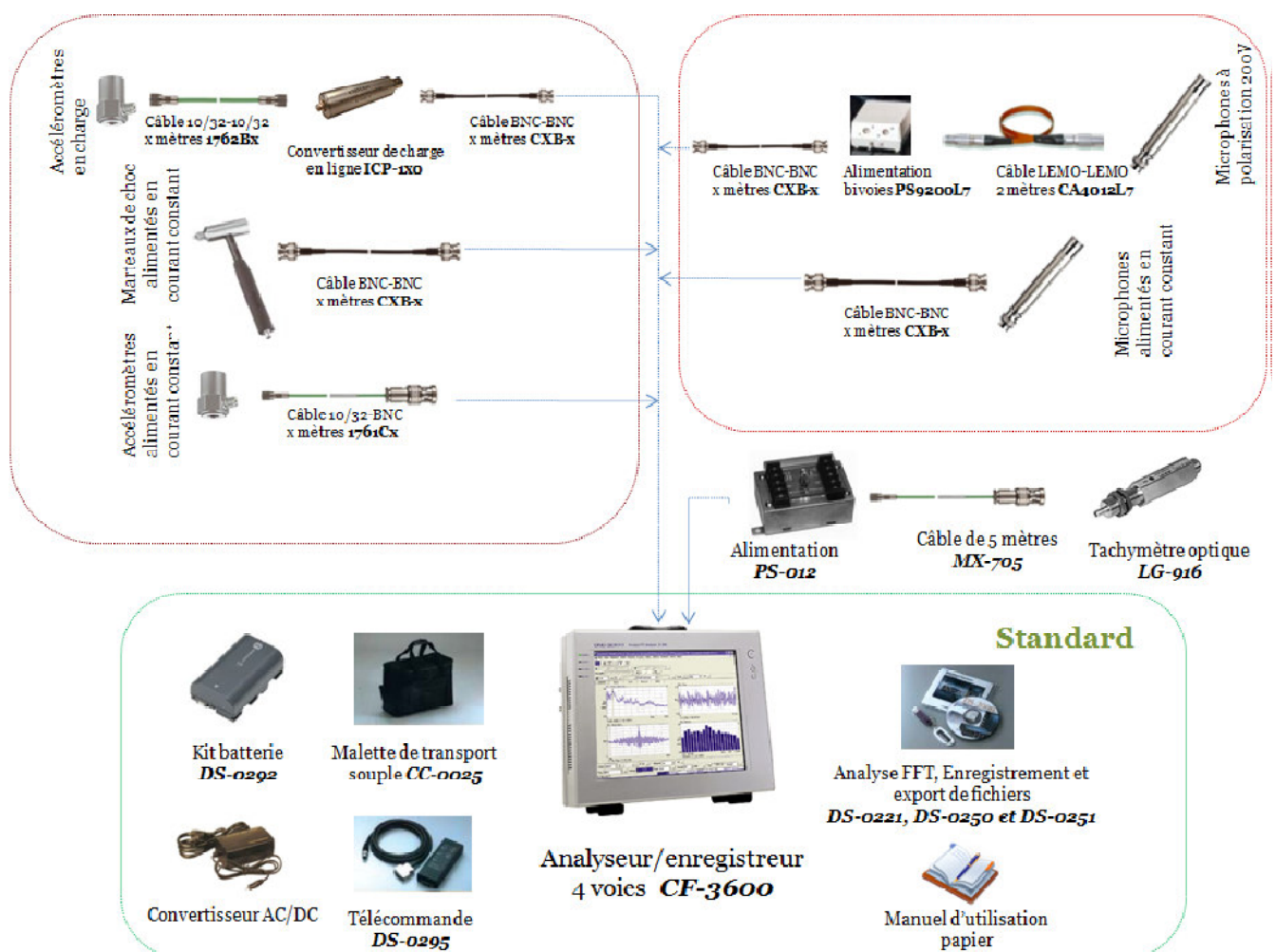
- Pilotage des mesures depuis le rapport
- Edition de rapport sitôt la mesure terminée
- Visionneuse disponible sans frais
- Analyse en bandes fines
- Analyse en Octave
- Analyse en Ordres

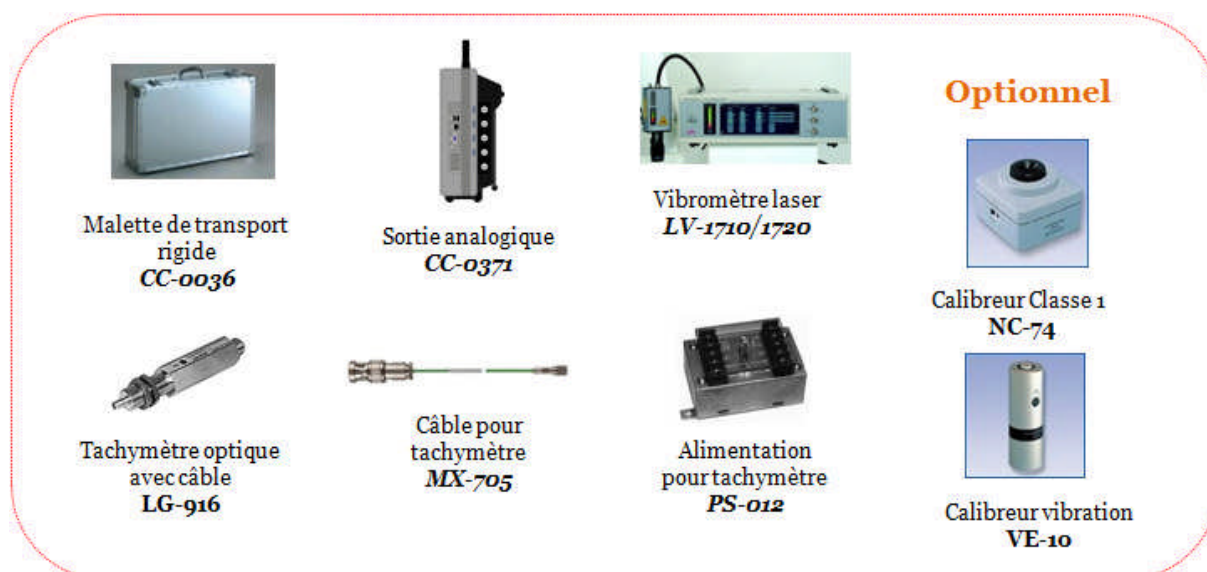
OC-1000

- Outil de création de graphiques
- Outil d'édition de rapports



A.7 Configurations matérielles





A.8. Microphones recommandés

		MPA-416	MPA-201
	Unité		
Mode		Champ libre	Champ libre
Type		1/4"	1/2"
Polarisation	V	o (ICP)	o (ICP)
Sensibilité	mV/Pa	50	50
Gamme de mesures	dB	29-127	18-130
Bande passante	Hz	20 -20 k	20 -20 k
Température	°C	0 à 40	-20 à 80
Préamplificateur		Intégré	Intégré
Connecteur		SMB	BNC

A.9 Accéléromètres recommandés

		8776A50	8702BXX	8763A500	8766A50
	Unité				
Mode		Voltage	Voltage	Voltage	Voltage
Type		Monoaxial	Monoaxial	Triaxial	Triaxial
Sensibilité	mV/g	100	50/100/200	10	100
Gamme de mesures	+/- g	50	100/50/25	500	50
Bande passante	Hz	1-10 k	0,5-10 k	1-12 k	0,5-5 k
Poids	gramme	4	8,7	3,3	16
Connecteur		10-32	10-32	Mini 4 broches	4 broches
Température	°C	54 à 121	54 à 100	54 à 121	55 à 121
Montage		collé	trou 10-32	trou 5-40	trou 6-32

A.10 Marteaux recommandés

		9722A2000	9724A5000	9726A20000	9728A20000
	Unité				
Mode		Voltage	Voltage	Voltage	Voltage
Sensibilité	mV/N	2	1	0,2	0,2
Gamme de mesures	N	2000	5000	20 000	20 000
Bande passante (-10 dB)	kHz	9,3	6,9	5,4	1
Poids tête	gramme	100	250	500	1500
Masse extension	gramme	50	125	250	760
Connecteur		BNC	BNC	BNC	BNC
Embouts fournis		6	6	6	3

A.11 Spécifications détaillées

Unité centrale avec écran tactile	
Processeur	533 MHz
Mémoire	256 Mo
Disque dur	30 GB. Flash disque (4 GB) optionnel.
Réseau	10BASE/100BASE-TX
Ecran	LCD 15" XGA 1024 x 768 pixels
Connectique	2 ports USB 2.0
Système d'exploitation	Microsoft® Windows® XP Professional

Mesures	
FFT temps réel	40 kHz/4 voies
Voies d'entrée	4 voies
Entrée déclenchement	1 voie, AC/DC, ± 0.5 to ± 10 V
	0 to 85 kHz $\pm 10\%$ (3 dB, avec filtre passe bande)
	Top/tour: 0.5 à 1024

Signaux d'entrée	
Nombre de voies	4
Connection	BNC
Configuration	Single ended
Impédance	1 M Ω $\pm$ 0.5%, moins de 100 pF
Couplage	DC ou AC (atténuation de 3 dB à 0.55 Hz)
Alimentation capteur	2 mA/4 mA
Filtrage analogique	A, B et C
Gamme d'entrée	-40 to 20 dBVrms (par pas de 10 dB)
Protection survolage	70 V rms AC pendant 1 minute (50 Hz)
Gamme de fréquence	de 0 à 40 kHz
Echantillonnage	32, 44.1, 48, 51.2, 64, 102.4 kHz etc.
Précision en fréquence	< $\pm$ 50 ppm
Convertisseur A/D	24 bit $\Delta\Sigma$ avec filtrage anti repliement
Gamme dynamique	100 dB
Précision pleine échelle	< ± 0.1 dB (à 1kHz)
Diaphonie	< 90 dB (à 1 kHz)
Précision d'amplitude entre voies	< ± 0.3 dB
Précision de phase entre voies	< 0.5 ° (DC à 20 Hz)
	< 1 ° (20 à 40 kHz)

Signaux de sortie	
Nombre de voies	1
Connexion	BNC
Impédance	50 Ω $\pm$ 10%
Amplitude	$\pm$ 10 mV to $\pm$ 10 V
Gamme de fréquence	de 0 à 40 kHz
Taux de conversion	32, 44.1, 48, 51.2, 102.4 kHz etc.
Convertisseur D/A	20 bit $\Delta\Sigma$
Type de signaux	Sinus, sinus balayé, aléatoire, pseudo-aléatoire, impulsion, bruit dans bande d'octave, bruit rose, sortie de données enregistrées
FFT analysis length	64/128/256/512/1024/2048/4096
Voltage amplitude accuracy	Less than $\pm$ 0.5 dB
Octave band filter	6th Butterworth (1/1, 1/3 octave)
Bruit dans bande d'octave	15 bandes d'octave (de 1 Hz à 16 kHz) ou 47 bandes de 1/3
Pink filter	Filtrage analogue -3 dB/OCT $\pm$ 1.0 dB (de 20 Hz à 20 kHz)
Mode	Continu/salves simples/salves continues

Spécifications générales	
Dimensions	410(W) x 314(H) x 150 (D) mm
Alimentation	19 VDC $\pm$ 5%
Consommation	Approx. 70 VA (avec adaptateur 100 VAC/DC)
Température d'opération	de 5 à 40 (0 à 40°C si le disque optionnel est intégré à l'unité)
Storage temperature	de 10 à 60°C
Poids	Approx. 10 kg
Ventilateur	Aucun
Protection contre saut	Batterie Lithium Ion fournie en standard. Autonomie 20 minutes

Spécifications adaptateur AC/DC	
Entrée	de 100 à 240 VAC
Fréquence	de 50 à 60 Hz
Sortie	19 VDC
Output current	4 A

Spécifications télécommande	
Dimensions	45(W) x 25(H) x 117(D) mm
Nombre de boutons	5 (START/STOP/F1/F2/F3)
	F1/F2/F3 à définir
LED	5, sur tous les boutons

ANNEXE B

MICROSCOPE INTERFERENTIEL

Le microscope interférentiel permet de mesurer des surfaces de quelques dizaines de micromètres carrés à plusieurs millimètres carrés [B]. Le principe de la mesure de la topographie (relief) est basé sur un faisceau de lumière blanche qui est envoyé sur la surface à analyser via des objectifs, de type Mirau, dont la fonction est de séparer la lumière (figure D1). Ce phénomène génère alors des images en franges d'interférence.

Pour mesurer l'amplitude du relief, les objectifs interférométriques du microscope sont solidaires d'un translateur piézo-électrique dont le déplacement est contrôlé par un microcalculateur. Les franges d'interférence se déplacent avec le mouvement du translateur et elles sont enregistrées pour chacune des positions verticales de l'objectif par des détecteurs matriciels : à chacune de ces positions, il correspond des images (x,y) en franges d'interférence. Un algorithme adapté basé sur la Transformée de Fourier Rapide (FFT) traduit ces images en variations de relief : les informations topographiques de champ observé sont ainsi obtenues.

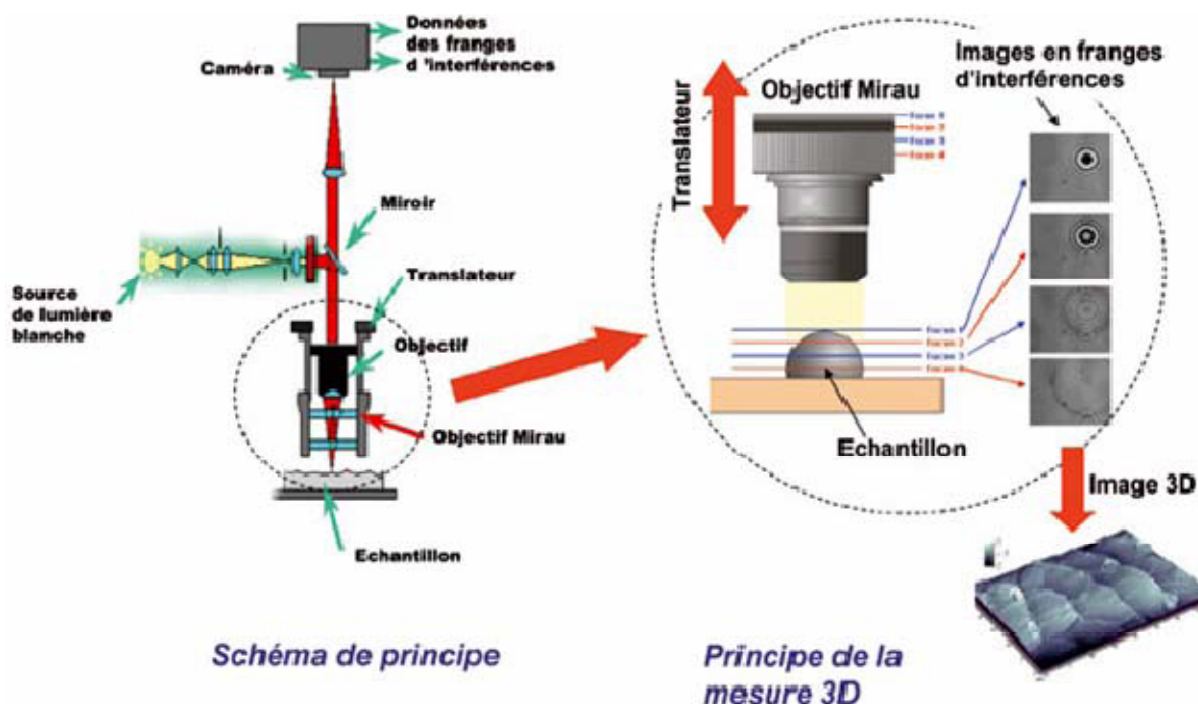


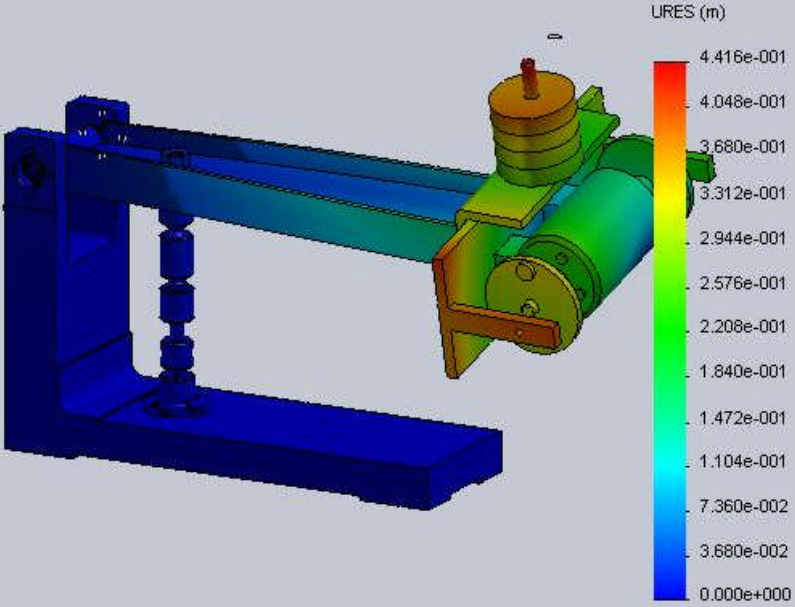
Figure B1 : Principe du profilomètre interférométrique [B].

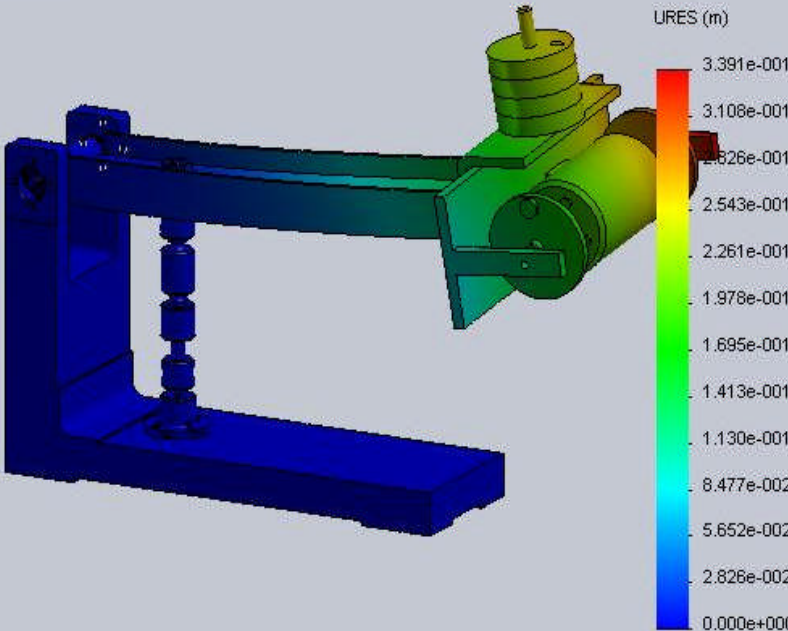
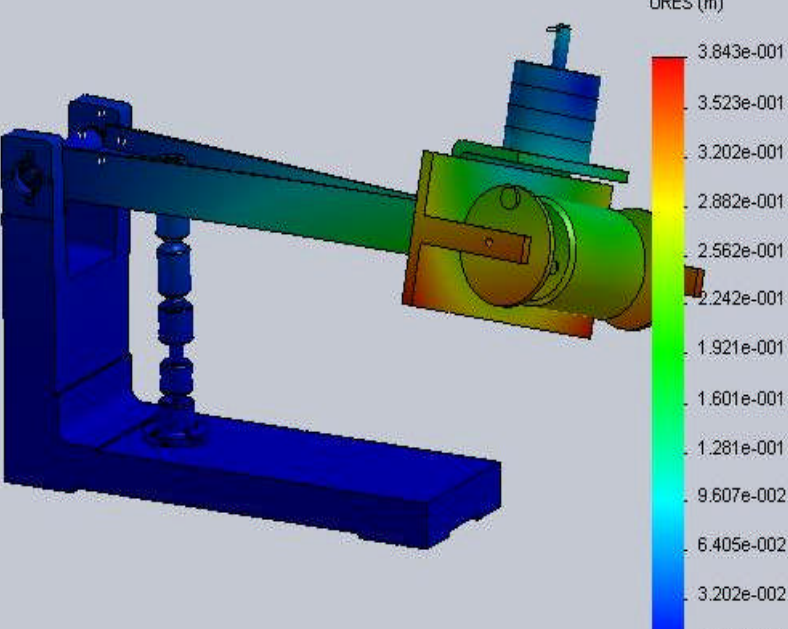
[B] Wyko NT1100, Wyko Surface Profilers Technical reference Manual, Veeco Instruments Inc., (1993), 50 p.

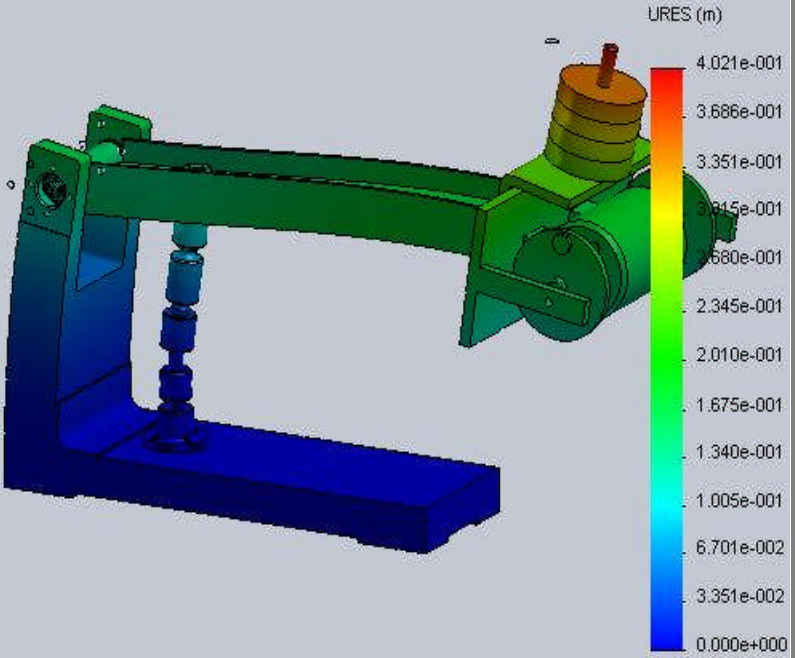
ANNEXE C

Résultats analyse fréquentielle par SolidWorks du banc de simulation de fretting

Le tableau suivant représente les résultats de l'analyse fréquentielle du banc de simulation en utilisant le logiciel de CAO (SolidWorks)

Numéro de mode	Fréquence (Hertz)	Schéma
1	18.373	Nom du modèle: Assemblag10 Nom de l'étude: Etude 1 Type de tracé: Fréquence Déplacements1 Déformée modale: 1 Valeur = 18.373 Hz Echelle de déformation: 0.163431 

2	19.729	Nom du modèle: Assemblag10 Nom de l'étude: Etude 1 Type de tracé: Fréquence Déplacements2 Déformée modale: 2 Valeur = 19.729 Hz Echelle de déformation: 0.211504 
3	28.11	Nom du modèle: Assemblag10 Nom de l'étude: Etude 1 Type de tracé: Fréquence Déplacements3 Déformée modale: 3 Valeur = 28.11 Hz Echelle de déformation: 0.240838 

4	129.62	Nom du modèle: Assemblag10 Nom de l'étude: Etude 1 Type de tracé: Fréquence Déplacements4 Déformée modale: 4 Valeur = 129.62 Hz Echelle de déformation: 0.177096 
5	352.1	Nom du modèle: Assemblag10 Nom de l'étude: Etude 1 Type de tracé: Fréquence Déplacements5 Déformée modale: 5 Valeur = 196.14 Hz Echelle de déformation: 0.142533 