



HAL
open science

APPORT DE LA MICROCARACTERISATION ACOUSTIQUE A LA TRIBOLOGIE

Youcef Guetteche

► **To cite this version:**

Youcef Guetteche. APPORT DE LA MICROCARACTERISATION ACOUSTIQUE A LA TRIBOLOGIE. Génie mécanique [physics.class-ph]. Insa Lyon; LaMCoS - Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures, UMR 5259 (Lyon, INSA), 1996. Français. NNT : . tel-02366653

HAL Id: tel-02366653

<https://theses.hal.science/tel-02366653>

Submitted on 16 Nov 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

Présentée

DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

Pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR

FORMATION DOCTORALE : MECANIQUE.

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE LYON :

Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique (MEGA).

PAR

Youcef GUETTECHE

Ingénieur de l'INIL, Boumerdes, Algérie

**APPORT DE LA MICROCARACTERISATION ACOUSTIQUE
A LA TRIBOLOGIE**

Soutenue le 19 décembre 1996 devant la Commission d'Examen :

M. L. VINCENT	Professeur,	Président
M. J. ATTAL	Professeur,	Rapporteur
M. F. PLATON	Professeur,	Rapporteur
M. Y. BERTHIER	Directeur de recherche	
M. M. IGNAT	Directeur de recherche	
M. J.-M. SAUREL	Ingénieur de recherche	

AVIS AUX LECTEURS

Ce travail débuté en novembre 1990, s'est achevé en décembre 1994. Pour des raisons à la fois, techniques et personnelles, ce texte, n'est publié qu'en décembre 1996.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont particulièrement au Professeur M. GODET, qui m'accueillit en son Laboratoire de Mécanique des Contacts (LMC) de Lyon, pour réaliser la présente étude. Décédé au cours de celle ci, son souvenir devait être rappelé avant de présenter ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur Y. BERTHIER, Directeur de recherche CNRS au LMC, pour m'avoir encadré, guidé et soutenu tant scientifiquement que financièrement, tout au long de cette étude.

Pour leur participation à mon jury de thèse, Messieurs les Professeurs J. ATTAL, F. PLATON, L. VINCENT, doivent être remerciés, ainsi que Monsieur le Directeur de recherche CNRS, M. IGNAT, et Monsieur l'ingénieur de recherche CNRS, J-M. SAUREL.

Je tiens à remercier tous les membres du LMC, particulièrement, Messieurs T. DUPASQUIER, J-C. GODEAU et P. AEBY pour leur aide technique fournie tout au long de ce travail.

Je n'oublie pas de remercier les membres du LAIN de Montpellier, qui m'ont bien accueilli et aidé lors de mes déplacements chez eux, pour effectuer des analyses avec leurs matériels.

DÉDICACES

Je dédie ce mémoire à :

la mémoire de ma mère, d'avoir tant attendu la fin de mes études, mais qui est décédée avant;

mon épouse, pour son soutien moral, et sa patience tout au long de cette étude;

mon frère aîné, pour son soutien moral tout au long de mes études.

SOMMAIRE

PAGES

INTRODUCTION GENERALE

11

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DU DETACHEMENT DE PARTICULES ET DES TTS

I.1 INTRODUCTION	15
I.2 GROUPE 1 : DETACHEMENT DE PARTICULE EN UN SEUL CYCLE	15
I.2.1 Conclusion	23
I.3 GROUPE 2 : DETACHEMENT DE PARTICULES APRES PLUSIEURS CYCLES	24
I.3.1 Conclusion	31
I.4 DISCUSSION	32
I.4.1 Généralités	32
I.4.2 Facteurs influents	35
I.4.3 Une autre démarche	37
I.5 CONCLUSION	43

CHAPITRE II

MOYENS ET METHODOLOGIE D'OBTENTION DES TTS

II.1 MOYENS	46
II.1.1 Introduction	46
II.1.2 Simulateur de frottement : TRIBOMAB	46
II-2 OBTENTION DES TTS	50
II-2.1 Introduction	50
II-2.2 Paramètres d'essais	51
II-2.3 Paramètres mesurés pendant l'essai	52
II.2.4 Essais effectués en une passe	53
II.2.5 Essais effectués en mouvement alternatif à plusieurs cycles	67
II.3 CONCLUSION	76

CHAPITRE III

MICROCARACTERISATION ACOUSTIQUE

III.1 INTRODUCTION	78
III.2 NOTIONS ELEMENTAIRES DE LA PHYSIQUE DES ULTRASONS	78
III.2.1 Type d'ondes	78
III.2.2 Loi de Snell-Descartes	80
III.2.3 Pression et Impédance acoustique	80
III.3 ELEMENTS CONSTITUTIFS DU MICROSCOPE ACOUSTIQUE	81
III.3.1 Générateur de haute fréquence	81
III.3.2 Transducteur émetteur-récepteur	81
III.3.3 Lentille acoustique	81
III.3.4 Mécanique de balayage	81
III.3.5 Electronique de commande	82
III.4 IMAGERIE ACOUSTIQUE	82
III.4.1 Principe	82
III.4.2 Résolution du microscope acoustique	83
III.4.3 Système de réglage d'assiette	84
III.4.4 Problèmes liés à l'imagerie de surface	86
III.5 APPLICATION DE L'IMAGERIE ACOUSTIQUE	88
III.5.1 Mécanique et sciences des matériaux	88
III.5.2 Electronique	88
III.5.3 Biologie et médecine	88
III.5.4 Tribologie	88
III.5.5 Détection d'un défaut en sous-surface	92
III.6 SIGNATURE ACOUSTIQUE D'UN MATERIAU : effet $V(z)$	93
III.6.1 Phénomène de la signature acoustique	93
III.6.2 Exploitation de la signature acoustique	94
III.6.3 Problèmes liés à la mesure de $V(z)$	96
III.7 CONCLUSION	98

CHAPITRE IV

MAB ET TRIBOLOGIE : FAISABILITE

IV.1 INTRODUCTION	100
IV. 2 ETUDE D'UNE EPROUVETTE DE FROTTEMENT	101
IV.2.1 Méthode d'analyse	101
IV.2.2 Conditions de frottement	101
IV.2.3 Après frottement et "léger polissage"	101
IV.2.4 Après enlèvement d'une couche de 4 µm	102
IV. 2.5 Après enlèvement d'une couche 5 µm	103
IV.2.6 Discussion des résultats	105
IV.2.7 Cartographie de module de Young	107
IV.3 CONCLUSION	108

CHAPITRE V

COUPLAGE : ESSAIS TRIBOLOGIQUES ET MAB

V.1 INTRODUCTION	110
V.2 ADAPTATION DU MAB AU SIMULATEUR DE FROTTEMENT	110
V.3 CONDITIONS ACOUSTIQUES	111
V.4 CONDITIONS TRIBOLOGIQUES	112
V.5 ANALYSE DES PREMIERS ESSAIS	113
V.6 PERSPECTIVES	114
V.7 INFLUENCE TRIBOLOGIQUES DU LIQUIDE DE COUPLAGE	115
V.8 MACRO ANALYSE	115
V.9 MICRO ANALYSE	117
V.10 MESURES DES SIGNATURES ACOUSTIQUES	117
V.11 DISCUSSION	118
V.12 POURSUITE AVEC ESSAIS EFFECTUES EN UNE PASSE	119
V.13 POURSUITE AVEC ESSAIS EFFECTUES A PLUSIEURS CYCLES	120
V.13.1 Conditions tribologiques	120
V.13.2 Anneau de Mindlin	120
V.13.3 Effets cumulatifs	121
V.14 CONCLUSION	125

CHPITRE VI

CARACTERISATION DU M.A.B. du LMC

VI.1 INTRODUCTION	127
VI.2. EPROUVETTE EN VERRE	127
VI.3 ETALON DE RUGOSITE "RUGO-TEST"	127
VI.4 COMPOSANT ELECTRONIQUE	130
VI.5 COMPOSITE FIBRE DE CARBONE / VERRE	132
VI.6 COUCHE D'ETAIN SUR SUBSTRAT EN ACIER	134
VI.7 EPROUVETTE DE FROTTEMENT	135
VI.8 CONCLUSION	137

CHAPITRE VII

DISCUSSION GENERALE

VII.1. INTRODUCTION	139
VII.2 LA TRIBOLOGIQUE	139
VII.3. LA MICROSCOPIE ACOUSTIQUE A BALAYAGE	140
VII.4 LES MOYENS EXPERIMENTAUX	141
VII.5 L'OPERATEUR	142
VII.6 METHODOLOGIE DES ESSAIS	142

CONCLUSION GENERALE	146
----------------------------	-----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	150
------------------------------------	-----

ANNEXE A	157
-----------------	-----

ANNEXE B	160
-----------------	-----

INTRODUCTION GENERALE

Des travaux sur le frottement et l'usure montrent que la vie d'un contact se joue au cours des premiers mouvements relatifs des corps en contact ou premiers corps. L'une des questions fondamentales est alors de caractériser au cours de ces premiers déplacements comment les premiers corps répondent aux sollicitations tribologiques. Ces sollicitations imposées sont l'effort normal et le déplacement tangentiel auquel s'opposera un effort tangentiel subit. Des études menées en collaboration avec le laboratoire de Matériau Métallurgie Physique de l'Ecole Centrale de Lyon ont montré qu'en fonction des sollicitations tribologiques, les premiers corps peuvent être en état de "surcontraintes" ou de "surdéformations". Dans le premier cas il y aura fissuration alors que dans le deuxième, il y aura formation d'une zone fortement écrouie. Ce type "d'écrouissage", faute d'avoir pu être obtenu en dehors de sollicitations tribologiques est appelé Transformation Tribologique Superficielle ou "**TTS**". L'étude de la cinétique de formation de ces TTS n'est malheureusement possible en microscopie optique ou électronique qu'après coupe, donc de manière destructive. Ceci pénalise l'étude et par la même, la maîtrise de la première phase de réponse des premiers corps aux sollicitations tribologiques.

La technique qui répond à la fois aux objectifs de visualisation et aux impératifs de mesure des caractéristiques élastiques locales des TTS sans être destructive, serait la **Microscopie Acoustique à Balayage (MAB)**. Elle trouve ses origines en 1939 suite à l'idée du soviétique Sokolov de produire des ondes ultrasonores à des fréquences de l'ordre du Giga Hertz. Dans les années 70, les travaux de Quate et Auld [Quat] de l'université de Stanford ont permis la construction du premier microscope acoustique.

Partant de là, l'objectif de ce travail a été, après une étude bibliographique sur les mécanismes de détachement de particules, de voir sous quelles conditions la microscopie acoustique pouvait être utilisable en tribologie.

L'originalité du sujet de recherche repose sur la visualisation et la caractérisation des modifications des propriétés élastiques pouvant se produire lors du frottement de deux premiers corps en contact, non seulement en surface, mais aussi en sous-surface.

La finalité étant de suivre au cours du frottement la réponse du matériau face aux sollicitations tribologiques, ce qui suppose :

1. la mise au point d'une technique basée sur la microcaractérisation acoustique permettant ce suivi;
2. la validation de la méthode par comparaison avec d'autres techniques de caractérisation notamment l'imagerie photonique ou électronique.

Si l'objectif est simple, sa mise en oeuvre a été sujette à quelques aléas inhérents à la jeunesse de la microscopie acoustique, et à son application en tribologie.

Ce travail s'est aussi déroulé à une période charnière de la compréhension des phénomènes tribologiques. Le délai important entre la fin de ce travail et sa publication, explique quelques décalages entre la rédaction, et les acquis actuels, tant en tribologie qu'en acoustique. D'où l'importance de présenter la chronologie du déroulement de cette étude pour mieux comprendre l'enchaînement du travail et la structure des chapitres.

Le simulateur de frottement utilisé au début de cette étude était d'une précision insuffisante pour découpler les effets du simulateur de ceux spécifiques de la réponse des premiers corps. L'alternative aurait été d'utiliser le simulateur de haute précision appelé "PEDEBA", mais il n'était pas possible de l'immobiliser pour de longues périodes. Cependant, nous avons effectué sur ce simulateur quelques dizaines d'essais préliminaires. La dernière alternative a donc été de concevoir et de réaliser un simulateur de frottement, devant satisfaire aux impératifs suivants :

1. intégrer un microscope acoustique et optique;
2. posséder une résolution de déplacement d'au moins 1 μm ;
3. posséder une rigidité suffisante devant les sollicitations tribologiques;
4. se réaliser dans des délais et avec des coûts de fabrication les plus réduits possible.

Ce simulateur nommé "TRIBOMAB", a été conçu et mis au point au cours de ce travail au Laboratoire de Mécanique des Contacts (LMC), et réalisé par une entreprise spécialisée pendant la période de réalisation des essais préliminaires. Entre temps, pour malgré tout, valider le bien-fondé de l'idée de départ, une éprouvette frottée a été envoyée au Laboratoire de Microcaractérisation Acoustique de Montpellier devenu depuis le Laboratoire d'Analyse des Interfaces et de Nanophysique (LAIN) pour l'analyser avec un Microscope Acoustique à Balayage (MAB). Les résultats ayant été prometteurs, nous avons décidé de poursuivre. Deux possibilités s'offraient : la première était d'utiliser un MAB du commerce, dont la résolution est très limitée, et dont l'utilisation en tribologie restait à vérifier. La deuxième possibilité était de demander au LAIN, de développer un MAB adapté à notre objectif. Ce dernier choix a été retenu, car motivé par notre besoin non seulement du matériel, mais aussi du savoir faire d'une technique nouvelle en tribologie, ainsi que d'un suivi scientifique rapproché permettant d'intégrer les évolutions de cette technique.

Pendant la conception et la mise au point du MAB par le LAIN de Montpellier, nous avons continué les essais tribologiques sur le TRIBOMAB qui n'aurait dû s'appeler que "TRIBO" puisque sans "MAB". Les quelques dizaines d'essais effectués étaient nécessaires pour :

- déterminer les paramètres tribologiques qui assurent une bonne reproductibilité des essais;
- comprendre la réponse des premiers corps et celles des écrans de surface, aux sollicitations tribologiques imposées;
- comprendre le processus de dégradation des surfaces des premiers corps.

La réalisation du MAB a connu des retards cumulés, dus aux délais de livraison de certains composants, et des problèmes techniques d'adaptation des moteurs de déplacement de balayage. Nous avons alors décidé d'emmener le TRIBOMAB à Montpellier pour utiliser sur place un MAB du LAIN.

Bien que ce MAB ne soit pas adapté à notre besoin, nous l'avons néanmoins utilisé avec quelques difficultés d'adaptation. Nous avons enfin pu effectuer quelques essais en alternant frottement et microcaractérisation acoustique sur les mêmes éprouvettes.

Les retards techniques et la complexité engendrée par le fait de travailler à la frontière de deux disciplines : la Tribologie, et la Microscopie Acoustique, ont fait que, le travail a été arrêté à ce stade. En effet, si la méthode est validée, avoir entrouvert la porte sur la tribologie et l'acoustique, sans avoir le temps d'aller au-delà, est quelque peu frustrant. Un autre chercheur a déjà pris la relève.

L'étude a été structurée en sept chapitres et deux annexes :

Chapitre I :

Afin de situer le sujet, nous avons effectué une étude bibliographique sur les mécanismes de détachement de particules, et les différentes approches proposées pour décrire ces mécanismes. Ensuite nous présentons l'approche du LMC et de ses partenaires.

Chapitre II :

Il s'agit de la conception et la mise au point du TRIBOMAB, suivi de l'analyse des essais tribologiques de cadrage.

Chapitre III :

Ce chapitre introduit quelques notions sur la physique des ultrasons, et le fonctionnement du Microscope Acoustique à Balayage, en vue de son utilisation en tribologie.

Chapitre IV :

Nous exposons les résultats des premiers essais de faisabilité du MAB effectués sur une éprouvette frottée.

Chapitre V :

Après transport du TRIBOMAB au LAIN, nous exposons les problèmes d'adaptation de ce premier couplage Tribologie-MAB, ainsi que les résultats des essais effectués sur site.

Chapitre VI :

Après la réception de notre MAB, nous exposons les différents tests de sa caractérisation et de la vérification de sa résolution.

Chapitre VII :

Nous discutons les résultats obtenus par le couplage tribologie-MAB.

Nous terminons l'étude par une conclusion qui regroupe à la fois l'étude bibliographique, les résultats "tribologiques" ainsi que les résultats "acoustiques", suivi des perspectives.

Annexe A :

Emission acoustique.

Annexe B :

Tableau récapitulatif des conditions et des résultats des essais effectués au cours de ce travail.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DU DETACHEMENT DE PARTICULES ET DES TTS

I.1 INTRODUCTION

De nombreux travaux ont été effectués dans le but de comprendre les origines et les scénarios de détachement de particules, afin de construire des modèles qui relient frottement et/ou usure aux paramètres qui les gouvernent.

Nous présentons dans cette étude bibliographique, les travaux les plus souvent référencés, et qui sont à priori représentatifs des grandes tendances des approches "classiques" du phénomène de détachement de particules. Nous employons le terme "classique" par opposition à la démarche développée au LMC, présentée au chapitre I.4.3.

Compte tenu de leur diversité, les résultats bibliographiques "classiques" supportent plusieurs structures de présentation. Nous avons choisi le critère du nombre de cycle de frottement pour obtenir le détachement de particules, ce qui nous donne deux groupes :

groupe 1 : le détachement de particules s'effectue en une passe;

groupe 2 : le détachement de particules s'effectue après plusieurs cycles.

Le choix de ce critère assez arbitraire, n'est en rien un jugement de fond sur ces travaux que nous avons choisi de présenter dans un premier temps comme le "panorama de la tribologie des troisièmes corps solides" en reprenant le maximum de vocabulaire des auteurs.

I.2 GROUPE 1 : DETACHEMENT DE PARTICULES EN UNE PASSE

Ce groupe comprend les études de compréhension du phénomène de détachement de particules qui se basent essentiellement sur l'interaction entre les aspérités des surfaces. La déformation des aspérités est modélisée dans la majorité des cas, par la théorie des champs des lignes de glissement. Le point commun de ces études est le détachement de particules qui s'effectue lors du premier passage.

Parmi ces études nous avons trouvé deux approches :

1. celles qui considèrent l'interaction de deux aspérités représentatives des deux surfaces antagonistes, en prenant en compte les différents paramètres géométriques;
2. celles qui prennent en compte toutes les rugosités de surface, et les différentes probabilités de distribution.

Parmi les pionniers du frottement et de l'usure; Bowden et Tabor [Bowd, 1950] qui affirmaient dans plusieurs de leurs travaux que l'effort tangentiel résulte principalement de la force nécessaire au cisaillement des jonctions ou liaisons formées par adhérence des surface de contact. Dans certaines conditions, par exemple quand une surface dure frotte contre une surface molle; le "labourage" peut aussi contribuer à cet effort. Ils ont utilisé cette hypothèse pour estimer des valeurs typiques de coefficient de frottement et expliquer la dépendance du frottement et de l'usure vis à vis de la charge, de la dureté, de l'aire apparente de contact, de la vitesse de glissement, de la température et des "films de surface". Ils associent à l'adhérence et à l'abrasion la contribution principale au glissement par friction; dans les deux cas ils ont trouvé qu'il y a déformation plastique.

Ensuite, les progrès des techniques de calculs, notamment celles basées sur la théorie des champs des lignes de glissement, ont orienté des chercheurs vers des modélisations du frottement et de l'usure ou détachement de particules, plus spécifiques. Nous citons à titre d'exemple une dizaine d'études.

A.P. Green [Gree] qui est cité dans [Komv1] comme le premier à avoir analysé en 1954 la déformation plastique des jonctions entre aspérités en frottement sec sous des contraintes combinées; normales et tangentielles en utilisant la théorie des champs des lignes de glissement. Il a estimé les efforts de rupture pour les fortes et les faibles jonctions. Cependant l'analyse de Green est appropriée uniquement à modéliser la composante de frottement due à la déformation des aspérités.

J.M. Challen et al [Chal1 en 1979, Chal2 en 1983], ont étudié les interactions qui se produisent quand une aspérité dure déforme plastiquement une surface relativement molle (fig. I-1), en utilisant la théorie des champs des lignes de glissement (fig. I-2). Ils ont trouvé que la force de frottement dépend essentiellement du travail nécessaire pour déformer plastiquement les aspérités dans le contact, et que la géométrie des aspérités influe largement sur ce travail. Suivant les angles des faces des aspérités peuvent avoir lieu :

1. la déformation plastique sans arrachement de matière;
2. l'arrachement des aspérités par cisaillement;
3. le labourage, c'est à dire coupe avec formation de copeaux.

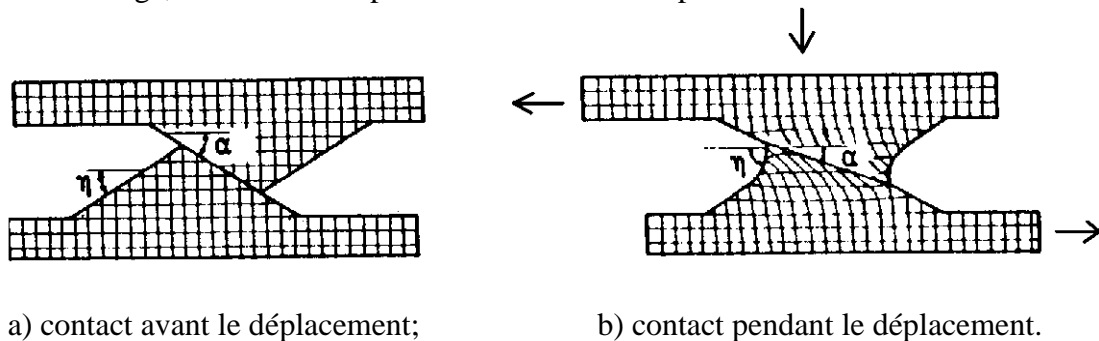


Fig. I-1 : Schéma de l'interaction entre les aspérités des premiers corps [Chal1].

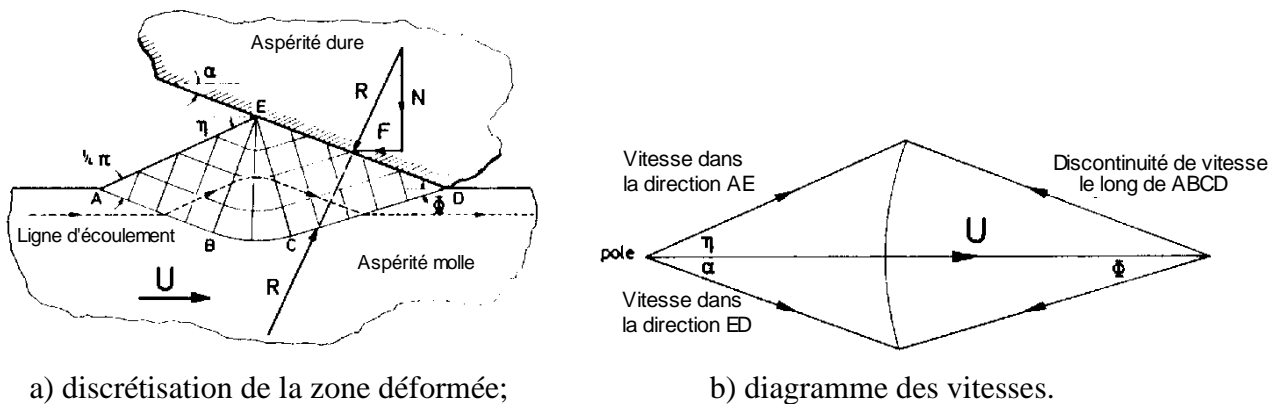


Fig. I-2 : Modèles géométriques pour le calcul par champs des lignes de glissement [Chal1].

Ils ont proposé des modèles reliant frottement et usure à la géométrie des aspérités, qui sont donnés respectivement par les relations I.1 et I.2 :

$$\mu = \tan\left(\alpha - \frac{1}{4}\pi + \frac{1}{2\cos f}\right) \quad (\text{I.1}); \quad \text{taux d'usure} = \frac{1}{\sqrt{2k}} \frac{\cos\left(\alpha + \frac{1}{2\cos f}\right)}{\cos\left[\pi + \left(\alpha - \frac{1}{4}\pi + \frac{1}{2\cos f}\right)\right]} \quad (\text{I.2})$$

f : compris entre 0 et 1, défini par l'épaisseur du "film d'interface", intègre d'autres facteurs, tel que la charge normale supportée par les aspérités...;

k : contrainte de cisaillement par écoulement.

Ces modèles comprennent quelques paramètres géométriques, quelques propriétés des matériaux des premiers corps, et d'autres paramètres qui doivent être interprétés comme des paramètres de calage. Après mise en charge, les paramètres géométriques à l'échelle du contact, ne peuvent être déterminés fidèlement, ainsi que leurs évolutions effectives sous sollicitations tribologiques.

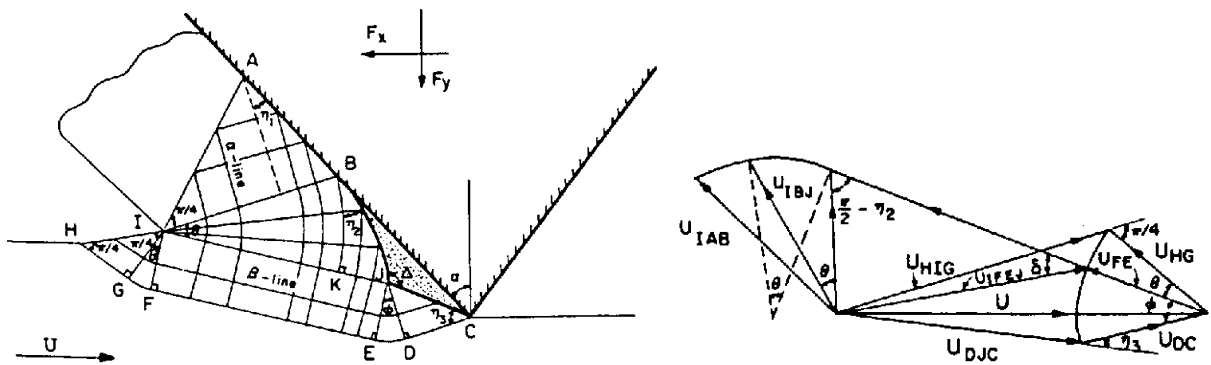
Une étude similaire a été menée par K. Komvopoulos et al [Komv1, 1986] qui ont décrit un modèle se basant sur la théorie des champs des lignes de glissement (fig. I-3) pour estimer le coefficient de frottement dans les cas du contact "sec" et en lubrification limite, lorsqu'une surface "dure" frotte contre une autre "molle". Ils ont trouvé que le coefficient de frottement μ dépend essentiellement de la géométrie des aspérités, il est donné par la relation I.3 :

$$\mu = \frac{\left[1 - \frac{3\pi}{2} + 4\alpha + \cos\alpha^{-1}(mf)\right] \cos\alpha + \sin\left[\alpha + \cos^{-1}(mf)\right]}{\left[1 - \frac{3\pi}{2} + 4\alpha + \cos\alpha^{-1}(mf)\right] \sin\alpha - \cos\left[\alpha + \cos^{-1}(mf)\right]} \quad (\text{I.3})$$

α : demi angle au sommet de l'aspérité;

m : taux de contrainte de cisaillement de la surface déformée;

f : taux de contrainte de cisaillement de l'interface.



a) discrétisation de la zone déformée;

b) diagramme des vitesses.

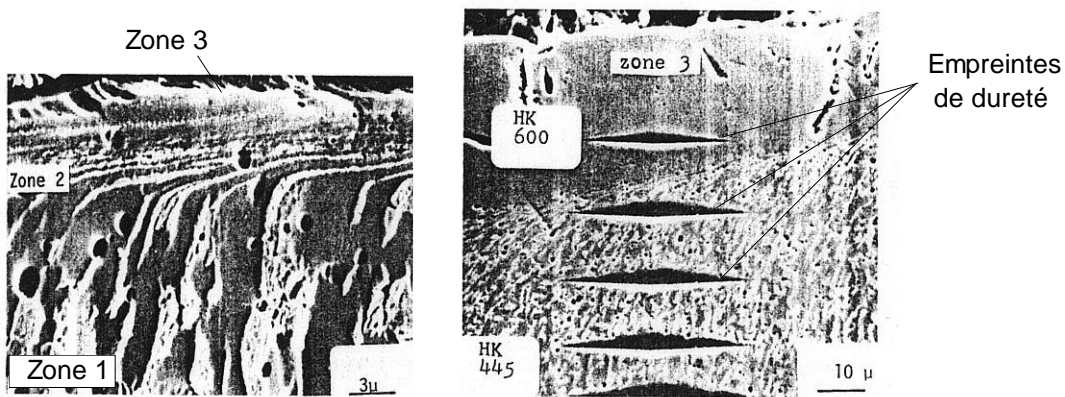
Fig. I-3 : Méthode des champs des lignes de glissement [Komv1].

Même si les auteurs affirment que la théorie proposée a été vérifiée expérimentalement, elle ne peut décrire en réalité que le premier déplacement, avant la déformation des aspérités. En effet, une fois que les aspérités changent de formes et que beaucoup d'entre elles se détachent sous forme de particules qui participent à la portance, la formule proposée n'est d'aucune utilité. Les formes des

rugosités utilisées pour vérifier ce modèle ne sont à notre avis qu'un cas particulier, qui ne peut être généralisé.

S.L. Rice, et al [Rice1, 1982] qui ont étudié les sous-surfaces des couples de matériaux en contact dans le cas de choc, de mouvement continu, et de choc puis mouvement continu, distinguent trois zones principales en sous-surface, (fig. I-4a) :

1. zone 1, la plus éloignée du contact, non affectée par les sollicitations tribologiques;
2. zone 2, celle intermédiaire, qui est déformée plastiquement, est le lieu de réorientation et d'évolution des cristallites;
3. zone 3, appelée la "surface de contact", elle diffère de la zone 1 et 2 en composition et en morphologie. En général, elle est homogène et de structure à grains fins. Ses caractéristiques morphologiques et de composition dépendent largement des matériaux, de l'environnement, de la nature du contact, des contraintes et des vitesses.



a) déformation plastique en sous-surface; b) essai de micro dureté en sous-surface.

Fig. I-4 : Modifications de sous-surface par frottement [Rice1].

La figure (I-4b) montre que la dureté augmente en direction de la surface (zone 3). Ceci est confirmé par d'autres chercheurs, ce qui explique selon eux, que les particules détachées en surface soient plus dures que le matériau de base [Antl].

Akira U. et Akira N. [Akir, 1986], ont trouvé que le frottement de deux premiers corps de même dureté, dont les surfaces sont bien nettoyées, implique leur adhérence. Avec le déplacement, les particules se détachent après la rupture des jonctions formées. Ceci s'explique par le fait qu'un "bon nettoyage" peut éliminer les couches de pollution de surface (ou écrans), permettant l'adhérence des premiers corps en contact.

T. Kayaba et al [Kaya, 1986] ont suivi à l'intérieur de la chambre d'un Microscope Electronique à Balayage (MEB), le mécanisme d'abrasion d'un pion en acier dur frottant un alliage (Cu, Zn). Les résultats obtenus leur font classer l'usure abrasive en quatre types : coupe (fig. I-5), labourage (fig. I-6), écaillage, et formation de "coin".

Le passage d'un type à un autre s'obtient à des "degrés critiques" de pénétration et selon les angles d'attaque, qui sont considérés comme les plus influents sur le coefficient de frottement et l'usure.

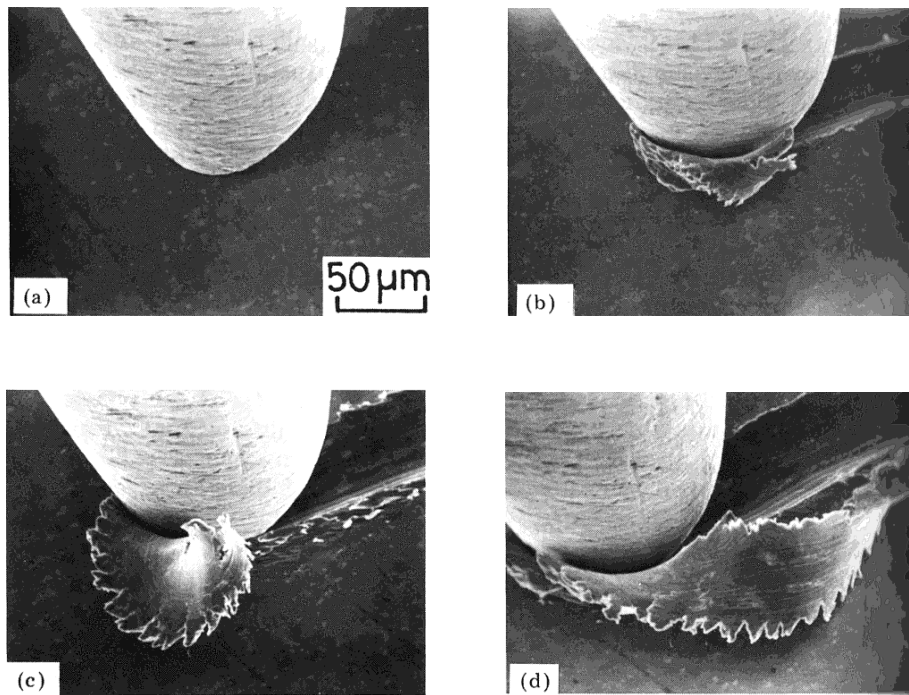


Fig. I-5 : Suivi de la coupe avec formation de copeau [Kaya].

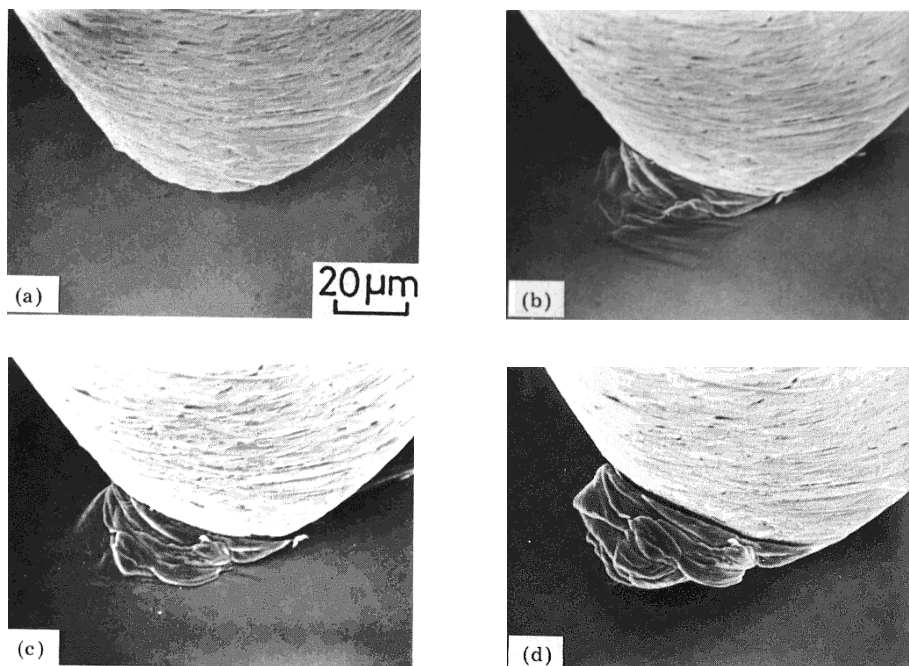


Fig. I-6 : Suivi du labourage avec formation de bourrelets [Kaya].

Dans cette étude, le contact entre deux premiers corps est simulé par un outil de coupe (fig. I-7a) qui laisse se former le copeau, ce qui est différent de la géométrie d'un contact réel (fig. I-7b).

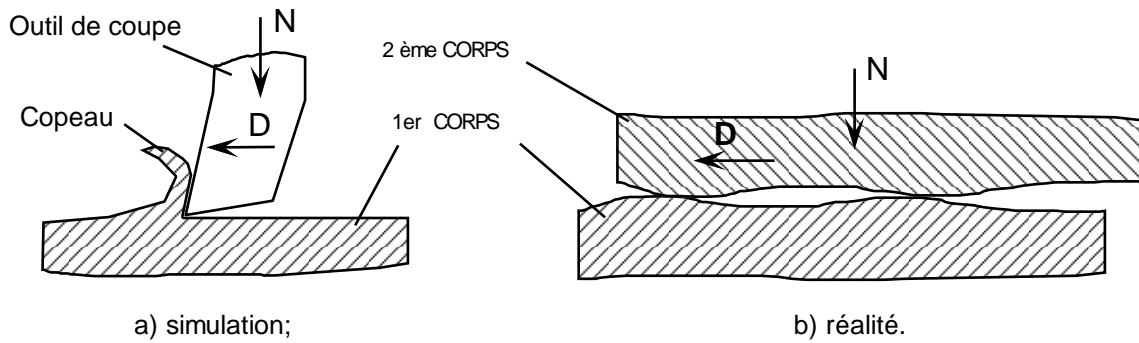


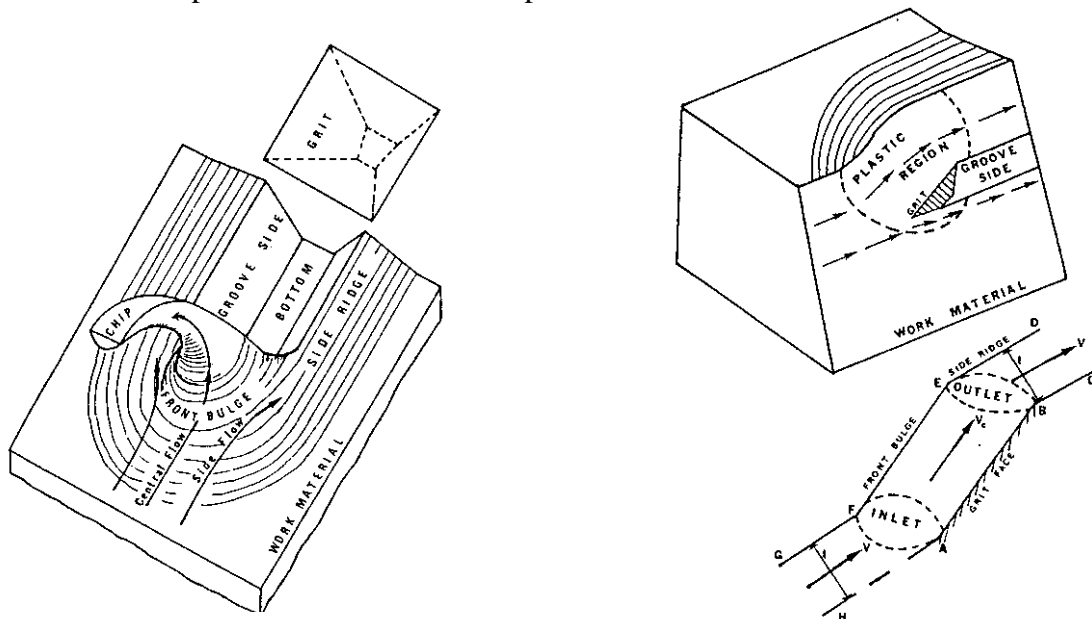
Fig. I-7 Divergence entre un contact simulé et un contact réel.

M. Abebe et F.C. Appl [Abeb, 1988] ont analysé théoriquement le processus d'abrasion en trois dimensions. Ce processus qui se traduit par la coupe et le labourage est considéré comme voisin de l'interaction d'un outil de coupe avec la pièce à travailler. Le paramètre considéré comme le plus influent est la géométrie des angles entre les différentes faces de l'outil et la surface de la pièce à travailler (angles d'attaque). Suivant les angles d'attaque il est proposé trois modèles :

1. le modèle de coupe abrasive, (fig. I-8a);
2. le modèle de labourage, (fig. I-8b);
3. le modèle d'abrasion.

L'étude est conclue par la détermination de la résultante des forces qui s'opposent au déplacement de l'outil, qui est en somme liée à la géométrie des différents angles, à la vitesse et à la charge normale.

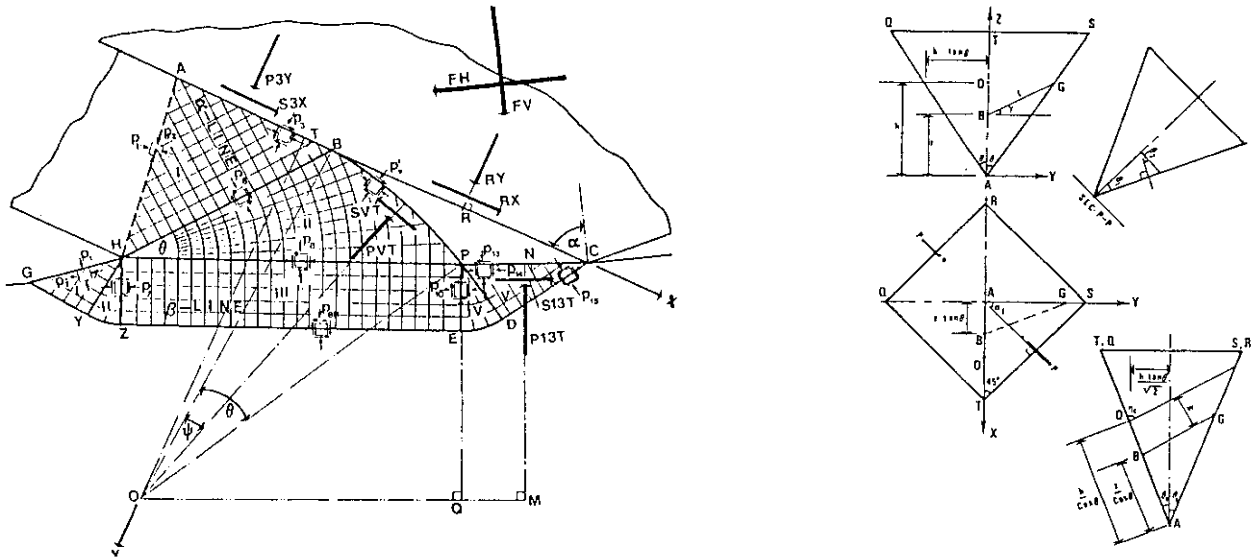
Les auteurs ne font pas référence à des essais pour valider leur modélisation.



a) schéma du modèle de coupe abrasive; b) schéma du modèle de labourage.

Fig. I-8 : Mode de détachement de particules d'après [Abeb].

Les figures (I-9a, b) qui illustrent l'utilisation de la méthode des champs des lignes de glissement dans un modèle tridimensionnel, montrent la complexité de son application à un contact dont les données géométriques sont difficilement déterminables après chargement et déplacement.



a) discrétisation de la zone déformée;

b) diagramme des vitesses.

Fig. I-9 : Méthode de champs des lignes de glissement en 3D [Abeb].

A. Magnée [Magn, 1993], a proposé une nouvelle "loi d'usure" non dimensionnelle qui généralise la loi d'Archard [Arch, 1956]. Elle prend en compte en plus des paramètres de la loi d'Archard, la forme géométrique locale du contact qui est définie par le facteur λ , les effets thermiques au niveau du contact et l'état mécano-physico-chimique de l'interface. Le modèle généralisé de cette "loi d'usure" est donnée par la relation I.4 :

$$W=C(F, L, \lambda) f(H_a/H_b) \quad (I.4)$$

C : regroupe les "variables opérationnelles" autres que la dureté des premiers corps;

F : force normale; L : amplitude du déplacement; H : dureté des premiers corps.

L'auteur suppose que le "phénomène d'abrasion" est un "phénomène alternatif", qui s'obtient selon une probabilité qui suit une fonction $\phi(x, a, \sigma)$, formulée par la relation I.5 :

$$\phi(x;a;\sigma)=\int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma(2\Pi)^{1/2}} \exp\left(-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}\right) dt \quad (I.5)$$

a : moyenne arithmétique de la variable étudiée x, σ : variance.

Cette expression représente la fonction de distribution de la densité de probabilité de la loi normale.

La variable x considérée ici, correspond au rapport H_a/H_b . Le "phénomène d'abrasion" serait alors décrit par la relation I.6 :

$$W = W_{\max} \phi(x, a, \sigma) \quad (I.6)$$

Pour le modèle non dimensionnel de sa loi d'usure, il propose d'utiliser un facteur d'abrasion "F" qui s'exprime sous la forme :

$$F = \frac{W_m}{W_r}, \quad \text{où } W_m \text{ est "l'usure" pour le matériau testé, et } W_r \text{ est "l'usure" pour un matériau standard.}$$

L'auteur confirme la validation expérimentale de son modèle du "volume spécifique d'usure" V qui est donné par la relation I.7 :

$$V = W/FL \quad (I.7), \quad W=f(H_a/H_b) \Rightarrow V = f(H_a/H_b).$$

Les essais de validation du modèle proposé, montrent deux types de dégradations, selon que le matériau est un solide élasto-plastique, ou un solide élasto-fragile. Dans le premier cas on obtient une

strie de labourage (fig. I-10a), alors que dans le deuxième, on obtient des fissures autour de la zone dégradée (fig. I-10b).

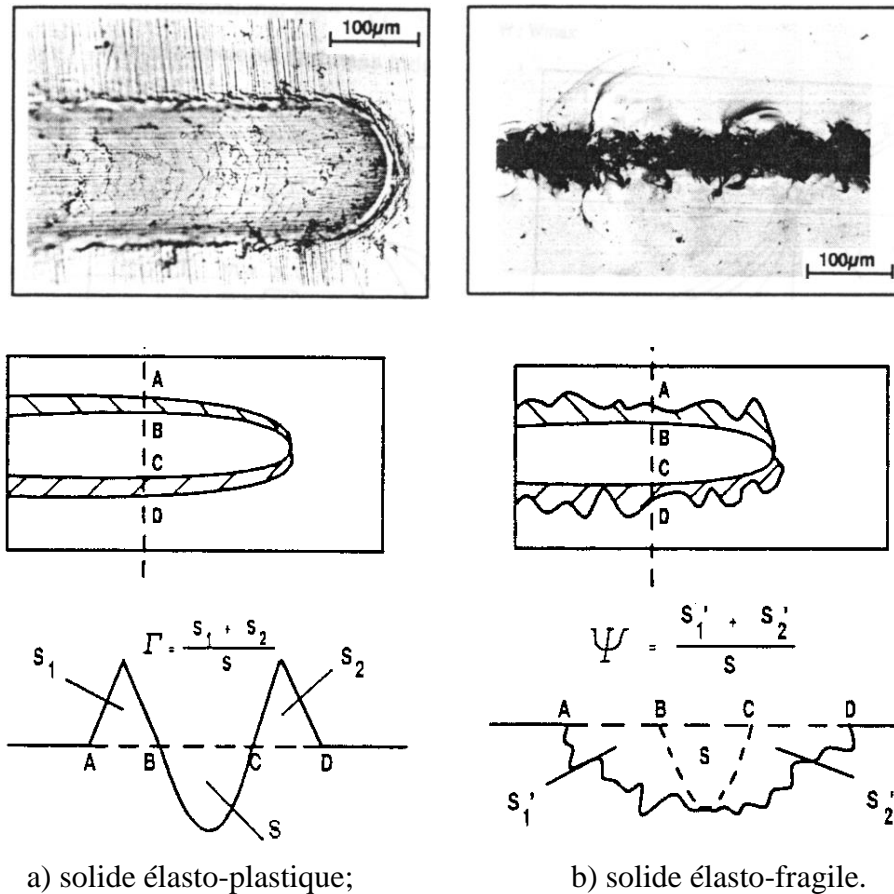


Fig. I-10 : Effet de la morphologie sur la dégradation des surfaces des premiers corps [Magn].

D'autres chercheurs utilisant les interactions entre les aspérités se rapprochent plus de la réalité en prenant en compte la géométrie de toute la surface des premiers corps, ce qui suppose, la rugosité, les formes de rugosités, et leurs fonctions de distributions, etc. Parmi lesquels, nous citons :

J.M. Halling [Hall1, 1975] a essayé de trouver un formalisme de prédiction de l'usure, dans le cas des aciers, lorsque la dégradation provient uniquement des interactions entre les aspérités. Les facteurs pris en considération sont quelques constantes du matériau et la topographie générale de la surface. L'auteur trouve que les dégradations s'obtiennent au premier cycle de frottement, ce qui est incompatible avec le mécanisme de fatigue .

L'auteur propose pour l'usure le modèle décrit par la relation I-8 :

$$V = N_w N_u N_L \gamma \int_d^\infty \frac{\bar{\epsilon}_{max}^t \Phi(z)}{N_+} \cdot dz \quad (I-8)$$

N_w, u, L, γ, Φ : paramètres de rugosité,
 ϵ : déformation effective selon Z.

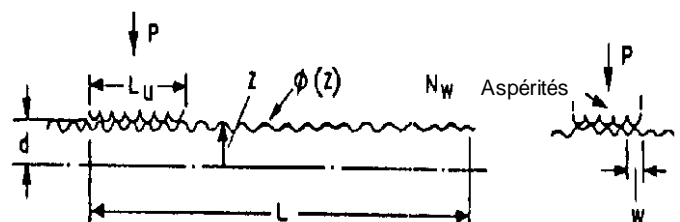


Fig. I-11 : Schéma du contact avec les paramètres géométriques [Hall1].

L'auteur regrette que ce modèle ne soit valable que pour le premier cycle avant la déformation plastique des aspérités.

P. Lacey [Lace 1990], a effectué une étude fondée sur l'influence de la rugosité et la forme des aspérités ainsi que leurs distributions sur le frottement et l'usure des métaux en lubrification limite. L'auteur a trouvé que l'usure dépend principalement de l'effort normal, des angles principaux des aspérités, de l'ondulation (λ) de la surface rugueuse, et de la ductilité de la surface.

L'auteur se trouvait en accord avec la classification des "types d'usure" de Burwell [Burw], (adhérence, abrasion, fatigue...), sur lesquels nous reviendrons.

I.2.1 Conclusion

Les études classées dans ce premier groupe sont pour la plus part une succession de reprises d'anciens travaux. Elles se rejoignent en majorité au carrefour de la méthode des champs des lignes de glissement pour décrire le détachement de particules pendant le premier déplacement relatif des premiers corps.

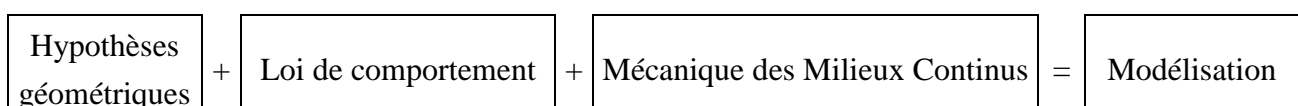
Les hypothèses de départ, supposent en général que les premiers corps aient des duretés différentes, et que la géométrie des aspérités soit connue. Les géométries "choisies" pour les aspérités, sont le plus souvent des cas particuliers, facilement simulables en fonction des approches théoriques retenues qui sont plus ou moins complexes. Ce choix conduit à des aspérités voisines de celles de particules d'abrasif. Par conséquent, contrairement à ce que suggèrent les auteurs, ces modélisations ne devraient pas être généralisées à toutes les géométries locales de contact. Nous reviendrons ultérieurement sur la notion de modélisation.

Les études qui considèrent plutôt la forme géométrique de toute la surface de contact, en prenant en compte la distribution des rugosités, sont plus proches de la réalité, bien que les lois de probabilité utilisées ne soient pas vérifiées expérimentalement pour les cas étudiés.

En résumé, l'ensemble de ces études, se limite essentiellement à l'effet géométrique pondéré par une sélection de quelques caractéristiques mécaniques des matériaux en contact. En effet chaque modèle comporte en moyenne de trois à dix paramètres, alors que l'ensemble des 3000 modèles recensés [Meng], en considère près de 100.

La diversité des modèles proposés montre que les approches "paramétriques" décrivent difficilement ces phénomènes de frottement et d'usure ou plus exactement de détachement de particules.

Les approches théoriques de ce premier groupe d'études peuvent se résumer de la façon suivante :



I.3 GROUPE 2 : DETACHEMENT DE PARTICULES APRES PLUSIEURS CYCLES

Ce groupe comprend les études du frottement où les mouvements cycliques induisent des efforts cumulatifs, assez voisin des phénomènes de "fatigue", et conduisant dans la majorité des cas à un régime de frottement "stationnaire".

K. Nakajima et Y. Mizutani [Naka, 1969] ont observé par rayons X et MEB, les changements de structure de la surface d'une éprouvette en acier à faible taux de carbone qui sont dus à des phénomènes "d'abrasion cumulée". Ils ont trouvé que la vitesse a une grande influence sur la modification de la structure métallurgique, et par la même, sur l'usure (fig. I-12). Ils constatent que le processus d'usure est principalement contrôlé par la nature de la première couche de pollution de la surface de l'éprouvette.

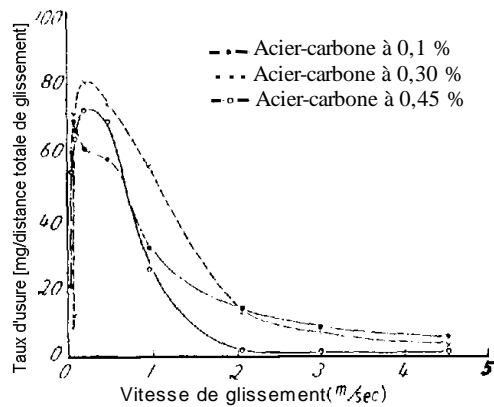


Fig. I-12 : Influence de la vitesse sur l'usure [Naka].

H. Muro et N. Tsushima [Muro, 1970] ont observé en roulement, des changements de structure métallurgique, de microdureté et la création de contraintes résiduelles dans des premiers corps en acier. Les changements de structure métallurgique (fig. I-13) sont dus essentiellement aux chargements et aux températures. La courbe montrée sur la figure (I-14) relie la microdureté en sous-surface aux contraintes résiduelles, qui se créent dès les premiers cycles de roulement, sous formes de contraintes de compression.

La température dans le contact n'étant pas mesurée, son rôle dans les changements de structure est imaginé d'après le diagramme d'équilibre des phases métallurgiques.

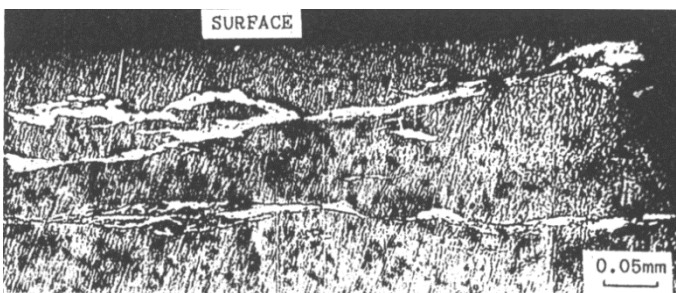


Fig. I-13 : Changement de structure par roulement [Muro].

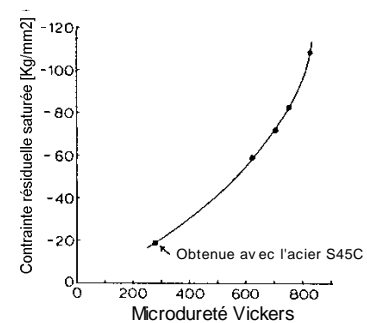


Fig. I-14 : Contraintes résiduelles en fonction de la microdureté [Muro].

T.S. Eyre et A. Baxter [Eyre, 1972] ont étudié la formation des "couches blanches" dans un contact entre deux éprouvettes en acier, (fig. I-15, 16). Ces couches blanches extrêmement dures (700-1200 Hv) sont stables thermiquement. Ils ont trouvé que la microdureté augmente avec la charge appliquée au contact. L'obtention d'une structure austénitique stable, est attribuée à des "températures flash" au niveau des aspérités en contact. Là aussi, les auteurs n'ont pas mesuré, mais imaginé ces températures flash à partir des diagrammes d'équilibre des phases.

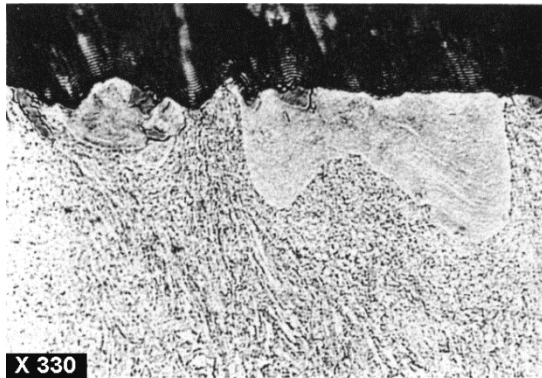


Fig. I-15 : Formation de phase blanche après frottement [Eyre].

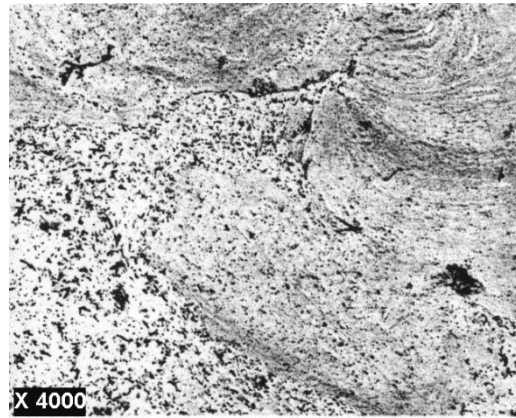


Fig. I-16 : Transformations de la structure en sous-surface [Eyre].

P.L. Hurricks [Hurr, 1973] a présenté dans son étude une synthèse de plusieurs travaux qui décrivent les facteurs les plus influents sur le frottement et l'usure des matériaux. Il cite en conséquence, que la constitution et la structure métallurgique apparaissent comme facteurs fondamentaux du comportement des corps frottants face à l'usure. Il cite en particulier : les composés interstitiels (dimension, forme et distribution), la composition chimique, les éléments d'addition, la nature de la matrice et les différents traitements thermiques. La dureté est citée [Krus] comme le paramètre le plus influent sur l'usure, (fig. I-17). D'après E. Zmihorski [Zmih], la température du traitement thermique qui a un effet direct sur la dureté, a pour conséquence un effet direct sur l'usure, (fig. I-18). L'auteur donne pour différents aciers au carbone, les traitements thermiques permettant d'accroître la résistance à l'usure. Les interprétations de ces phénomènes sont d'ordre métallurgique.

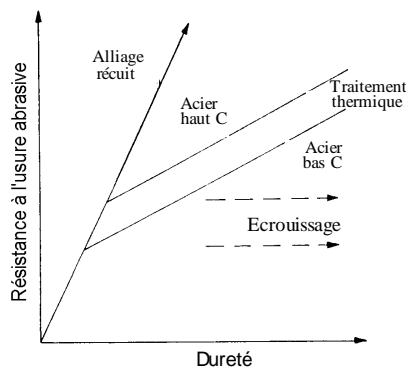


Fig. I-17 : Influence de la dureté sur la résistance à l'usure, [Krus].

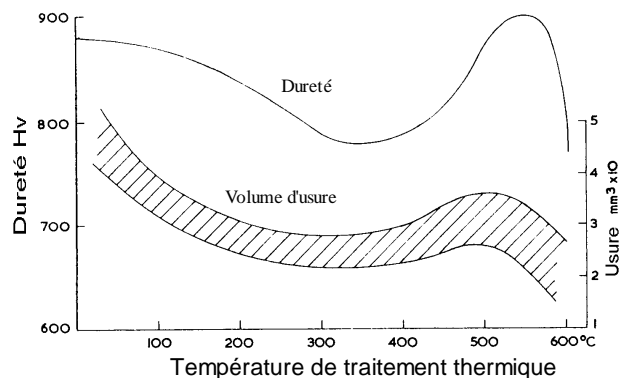


Fig. I-18 : Influence de la température de traitement sur la dureté, par conséquent sur l'usure, [Zmih].

P. Suh [Suh, 1973] a proposé une théorie de dégradation de surface des métaux, basée sur les phénomènes physiques suivants :

- le comportement des dislocations à la surface;
- la fissuration de la sous-surface;
- la formation de "pores" dans le matériau et leur regroupement ultérieur par cisaillement.

Le mécanisme de détachement de particule ainsi rencontré est appelé : *le délaminage*. Les particules formées sont des écailles, (fig. I-19, 20). Ce mécanisme peut être décrit de la façon suivante :

1. au début du glissement, le matériau qui est en surface ou l'avoisinant présente une densité de dislocations normale;
2. avec le glissement, il y a "empilement des dislocations" à des faibles distances de la surface. Ce qui mène avec le temps, à la formation de "pores" qui s'accroissent si le matériau atteint une "saturation d'empilement de dislocations";
3. avec le temps, les "pores" ainsi formés se regroupent par cisaillement du matériau, ce qui conduit à la formation de fissures parallèles à la surface de frottement;
4. quand ces fissures atteignent les longueurs critiques, le matériau se cisaille en produisant des particules sous forme d'écailles.

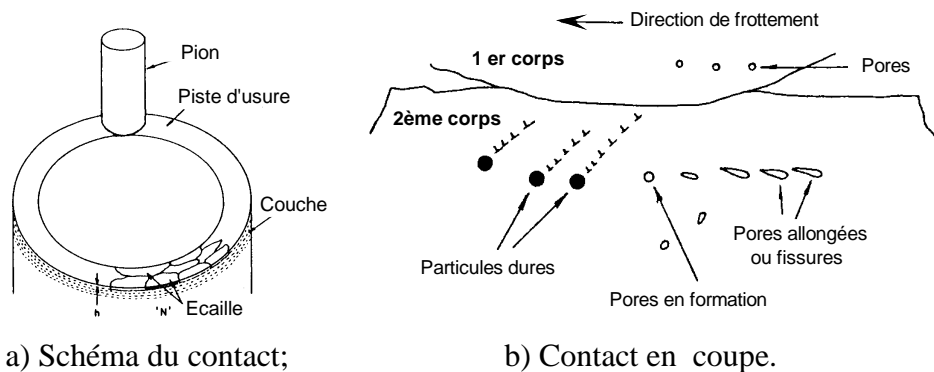


Fig. I-19 : Schéma représentatif du mécanisme de délaminage [Suh].



Fig. I-20 : Coupe métallographique montrant le délaminage [Suh].

D.R. Rigney et J.P. Hirt [Rign1, 1979] ont décrit un modèle de détachement de particules lors du frottement des métaux après plusieurs cycles. Ce modèle est basé sur le travail plastique déployé dans la "peau" des corps en contact. A partir du travail plastique ils estiment les valeurs du coefficient de frottement d'après la relation I-10 :

$$\mu = (l \cdot p \cdot \tau \cdot \sigma) / N \quad (\text{I-10})$$

- l : largeur de déformation; p : profondeur de déformation;
 τ : contrainte de cisaillement; σ : résistance au cisaillement; N : effort normal.

Ce modèle ignore le rôle d'autres paramètres, tels que la vitesse de déplacement, qui sont prépondérants dans d'autres travaux.

T. Akagaki et K. Kato [Agak, 1987], ont observé en lubrification limite un mécanisme de génération de particules sous formes d'écailles très minces, qui serait différent du délaminage proposé par P. Suh [Suh]. Dans le cas du frottement d'une surface "relativement rugueuse", les aspérités se déforiment et s'écoulent plastiquement après plusieurs passes, ce qui fait que les surfaces frottantes se lissent. Selon la direction du frottement par rapport à la direction des aspérités, ils ont observé deux types d'écoulement de matière, vers l'avant du contact (fig. I-21), et latéralement (fig. I-22). Dans le cas du frottement d'une surface rugueuse contre une surface lisse, l'écoulement plastique des aspérités de la surface rugueuse, conduit au détachement de particules, qui peut conduire au labourage de la surface lisse (fig. I-23). Les auteurs trouvent qu'en général, dans ces conditions, les particules détachées ont la forme d'écailles ou de "feuillet".

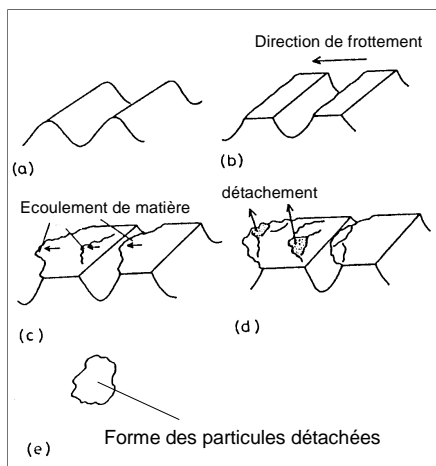


Fig. I-21 : Direction des rugosités perpendiculaire à celle du frottement [Agak].

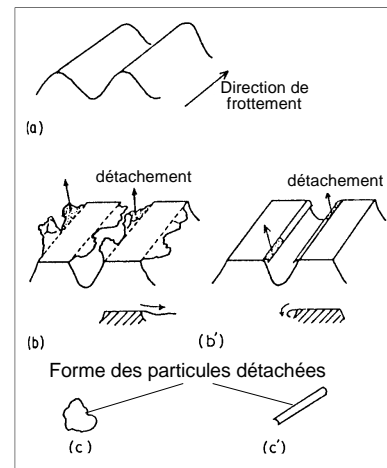


Fig. I-22 : Direction des rugosités confondue avec celle du frottement [Agak].

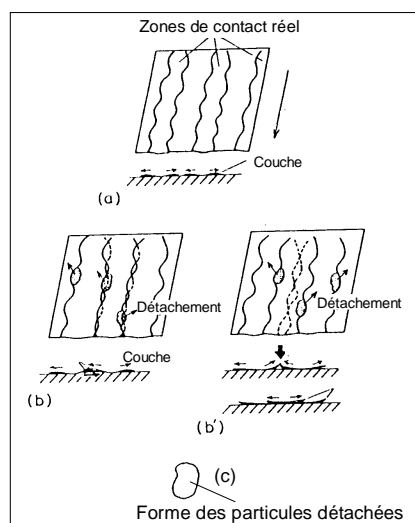


Fig. I-23 : Trace de frottement d'une surface rugueuse contre une surface lisse [Agak].

K.M. Kong et J.T. Song [Kong, 1990] ont étudié la relation entre le "taux d'usure" défini par la perte de matière, et l'écoulement plastique dans la zone de sous-surface dans le cas de roulement d'une éprouvette en acier commercial sur une éprouvette en alliage (Fe-Cr-Ti) à structure perlitique fine. Les auteurs sont en accord avec Rice [Rice1] pour la division de la sous-surface en trois zones. Ils ont trouvé qu'avec le chargement, l'épaisseur de la zone plastifiée augmente, ce qui produit la formation de "pores" et de micro-fissures à l'interface des zones écrouies et non écrouies. En général, la charge et la vitesse font augmenter l'usure, l'épaisseur de la zone plastifiée et la rugosité. Dans les mêmes conditions de frottement, l'alliage Fe-Cr-Ti a montré une meilleure tenue à l'usure que l'acier commercial.

B.K. Prasard, et S.V. Prasard [Pras, 1991] ont utilisé des éprouvettes de frottement en acier à 0,5% de Carbone ayant subi différents traitements thermiques en vue d'obtenir des structures métallurgiques différentes. Les conditions d'essais retenues, font dire aux auteurs que le mécanisme de détachement de particule s'effectue par un mécanisme d'abrasion contrôlé par les propriétés de "sous-surface", elles mêmes contrôlées par la structure métallurgique du volume et la dureté.

Leur étude a montré aussi que selon le traitement thermique, la résistance à l'abrasion varie largement, et que lors du frottement, la sous-surface de l'éprouvette abradée présente une microstructure plus fine, avec formation d'une "couche blanche".

D.A. Rigney [Rign2, 1992] a étudié d'une façon générale les différents mécanismes de détachement de particules en prenant comme variables : la charge, la vitesse, la distance de glissement, la géométrie des éprouvettes, leur composition chimique, leur microstructure, leur dureté, le revêtement et l'environnement. Les moyens d'analyse et du suivi sont : la microscopie optique, électronique et à effet tunnel, la diffraction X, la spectroscopie des électrons Auger, la micro-dureté et la profilométrie.

L'auteur trouve qu'en général la déformation plastique et le changement de structure sont toujours présents, et sont à la base du détachement de particules. Le frottement crée des "couches de surface" dont les microstructures sont différentes de celle du matériau initial. L'environnement provoque des réactions qui, selon le matériau et les conditions expérimentales peuvent conduire à l'usure douce ou sévère, c'est à dire admissible, ou non.

B.M. Shukla et al [Shuk, 1992] se basent sur les contraintes résiduelles pour décrire un processus de détachement de particules lorsque les conditions de contact conduisent aux déformations plastiques. Ils estiment que la résistance à l'usure décroît avec l'augmentation des contraintes résiduelles, et que leur présence favorise l'amorçage et la propagation des fissures.

D'après leur étude, les particules qui se présentent sous forme de feuillets enroulés sur eux mêmes, se forment une fois les particules détachées, sous l'action des contraintes résiduelles accumulées lors du détachement. Ils ont trouvé que le diamètre des enroulements des particules estimés théoriquement corrèle avec ceux mesurés in situ avec un MEB.

O. Vingsbo et al [Ving, 1992] ont étudié les mécanismes de détachement de particules sous des sollicitations de fretting ou petits débats, avec différents matériaux de différentes duretés. Ils partent du constat que pour les conditions d'essais, les fissures qui s'amorcent de part et d'autre des zones de contact, se propagent obliquement vers le centre de la zone du contact. Du fait du mouvement alternatif, les fissures peuvent se rejoindre et un fragment de matière peut se détacher en laissant un "trou conique".

M. Mizumoto et K. Kato [Mizu, 1992] ont réalisé des essais de frottement pion/disque sur un mini-tribomètre à l'intérieur de la chambre du MEB, entre des premiers corps ayants des aspérités abrasives. Les particules détachées, qui dans les faits (fig. I.-24) plutôt "éjectées", sont comptées à l'aide d'un compteur à LASER. Ils ont déduit deux fonctions de densité de probabilité Φ_1 et Φ_2 liées aux nombres et aux dimensions des particules détachées selon les conditions de contact. Ces deux fonctions Φ_1 et Φ_2 sont limitées par la dimension des particules détachées de $0,4 \mu\text{m}$. La signification physique de cette dimension assez particulière, n'a pas été explicitement évoquée. Les particules détachées comptabilisées sont considérées ici comme particules d'usure. Les auteurs ont trouvé que le nombre de particules détachées augmente avec le degré de pénétration du pion, et par la même, fait augmenter le coefficient de frottement.

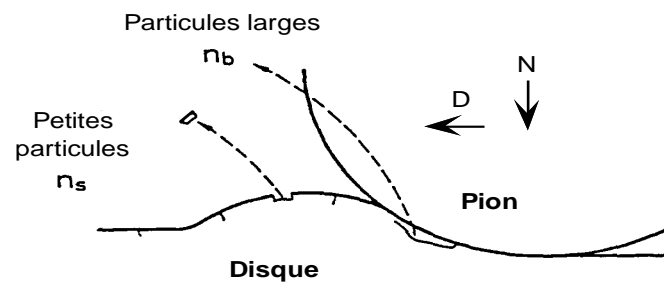


Fig. I-24 : Mécanisme de détachement de particules selon [Mizu].

Y. Kimura et al [Kimu, 1992] suggèrent que pour des sollicitations tribologiques, la mécanique de la rupture, est inefficace pour prédire le facteur d'intensité de contrainte à partir duquel il y aura fissuration en sous-surface. Selon eux, les valeurs de contraintes calculées sont généralement trop faibles pour permettre l'amorçage de fissures sous des charges raisonnables. Ils ont trouvé que les particules détachées ont la forme de "paillettes", obtenues par des ruptures tangentielles dans le matériau, se produisant à la surface frottante. L'influence du coefficient de frottement est plus importante sur le coefficient de concentration de contrainte K_{I} , qui gouverne la propagation des fissures, que sur K_{II} .

S.L. Rice et al [Rice2, 1992] ont développé un modèle qui prédit en régime permanent le coefficient de frottement pour deux surfaces élasto-plastiques en contact glissant. Ils prennent en considération quelques propriétés mécaniques et les caractéristiques de rugosité des surfaces des premiers corps ainsi que la quantité et les dimensions des débris piégés. Ils ont trouvé que la contribution de l'adhérence entre les premiers corps est pratiquement négligeable.

Le modèle proposé pour la prédiction du coefficient de frottement μ , est donné par la relation I.11 :

$$\mu = \frac{S_1}{P} \left[(1 - \beta) A_a \cdot f \left(\frac{\tau_{a1}}{S_1} \right) + \beta A_a + A_{d1} \right] + \frac{S_2}{P} \left[(1 - \beta) A_a \cdot f \left(\frac{\tau_{a2}}{S_2} \right) + \beta \cdot A_a \cdot f \left(\frac{S_1 \cdot H_1}{S_2 \cdot H_2} \right) + A_{d2} \right] \quad (I.11)$$

$S_{1,2}$: contrainte de cisaillement dans les premiers corps; H_1, H_2 : dureté des premiers corps;
 A_a, A_d : aires des aspérités et des débris en contact; f : fonction calculée par itération; P : charge normale;
 β : pourcentage des aspérités en contact qui subissent la contrainte de cisaillement τ , par frottement.

Cependant, les auteurs mentionnent d'autres facteurs qui ont une grande influence sur le frottement mais qui n'apparaissent pas explicitement dans leur modèle. Leur influence est supposée être prise en compte indirectement par le biais des facteurs apparents dans le modèle. Parmi les facteurs non apparents, ils citent : l'aire de contact nominale, le module de Young des premiers corps, le coefficient de Poisson, le coefficient d'adhésion, la géométrie des surfaces, la densité des débris K_d qui est le nombre de débris par m^2 , le pourcentage des débris qui labourent les premiers corps, et l'angle d'orientation de la force de réaction qui résulte de ce labourage.

Dans le cas d'un contact acier/acier, avec une densité des débris nulle ($K_d=0$), donc sans détachement de particules, les auteurs obtiennent un coefficient de frottement très faible et stable (0,34). Avec l'augmentation de la densité de débris, le frottement augmente proportionnellement dans le temps. Il se stabilise à une valeur limite qui, selon les auteurs, est une conséquence de la répartition de la charge entre les aspérités et les débris (fig. I-25).

La figure (I-26), montre les courbes du coefficient de frottement μ qui ont les mêmes allures dans le temps, en fonction de valeurs aléatoires de densités de débris K_d et de diamètres D des débris considérés de forme sphérique. Cependant, l'interprétation avancée des variations de ces courbes ne se réfère qu'au comportement dynamique du simulateur utilisé.

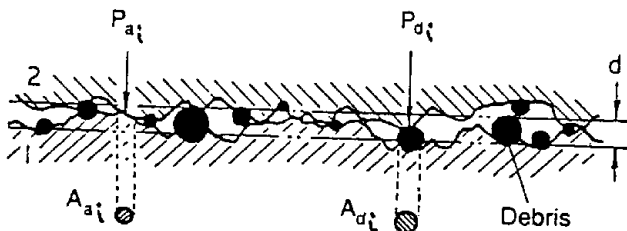


Fig. I-25 : Schéma du contact montrant les aires des aspérités et des débris [Rice2].

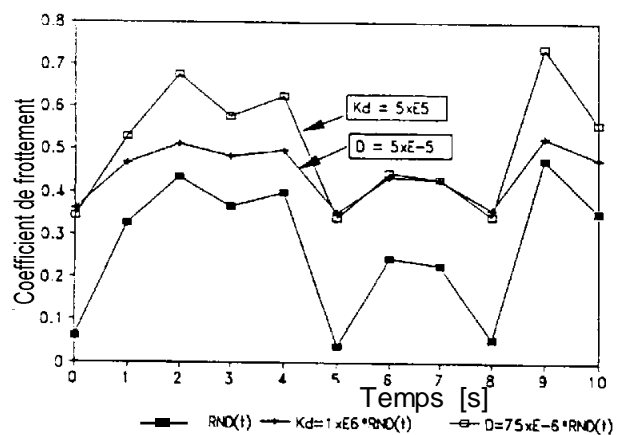


Fig. I-26 : Coefficient de frottement en fonction de valeurs aléatoires de K_d et D [Rice2].

Cette étude est l'une des rares qui tentent de prendre en compte le rôle des particules détachées et piégées, sur le comportement tribologique du contact.

I.3.1 Conclusion

Les études classées dans ce groupe ne considèrent plus les formes individuelles des aspérités notamment leurs "angles d'attaque", mais prennent en compte l'effet du nombre de cycles, bien que cela ne soit pas toujours clairement défini. Elles s'appuient sur le contrôle du détachement de particules, à partir de mécanismes de "fatigue" de la peau des premiers corps.

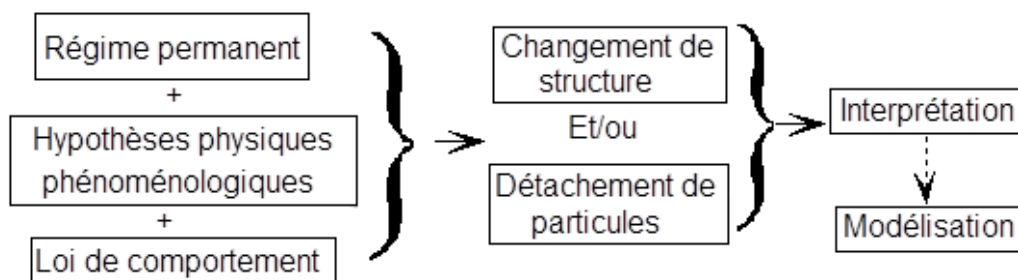
Selon les hypothèses et les conditions de contact adoptées, les auteurs proposent des interprétations et/ou des formalismes pour les phénomènes du frottement et d'usure, qui conduisent à différentes morphologies de particules. Nous retrouvons souvent un amalgame entre particule détachée, dégradation de surface et "usure", qui a pour origine le flou qui entoure la définition de l'usure sur laquelle nous reviendrons.

Parmi ces études, certaines partent du suivi de la morphologie des surfaces pour établir les constats, puis les interprétations pour aller vers un formalisme. Alors que d'autres, considèrent plutôt la sous-surface, et privilégient les effets de certaines "propriétés métallurgiques" des premiers corps. Ces approches assez physiques, n'affichent cependant pas un réel souci de corrélation entre les propriétés prises en compte, et l'enchaînement de leurs conséquences tribologiques. Par exemple, la dureté qui est considérée comme très influente sur le frottement et l'usure, dépend du matériau, mais aussi de sa structure, qui elle-même dépend du traitement thermomécanique... Ce qui explique que certains auteurs raisonnent en termes de structures, d'autres de dureté, d'autres de traitement thermique...

Cependant, les études de la sous-surface convergent vers les évolutions de certaines propriétés du matériau au cours du frottement, ce qui implique une dynamique à prendre en compte par les modélisations. Si les évolutions de structure constatées sont décrites par référence à des évolutions connues, elles n'y sont jamais totalement assimilées, ce qui sous-entend une spécificité liée aux sollicitations tribologiques : pression locale de contact et effort tangentiel important.

De la même manière que pour le premier groupe d'études, les modèles proposés ici, ne tiennent compte que de certains paramètres jugés prépondérants. Les modèles proposés, quand ils sont "dits vérifiés", ne le sont évidemment que pour les hypothèses et des conditions d'essais très restreintes pas toujours totalement définies dans les textes.

Les approches théoriques de ce deuxième groupe d'études peuvent se résumer de la façon suivante :



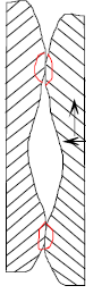
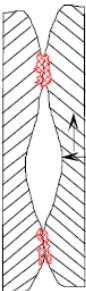
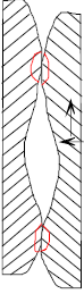
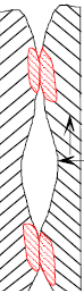
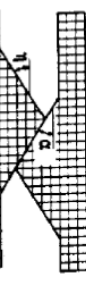
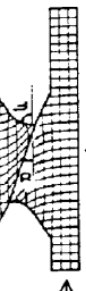
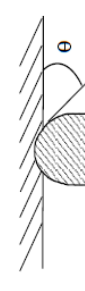

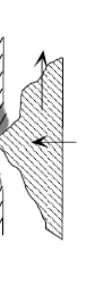

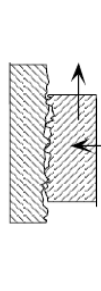

I.4 DISCUSSION

I.4.1 Généralités

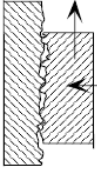
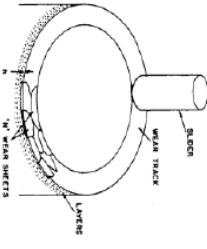

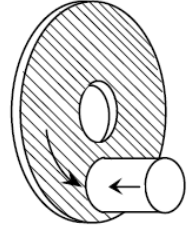
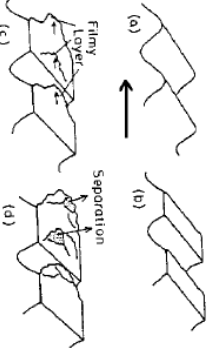
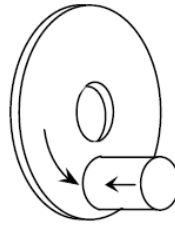
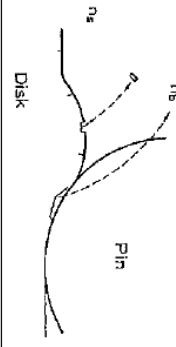
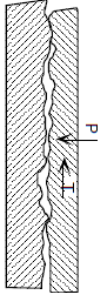
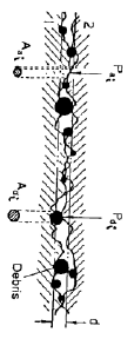
Nous rappelons que les études citées ici (tab.I.1 et I.2) ne représentent que les grandes tendances "classiques" qui apparaissent dans notre structuration de cette bibliographie. D'autres études qui ne sont pas citées ici, conduisent à d'autres modèles avec d'autres paramètres, voire d'autres interprétations, tout en demeurant dans le droit fil des études citées. La majorité des études, traite le problème du détachement de particules sous un angle spécifique, soit mono-disciplinaire, soit en considérant quelques facteurs jugés prépondérants en négligeant les effets d'autres. Seul S.L. Rice [Rice2] affiche clairement que son modèle ne prend en compte que quelques paramètres, et qu'il sait pertinemment que d'autres sont tous aussi importants. Dans les faits, regrouper des paramètres sans essayer de généraliser l'approche, n'est qu'une mise en forme des résultats. En effet, Suite à un essai, il est toujours possible de trouver des relations entre différents paramètres mesurés. Dans la mesure où, modéliser n'est pas décrire, il n'est pas gênant de procéder ainsi, et le modèle n'est pas obligé de prendre en compte les paramètres physiques effectifs de l'application (modèle analogique). En revanche, lorsque le modèle est utilisé pour interpréter physiquement les résultats, il est possible de s'interroger sur la logique suivie.

Les études classées dans le groupe 1 se sont focalisées sur l'aspect géométrique des aspérités, qui sont schématisées comme des "pics", alors qu'en réalité les rugosités des surfaces ressemblent plutôt à des "dunes". Un modèle construit principalement sur les interactions de rugosités, même s'il est "simulable et vérifiable" dans certains cas, ne peut décrire en fait que l'état initial qui est bouleversé dès le premier cycle de frottement. Cependant, l'idée que nous approuvons est l'importance de l'étude des réponses des premiers corps dès leur premier déplacement, qui est une phase de la vie d'un contact, déterminante pour sa vie ultérieure.

Les études classées dans le groupe 2 considèrent quant à elles le régime permanent de la vie d'un contact, où le détachement de particules se produit après plusieurs cycles de frottement. Ces études sont à notre avis les plus proches de la réalité, bien que les modèles qui ont été présentés jusqu'ici soient très restrictifs et ne prennent en compte que quelques paramètres jugés plus importants que d'autres sans véritables critères de choix. Parmi ces études, certaines se limitent à l'analyse topographique de la surface pour essayer de décrire et/ou prédire les phénomènes de frottement et de l'usure. D'autres, s'intéressent plus à la sous-surface, qui, en général utilisent la coupe métallographique transversale pour visualiser les transformations pouvant avoir lieu dans cette zone. Les études des phénomènes se produisant à la surface et en sous-surface sont en effet complémentaires, leur couplage est donc indispensable. Les études de la sous-surface ont révélé en général des transformations de structure dans les zones déformées, l'augmentation de leur dureté, et la formation dans certains cas de "phase blanche". Dans certaines conditions, des fissures naissent en surface, et se propagent suivant des angles qui dépendent des sollicitations imposées.

Auteurs	Condition/Phénomène	Type de contact	Résultats	Coefficient de frottement	Usure
Bowden et Tabor [Bowd]	Adhérence entre premiers corps, puis cisaillement de la jonction ainsi formée			$\mu = f(N, D, Ar, V, T)$	$u = f(N, D, Ar, V, T)$
A. Green [Gree]	Déformation plastique des jonctions.			—	—
J.M. Challen [Chall.2]	Déformation plastique des jonctions, méthode des champs des lignes de glissement			$\mu = \tan \left(\alpha - \frac{1}{4}\pi + \frac{1}{2\cos f} \right)$	$u = \frac{1}{\sqrt{2k}} \frac{\cos \left(\alpha + \frac{1}{2\cos f} \right)}{\cos \left[\pi + \left(\alpha - \frac{1}{4}\pi + \frac{1}{2\cos f} \right) \right]}$
M. Abebe et al [Abeb] — T. Kayaba et al [Kaya]	Selon l'angle d'attaque : - coupe, - labourage, - abrasion.			$\mu = f(\theta, \dots)$ θ : angle d'attaque	—
Konvopoulos [Konv]	Surface dure contre surface molle, méthode des champs des lignes de glissement			$\mu = \frac{\left[\frac{1-3\pi+4\alpha+\cos\alpha^{-1}(m/f)}{2} \right] \left[\cos\alpha + \sin\alpha + \cos^{-1}(m/f) \right]}{\left[\frac{1-3\pi+4\alpha+\cos\alpha^{-1}(m/f)}{2} \right] \left[\sin\alpha - \cos\alpha + \cos^{-1}(m/f) \right]}$	—
J. M. Halling [Hall.2]	- interaction des aspérités - méthode des champs des lignes de glissement			—	$u = N_w N_u N_l \int_d^{\infty} \frac{e^{-z}}{N_+} \Phi(z) dz$

Tab. I.1 : Résumé de quelques études de détachement de particules présentées en bibliographie, groupe : 1.

Auteurs	Conditions/Phénomènes	Type de contact	Résultats	Coefficient de frottement	Usure
P. Lacey [Lacey]	- surface dure contre surface molle, - influence des rugosités, - angle d'attaque.		- interaction des rugosités, - mécanismes "classiques" d'usure	$\mu = f(L, N, T, \sigma)$	$u = f(Ra, N, \theta)$
N.P. Suh [Suh]	- fatigue cyclique, - délaminage.			—	—
Agakaki et al [Agak]	- fatigue cyclique, - Lubrification limite, - écaillage ≠ délaminage			—	—
Mizumoto et al [Mizu]	Fonction de distribution des dimensions des particules détachées Φ . Ejection des particules des boudoirs à l'avant du pion.			—	—
S.L. Rice et al [Rice2]	La charge est supportée par les aspérités et les particules détachées. (débris).			$\mu = \frac{S_1}{P} \left[(1 - \beta) \cdot A_a \cdot f \left(\frac{\tau_{a1}}{S_1} \right) + \beta A_a + A_{a1} \right] + \frac{S_2}{P} \left[(1 - \beta) \cdot A_a \cdot f \left(\frac{\tau_{a2}}{S_2} \right) + \beta \cdot A_a \cdot f \left(\frac{S_1 \cdot H_1}{S_2 \cdot H_2} \right) + A_{a2} \right]$	—

Tab. I.2 : Résumé de quelques études de détachement de particules présentées en bibliographie, groupe : 2.

A mi-parcours de ce travail, nous avons tenté de regrouper les facteurs les plus importants "recueillis" dans la bibliographie. Le classement le moins décevant se compose de trois familles (tab. I.3) :

- facteurs liés aux premiers corps;
- conditions de contact;
- autres...

I.4.2 Facteurs influents

I.4.2.1 Premiers corps

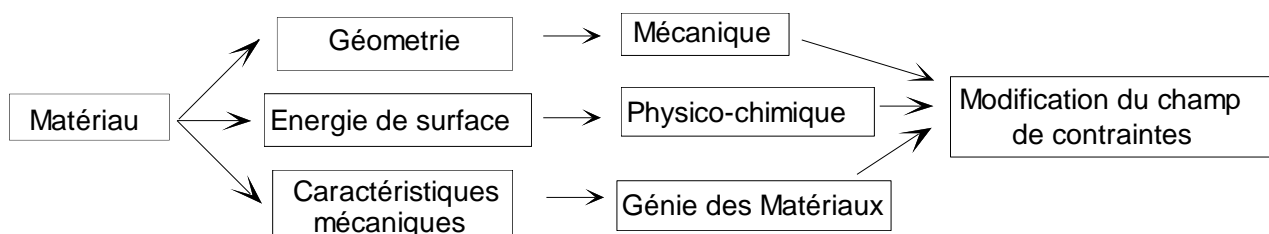
Le plus souvent, c'est le matériau de l'un des deux corps en contact qui est considéré comme prépondérant. Partant de là, les travaux mettent en avant les propriétés :

1. chimiques : éléments constitutants, structures, etc.;
2. mécaniques : modules élastiques, limites élastiques, dureté...;
3. physiques : dislocations, conductivité thermique, températures de transition, notamment pour les polymères [Guet], etc.

L'état de surface se caractérise principalement par la rugosité (Ra, Rt, Rz...) et le nettoyage.

Il est évident que cette liste de paramètres pouvait être établie à priori, sans passer par l'analyse d'essais tribologiques. Nous mettons une nouvelle fois en évidence "le manque de généralité" dont parlait Maurice Godet, avec pour corollaire l'existence "d'îlots de compétence sur un matériau, voire même sur l'une de ces propriétés, devenant la grille de lecture d'un essai". Pour essayer de faire émerger cette généralité, nous avons essayé de relire une partie de la bibliographie en cherchant à faire apparaître des relations de causes à effets sous l'angle de la mécanique des contacts, en se limitant au détachement de particules. Le détachement de particules est alors relié au champ de contraintes dans la peau des premiers corps. Ce champ de contraintes (Tab. I-2) dépend :

- de la macro et de la micro-rugosité, qui définissent les zones de contacts : aspect mécanique;
- de l'adhérence des surfaces, qui en l'absence d'un accrochage mécanique dû aux rugosités définit les forces tangentielles locales : aspect physico-chimique;
- des caractéristiques thermomécaniques des premiers corps : aspect matériau;
- -



Tab. I.2 : Paramètres influents sur le champ de contraintes.

Les publications ne permettent pas de collecter cet ensemble d'informations, ce qui vérifiait le jugement de Maurice Godet : "la bibliographie contient tout et son contraire".

I.4.2.2 Conditions de contact

Les facteurs de conditions de contact les plus cités sont, la charge normale P et la vitesse de déplacement V, auxquels s'ajoutent la température et le milieu ambiant. Même si cela n'est pas explicitement écrit, le produit "P.V" reste le plus souvent cité après la nature des matériaux. Cela peut se comprendre dans la mesure où ce produit est homogène à une puissance qui pourrait conduire à un apport d'énergie nécessaire à la destruction des surfaces. La signification physique des températures trouvée dans la bibliographie est assez floue, car il s'agit de température de surface qu'il conviendrait de mesurer entre deux pièces en mouvement. Par conséquent, toutes les difficultés expérimentales sont réunies ! Aussi, les températures sont souvent estimées par :

- extrapolation de mesure avec des thermocouples placés à différentes profondeurs sous la surface;
- mesure infra-rouge en sortie de contact;
- mesure infra-rouge au travers d'orifice percé dans l'un des premiers corps;
- à partir des températures tabulées de changement de structures connues; c'est entre autres ce qui a conduit à imaginer la notion de "température flash".

A notre sens, ce qui est gênant dans cette dernière reconstitution de la température de surface, c'est qu'elle se fonde sur des températures de changement de structures obtenues sans sollicitations mécaniques, notamment sans pression, alors que les pressions de contact sont élevées.

De la même manière, le rôle du type de mouvement, continu, cyclique, est oublié ou ignoré, alors qu'il joue un rôle important sur la circulation des 3ème corps dans le contact [Gode1].

Premiers corps	Matériau	Propriétés Mécaniques
		Propriétés Physiques
		Propriétés Chimiques
	Surface	Géométrie
		Nettoyage
		Rugosité
Conditions de contact	Charge	F_N
		F_T
	Déplacement	Amplitude
		Vitesse
		Continu
		Cyclique
	Ambiance	Température
		Humidité
		Agressivité
	Autres	Facteurs ignorés ou d'influences mals connues

Tab. I.3 : Familles des facteurs les plus influents sur le frottement et l'usure.

I.4.2.3 Autres facteurs

Si nous suivons la chronologie de l'évolution du nombre de facteurs pris en compte, nous remarquons une croissance. Cette croissance est liée à l'utilisation de nouveaux moyens d'analyse qui fournissent de nouveaux paramètres et de nouvelles échelles d'études. D'autres facteurs peuvent donc, être jusqu'à nos jours ignorés ou dont l'influence est mal connue ou non détectable, et qui peuvent avoir des effets directs ou indirects sur la vie d'un contact.

I.4.2.4 Paramètres statiques ou dynamiques ?

En dehors des mesures dynamiques de la force tangentielle, la majorité des études ne fait référence qu'à des paramètres mesurés avant ou après essais, c'est-à-dire des paramètres statiques alors que les sollicitations tribologiques sont dynamiques.

Si les mesures dynamiques des caractéristiques de matériaux se développent, elles ne sont pas réalisées dans les conditions de sollicitations tribologiques. Cette différence se situe principalement au niveau des pressions et de l'interactivité entre les paramètres.

Par conséquent, la question de fond demeure : quelles sont les propriétés des matériaux à prendre en compte ?

I.4.3 Une autre démarche

I.4.3.1 Introduction

L'inventaire de certains paramètres qui interviennent dans la vie d'un contact et la corrélation de quelques uns d'entre eux sont insuffisants tant pour décrire la vie d'un contact que pour la modéliser correctement. Les études paramétriques ayant elles aussi révélé leurs limites, Maurice Godet a trouvé "plus réaliste de hiérarchiser les contributions des différents paramètres afin d'aborder un problème de frottement et d'usure avec une approche structurée et objective". Cette approche dans un premier temps, essentiellement phénoménologique a nécessité le développement, au LMC, et dans des laboratoires partenaires, d'outils d'investigations et de concepts structurants. Il s'agit bien évidemment de la notion de troisième corps, puis de triplet tribologique, de mécanismes d'accommodations de vitesse, de circuit tribologique... Ces dernières notions ont été introduites en parallèle de ce travail et se sont affinées au cours du temps, (cf. Avis au lecteurs).

I.4.3.2 Troisième corps

Pour la construction des pyramides, les égyptiens ont fait appel à la tribologie, en utilisant des lubrifiants liquides et des rouleaux [Hall2] pour transporter leurs matériaux. Une simple réflexion sur le fonctionnement d'un contact aurait déjà pu mener à comprendre que le déplacement relatif de deux corps en contact en nécessitait un troisième.

J. Caubet en 1966, amorça ce raisonnement que M. Godet [Gode1, Gode2] concrétisa par la notion de troisième corps en 1970, ce qui fournit le concept de base d'un nouvel axe de recherche en Tribologie [Play1, Play2]. Le troisième corps fournissait en quelque sorte le "degré de liberté manquant pour aborder la tribologie unitairement, c'est-à-dire en structurant la pluridisciplinarité" (Maurice Godet).

Un troisième corps (fig. I-27) peut être une couche mince, ou des particules qui séparent les deux premiers corps en contact. Il peut être formé naturellement, in-situ, par : détachement de particules, réactions chimiques (oxydes...), ou introduit artificiellement sous forme d'un lubrifiant fluide ou solide.

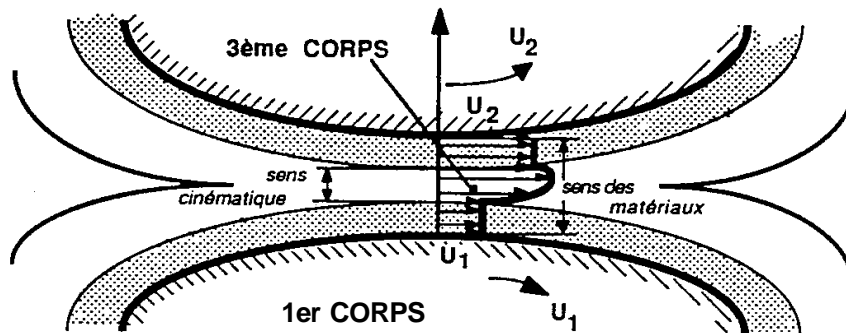


Fig. I-27 : Coupe d'un contact, schématisant de la définition du troisième corps [Gode2].

Ce troisième corps a été initialement distingué (Fig. I-27) au sens des matériaux, c'est-à-dire par une composition chimique différente de celle des premiers corps et au sens cinématique en fonction de la zone où se localisait le gradient de vitesse dans son épaisseur.

Ensuite par souci de généralisation entre 3ème corps fluide et solide, le troisième corps est devenu un opérateur ayant trois fonctions :

1. transmettre la charge entre les premiers corps. Il s'agit de la portance du 3ème corps, portance qui nécessite une dissipation d'énergie qui est le frottement;
2. séparer les premiers corps en évitant ainsi leur adhérence. Cette séparation partielle ou totale contrôle les dégradations dans les 1ers corps. Cette notion de protection, a initialement été introduite à partir de la notion "d'écrantage des forces d'adhésion", d'où la notion d'écran, sur laquelle nous reviendrons;
3. accommoder la différence de vitesse entre les premiers corps. C'est le troisième corps qui doit accommoder dans son épaisseur la différence de vitesse relative des premiers corps. Nous reviendrons aussi sur cette notion en présentant les mécanismes d'accommodation de vitesse.

C'est à partir de ces trois fonctions que les étapes de la vie du 3ème corps : conception, naissance et vie propre ont été identifiées qualitativement [God1, Bert1, Bert2]. La quantification de ces phénomènes est très délicate, car elle nécessiterait des mesures dynamiques in-situ dans des volumes de 3ème corps de l'ordre d'une vingtaine de μm^3 . Cet handicap a été partiellement contourné :

- en filmant la vie du 3ème corps au travers d'éprouvettes transparentes;
- en observant les corps en contact à partir d'essais de différentes durées, puis en reconstruisant la vie "dynamique" du contact à partir d'une succession de vues statiques.

Ce travail de reconstitution repose sur une évaluation relative de la cohésion du 3ème corps, et de son adhérence au 1er corps établie à partir d'un "atlas de morphologie de 3ème corps" créé au LMC en corrélation avec les films de la vie du 3ème corps.

La quantification par analyse d'images de cet atlas n'a pas réellement abouti [Bert5] car la sélectivité de l'oeil est supérieure à celle d'un analyseur d'images.

1.4.3.3 Les " écrans de surface "

Pour tendre vers une modélisation mécanique des troisièmes corps solides, il fallait traduire des effets physico-chimiques en conséquences mécaniques. C'est pourquoi, la notion d'écran, issue de "l'écrantage physico-chimique" s'est généralisée aux parties du troisième corps d'une épaisseur de quelques nanomètres, qui recouvre les surfaces des premiers corps. Ces écrans peuvent être déposés artificiellement ou provenir d'une contamination naturelle (oxydes, impuretés...). En effet, une surface n'est jamais propre à l'air ambiant et un nettoyage ne fait que substituer des écrans connus à des écrans plus ou moins contrôlés.

Lors de la mise en contact des premiers corps, les écrans jouent le rôle de séparateurs; ils empêchent, comme nous le verrons, l'adhérence des surfaces en contact. Le rôle protecteur des écrans a été mis en évidence dans plusieurs études récentes [Bert3, Noll]. Malgré leur faible épaisseur, ils peuvent accommoder des différences de vitesses significatives entre les premiers corps. En général les écrans naturels réduisent le frottement ce qui limite les dégradations des premiers corps. Cependant, leur action se limite le plus souvent aux premiers cycles de frottement, les troisièmes corps qui se forment ensuite, notamment par détachement de particules des premiers corps prennent alors la relève.

Les troisièmes corps naturels ainsi créés ont une épaisseur de quelques micromètres à comparer aux quelques nanomètres des écrans. On comprend que cette variation d'épaisseur du troisième corps au cours de la vie du contact mette en jeu la raideur des pièces qui bouclent la chaîne des efforts entre les deux premiers corps. Ce constat a été l'une des raisons qui a conduit à introduire la notion de triplet tribologique.

1.4.3.4 Triplet tribologique

Il se compose [Bert4] :

1. du mécanisme qui gouverne les conditions de fonctionnement des contacts en leur transmettant des charges statiques ou dynamiques et en leur imposant une cinématique et un environnement. L'étude du mécanisme relève de la mécanique;

2. des premiers corps. Ils encaissent les sollicitations transmises par le mécanisme et y répondent par des transformations aussi bien en volume qu'en surface. L'étude des premiers corps relève de la mécanique et de la science des matériaux;
3. du troisième corps. Ses trois fonctions ont déjà été définies. Son étude fait appel à la mécanique, à la science des matériaux et à la physico-chimie.

1.4.3.5 Mécanisme d'accommodation de vitesse

Destinés à structurer l'approche phénoménologique, les mécanismes d'accommodation de vitesse, notés $S_i M_j$, sont définis [Bert2] pour un contact élémentaire par le site S_i et le mode M_j qui indiquent respectivement le lieu de l'accommodation de vitesse, et la manière dont elle s'effectue.

Les sites possibles sont (fig. I-28) :

- les deux premiers corps, site S_1 et S_5 ;
- la partie volumique du troisième corps, S_3 ;
- les écrans sites S_2 et S_4 .

Dans chacun de ces sites, la vitesse peut être accommodée selon quatre modes :

- la déformation élastique, mode M_1 ;
- la rupture ou fissuration, mode M_2 ;
- le cisaillement, mode M_3 ;
- la formation de "corps roulants", mode M_4 .

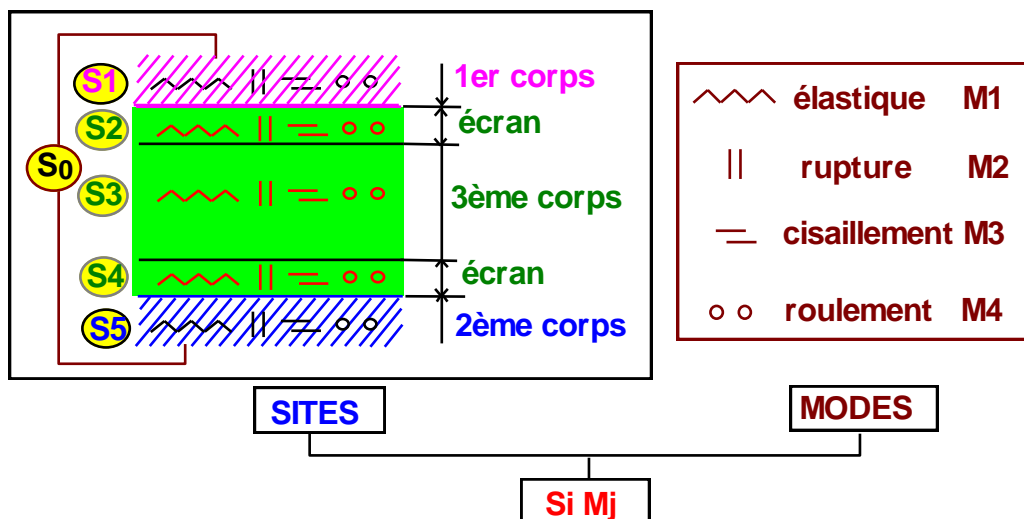


Fig. I-28 : Les Sites et les Modes d'accommodation de vitesse : $S_i M_j$.

La combinaison de 5 sites et de 4 modes conduit à l'activation possible de 20 mécanismes d'accommodation de vitesse notés " $S_i M_j$ ". En l'absence de 3ème corps artificiel, tel qu'un lubrifiant, fluide ou solide, la configuration initiale de contact se compose seulement des sites S_1, S_2, S_4 et S_5 . Le site S_0 qui correspond à la possibilité d'accommodation de vitesse dans le mécanisme qui transmet les efforts aux premiers corps a été introduit pour prendre en compte la totalité du triplet tribologique.

1.4.3.6 Circuit tribologique

Il a été introduit [Bert2] pour formaliser les débits de matière induits par l'accommodation de vitesse (fig . I-29).

Les particules détachées des premiers corps constituent le débit source interne de 3ème corps Q_{si} . Une fois détachée des premiers corps, ces particules circulent à l'intérieur du contact, débit Q_i , ou à l'extérieur du contact Q_e . En fonction des contributions de chacun des éléments du triplet tribologique, les particules constituant le débit Q_e peuvent être recyclées dans le contact Q_r , ou en être définitivement éjectées, débit Q_u . Le débit Q_u étant le débit d'usure. L'apport d'un troisième corps dans le contact correspond au débit source extérieur Q_{se} .

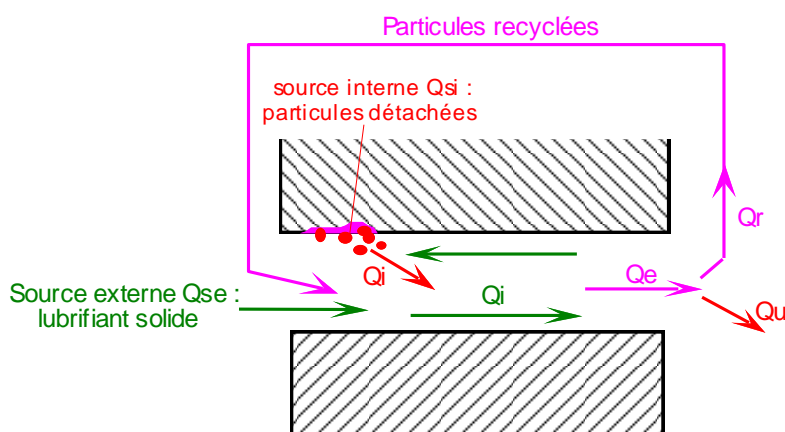


Fig . I-29 : Circuit Tribologique [Bert3].

Dans ce contexte les appellations d'usure par abrasion, adhérence, corrosion, fatigue, délaminage..., n'ont plus cours, car en fait, ce ne sont que des mécanismes de détachement de particules. En effet, une particule bien que détachée des premiers corps n'est pas forcément une particule d'usure. Quand elle demeure dans le contact, ou peut y être réintroduite, elle peut participer à l'accommodation de vitesse. L'usure doit alors être définie comme un débit de particules détachées qui quittent définitivement le contact (Q_u). Par la même, la dégradation des surfaces des premiers corps n'implique pas directement la perte de fonction du contact (ex. frein, embrayage...).

La maîtrise de l'usure passe donc par celle des mécanismes de détachement de particules (débit source), puis celle des autres débits de troisième corps.

1.4.3.7. Vie d'un contact

Pour répondre au souci de généralité de l'approche, la grille de lecture : 3ème corps, triplet tribologique, mécanisme d'accommodation de vitesse, et circuit tribologique, est appliquée aux trois étapes de la vie tribologique d'un contact, qui sont :

- conception;
- naissance;
- vie propre.

Cette vie se joue dès les premiers mouvements relatifs des premiers corps, par conséquent, la maîtrise du frottement et de l'usure passe par celle des phases de conception et de naissance.

Pour un contact élémentaire (fig. I-30) au cours de la phase de conception, ce sont l'effort normal $N(t)$ et le déplacement $d(t)$ qui sont imposés. En l'absence d'accrochage mécanique induit par des rugosités, ce sont les écrans qui opposent leur résistance au déplacement et qui, par conséquent, définissent la force tangentielle $T(t)$ qui est donc subit.

Par conséquent, les sollicitations locales imposées aux premiers corps sont contrôlées, dans un premier temps, par les écrans. A ces sollicitations locales qui induisent un champ de contraintes initialement contrôlé par la physico-chimie, les premiers corps ou les écrans fournissent une réponse dont dépendra la vie du contact. Si seuls les écrans répondent, l'accommodation de vitesse se localise dans les sites $S_{2,4}$ et la vie du contact est gouvernée par leur physico-chimie. Si les premiers corps répondent par des évolutions de surface telles que fissuration ou détachement de particules, c'est la mécanique et les propriétés des matériaux qui gouvernent la vie du contact.

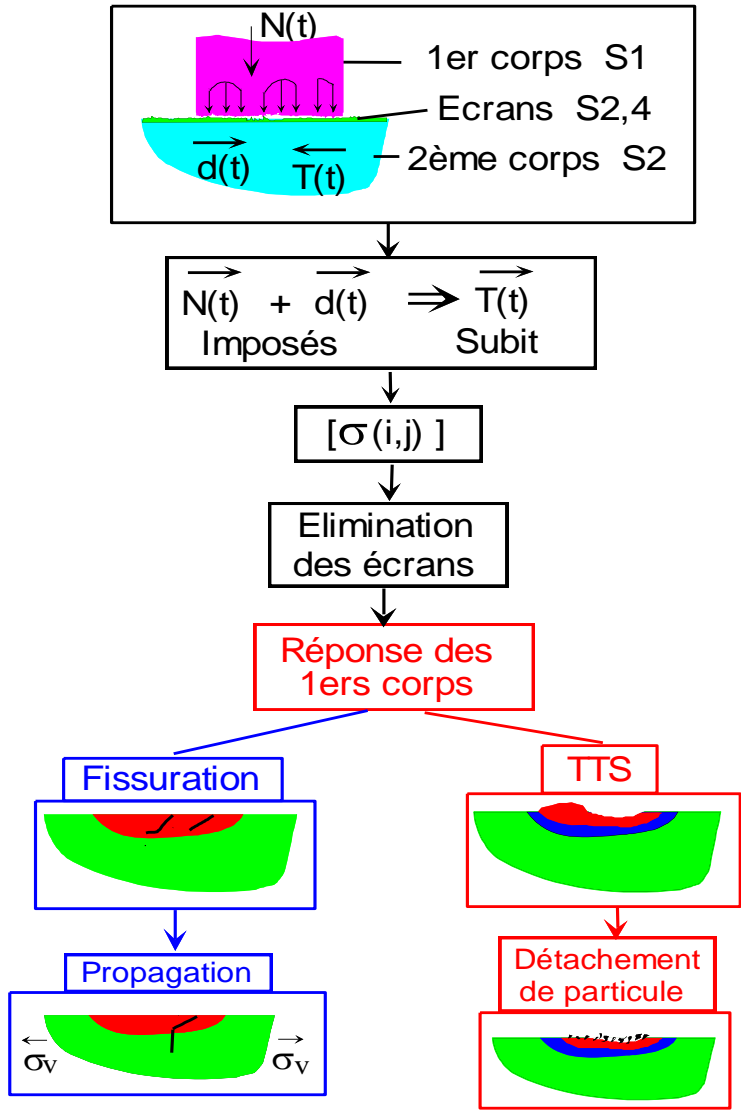


Fig. I-30 : Schéma de la vie d'un contact.

Ce détachement de particules plus particulièrement étudié à l'époque, dans des conditions de petits débattements, a conduit C. Colombié [Colo, 1986], puis P. Blanchard [Blan, 1991] à mettre en évidence que les zones de détachement de particules présentaient des changements de structures qui étaient plus liées à des effets de pression qu'à des effets thermiques, comme cela avait été supposé dans la bibliographie, d'où l'appellation des **Transformation Tribologique Superficielle (TTS)** (fig. I-31). Pour les matériaux étudiés qui sont des alliages de Titane (TAV6, TV15CA(α) et TV15CA(β)), les TTS ont les propriétés suivantes :

1. sont très dures;
2. sont monophasées;
3. possèdent des tailles de grains très fines (entre 100 et 200 nm de diamètre);
4. possèdent les mêmes compositions chimiques que l'alliage initial.

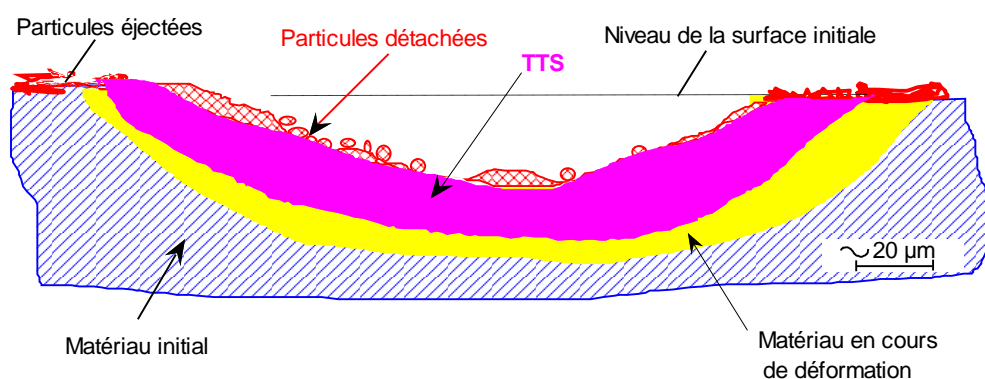


Fig. I-31 : Coupe transversale d'une éprouvette de frottement montrant la zone des TTS [Blan].

Les travaux de S. Fayeulle [Faye], montrent cette évolution des TTS, qui conduisent au détachement de particules. Malheureusement, les évolutions des TTS pendant le frottement ne peuvent être suivies avec les moyens classiques qu'après coupes, donc de façon destructrice.

I.5 CONCLUSION

Comme nous l'avons écrit en introduction de ce chapitre, les références bibliographiques ne sont représentatives que des grandes tendances les plus classiques. Elles traduisent la diversité des façons d'aborder, d'interpréter et de modéliser les phénomènes liés au frottement et à l'usure. Les résultats sont fonctions des outils d'investigation choisis ou disponibles et de la culture des chercheurs. Lorsque les modélisations s'ajustent sur une réalité, elles remplissent leurs fonctions puisque modéliser n'est pas décrire. En revanche, lorsqu'elles sont utilisées pour interpréter la réalité, il nous semble qu'elles débordent leurs hypothèses.

Pour conclure sur le panorama tribologique dans lequel s'est déroulé ce travail, nous citons les résultats de l'étude exhaustive de Meng et Ludema [Meng] publiée en 1995. Ils ont recensé près de 3000 modèles reliant le frottement et/ou l'usure à une centaine de paramètres.

Pour les modèles faisant intervenir le module d'Young, il s'agit en général du module d'Young de seulement l'un des matériaux en contact. Selon ces modèles, ce module peut être affecté d'un exposant positif ou négatif !

Bien que l'usure fasse partie de la vie de tous les jours, elle n'a pas encore d'unité légale. Cette absence d'unité, reflète à notre avis, le résultat de la juxtaposition d'études trop spécifiques, d'où le manque de généralité. On comprend ainsi la volonté de Maurice Godet de "coudre entre elles toutes ces approches" à partir des concepts de troisième corps, de triplet tribologique, de mécanisme d'accommodation de vitesse et de circuit tribologique. Cette grille de lecture d'un problème tribologique devrait être applicable aux trois étapes de la vie d'un contact.

C'est dans cet état d'esprit, et à une époque où se rodait cette grille de lecture qu'a débuté ce travail sur la conception et la naissance des TTS. Il était donc nécessaire de produire des TTS et de les caractériser.

Pour produire des TTS, de manière reproductible, il nous fallait un moyen et un protocole d'essais. Le triplet tribologique nous avait sensibilisé au rôle de la rigidité du moyen d'essai. En ce qui concerne le protocole d'essais, nous avons été confrontés au rôle déterminant des écrans sur la vie du contact. Si ce rôle a été explicitement présenté dans la partie bibliographique, ce n'était pas le cas au début de ce travail. C'est ce qui explique que deux ans après le début de ce travail, une étude spécifique des écrans ait été lancée au laboratoire [Noll].

Parmi les moyens utilisés pour caractériser les TTS se trouvaient, la microscopie optique, électronique, à force atomique et à effet tunnel, la spectroscopie Raman, la diffraction des rayons X, les sondes à rayons X, la micro-dureté. Ces moyens sont utilisés, soit sur la surface de frottement, soit sur des coupes de type métallographiques. En dehors du caractère destructif des coupes, elles peuvent perturber le phénomène à étudier notamment en présence de revêtement, et très souvent par effet de bord lors du polissage. Elles sont difficilement exploitables près du bord libre qui est justement la "peau" du premier corps à étudier.

N'étant pas destructive, la microcaractérisation acoustique à balayage a semblé être un bon outil d'analyse, d'autant plus qu'elle répondait à deux de nos objectifs : visualiser et mesurer. En effet, elle devait nous permettre :

1. d'obtenir des images de la sous-surface, ce qui devenait le pendant des visualisations des écoulements de 3ème corps réalisées en surface;
2. de déterminer les valeurs locales de module d'Young sans intermédiaires mécaniques, avec une précision raisonnable, permettant le suivi de très faibles variations de ces modules, induites par un "écrouissage", donc par les TTS;
3. de déterminer le module d'Young et le coefficient de Poisson des revêtements. Si ces mesures ne concernaient pas directement ce travail, elles étaient nécessaires pour nourrir la modélisation des massifs revêtus lancée au laboratoire.

CHAPITRE II

MOYENS ET METHODOLOGIE

D'OBTENTION DES TTS

II.1 MOYENS

II.1.1 Introduction

Au début de cette thèse, il a été nécessaire de choisir un simulateur de frottement parmi ceux disponibles au LMC afin d'effectuer les essais permettant d'obtenir des TTS.

Le premier simulateur que nous avons utilisé avait été conçu pour étudier les dégradations des armatures des conduits flexibles utiles pour les forages pétroliers [Loff]. Le mouvement de translation était assuré par un excentrique à rayon variable qui donnait des amplitudes dont la précision était incompatible avec celle nécessaire au suivi des TTS. L'instrumentation associée ne permettait pas non plus de suivre les phénomènes étudiés avec la précision requise, et l'adaptation d'un microscope acoustique était difficilement envisageable.

L'autre alternative était d'utiliser le simulateur "PEDEBA", dont la précision et la rigidité convenaient à notre application. Sur ce simulateur, le mouvement de translation est donné par un vérin hydraulique asservi en déplacement. La charge normale est elle aussi appliquée par un vérin hydraulique asservi. Ce simulateur est doté de capteurs de déplacement et de force dans les trois directions. Nous avons réalisé sur ce simulateur quelques essais préliminaires dont nous exposerons les résultats plus tard. Ce simulateur ne pouvant être réservé uniquement pour notre besoin, nous avons alors opté pour la conception et la réalisation d'un simulateur de frottement qui satisfasse les impératifs suivants :

1. intégrer un microscope acoustique et optique;
2. posséder une résolution de déplacement d'au moins 1 μm ;
3. posséder une rigidité suffisante devant les sollicitations tribologiques;
4. se réaliser dans des délais et avec des coûts de fabrication les plus réduits possible.

Ce simulateur est appelé TRIBOMAB, pour son utilisation associée de la **T**ribologie et de la **M**icroscopie **A**coustique à **B**alayage (MAB). Il a été conçu et mis au point au cours de ce travail.

II.1.2 Simulateur de frottement : TRIBOMAB

II.1.2.1 Description

Le TRIBOMAB (fig. II-1), se compose essentiellement :

- ♦ d'un bâti très rigide d'une masse de plus de 350 kg;
- ♦ d'une table de déplacement (4), qui donne le mouvement de translation pendant le frottement. Elle est motorisée et pilotée par microordinateur. Elle sera aussi utilisée par le microscope acoustique pour réaliser le balayage de la surface à examiner, (Cf III.3.5);
- ♦ de deux porte-échantillons démontables (1, 2), qui s'assemblent par queue d'aronde, respectivement sur la partie supérieure du bâti, et sur la table de déplacement (4);
- ♦ d'un vérin hydraulique (6,7) à membrane, qui permet d'appliquer la charge normale N. Il est relié à une pompe hydraulique manuelle (9) et à un système d'équilibrage par gravité (8),

qui permet d'asservir la force normale à l'aide de masses marquées P. Ce système permet d'éviter d'éventuelles variations de pression lors du détachement de particules qui conduit souvent à un écartement des premiers corps, donc à un recul du piston du vérin hydraulique. Cette conception du système de mise en charge privilégie la force à la raideur normale. En effet, les essais se réalisant à de très faibles vitesses, les effets d'inertie selon l'axe Z sont négligeables, donc la raideur selon Z est très faible. Compte tenu de la différence des diamètres des pistons des deux vérins, ce système permet en plus, d'avoir un chargement normal N plus précis par masses marquées P, dont le rapport N/P est de 2,4;

- ♦ d'un capteur de force (3) pour mesurer en temps réel les forces, tangentielle et normale;
- ♦ d'un capteur de déplacement réel de l'éprouvette inférieure dans la direction X;
- ♦ d'un capteur de déplacement réel de l'éprouvette inférieure dans la direction Z, qui mesure la séparation entre les deux éprouvettes.

Le dessus du bâti est dégagé, pour permettre l'installation d'une lentille acoustique, ou d'un système de visualisation optique (caméra, microscope...).

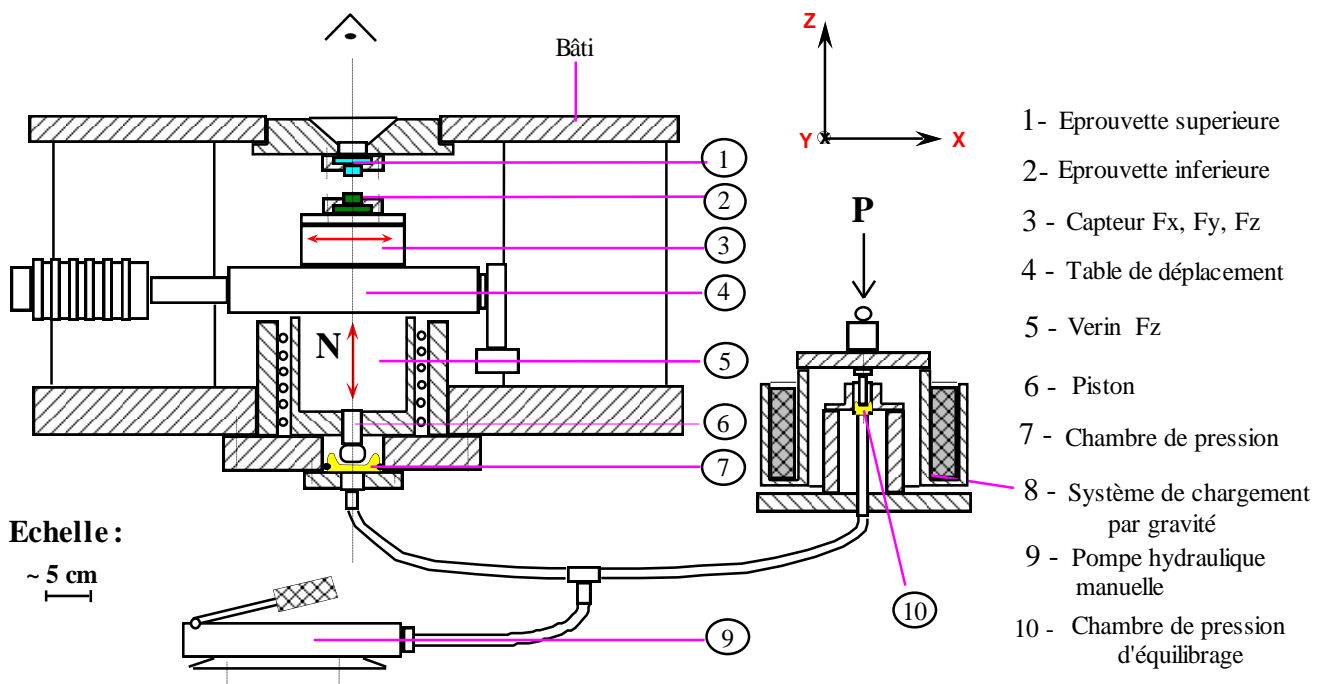


Fig.II-1 : Schéma du TRIBOMAB.

II.1.2.2 Caractéristiques techniques

Les principales caractéristiques sont :

- charge normale : 0 à 1000 N;
- charge tangentielle : ± 300 N;
- sensibilité des capteurs de force : 0,01 N;
- sensibilité des capteurs de déplacement : 0,1 μ m;
- sensibilité du système de chargement par gravité : 10^{-3} Kg;
- table de déplacement suivant X : vitesse : 0 à 4 mm/s, incrément 1 μ m, course max. : 100 mm.

II.1.2.3 Principe de fonctionnement

Après l'étalonnage des capteurs de force et de déplacement, le déroulement d'un essai est le suivant :

1. fixation des éprouvettes supérieures et inférieures dans leurs porte-éprouvettes, en repérant leurs positions par rapport au sens du mouvement;
2. rapprochement des deux éprouvettes à l'aide de la pompe hydraulique manuelle;
3. remise à zéro des amplificateurs des capteurs de force et de déplacement;
4. mise en charge du contact à l'aide des masses marquées, avec contrôle de la valeur N par le capteur de force;
5. choix des paramètres cinématiques (vitesse, amplitude du déplacement, nombre de cycles etc.) depuis le logiciel de pilotage du moteur de la table de déplacement selon l'axe X qui donne le mouvement relatif des éprouvettes;
6. numérisation des signaux obtenus par les différents capteurs au cours du frottement;
7. déchargement après arrêt de l'essai, et éventuellement démontage des éprouvettes pour les observations et les analyses effectuées en dehors du simulateur.

II.1.2.4 Caractérisation du simulateur "TRIBOMAB"

II.1.2.4.1 Introduction

Quel que soit la rigidité d'un simulateur de frottement, une partie du déplacement imposé ou déplacement théorique (D_{th}) est accommodée par déformation élastique de l'ensemble des mécanismes de déplacement : porte-éprouvette, capteur de force, et jeux entre les pièces. De ce fait, le déplacement tangentiel réel (D_r) entre les éprouvettes en contact est toujours inférieur au déplacement imposé. Par conséquent, pour garantir au mieux la reproductibilité des essais, il est nécessaire de caractériser les déformations propres du simulateur. Pour cela, après la réception et pendant le montage du TRIBOMAB, nous avons effectué différents contrôles dimensionnels, ainsi que des tests de fonctionnement après assemblage. Ensuite, nous avons effectué des essais pour connaître sa rigidité dans la direction du déplacement avec et sans chargement normal.

II.1.2.4.2 Essais statiques sans chargement normal

Ce test a été effectué en chargement tangentiel par gravité selon l'axe X, (fig.II-2). Les différentes mesures des déformations élastiques du système dans ce cas, montrent que la valeur de la déformation est proportionnelle à la charge tangentielle T, et suit la relation (II.1) :

$$\Delta d = r * T \text{ [}\mu\text{m]}; \quad (\text{II.1})$$

$$r = 0,2 \mu\text{m} / \text{N}; \quad (\text{II.2})$$

Δd : déformation élastique; r : coefficient de proportionnalité.

Cette proportionnalité, montre que les effets des jeux et des arcs-boutements sont négligeables, ce qui n'était pas évident à priori.

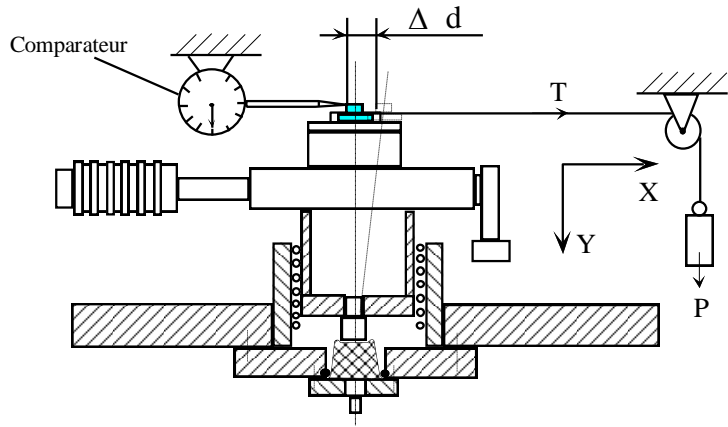


Fig. II-2 : Schéma du test de rigidité sans charge normale.

II.1.2.4.3 Essais dynamiques sous différentes charges normales

Sous chacune des charges normales de 50, 100, 150 et 200 N, nous avons effectué des essais de frottement avec trois valeurs de déplacement 10, 30 et 50 μm, selon deux types de mouvement, continu ou alternatif.

Les valeurs de déplacement ont été mesurées par deux capteurs interférométriques à LASER, visant chacun un point se situant le plus près possible du contact (fig.II-3b). Pour cela, les surfaces des deux éprouvettes ont été coupées à moitié (fig.II-3a), puis polies afin de permettre la réflexion du faisceau LASER. Dans ces conditions, la résolution théorique des mesures de déplacement est de 10 nm.

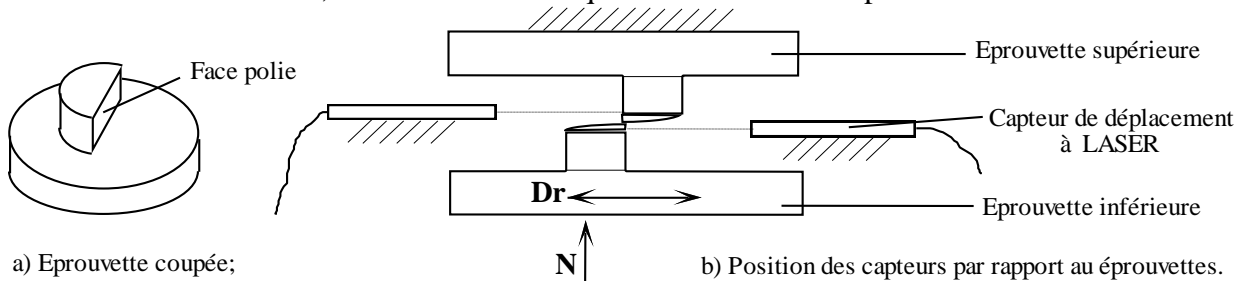


Fig.II-3 : Méthode de mesure du déplacement relatif entre les éprouvettes par capteurs LASER.

II.1.2.4.4 Déplacement théorique (Dth) et déplacement réel (Dr)

Les résultats des essais de caractérisation sous chargement normal ont montré que dans le cas d'un seul passage, le déplacement réel (Dr) est égal à celui imposé (Dth) diminué de la valeur de la déformation Δd qui est causé par la force de frottement T qui suit la loi (II.3) :

$$Dr = Dth - \Delta d,; \quad II.3$$

Rappel : $\Delta d = 0,2 * T [\mu m]$.

En mouvement alternatif, à partir du premier retour, l'amplitude du déplacement réelle chute encore de quelques micromètres par rapport au premier passage. Cette diminution, résulte à la fois de l'augmentation du frottement induite par l'évolution du contact, et du rattrapage des différents jeux du mécanisme d'entraînement de la table de déplacement.

Les courbes de déplacement réel et de la force tangentielle T en fonction du temps, (fig.II-4) montrent le comportement typique du TRIBOMAB en mouvement alternatif (charge normale : 100 N, D_{th} : 50 μm , n : 10 cycles). Nous remarquons qu'au premier aller, le déplacement réel est égal à 31 μm , et au premier retour il n'est que 20 μm . La remarque la plus importante qui confirme la relation entre le frottement et le déplacement réel est l'allure des deux courbes qui montrent une augmentation du déplacement quand le frottement baisse et vis versa.

Par conséquent, faute d'asservissement du déplacement, il faut toujours prévoir lors du choix de l'amplitude de déplacement que D_r est inférieur à D_{th} .

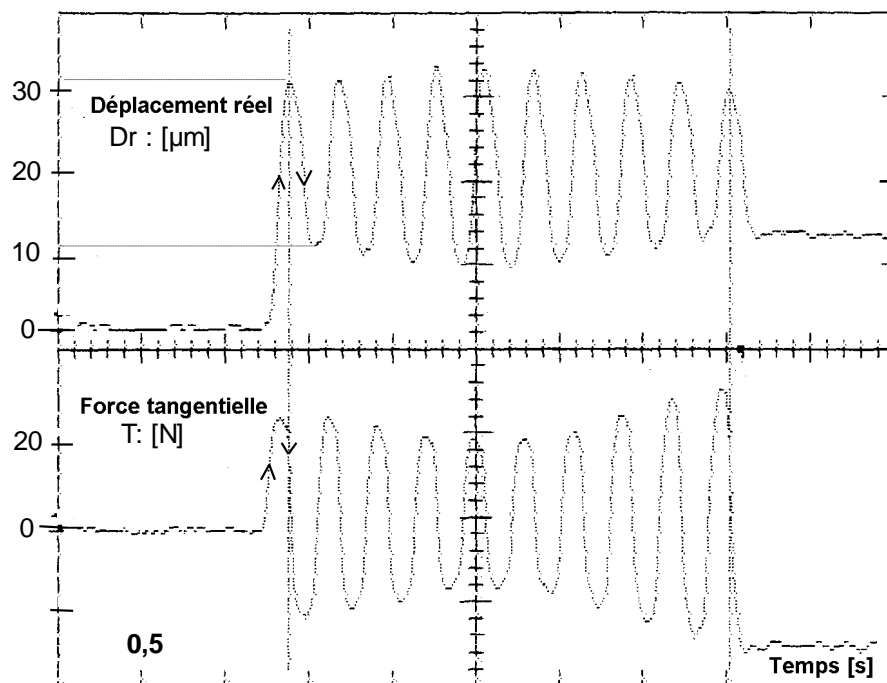


Fig.II-4 : Courbes de la force tangentielle et du déplacement réel en fonction du temps.

II-2 OBTENTION DES TTS

II-2.1 Introduction

L'objectif étant de suivre la conception et la naissance des TTS pendant le frottement, nous devons trouver les conditions tribologiques reproductibles, qui conduisent à ce phénomène. Les conditions de contact qui sont contrôlées dans notre cas sont : le simulateur, l'environnement, la préparation des éprouvettes (matériau, géométrie, rugosité, nettoyage des surfaces), la charge normale, la vitesse de déplacement, l'amplitude de déplacement et le nombre de cycles.

Plusieurs essais préliminaires ont été effectués afin de caler les conditions de frottement, donc limiter le nombre des paramètres à faire varier, et garantir une bonne reproductibilité des essais. Les essais doivent entre autres, mettre en évidence l'évolution des TTS, et permettre le suivi par microscopie acoustique des différentes modifications de propriétés élastiques pouvant avoir lieu en surface ou en sous-surface (en peau) des premiers corps.

Les analyses et les observations s'effectuent après arrêt des essais et ouverture du contact, sauf pour les essais de visualisation in-situ. Les perturbations ainsi induites sont prises en compte au mieux lors des analyses, avec pour inconvénients :

1. après l'arrêt de l'essai, les observations correspondent à l'étape instantanée de la vie du contact lors de l'ouverture du contact;
2. après ouverture du contact, des transformations chimiques et morphologiques auront lieu.

Pour contourner ces problèmes, nous avons effectué entre autres, quelques essais avec des éprouvettes supérieures transparentes (verre et saphir) permettant ainsi un suivi in situ par caméra à des grossissements allant jusqu'à 500 fois. Ces essais qui ne seront pas décrits ici, nous ont facilité la reconstitution de la vie du contact (Cf. II.2.4.7).

Nous ne présentons ici que les essais les plus représentatifs des conditions tribologiques conduisant de manière reproductible à la formation des TTS. L'ensemble des essais, (annexe B) effectués sur les deux simulateurs (PEDEBA et TRIBOMAB) peut être divisé en deux groupes : essais effectués en une seule passe et en plusieurs cycles (mouvements alternatifs).

II-2.2 Paramètres d'essais

Les paramètres d'essais choisis pour atteindre notre objectif, sont en partie imposés par les possibilités techniques, et le souci de reproductibilité. Ces paramètres sont :

1. matériau : 35NCD16 trempé à 860 °C, revenu à 600 °C; dureté : 350 Hv. Ce matériau a été retenu dans ce contexte, car déjà utilisé au laboratoire au cours de plusieurs thèses, donc de comportement tribologique connu. D'autre part, il possède une structure homogène à faible dimension des grains, compatible avec les conditions de la MAB;
2. géométrie des éprouvettes : bombée/plane (fig.II-5, 6, et 7), de rayons respectifs R_b et R_p . Ceci permet :
 - a. d'obtenir des pressions Hertziennes élevées pour de faibles charges, donc de faibles déformations des moyens d'essai;
 - b. de calculer par les relations de Hertz, la pression, l'aire de contact, etc.;
 - c. de localiser facilement le contact, surtout lors des essais de visualisation;
 - d. d'analyser l'éprouvette plane par Microscopie Acoustique (Cf. III.6.3.4);
3. polissage : mécanique, finition au tissu imprégné d'une solution abrasive à grain de diamant de 1/4 μm ;
4. rugosité : R_a de 0,01 à 0,08 μm , (fig.II-6);

5. nettoyage : bain d'alcool + ultrasons, la surface des éprouvettes étant tournée vers le bas, afin d'éliminer au maximum les résidus des produits de polissage, c'est aussi une façon peut coûteuse d'obtenir des écrans de surface reproductibles;
6. charge normale : de 10 à 250 N, ou pression de Hertz de 0,2 à 2 GPa;
7. vitesse de déplacement : 0,2 0,5 1 1,5 2 et 4 mm/s;
8. type de mouvement : une passe, ou cyclique;
9. nombre de cycles : 1 à 1000;
10. température et humidité : à l'ambiante.

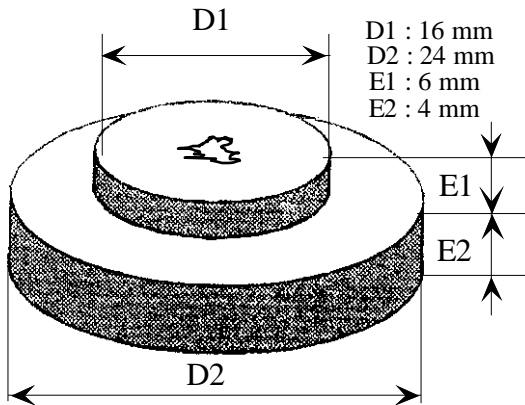


Fig.II-5 : Dimensions principales de l'éprouvette plane.

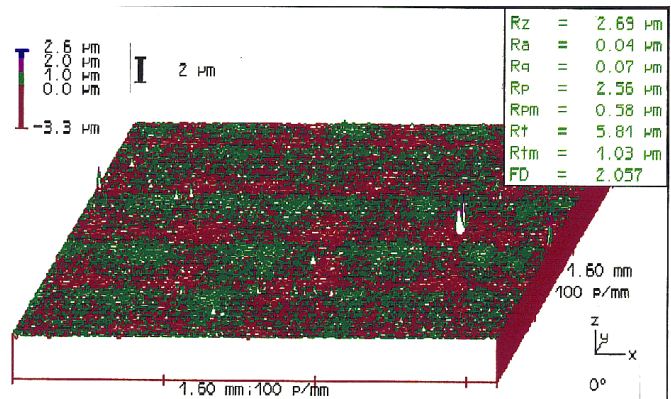


Fig.II-6 : Profil rugosimétrique de l'éprouvette plane, obtenu sur rugosimètre optique.

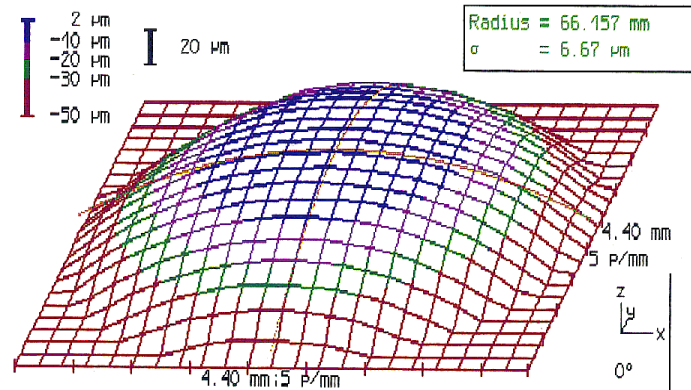


Fig.II-7 : Profil d'une éprouvette bombée, obtenu sur rugosimètre optique.

II-2.3 Paramètres mesurés pendant l'essai

L'instrumentation de la machine comporte la mesure analogique :

- de la force tangentielle T et normale N, dont le rapport donne la courbe de frottement;
- du déplacement réel D_r et de la séparation entre les éprouvettes.

Le coefficient de frottement est calculé ensuite d'après le rapport T/N .

II.2.4 Essais effectués en une passe

II.2.4.1 Conditions générales des essais

Les premiers essais de cadrage des paramètres de contact ont été effectués sur la PEDEBA, et ensuite sur le TRIBOMAB dans les conditions suivantes :

- contact bombé/plan : $R_b/R_p = 60/3000$ mm; - mouvement continu, une passe;
- charge normale comprise entre: 50 et 250 N; - vitesse : 0,5 à 2 mm/s;
- déplacement : 5 à 1600 μm .

II.2.4.2 Comportement des écrans

Les essais effectués en une passe, à des déplacements inférieurs à 30 μm n'ont pas mis en évidence de dégradation de surface visible optiquement jusqu'à un grossissement de 1000 fois. Les mesures de la force tangentielle (Fig.II-8) donnent de faibles coefficients de frottement ($f < 0,12$). Ceci montre que l'accommodation de vitesses se localise essentiellement dans les écrans ($S_{2,4}M_3$). Si l'étude des écrans n'est pas l'objectif de ce travail, elle représente un aiguillage vers l'obtention des TTS ou des fissures. Le contrôle de la formation des TTS passe donc par celui des écrans.

Au-delà d'un déplacement de 30 μm , il y a naissance locale de petites stries de quelques micromètres de longueur qui sont visibles optiquement à un grossissement de 500 fois (fig.II-9, flèches). Sur ces zones striées, il y a interaction directe entre les premiers corps $S_{1,5}$ après élimination des écrans $S_{2,4}$. Ces essais montrent bien l'influence du déplacement [Vinc] sur le comportement des écrans. En revanche, dans les conditions décrites ci-dessus, la variation de la charge normale et de la vitesse ne semble pas perturber leur comportement. L'accommodation des vitesses reste localisée dans leur épaisseur ($S_{2,4} M_3$).

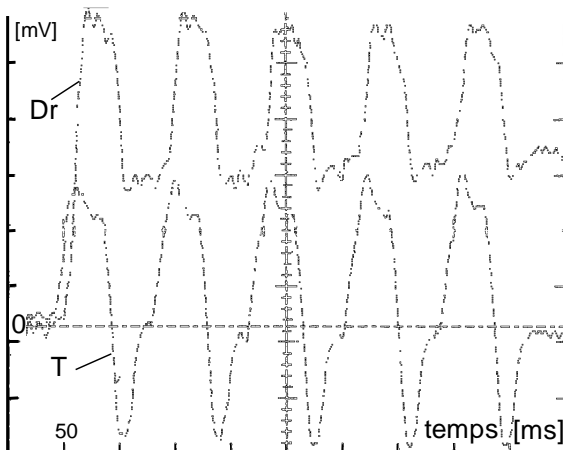


Fig. II-8 : Courbes de frottement et déplacement.

$N = 100$ [N]; $V = 0,5$ mm/s; $D_{th} = \pm 25$ μm .

Calibres : Dr : 1 unité = 20 mv \rightarrow 0,8 μm ;

T : 1 unité = 50 mv \rightarrow 5 N.

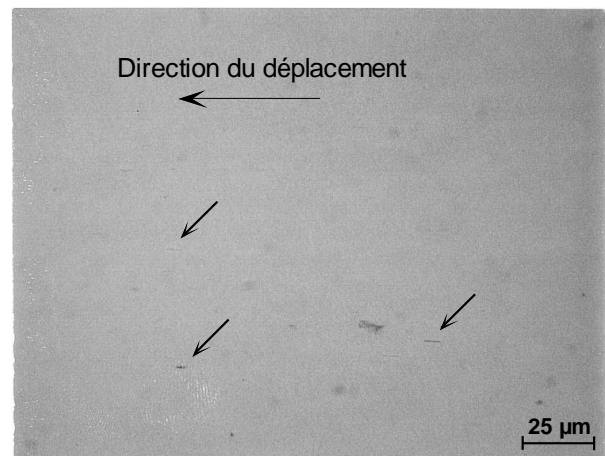
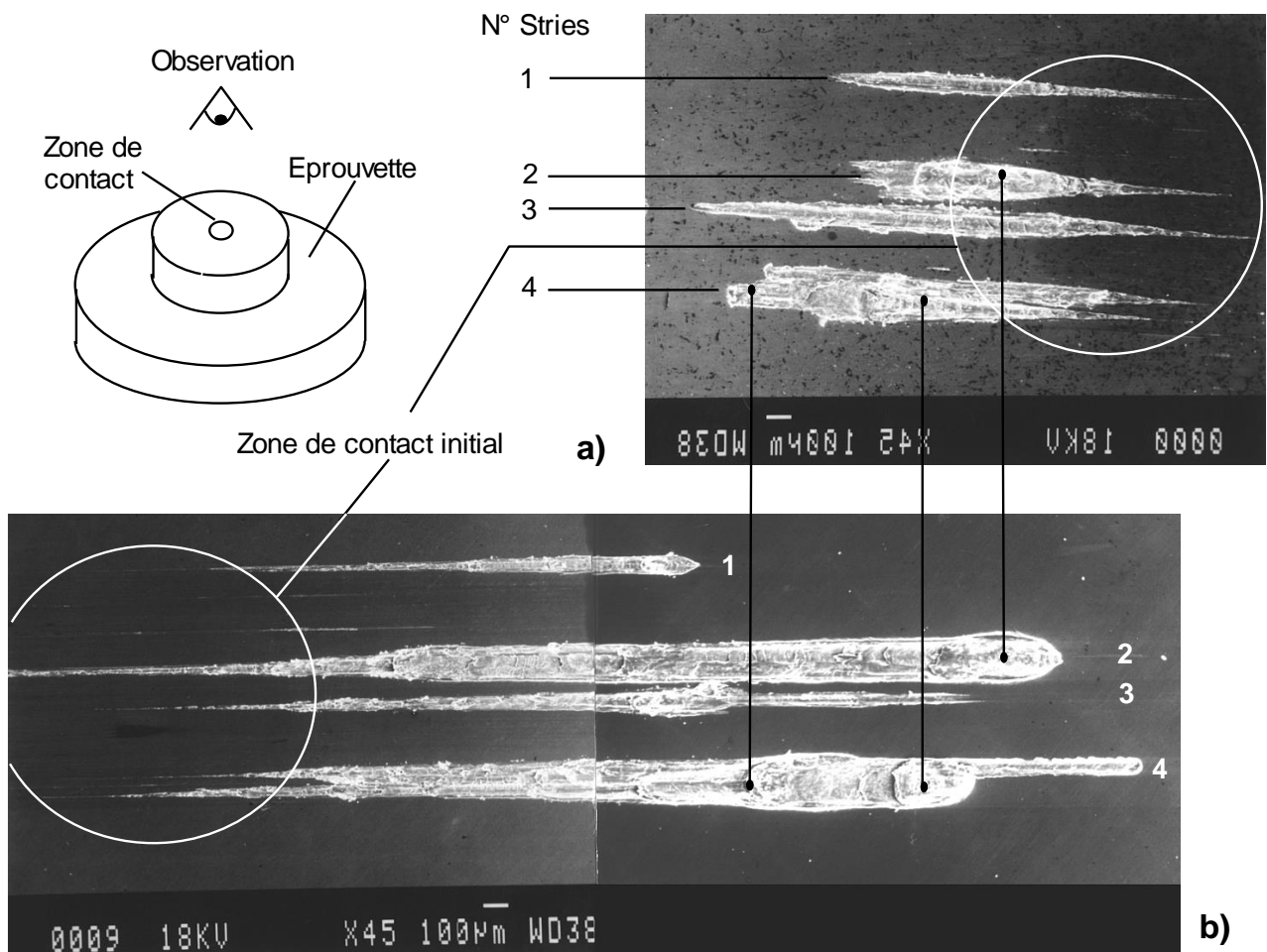


Fig. II-9 : Formation de stries à $Dr = 40$ μm .

II-2.4.3 Analyses morphologiques des surfaces

Les essais effectués à des déplacements de plus de 100 μm conduisent à des dégradations de surface visibles à l'oeil nu, sous formes de stries de labourage. Faute d'un vocabulaire adapté, le terme "labourage" a été retenu ici, bien qu'il n'exprime pas forcément la même signification tribologique que celles rencontrées dans la bibliographie.

Nous étudions de près un essai représentatif des essais effectués en une passe sur la PEDEBA, sous une charge normale de 100 N, une vitesse de 1 mm/s et une amplitude de déplacement D_r de 1,6 mm. Les observations des éprouvettes au microscope optique et au MEB (fig. II-10), ont montré que les dégradations naissent à l'intérieur de la zone de contact Hertzienne initiale, en des "points" qui s'élargissent avec le déplacement et deviennent des stries. Précisons que les images (fig. II-10) sont disposées de manière à montrer la position de l'éprouvette supérieure (fig. II-10a) par rapport à l'éprouvette inférieure (fig. II-10b) en fin d'essai, d'où l'inversion de l'image de l'éprouvette supérieure et son décalage à droite. Pour obtenir une image réaliste du contact, il suffit de rabattre l'image de l'éprouvette supérieure sur celle de l'éprouvette inférieure. En comparant les stries des deux surfaces antagonistes qui ont les mêmes numéros, nous remarquons qu'elles présentent des morphologies complémentaires. C'est à dire que lors de l'ouverture du contact, les "empreintes" de chaque surface restent marquées sur l'autre.



a) éprouvette supérieure (Image inversée horizontalement); b) éprouvette inférieure.

Fig.II-10 : Surface des éprouvettes après frottement.

La séparation entre les deux éprouvettes, mesurée au cours du déplacement (fig. II-11) montre un écartement des deux éprouvettes de plus de trois micromètres. Les observations des surfaces frottées suggèrent que les zones de contact réel instantanées diminuent avec le déplacement. Ces zones de portance, qui sont communes aux deux éprouvettes, ont des morphologies complémentaires et se présentent sous forme de zones dégradées et d'amas de particules, qui se sont accumulées au cours du déplacement. Un autre essai effectué dans des conditions similaires montre d'une façon explicite la diminution de l'aire de contact réel avec le déplacement, (fig. II-12). En partant initialement d'une aire de contact A1, qui est égale à la zone de Hertz, l'aire du contact réel diminue et devient A2 à la fin du déplacement de 4 mm. Ceci est bien sûr accompagné d'une augmentation de la pression de contact qui fera l'objet d'un suivi ultérieurement.

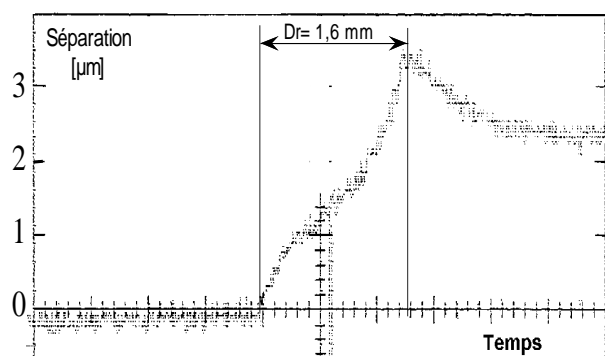


Fig. II-11 : courbe de la séparation entre les éprouvettes au cours du déplacement.

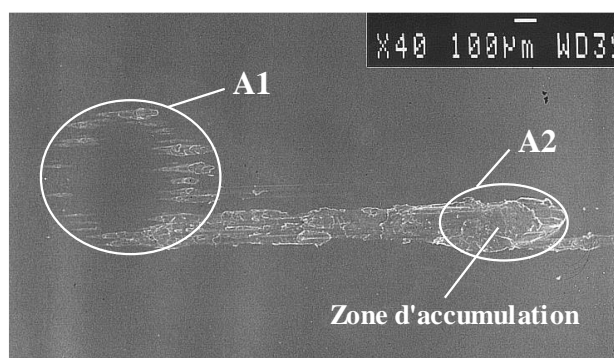
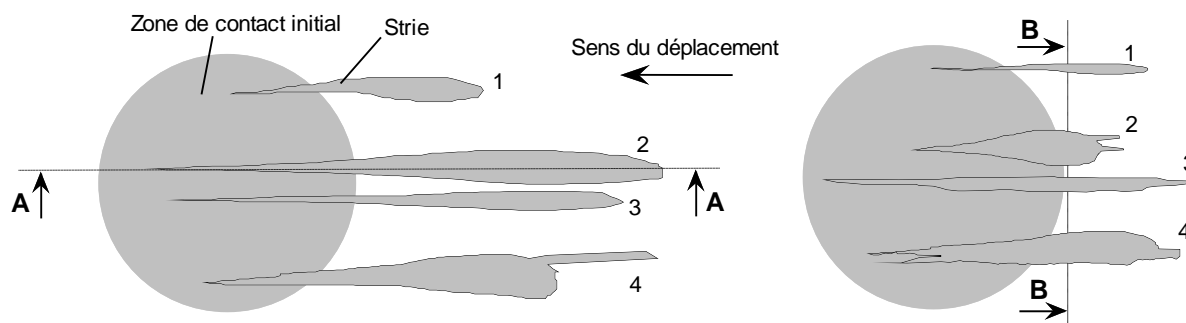


Fig. II-12 : Diminution de l'aire de contact avec le déplacement, "autre essai".

II.2.4.4 Transformation Tribologique Superficielle

Nous avons poursuivi les analyses en sous-surface afin d'évaluer l'étendue des dégradations. Nous avons alors coupé, après enrobage, l'éprouvette plane le long de la strie N°2 selon le plan A-A de la figure (II-13a), et l'éprouvette bombée selon le plan B-B de la figure (II-13b).

Les observations au MEB (fig. II-14) de la coupe A-A après polissage et attaque chimique, ont mis en évidence des zones en sous-surface qui sont déformées plastiquement, et présentent des "lignes d'écoulement de matière", sur une profondeur d'une cinquantaine de micromètres. Ces zones correspondent bien à des TTS (Transformation Tribologique Superficielle).



a) Zone de contact de l'éprouvette inférieure;

b) Zone de contact de l'éprouvette supérieure.

Fig. II-13 : Plans de coupe des éprouvettes inférieure (A-A), et supérieure (B-B).

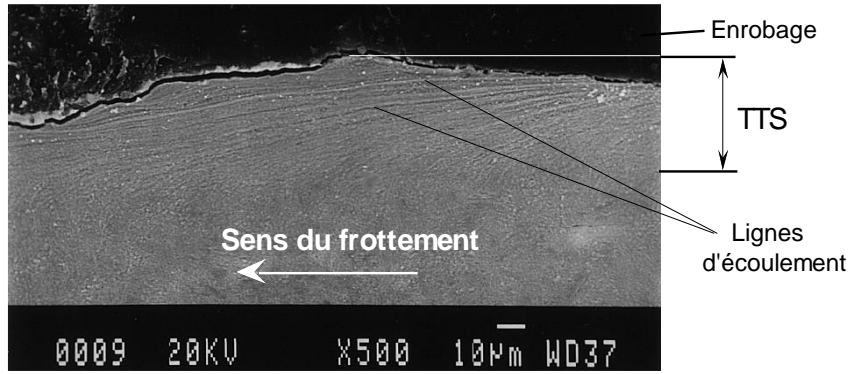
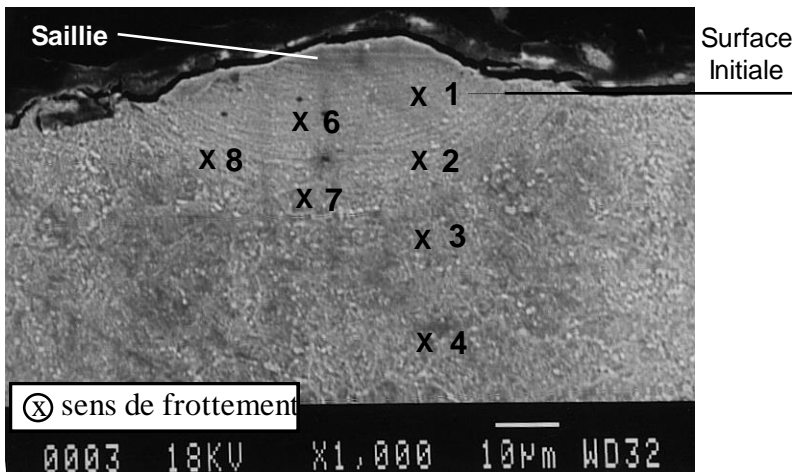


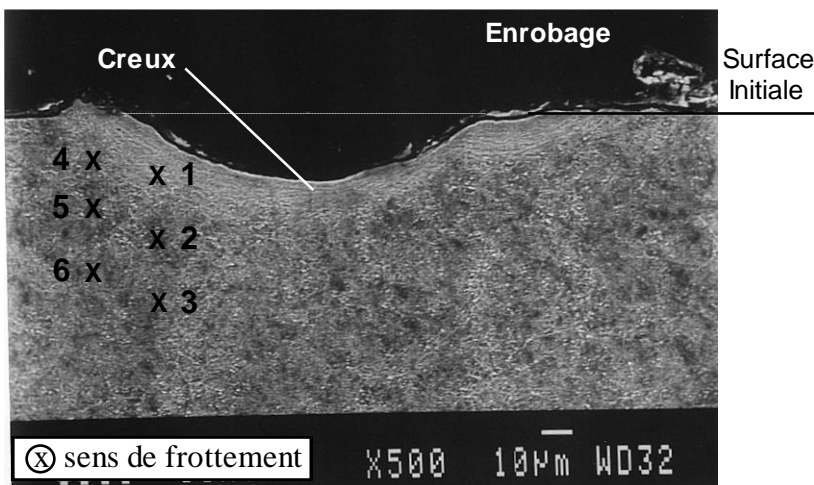
Fig. II-14 : Déformations plastiques en sous-surface (coupe A-A).

Nous avons observé au MEB sur la coupe de l'éprouvette supérieure selon le plan B-B (fig. II-13b), que les stries de labourage se représentent sous formes de creux et de saillies (fig. II-15a, b). Les creux correspondent aux zones d'écoulement de matière, et les saillies aux zones d'accumulation de matière (fig. II-16). Nous remarquons aussi l'existence de "lignes concentriques" qui sont le résultat des écoulements de matière (S_1M_3), délimitant des structures métallurgiques différentes. Les mesures de microdureté effectuées sur la face coupée de l'éprouvette supérieure, sur une saillie (fig. II-15a) et sur un creux (fig. II-15b) montrent que la dureté croît dans la zone des TTS, en direction de la surface.



Repère	Dureté Hv ₅₀
1	1000
2	680
3	530
4	470
6	980
7	680
8	520

a) Strie N° : 2;



Repère	Dureté Hv ₅₀
1	710
2	520
3	520
4	660
5	510
6	370

b) Strie N° : 4;

Fig. II-15 : Partie gauche de la coupe de l'éprouvette supérieure selon le plan B-B.

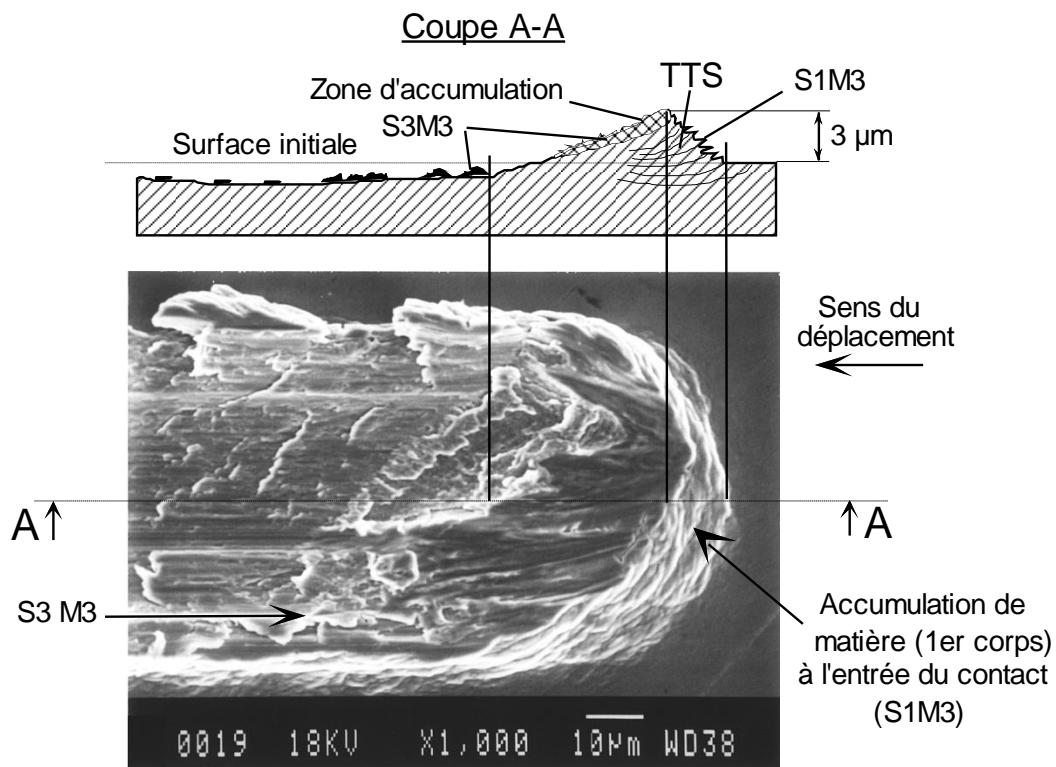


Fig. II-16 : Accumulation de matière par déformation plastique à l'entrée du contact.

La surface d'une éprouvette qui a frotté dans les conditions précédentes a été polie et attaquée au Nital à 4%. Les images optiques (fig. II-17) montrent des transformations de structures en amont de l'entrée du contact. Le matériau sur le bord avant d'une zone de portance a subi des transformations de structures avant même qu'il soit en contact direct avec le matériau antagoniste. Ce phénomène peut-être expliqué par la présence de bourrelets qui se forment à l'entrée du contact, (fig. II-16, flèche) par accumulation de matière suite aux déformations plastiques. Ce qui montre une propagation des TTS en sous-surface à l'avant du contact. Par conséquent, le contact entre les premiers corps s'effectue entre des matériaux dont les propriétés mécaniques, physiques et chimiques doivent être différents des propriétés initiales.

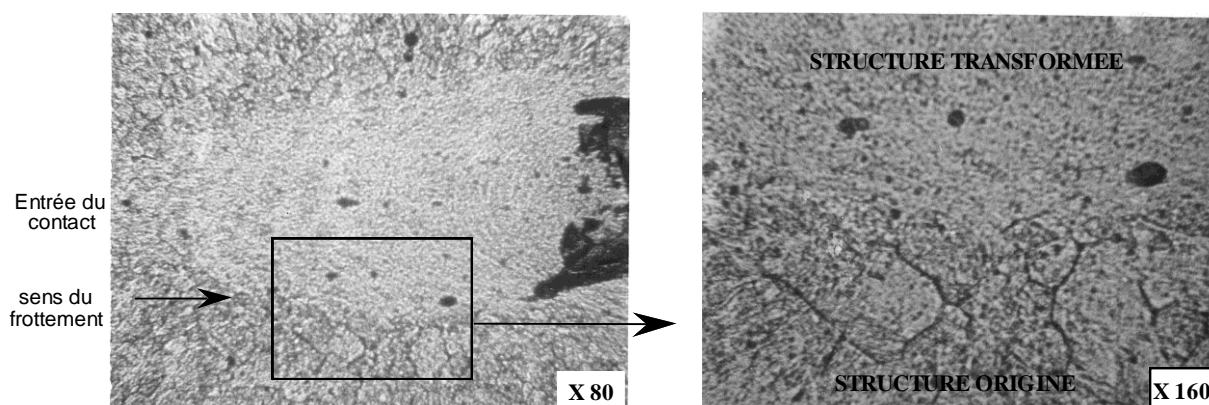


Fig. II-17 : Transformations de structure métallurgique à l'entrée du contact.

II.2.4.5 Scénario de formation des "stries de labourage"

Au moment de la mise en contact, les deux premiers corps sont séparés par les écrans naturels, qui empêchent leur adhérence. Au cours des premiers incréments de déplacements relatifs des premiers corps, soit $D_r \leq 30 \mu\text{m}$, le mécanisme d'accommodation activé est $S_{2,4}M_3$. A ce stade, le coefficient de frottement est faible, et les surfaces des premiers corps ne peuvent se dégrader. Ensuite, les stries de labourage se forment d'après le scénario suivant :

Lorsque le déplacement croît, dans certaines zones du contact les écrans n'ont plus la capacité d'accommoder le déplacement imposé. Il y a aura localement contacts directs (fig. II-18a) entre les premiers corps $S_{1,5}$ d'où leur adhérence [Rice1] mise en évidence ici, à partir de la mesure de la force normale d'ouverture du contact et par la complémentarité de la morphologie des surfaces antagonistes, qui indiquent alors une rupture après adhérence.

La très faible raideur normale du simulateur autorise autour des jonctions ainsi formées, une déformation plastique par des écoulements de matière ($S_{1,5}M_3$) qui débouchent en surface (fig. II-18b). Les "amas de matière" ainsi produits, accroissent la valeur de la séparation et modifient la répartition des zones portantes. Dans ces zones la pression de contact augmente vraisemblablement. Sous l'action de la déformation, et, ou de la pression, la dureté des sites $S_{1,5}$ augmente, c'est ce qui fait parler "d'écrouissage" sans que forcément ce terme soit représentatif des phénomènes mis en jeu.

Lorsque le déplacement se poursuit, l'accommodation de vitesse ($S_{1,5}M_3$) se poursuit entraînant (fig. II-18c) :

- un cisaillement des amas jusqu'au détachement de particules ayant la forme de feuillets. Il y a formation du site S_3 et activation du mécanisme d'accommodation de vitesse S_3M_3 qui s'ajoute au mécanisme $S_{1,5}M_3$;
- une décohésion ($S_{1,5}M_2$) à l'arrière du contact. Nous employons le terme de décohésion car il semble que ces ruptures soient induites par un effet d'étirement (fig. II-18d);
- une propagation de la TTS en avant du contact (fig. II-16).

L'accommodation de vitesse se réalise alors par activation des mécanismes $S_{1,3,5}M_3$.

Notons que c'est la faible raideur du simulateur (effet du mécanisme : S_0) qui autorise la création des amas formés par l'accommodation de vitesse $S_{1,5}M_3$ (effet des premiers corps). Se sont ces amas qui créent en quelque sorte les "rugosités" que devraient prendre en compte les modélisations à la place des rugosités initiales. Très rapidement le troisième corps s'interpose entre les amas. Lorsque le déplacement croît encore, la géométrie macroscopique du contact se superpose à l'effet de séparation. En effet, dans notre cas, la courbure de l'éprouvette bombée, favorise la formation des amas. Nous voyons ainsi à quelle échelle géométrique interviennent les éléments du triplet tribologique.

Il faut aussi souligner que, du fait de la propagation de la TTS à l'avant du contact, les caractéristiques mécaniques des sites $S_{1,5}$ à prendre en compte localement, sont très différentes des caractéristiques initiales.

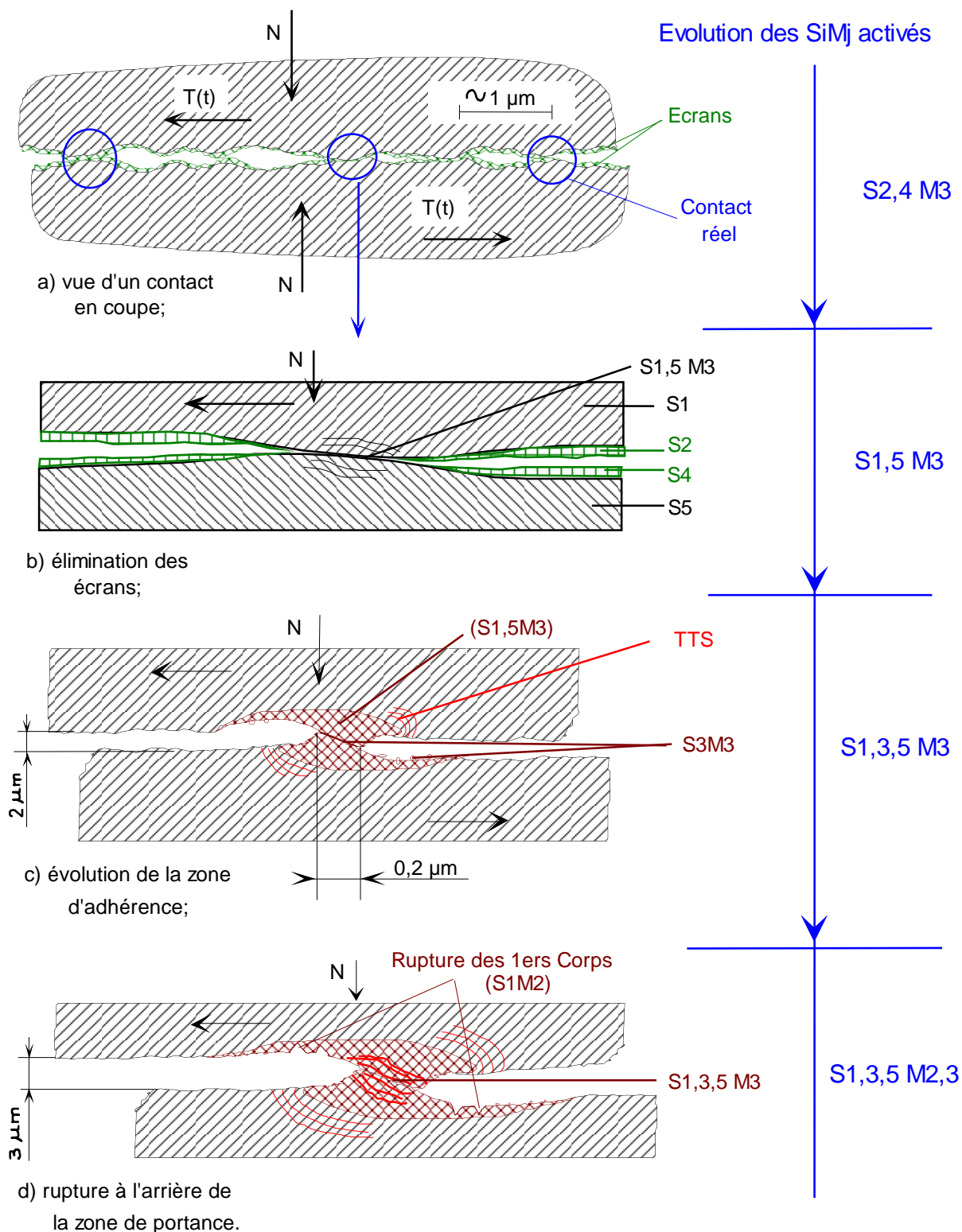


Fig. II-18 : Schéma du scénario de formation d'une strie de labourage.

Maintenant que l'enchaînement des mécanismes d'accommodation de vitesse est identifié, il est évident que leur analyse demanderait des mesures plus fines, couplées à des modélisations. Ceci, afin d'évaluer les

contributions respectives de la pression, de la déformation et de la raideur du simulateur, dans la formation des amas de matière, qui ne sont que la matérialisation de l'accommodation $S_{1,5} M_3$.

Il est aussi évident que nous venons de raisonner qu'à l'échelle d'une seule zone de contact, alors que, comme nous le verrons, dans un même contact plusieurs zones sont activées et peuvent se relayer. Les modélisations devraient être utilisées comme des outils d'analyse et d'aide la compréhension. Ce travail s'écarte de notre objectif, aussi nous en restons à la phénoménologie permettant de reproduire des TTS.

II.2.4.6 Evolution des zones portantes

Sur l'ensemble des essais effectués où il y avait formation de stries de labourage, nous avons remarqué qu'elles naissent à partir de petites zones de contact qui s'élargissent en surface et aussi en sous-surface en fonction du déplacement. Cependant cet élargissement, ou plus généralement cette évolution s'effectue différemment pour les stries des deux corps en contact. Schématiquement trois cas ont été identifiés, ils sont décrits séparément, puis récapitulés sur les figures II-22, 23, 24.

Le cas le plus fréquent, pour deux premiers corps ayant des propriétés de surface identiques, est qu'avec le déplacement de faible amplitude, le labourage s'effectue de part et d'autre sur les deux surfaces, symétriquement par rapport à la zone de portance, ou zone d'accumulation de matière, (fig. II-19). Dans ce cas, les stries antagonistes de chaque surface ont des longueurs voisines (fig. II-24a).

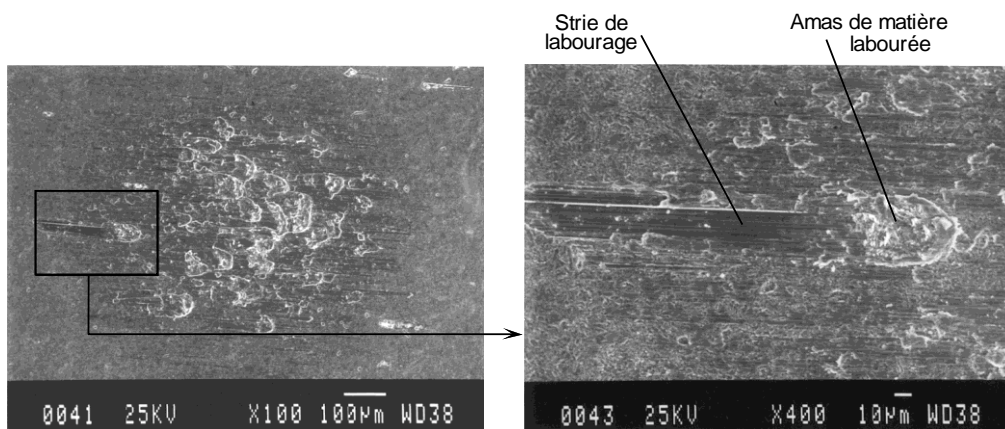


Fig.II-19 : Accumulation de la matière à l'avant de la zone de portance.

Parfois, l'amas de matière portante de l'une des deux surfaces peut se bloquer, le "labourage" de la strie de la surface correspondante s'arrête, ainsi que la propagation de la TTS. Le labourage dans ce cas, ne se poursuit que sur la surface antagoniste qui est la seule à contribuer à l'accommodation de vitesse (S_1 ou S_5). On obtient alors des stries antagonistes de longueurs différentes; $L_B > L_B'$. Il existe des cas (fig. II-20, fig. II-21) où la largeur des stries l_E et l_E' , et la longueur L_E et L_E' sont différentes. Un scénario possible de formation de ces stries est le suivant :

- la zone E (fig. II-21) de l'éprouvette inférieure (S_5) s'est formée en premier lieu par contact avec la zone E_0 de l'éprouvette supérieure (S_1) (fig. II-20);
- le déplacement continu, les deux éprouvettes sont séparées sous l'action des déformations plastiques de l'ensemble des stries, ce qui aurait modifié pour la strie E la profondeur affectée par l'accommodation de vitesse (S_5M_3), d'où la différence de largeur; $l_E > l_{E'}$;
- la zone portante E s'est ensuite bloquée, l'accommodation s'est poursuivie dans l'éprouvette supérieure (S_1M_3) mais aussi dans le troisième corps (S_3M_3) noté E_0 sur la figure II-21, d'où la différence de longueur : $L_{E'} > L_E$. Dans ce cas, la contribution du troisième corps à l'accommodation de vitesse, est très importante.

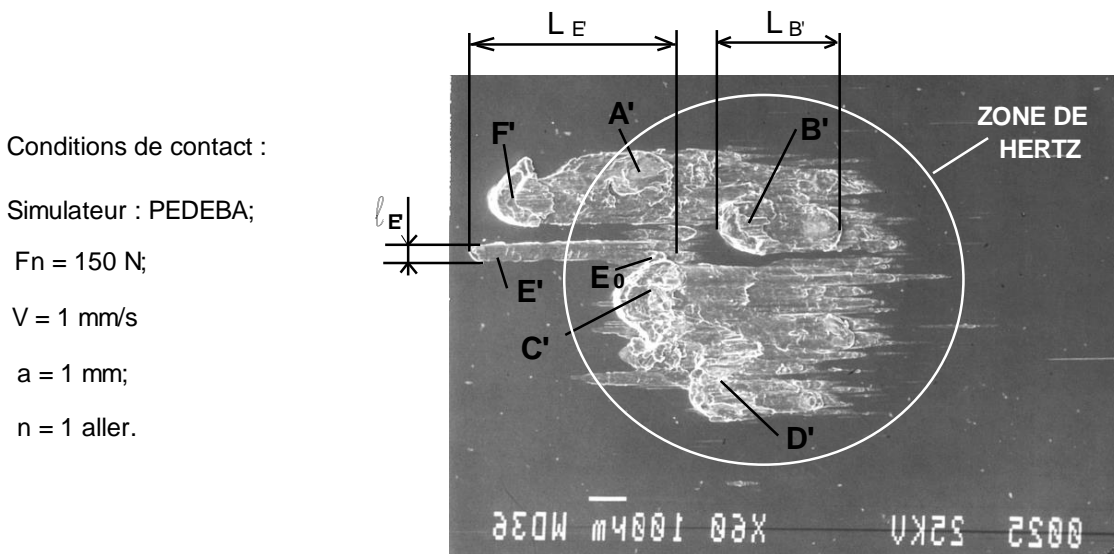


Fig.II-20 : Surface frottante de l'éprouvette supérieure (image inversée horizontalement).

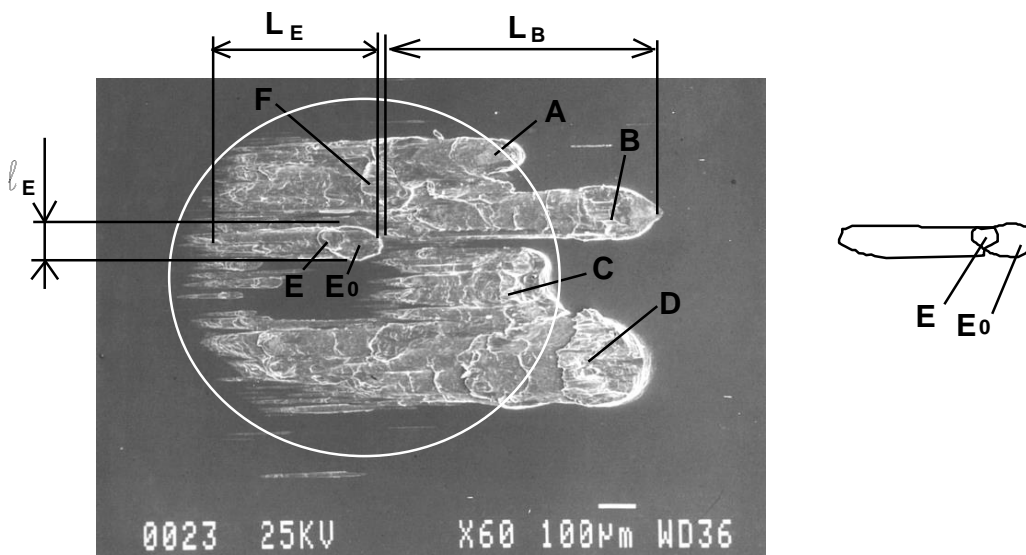


Fig.II-21 : Surface frottante de l'éprouvette inférieure, les points désignés sont les antagonistes de ceux de l'éprouvette supérieure ci-dessus.

Dans ce scénario, retenons qu'à l'échelle de l'ensemble du contact, les mécanismes d'accommodation de vitesse activés localement se prennent en relais. Par conséquent, le suivi des TTS suppose de contourner ces prises de relais qui compliquent l'analyse mécanique.

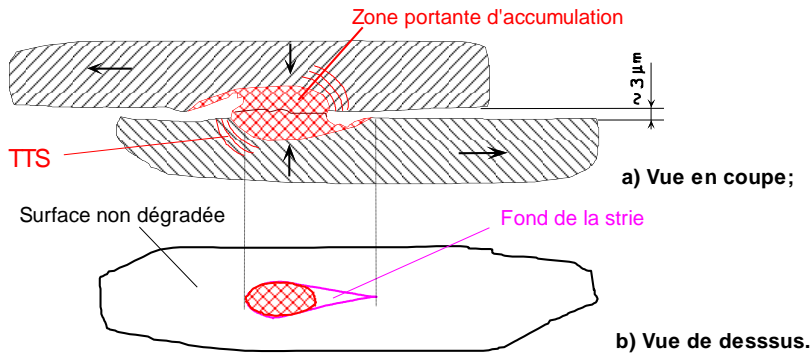


Fig.II-22 : Vue en coupe et de dessus d'une zone de portane.

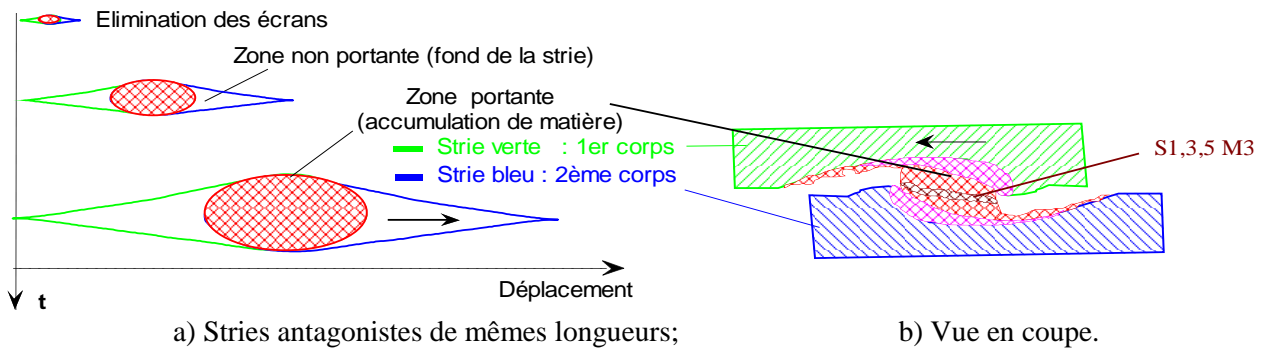


Fig. II-23 : Schéma de l'évolution des zones de portance selon le premier cas.

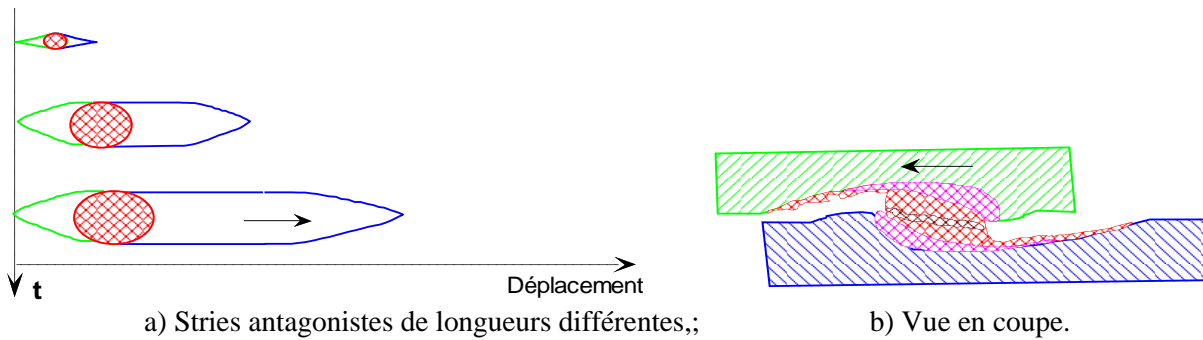


Fig.II-24 : Schéma de l'évolution des zones de portance selon le deuxième cas.

Le dernier cas identifié de l'évolution d'une zone de portance est celui engendré par l'éjection de 3ème corps en aval de la strie (fig. II-25). Les particules de 3ème corps éjectées s'agglomèrent progressivement et contribuent à l'accommodation de vitesse (S_3M_3 et S_3M_2). L'amas de particules ainsi sollicité se déplace par accommodation de vitesse dans les écrans ($S_{2,4}$), d'où la trace S_2 (fig. II-25) appelé "pseudo-strie". En fonction de la durée de vie des écrans, la pseudo-strie peut devenir une strie...

Notons que ce scénario de la naissance d'une nouvelle zone d'accommodation de vitesse a pu être établi par corrélation avec des essais réalisés en mouvement alternatif (fig. II-26). En effet, la cinématique alternative semble amplifier ce processus.

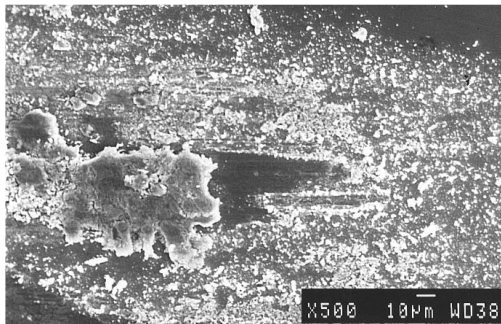


Fig.II-25 : Formation d'une pseudo-strie ($S_3M_{2,3}$, S_2M_3).

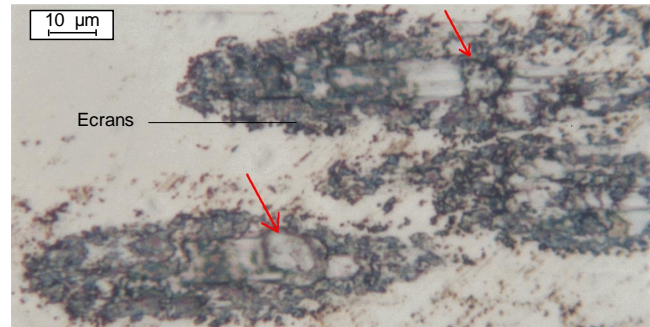


Fig.II-26 : Naissance de strie de labourage dans le cas du mouvement alternatif.

II.2.4.7 Reconstitution de la vie d'un contact lors du déplacement

En partant du constat de la complémentarité des morphologies des surfaces des premiers corps lors de l'ouverture du contact, nous avons essayé de reconstituer la vie du contact réel au cours du déplacement relatif des premiers corps, par la méthode suivante :

Nous avons photocopié sur un transparent, l'image optique de l'une des deux surfaces frottées. Ensuite ce transparent est superposé sur l'image optique de la surface antagoniste. L'animation II.1 présente cette reconstitution par incrément de 0,2 mm de déplacement en partant de la zone initiale de contact, qui est hertzienne.

A chaque incrément de 0,2 mm de déplacement, nous avons estimé l'aire de contact instantanée délimitée par l'intersection des stries antagonistes des deux surfaces. La pression "instantanée" est ensuite calculée d'après ces aires. L'appellation instantanée est abusive, en effet la pression instantanée ne peut être obtenue que par analyse d'image d'essai de visualisation.

Cette reconstitution montre bien que l'aire réelle de contact en fin de déplacement, se limitait aux sommets des zones portantes formées par accumulation de matière à l'avant du contact.

La courbe de la pression (fig. II-27), montre qu'avec le déplacement, la pression instantanée augmente. Ce qui est en accord avec la diminution de l'aire réelle de contact et la séparation des éprouvettes de plus de 3 µm en fin d'essai.

Nous remarquons (tab. II-1, fig. II-27) que le coefficient de frottement débute à la valeur 0,12, ce qui correspond à l'accommodation de vitesse dans les écrans ($S_{2,4}M_3$). Après élimination des écrans en certaines zones, l'adhérence locale des premiers corps fait augmenter le frottement rapidement, l'accommodation de vitesse passe de $S_{2,4}M_3$ à $S_{1,5}M_3$. Il se stabilise relativement pendant une phase dite de "labourage stationnaire". L'augmentation du coefficient de frottement en fin de déplacement semble due à l'augmentation de la largeur des stries, qui se traduit par une augmentation de la contribution du mécanisme d'accommodation de vitesse $S_{1,5}M_3$. La contribution du site S3 était très limitée.

Déplacement [mm]	Pression estimée [MPa]	Frottement
0	225	0,12
0,2	280	0,52
0,3	320	0,82
0,4	330	0,8
0,6	380	0,8
0,8	420	0,8
1	740	0,85
1,2	1200	0,87
1,4	3100	0,94
1,6	10000	0,98

Tab. II-1 : Valeurs de la pression réelle estimée et du coefficient de frottement, d'après le scénario de reconstitution du contact en mouvement.

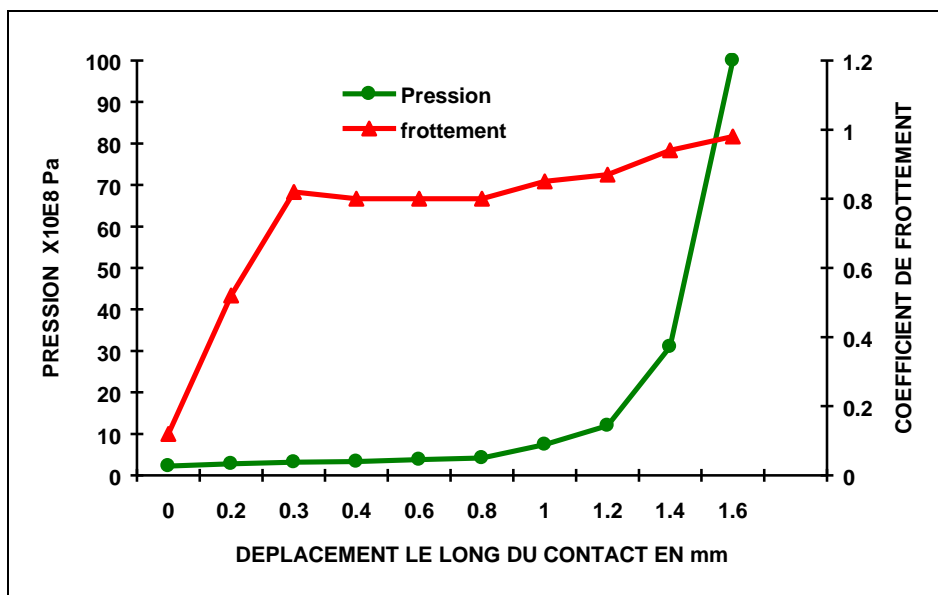
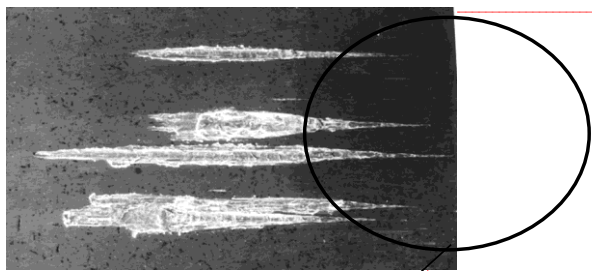
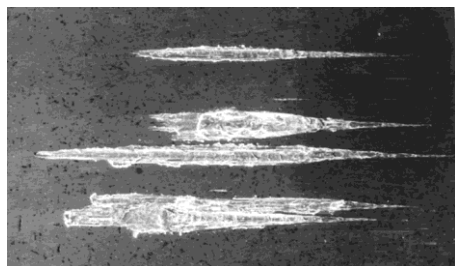


Fig. II-27 : Pression réelle et coefficient de frottement d'après le scénario de reconstruction de la vie du contact.

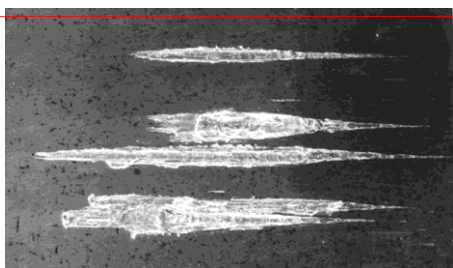


Position initiale

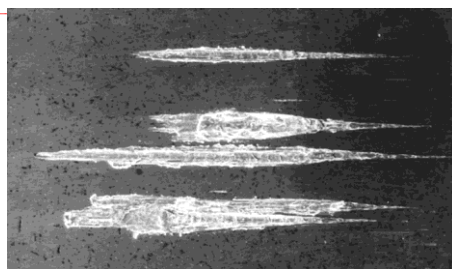
Zone de Hertz



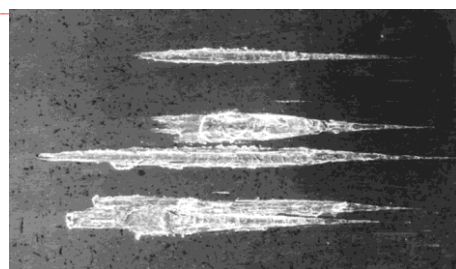
Sens de déplacement

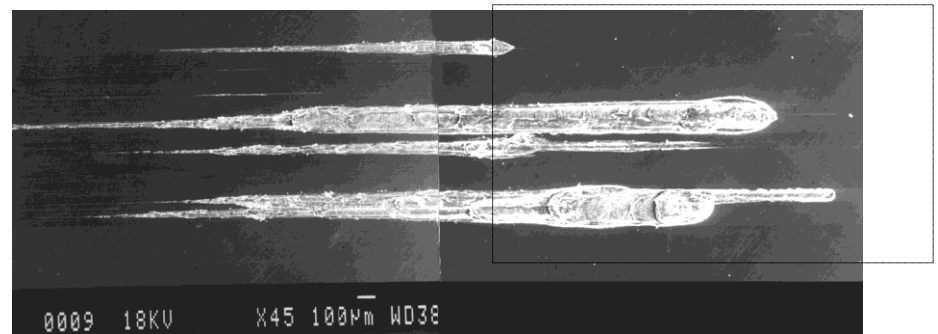
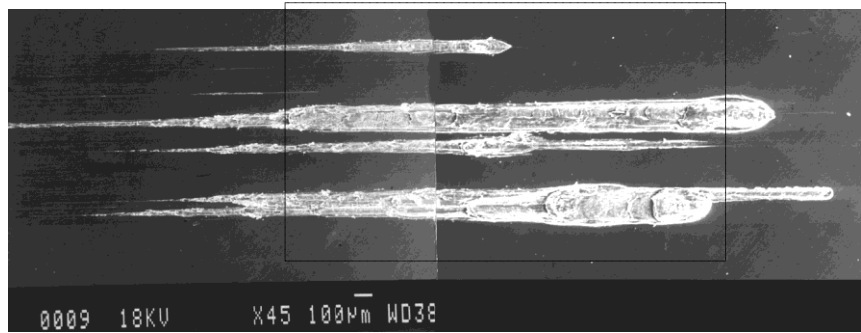
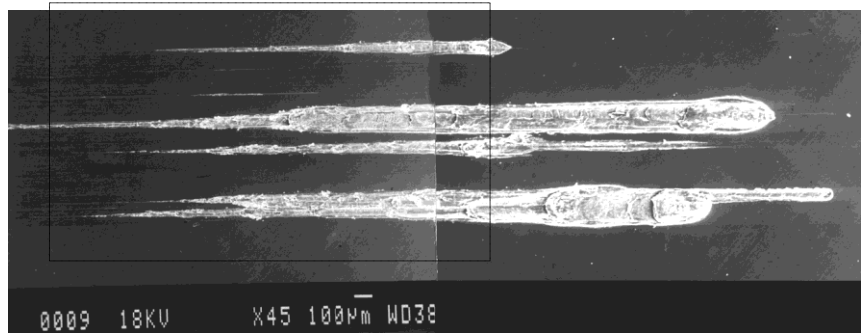
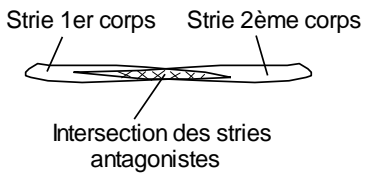
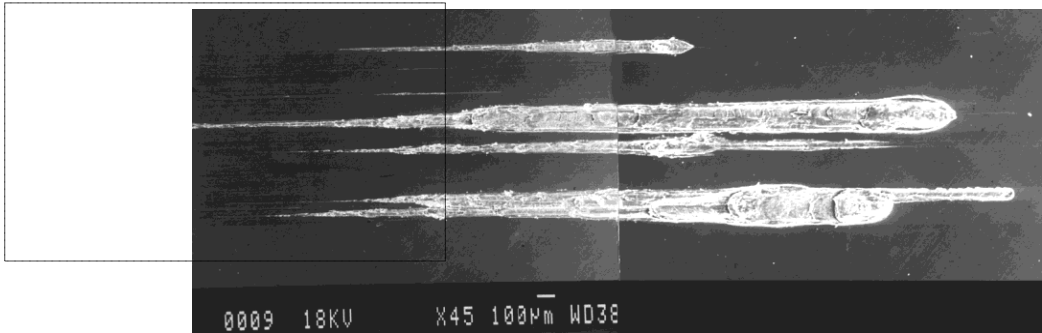
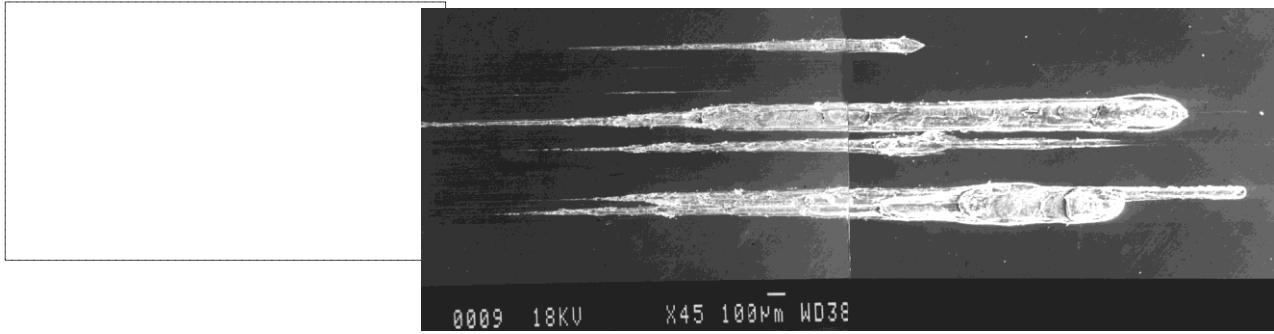


" Transparent "



Position finale





Animation II.1 : Simulation du déplacement relatif des premiers corps par animation du transparent.

II.2.4.8 Conclusion

Les essais en une passe nous ont permis de :

1. comprendre la réaction des écrans de surface face aux sollicitations tribologiques;
2. suivre la formation et l'évolution des zones de portance ainsi que des TTS, et la formation du troisième corps.

La durée de vie des écrans qui dépend essentiellement de leur nature, est sensible à l'amplitude du déplacement. Nous avons vu qu'un déplacement de plus de 30 μm les élimine immédiatement de certaines zones, ce qui autorise l'adhérence des premiers corps. La compréhension de cette réaction des écrans et des premiers corps face aux sollicitations tribologiques nous a permis de reconstruire le scénario de la formation des stries de "labourage" qui conduisent à la formation des TTS, puis au détachement de particules de troisième corps. La naissance des stries de labourage dépend en premier lieu de la vie des écrans. Ensuite, leur évolution dépend des conditions de contact, y compris la raideur normale du simulateur. Cette raideur qui est pratiquement annulée verticalement par le système de chargement par gravité (fig. II-1), autorise une séparation de plusieurs micromètres permettant l'accumulation de la matière à l'avant du contact.

Conformément aux travaux de Colombier [Colo] et Blanchard [Blan], la dureté des TTS est supérieure à la dureté initiale des sites S_1 et S_5 . Bien que nous ne l'avons pas spécifiquement étudié, leur structure métallurgique est aussi différente de la structure initiale des sites S_1 et S_5 . Dans nos conditions d'essais, les TTS se propagent à une distance de l'ordre de 50 μm en sous-surface et d'environ 100 μm à l'avant de la zone effective de contact.

Nous avons constaté le couplage entre déformation et pression lors de la naissance des TTS. En effet, leur naissance se produit après élimination des écrans qui permet l'adhérence locale des sites S_1 et S_5 . Le mécanisme d'accommodation de vitesse activé dans ces zones est alors $S_{1,5} M_3$, se traduisant par une déformation plastique qui, dans notre cas, fait augmenter la séparation des sites $S_{1,5}$, ce qui se induit une variation locale de pression.

Les conditions d'obtention des TTS sur les simulateurs, PEDEBA et TRIBOMAB, étant identifiées par des déplacements unidirectionnels monopasses, nous avons repris le même travail d'identification dans le cas des déplacements unidirectionnels cycliques.

II.2.5 Essais effectués en mouvement alternatif à plusieurs cycles

II.2.5.1 Introduction

Ces essais unidirectionnels cycliques ont été réalisés à des amplitudes de déplacement tangentiel inférieures à 50 micromètres. L'étude des TTS dans ces conditions présente un intérêt industriel, car ce sont celles des liaisons quasi-statiques, tels que les assemblages soumis à des vibrations et, ou aux déformations des éléments en contacts.

Le "TRIBOMAB" peut effectuer des mouvements alternatifs grâce à un moteur pas à pas réversible. Le déplacement peut être choisi entre $\pm 1 \mu\text{m}$ et $\pm 50000 \mu\text{m}$. A chaque changement de sens de rotation du moteur, il y a une période d'arrêt du moteur (temps mort) d'une vingtaine de millisecondes. Si la fréquence théorique du mouvement est déterminée par la vitesse et la valeur du débattement, la fréquence réelle, dépend du débattement réel, et du temps mort.

Nous avons effectué quelques dizaines d'essais en mouvement alternatif à petits débattements, dont un récapitulatif est présenté en annexe B.

A la fin de chaque essai, les deux éprouvettes sont examinées au microscope optique et au MEB. Quelques essais ont été visualisés in-situ à l'aide d'une caméra et d'éprouvettes transparentes en verre ou en saphir. Ces essais ont contribué à la compréhension de certains phénomènes de surface, et seront référencés en conséquence (annexe B).

Nous présentons ici l'analyse globale de l'ensemble de ces essais en l'axant sur la maîtrise de la formation des TTS.

II.2.5.2 Conditions des essais

Les essais exploités ici, ont été réalisés sur le TRIBOMAB, dans les conditions suivantes :

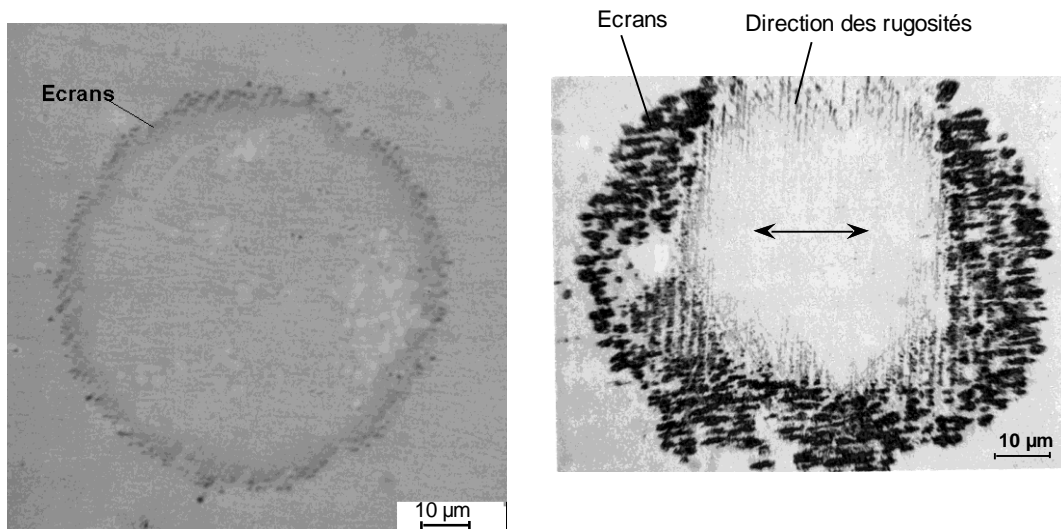
- milieu : ambiant,
- géométrie des premiers corps : bombé/plan;
- charge normale : 50 à 250 N;
- amplitude du déplacement : $\pm 2,5$ à $\pm 50 \mu\text{m}$;
- Ra : 0,02 à 0,08 μm ;
- vitesse théorique : 0,5 mm/s;
- nombre de cycles : 1 à 1000.

II.2.5.3 Anneau de Mindlin

Les essais en mouvement alternatif à faibles amplitudes c'est à dire inférieures à 25 micromètres, ont donné sur les surfaces frottées des anneaux de diamètres inférieurs au millimètre, qui sont visibles à l'oeil nu, (fig. II-28a). Les essais de visualisation in-situ par caméra à un grossissement de 500 fois, ont montré après seulement quelques cycles de frottement la formation sur la périphérie de la zone de Hertz d'un anneau (fig. II-28b) de couleur distincte et d'une largeur de quelques micromètres.

Cet anneau serait à priori la matérialisation de celui introduit théoriquement en 1949 par Mindlin [Mind] pour calculer la compliance d'un contact chargé normalement entre un premier corps bombé et un premier corps plan. Mindlin a introduit théoriquement cet anneau pour satisfaire au mieux l'écriture des conditions mathématiques de contact. Il divise l'aire du contact en deux zones : une centrale, où il n'y aurait pas de glissement, et un anneau périphérique où il y aurait glissement. Mindlin suppose que le glissement s'effectue de l'extérieur vers l'intérieur de l'anneau. Son étude ne se réfère à aucune condition expérimentale. L'étude de cet anneau a été reprise au laboratoire par I. Raou [Raou] puis par N. Noll [Noll].

Dans notre cas, l'obtention de cet anneau qui résulte des conditions tribologiques adoptées, est utilisée comme moyen de contrôle de la reproductibilité des essais. En effet il est très sensible aux conditions initiales de rugosité (fig.II-28a), et aux conditions de nettoyage des premiers corps.



a) $a = \pm 5 \mu\text{m}$, $N = 70$ N, $P_{\text{max}} = 0,5$ GPa; b) $a = \pm 25 \mu\text{m}$, $N = 24$ N, $P_{\text{max}} = 0.39$ GPa.

Fig.II-28 : Anneau de Mindlin, sans dégradation de surfaces jusqu'à 1000 cycles.

Dans notre cas, l'anneau est apparemment formé par accumulations d'écrans qui se sont éventuellement transformés chimiquement pendant le frottement (Cf. II.2.5.4). Un relevé de profil de la surface effectué par rugosimètre optique (UBM), (fig. II-29) montre que l'anneau a une épaisseur de l'ordre du micromètre.

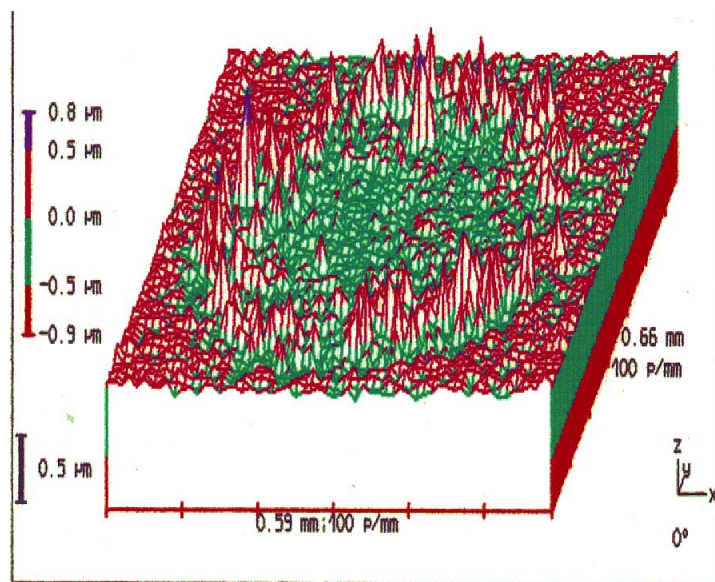


Fig. II-29 : Profil de l'anneau de Mindlin obtenu par rugosimétrie optique.

La formation de cet anneau conduit à l'activation du mécanisme d'accommodation de vitesse $S_{2,4}M_3$. La durée de vie de ce mécanisme conditionne les formations des TTS.

II.2.5.4 Vie des écrans

Notre objectif n'étant pas d'étudier le comportement des écrans, nous avons simplement réalisé des essais pour identifier parmi les paramètres que nous pouvions contrôler ceux qui influençaient significativement leur vie.

Les observations au microscope optique et au MEB, des éprouvettes après essais (Annexe B), montrent que le comportement des écrans dépend en premier lieu de leur nature, et ensuite de l'amplitude du débattement. Le contrôle et l'analyse des écrans étaient délicats, nous avons étudié :

1. l'influence de leur nature, en notant par exemple l'effet du produit de polissage. En effet lors de la préparation des éprouvettes nous avons utilisé deux produits de polissage, dont un est soluble dans l'eau, et l'autre insoluble. Malgré le nettoyage à l'alcool et aux ultrasons, les écrans issus du produit insoluble favorisent la formation de l'anneau, ainsi que l'accommodation $S_{2,4}M_3$ sans formation de TTS, pendant un nombre de cycles très élevé. En augmentant le nombre de cycles, les écrans peuvent s'éliminer de certaines zones de l'anneau, entraînant la formation de TTS;
2. le rôle des amplitudes de déplacements théoriques, lorsque ceux ci sont inférieurs à 30 μm , les écrans résistent pendant plusieurs centaines de cycles. Les écrans sont alors sensibles au déplacement. Les observations au microscope optique et au MEB ne dévoilent pas d'importantes dégradations des surfaces (fig. II-30). Au-delà de 30 μm , il peut y avoir des ruptures locales des écrans après seulement quelques cycles. Des stries de quelques micromètres de longueur apparaissent alors sur les surfaces, en premier lieu sur l'anneau de Mindlin;
3. l'effet de la charge normale, qui dans une plage de 50 à 250 N, donc des pressions Hertziennes de 200 MPa à 1 GPa, n'a pas modifié notablement le comportement des écrans. Les courbes de frottement ont toutes la même allure (fig. II-37), seules les valeurs maximales changent selon la réaction des écrans et l'évolution des stries si elles se produisent;
4. l'influence des rugosités de surfaces, dont les valeurs de R_a varient ici de 0,01 à 0,08 μm . L'image optique (fig. II-31) montre le rôle des rugosités, qui participent au piégeage des écrans (fig. II-32), donc favorise l'accommodation $S_{2,4} M_3$.

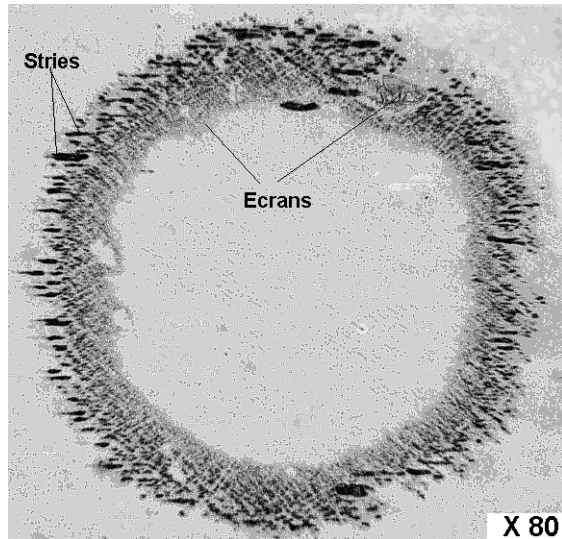


Fig. II-30 : Premières dégradations sur l'anneau.

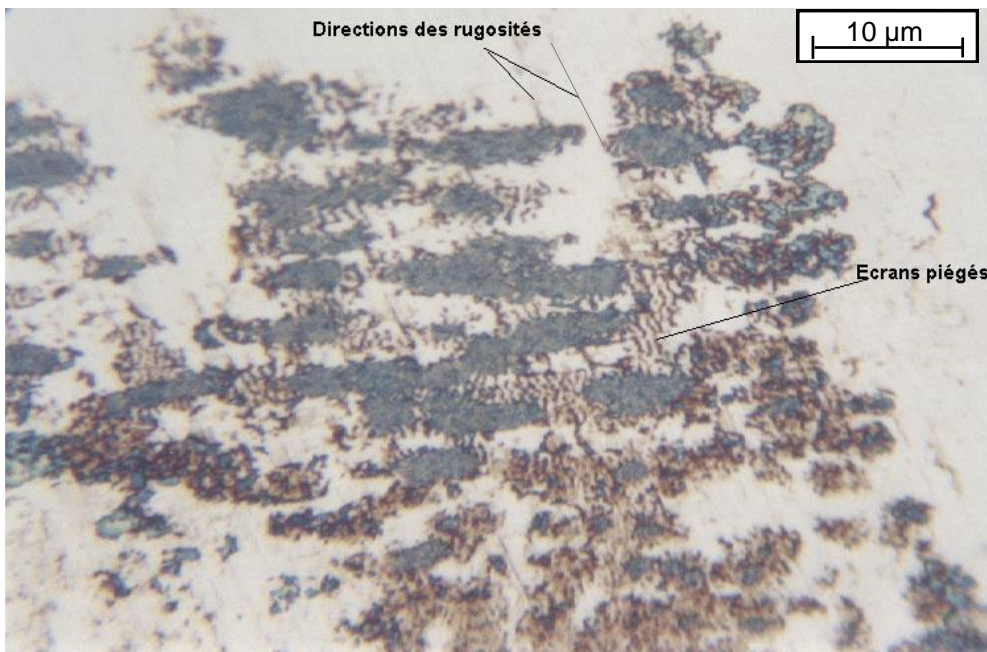


Fig. II-31 : Piégeage des écrans entre les rugosités de surface.

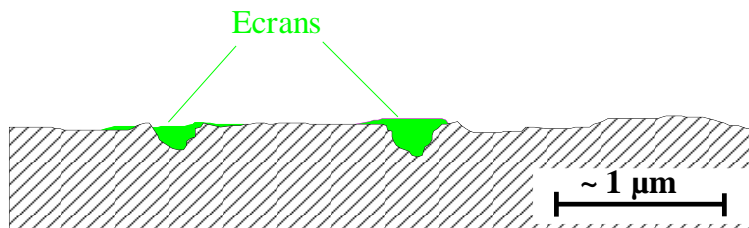


Fig. II-32 : Schématisation du piégeage des écrans dans les rugosités.

A l'heure actuelle, les moyens d'analyse des propriétés mécaniques, physiques et chimiques des écrans ne donnent pas encore satisfaction malgré des travaux réalisés en parallèle de ce travail [Noll]. Des analyses par infrarouge au CRPCS devenu depuis XSI de Mulhouse, ont montré un processus de formation de

polymères pendant le frottement, qui proviennent des transformations du reste du produit de polissage, (fig. II-33). Au début de nos essais de frottement, nous avons été confrontés à ce problème sans vraiment l'avoir identifié comme tel. Par ailleurs, ce n'est que l'exploitation de simulateurs de plus en plus précis, conjointement au constat précédent, qui a permis de mettre en évidence que de faibles modifications des écrans initiaux pouvaient modifier significativement le comportement tribologique d'un contact pendant des durées très importantes. Par exemple jusqu'à $4 \cdot 10^4$ cycles dans le cas d'un contact acier/polymère [Pill].

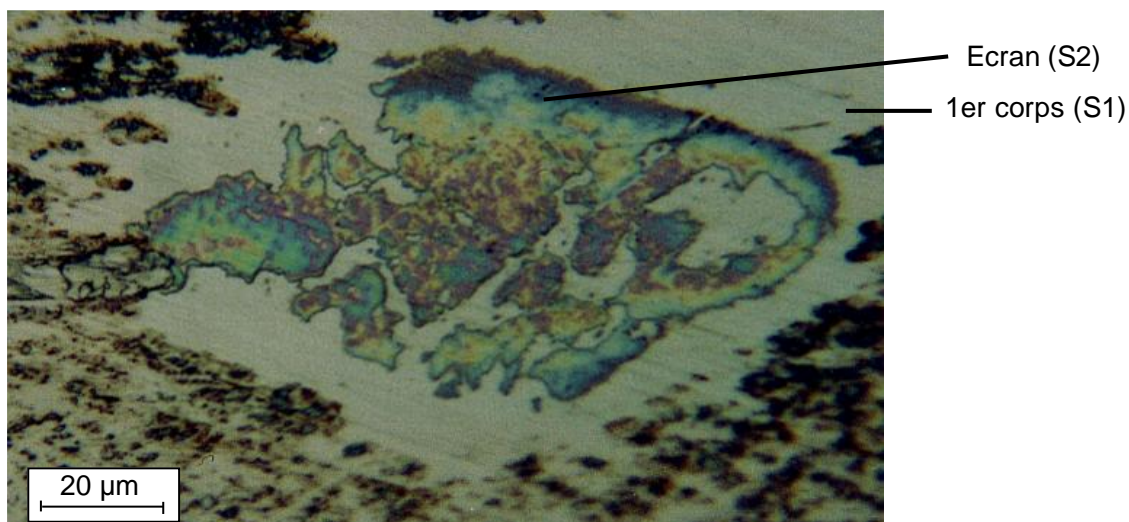


Fig. II-33 : Ecrans formés pendant le frottement, à partir de reste du produit de polissage.

II.2.5.5 Effet du simulateur

Nous avons remarqué qu'avec une amplitude théorique de $50 \mu\text{m}$, nous obtenons des stries de labourage localisées sur certaines zones de la surface de contact (fig. II-34), dont le nombre ne semble pas évoluer avec le nombre de cycles. En partant du comportement élastique du simulateur TRIBOMAB (Cf. I.1.2.4.4), nous avons compris que ces dégradations s'obtiennent en fait, seulement au cours du premier passage. A partir du premier retour l'amplitude de déplacement réel se réduit à moins de $30 \mu\text{m}$, (Cf. III.1.2.4.3). Dans ce cas, à cette amplitude du débattement, les écrans contribuent à l'accommodation de vitesse et protègent les surfaces jusqu'à plusieurs centaines de cycles. De ce fait, nous avons décidé pour les futurs essais, dans le cas où les amplitudes théoriques sont supérieures à $30 \mu\text{m}$, de commencer le mouvement à des faibles amplitudes, puis de les augmenter progressivement jusqu'à l'amplitude voulue. Ceci permet d'éviter la dégradation de la surface dès le premier passage, dont l'amplitude réelle dépasse celle du mouvement alternatif qui suit.

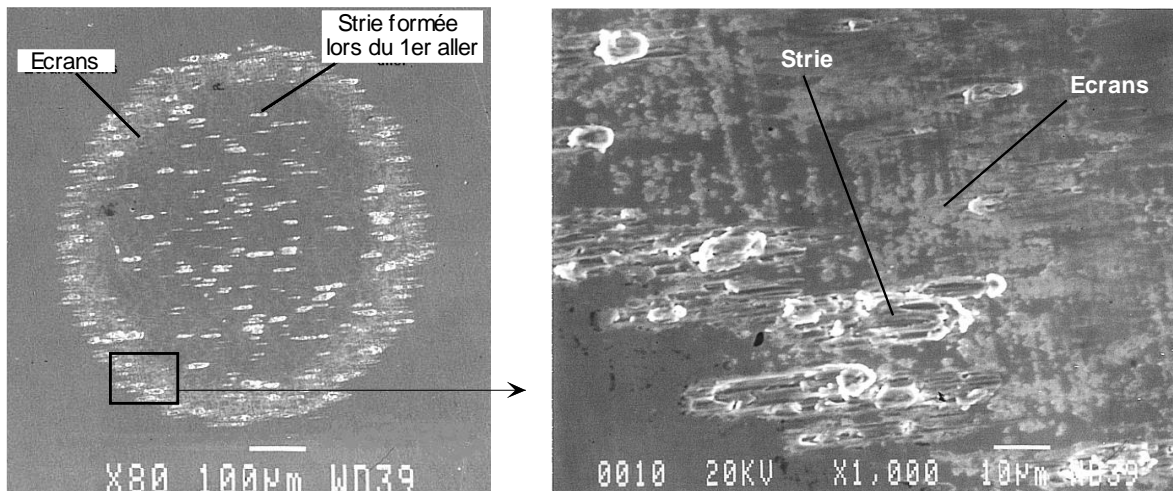


Fig. II-34 : Stries formées lors du premier déplacement, $\pm 25 \mu\text{m}$ à 10 cycles.

II.2.5.6 Dégradation de la surface

Avec des amplitudes de débattement de plus de $50 \mu\text{m}$, et un nombre de cycle supérieur à 100, les écrans sont totalement éliminés du contact, les deux surfaces des premiers corps se trouvent en contact direct. Le scénario décrit au chapitre Cf.II.2.4.5 se reproduit, l'accommodation de vitesse ne s'effectue plus par activation du mécanisme $S_{2,4}M_3$ mais par activation du mécanisme $S_{1,5}M_3$. En effet pendant le déplacement relatif, il y a rupture dans les premiers corps autour des jonctions formées par adhérence. Le matériau dans la zone d'adhérence se déforme plastiquement.

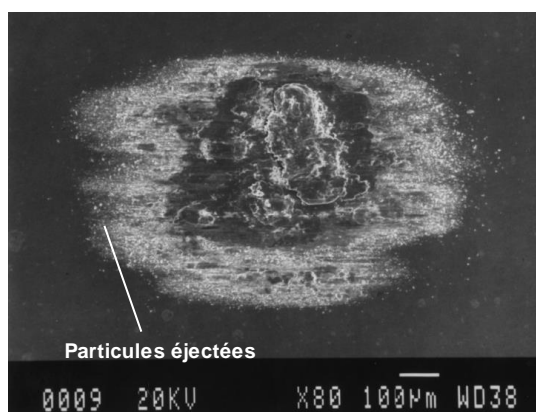


Fig. II-35 : Ejection des particules détachées.

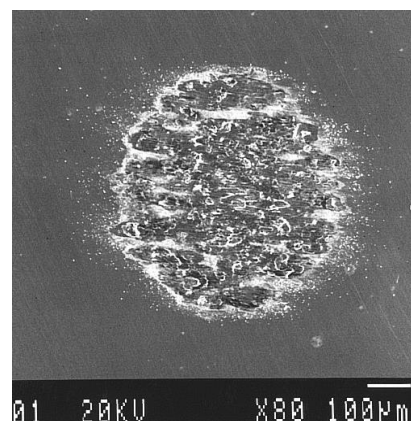


Fig. II-36 : Zone de contact dégradée.

Les fortes pressions locales provoquent l'écoulement de la matière, qui ensuite conduit au détachement de particules (fig. II-35). Au cours du temps le débit source des particules peut se stabiliser, ou s'arrêter. Ce sont les particules déjà détachées qui assurent alors la portance, selon leur maintien dans le contact (débit interne). Sinon, le débit source s'accroît avec le nombre de cycles, et la dégradation affecte l'ensemble du contact, (fig. II-36).

Sur le plan technique, notons que cette notion du débit source de troisième corps traduit le fait qu'une surface dégradée peut encore remplir sa fonction si le troisième corps reste piégé dans le contact.

II.2.5.7 Etude d'une courbe de frottement typique du mouvement cyclique

Comme nous voulons travailler à des déplacements inférieurs à une cinquantaine de micromètres, il est nécessaire de caractériser le comportement du simulateur dans cette plage de fonctionnement.

La figure II-37 montre les courbes des déplacements réels ainsi que la courbe de la force tangentielle mesurée pendant un cycle de frottement. Ces courbes sont obtenus lors d'un essai effectué à $F_n=100$ N, $V=0,5$ mm/s, à l'air ambiant, qui est typique de l'ensemble des essais effectués sur notre simulateur. Le déplacement réel de la table de translation est mesuré entre la partie mobile de la table et le bâti du simulateur. Quant au déplacement réel entre les deux éprouvettes, il est mesuré entre le porte éprouvette inférieur qui est mobile, et le bâti.

Pour faciliter la comparaison nous avons :

1. regroupé les courbes sur le même graphique;
2. représenté tous les signaux en [mV], en gardant le même calibre pour les déplacements;
3. décalé de la valeur "a", le zéro de la courbe de déplacement entre les éprouvettes (D_r).

La phase A correspond à l'accommodation par déformation élastique du simulateur (Cf. II.1.2.4.3) S_0M_1 . Pendant cette phase, la valeur du déplacement réel D_r est très faible par rapport à la valeur théorique imposée D_{th} , alors que la force tangentielle atteint rapidement la valeur qui va permettre le mouvement. Cette phase est principalement dominée par l'effet des écrans qui séparent les premiers corps et évitent leur adhérence, ce qui limite le frottement.

La phase B qui représente un arrêt total de déplacement, ne peut s'expliquer que par un problème de calage de jeux dans les mécanismes d'entraînement de la table de déplacement.

La phase C correspond à un déplacement à vitesse constante, les courbes de déplacement de la table et des éprouvettes sont linéaires dans le temps. On remarque que le déplacement de la table est supérieur à celui des éprouvettes ($a' > a$), ceci est dû principalement à l'accommodation élastique du capteur de force situé entre la table et l'éprouvette inférieure. Durant cette phase le frottement peut croître ou diminuer suivant les mécanismes d'accommodation de vitesse activés dans le contact.

La phase D correspond à l'arrêt du déplacement qui correspond au temps de changement de sens de rotation du moteur d'entraînement. La force tangentielle diminue, suite au rattrapage des différents jeux, mais aussi vraisemblablement suite à une réorganisation du troisième corps. Cette réorganisation a été identifiée lors d'essais de visualisation. Il n'est pas possible de conclure au-delà, car les déplacements mis en jeu étaient au voisinage de la résolution du système optique utilisé. Après cet arrêt, le même cycle se répète dans le sens opposé.

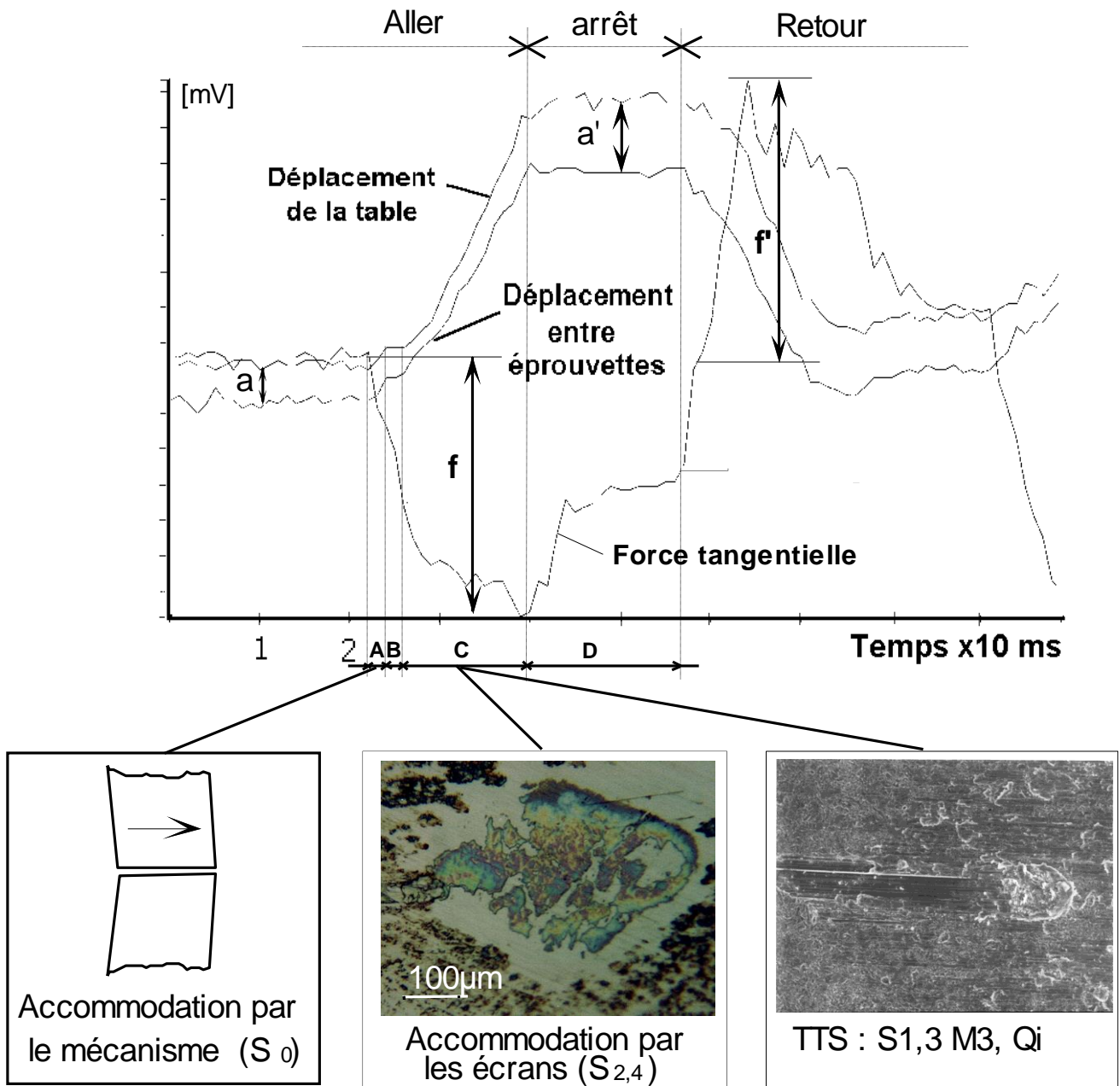


Fig. II-37 : Courbes des déplacements et de force tangentielle au cours d'un cycle de mouvement alternatif.

Nous remarquons que pendant le premier retour, la force tangentielle augmente considérablement (fig. II-37, $f' > f$), à cause des réactions physico-chimiques induites par les écrans. L'amplitude de déplacement du premier passage est toujours supérieure à celles des cycles suivants, même dans les cas où il n'y a pas de "griffure". Ceci est dû au comportement des écrans de surface, et à celui du simulateur.

II.3 CONCLUSION

L'analyse de ces premiers essais tribologiques effectués sur les simulateurs PEDEBA et TRIBOMAB nous a permis de définir des protocoles d'essais permettant d'obtenir des TTS et d'assurer la reproductibilité des essais futurs. Ce travail était nécessaire car les degrés de libertés de l'étude étaient d'autant plus importants, que les notions d'écrans et de TTS étaient en cours d'études. Sur le plan de la microscopie acoustique nous avons tout à apprendre d'une technique elle aussi en pleine évolution. Aussi nous avons tenu à limiter le nombre de paramètres expérimentaux à prendre en compte.

La compréhension de la formation des TTS et du détachement de particules associé, passe par la maîtrise du rôle des écrans. En effet, en l'absence de forte rugosité, comme c'est le cas ici, les champs de contraintes locaux auxquels répondent les premiers corps (sites S_1 et S_5) sont en partie déterminés par la résistance mécanique des écrans, qui fixe la valeur locale de la force tangentielle. L'obtention des TTS en un faible nombre de cycles passe d'abord par l'élimination des écrans, dont la durée de vie, dépend en premier lieu de leur nature, de la valeur des déplacements, de la géométrie locale du contact et de la rigidité du simulateur. La notion d'écrans étant récente au début de ce travail et une thèse étant en cours sur ce sujet, nous nous sommes limités à les maîtriser de manière à assurer la reproductibilité de leurs effets. Une partie de ce travail a été validé à partir d'essais de visualisation conduits en collaboration avec le thésard étudiant spécifiquement les écrans.

Partant de là, nous avons suivi la naissance des TTS à partir des zones d'où sont éliminés les écrans. Dans ces zones très réactives, les matériaux des premiers corps adhèrent, ce qui se traduit par l'augmentation locale de la force tangentielle. Si le mouvement imposé est suffisant en regard de la raideur tangentielle du simulateur, l'accommodation dans les sites S_1 et S_5 se traduit par des écoulements de matière $S_{1,5}M_3$. En fonction de la raideur normale du simulateur, faible dans notre cas, la séparation des premiers corps augmente en s'accompagnant de la formation d'un troisième corps (site S_3). Ce dernier prend alors la relève des sites S_1 et S_5 en accommodant leur différence de vitesse. Les observations au MEB et par caméra in-situ, nous ont permis de reconstituer le scénario de l'enchaînement de l'activation des S_iM_j .

Les coupes métallographiques ont montré que sous les zones dégradées observées en surface et en avant de ces zones, se formaient des modifications de structures conformes à celles mise en évidence par Colombié [Colo, 1986] et dénommées TTS. Sous les sollicitations normales et tangentielles combinées, il y a propagation de ces TTS en avant de la zone effective de contact.

Etant capable de reproduire des TTS, il s'agit de savoir maintenant comment elles sont détectables par microscopie acoustique.

CHAPITRE III

MICROCARACTERISATION ACOUSTIQUE

III.1 INTRODUCTION

L'utilisation des ultrasons en microscopie trouve ses origines dans les années soixante-dix, suite aux travaux de Quate et Auld [Quat] de l'université de Stanford (Californie). Actuellement, plusieurs prototypes de Microscope Acoustique à Balayage (MAB) sont commercialisés, fonctionnant à des fréquences dépassant le Giga Hertz. La fréquence est directement liée à la résolution du MAB, qui avoisine le micromètre à une fréquence d'un GHz. Cette résolution est obtenue en focalisant les ondes acoustiques à l'aide d'une lentille en un foyer central appelé tache focale par similitude avec la microscopie optique. La propagation des ondes acoustiques à ces fréquences est fortement atténuée dans l'air, il faut donc ajouter un liquide de couplage entre la lentille et la surface à analyser. L'avantage de l'utilisation des ondes acoustiques, réside dans leur propriété de se propager à l'intérieur de la matière sans destruction. Les vitesses de propagation de ces ondes étant directement liées aux propriétés élastiques du matériau analysé, elles constituent une source d'information sur le matériau.

L'utilisation du MAB en tribologie présente un double intérêt. En effet, comme nous le verrons, selon la direction de balayage par rapport à la surface analysée, horizontal ou vertical, le MAB peut fournir respectivement :

1. des images de surface ou de sous-surface "tribologique" des premiers corps, à des grossissements pouvant atteindre 2000 fois;
2. des mesures locales des vitesses des ondes acoustiques qui donnent localement les valeurs intrinsèques des constantes d'élasticité du matériau.

Ce chapitre présente quelques notions de base de la physique des ultrasons qui seront appliquées à la microscopie acoustique. Ensuite nous détaillons le fonctionnement du microscope acoustique qualitativement et quantitativement, en vue de son utilisation en tant que tribologue.

III.2 NOTIONS ELEMENTAIRES DE LA PHYSIQUE DES ULTRASONS

III.2.1 Type d'ondes

Dans un solide élastique, les ondes acoustiques se propagent en induisant des variations de pression, sous différents modes. Seuls les principaux modes ou types d'ondes sont décrits ici.

III.2.1.1 Ondes longitudinales

Appelées aussi ondes de compression. La direction de propagation est confondue avec la direction des vibrations (fig. III-1). Leur vitesse V_l est donnée par la relation (III-1) :

$$V_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (\text{III-1})$$

λ, μ : constantes de Lamé, E : module de Young,
 ν : constante de Poisson, ρ : masse volumique du matériau.

III.2.1.2 Ondes transversales

Appelées aussi ondes de cisaillement. La direction de propagation est perpendiculaire à la direction de vibration (fig. III-2). Ces ondes ne se propagent pas dans les liquides ou les gaz dont le module d'élasticité transversale est nul. Ces ondes se propagent avec la vitesse V_t donnée par la relation (III-2):

$$V_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (\text{III-2})$$

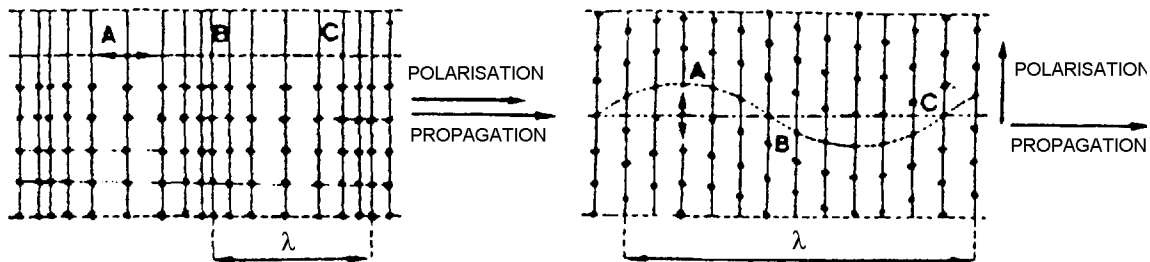


Fig. III-1 : Ondes Longitudinales. Fig. III-2 : Ondes Transversales.

III.2.1.3 Ondes de Rayleigh

Lord Rayleigh a montré en 1887 que lorsqu'un solide élastique isotrope est limité par une surface; des ondes de surfaces peuvent alors apparaître, (fig. III-3). Ces ondes sont constituées par la superposition d'une onde longitudinale et d'une onde transversale en quadrature. Elles se propagent à des vitesses inférieures à celle des ondes transversales, avec une profondeur de pénétration inférieure à une longueur d'onde.

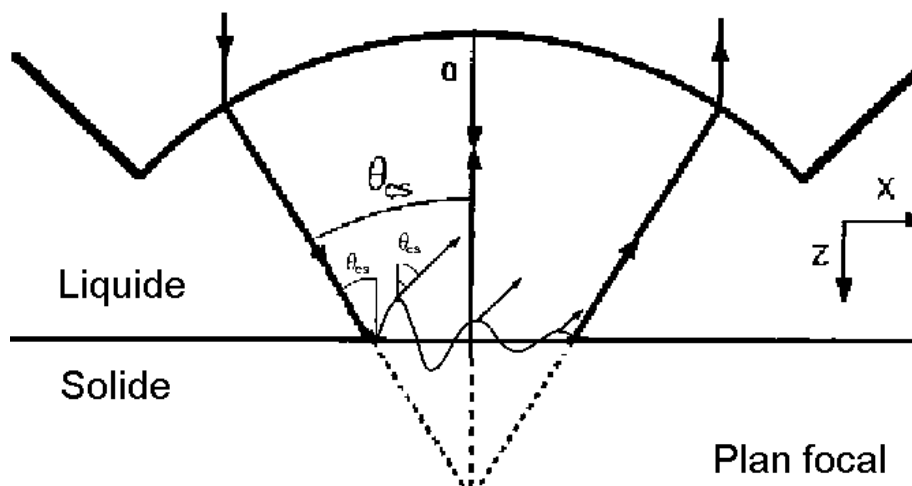


Fig. III-3 : Ondes de Rayleigh [Saie].

III.2.1.4 Onde de Lamb

Lamb a montré en 1917 qu'un solide élastique isotrope limité par deux surfaces, dont l'épaisseur est de l'ordre de la longueur d'onde, pouvait être le siège d'une onde de plaque ou onde de Lamb. Sa vitesse de propagation est fonction de la fréquence, de l'épaisseur de la couche et du substrat, et des vitesses V_t et V_l .

III.2.1.5 Ondes de Love

Ces ondes se propagent dans des couches minces, dont l'épaisseur est de l'ordre de la longueur d'onde et déposées sur un substrat dans lequel la vitesse de propagation est supérieure à celle dans la couche. C'est un cas particulier des ondes de Lamb.

III.2.2 Loi de Snell-Descartes

Les lois de propagation de Snell-Descartes qui sont bien connues en optique, restent valables pour les ondes acoustiques, et sont données par les relations (III-3) :

$$\frac{\sin \theta_l'}{V_l'} = \frac{\sin \theta_l''}{V_l''} = \frac{\sin \theta_t''}{V_t''} \qquad \frac{\sin \theta_l}{V_l} = \frac{\sin \theta_l'}{V_l'} = \frac{\sin \theta_t}{V_t} \qquad \text{(III-3)}$$

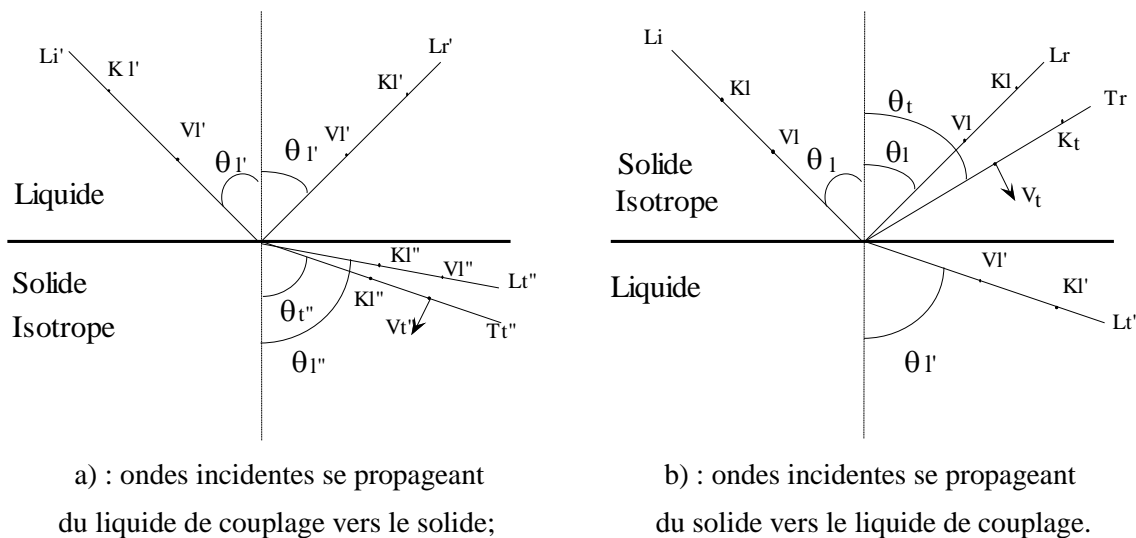


Fig. III-4 : Loi de Snell-Descartes appliquée aux ultrasons.

III.2.3 Pression et Impédance acoustique

La pression acoustique P en un point d'un milieu est la différence entre la pression à un instant quelconque et la pression au repos. Dans le cas d'une onde longitudinale se propageant dans un solide, la pression acoustique est équivalente à une contrainte de compression. Dans le cas d'une onde transversale, la pression est équivalente à une contrainte de cisaillement.

La pression acoustique est donnée par la relation (III-4) :

$$P = \rho \cdot C \cdot v \quad (\text{III-4})$$

C : célérité de l'onde acoustique,

v : vitesse de déplacement des particules,

ρ : densité du matériau.

Le rapport $Z = P/v = \rho \cdot C$ est l'impédance acoustique qui est une grandeur spécifique du milieu.

III.3 ELEMENTS CONSTITUTIFS DU MICROSCOPE ACOUSTIQUE

Le microscope acoustique [Quat] se compose principalement de cinq éléments (fig. III-5), décrits ci-dessous.

III.3.1 Générateur de haute fréquence

Il peut fonctionner en mode continue (en train d'onde) ou en mode impulsionnel, et fournit un signal électrique qui fait vibrer le transducteur à une fréquence déterminée.

III.3.2 Transducteur émetteur-récepteur

Il est constitué d'une pastille en matériau piézo-électrique, qui est ici de l'oxyde de Zinc. Cette pastille est fixée sur la face plane et polie à l'opposé de la lentille acoustique. Ce transducteur convertit le signal électrique fourni par le générateur haute fréquence en ondes ultrasonores de même fréquence, et inversement.

III.3.3 Lentille acoustique

La lentille est un dioptre sphérique concave. Elle est usinée à l'extrémité d'un cylindre en saphir dont les dimensions (longueur et rayon) dépendent de la fréquence des ondes acoustiques. Le rayon de la lentille est de l'ordre de 100 μm pour une fréquence de l'ordre 600 MHz. Comme en optique, la lentille a un rôle de focalisation des ondes acoustiques. Si la forme asphérique [Atta2] est idéale pour une focalisation rigoureuse, car elle réduit les problèmes d'aberration de sphéricité, sa fabrication demeure difficile.

III.3.4 Mécanique de balayage

Elle est constituée de trois tables de déplacement motorisées croisées selon les trois directions X-Y-Z. Elle assure le balayage de l'objet dans le plan horizontal X-Y, et le déplacement de la lentille acoustique selon l'axe vertical Z. Dans notre cas, l'une des deux tables horizontales est aussi utilisée pendant le frottement pour générer le mouvement relatif des éprouvettes.

III.3.5 Electronique de commande

Elle comprend l'électronique de pilotage des moteurs électriques des tables de déplacement, et les unités de traitement de signal (filtres, amplificateurs, intégrateur, oscilloscope, carte d'acquisition, etc.). Un micro-ordinateur, permet la synchronisation des opérations de balayage mécanique, d'acquisition, d'affichage et de stockage de l'ensemble des signaux reçus à chaque incrément, ainsi que les calculs et traitements nécessaires.

III.4 IMAGERIE ACOUSTIQUE

III.4.1 Principe

Le signal électrique produit par le générateur haute fréquence (fig. III-5) est converti en ondes ultrasonores de même fréquence par le transducteur piézo-électrique. Ces ondes se propagent dans le cylindre en saphir, du transducteur vers la lentille (ligne à retard) puis dans le liquide de couplage et enfin dans l'échantillon. Un système de "switchs" électroniques permet de générer des trains d'ondes à une fréquence déterminée, et d'aiguiller les ondes réfléchies vers un système de détection, à chaque émission.

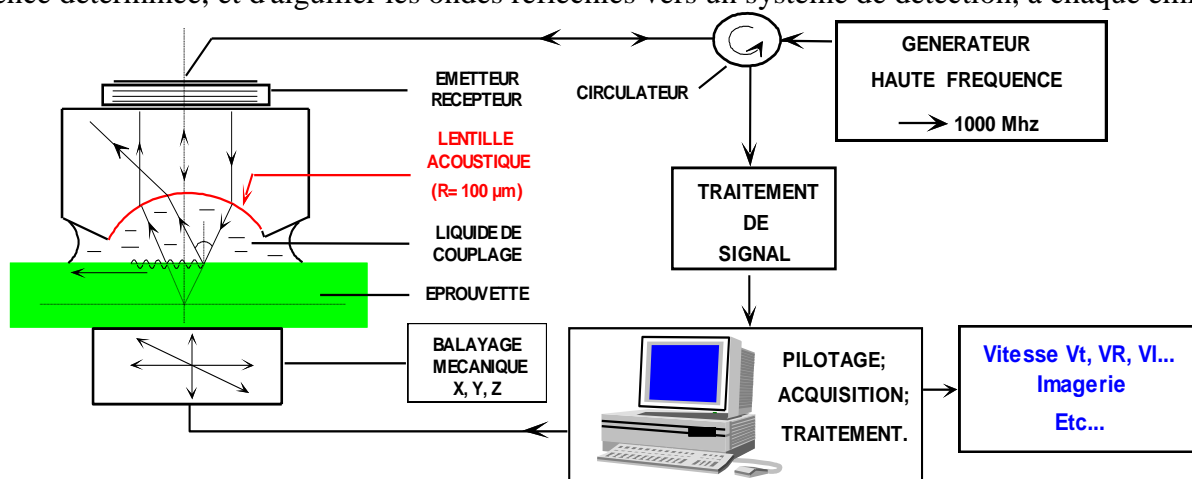


Fig. III-5 : Schéma du principe de la micro-caractérisation acoustique.

A leur arrivée sur la surface de l'échantillon, ces ondes focalisées suivent les lois de Snell-Descartes. Selon la nature du matériau et sa géométrie il peut y avoir formation de plusieurs types d'ondes qui peuvent interférer, puis qui seront reconverties en signal électrique qui sera transféré après détection vers les unités électroniques de traitement, ensuite numérisé par un micro-ordinateur.

A l'aide d'un logiciel approprié, un codage de couleur est attribué selon l'intensité du signal à chaque mesure. Ici, la valeur -5 [V] du signal est codée en bleu, et la valeur +5 [V] en rouge, les valeurs intermédiaires sont codées par des dégradées de couleurs dans le spectre du visible. L'obtention d'une image se fait en répétant ce cycle jusqu'à ce que l'ensemble de la surface choisie de l'éprouvette soit balayée horizontalement en X-Y (fig. III-6). Selon les pas de balayage qui

correspondent aux incréments de déplacement des moteurs ΔX et ΔY choisis, nous obtenons la taille de l'image en pixel. Le grossissement dépend des dimensions d'affichage ou d'impression.

Toute discontinuité des propriétés élastiques du matériau de l'objet analysé, fait varier le signal acoustique, à savoir : fissures, porosités, joints de grains, changement de structures, etc. Le signal acquis, contient ainsi un ensemble d'informations qui caractérisent l'état élastique du matériau analysé. Cependant les interprétations nécessitent une bonne connaissance en physique des ultrasons.

L'imagerie acoustique ne donne en fait que des informations qualitatives sur l'état élastique du matériau. Un couplage avec des mesures quantitatives (Cf.III.6) sera nécessaire pour mieux comprendre l'origine de la différence de contraste d'une image acoustique.

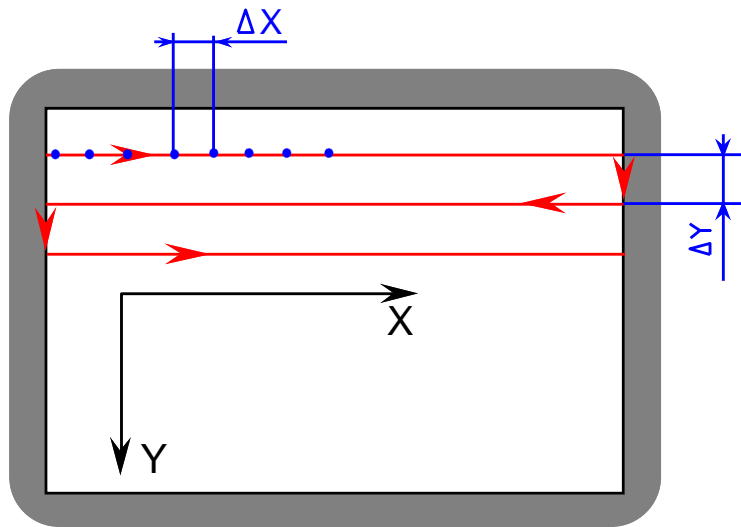


Fig. III-6 : Formation d'une image acoustique sur l'écran du PC pendant le balayage horizontal en X,Y.

III.4.2 Résolution du microscope acoustique

Par analogie avec l'optique, la tache focale a la forme d'un ellipsoïde, (fig. III-7a), dont les axes d_1 et d_2 sont donnés par les lois de diffraction, c'est à dire, fonction de la longueur d'onde λ et de l'angle d'ouverture de la lentille θ . Nous avons respectivement [Brig] :

$$d_1 = \frac{1,22 \lambda}{\sin \theta} ; \text{ et } d_2 = \frac{3\lambda}{2}. \quad (\text{III-5})$$

$\lambda = V_R/F$; V_R : vitesse de l'onde de Rayleigh; F : la fréquence des ultrasons.

Pour simplifier, d_1 est en général considéré égal à $\lambda/2$.

Le rapprochement de la lentille de la surface provoque la pénétration de la tache focale dans le matériau. Par commodité ceci est appelé une "*défocalisation*". En défocalisant (fig. III-7b), la mesure intègre les informations contenues dans le volume du cône délimité en surface par la zone d'incidence de diamètre D_s , et en profondeur par la focale. Quand la tache focale est en sous-surface, géométriquement la résolution latérale en surface diminue (D_s augmente). Physiquement, l'énergie du signal est concentrée sur la partie centrale, ce qui ne devrait pas trop affecter la

résolution en profondeur [Brig]. Cependant, les aberrations, l'absorption et la diffusion d'une partie de l'énergie par le matériau dans son volume, limitent les possibilités d'imagerie en profondeur.

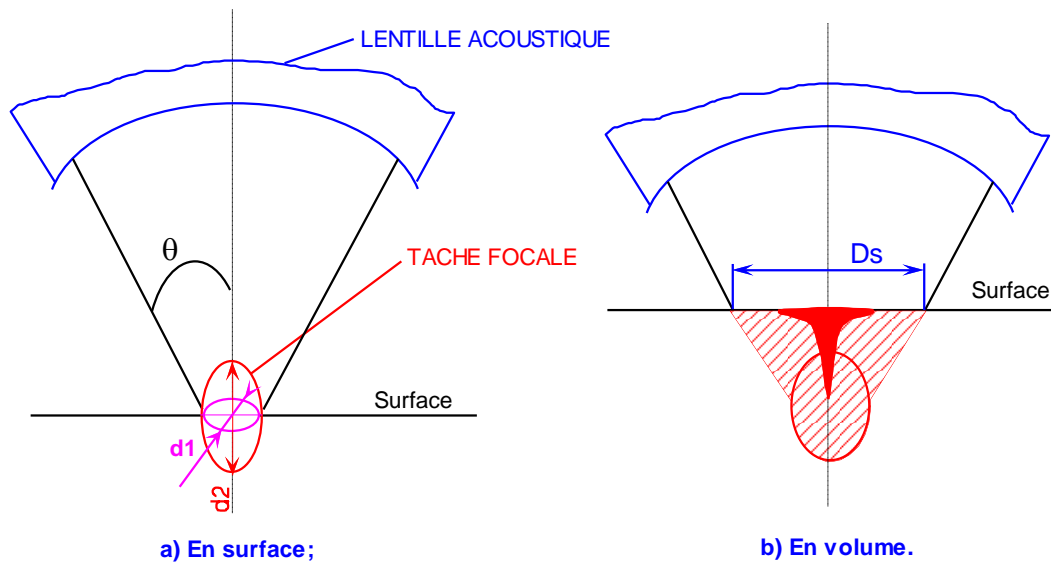


Fig. III-7 : Résolution en surface et en volume.

Le volume examiné en fonction de la défocalisation est donné par la relation (III-6) :

$$V = \Pi \cdot \frac{V_R}{F} \left[Z \operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{V_{liq}}{V_R} \right) \right]^2 \quad \text{(III-6)} \quad V_{liq} : \text{vitesse dans le liquide de couplage.}$$

Nous donnons à titre indicatif dans le tableau (III-a), les résolutions acoustiques en fonction de la fréquence et de la profondeur de mesure :

Fréquence [GHz]	Rayon de la lentille [mm]	Résolution moyenne d_1 [μm]		Profondeur max. [mm]
		en surface	en profondeur	
1	0.4	0.6	2	0.08
0.5	1.6	1.2	4	0.3
0.25	6.4	2.4	8	1.3
0.1	40	6	20	8

Tab III-a : Valeurs de la résolution et de la profondeur maximale de mesure en fonction de la fréquence, avec le mercure comme liquide de couplage, cas du verre [Atta3].

III.4.3 Système de réglage d'assiette

Le signal acoustique est d'autant meilleur que la surface à analyser est plane et perpendiculaire à l'axe de la lentille. Ce dernier point implique que l'altitude de la surface de l'éprouvette par rapport à lentille doit rester constante pendant le balayage (Cf. III.5.3.4). Nous avons donc prévu un système de réglage d'assiette par vis micrométriques selon les deux directions de balayage (X, Y). Ce système se compose de deux parties : l'une reliée à la lentille, l'autre à l'éprouvette inférieure (fig. III-8). Le réglage d'assiette s'effectue successivement sur chaque axe (X, Y) par balayage en une seule ligne qui passe par le centre de la zone de mesure choisie.

Sur l'oscilloscope (fig. III-9) qui affiche le signal instantané, il est nécessaire de faire apparaître le premier écho de la lentille qui est une référence temporelle, et celui de l'objet. Le premier écho de la lentille atteint le transducteur avant celui de l'objet, car le trajet est plus court. Une porte d'intégration permet de sélectionner dans le temps, la partie du signal qui nous intéresse, qui est dans notre cas l'écho de l'objet.

Lorsque la surface est plane et perpendiculaire à l'axe de la lentille, la distance entre la lentille et la surface de l'éprouvette ne varie pas pendant le balayage en X, Y. Dans ce cas l'écho de l'objet reste à l'intérieur de la porte d'intégration (fig. III-9 position B). Une surface inclinée provoque la variation de cette distance pendant le balayage, qui implique une variation du temps d'arrivée de cet écho au transducteur. Quand la lentille se rapproche de la surface de l'objet, son écho s'éloigne de celui de la lentille (fig. III-9, position A), car les ondes réfléchies mettent plus de temps pour atteindre le transducteur. Le réglage de l'assiette consiste donc à jouer sur l'inclinaison du plan de balayage de façon à maintenir l'écho de l'objet à l'intérieur de la fenêtre d'intégration, pendant le balayage en ligne selon chacun des axes X et Y.

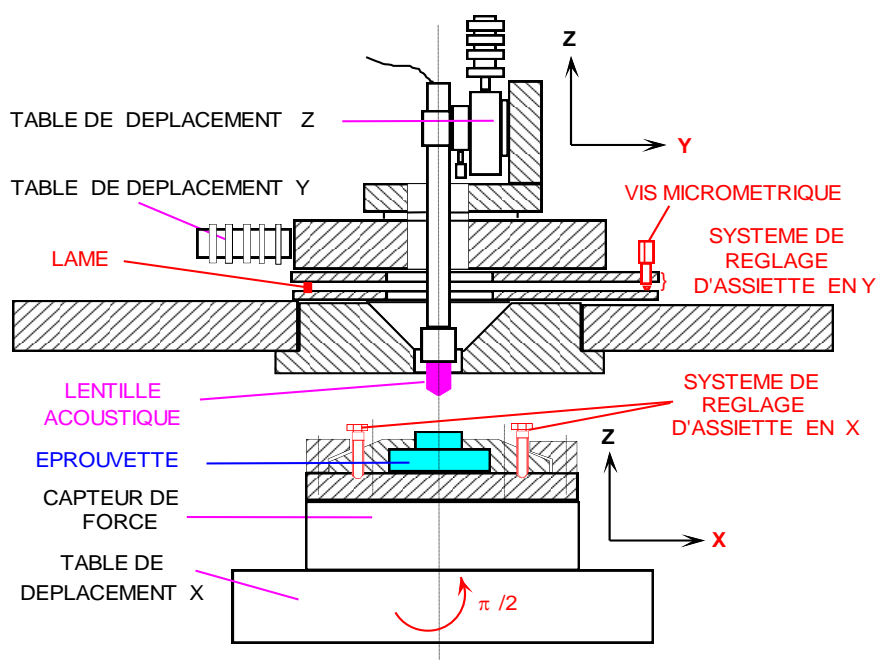


Fig. III-8 : Dispositif de balayage mécanique et de réglage d'assiette.

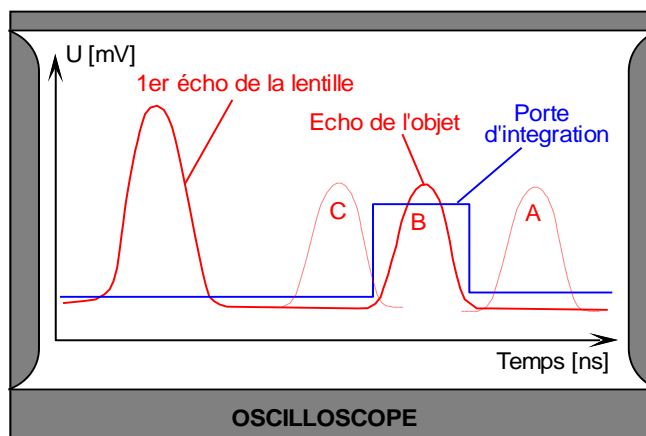


Fig. III-9 : Position optimale de l'écho de l'objet par rapport à la porte d'intégration.

III.4.4 Problèmes liés à l'imagerie de surface

Parmi les problèmes liés à l'imagerie de surface nous citons, les effets que nous avons supposé les plus rencontrés : la réflexion à l'interface liquide-objet, la température et l'aberration de sphéricité.

III.4.4.1 Réflexion à l'interface liquide-objet

La réflexion d'une partie des ondes incidentes par la surface engendre une diminution de l'énergie qui devrait pénétrer dans le solide. Cette réflexion parasite est due à la différence des impédances acoustiques de part et d'autres de l'interface liquide-objet. Le choix d'un liquide de couplage ayant une impédance acoustique la plus proche possible de celle de l'objet (tableau III-b), limite alors cette réflexion. Dans notre cas, avec les éprouvettes en acier, le mercure conviendrait mieux que l'eau, cependant l'utilisation de l'eau est plus simple en pratique, c'est pourquoi nous l'avons choisi dans ce travail.

Milieu	Masse volumique ρ [10 ³ kg/m ³]	Vitesse des ondes longitudinales V_l [m/s]	Vitesse des ondes transversales V_t [m/s]	Impédance caractéristique, Z [10 ⁶ kg/m.s]
Acier	7.8	5900	3230	45.6
Air	0.0012	344	-	0.00041
Aluminium	2.7	6260	3080	16.9
Argent	10.5	3600	1590	38
Cuivre	8.9	4700	2260	41.8
Eau	0.997	1497	-	1.49
Etain	7.3	3320	1670	24.2
Glace	0.9	3980	1990	3.6
Huile	0.9	1342	-	1.21
Laiton	8.1	4430	2123	36.1
Mercure	13.6	1451	-	19.7
Nickel	8.8	5630	2960	49.5
Or	19.3	3240	1200	62.6
Plexiglas	1.18	2670	1121	3.2
Porcelaine	2.41	5340	3120	12.9
Plomb	11.4	2160	700	24.6
Quartz	2.6	5570	3515	14.5
Tungstène	19.1	5460	2620	104.2
Verre	3.6	5260	2960	19

Tableau III-b : Paramètres acoustiques des matériaux usuels [Pedr].

III.4.4.2 Effet de la température sur le signal acoustique

L'absorption d'une partie de l'énergie transmise entre la lentille et l'éprouvette par le liquide de couplage varie considérablement avec sa température (fig. III-10). La température fait aussi varier la vitesse des ultrasons dans le liquide de couplage (fig. III-11). D'après ces deux courbes (fig. III-10 et III-11), la température optimale de fonctionnement, dans le cas de l'eau, doit être comprise entre 65 et 75 °C pour donner un meilleur signal acoustique. Cependant, dans notre cas, nous travaillons à une température moyenne de 23°C qui est la température conseillée pour les circuits électroniques de l'appareillage utilisé.

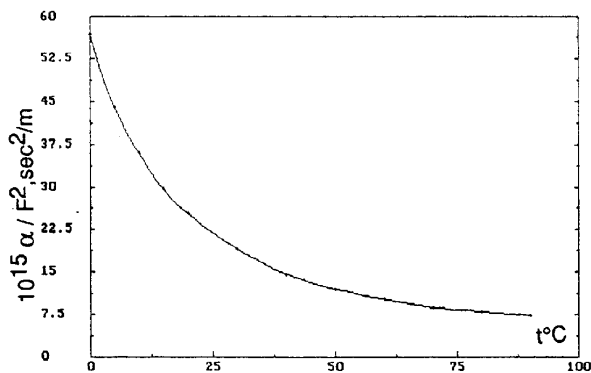


Fig. III-10 : Absorption des ultrasons dans l'eau en fonction de la température [Coel]

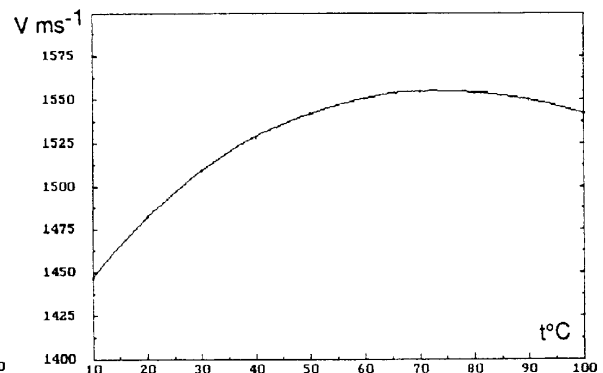


Fig. III-11 : Vitesse des ultrasons dans l'eau en fonction de la température [Coel] .

III.4.4.3 Aberration de sphéricité

Du fait de la biréfringence acoustique naturelle de l'objet, le faisceau convergent initial donne naissance à deux caustiques à l'intérieur du matériau avec apparition de deux foyers aberrants: longitudinal et transversal, (fig. III-12). Pour maîtriser ces aberrations, il faut une fois la profondeur et le rapport des vitesses liquide/objet fixés, concevoir une forme de lentille ne permettant de recevoir qu'un seul type d'onde.

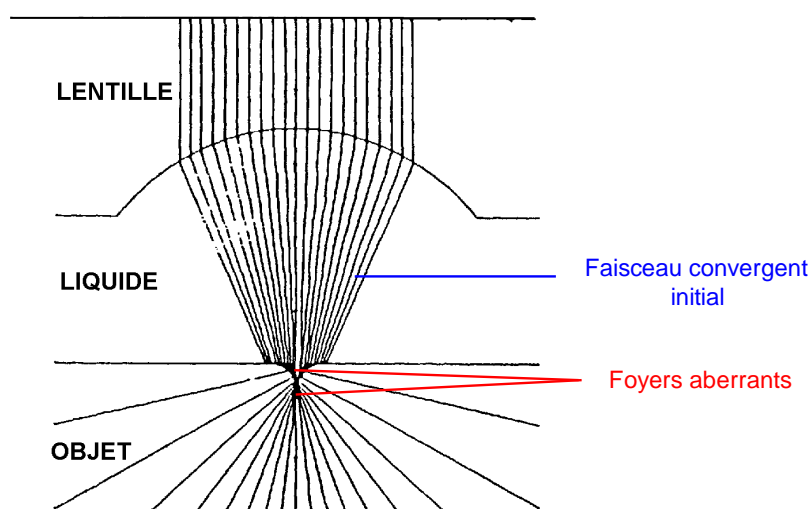


Fig. III-12 : Aberration de sphéricité à la surface de l'objet [Atta3].

III.5 APPLICATION DE L'IMAGERIE ACOUSTIQUE

III.5.1 Mécanique et sciences des matériaux

La microscopie acoustique peut fournir des images en profondeur dans un matériau solide élastique à des résolutions de l'ordre du micromètre. La différence de contraste qui dépend des propriétés élastiques du matériau peut donner des informations sur :

- la structure métallurgique [Matt], (grains : dimensions et orientations, fig. III.13 et 14);
- les défauts du réseau cristallin [Hopp];
- la distribution des différents matériaux constituant d'un alliage [Atta2];
- la distribution des fibres ou autres charges dans un matériau composite [Kacz];
- les problèmes d'adhérence des couches minces ou des revêtements [Saur];
- les constantes élastiques (module de Young, coefficient de Poisson...), [Brig, Bast, Cast].

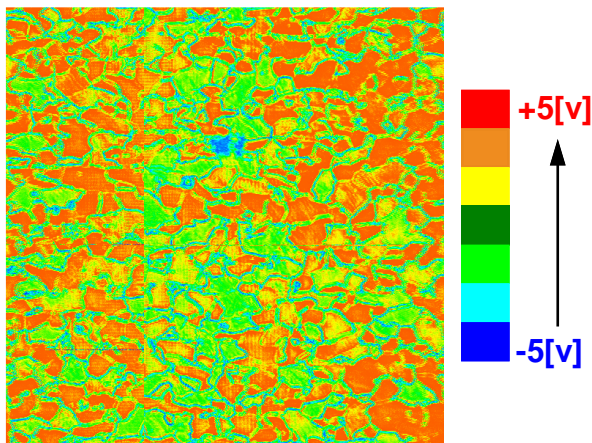


Fig. III-13 : Image acoustique (600x600 μm)
d'un acier A45.

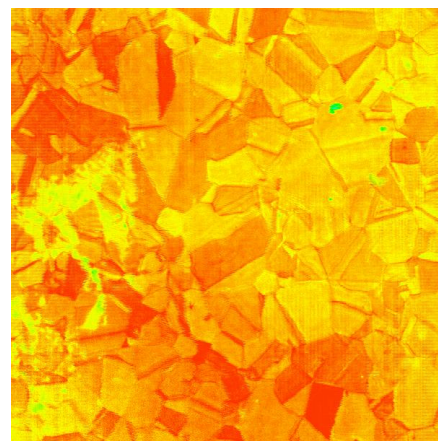


Fig. III-14 : Image acoustique (600x600 μm),
d'un substrat en acier sous un revêtement MoSx.

III.5.2 Electronique

L'industrie électronique, pour répondre aux exigences poussées de fiabilité et de fidélité, doit contrôler minutieusement les composants électroniques. Les circuits intégrés qui sont optiquement opaques et de dimensions microscopiques; ne peuvent être contrôlés sans destruction qu'avec la microscopie acoustique [Atta1, Quat, Saie].

III.5.3 Biologie et médecine

En médecine le caractère non destructif de la microscopie acoustique est d'un très grand intérêt (Hopp), car elle permet :

- l'observation de cellules vivantes dans un milieu propice à leur développement;
- l'examen sans danger des organes internes du corps humain.

III.5.4 Tribologie

L'étude bibliographique débutée en 1991, n'a pas révélé de travaux qui utilisent la microscopie acoustique en tribologie, et plus particulièrement pour le suivi du détachement de particules et de la fissuration. En revanche, les émissions acoustiques (EA) générées par le frottement étaient couramment utilisées. Cette méthode des EA est distincte de la microscopie acoustique, pour éviter toute confusion, elle est exposée brièvement en annexe A. En revanche, nous présentons dans ce qui suit quelques travaux qui utilisent les ondes acoustiques pour déterminer certains paramètres physiques de contact chargé statiquement.

J. Krölikowski et al [Kröl1, 1989] ont élaboré un modèle de transmission et de réflexion des ondes ultrasonores longitudinales à travers l'interface d'un contact entre deux corps solides chargés. Les mesures sont faites à des pressions de contact comprises entre 0 et 1 GPa et des fréquences acoustiques comprises entre 10 et 90 MHz. Les résultats obtenus (fig. III-15) montrent que le coefficient de réflexion des ultrasons (R) diminue avec la pression du contact, alors que la raideur K du contact augmente proportionnellement avec la pression.

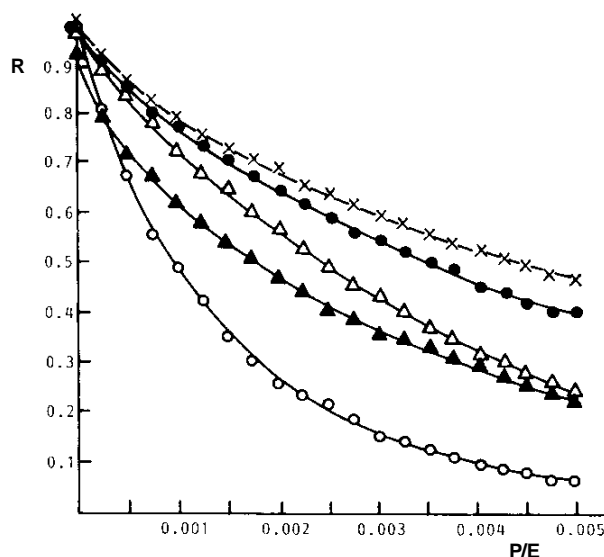


Fig III-15 : Coefficient de réflexion des ondes longitudinales à l'interface du contact entre deux éprouvettes en acier dur (62 HRC)
P/E : pression du contact / module de Young [Kröl1].

○ 10 MHz △ 30 MHz X 50 MHz ● 70 MHz ▲ 90 MHz

J. Krölikowski et J. Szepek [Kröl2, 1991] ont utilisé la méthode précédente pour déterminer l'aire réelle du contact et sa raideur. Avec un contact rugueux et une pression de 400 MPa, les résultats obtenus (fig. III-16 et III-17) montrent que :

- la pression du contact dépend linéairement de sa raideur, excepté pour des pressions inférieures à 10 MPa,
- l'aire réelle du contact est proportionnelle à la pression,
- le coefficient de transmission (fig. III-18) croît avec la pression du contact, alors que le coefficient de réflexion (fig. III-19) diminue.

Dans ces conditions d'essais, la pression a un effet non négligeable sur les capteurs acoustiques, qui n'est pas pris en compte ici.

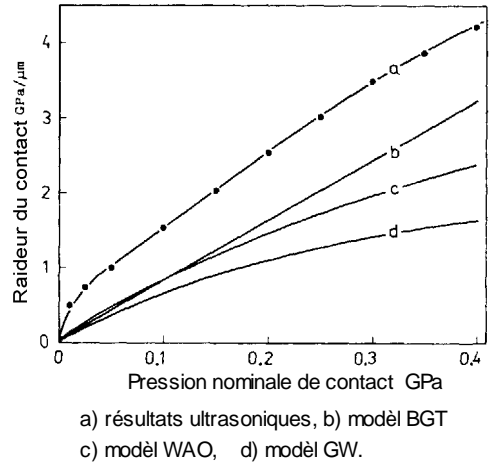


Fig. III-16 : Influence de la pression sur la raideur de contact [Kröl2].

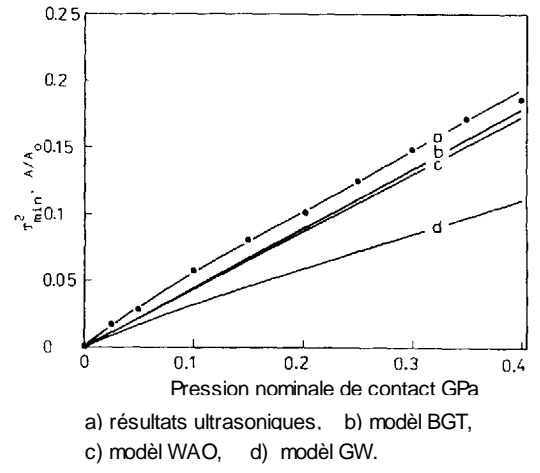


Fig. III-17 : Influence de la pression sur le l'aire réelle du contact [Kröl2].

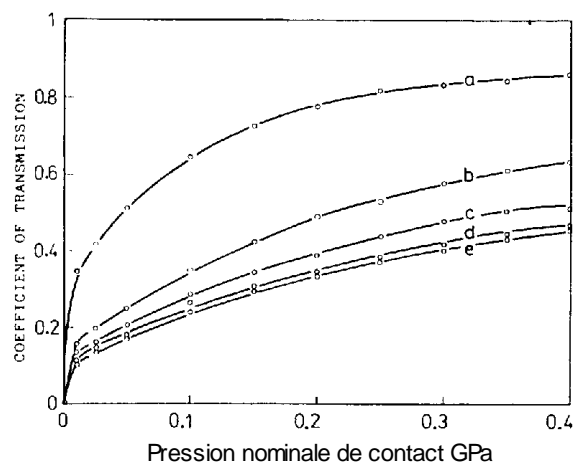


Fig. III-18 : Influence de la pression sur le coefficient de transmission [Kröl2].

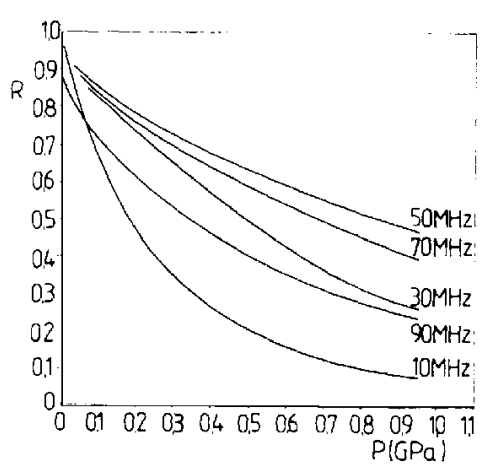


Fig. III-19 : Influence de la pression sur le coefficient de réflexion [Kröl2].

Y. Minakushi et al [Mina] ont proposé une méthode de mesure quantitative de la pression du contact entre plaques élastiques (fig. III-20) par transmission d'ondes ultrasonores. Cette méthode se base sur le principe de variation de la pression acoustique détectée par le capteur, selon la variation de l'aire réelle du contact. Les résultats exposés sur les figures III-21, montrent que le rapport E_R , rapport du maximum du premier écho de la surface de contact chargé, sur celui du contact non chargé, qui est une caractéristique des ondes réfléchies, croit linéairement avec la charge normale, donc avec la pression du contact.

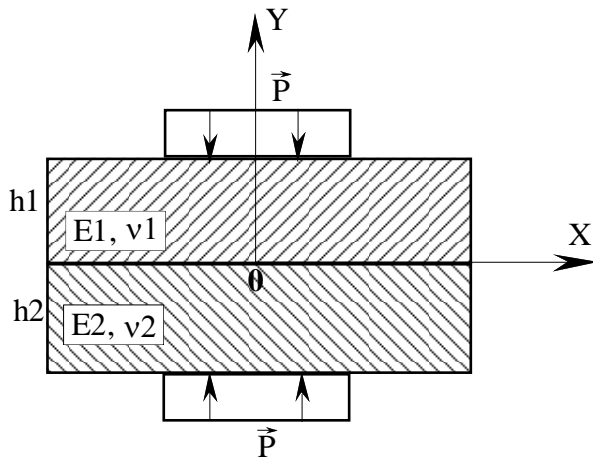


Fig. III-20 : Mesure de l'aire réelle dans un contact chargé [Mina].

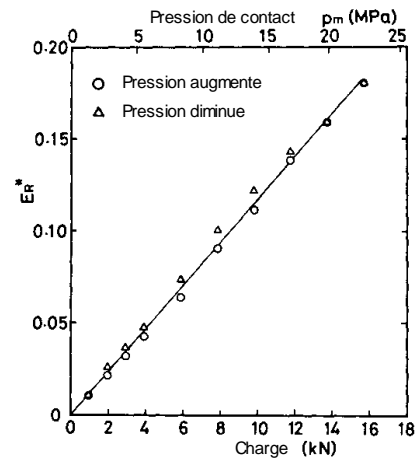
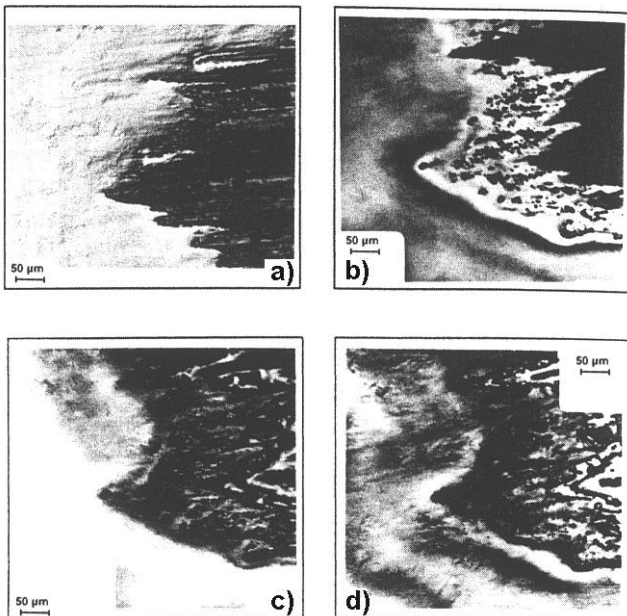


Fig. III-21 : Evolution de la pression acoustique avec la charge normale [Mina].

Récemment en 1994, P. J. Blau et al [Blau], ont utilisé un microscope acoustique commercial "SAM Leitz ELSAM" qui travaille à des fréquences acoustiques allant jusqu'à 2 GHz, pour étudier les surfaces frottées. Les analyses acoustiques ne s'effectuent qu'après frottement en dehors du simulateur de frottement. Les images acoustiques (fig. III-22b, c, d) acquises à des fréquences de travail de 1 et 1,2 GHz sur la surface de l'éprouvette frottée, montrent une grande similitude avec celles obtenues optiquement (fig. III-22a). L'image optique (fig. III-23) et l'image acoustique (fig. III-24), acquise en surface, mettent en évidence les mêmes fissures, bien que l'image optique soit plus nette. La différence majeure entre les deux types d'images est, qu'autour des zones déformées plastiquement, les images acoustiques mettent en évidence un contraste qui, selon les auteurs, implique l'existence de contraintes résiduelles.



a : image optique; b : image acoustique à $z=0 \mu\text{m}$;
 c : image acoustique à $z= -0,75 \mu\text{m}$;
 d : image acoustique à $z= -1,25 \mu\text{m}$.

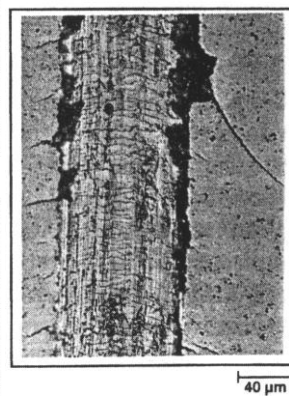


Fig III-23 : Image optique [Blau].

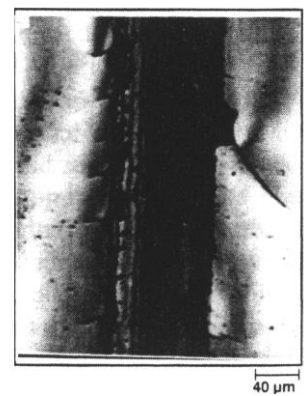


Fig III-24 : Image acoustique en surface [Blau].

Fig. III-22 : Images optiques et acoustiques à différentes défocalisations [Blau].

Les auteurs constatent que la microscopie acoustique est plus facilement exploitable en tribologie pour étudier ce qu'ils appellent : "mécanisme de fatigue", que les mécanismes qui causent des déformations plastiques ou des détachements de particules. Ce raisonnement est vrai dans la mesure où une surface dégradée ou qui présente des particules détachées, ajoute des atténuations aux ondes acoustiques qui s'y interfèrent ou la traversent. Ces auteurs confirment ainsi le rôle de l'onde de Rayleigh qui se déplace sur une épaisseur d'une longueur d'onde en surface, sur le mécanisme de formation de l'image acoustique. Ceci a aussi été constaté au cours de ce travail.

III.5.5 Détection d'un défaut en sous-surface

La visualisation en sous-surface inclue automatiquement les informations de la surface, puisque les ondes acoustiques doivent la traverser pour atteindre la sous-surface. Pour minimiser l'influence de la surface et favoriser les informations issues de la sous-surface il faut que la surface présente un minimum de discontinuités élastiques risquant de perturber le signal acoustique. Le cas favorable à une bonne visualisation d'un défaut en sous-surface, fig. III-25, suppose que :

1. le défaut se trouve à une profondeur compatible avec la lentille utilisée, (cas A défavorable);
2. le défaut réfléchisse les ondes sous un angle inférieur à celui de l'ouverture de la lentille, pour qu'il soit capté, (cas B défavorable). Ceci est à tempérer du fait de la diffraction;
3. les ondes réfléchies par un défaut en sous-surface atteignent le capteur avec une énergie suffisante pour donner un signal significatif, (cas C).

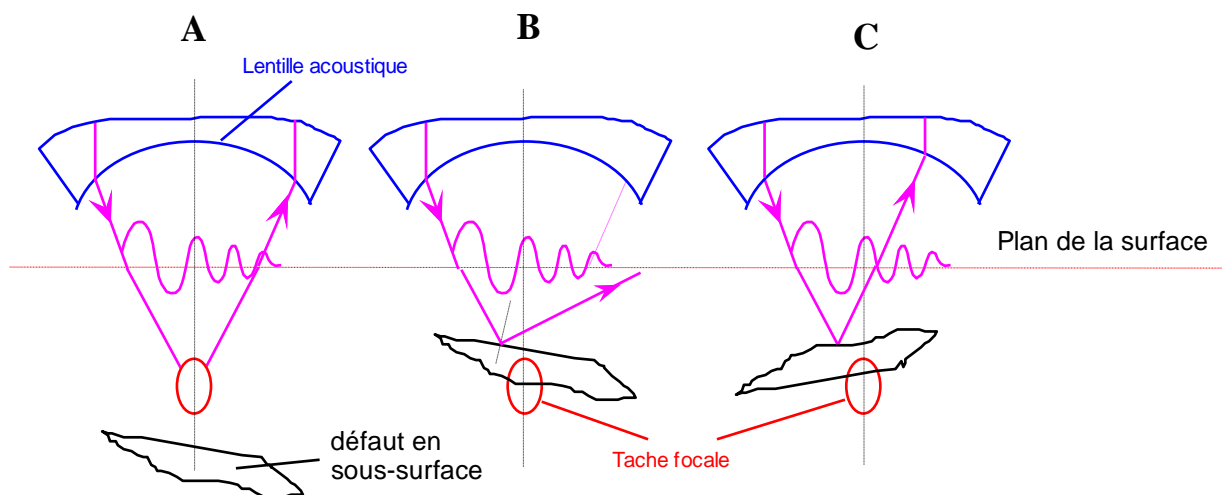


Fig. III-25 : Détection d'un défaut en sous-surface.

La visualisation de la sous-surface, peut donner des informations nécessaires à la compréhension de la conception et de la naissance des TTS. Nous verrons par la suite comment concilier les impératifs acoustiques avec les états de surface des premiers corps afin de favoriser les informations issues de la sous-surface.

III.6 SIGNATURE ACOUSTIQUE D'UN MATERIAU : effet $V(z)$

III.6.1 Phénomène de la signature acoustique

Le déplacement de la lentille perpendiculairement à la surface observée (fig. III-26), donne un signal dont la valeur de la tension est fonction de ce déplacement selon l'axe Z. La courbe obtenue (fig. III-27), présente des minima et des maxima dont les amplitudes diminuent avec la défocalisation. Cette courbe s'appelle l'effet $V(z)$. L'obtention des minima et des maxima est due principalement à l'interférence entre l'onde réfléchie à l'incidence normale et l'onde de Rayleigh qui se propage en surface sur une épaisseur inférieure à une longueur d'onde. La périodicité de ces interférences apporte une information sur les chemins des ondes acoustiques, et par la même sur leurs vitesses. La courbe $V(z)$ caractérise intrinsèquement le matériau [Atta2, Brig], d'où son appellation de *signature acoustique*. Elle représente donc une source d'informations sur les propriétés élastiques du matériau.

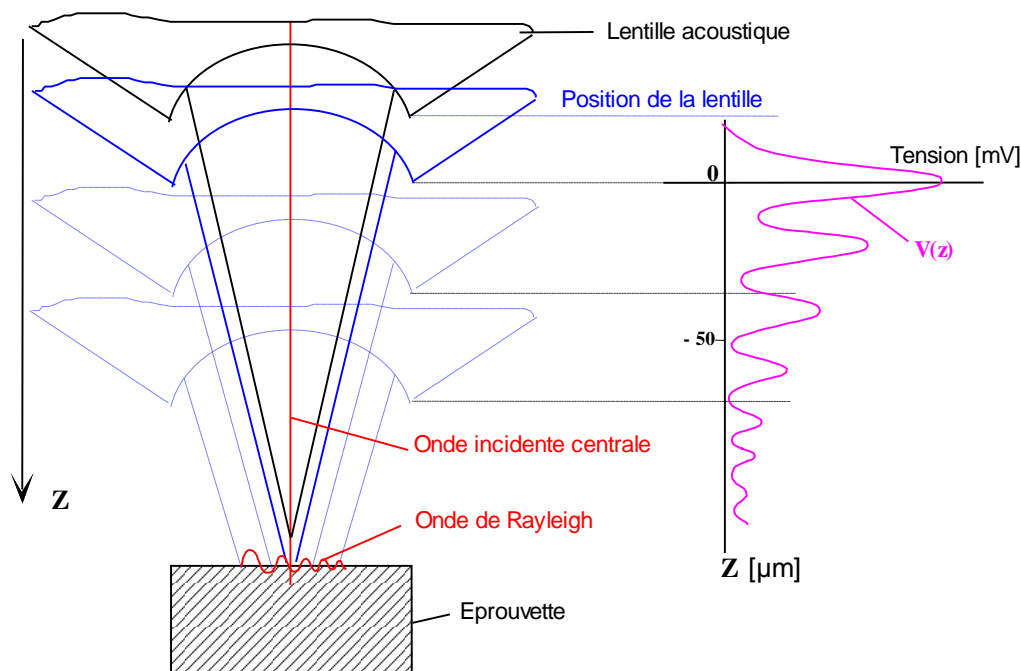


Fig. III-26 : Schéma du principe de la mesure de $V(z)$.

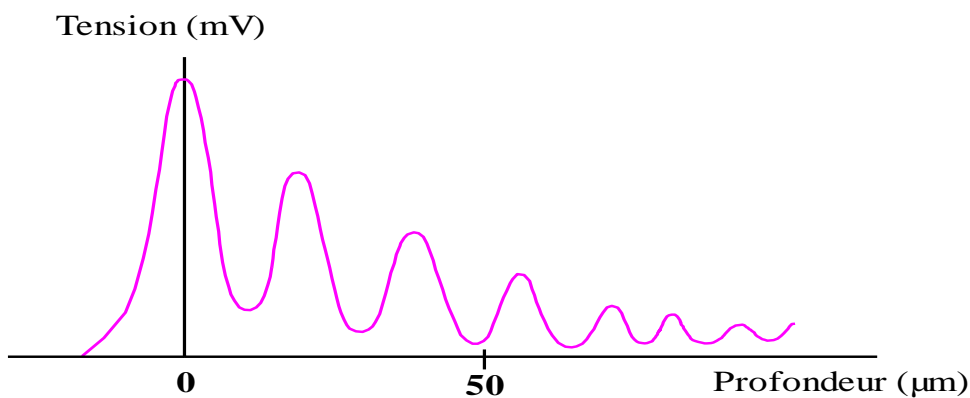


Fig. III-27 : Courbe $V(z)$ obtenue sur une éprouvette en acier (après lissage).

III.6.2 Exploitation de la signature acoustique

III.6.2.1 Détermination des vitesses acoustiques

L'exploitation de la courbe $V(z)$ passe par l'utilisation de la méthode de la Transformée Rapide de Fourier (la FFT). Le traitement par la méthode FFT pour qu'il soit significatif et exploitable exige que la courbe $V(z)$ ait au moins 3 ondulations et 512 points acquis. Dans notre cas l'acquisition de la courbe $V(z)$ se fait en 1024 points pour une meilleure précision. Rappelons pour mémoire que la méthode FFT repose sur le principe de transformer une fonction du temps en une fonction de fréquence. Après traitement, sur le spectre de la FFT (fig. III-28); les fréquences dominantes incluses dans la signature acoustique $V(z)$ sont représentées par les raies d'amplitude significative et qui correspondent à des modes de propagations des ondes acoustiques (Cf. III.2.1). Nous pouvons ainsi déterminer la fréquence de chaque mode, donc de chaque type d'onde. La sélection sur le spectre de $V(z)$ des numéros de raie qui correspondent aux modes connus (longitudinal, transversal, Rayleigh, Lamb, etc.), repose sur un savoir faire.

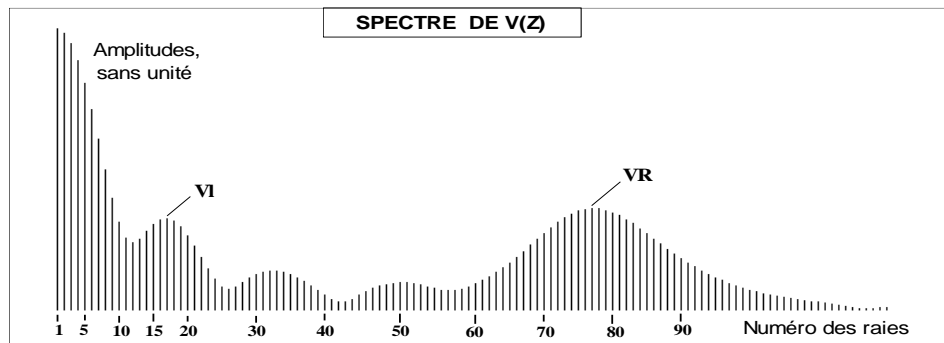


Fig. III-28 : Spectre de $V(z)$ après traitement par FFT.

- La signature acoustique $V(z)$ permet essentiellement de déterminer les vitesses :
- de Rayleigh V_R et par la même la vitesse transversale V_t , données par les relation (III-7, 8);
 - longitudinale V_l , donnée par la relation (III-9) :

$$V_R = 0,92 V_t; \quad (III-7)$$

$$V_t = \frac{V_{liq}}{\left(1 - \left(1 - \frac{V_{liq}}{2\Delta Z F}\right)^2\right)^{0,5}}; \quad \Delta Z : \text{Périodicité de la courbe } V(z). \quad (III-8)$$

$$V_l = \frac{Z_{liq}}{Z_{obj}} \frac{1+R}{1-R}; \quad Z : \text{impédance acoustique, du liquide et de l'objet}; \quad (III-9)$$

R : coefficient de réflexion.

III.6.2.2 Détermination de E et de μ

La détermination de la vitesse transversale (V_t) et la vitesse longitudinale (V_l), permet de calculer le module de Young E ainsi que le coefficient de Poisson ν d'après les relations (III-10, III-11) [Pedr] :

$$E = \rho \cdot V_t^2 \cdot \frac{3V_l^2 - 4V_t^2}{V_l^2 - V_t^2} \quad (\text{III-10})$$

$$\nu = \frac{V_l^2 - 2V_t^2}{2(V_l^2 - V_t^2)} \quad (\text{III-11})$$

Pour le calcul du module de Young, on considère que la densité locale ρ est relativement constante après déformation plastique. En effet les raisons avancées supposent que l'écroutissage et/ou la déformation plastique n'influent que sur l'état des dislocations du réseau cristallin sans pratiquement modifier les distances inter-atomiques qui déterminent la densité [Ashb]. Par conséquent, la variation de la densité, ne devrait pas, dans nos conditions tribologiques, affecter le suivi des TTS. En revanche, le problème de la densité se pose dans le cas des troisièmes corps, et des multicouches. Les troisièmes corps peuvent avoir des densités différentes des premiers corps. En plus, leur compactage varie en fonction des conditions du contact.

III.6.2.3 Application aux couches minces

Les revêtements très utilisés en tribologie associent des matériaux réputés par leurs bonnes propriétés de surface à d'autres qui ont de bonnes propriétés de volume. L'adhérence entre la couche et le substrat est un paramètre déterminant pour la vie d'un revêtement. Le seul moyen de contrôle non destructif de l'état d'adhérence des couches minces qui garanti la fiabilité du revêtement, serait l'utilisation d'ondes acoustiques. La microcaractérisation acoustique permet en outre de quantifier les propriétés élastiques du revêtement nécessaires aux calculs de résistance mécanique.

La couche à contrôler doit avoir les conditions exigées par la méthode acoustique à savoir : une bonne planéité, un bon état de surface, et être homogène.

La fréquence des ultrasons est choisie selon l'épaisseur de la couche à caractériser et le type de matériau. Afin de ne tenir compte que des propriétés élastiques de la couche, la longueur d'onde doit être inférieure à l'épaisseur de la couche. Sinon, le signal acoustique sera perturbé par le matériau du substrat (fig. III-29).

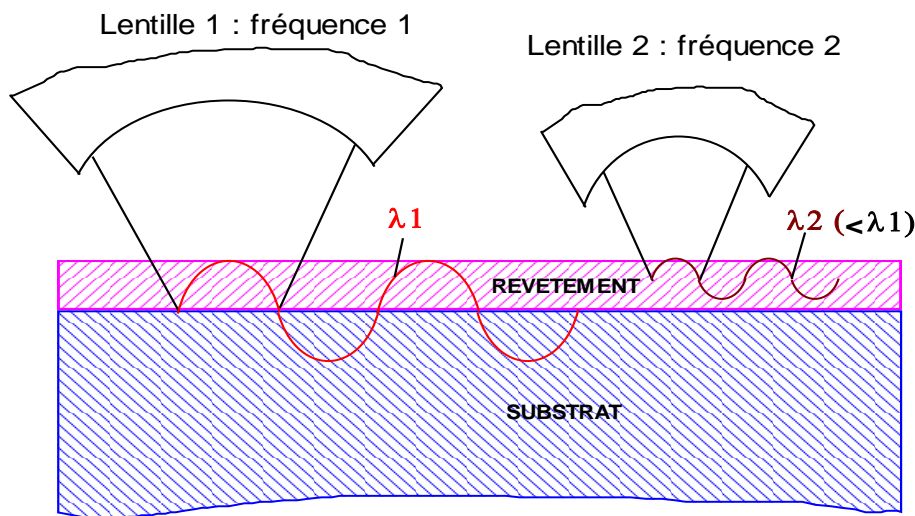


Fig. III-29 : Influence de l'épaisseur du revêtement et de la fréquence des ultrasons sur les mesures.

Des mesures effectuées sur des revêtements MoSx, montre que la signature acoustique est affectée par l'épaisseur de la couche du revêtement. Les valeurs des vitesses mesurées tendent vers celles du substrat pour de faibles épaisseurs, et vers celles de la couche pour des épaisseurs supérieures ou égales à la longueur d'onde des ultrasons.

III.6.3 Problèmes liés à la mesure de $V(z)$

III.6.3.1 Limite de résolution

Lors de l'acquisition de la signature acoustique $V(z)$, la tache focale pénètre à l'intérieur du matériau, mais le lieu de mesure du phénomène de $V(z)$ s'effectue toujours à une profondeur d'une longueur d'onde sous la surface. Géométriquement ceci provoque une baisse de la résolution, car le diamètre D_s (fig. III-7b) de la zone de mesure augmente avec la défocalisation. Ce diamètre atteint sa valeur maximale à la défocalisation maximale. A titre indicatif, pour une fréquence de 600 MHz et une défocalisation de 100 μm , le diamètre maximal D_s est de 30 μm . Logiquement, le signal $V(z)$ inclue toutes les informations relatives aux propriétés élastiques du matériau se situant à l'intérieur de cette zone. D'après Smith et al [Smith, 1983], Peck et Briggs [Peck, 1987], le signal $V(z)$ est affecté par tout ce qui se trouve à l'intérieur de cette zone, mais la concentration d'énergie du signal se trouve au centre, ce qui signifie malgré tout que la défocalisation dégrade peu la résolution en surface.

III.6.3.2 Influence de la rugosité

Les rugosités représentent des discontinuités de propriétés élastiques en surfaces, par conséquent elles provoquent des atténuations supplémentaires des ultrasons. Leur influence reste liée à leur échelle par rapport à la longueur d'onde des ultrasons, (fig. III-30).

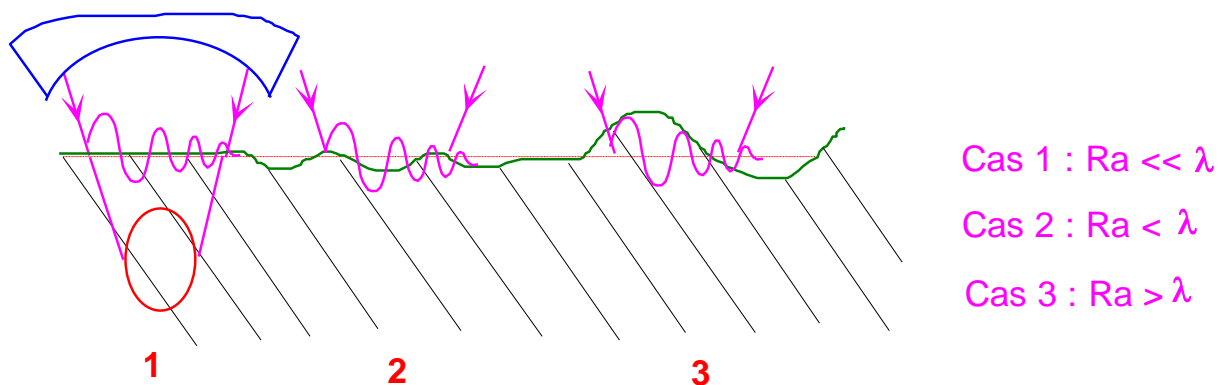


Fig. III-30 : Effet de l'état de surface sur le signal $V(z)$.

Le cas 1 représente le cas idéal d'une surface polie "miroir" où l'effet de la rugosité est nul.

Le cas 2 représente un état de rugosité ne perturbant pas trop le signal acoustique, car l'amplitude de la rugosité est relativement inférieure à la longueur d'onde de Rayleigh.

Le troisième cas représente un état de rugosité qui perturbe fortement le signal acoustique, dans ce cas l'analyse de la courbe $V(z)$ ne donne pas de valeurs significatives des propriétés élastiques du matériau.

Pour réduire l'effet de la rugosité de la surface à analyser, celle-ci doit être largement inférieure à la longueur d'onde de Rayleigh, soit par exemple dans le cas de l'acier et une fréquence des ondes acoustiques de 600 MHz, la rugosité moyenne R_a doit être inférieure à $0,5 \mu\text{m}$.

III.6.3.3 Problème induit par l'effet $V(z)$: influence de la planéité en imagerie

Dans le cas d'une surface courbée, lors de l'acquisition de l'image acoustique (fig. III-31), la distance entre la lentille et la surface de l'éprouvette varie. Dans le cas où cette distance est inférieure ou égale à la distance focale, la variation d'altitude de la lentille provoque alors un effet $V(z)$ (fig. III-32). Ce phénomène se représente sur l'image acquise sous forme de succession de franges qui varient selon la position de la lentille par rapport à une courbe $V(z)$ mesurée sur la zone correspondante de l'éprouvette, (ex. fig. III.32 positions A, B).

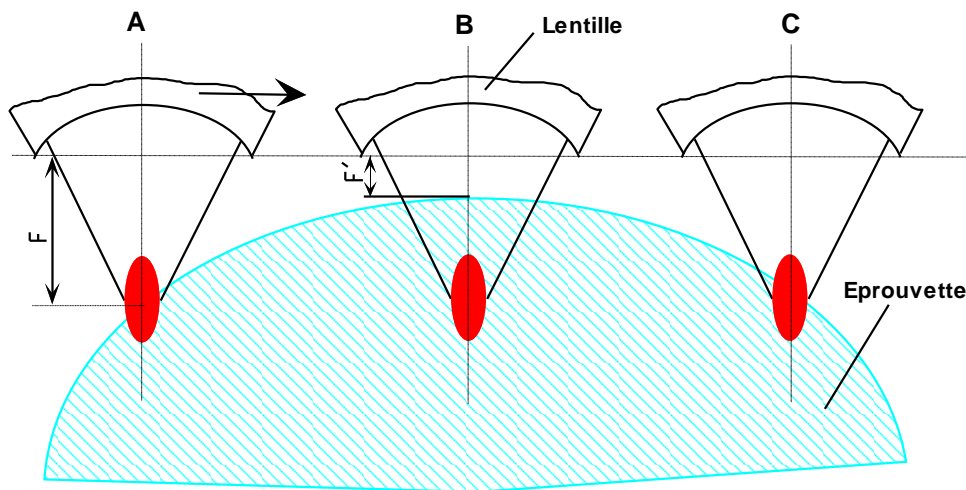


Fig. III-31 : Balayage par la lentille d'une surface non plane.

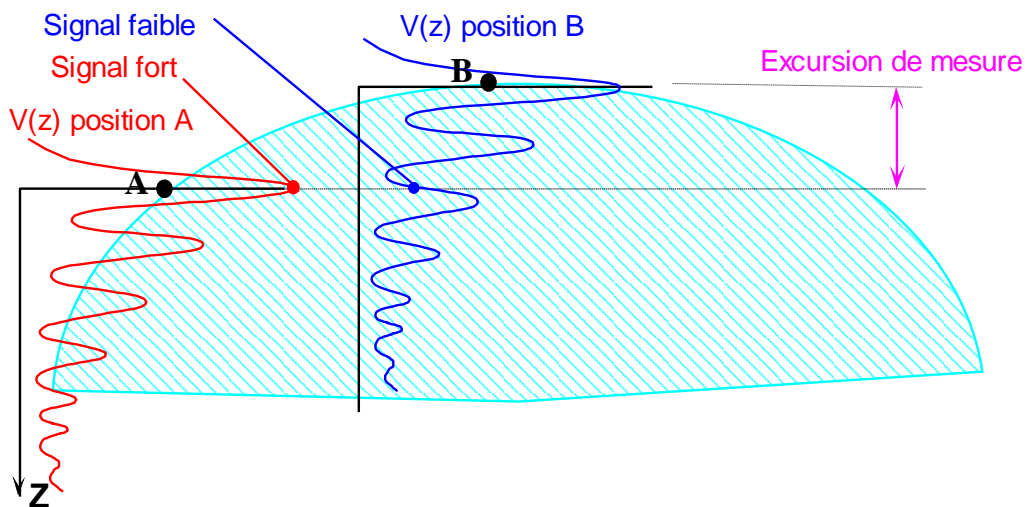


Fig. III-32 : Influence de $V(z)$ en imagerie dans le cas de surface non plane.

La figure (III-33) représente l'image acoustique d'une surface ellipsoïdale dont les demi-axes principaux sont 40 mm et 30 mm. Si on se place à une défocalisation qui correspond à un maxima sur une courbe $V(z)$, sur l'image le codage de couleur correspondant de cette zone tend alors vers le rouge, (fig. III-33 position A). Tandis que sur un minima, le codage de couleur tend vers le bleu, (fig. III-33 position B). Par conséquent l'analyse des surfaces courbées est très délicate en microscopie acoustique. La solution technique la plus simple est de limiter l'acquisition des images à de faible courbure, soit inférieure à la période de $V(z)$ sur le champ examiné, ou d'utiliser un système d'autofocus qui asservit temporellement l'écho provenant de l'objet.

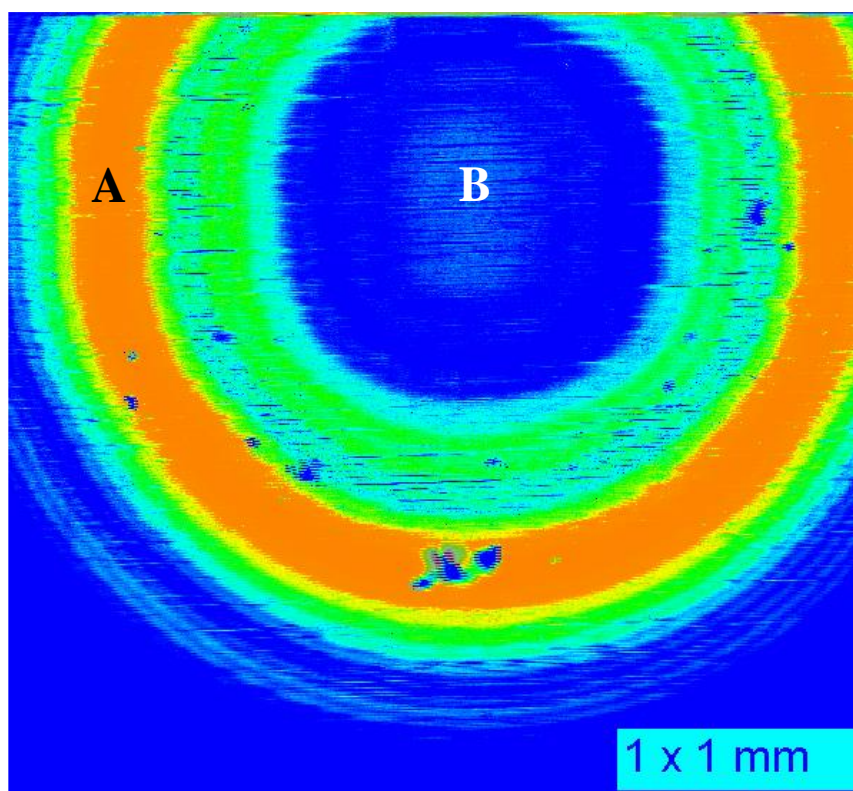


Fig. III-33 : Image acoustique d'un ellipsoïde de demi-axes 40 et 30 mm.

III.7 CONCLUSION

L'avantage incontesté qu'offre la microscopie acoustique à balayage, est son caractère non destructif. Ceci permet l'analyse des éprouvettes en surface, et en sous-surface sans avoir recours à des coupes métallographiques. Le deuxième avantage qu'offre la MAB en tribologie, est la mesure locale des propriétés élastiques d'un matériau avec une grande précision. Cependant la mise en oeuvre de cette technique récente pose quelques difficultés, essentiellement :

1. *la difficulté théorique ou de modélisation :*

qui provient du fait que la microscopie acoustique n'est pas totalement maîtrisée, surtout en matière d'exploitation des signatures acoustiques $V(z)$ et de l'interprétation des images acoustiques. Des recherches sont en cours pour extraire au mieux les informations contenues dans le signal $V(z)$, et pour

améliorer l'interprétation des images acoustiques. Ceci suppose la modélisation des phénomènes d'interférence les plus courants, en les reliant aux paramètres physiques qui sont à leurs origines;

2. *la difficulté de préparation des éprouvettes :*

à cause des exigences d'utilisation des ondes acoustiques, le matériau de l'éprouvette doit être élastique, homogène, avec un minimum de discontinuités qui doivent être très inférieures à la taille du phénomène étudié. La surface doit être plane et polie, ceci pose le problème des dégradations éventuelles, induites par le frottement. D'où la limitation du choix des éprouvettes;

3. *la difficulté d'expérimentation :*

qui vient d'un côté de l'adaptation du MAB au simulateur de frottement, et de l'autre, des conditions d'utilisation du MAB. Concernant les problèmes d'adaptation dans notre cas, le réglage d'assiette de l'éprouvette inférieure exige le desserrage des vis de fixation, d'où le problème de repositionnement pour la poursuite des essais de frottement. Le même problème se pose quand il faut démonter l'éprouvette supérieure après le frottement, pour la remplacer par la lentille acoustique. Concernant les conditions d'utilisation du MAB, le problème principal vient de l'utilisation du liquide de couplage. En effet, il peut modifier les écrans, et impose donc un nettoyage de la surface entre chaque analyse acoustique et essai de frottement, afin d'assurer une bonne reproductibilité des écrans. Cette influence du liquide de couplage doit être prise en compte lors des analyses tribologiques. L'état de surface exigé par l'utilisation du MAB limite le choix des conditions tribologiques qui ne doivent pas trop dégrader les surfaces;

4. *la difficulté d'interprétation :*

qui réside surtout en imagerie, et vient de la richesse du signal acoustique et son intégration d'informations de diverses origines. L'interprétation suppose l'isolation de chaque effet provenant des diverses discontinuités élastiques présentes en surface et en sous-surface de l'éprouvette, tel que : grains, changement de structure, porosité, inclusion, fissure, rugosité, etc., et de les distinguer des variations du signal ayant pour origine les réglages électroniques ou logiciels;

5. *la difficulté financière :*

l'acquisition du MAB a représenté un investissement important pour le LMC. L'acquisition d'options supplémentaires nécessaires à son évolution, et adaptation aux cas particuliers, n'est malheureusement possible qu'en fonction des financements disponibles. Dans l'immédiat, notre besoin d'un jeu de lentilles fonctionnant à différentes fréquences reste primordial et non exhaussé, nous avons dû nous contenter des moyens disponibles !

CHAPITRE IV

MAB ET TRIBOLOGIE : FAISABILITE

IV.1 INTRODUCTION

Dans l'attente de la réalisation de notre microscope acoustique, nous avons entrepris au LAIN (LMAM à l'époque), l'étude par microscopie acoustique, d'une éprouvette frottée dans les conditions décrites ci-dessous. L'objectif était de vérifier si la MAB, nous permet tant de déceler la présence des TTS, puis de les caractériser. Ce travail préliminaire s'est traduit essentiellement par l'acquisition d'images acoustiques à différentes défocalisations et de signatures acoustiques $V(z)$.

IV.2 ETUDE D'UNE EPROUVETTE DE FROTTEMENT

IV.2.1 Méthode d'analyse

Les images acoustiques acquises sur la zone de contact en surface et à différentes défocalisations, sont comparées aux images obtenues par MEB. Ceci permet de vérifier la fidélité du contraste acoustique, voir s'il contient plus d'informations, et comment il varie en fonction de la défocalisation. En parallèle, des signatures acoustiques $V(z)$ sont mesurées sur les zones désignées par des chiffres sur la figure IV-1, et qui représentent des points particulièrement importants sur le plan tribologique. En effet, ils se situent sur et autour des zones déformées. La détermination des valeurs de module de Young (E) se fait à partir du traitement des courbes $V(z)$ mesurées en chaque zone. Le suivi des évolutions des propriétés élastiques (module de Young) en sous-surface, se fait par un artifice qui consiste à enlever de la matière en surface par polissage mécanique par incrément de profondeur 4 à 5 μm . L'inconvénient majeur de cette méthode est le risque de modifier par polissage les propriétés mécaniques de la surface, ceci doit être pris en compte dans l'analyse des résultats.

Des mesures acoustiques avant l'essai de frottement s'imposaient, mais elles étaient difficilement envisageables, car le simulateur de frottement était au LMC et le MAB au LAIN. Après l'essai de frottement, pour se placer dans les conditions les plus favorables pour la MAB, la surface de l'éprouvette a été légèrement polie mécaniquement, à la fois pour atténuer les rugosités induites par le frottement et diminuer le nombre des particules de troisièmes corps.

Trois séries de mesures ont été effectuées selon l'épaisseur de matière enlevée :

1. après le léger polissage de la surface;
2. après enlèvement d'une couche de matière d'environ 4 μm ;
3. après enlèvement de 5 μm supplémentaires;

A cette dernière étape, de signatures acoustiques $V(z)$ ont été effectuées par acquisition automatique.

IV.2.2 Conditions de frottement

L'essai a été effectué dans les conditions suivantes :

simulateur de frottement : PEDEBA, humidité et température : à l'ambiante,

charge : 100 N, pression Hertzienne max. : 360 MPa, vitesse : 1 mm/s, déplacement : 0,5 mm.

IV.2.3 Après frottement et "léger polissage"

L'image acoustique acquise en surface (fig. IV-2) présente un contraste qui reproduit les différents détails de la surface similaires à ceux de l'image obtenue par MEB (fig. IV-1) à la différence près de quelques impuretés. Le contraste acoustique a pour origine les différences des propriétés élastiques du matériau, alors que le contraste électronique provient de la densité d'électron émis par la surface. Cette densité est plus élevée sur les arêtes, ce qui reproduit simplement la morphologie de la surface. Les zones dégradées qui représentent des discontinuités acoustiques, sont représentées par une couleur bleu qui, dans le codage choisi, indique une forte atténuation des ondes acoustiques. Les zones non dégradées sont représentées par des couleurs qui tendent vers le rouge, donc réfléchissent mieux les ondes acoustiques.

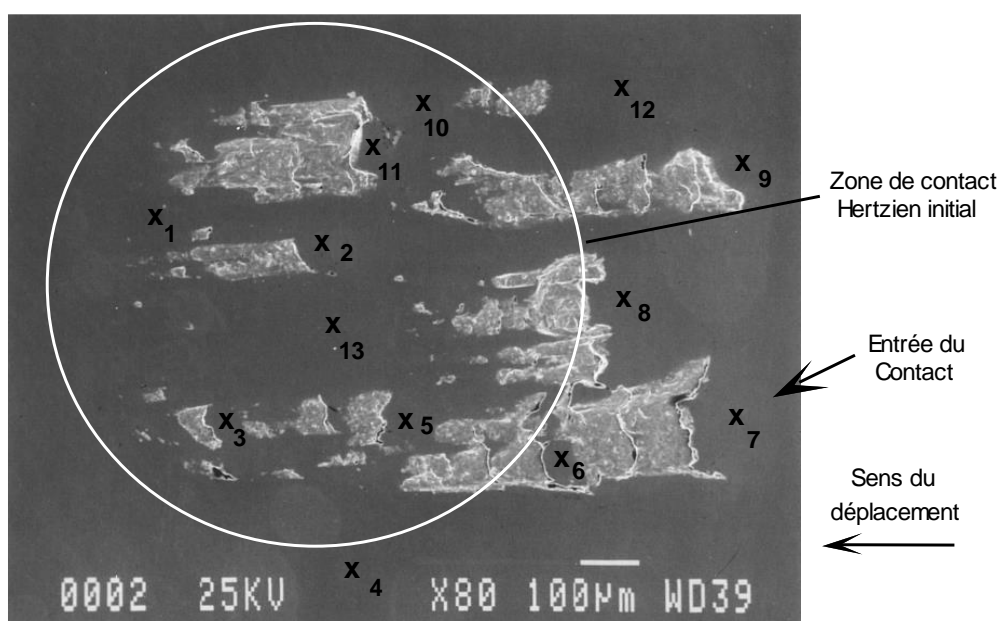


Fig. IV-1 : Image électronique de l'éprouvette inférieure après frottement.

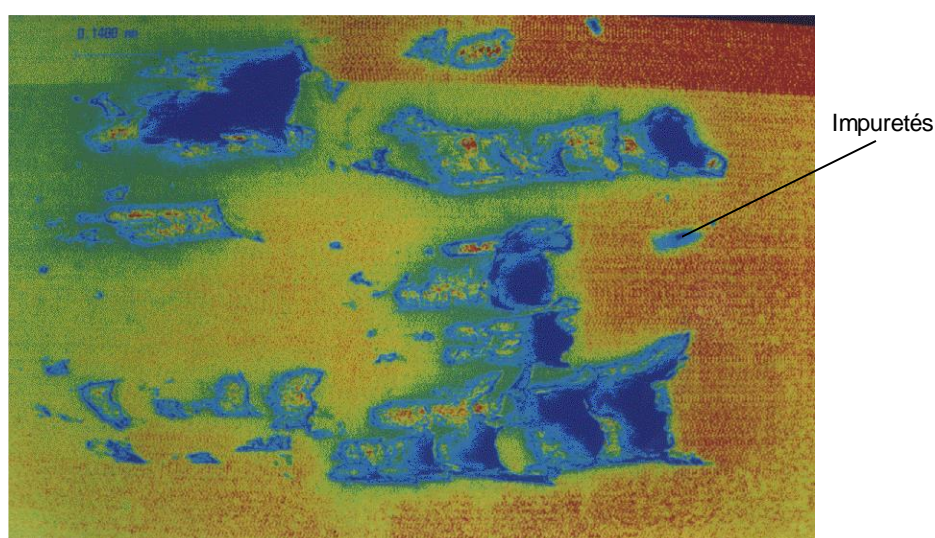


Fig. IV-2 : Image acoustique en surface ($f=0 \mu\text{m}$) de l'éprouvette inférieure après frottement.

L'interprétation des images acoustiques est difficile, car les types de discontinuités élastiques qui influent sur le contraste sont nombreux, et leur séparation nécessite un savoir faire. Dans le cas des surfaces

dégradées, la différence de contraste peut provenir, soit des gradients de propriétés élastiques du matériau, soit de la différence d'altitudes entre les différentes zones d'acquisition. Les courbes de $V(z)$ permettent dans ce cas d'isoler les effets de chacun de ces paramètres.

Le traitement des signatures acoustiques acquises sur les zones indiquées (fig. IV-1) ont donné les valeurs de module de Young (E) qui sont représentées sur le tableau IV-1 (colonne, léger polissage), dont les valeurs manquantes sont dues à des $V(z)$ inexploitable. Dans ce tableau, nous remarquons que E varie entre 186 GPa (repère N°2) et 232 GPa (repère N°11). Ceci représente des variations considérables par rapport à la valeur moyenne de E qui est de 210 GPa, mesurée sur une zone non frottée de la surface. Les deux valeurs extrêmes correspondent à des zones déformées plastiquement, qui se situent à l'entrée du contact.

L'oxydation de la surface induite par le liquide de couplage, ici de l'eau, a empêché d'avoir des images de sous-surface.

IV.2.4 Après enlèvement d'une couche de 4 μm

Après enlèvement par polissage mécanique d'une couche de 4 μm d'épaisseur, nous avons refait l'acquisition des signatures acoustiques $V(z)$ et des images acoustiques sur les mêmes zones (fig. IV-3). Les images obtenues à une défocalisation en sous-surface de 4 μm montrent une différence de contraste sur les bords avant des stries, qui ne sont visibles optiquement qu'après attaque chimique. Ces mêmes zones sont mieux visibles acoustiquement à la défocalisation de 10 μm , (fig. IV-4, flèche). Ceci confirme les résultats déjà cités (Cf. II.2.4.4) concernant la propagation des TTS en sous-surface à l'avant du contact. C'est à dire que les TTS se forment à une profondeur d'une dizaine de micromètres dans nos conditions d'essai, et se propagent à l'avant du contact, qui présente une structure à faible dimension des grains, obtenue par déformation plastique. Sur la figure IV-3 nous remarquons sur les zones A et B une porosité qui, probablement existait avant le frottement. Cette porosité est visible optiquement.

Les valeurs de module de Young (tab. IV-1), varient de 169 (repère N°6) à 220 GPa (repère N°11). On note la chute de ces valeurs extrêmes de E ainsi que celles des repères 1, 3, 4, 5, 7, 9, et 10; (9 mesures sur 13).

IV. 2.5 Après enlèvement d'une couche 5 μm

Après enlèvement d'une nouvelle couche de 5 μm , les mêmes acquisitions d'images et de $V(z)$ ont été refaites. Les images acoustiques confirment toujours la différence de structure à l'entrée du contact. Des résultats semblables ont été mis en évidence optiquement sur des éprouvettes polies électrolytiquement et attaquées chimiquement (fig. IV-5 et IV-6).

Les valeurs de E (Tab. IV-1, colonne à -9 μm), varient de 193 (repère N°9) à 261 GPa (repère N°4). Nous remarquons que cinq plus grandes valeurs de E sont obtenues à ce stade de d'enlèvement de matière, (repères 2, 3, 4, 6 et 10).

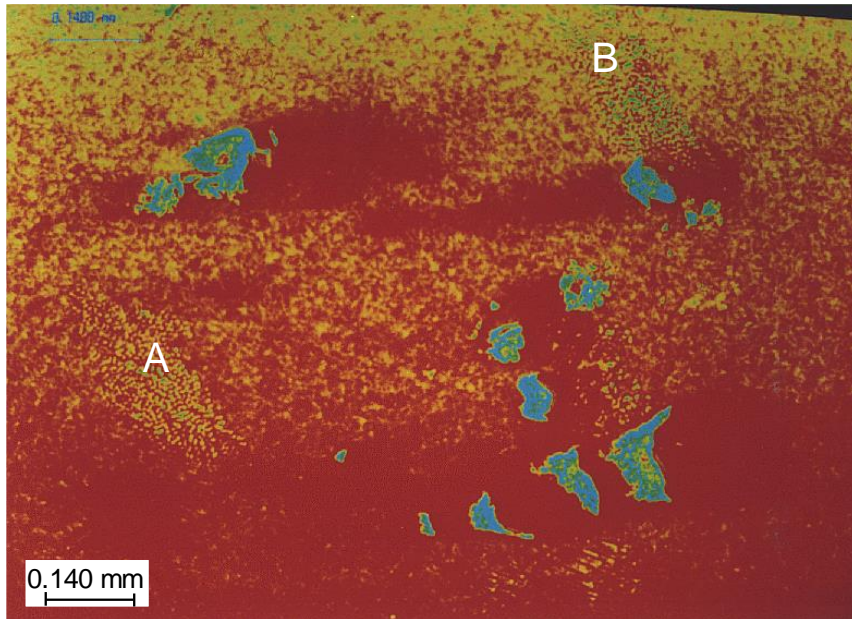


Fig. IV-3 : Image acoustique à - 4 μm de défocalisation.

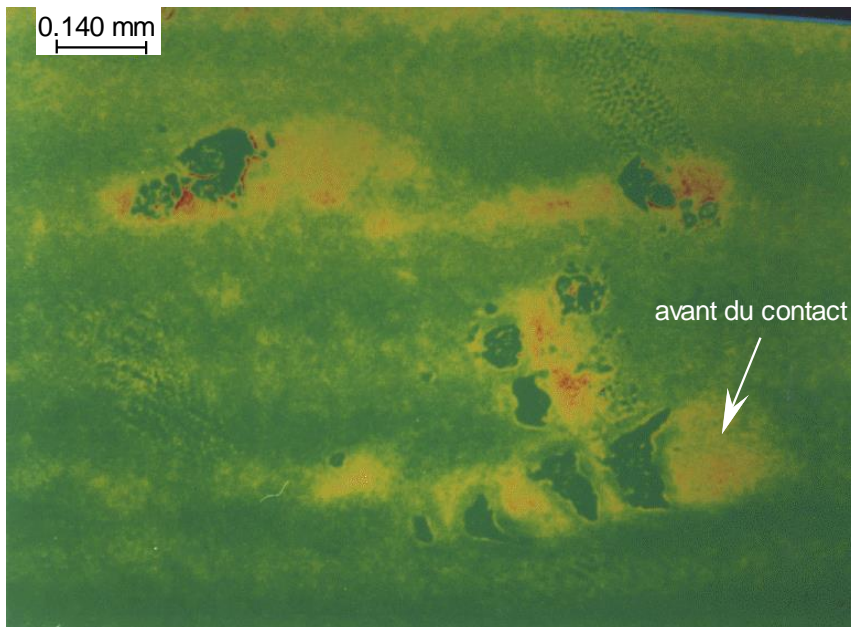


Fig. IV-4 : Image acoustique à - 10 μm de défocalisation.

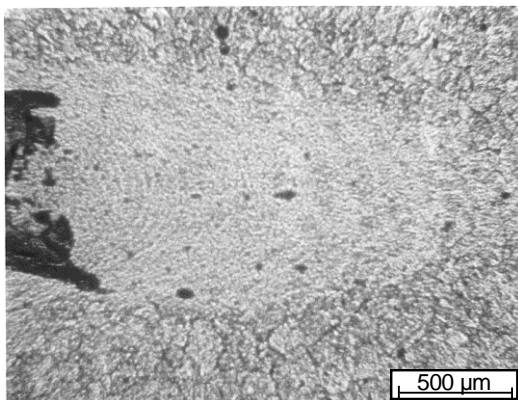


Fig. IV-5 : Image optique d'un bord avant d'une strie après attaque chimique.

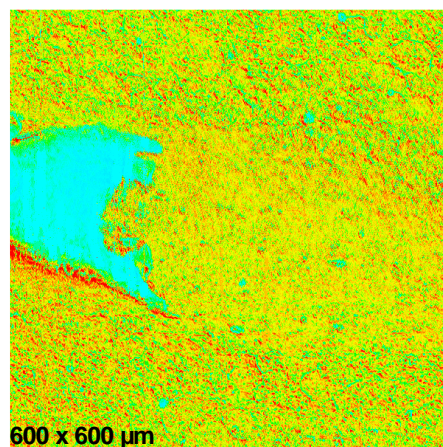


Fig. IV-6 : Image acoustique d'un bord avant d'une strie.

Zones de mesures	Valeurs de E [GPa]		
	Après léger polissage (0 μm)	à - 4 μm	à - 9 μm
1	208	207	205
2	186	203	239
3	212	199	231
4	222	208	261
5	205	196	-
6	-	169	241
7	212	180	196
8	213	219	197
9	217	210	193
10	209	207	212
11	232	220	198
12	211	217	205
13	214	218	-

Tableau IV-1 : Valeurs de module de Young E selon les zones désignées sur la figure VI-1 et selon l'épaisseur de la couche enlevée par polissage mécanique.

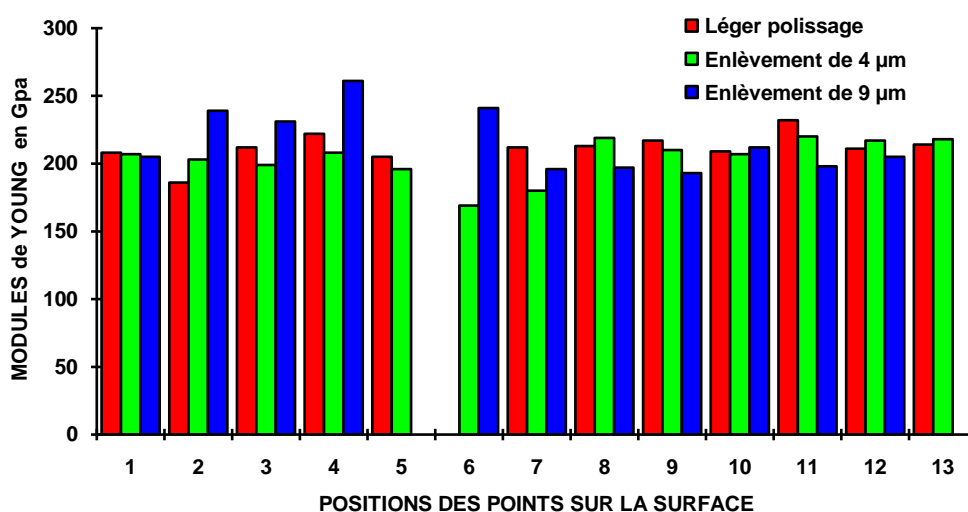


Fig. IV-7 : Diagramme des valeurs de module de Young E selon les zones désignées sur la figure VI-1 et selon l'épaisseur de la couche enlevée par polissage mécanique.

IV.2.6 Discussion des résultats

Les difficultés rencontrées au cours de ces mesures sont essentiellement dues au :

1. liquide de couplage, qui a engendré des phénomènes d'oxydation;
2. inhomogénéités, provenant de différentes origines dans le matériau (porosités...), bien que minimes, peuvent disperser les résultats, vu la ponctualité des mesures;
3. polissages successifs, malgré les précautions prises, ils peuvent légèrement écrouir les premiers corps et créer des contraintes résiduelles pouvant perturber les mesures.

Les images acoustiques obtenues lors de cette étude, montrent une richesse d'informations sur l'état élastique de l'éprouvette frottée. L'apport par rapport aux images optiques ou électroniques réside dans la

détection des modifications de structures à l'avant des stries, qui correspondent bien à la formation et la propagation des TTS.

L'analyse des signatures acoustiques $V(z)$ individuellement, n'a pas permis de trouver des explications logiques reliant les paramètres de frottement et les vitesses acoustiques suivant la matière enlevée, qui ici, simule les mesures en profondeur. Ceci s'applique par conséquent à l'analyse individuelle des valeurs de module de Young. La mesure qui semble poser le plus d'interrogation, est celle de la zone N° 4 qui avoisine la frontière de la zone de contact Hertzien. En effet, elle donne une valeur de 208 GPa à - 4 μm , qui est voisine de la moyenne mesurée ailleurs sur la surface, 210 GPa, et donne en même temps la valeur la plus élevée, 261 GPa à - 9 μm . De même que la mesure N°6 qui donne la valeur la plus faible (169 GPa) à - 4 μm , et une valeur élevée de 241 GPa à - 9 μm . Ceci irait dans le sens de ce qui a été vu (CF. II.2.4.4), c'est à dire, à la profondeur - 9 μm , se situe la zone de formation des TTS, bien que les valeurs absolues, 241 et 261 MPa ne soient pas réalistes.

Une analyse statistique (tab. V-2) a été faite pour essayer de trouver des corrélations entre les résultats obtenus, à savoir :

1. chercher des relations entre l'état de surface autour de chaque zone de mesure et les valeurs des vitesses acoustiques ou de module de Young;
2. suivre les variations des valeurs des vitesses et des module de Young pour chaque zone de mesure en fonction de la matière enlevée;
3. comparer les valeurs de vitesses acoustiques et de module de Young des positions se trouvant sur les zones non frottées, frottées et dégradées.

	Après léger polissage	Après enlèvement de matière :	
		4 μm	9 μm
E_{moyenne} (GPa)	211	204	216
Variance	10,3	14,7	21,9
Variance / E_{moyenne}	4,8 %	7,2 %	10 %

Tableau V-2 : Etude statistique sur les valeurs moyennes de Module de Young.

L'analyse statistique des valeurs de module de YOUNG (tab. IV-2) montre que la moyenne de ces valeurs, initialement égales à la valeur "classique" tabulée de l'acier (211 GPa), diminue après enlèvement de 4 μm (204 GPa), puis augmente après enlèvement de 9 μm (216 GPa). L'analyse de la variance montre une augmentation de la dispersion des valeurs de module de Young en fonction de la couche de matière enlevée. Par conséquent, il est encore vraisemblable que l'augmentation des valeurs de module de Young après enlèvement de 9 μm corresponde à une évolution des TTS accompagnée par des transformations de structures et d'augmentation de dureté (Cf. II.2.4.4) en sous-surface.

Les résultats obtenus nous ont permis de définir le protocole des essais de frottement ultérieurs qui mettent en évidence la propagation des TTS sans trop dégrader la surface.

IV.2.7 Cartographie de module de Young

Cette cartographie est obtenue par acquisitions successives des signatures acoustiques $V(z)$ sur une surface (X, Y) déterminée, avec un incrément de mesure qui peut être choisi selon la fréquence des ultrasons. Dans notre cas, à 600 MHz, il est de $30\ \mu\text{m}$, ce qui correspond au diamètre maximal de la zone d'incidence en surface à la fin du déplacement vertical de la lentille (Cf. III.4.2). Ceci permet d'éviter le chevauchement inutile des mesures en surface pour des zones de mesures voisines. L'acquisition de $V(z)$ s'effectue à chaque incrément, puis le signal $V(z)$ est enregistré selon les coordonnées (X, Y) . Après le balayage de toute la surface choisie, et les calculs nécessaires, un codage de couleurs selon les valeurs de module de Young, donne alors une cartographie en couleur de la surface balayée.

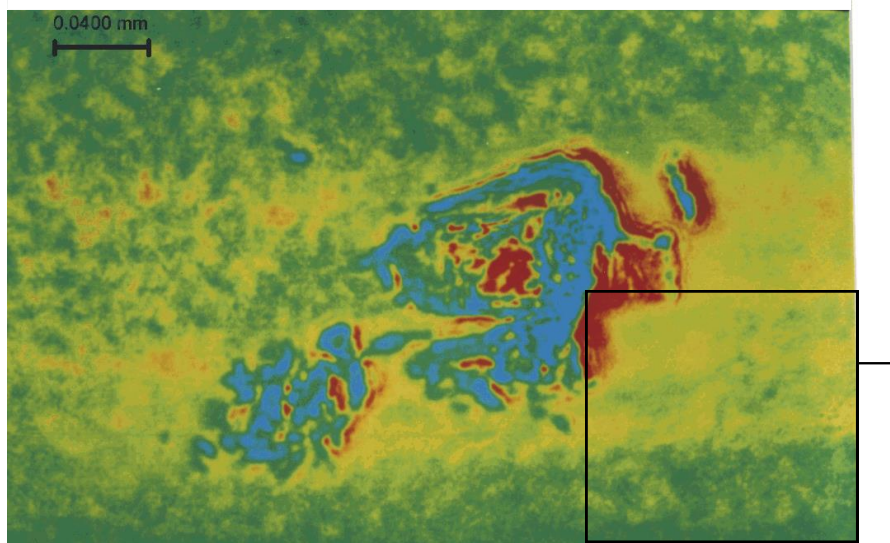


Fig. IV-8 : Image acoustique à $-4\ \mu\text{m}$ de défocalisation, le cadre montre la surface de mesure de la cartographie des modules de Young.

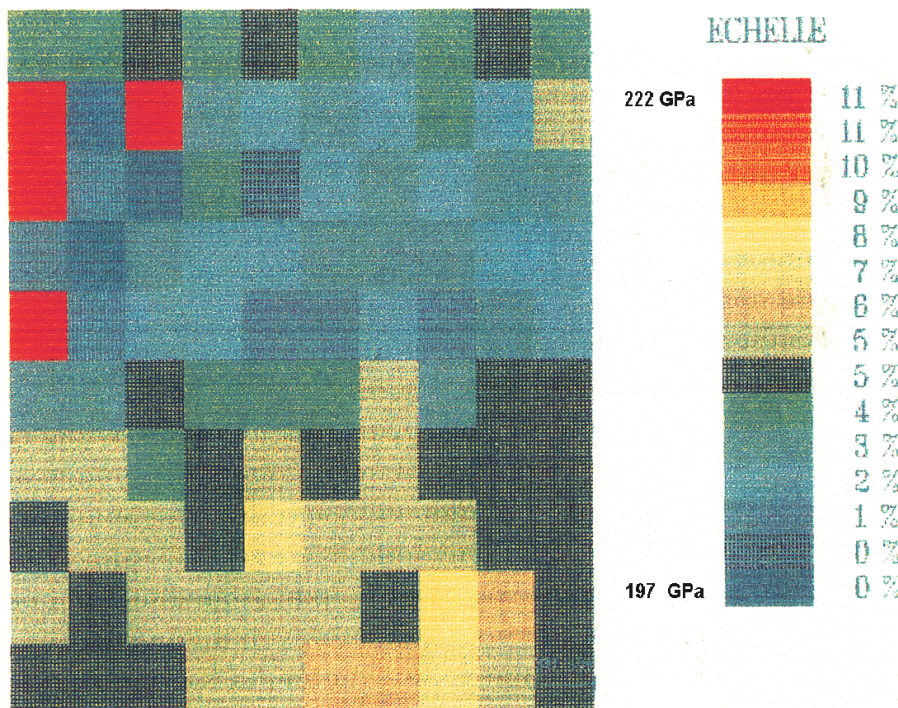


Fig. IV-9 : Cartographie de module de Young, avec un incrément de $30\ \mu\text{m}$.

Après les traitements, nous remarquons sur la cartographie de module de Young, (fig. IV-9), que les zones les plus déformées et qui sont représentées sur l'image acoustique (fig. IV-8) par une couleur rouge, ont des valeurs de module de Young plus élevés (220 GPa). Nous retrouvons ici, une "logique tribologique" qui pourrait relier les réponses des premiers corps, par déformation plastique, aux valeurs de module de Young obtenues par signatures acoustiques.

Notons que les résultats obtenus par MAB sont assez précis au point de vue mécanique, par exemple, une erreur de 1% sur la vitesse transversale V_t , se traduit par une erreur de 2% sur le module de Young. Rappelons qu'une erreur de 1% sur les vitesses acoustiques est importante. En effet l'erreur sur la vitesse V_t du verre est de 0,1 %, (Cf. VI.2.1)

IV.3 CONCLUSION

Nous avons vu que les images acoustiques acquises en surface de l'éprouvette frottée, sont similaires à celle obtenue avec le MEB. Les images acoustiques vont au-delà du contraste électronique qui reflète la morphologie de la surface, et donnent en plus des informations sur l'état élastique du matériau. Dans notre cas, les images acoustiques ont révélé des transformations de structure dans les zones déformées à l'avant des stries. Ceci confirme bien la propagation des TTS à l'avant du contact.

Sur les images acoustiques, selon le codage retenu, les zones qui sont dégradées donnent des couleurs qui tendent vers le bleu, donc qui atténuent fortement les ondes acoustiques. Les zones déformées plastiquement et qui ne présentent pas de fortes dégradations (Cf. III.6.3.3), donnent plutôt des couleurs qui tendent vers le rouge. Cependant, l'interprétation des différentes couleurs d'une image acoustique est très complexe, à cause du "mélange" d'informations provenant à la fois des gradients de propriétés élastiques et des différences d'altitudes. L'acquisition de signatures acoustiques en parallèle, sur les zones ambiguës, devrait aider à isoler chaque effet, et par la même, à "soigner" les interprétations.

Les valeurs moyennes des modules de Young mesurées après enlèvement successif de la matière ont montré une nette augmentation après enlèvement de 9 μm , ce qui se corrèle positivement avec l'idée de "naissance et de propagation des TTS" en sous-surface et à l'avant du contact. La cartographie de module de Young confirme cette corrélation.

Nous rappelons que la micro-caractérisation acoustique, est une méthode encore jeune, les travaux de recherches en ce domaine sont en progression, et portent sur l'optimisation des moyens et des paramètres d'acquisition ainsi que des méthodes de traitement et d'exploitation du signal tel que :

- la recherche de la fréquence optimale des ultrasons pour chaque matériau et phénomène étudié;
- l'optimisation du traitement des $V(z)$ par FFT;
- l'analyse plus poussée des $V(z)$, en l'occurrence l'exploitation des amplitudes;
- l'exploitation de la phase, etc.

Ces travaux devraient déboucher sur la modélisation des différents "phénomènes acoustiques" se produisant en surface ou en sous-surface des objets analysés, et par conséquent, accroître la fiabilité des interprétations qui reposent actuellement sur un très grand savoir faire.

En conclusion, ces études réalisées sur une éprouvette frottée ont montré que la MAB peut fournir des informations utiles en tribologie, si les conditions de frottement sont compatibles avec les exigences acoustiques.

CHAPITRE V

COUPLAGE : ESSAIS TRIBOLOGIQUES ET MAB

V.1 INTRODUCTION

Pour tenter de pallier au retard de "livraison" du microscope acoustique, le simulateur de frottement (TRIBOMAB sans MAB) a été transporté au LAIN de l'Université de Montpellier afin d'utiliser l'un de ses microscopes acoustiques. Ce transport était nécessaire, afin de franchir le premier pas dans le couplage "Simulateur de frottement - Microcaractérisation acoustique" et donc de vérifier le bien fondé du sujet de recherche.

L'objectif étant de suivre l'évolution des TTS en cours de frottement, l'idéal serait donc d'effectuer ce suivi in-situ en temps réel, donc de frotter directement avec l'un des premiers corps en saphir, qui ferait office d'éprouvette et de lentille acoustique. Un compromis serait de loger une lentille acoustique à une distance choisie de la surface de l'éprouvette. Ce souhait qui peut être une utopie de tribologie, ne peut être satisfait à cause des problèmes techniques suivants :

1. la distance fixe entre la lentille et la surface de l'éprouvette, interdit la mesure de $V(z)$. Ceci empêche la mesure des vitesses acoustiques et par la même, des paramètres élastiques du matériau. A moins, dernière utopie, d'avoir le balayage par une autre tactique;
2. l'acquisition pendant le frottement, ne peut se faire dans ce cas, que sur une seule ligne horizontale, donc pas d'imagerie en X-Y;
3. le frottement génère des vibrations non négligeables de la lentille qui peuvent perturber le signal acoustique;
4. la dégradation éventuelle de la surface, perturbe le signal acoustique;
5. la présence du liquide de couplage modifie les conditions tribologiques à la surface.

Les analyses acoustiques, sous forme d'images et de signatures acoustiques, ne s'effectuent donc qu'après arrêt de l'essai et ouverture du contact.

Dans ce chapitre, nous décrivons la démarche générale des essais effectuée au LAIN, depuis les problèmes d'adaptation du simulateur de frottement et du MAB, jusqu'à la fin des essais. La méthodologie des essais adoptée est la suivante :

1. acquisition d'images acoustiques à différentes défocalisations sur l'éprouvette inférieure plane avant le frottement;
2. acquisition des signatures acoustiques $V(z)$ en différentes zones choisies, puis repérées;
3. répétition des mêmes acquisitions après quelques cycles de frottement.

Ceci permet de déceler d'éventuels changements au niveau des TTS. Nous répétons cette alternance de frottement-mesure acoustique jusqu'à la naissance des premières dégradations des premiers corps.

Le MEB et le microscope optique de haute résolution, étaient au LMC, ce qui nous n'a pas facilité ce couplage Tribologie-MAB.

V.2 ADAPTATION DU MAB AU SIMULATEUR DE FROTTEMENT

L'utilisation de la mécanique de balayage du microscope acoustique existant, sur notre simulateur de frottement a nécessité la fabrication d'une adaptation (fig. V-1) sur laquelle seront fixées les tables de déplacement et qui sert aussi au réglage d'assiette de la lentille.

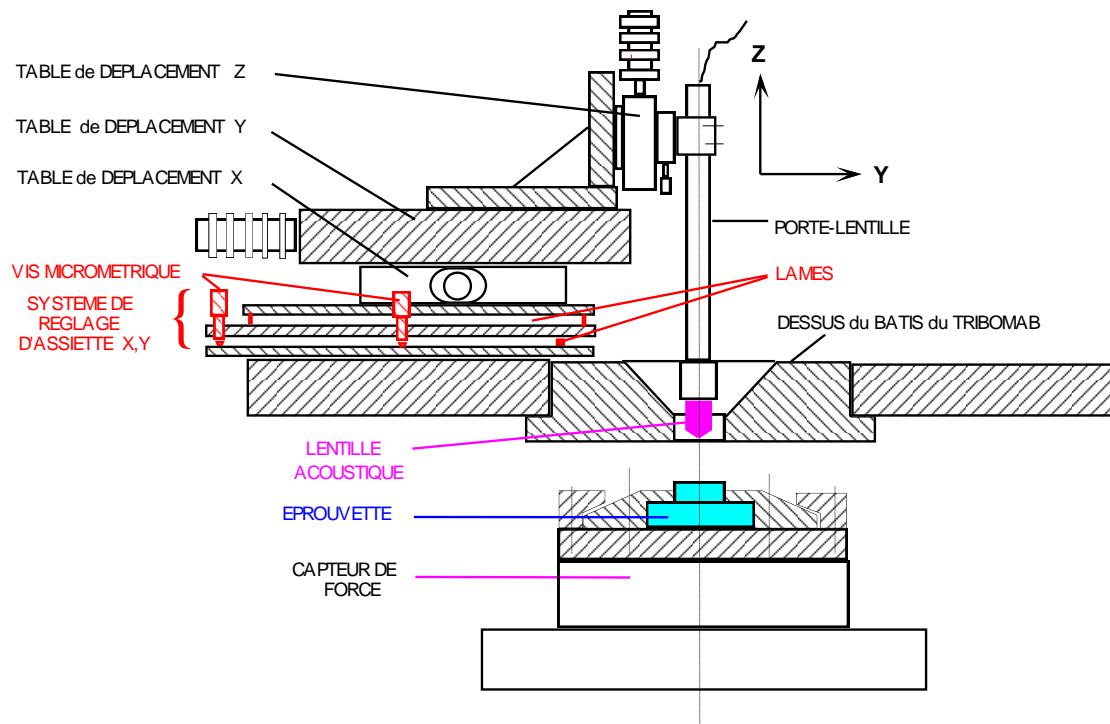


Fig. V-1 : Adaptation du système de balayage mécanique au-dessus du TRIBOMAB.
(Comparaison avec fig. III-8).

V.3 CONDITIONS ACOUSTIQUES

En pratique, pour avoir des résultats significatifs en microscopie acoustique il faut respecter les règles suivantes :

- ♦ la température ambiante pendant l'acquisition doit être comprise entre 23 et 25 °C, (Cf. III.4.4.2);
- ♦ la bonne planéité de la surface à analyser, (Cf. III.6.3.4);
- ♦ le bon réglage de l'assiette de l'éprouvette, (Cf. III.4.3);
- ♦ l'optimisation des réglages de tous les paramètres électroniques et de traitement du signal; (amplificateurs, filtres, porte d'intégration, etc.).

A cause de l'utilisation du liquide de couplage, de l'eau dans notre cas, les surfaces s'oxydent pendant la mesure (fig. V-3). C'est pourquoi un antioxydant qui est une huile de coupe soluble a été ajouté au liquide de couplage. Plusieurs tests préliminaires ont été effectués avec différentes concentrations pour trouver un compromis entre la protection contre l'oxydation et la faible atténuation du signal acoustique. La concentration retenue qui semble être correcte est 0,25%.

Sur le plan tribologique, la présence du liquide de couplage affecte le comportement des écrans. Pour garantir au mieux la reproductibilité des essais entre chaque alternance frottement-mesure, nous avons nettoyé la surface uniquement à l'eau distillée suivie d'un séchage avec un gaz neutre. L'utilisation d'autres produits chimiques est déconseillée, car ils ont pour effet, soit d'atténuer les ultrasons, soit d'affecter les écrans. Les conséquences de ce nettoyage devront être pris en compte lors des interprétations tribologiques.

L'utilisation pour ce premier couplage Tribologie-Microcaractérisation acoustique, d'un microscope acoustique qui n'était pas conçu dans cette optique, a posé quelques problèmes :

- le montage de la lentille en port à faux (fig. V-1), a engendré des vibrations qui ont rendu certaines images acoustiques inexploitable;
- la lentille acoustique utilisée ne dispose pas d'un capteur de position par rapport à la surface de l'éprouvette. Par conséquent, lors du premier positionnement de la tache focale en surface, et lorsque l'écho de la surface est trop faible, il y a le risque que la lentille entre en contact avec la surface, (fig. V-4);
- le porte-éprouvette supérieur qui doit être démonté pour son remplacement par la lentille entre chaque alternance d'essai de frottement et de microcaractérisation acoustique, rend difficile le repositionnement de la lentille au même endroit de la surface de l'éprouvette inférieure.

En dehors de ces problèmes d'inadéquation entre le simulateur de frottement et le microscope acoustique utilisé, et malgré l'adaptation du liquide de couplage à la tribologie en lui ajoutant un antioxydant, après quelques heures d'imagerie, l'oxydation se produit toujours. Nous avons alors augmenté le taux de l'antioxydant à 0,5 %.

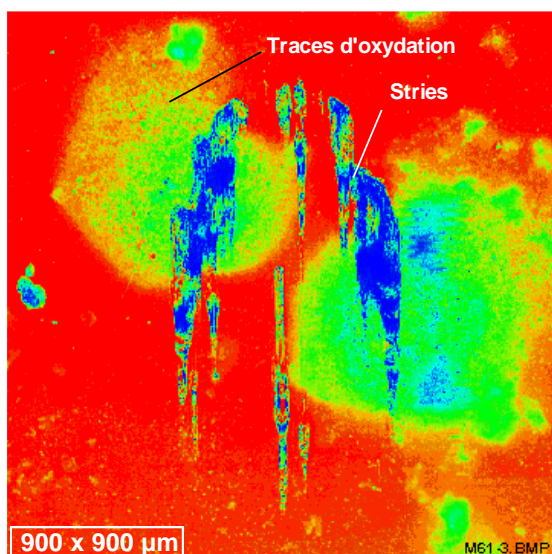


Fig. V-3 : Traces d'oxydation de la surface par le liquide de couplage.

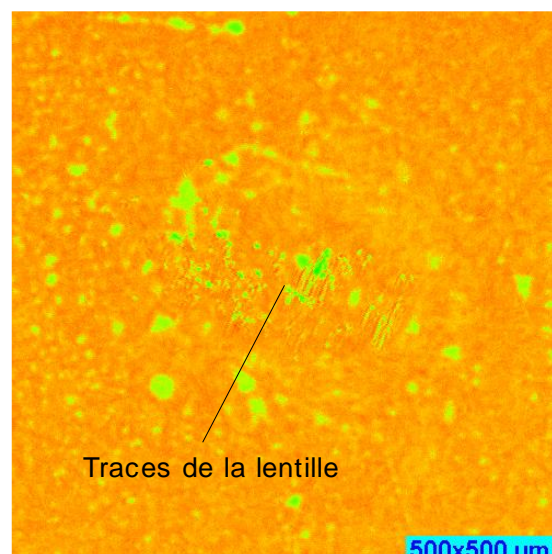


Fig. V-4 : Traces laissées par le contact de la lentille avec la surface.

V.4 CONDITIONS TRIBOLOGIQUES

Les conditions tribologiques retenues pour ces essais sont les suivantes :

$V = 0.5 \text{ mm/s}$; $F = 100 \text{ N}$; $d = \pm 5, \pm 10, \pm 25 \text{ } \mu\text{m}$; nombre de cycles ≤ 10 .

Le nombre de cycles est inférieur à 10, il permet de suivre les premières évolutions des TTS sans dégradation de la surface.

V.5 ANALYSE DES PREMIERS ESSAIS

Dans ce contexte délicat, nous avons effectué quelques essais tribologiques. Avant et après chaque incrément de frottement, nous avons acquis des images acoustiques à des défocalisations jusqu'à 9 μm sur les éprouvettes inférieures, ainsi que des signatures acoustiques sur des zones qui nous ont semblé intéressantes tribologiquement.

Dans nos conditions tribologiques, l'analyse des images acoustiques acquises n'a pas révélé de différences notables, ni avant et après frottement, ni avec la défocalisation qui n'a pour effet ici que des baisses d'intensité du signal, qui sont tout à fait normales, (Cf. III.4.2).

L'analyse des signatures acoustiques mesurées sur différentes zones frottées ou non, a montré de très faibles fluctuations des valeurs de vitesses acoustiques, et donc valeurs de module de Young (tab. V-1) autour de celles tabulées. La mesure N° 11 qui donne la valeur $E = 230 \text{ GPa}$, est effectuée à l'avant d'une zone faiblement dégradée, ce qui montre encore la propagation des TTS à l'avant du contact. Sur le reste de la zone du contact, les variations de propriétés élastiques sont insignifiantes, dans nos conditions tribologiques et acoustiques. Sur le plan tribologique ceci s'explique par l'accommodation dans les écrans, où le coefficient de frottement était inférieur à 0,15.

N° de mesure	VR [m/s]	Vt [m/s]	E [GPa]
1	3041	3305	215
2	3037	3300	214
3	3038	3302	214
4	3050	3312	215
5	3067	3333	217
6	3045	3310	215
7	3016	3279	212
8	3037	3301	214
9	3022	3285	213
10	3025	3288	213
11	3200	3478	230
12	3010	3272	211
13	3009	3270	211
14	3016	3278	212
15	3038	3302	214
16	3038	3302	214
17	3050	3314	215
18	3033	3295	214
19	3035	3298	214
E _{moy} [GPa]			214,58
Variance (σ)			4,01
σ / E_{moy} [%]			1,86 %

Tab. V-1 : Valeurs des vitesses acoustiques et des valeurs de module de Young.

V.6 PERSPECTIVES

A la suite de cette première série d'essais, nous avons décidé pour les essais suivants :

1. d'effectuer les mesures acoustiques en dehors du simulateur de frottement, pour s'affranchir des vibrations induites par le port à faux de la lentille acoustique. Ceci implique le démontage du porte-échantillon inférieur après chaque frottement, ce qui n'est pas trop gênant car le positionnement de ce dernier est assuré par un système de guidage à queue d'aronde, d'une précision de l'ordre du micromètre, (Cf. II.1.2.1);
2. de marquer la surface de l'éprouvette inférieure de manière à pouvoir se repositionner par imagerie après chaque essai de frottement. Ce marquage a été produit de la façon suivante :
 - a. créer à l'aide d'un pointeau, au sommet d'une éprouvette supérieure bombée (fig. V-5), une empreinte pyramidale à base carrée;
 - b. frotter cette éprouvette contre l'éprouvette inférieure (fig. V-6) à un débattement de $\pm 2 \mu\text{m}$, ce qui crée sur celle-ci, quatre empreintes plus ou moins visibles (fig. V-7) qui seront des repères par la suite.

Les éprouvettes ayant la même géométrie, les empreintes de repérage seront alors reproductibles et centrées sur la surface de l'éprouvette inférieure.

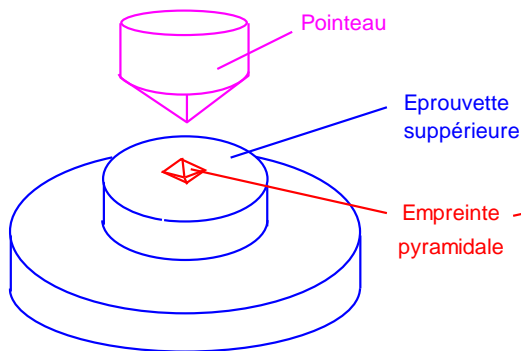


Fig.V-5 : Obtention de l'empreinte pyramidale à base carrée.

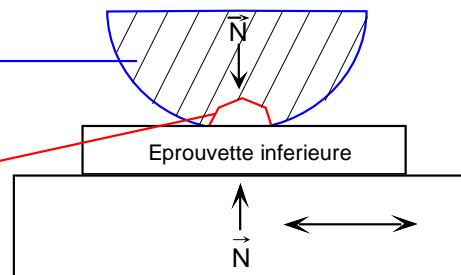
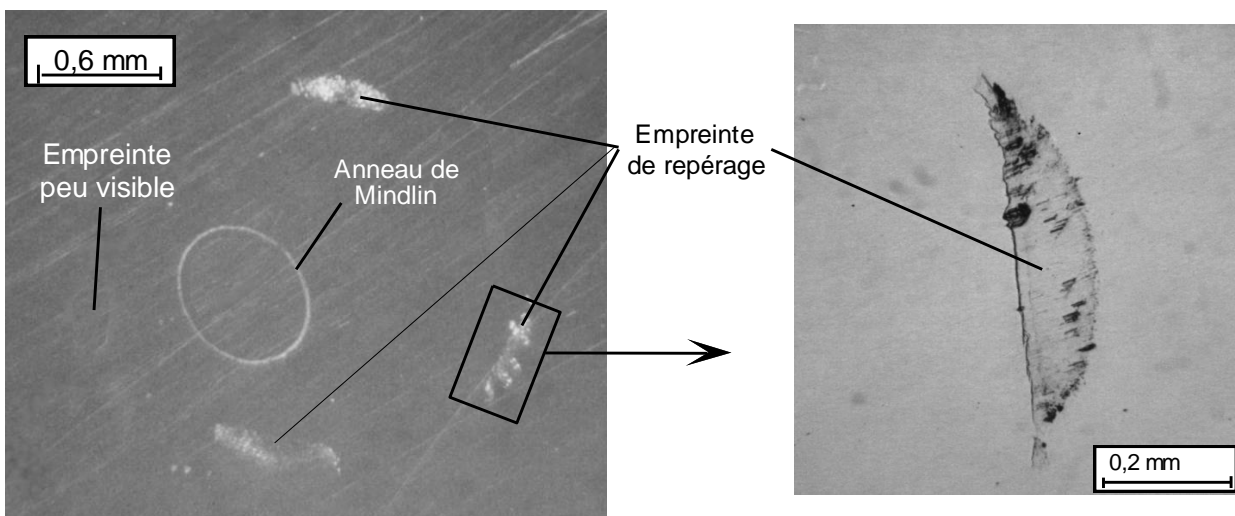


Fig.V-6 : Marquage de la surface inférieure Par les arêtes de l'empreinte pyramidale.



a) vue générale;

b) zoom sur une empreinte de repérage.

Fig. V-7 : Empreintes de repérage créées par frottement, sur l'éprouvette inférieure.

V.7 INFLUENCE TRIBOLOGIQUES DU LIQUIDE DE COUPLAGE

En prenant en compte les perspectives précédentes, tout en maintenant les mêmes conditions tribologiques (Cf. V.4), nous avons essayé d'alterner frottement et microcaractérisation acoustique pour suivre les évolutions des TTS.

L'antioxydant utilisé précédemment n'étant plus disponible au LAIN, nous avons été obligés d'utiliser une autre huile de coupe. Ce changement, bien que portant sur seulement 0,5 % du liquide de couplage, a radicalement modifié le comportement des écrans, et réduit leur durée de vie. Les dégradations des surfaces s'obtenaient alors en moins de cinq cycles, ce qui tribologiquement, ne permettant plus un suivi suffisamment progressif et explicite des TTS. En plus, cet antioxydant laissait après séchage une couche atténuante pour les ultrasons, (fig. V-8), et des écrans.

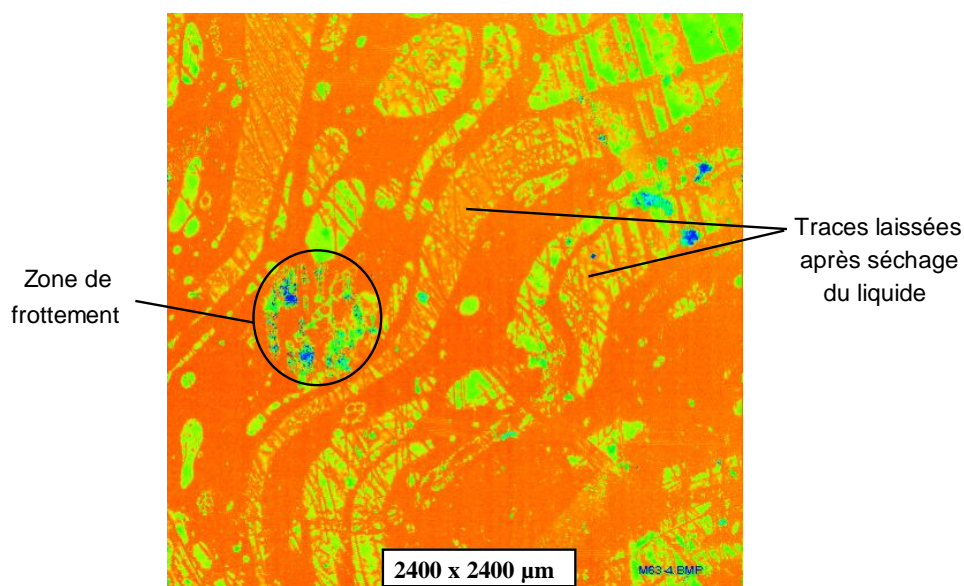


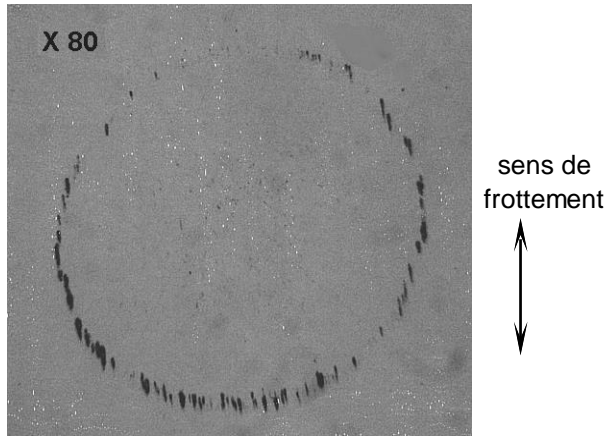
Fig. V-8 : Image acoustique montrant des traces laissées après séchage du liquide de couplage.

V.8 MACRO ANALYSE

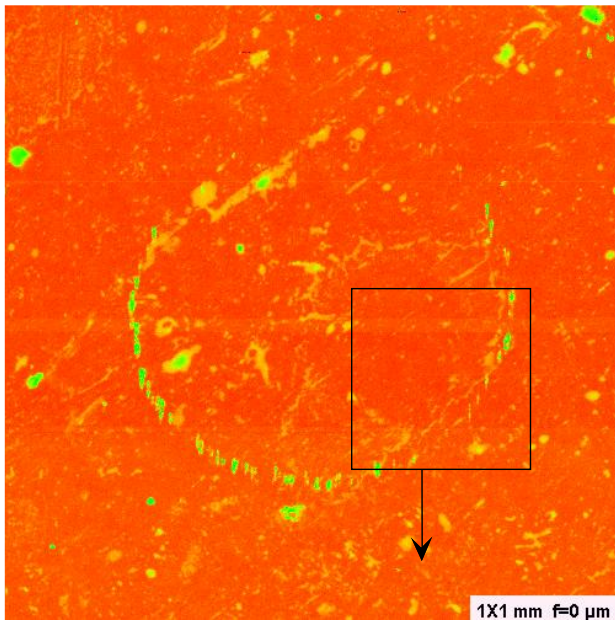
Les images acoustiques les plus exploitables sont celles relatives à l'essai N° 60 (Annexe A), qui sont prises à différentes défocalisations sous formes de vue générale et de zooms sur des zones jugées importantes. Précisons que les zooms effectués par rapport à une image donnée en prenant des incréments de balayage de la surface plus petits, seront appelés "zooms physiques" pour les distinguer des "zooms logiciels", qui s'obtiennent par agrandissement des pixels d'images déjà numérisées.

L'image acquise en surface (fig. V-9b) est plus contrastée, et inclue des "taches" qui sont probablement des impuretés accumulées sur la surface (fig. V-9d), l'atmosphère n'étant pas contrôlée. La défocalisation par incrément de 2 µm atténue les perturbations induites par ces impuretés, par conséquent les images acoustiques sont plus nettes (fig. V-9b, c, d, e).

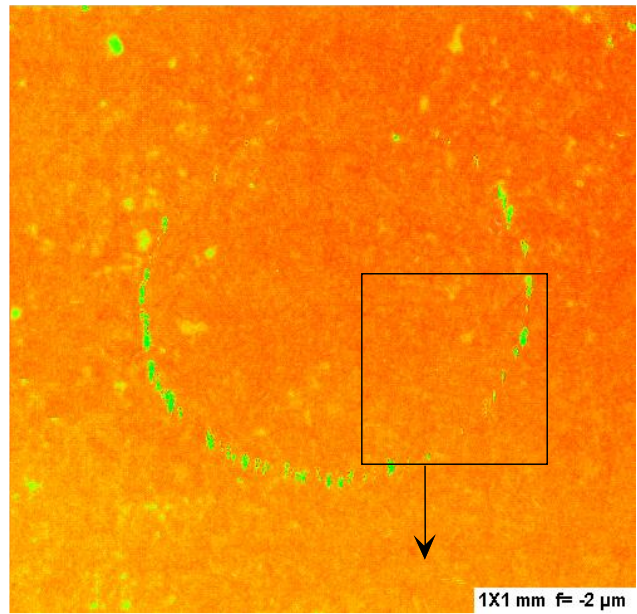
La comparaison des images optiques de la surface (fig. V-9a) et les images acoustiques (fig. V-9b, c), montre une grande similitude, et ne dévoile pas de différences notables sur les zones dégradées. Les deux moyens d'imagerie, montrent les mêmes stries sur l'anneau de Mindlin.



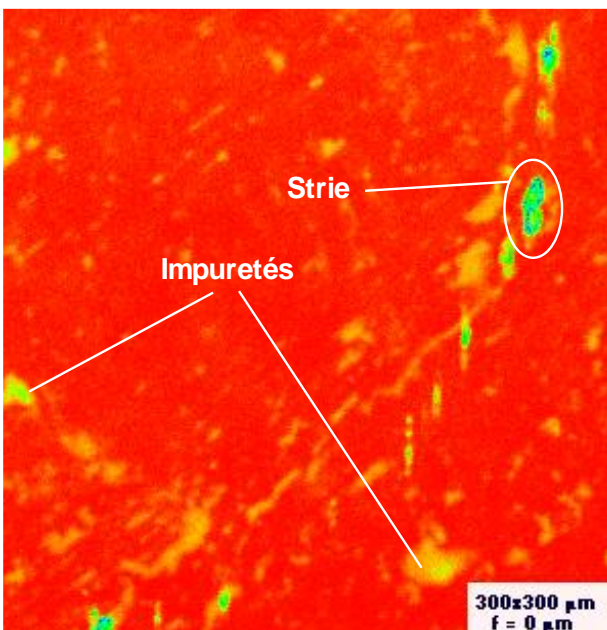
a) Image optique de la surface d'une éprouvette frottée;



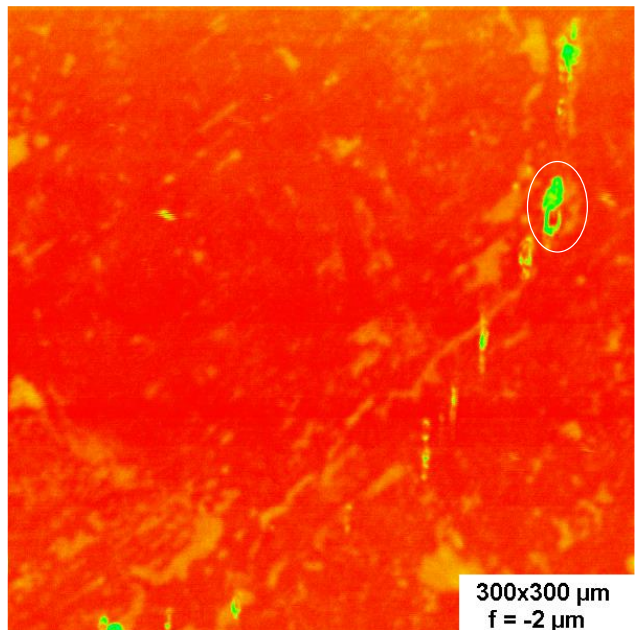
b) image acoustique en surface;



c) image acoustique à -2 μm;



d) Zoom physique en surface;



e) Zoom physique à -2 μm.

Fig. V-9 : Images optiques et acoustiques de l'éprouvette frottée.

V.9 MICRO ANALYSE

A première vue, nous remarquons sur les images acquises en surface (fig. V-9d, à $f=0\ \mu\text{m}$), et celles à $-2\ \mu\text{m}$ de défocalisation (fig. V-9e) des différences de contraste, et de dimensions des stries. L'interprétation de ces différences fait intervenir à la fois :

1. l'intensité du signal qui change avec la défocalisation, peut être ajustable par réglage électronique ou logiciel par décalage du zéro;
2. l'effet de la défocalisation sur le contraste des détails situés à la périphérie des petites stries qui sont formées sur l'anneau de Mindlin, et qui semblent changer de dimensions latérales. Sur la figure V-10, à la position "A" de la lentille, la couleur attribuée au signal acquis, d'après le codage retenu, tend vers le rouge. A la défocalisation de $2\ \mu\text{m}$, le signal acquis sur la même zone sera moins fort, donc la couleur attribuée change. Selon la défocalisation, la valeur du signal à la position "A" est toujours différente de celle de "B". Ce qui se traduit sur les images acoustiques par une impression de changement de la taille des stries en fonction de la défocalisation.

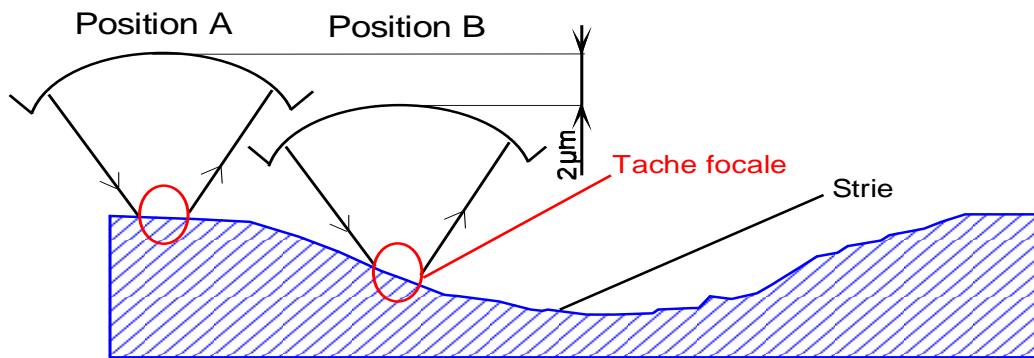


Fig. V-10 : Effet de l'altitude sur le bord d'une strie.

V.10 MESURES DES SIGNATURES ACOUSTIQUES

Le traitement des courbes $V(z)$, (fig. V-11) mesurées à l'intérieur et à l'extérieur de la zone de frottement, donnent des vitesses acoustiques et des valeurs de module de Young (tab. V-2) qui fluctuent à moins de 2% en moyenne autour des valeurs "classiques" tabulées de l'acier (211 GPa). Cette fluctuation est du même ordre que celle obtenue sur une éprouvette non frottée. Cette fluctuation provient de la ponctualité des mesures en regard de l'hétérogénéité locale du matériau. Ceci ne nous permet pas de trouver des corrélations entre les valeurs des vitesses acoustiques ou les valeurs de module de Young correspondantes et les sollicitations tribologiques, ou du degré de dégradation du matériau. Ce qui est peut-être dû à un problème d'échelle, c'est à dire que l'épaisseur de la zone qui présente des variations de propriétés élastiques en sous-surface, est peut être inférieure à la résolution de la lentille acoustique à 600 MHz utilisée jusqu'ici. Ou bien les conditions tribologiques n'ont pas suffisamment sollicité les premiers corps pour donner des variations détectables.

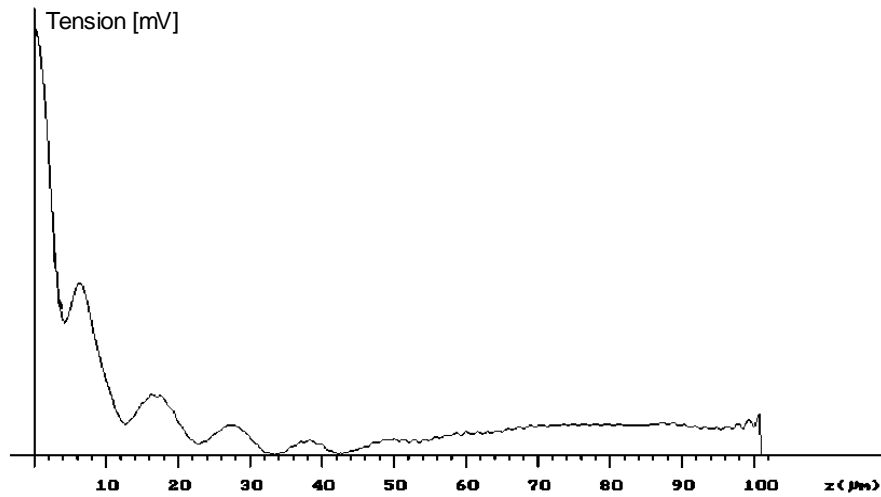


Fig. V-11 : Signature acoustique $V(z)$ représentative de l'ensemble des mesures.

N° de mesures	Zone de mesure	V_R [m/s]	V_t [m/s]	E [GPa]
1	Sur la zone frottée	3010	3272	211
2		3008	3270	211
3		3016	3278	212
4		3038	3302	214
5		3038	3302	214
6	A l'extérieur de la zone frottée	3049	3314	215
7		3031	3295	214
8		3034	3298	214

Tableau V-2 : Valeurs de vitesse de Rayleigh et de module de Young E.

V.11 DISCUSSION

Sur le plan tribologique, ces essais montrent que les dégradations se forment en premier sur l'anneau de Mindlin dès l'élimination des écrans. Cette élimination, suite à l'utilisation du nouvel antioxydant, se produit ici rapidement en moins de cinq cycles, ce qui montre l'influence des paramètres physico-chimiques sur la réaction des écrans.

Nous savons maintenant que pour nos conditions d'essais, la zone de naissance des TTS se localise sous l'anneau de Mindlin. Ce résultat, classique maintenant, était important à l'époque.

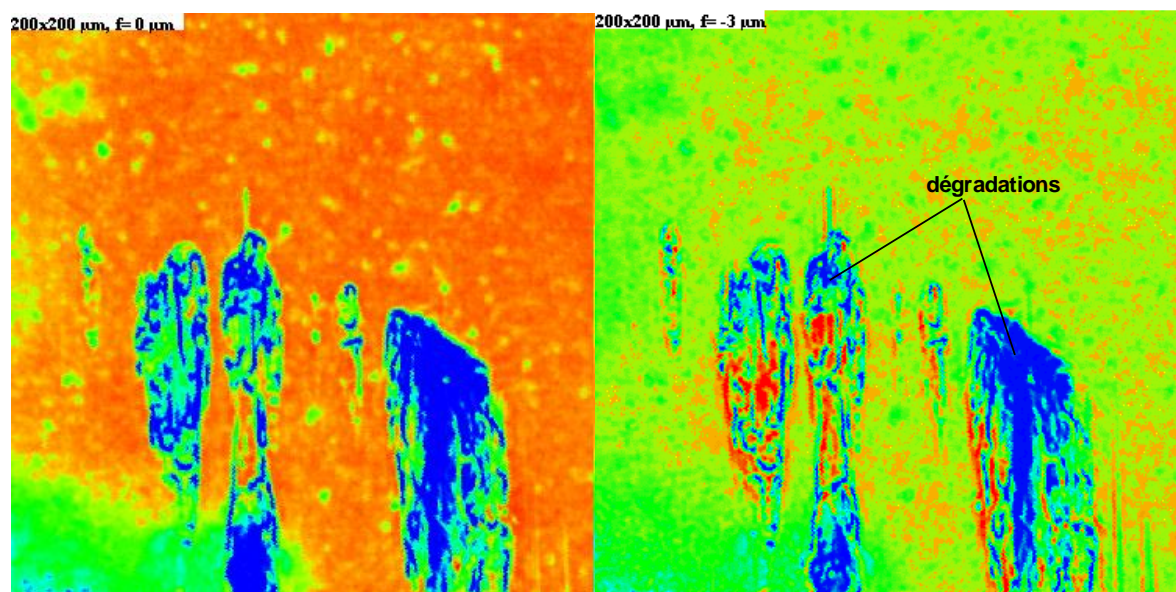
Sur le plan acoustique, dans ces conditions tribologiques des essais, les écrans qui s'accumulent sur les zones non dégradées de l'anneau de Mindlin, sont très peu détectables par imagerie acoustique à 600 MHz. La mise en évidence d'éventuels changements de structure dans la zone des TTS s'est avérée très délicate. Nous avons alors pensé que pour bien mettre en évidence les évolutions des TTS, nous devons solliciter plus le matériau sans pour autant dégrader les surfaces. Pour cela nous avons envisagé :

- a) d'augmenter la charge normale et le déplacement ($> 500 \mu\text{m}$), mais en ne réalisant qu'une passe. L'objectif étant d'obtenir avec certitude des zones fortement "écrouies", en limitant au maximum la dégradation des surfaces;

b) de réduire la charge normale et l'amplitude du déplacement, en travaillant en mouvement alternatif. L'idée était de favoriser l'accommodation dans les écrans, ce qui limite les dégradations de la surface. Le nombre de cycle a pour effet de solliciter le matériau dans la peau des premiers corps par fatigue.

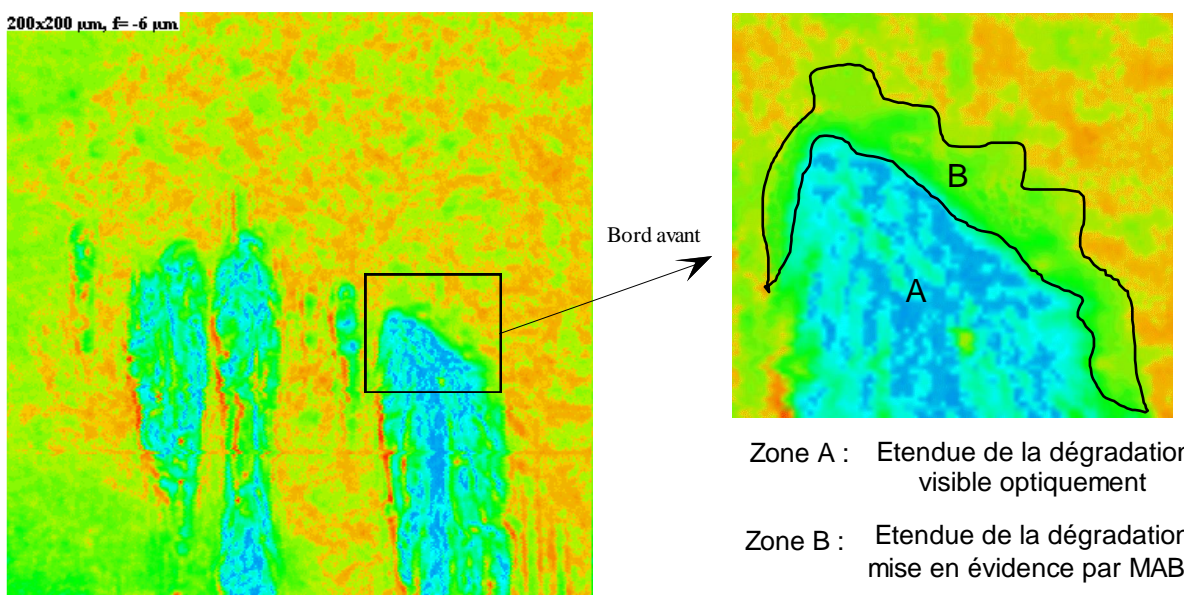
V.12 POURSUITE AVEC DES ESSAIS EFFECTUES EN UNE PASSE

L'essai N°61 (annexe B) qui est effectué à $P_{max} = 1$ GPa, $D_{th} = 500$ μm , en une passe, a donné des dégradations importantes des surfaces des premiers corps. Ces dégradations sont bien visibles sur les images acoustiques (fig. V-12) acquises à différentes défocalisations. Ces essais étant réalisés au LAIN, les images optiques n'ont pas pu être réalisées qu'ultérieurement au LMC.



a) 200x200 μm , en surface;

b) 200x200 μm , à - 3 μm ;



c) 200x200 μm , à - 6 μm ;

d) Zoom logiciel du bord avant d'une strie.

Fig. V-12 : Images acoustiques de la surface frottée à différentes défocalisations.

Ces images acoustiques montrent des différences de contraste importantes sur les bords avant des stries de frottement, qui sont des zones déformées plastiquement, (fig. V-12d). Cette étendue de dégradation mise en évidence par MAB, ne peut l'être par microscopie optique.

Les mesures de signatures acoustiques sur les zones trop dégradées ne donnent pas des résultats significatifs. Les signatures acoustiques acquises à l'amont du contact donnent en moyenne des variations de modules d'Young inférieures à 2 %, ce qui ne permet pas de tirer des conclusions, car les mesures sur des zones non frottées de la même éprouvette donne des variations similaires.

Ces mesures acoustiques ont duré quelques heures, pendant lesquelles l'oxydation de la surface en contact permanent avec le liquide de couplage s'est poursuivie. Comme l'oxydation provoque des atténuations importantes du signal acoustique, les microcaractérisations acoustiques de cette éprouvette n'ont pas pu être poursuivies. Nous avons alors décidé, pour la troisième fois, d'augmenter de 0,25% le taux d'antioxydant ajouté au liquide de couplage, pour les prochains essais.

V.13 POURSUITE AVEC DES ESSAIS EFFECTUES A PLUSIEURS CYCLES

V.13.1 Conditions tribologiques :

Ces essais sont effectués dans les conditions suivantes :

charge normale : 50 N; pression Hertzienne Maximale : 250 MPa;
amplitude : $\pm 5 \mu\text{m}$; Nombres de cycles : de 200 à 500.

V.13.2 Anneau de Mindlin

Les conditions tribologiques décrites ci-dessus ont conduit à la formation par accumulation des écrans, de l'anneau de Mindlin, qui est visible optiquement, et de diamètre inférieur à 1 mm.

Les images acoustiques (fig. V-13) acquises sur la zone de frottement, mettent en évidence cet anneau par un contraste créé par l'effet d'accumulation des écrans qui atténuent les ultrasons.

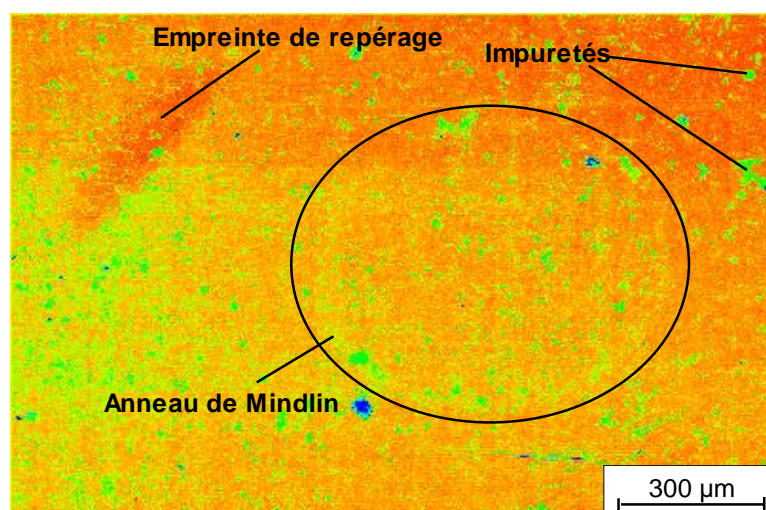


Fig.. V-13 : Image acoustique en surface représentant l'anneau de Mindlin.

Les signatures acoustiques acquises en différentes zones, parmi lesquels l'anneau de Mindlin n'ont pas donné des variations notables des vitesses de Rayleigh, donc de même pour les modules de Young. En revanche, les amplitudes des maxima des courbes des $V(z)$ diffèrent pour différentes zones de mesures, sans modification des paramètres d'acquisition. Ces différences n'ont pas pu être exploitées, à l'époque, car le logiciel permettant leur exploitation, était en cours de développement, (Cf. VII.6).

Sur le plan acoustique, plusieurs tentatives ont été faites pour détecter et caractériser les écrans sur l'anneau de Mindlin, à savoir jouer sur :

- la défocalisation;
- la largeur de la porte d'intégration du signal (Cf. III.4.3);
- les réglages des différents paramètres d'acquisition, logiciels et électroniques.

La défocalisation n'a pour effet que de diminuer les atténuations du signal acoustique provoquées par les impuretés de surface, l'image est plus nette en défocalisant entre 4 et 10 μm .

L'anneau de Mindlin est relativement mieux visible quand la porte d'intégration est d'une largeur qui permet d'intégrer le pic de l'écho de l'éprouvette en entier.

A une sensibilité électronique de 5 mV, qui est spécifique du matériel utilisé, les détails des images sont plus contrastés qu'à la sensibilité de 50 mV.

V.13.3 Effets cumulatifs

Nous avons poursuivi avec le protocole précédent en prenant plus de précautions lors des manipulations, vu que le système "Tribo-acoustique" est mal adapté pour ce type d'essais. Nous avons alors pu effectuer sur un même couple d'éprouvettes plusieurs alternances de frottement et de microcaractérisations acoustiques.

Les images optiques (fig. V-15, 16) et acoustiques (fig. V-17, 18) montrent que l'anneau est mieux visible après 1000 cycles qu'à 500 cycles de frottement (fig. V-17, $L_1 < L_2$). La formation de l'anneau a bien subi un effet cumulatif par accumulation des écrans, malgré les effets du liquide de couplage et surtout du nettoyage entre les mesures acoustiques et les essais tribologiques. Le repositionnement du porte-éprouvette s'effectue avec une précision largement inférieure au micromètre, qui garanti la "superposition" de l'anneau de Mindlin. Dans le cas d'un mauvais repositionnement, il ya formation de deux anneaux qui sont décalés de la valeur du jeu mécanique.

Les images acoustiques acquises en sous surface n'ont pas montré de différences notables avec celles acquises en surface, sauf qu'avec la défocalisation, les impuretés de surface ne sont plus visibles, les images deviennent légèrement nettes.

Le traitement des signatures acoustiques (Tab. V-3) mesurées le long d'une droite qui traverse l'anneau de Mindlin (fig. V-18) montrent des variations de module d'Young E inférieures en moyenne à 2 % selon les zones de mesure, ou selon le nombre de cycles. En effet, que se soit à l'intérieur ou à l'extérieur de la zone de frottement, les valeurs de E ne varient pas notablement, et ne corrént pas avec les sollicitations tribologique. C'est à dire qu'on s'attendait à ce que sur l'anneau de Mindlin, les vitesses varient par rapport aux autres zones de la surface, ce qui n'est pas le cas.

Sur le plan tribologique, nous remarquons bien que l'anneau se forme par accumulation d'écran, dont le débit provient du centre de la zone du contact, et dépend de la nature des écrans et des conditions tribologiques, notamment l'amplitude du déplacement.

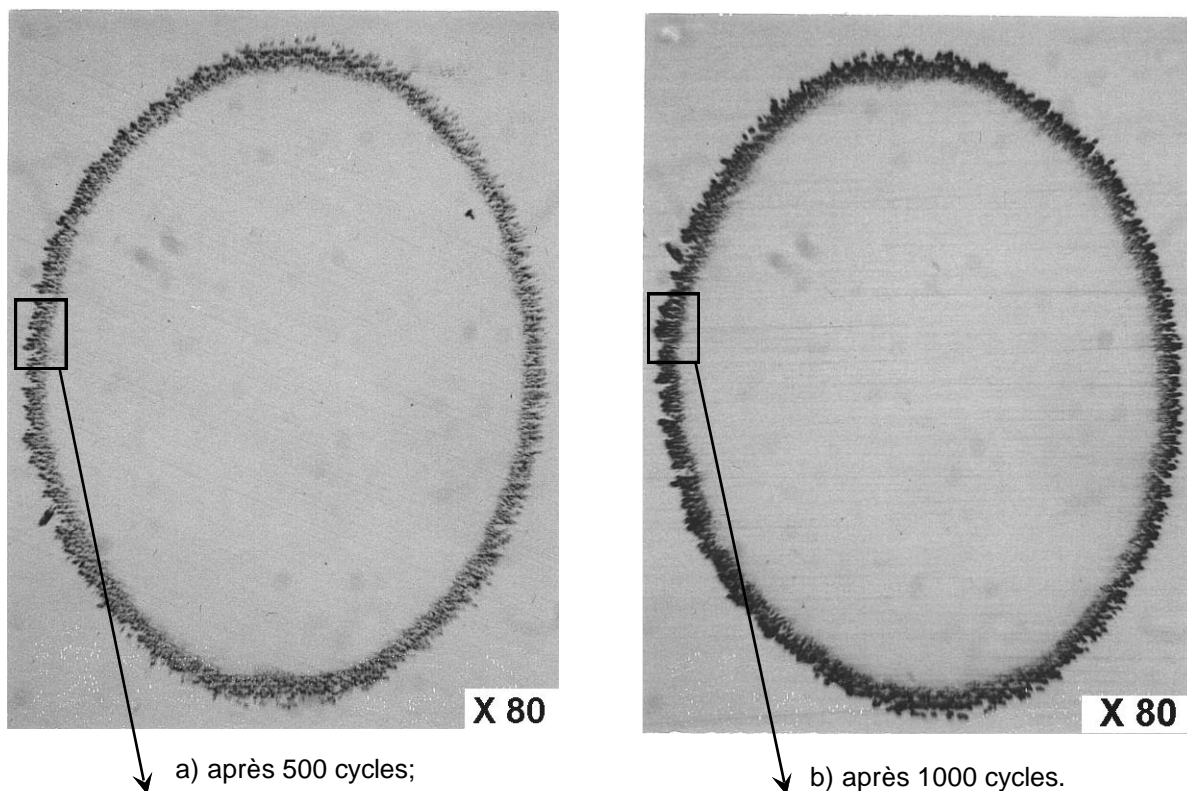


Fig. V-14 : Images optiques de l'éprouvette frottée.

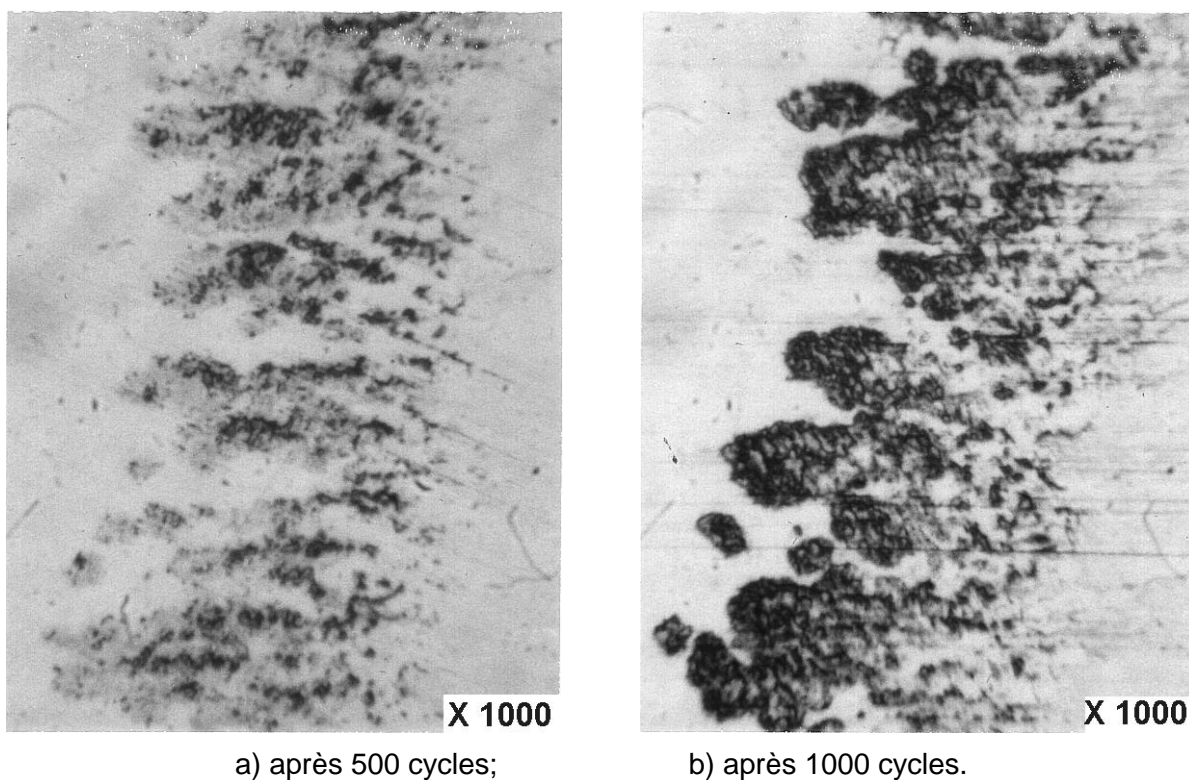
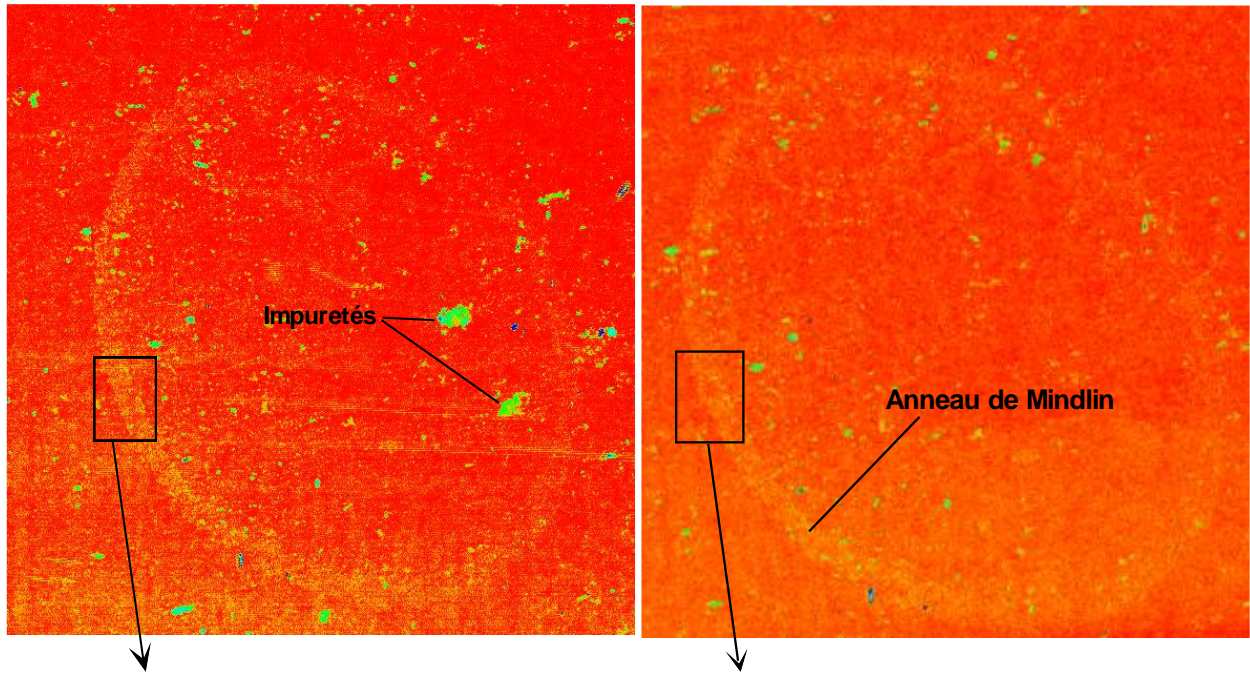


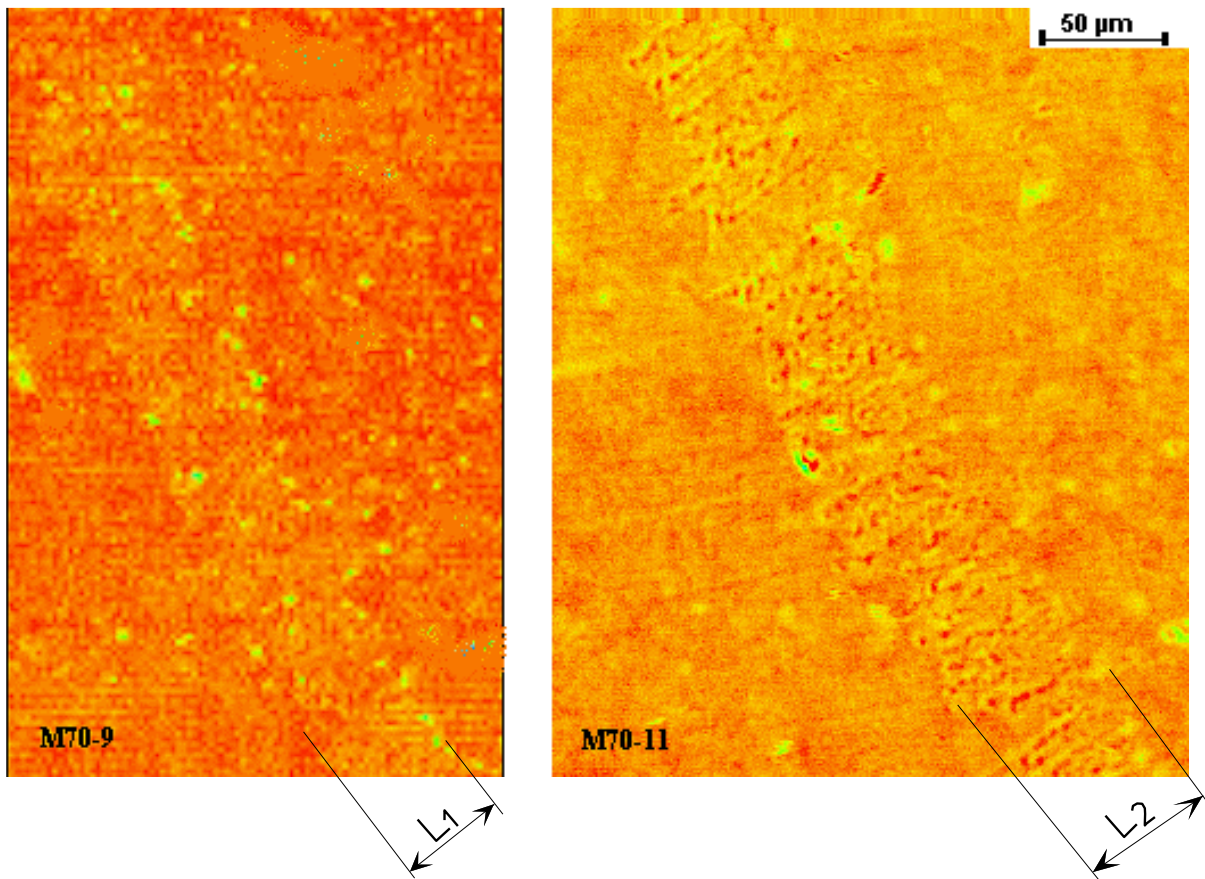
Fig. V-15 : Zooms physiques par rapport aux images ci-dessus.



a) après 500 cycles;

b) après 1000 cycles.

Fig. V-16 : Images acoustiques de l'éprouvette frottée, acquises à $-2 \mu\text{m}$, en $1000 \times 1000 \mu\text{m}$.



a) après 500 cycles;

($L1 < L2$)

b) après 1000 cycles.

Fig. V-17 : Zooms physiques par rapport aux images ci-dessus.

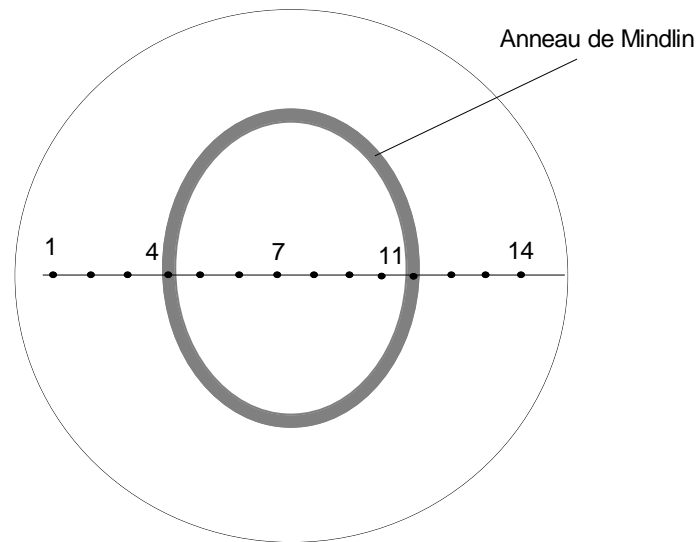


Fig. V-18 : Repère des zones de mesure des signatures acoustiques sur la surface frottée.

Repère	V_R [m/s]	E [GPa]
1	3012	212
2	2987	209
3	3024	213
4	3049	215
5	3085	219
6	3041	215
7	3073	218
8	3038	214
9	3028	213
10	3039	215
11	3040	215
12	3041	215
13	3042	215
14	3072	218

Tab. V-3 : Vitesses de Rayleigh et modules de Young selon les zones de mesures d'après la figure (V.18).

Les faibles variations des vitesses acoustiques mesurées sur différentes zones de la surface frottée dans nos conditions d'essai, peuvent être expliquées par :

- a) le fait qu'il n'y a pas eu de variations significatives des propriétés élastiques car l'accommodation de vitesse s'est effectuée dans les écrans ($S_{2,4}M_3$, $f < 0,15$);
- b) la résolution du MAB à 600 MHz est insuffisante en regard de la taille des phénomènes tribologiques obtenus dans nos conditions d'essais.

V.14 CONCLUSION

Nous avons franchi ici un premier pas dans l'utilisation combinée du simulateur de frottement et du microscope acoustique, en se heurtant à des problèmes d'adaptation, et d'optimisation des conditions de frottement et de mesures acoustiques. Nous rappelons que ce travail s'est déroulé au LAIN, avec un microscope qui n'était pas adapté au simulateur de frottement, et qu'il s'effectue à la frontière de deux disciplines qui ne sont pas encore complètement maîtrisées. C'est ce qui explique les nombreuses tentatives pour essayer de trouver des compromis entre objectifs tribologiques et impératifs de l'utilisation de la microscopie acoustique.

Sur le plan tribologique, les essais effectués en une passe avec des déplacements permettant l'élimination des écrans, ont conduit à la formation des TTS en sous-surface et à l'amont du contact. Les essais effectués en mouvement alternatif à petits débattements ont conduit à la formation de l'anneau de Mindlin, par accumulation des écrans qui proviennent du centre et qui migrent à l'extérieur. Ici, dans la gamme des sollicitations tribologiques, seuls les écrans contribuent à l'accommodation de vitesse (S_2M_3). C'est à dire que les surfaces des premiers corps n'est pas affectées. L'étude des écrans n'était pas prévue ici, mais leur présence représentait un aiguillage vers l'obtention des TTS.

L'imagerie acoustique a mis en évidence la présence d'écran sur l'anneau de Mindlin qui se forme après quelques dizaines de cycles. A priori, les écrans atténuent le signal acoustique. Contrairement à l'imagerie acoustique, le traitement des signatures acoustiques n'a pas donné de différences significatives entre les vitesses acoustiques mesurées sur différentes zones ayant participé ou non à l'accommodation de vitesses. Ceci peut s'expliquer par le fait que les conditions de frottement ont conduit à la formation d'écrans d'épaisseurs inférieures au micromètre, donc "partiellement" transparents aux ondes acoustiques à la fréquence de 600 MHz, où la longueur d'onde de Rayleigh est de 5 μm .

Nous proposons pour l'étude de ces écrans de surface, l'utilisation des fréquences acoustiques plus élevées, d'environ 2 GHz, afin d'atteindre une résolution inférieure au micromètre. Il en est de même pour les TTS, d'où le besoin d'avoir un jeu de lentilles fonctionnant à différentes fréquences, permettant d'obtenir différentes résolutions.

Faute de temps, les essais tribologiques ont été arrêtés à ce stade, et d'autres essais s'imposent avec d'autres conditions tribologiques, qu'un autre chercheur a déjà entrepris.

CHAPITRE VI

CARACTERISATION DU M.A.B. du LMC

VI.1 INTRODUCTION

Après la réception du microscope acoustique en juin 1994, soit plus de quatre ans après le début de ce travail, les premières mesures ont eu pour objectif d'en vérifier le fonctionnement et d'en contrôler la résolution en surface ainsi qu'en sous-surface, ainsi que la fidélité. Pour cela nous avons utilisé des éprouvettes possédant chacune des propriétés explicitement détectables à la fois par microcaractérisation acoustique et par d'autres moyens de caractérisation connus et validés.

Seuls sont présentés ici les résultats obtenus sur les cas tests suivants :

- 1 - éprouvette en verre;
- 2 - étalon de rugosité "rugo-test" en verre;
- 3 - composant électronique de puissance;
- 4 - composite fibre de carbone/verre;
- 5 - couche d'étain sur substrat en acier;
- 6 - éprouvette de frottement.

VI.2. EPROUVETTE EN VERRE

Par son homogénéité, son état de surface, et ses propriétés acoustiques tabulées, le verre constitue un bon moyen d'étalonnage des mesures acoustiques. Le traitement d'une dizaine de signatures acoustiques mesurées sur la surface du verre a donné une vitesse de Rayleigh moyenne de 3140 m/s, pour une valeur théorique tabulée de 3127 m/s. La dispersion des valeurs mesurées est inférieure à 0.1%, ce qui montre une très bonne précision.

VI.3 ETALON DE RUGOSITE "RUGO-TEST"

Afin de vérifier la résolution du MAB dans le plan focal et en profondeur, nous avons analysé un étalon de rugosité en verre. L'une des surfaces de cet étalon porte des stries de géométrie connue et contrôlée par rugosimétrie optique (fig. VI-1). Nous avons examiné l'extrémité de la zone contenant les rugosités contrôlées afin d'inclure en même temps la zone lisse.

Les images acoustiques sont acquises sur une surface de 600x600 μm , ce qui a permis de visualiser cinq stries à la fois, (fig. VI-2). La comparaison entre les images acoustiques acquises à différentes altitudes et les profils obtenus avec un rugosimètre optique, montre que les valeurs du pas des stries sont bien égales dans les deux cas. Ce qui montre une bonne précision du MAB dans le plan de balayage.

La surface est constituée ici d'un seul matériau, qui est le verre, la différence de couleurs peut provenir (Cf. III.6.3.4) soit de la différence d'altitude des rugosités, soit d'un effet de $V(z)$ sur leurs flancs. Sur les images acoustiques (fig. VI-3), le changement de couleurs (contraste) observé est fonction de la défocalisation, donc dû aux deux effets : altitude et $V(z)$. Nous devons isoler chacun de ces effets, afin de pouvoir interpréter ce contraste.

Lors du balayage de la surface avec la lentille acoustique selon le plan focal A, (fig. VI-2), la tache focale passe respectivement sur des saillies (position A1) et sur des creux (position A2). Le passage sur une saillie donne un signal fort (couleur rouge), alors que le passage sur un creux donne un signal faible (couleur verte). Lors du balayage selon un plan qui passe par les flancs des saillies, (position B2) on observe un effet $V(z)$ causé par la variation progressive d'altitude, ce qui se traduit par une variation des couleurs du rouge au vert et réciproquement. Le décalage ΔP du plan focal B est dû au changement des milieux (eau et verre), d'après les lois de Snell-Descartes, (Cf. III.2.2)

La défocalisation par incrément de $1 \mu\text{m}$ depuis la surface jusqu'au fond des stries, donne la même valeur de la profondeur des creux que celles mesurées par le rugosimètre optique, qui est d'environ $4 \mu\text{m}$. En fait, quand la tache focale est centrée sur les sommets des saillies, ces derniers sont codés par la couleur rouge sur les images acoustiques (fig. VI.3). A cette position de la tache focale, le fond des creux est codé par le vert. Quand la tache focale est centrée sur le fond des creux après le déplacement de $4 \mu\text{m}$ vers le bas, le fond de la strie est alors codé par le rouge (position C2). Ceci montre encore la bonne résolution spatiale du MAB qui, à la fréquence de travail de 600 MHz, est sensible au micromètre.

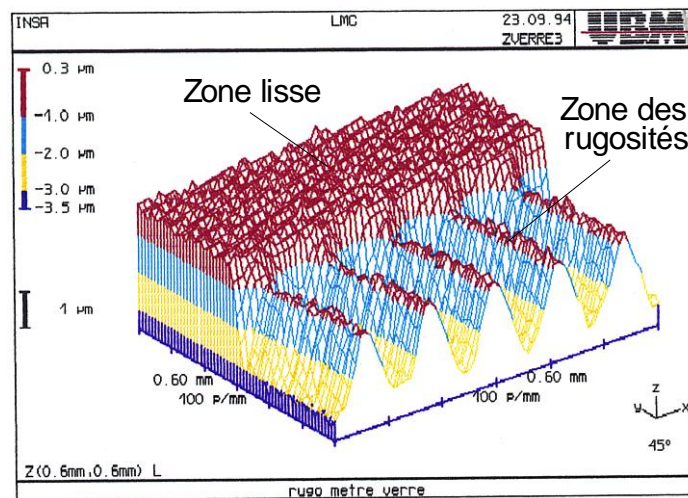


Fig. VI-1 : Image 3d de l'étalon de rugosité, obtenue par rugosimétrie optique.

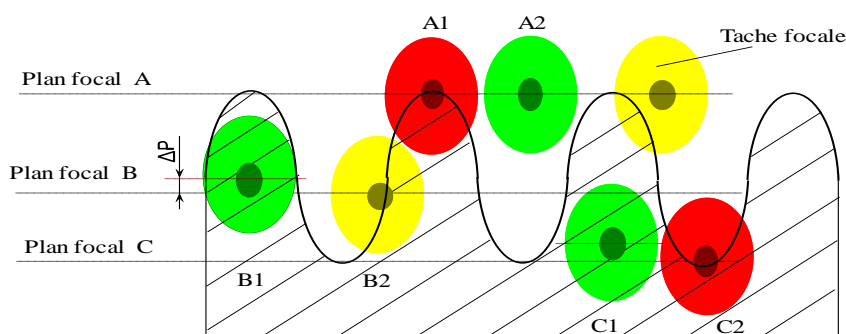
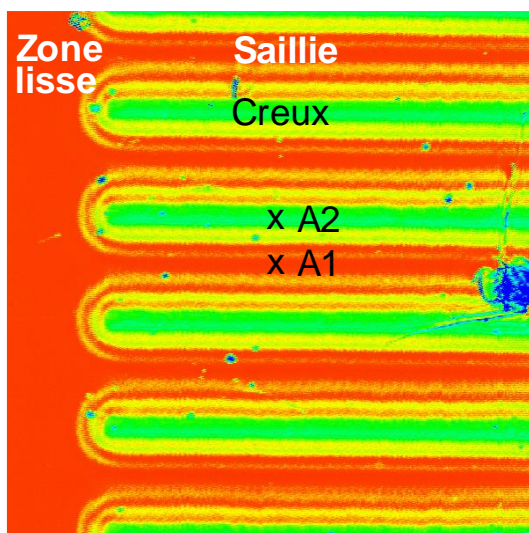
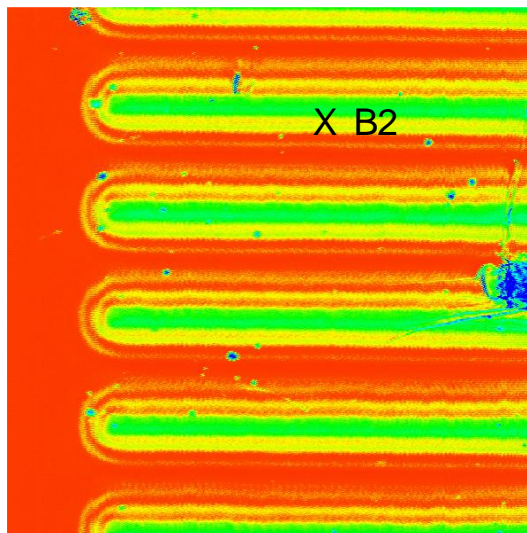


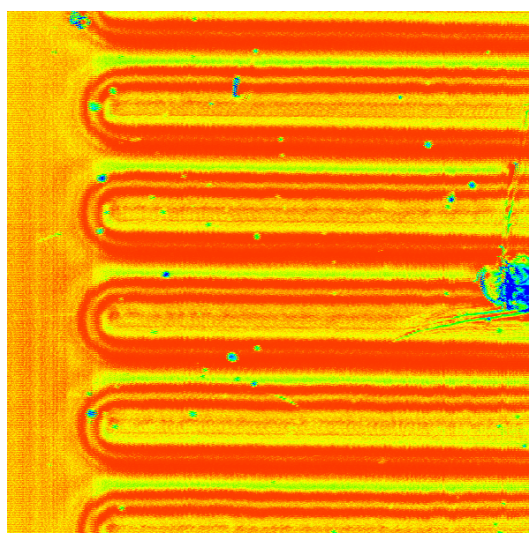
Fig. VI-2 : Positions de la tache focale selon le balayage dans un plan focal à différentes altitudes.



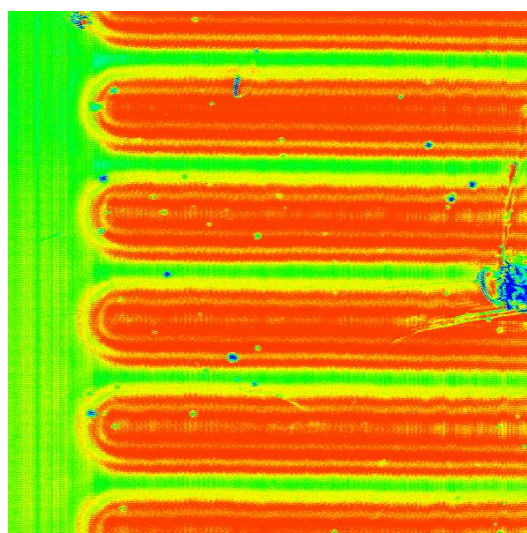
a) en surface;



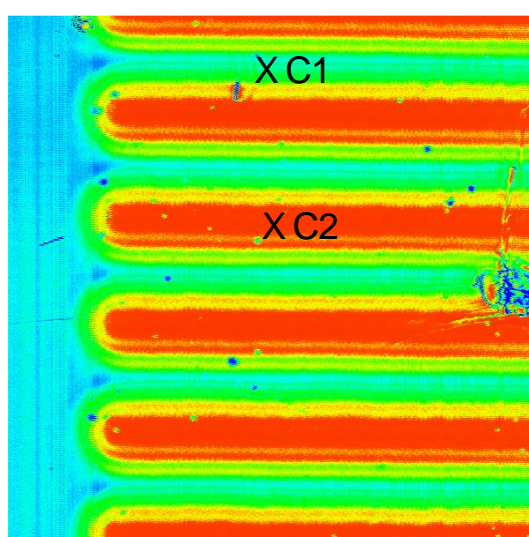
b) à -1 μm;



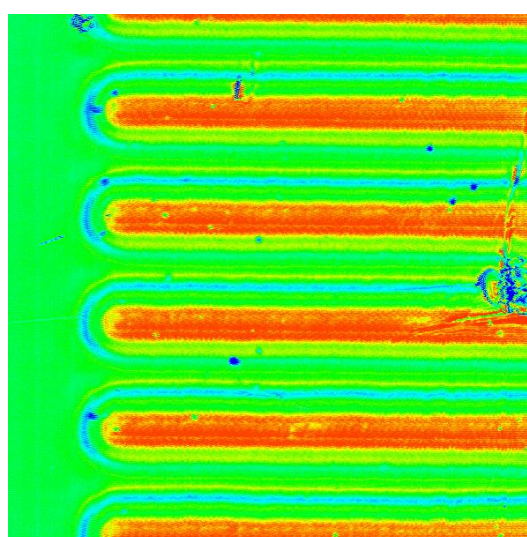
c) à -2 μm;



d) à -3 μm;



e) à -4μm;



f) à -5 μm.

Fig. VI-3 : Images acoustiques (600x600 μm) obtenues à différentes altitudes.

VI.4 COMPOSANT ELECTRONIQUE

Afin de dissocier les effets d'altitude de ceux dû aux matériaux, nous avons examiné un composant électronique de puissance (fig. VI-4) possédant trois paramètres très influents sur le signal acoustique, qui sont la présence de :

- 1- couches d'épaisseurs micrométriques;
- 2- matériaux différents, pour les différentes couches;
- 3- surfaces et interfaces à différentes altitudes.

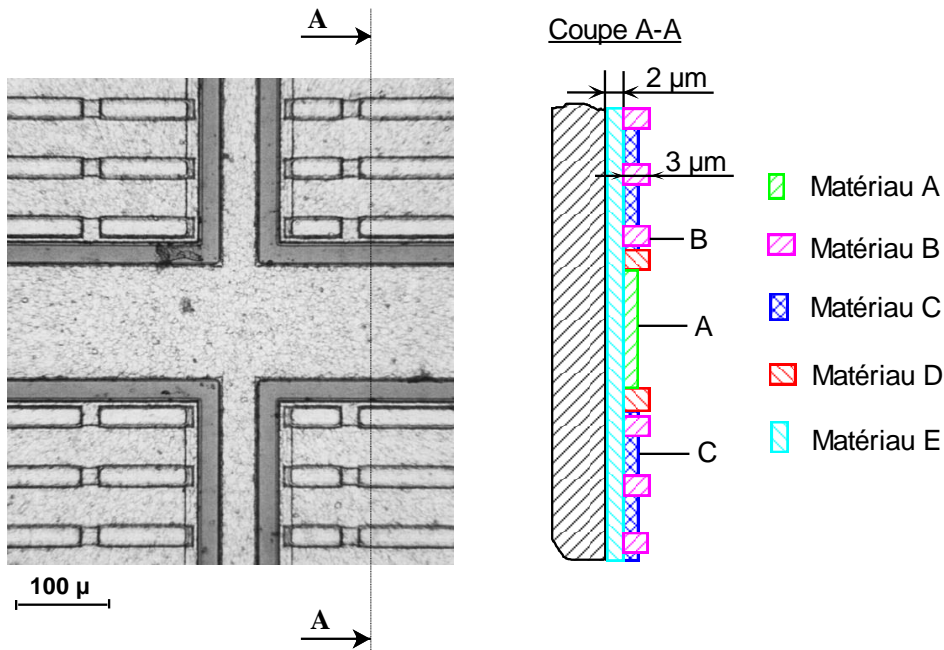
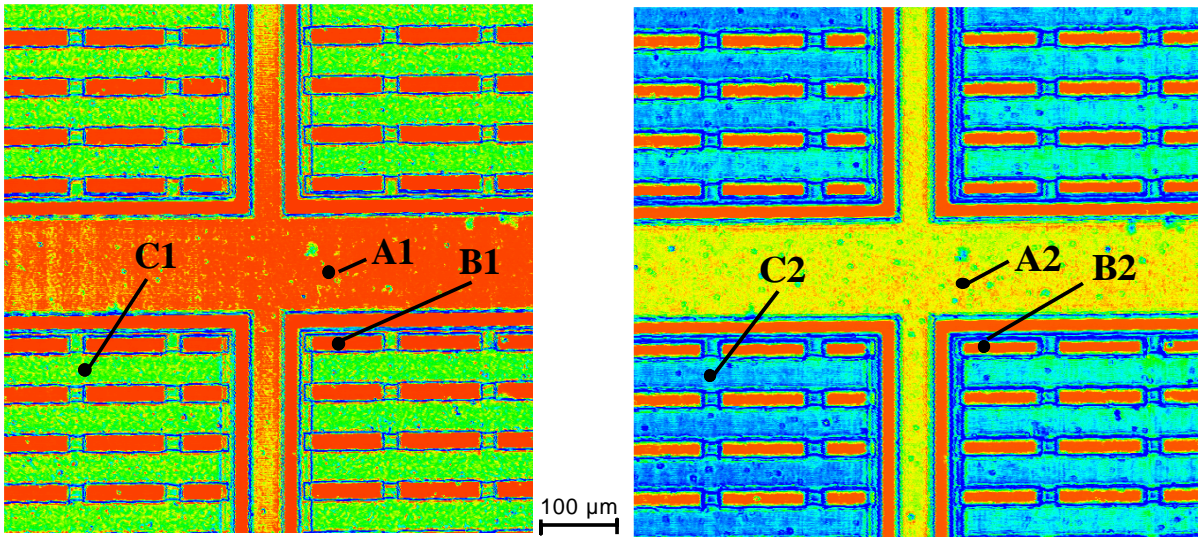


Fig. VI-4 : Image optique du composant électronique, vu de dessus avec le schéma de la coupe A-A, vue de gauche.

Les images acoustiques, (fig. VI-5), acquises à différentes défocalisations reproduisent les mêmes détails de surface que l'image optique (fig. VI-4) prise en surface, à une même échelle. Pour un même détail, les images acoustiques donnent, selon le codage, des couleurs qui sont fonction de l'altitude mais aussi des propriétés élastiques des matériaux.

Pour différents matériaux qui se situent à une même altitude (fig. VI-5, repère A1,2, C1,2) nous remarquons une nette différence de contraste, ce qui montre l'influence du paramètre matériau sur le signal acoustique; c'est à dire l'influence de ces propriétés élastiques. En revanche, selon la défocalisation, les couleurs changent d'une zone de mesure à une autre selon l'effet $V(z)$, incluant à la fois l'effet d'altitude et de différence de matériaux. Ce qui donne pour certaines défocalisations sur des zones qui diffèrent à la fois par l'altitude et le matériau (fig. VI-5a, repères A1 et B1), des couleurs voisines. Ceci s'explique par la coïncidence d'une "compensation mutuelle" du signal acquis, par les effets du matériau et d'altitude pour ces positions.

Là où il y a ambiguïté d'interprétation, ce sont les mesures de $V(z)$ qui permettent de séparer l'effet de l'altitude de celui du matériau. En effet, sur une courbe $V(z)$, (fig. VI-6), le maximum du signal correspond à la présence de la tache focale en surface de l'éprouvette. A cette position, en imagerie le codage donne une couleur qui tend vers le rouge.



a) $f = -2 \mu\text{m}$;

b) $f = -10 \mu\text{m}$;

Fig. VI-5 : Images acoustiques du composant électronique à différentes défocalisations.

Sur la figure (VI-6), les deux courbes $V(z)$ sont mesurées sur deux zones qui diffèrent à la fois par les matériaux et l'altitude, (fig. VI-5 zones A et B). La différence d'altitudes de $2 \mu\text{m}$, se remarque par le décalage selon l'abscisse, des deux premiers maxima des deux courbes $V(z)$, alors que la différence de matériau ne se détermine qu'après traitement des $V(z)$ par FFT.

Le rôle important de l'effet $V(z)$ sur l'obtention du contraste des images acoustiques, permet d'expliquer dans notre cas l'origine des différentes couleurs. Par exemple à la défocalisation $-2 \mu\text{m}$, l'intersection des deux courbes (fig. VI-6, repères A1, B1) donne en imagerie un codage de même couleur (fig. VI-5 A1, B1). Pour une autre défocalisation, par exemple à $-10 \mu\text{m}$, les valeurs des deux signaux $V(z)$, (fig. VI-6, repères A2, B2) sont très distincts et donnent donc en imagerie des couleurs différentes. En suivant ce raisonnement on peut expliquer alors les variations de couleurs entre différentes zones d'une image à une autre.

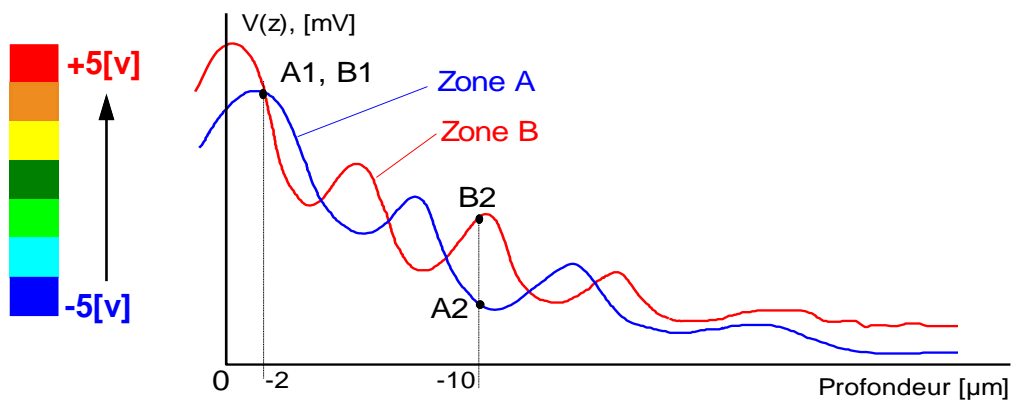


Fig. VI-6, Courbes $V(z)$ mesurées sur deux zones différentes (après lissage).

Avec la défocalisation, les interfaces des couches et du substrat devraient être mis en évidence en imagerie. Ici, nous n'avons pas pu confirmer leurs présences par simple analyse de couleurs des images acoustiques acquises à différentes défocalisations. Nous proposons d'utiliser

une lentille spéciale dont l'angle d'ouverture est inférieur à celui de Rayleigh, ce qui devrait favoriser la détection d'ondes longitudinale. Rappelons que les variations de propriétés élastiques en sous-surface sont détectées par les ondes longitudinales qui se propagent à l'intérieur du matériau.

VI.5 COMPOSITE FIBRE DE CARBONE / VERRE

Toujours pour caractériser la sous-surface en liaison avec d'autres moyens d'observation, nous avons utilisé une éprouvette contenant une fibre de carbone de 100 μm de diamètre noyée dans un substrat en verre (fig. VI-7). Pour que la distance entre la fibre et la surface du substrat en verre soit compatible avec la profondeur de mesure du MAB à 600 MHz, nous avons par polissage, rapproché la surface du verre à une trentaine de micromètres de la fibre. Du fait des contraintes résiduelles induites par la fabrication du composite, le verre s'est fissuré au-dessus de la fibre.

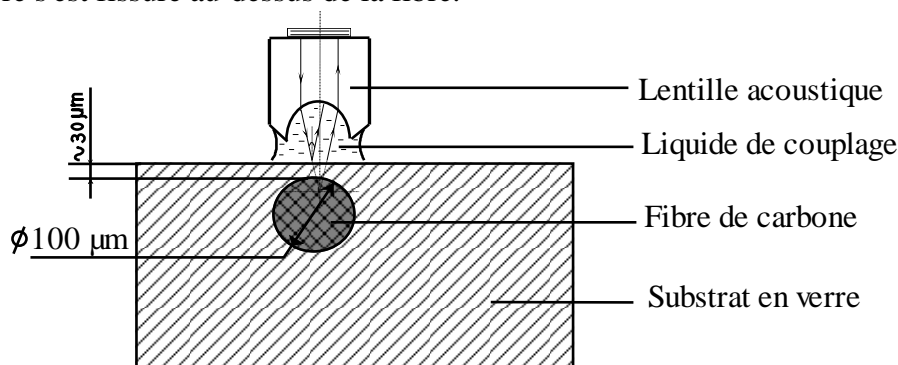


Fig. VI-7: Coupe transversale du composite verre/carbone.

Les images acoustiques acquises en surface (fig. VI-9) et surtout à - 10 μm de défocalisation, montrent les détails très proches de ceux de l'image optique (fig. VI-8) prise à même échelle. La dégradation de la surface du verre induite par les fissures a suffisamment perturbé le signal acoustique pour masquer la fibre de carbone recherchée par défocalisation jusqu'à -80 μm . L'atténuation causée par la dégradation de la surface se traduit sur les images acoustiques selon le codage retenu, par une couleur bleu qui correspond à une faible valeur du signal acoustique.

Par imagerie acoustique, nous avons détecté des fissures non débouchantes en surface, puisque non visibles optiquement, (fig. VI-8). Du fait de la diffraction, ces fissures ne sont pas détectables en défocalisant le microscope optique par rapport à la surface du verre. Ces fissures naissent en sous-surface autour de la fibre, et se propagent vers la surface. Les images acoustiques (fig. VI-9) acquises à des incréments de 5 μm de défocalisations, montrent que ces fissures deviennent plus visibles à - 30 μm , et donnent des franges [Brig].

Sur les mêmes images, nous remarquons des bulles d'air qui sont créées pendant la fabrication du composite, dont les dimensions latérales s'élargissent avec la défocalisation (fig. VI-9d). En fait, les bords circulaires des bulles qui sont coupées lors du polissage, créent des franges lors de la défocalisation.

Ceci montre bien l'utilité du MAB pour la détection des fissures ou autres dégradations en sous-surface.

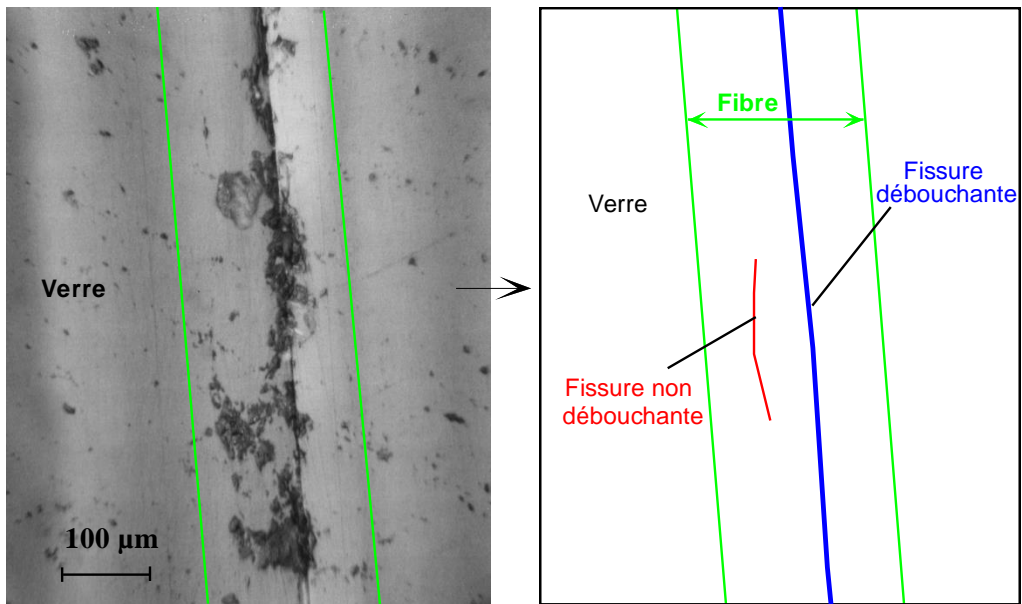


Fig. VI-8 : Image optique du composite verre/carbone après polissage.

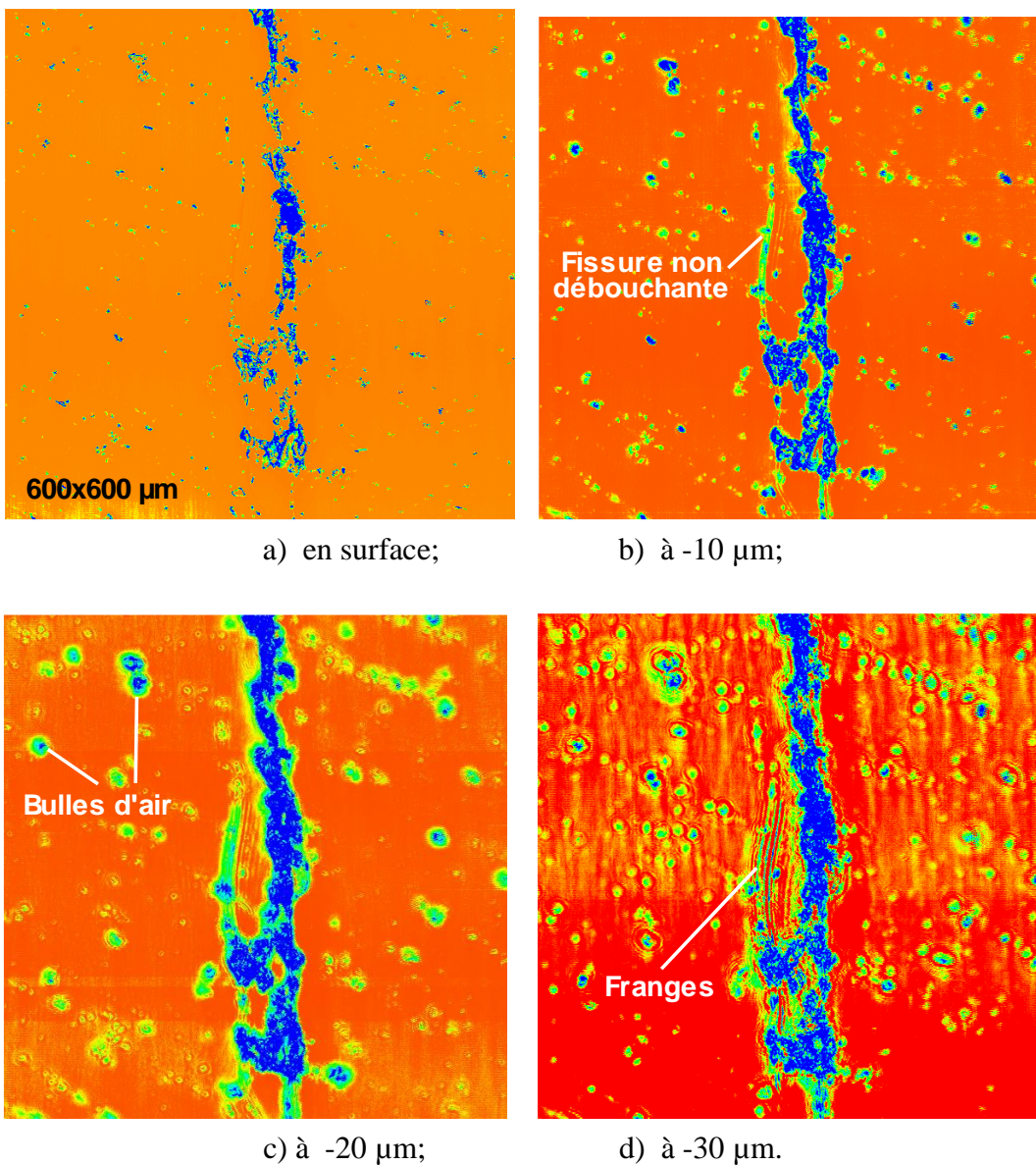


Fig. VI-9 : Images acoustiques du composite verre/carbone à différentes défocalisations.

VI.6 COUCHE D'ETAIN SUR SUBSTRAT EN ACIER

Dans la perspective de l'exploration de l'interface couche/substrat, nous avons déposé dans un four chauffé à 600 °C, une couche d'étain sur une surface polie en acier. Par polissage, nous avons réduit l'épaisseur de la couche d'étain à 4 µm. Sur l'un de ces bords, l'épaisseur de la couche diminue progressivement en formant un plan incliné (fig. VI-10).

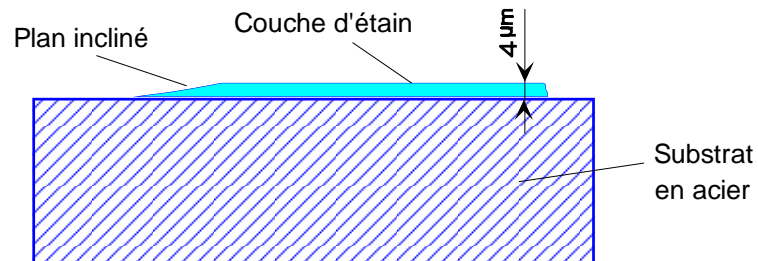


Fig. VI-10 : Coupe transversale du substrat et de la couche de l'étain.

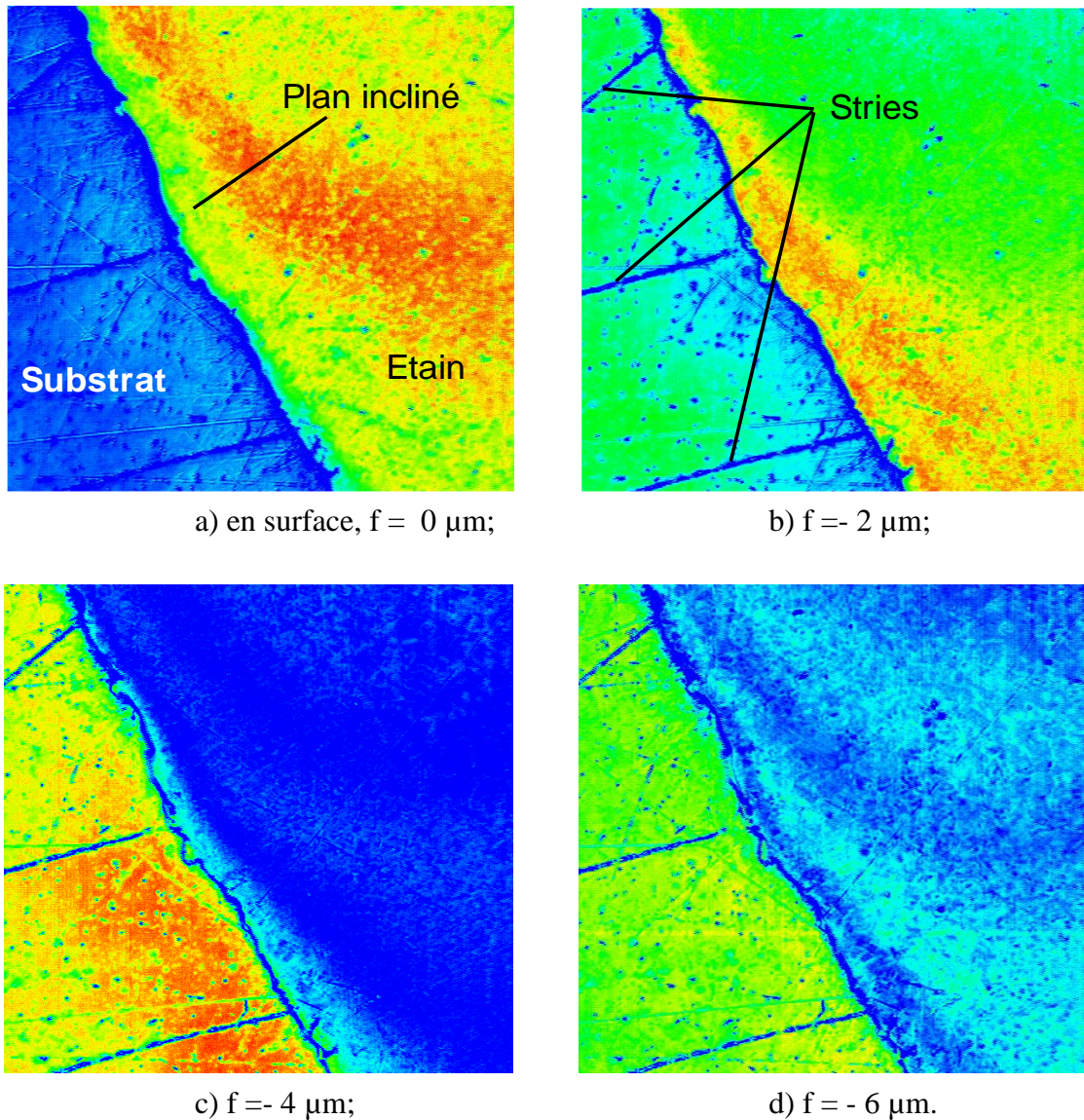


Fig. VI-11 : Images acoustiques (600x600 µm) obtenues à différentes altitudes.

La surface du substrat possède quelques stries obtenues lors du polissage réalisé avant le dépôt. La zone examinée est celle du plan incliné, ce qui permet de visualiser simultanément, le substrat avec quelques stries qui se prolongent sous la couche, et la surface de la couche.

Les images acoustiques (fig. VI-11) acquises à différentes défocalisations par incrément de 1 μm , montrent à la fois la surface de la couche et celle du substrat avec ses trois stries. Rappelons qu'ici, à la fréquence de 600 MHz, la dimension verticale de la tache focale est de 7 μm , ce qui permet d'inclure en même temps les deux surfaces lors des défocalisations de 0 à - 6 μm .

Nous rappelons que, selon le codage retenu, la surface sur laquelle est centrée la tache focale donne sur l'image acoustique une couleur qui tend vers le rouge. La figure (VI-11a) acquise en surface de la couche, montre celle ci en rouge, et la surface du substrat en bleu, alors qu'à la défocalisation de -4 μm (fig. VI-11c), nous obtenons l'inverse, ce qui montre que la différence d'altitude entre les deux surfaces est bien de 4 μm . Le bord de la couche qui est incliné, présente donc un effet $V(z)$ lors de la défocalisation, ce qui explique la progression de couleurs entre la surface de la couche et celle du substrat.

Nous avons là encore la confirmation que la résolution spatiale de notre MAB, est en accord avec la théorie, et avec les résultats des autres tests exposés précédemment.

En défocalisant jusqu'à -10 μm par incrément de 1 μm , nous n'avons pas pu déceler en dessous de la couche de l'étain, le prolongement des stries présentes à la surface du substrat. Ceci peut être dû à l'atténuation induite par la couche de l'étain qui est un matériau lent en terme de vitesses acoustiques. Nous avons essayé de diminuer l'épaisseur de la couche par polissage, malheureusement elle s'est complètement détachée. Une autre explication possible de la non détection de ces stries, repose sur le fait que les stries présentes à la surface du substrat sont codées par la couleur bleu, ce qui indique que ces zones atténuent le signal acoustique. Cette atténuation est accentuée par la couche d'étain, et empêche la détection des stries.

VI.7 EPROUVETTE DE FROTTEMENT

Notre objectif ici est de comparer des images acoustiques et des signatures acoustiques d'une même éprouvette frottée, obtenues avec le MAB du LAIN et celui du LMC.

Les images acoustiques obtenues avec le MAB du LMC, (fig. VI-13) sont semblables à celles obtenues avec le MAB du LAIN (fig. VI-12), tant en surface qu'en sous-surface. Dans les deux cas, l'anneau de Mindlin représentatif des conditions d'essais tribologiques, est bien visible à la périphérie de la zone de contact.

L'image obtenue avec le MAB du LMC présente plus "d'impuretés", car elle a été réalisée plusieurs semaines après celle obtenue au LAIN. Au cours de ces semaines, en plus des impuretés déposées en surface, des transformations physico-chimiques ont eu lieu.

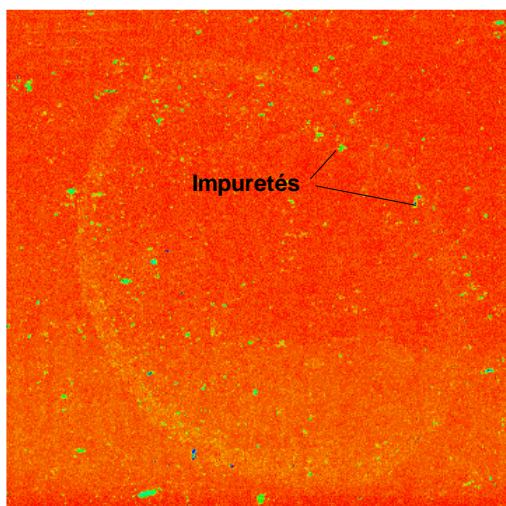


Fig. VI-12 : Image acoustique 750x750 μm obtenue avec le MAB du LAIN.

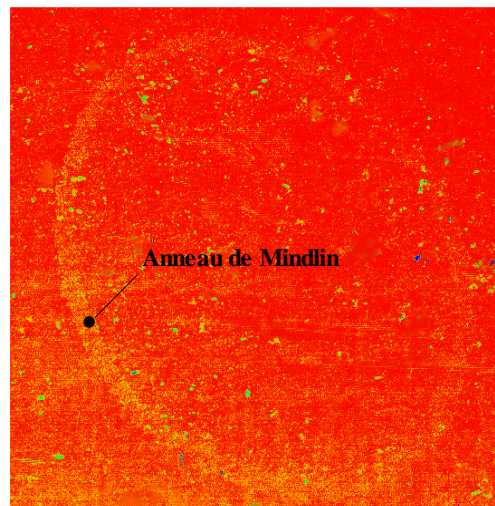


Fig. VI-13 : Image acoustique 700x700 μm obtenue avec le MAB du LMC.

Les courbes de $V(z)$, (fig. VI-14) obtenues avec le MAB du LAIN présentent un meilleur lissage que celles obtenues avec le MAB du LMC (fig. VI-15). Ceci est dû essentiellement à la différence des réponses des lentilles acoustiques, mais reste sans incidence sur le traitement par la méthode FFT.

Le traitement des signatures acoustiques $V(z)$ mesurées sur les mêmes éprouvettes en acier 35NCD16 au LMC et au LAIN, a donné en moyenne des valeurs de vitesses de Rayleigh respectivement 3021 m/s et 3025 m/s, soit des valeurs pratiquement identiques.

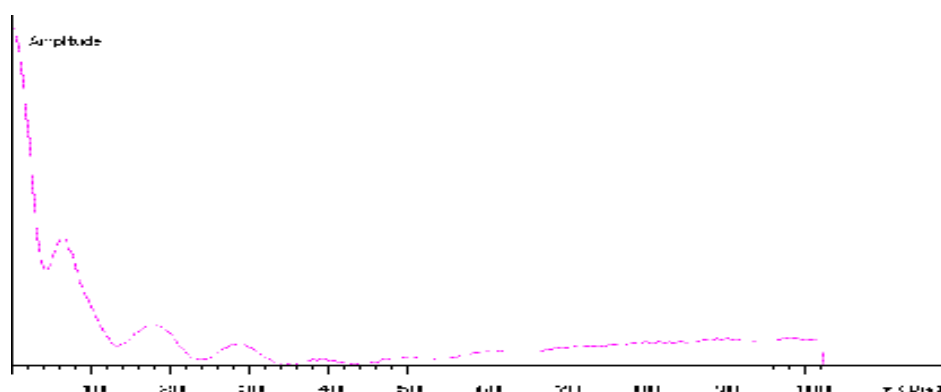


Fig. VI-14 : $V(z)$ mesurée avec le MAB du LAIN.

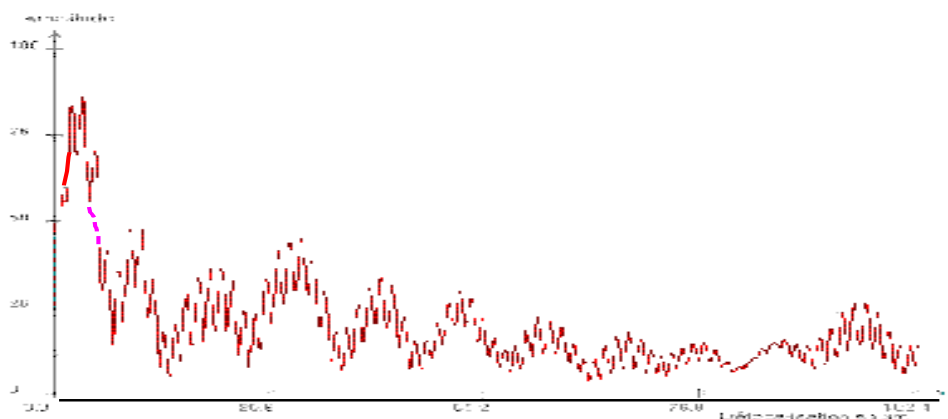


Fig. VI-15 : $V(z)$ mesurée avec le MAB du LMC.

VI.8 CONCLUSION

Après sa réception, le Microscope Acoustique à Balayage du LMC a été vérifié et validé à partir des différents tests que nous venons de citer. Ainsi les différents paramètres déterminants en $V(z)$ et en imagerie ont été contrôlés, à savoir :

1. la résolution en surface et en volume (spatiale), par comparaison avec d'autres moyens de mesure tel que le MEB, le microscope optique et le rugosimètre optique. Les images acoustiques présentent en général les mêmes détails des morphologies des surfaces que celles détectés par les autres moyens. Bien que théoriquement, la dimension de la tache focale à la fréquence de 600 MHz utilisée soit de 7 μm en vertical, des variations de 1 μm ont été bien ressenties sur les images acoustiques. Cela s'explique par le fait que l'énergie du signal acoustique se concentre au centre la tache focale;
2. la fidélité des mesures, par comparaison avec le MAB du LAIN, en imagerie et en $V(z)$ sur les mêmes éprouvettes, et par comparaison avec d'autres moyens de mesures, pour déterminer les valeurs des modules de Young, qui sont déterminés ici d'après les vitesses de Rayleigh;
3. la détection de certains défauts en sous-surface dans le cas du composite verre/fibre de carbone. Cette détection est soumise à des conditions (Cf. III.5.5) qui ne sont pas toujours satisfaites dans un cas industriel. L'interprétation des effets de la sous-surface ne peut être fiable par simple analyse du contraste des images acoustiques. En effet, en imagerie de sous-surface, l'effet $V(z)$ qui se produit sur une profondeur d'une longueur d'onde à partir de la surface, est toujours dominant.

L'ensemble des tests effectués ici montre un accord entre les résultats obtenus et la théorie de la microscopie acoustique, sans occulter certaines difficultés d'interprétation. D'autres essais sur des éprouvettes avec des défauts types "fabriqués sur mesure" sont en cours pour mieux maîtriser l'application de la MAB à la tribologie. Nous ne devons pas oublier que la finalité de la MAB au LMC est d'étudier la conception et la naissance des TTS.

CHAPITRE VII

DISCUSSION GENERALE

VII.1. INTRODUCTION

L'objectif de cette étude était de suivre au cours du frottement le processus de formation des Transformations Tribologiques Superficielles (TTS) qui sont l'une des deux réponses des premiers corps aux sollicitations tribologiques. Pour mieux situer l'approche tribologique retenue au LMC pour l'étude des troisièmes corps solides, nous avons effectué une étude bibliographique assez large. En regard de l'étude des TTS, nous avons retenu que la Microscopie Acoustique à Balayage pouvait être un plus remarquable dans la mesure où elle devrait permettre un suivi des TTS, tant qualitatif que quantitatif, en surface ainsi qu'en sous-surface sans destruction. Ce qui a passé par la conception et la réalisation d'un simulateur de frottement appelé TRIBOMAB, et d'un MAB. La discussion portera donc sur le déroulement de ce travail qui s'articule autour :

1. des concepts tribologiques;
2. de la théorie du MAB;
3. des moyens tribologiques et acoustiques;
4. de l'opérateur;
5. de la méthodologie des essais.

VII.2 LA TRIBOLOGIE

Nous avons vu que les études présentées dans la bibliographie se classaient en deux grands groupes selon les hypothèses faites par les auteurs et les conditions de contact. Les études du premier groupe s'intéressent aux interactions entre les aspérités au cours d'une seule passe, le mécanisme de détachement de particules activé est l'abrasion. Celles du second groupe étudient le frottement et l'usure pendant un état dit "stationnaire", après plusieurs passages, le mécanisme de détachement de particules actif est alors la "fatigue".

Les auteurs du premier groupe se sont focalisés sur l'effet de la géométrie de l'aspérité et de quelques paramètres du matériau. Les différents angles des aspérités (angles d'attaque), qui sont pris en compte, sont "choisis" de façon à être modélisables à partir des techniques retenues, qui sont le plus souvent la méthode des champs des lignes de glissement. En réalité, il est difficile de déterminer la géométrie des aspérités après le chargement du contact et le déplacement relatif des premiers corps. Dans le cas des surfaces de faibles rugosités, ce qui est le cas général industriellement, les angles d'attaques ne sont plus significatifs. D'un autre côté le nombre de paramètres pris en compte à chaque fois est en moyenne de trois à dix, alors que l'ensemble des paramètres considérés par l'ensemble des chercheurs dépasse cent. Les modèles proposés pour la prédiction du frottement et de l'usure souffrent d'un manque de généralisation et de fondement physique réel.

Les auteurs du deuxième groupe, s'intéressent plutôt à l'effet du nombre de cycle pendant le frottement stationnaire, le mécanisme dominant ici est la fatigue et/ou les effets cumulatifs. Bien que cela soit plus proche de la réalité, les auteurs abordent le problème de frottement et de détachement de particules différemment selon leurs spécialités et leurs moyens d'investigation. Les approches sont alors mono-disciplinaires, ce qui est contraire au caractère pluridisciplinaire de la tribologie.

Partant de là, le LMC, avec certains laboratoires partenaires, a développé une analyse phénoménologique. dans la droite ligne du concept du troisième corps, et pour converger vers une modélisation objective, cette analyse a nécessité la mise au point de concept phénoménologique structurant qui sont : le triplet tribologique, les mécanismes d'accommodation de vitesse et le circuit tribologique. Ces concepts permettent d'étudier le contact aux trois étapes de la vie du 3ème corps : conception, naissance et vie propre.

Dans ce contexte, ce travail porte sur l'étude des possibilités du suivi de la conception et de la naissance des TTS par MAB. Sur le plan tribologique, cela nous a demandé en préliminance de contrôler l'influence des écrans ($S_{2,4}$) qui déterminent les réponses des premiers corps aux sollicitations tribologiques : fissuration ou TTS. Nous nous sommes limités à ce contrôle, car une étude spécifique des écrans se déroule en parallèle de ce travail [Noll].

VII.3. LA MICROSCOPIE ACOUSTIQUE A BALAYAGE

La physique des ultrasons, contrairement au frottement "dit sec", dispose de modèles mathématiques décrivant les principaux modes de propagations des ondes ultrasonores, les interférences entre ces différents modes, etc., ce qui pour nous représentait une garantie. L'avantage incontesté de l'utilisation des ultrasons est leur faculté de se propager à l'intérieur des matériaux solides, et de donner ainsi des informations quantifiées sur l'état élastique du matériau étudié. L'étude sans destruction des surfaces, sous-surfaces et des volumes est devenue possible en utilisant la microscopie acoustique à des résolutions de l'ordre du micro mètre. L'application de la MAB en tribologie, pose quelques problèmes, parmi lesquels nous citons :

1. les conditions d'utilisation actuelle de la MAB, à savoir :
 - le matériau : doit être élastique, avec un minimum de discontinuités;
 - la géométrie de l'éprouvette, dont la surface doit être plane et de très faibles rugosités;
 - la température optimale doit être comprise entre 23 et 25 °C;
 - la présence du liquide de couplage sur la surface à analyser, qui affecte la réponse des écrans de surface, qui eux même affectent le frottement;
2. les interférences entre différents types d'ondes, compliquent les analyses des signaux acquis riches en informations. Le problème se pose surtout en imagerie où l'interprétation exige des connaissances poussées en physique des ultrasons, ce qui freine son utilisation par les non spécialistes. En effet les physiciens travaillent sur la modélisation et la simulation des phénomènes acoustiques se produisant en surface et en sous-surface, afin d'isoler chaque mode de propagation et par la même permettre d'extraire chaque information que contient le signal acoustique;
3. les signatures acoustiques $V(z)$, sur le plan pratique, ne contiennent parfois qu'une ou deux ondulations, ce qui rend leur traitement par la méthode FFT non significatif. Ceci est souvent le cas des zones dégradées d'une éprouvette de frottement, ce qui exige l'adaptation des techniques de traitement du signal acoustique aux effets du frottement;

4. le travail avec plusieurs fréquences d'ultrasons pour affiner les analyses selon le matériau, et la taille du phénomène étudié, exige l'utilisation de lentilles acoustiques spécifiques pour chaque gamme de fréquences, ce qui augmente le coût de l'investissement.

VII.4 LES MOYENS EXPERIMENTAUX

Dans le cadre de ce travail, nous avons conçu un simulateur de frottement, de rigidité et de résolution suffisantes à l'époque pour satisfaire notre objectif tribologique, et qui soit capable d'intégrer un MAB, qui a été développé par le LAIN de Montpellier pour satisfaire cet objectif. Les retards cumulés dans les délais de réalisation des deux équipements nous ont imposé une "chronologie" de réalisation des essais, tant tribologiques que "tribo-acoustiques" pas forcément idéale.

Notre MAB peut fonctionner jusqu'à une fréquence de 1 GHz en train d'onde continue, et est capable de travailler en imagerie (X, Y) et en $V(z)$. Vu le budget engagé pour l'ensemble des équipements, nous ne pouvions acquérir à l'époque qu'une seule lentille acoustique. Nous avons alors été obligés de choisir une fréquence de travail qui soit adapté au type de matériau utilisé dans notre cas l'acier 35NCD16, et la moyenne des "tailles estimées" des phénomènes étudiés. Après plusieurs essais avec plusieurs lentilles acoustiques, donc plusieurs fréquences, la fréquence optimale retenue a été de 600 MHz. Elle permet l'acquisition des images acoustiques avec une résolution latérale de 2 μm , et des signatures acoustiques dans des zones de moins de 15 μm de rayon en surface. La disponibilité d'une seule lentille, a limité la taille des phénomènes étudiés, ce qui nous a pénalisé tant sur le plan des choix des conditions tribologiques, que sur le plan des analyses acoustiques.

L'adaptation du microscope acoustique au simulateur de frottement "TRIBOMAB" a posé quelques problèmes qui ont été maîtrisés en partie au fur et à mesure de ce travail, citons :

1. le réglage d'assiette;
2. le porte à faux de la lentille;
3. l'influence du liquide de couplage;
4. le repositionnement de la lentille après les alternances de frottement et de mesures acoustiques.

Le MAB nous a été fourni avec un logiciel qui permet le pilotage des moteurs de déplacement du simulateur et la gestion du microscope acoustique. Il permet le calcul des vitesses acoustiques après traitement de la courbe $V(z)$ par la méthode FFT. Sur le spectre d'une signature acoustique $V(z)$ les maxima correspondent à des modes de propagation détectés (Longitudinal, transversal, Rayleigh, Lamb etc.). Les vitesses sont calculées pour chaque mode sélectionné. La détermination des modes est basée sur une bonne connaissance des divers modes, de la méthode de traitement du signal par FFT, et en bonne partie sur un savoir faire que nous avons essayé d'acquérir auprès du LAIN.

Depuis 1991, date du début de cette thèse, à l'instant de rédaction de ce rapport, la théorie de la MAB a connu des développements importants, surtout en matière d'analyse des signatures acoustiques. Utiliser ces développements, exige l'acquisition de nouveaux outils matériels et logiciels, qui sont principalement développés au LAIN. Faute de moyens financiers, nous n'avons utilisé que les éléments du MAB livrés initialement.

VII.5 L'OPERATEUR

L'utilisation de la *microscopie acoustique* en *tribologie* nécessite des connaissances dans les deux disciplines. Du côté de la MAB, il y a deux niveaux de connaissances :

- a) la maîtrise du matériel, qui est à la portée de tous;
- b) l'interprétation des résultats, qui nécessite une bonne connaissance de la physique des ultrasons. Plus encore, cela nécessite de l'expérience en matière d'exploitations des mesures acoustiques en fonction de la fréquence des ondes acoustiques, de la défocalisation, du matériau, des discontinuités élastiques en générale (géométrie, état de surface, porosité, fissures etc.). Ces connaissances représentent pour un tribologue une nouvelle spécialisation. L'exploitation optimale des résultats du MAB par des non spécialistes, nécessite souvent le recours à des spécialistes pour affiner l'interprétation de ces résultats.

VII.6 METHODOLOGIE DES ESSAIS

Le microscope acoustique comme outils d'analyse, peut être utilisé pour différentes applications, dans notre cas, en tribologie notre objectif nous limite le choix des conditions de frottement qui satisfassent en même temps les exigences acoustiques, à savoir :

1. les conditions de contact qui ne doivent pas trop dégrader les surfaces. C'est à dire optimiser les sollicitations tribologiques qui doivent créer des modifications des propriétés du matériau, compatibles avec les possibilités du MAB, ce qui suppose le contrôle des effets tribologiques;
2. le suivi de la dynamique des phénomènes étudiés, ne peut se faire réellement in-situ, mais par alternance de frottement et analyses acoustiques. Ceci exige une très bonne précision du système de positionnement des portes éprouvettes qui sont démontés après chaque cycle de frottement;
3. le repérage de la zone de frottement après déplacement du porte-éprouvette inférieur exige un marquage au centre de la surface de l'éprouvette inférieure;
4. le frottement étant "à sec", l'utilisation du liquide de couplage entre chaque alternance de frottement et d'analyse acoustique, exige un "séchage" de la surface qui ne modifie pas les écrans ainsi formés, afin d'assurer une bonne reproductibilité.

Les essais tribologiques préliminaires nous ont permis de trouver des conditions de frottement optimales pour satisfaire les exigences "Tribo-Acoustiques", et par la même assurer une bonne reproductibilité. La chronologie des essais tribologiques montre que nous sommes passé par plusieurs étapes de recherche de ces conditions optimales, qui satisfassent simultanément les objectifs tribologiques et les exigences acoustiques.

Le traitement des signatures acoustiques effectuées à la fréquence de 600 MHz sur les éprouvettes frottées, mais non dégradées, n'a pas montré des variations significatives des vitesses acoustiques.

Nous avons pensé que si nous augmentions la pression du contact afin de créer des empreintes ayant des déformations plastiques graduelles, nous pouvions alors détecter explicitement des variations des vitesses acoustiques le long de l'empreinte.

En fait, nous étions inspirés par les empreintes créées pour le repérage des zones de contact (Cf. V.6, fig. V-7), qui étaient bien contrastées sur les images acoustiques.

L'image acoustique acquise sur l'empreinte obtenue par frottement à petits débattements (fig. VII-1), montre une progression de couleurs vers l'orange dans le sens de l'accroissement de l'enfoncement donc de la déformation plastique.

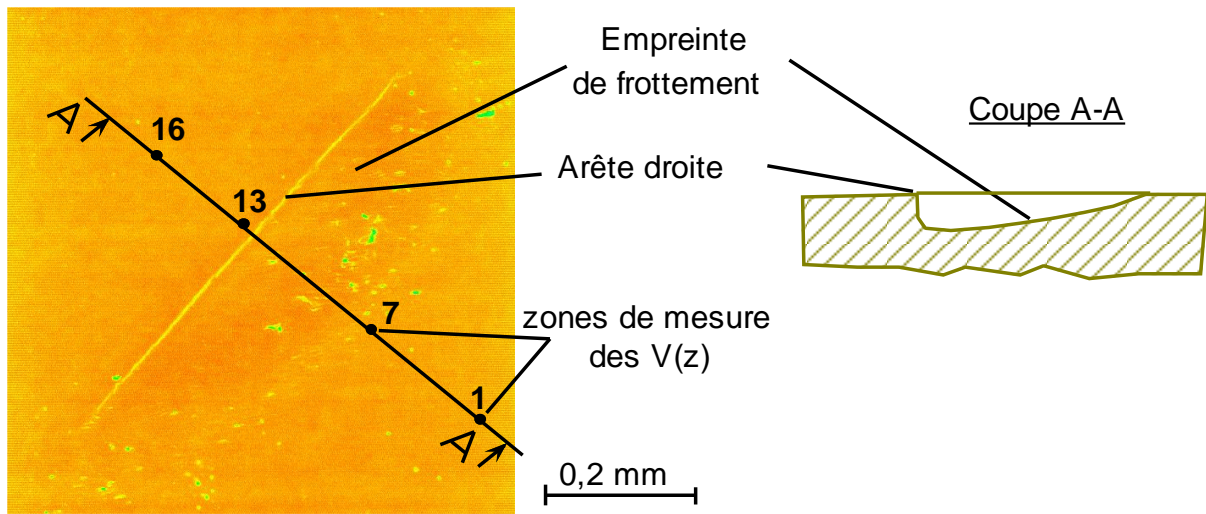


Fig. VII-1 : Image acoustique et coupe de l'empreinte de frottement.

En parallèle, le LAIN travaillait sur l'exploitation des amplitudes des courbes de $V(z)$ acquises avec les mêmes paramètres et réglages électroniques. En effet la courbe enveloppe des maxima d'une courbe $V(z)$, (fig. VII-2) peut contenir des informations en plus des vitesses des ondes acoustiques qui sont déterminées par traitement FFT des courbes $V(z)$.

Le traitement des maxima de $V(z)$ par un programme développé récemment au LAIN, permet de déterminer des "*coefficients d'atténuation*", qui donnent des informations sur les propriétés élastiques du matériau. Par conséquent, nous avons envoyé au LAIN, les données des $V(z)$ acquises avec les mêmes réglages électroniques, le long d'une droite qui traverse l'empreinte selon les zones indiquées sur la figure VII-3. L'objectif était de trouver d'éventuelles corrélations entre les "*coefficients d'atténuation*", et les réponses des premiers corps aux sollicitations tribologiques.

Bien que l'empreinte de frottement obtenue soit légèrement inclinée par rapport à la surface, l'effet de l'altitude n'intervient pas ici sur les signatures acoustiques, puisqu'elles se produisent à partir de la surface. En revanche, l'inclinaison, si elle est courbée, peut avoir un effet secondaire sur les amplitudes des courbes $V(z)$. Ici, vu la taille de l'empreinte, ceci ne devrait pas intervenir de façon significative.

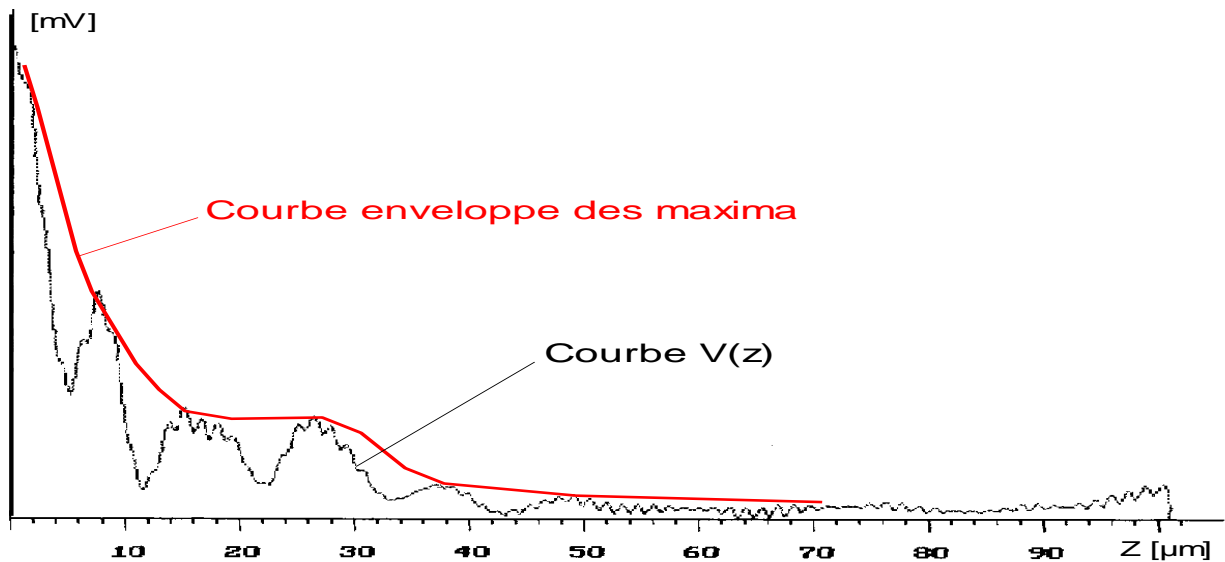
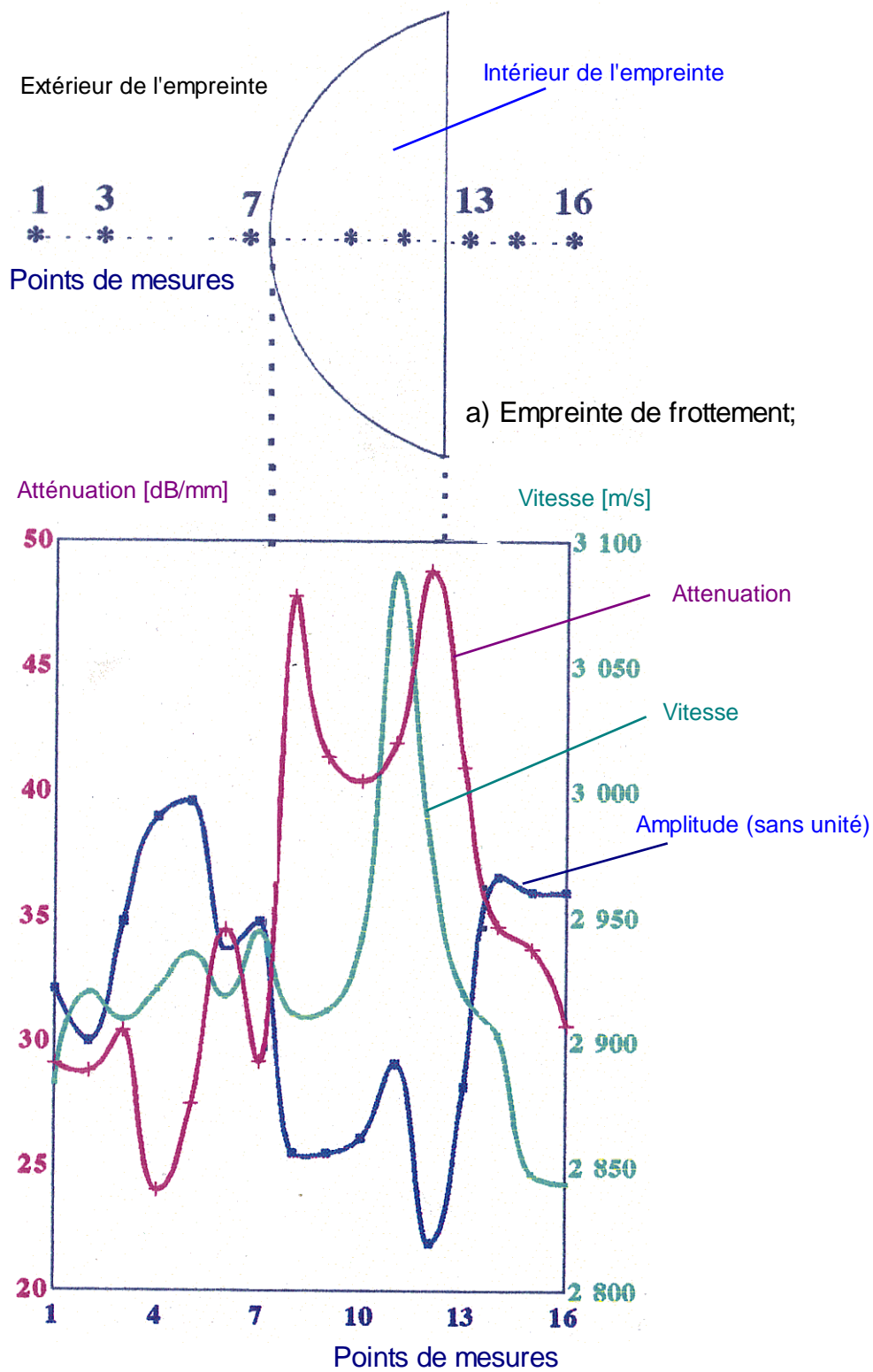


Fig. VII-2 : Courbe enveloppe des maxima d'une courbe $V(z)$.

La figure (VII-3) présente les résultats des traitements de ces courbes $V(z)$, par FFT et par le programme d'exploitation des amplitudes. Nous remarquons que les vitesses acoustiques ont des valeurs voisines à l'extérieur de l'empreinte de frottement, mais à l'intérieur, ces valeurs croient de la périphérie circulaire (repère 7) vers l'arête rectiligne (repère 13) où l'enfoncement est plus important. Les valeurs des vitesses augmentent donc avec l'enfoncement qui correspond en fait à des déformations plastiques plus importantes. Les valeurs des atténuations quant à elles augmentent vers les bords de l'empreinte et diminuent au centre. Ceci montre que les coefficients d'atténuation trouvés, correspondent à des gradients de déformations, que l'on sait liés à la formation des TTS. Ce dernier résultat ouvre la voie vers de nouvelles corrélations entre réponses tribologiques des 1ers corps et traitement des signatures acoustiques. Pour avancer dans cette voie, il resterait à établir les relations entre cette réponse tribologique et les paramètres mesurables acoustiquement.

A notre avis, ceci illustre la difficulté de fond de l'utilisation de la microscopie acoustique à balayage en tribologie. En effet, la tribologie compte sur la MAB pour caractériser les paramètres représentatifs de la formation des TTS, alors que la MAB nécessite la connaissance de paramètres pour caler ses modélisations.



b) Courbes des vitesses et atténuations acoustiques.

Fig. VII-3 : Correspondance entre l'empreinte de frottement et les courbes des vitesses, des amplitudes, et des atténuations acoustiques.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un nouvel axe de recherche du Laboratoire de Mécanique des Contacts, qui est l'étude de la conception et de la naissance des Transformations Tribologiques Superficielles (TTS) par Microscopie Acoustique à Balayage (MAB). La MAB a été retenue car c'est une méthode non destructive qui permet :

1. d'obtenir des images de surface, et de sous-surface, ce qui devenait pour la peau des 1ers corps, le pendant des visualisations des écoulements de 3ème corps réalisées en surface;
2. de déterminer les valeurs locales de module d'Young sans intermédiaires mécaniques, et avec une précision raisonnable, permettant le suivi de très faibles variations de ces modules, telles que celles induites par un "écrouissage", donc par les TTS;
3. de déterminer le module d'Young et le coefficient de Poisson des revêtements. Si ces mesures ne concernaient pas directement ce travail, elles étaient nécessaires pour nourrir la modélisation des massifs revêtus lancée au laboratoire.

Dans ce contexte, notre objectif a donc été de mettre au point une méthodologie permettant de suivre la conception et la naissance des TTS. Ce travail comporte un volet tribologique et un volet acoustique. Il a débuté seulement quelques années après que la notion de TTS ait été introduite en tribologie. Par conséquent il a débuté par une étude bibliographique "classique" des mécanismes de détachement de particules. Cette étude a montré que les travaux reposent pour la plus part sur des hypothèses très restreintes, et souffrent de l'absence d'un formalisme fiable et général pouvant décrire l'évolution du frottement ou prédire la durée de vie d'un contact. En effet, les résultats sont fonctions des outils d'investigation choisis ou disponibles et de la culture des chercheurs. Lorsque les modélisations s'ajustent sur une réalité, elles remplissent leurs fonctions puisque modéliser n'est pas décrire. En revanche, lorsqu'elles sont utilisées pour interpréter directement la réalité, il nous semble qu'elles outrepassent leurs hypothèses.

Nous avons alors adopté l'approche développée au LMC et par quelques laboratoires partenaires, qui permet d'aborder un problème de frottement et d'usure de manière structurée et objective. Cette approche, dans un premier temps, essentiellement phénoménologique a nécessité le développement, au LMC, d'outils d'investigations et de concepts structurants. Il s'agit de la notion de troisième corps, puis de triplet tribologique, de mécanismes d'accommodations de vitesse, de circuit tribologique... Ces dernières notions introduites en parallèle de ce travail, se sont affinées au cours du temps, ce qui explique qu'elles seraient, ni présentées et ni utilisées de la même façon aujourd'hui...

L'étude bibliographique sur la partie acoustique s'est restreinte à la compréhension des phénomènes conduisant à l'imagerie et la signature acoustique qui sont les deux principales fonctions utilisées pour l'étude des TTS. Il s'agit d'une étude bibliographique d'utilisateur plutôt qu'une bibliographie de spécialiste. Nous n'avons pas poussé plus loin, car la MAB étant une discipline en cours de développement, nous avons préféré collaborer avec des spécialistes.

Par ailleurs, au début de ce travail, nous n'avons pas trouvé d'études tribologiques utilisant la MAB, nous avons donc tout à apprendre. Pour éviter une confusion à laquelle nous avons souvent été confrontés, nous avons dû faire état de la mesure des émissions acoustiques qui sont utilisées en tribologie depuis beaucoup plus longtemps que la MAB. Elles donnent des signaux très riches en informations mais dont l'exploitation n'est pas encore totalement maîtrisée.

Pour coupler physiquement, la tribologie et la MAB, nous avons mis au point un simulateur de frottement capable d'intégrer le MAB conçu pour notre application. Après la réalisation du simulateur, les premiers essais ont été effectués pour cadrer les paramètres tribologiques permettant l'obtention de TTS de manière reproductible et leur analyse par MAB. Ce cadrage a essentiellement porté sur le rôle des écrans ($S_{2,4}$) qui gouvernent l'aiguillage de la réponse des premiers corps aux sollicitations tribologiques. Cette réponse des premiers corps a été étudiée par analogie avec notre structuration de la bibliographie : en une passe et en plusieurs cycles en mouvement alternatif. Cette réponse est insignifiante lorsque l'accommodation se limite aux écrans ($S_{2,4}$). Après l'élimination des écrans, les premiers corps répondent soit par TTS ($S_{1,5}M_3$) ou fissuration ($S_{1,5}M_2$). Par conséquent nous avons défini les conditions d'essais activant la réponse TTS.

Pour cela, sur le plan tribologique nous avons dû reconstruire le scénario de la formation des TTS. Ce scénario, présenté chronologiquement dans le texte, et présenté ici en fonction de la contribution de chaque site d'accommodation de vitesse :

S_0 : le mécanisme, ici le simulateur;

$S_{1,5}$: les premiers corps, ici les deux éprouvettes;

$S_{2,4}$: les écrans;

S_3 : le troisième corps, ici les particules détachées.

S_0 :

le simulateur accommode par déformation élastique une partie du déplacement tangentiel imposé, ce qui nous a imposé une méthodologie de choix de l'amplitude de déplacement. La faible raideur normale du simulateur utilisé, favorise l'augmentation de la séparation des premiers corps ce qui favorise la naissance des TTS;

$S_{1,5}$:

la réponse de ces sites par fissuration étant écartée, nous avons validé la notion de TTS en vérifiant par rapport aux travaux antérieurs que nous retrouvions bien des zones qui :

1. s'étendent sur une profondeur d'une cinquantaine de micromètres en sous-surface;
2. possèdent une structure différente de celle d'origine, à faible dimension de grains;
3. présentent une dureté croissante vers la surface.

De plus nous avons mis en évidence que dans nos conditions d'essais, et principalement en raison de la faible rigidité normale du simulateur, les TTS sont conçues à partir d'un écoulement plastique $S_{1,5} M_3$ qui localise le contact. Ensuite elles se propagent en sous-surface vers l'avant du contact local.

S_{2,4} :

l'étude des écrans n'entraîne pas dans notre objectif. Cependant, leur présence déterminante dans la reproductibilité des essais, nous a contraint de cerner au mieux leur rôle d'aiguillage. C'est d'ailleurs à partir de là qu'une thèse a été lancée pour les étudier spécifiquement;

S₃ :

le site S₃, se crée par détachement de particules lors de l'accommodation de vitesse S_{1,5}M₃. Les particules ainsi détachées sous forme de feuillets participent alors à l'accommodation de vitesse S₃M₃.

Sur le plan Tribologie - MAB, ce couplage étant à notre connaissance une première, a été précédé de la validation de la méthode par comparaison des résultats avec ceux d'autres méthodes de caractérisation des TTS connues et validées en tribologie. L'utilisation de la MAB en tribologie a posé quelques problèmes techniques ayant pour origine la physique même de la propagation des ultrasons:

1. le liquide de couplage qui permet la propagation des ultrasons entre la lentille et l'éprouvette; modifie les écrans, donc la reproductibilité de la réponse des sites S_{1,5} ;
2. l'adaptation au suivi des TTS en sous-surface. En effet la production des TTS s'accompagne le plus souvent de modifications géométriques en surface qui sont contradictoires avec l'une des exigences de la MAB, en l'occurrence, la planéité et la très faible rugosité de surface !

Ces conditions restreignent le choix des paramètres de frottement afin de trouver un compromis entre finalités tribologiques et exigences acoustiques.

Au cours de ce travail, les résultats obtenus par MAB ont essentiellement porté sur les signatures acoustiques et l'imagerie en surface et en sous-surface.

Signature acoustique :

L'acquisition de signature acoustique $V(z)$, a permis de déterminer localement les vitesses acoustiques, et par la même le module de Young, qui intervient dans la majorité des modèles mécaniques. L'analyse des $V(z)$ acquises sur une surface frottée, a montré que les zones déformées plastiquement présentent des vitesses acoustiques relativement élevées, donc des augmentations de module de Young. Les mesures effectuées sur l'anneau de Mindlin, donc essentiellement dans les écrans obtenus dans nos conditions d'essais, n'ont pas donné de variations significatives par rapport au matériau initial. Le traitement par FFT des mesures de $V(z)$ effectuées sur les zones dégradées ne donnent pas, dans la majorité des cas, des résultats significatifs, du fait des fortes atténuations. Un autre traitement des $V(z)$ qui exploite les amplitudes a permis de trouver des corrélations entre les réponses tribologiques des premiers corps, les vitesses et les atténuations acoustiques. Ceci montre que l'exploitation de la signature acoustique doit être poursuivie avec d'autres méthodes de traitement.

Imagerie en surface :

L'imagerie de la surface reproduit fidèlement les détails morphologiques, généralement similaires à ceux obtenus par MEB ou par Microscopie optique ce qui facilite la relation entre ces différentes méthodes. La différence de l'origine du contraste fait que les images acoustiques donnent avec certaines difficultés d'interprétation, des informations sur l'état élastique du matériau, qui dépend en somme : de la structure, de l'écroutissage, des contraintes résiduelles, etc. Un couplage avec des mesures de signatures acoustiques facilite l'interprétation des images acoustiques, notamment en distinguant les effets "d'altitude", des effets "matériau".

Imagerie en sous-surface :

L'acquisition d'images acoustiques à différentes défocalisations fait automatiquement intervenir l'effet $V(z)$, qui se produit en surface. Les informations de sous-surface sont véhiculées principalement par les ondes longitudinales qui se propagent en profondeur. Celles-ci sont détectées si, elles sont réfléchies avec suffisamment d'énergie vers le capteur. Par conséquent, pour détecter tous les phénomènes pouvant affecter les propriétés élastiques de la peau des premiers corps, il est nécessaire de disposer de lentilles de fréquences et d'angles d'ouvertures différents. Ne disposant que d'une seule lentille qui nous a permis de détecter les TTS et leur propagation, nous ne pouvons conclure sur l'existence d'autres phénomènes.

Malgré les problèmes rencontrés, inhérents pour la plus part au fait que ce travail s'est déroulé à la frontière de deux disciplines en évolution, nous pensons avoir développé et validé une méthodologie d'emploi de la Microscopie Acoustique à Balayage en Tribologie. Cependant nous sommes un peu déçus de n'avoir contribué qu'à entrouvrir une porte vers de nouvelles possibilités. Aussi nous suggérons à ceux qui prennent la relève :

- a) la constitution d'un "atlas" de signatures et d'images acoustiques des réponses tribologiques "types", provoquées dans des conditions données. L'objectif étant de faciliter les discriminations entre effet de surface et effet de volume;
- b) la requête à l'égard des acousticiens, pour la modélisation des réponses types des premiers corps aux sollicitations tribologiques;
- c) l'acquisition d'un jeu de lentilles acoustiques fonctionnantes à diverses gammes de fréquences, ce qui permet d'adapter la résolution du MAB à la taille du phénomène étudié;
- d) l'adaptation d'un capteur de déplacement aux lentilles acoustiques, ce qui facilite le premier positionnement de la tache focale sur la surface de l'éprouvette. Ceci permet d'éviter de transformer la lentille en éprouvette de frottement lorsque l'écho de la surface n'est pas détecté (signal très faible ou absent);
- e) l'étude des contraintes résiduelles que le MAB permette de mesurer.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Abeb1] Abebe M. et Appl F. C. "Theoretical analysis of the basic mechanics of abrasive processes. Part I : General Model ", *Wear*, 1988, N°126, p. 251-266.
- [Abeb2] Abebe M. et Appl F. C. "Theoretical analysis of the basic mechanics of abrasive processes. Part I : Model of the ploughing process", *Wear*, 1988, N°126, p. 267-283.
- [Agak] Akagaki T. et Kato K. "Plastic flow of process of surface layers in flow wear under boundary lubricated conditions", *Wear*, 1987, N°117, p. 179-196.
- [Akir] Akira U. et Akira N. "effect of deformation of the contact surface on wear and friction. A study on clarification of the mechanism of abrasive wear", *Wear*, 1986, N°110, p. 409-418.
- [Antl] Antler M. "Processus of metal transfert and wear", *Wear*, 1964, N°7 p. 181-203.
- [Arch] Archard J.F. et Hirst W. "The Wear of Metals under Unlubricated Conditions", *Proc. Roy. Soc.*, 1956, Vol. 236, p. 397-409.
- [Ashb] Ashby M.F. et Jones D.R.H. "Matériaux, 1. Propriétés et applications", Oxford : Pergamon Press, 1980, Paris : Bordas, 1991, 278 p.
- [Atta1] Attal J. " The acoustic microscope : A tool for non destructive testing NDE of semiconductor materials devices. ". *Zemel Plenum*, 1977, p. 631-677.
- [Atta2] Attal J., Caplain R. et al, " A survey of research in acoustic microscopy applied to metallurgy", *Mechanics of coating, Leads-Lyon Symposium N° 16, Tribologys serie*, edited by Dowson D., Amsterdam : Elsevier 1990, N° 17, p. 315-321.
- [Atta3] Attal J., Truong Quang N., et al, "Acoustic Microscopy : Recent Progress in Imaging trough Opaque Materials", *Microsc. Semicond. Mater. Conf.* Oxford, 6-10 Avril 1981, p. 441-446.
- [Atal] A. Atalar, " A physical model of acoustic signature ", *J. Appl. Phys.* 1979, Vol. 50, N°12, p.8237-8239.

- [Bast] Baste S. et Deschamps M., " Identification des constantes d'élasticité à partir des vitesses de propagation dans un plan principal de symétrie. ", C.R. Acad. Sci. Paris, 1989, T. 309, series II, p. 1521-1526.
- [Bert1] Berthier Y., Vincent L., M. Godet, "Velocity accommodation in fretting", Wear, 1988, N°125 p. 25-38.
- [Bert2] Berthier Y., Brendle M., Godet M., "Boundary conditions ; adhesion in fretting" -Tribologie serie 12- "Interface dynamic", edited by Dowson D., Taylor C. M., Godet M., and D. Berthe, sept 1988, Amsterdam : Elsevier, p. 19-25.
- [Bert3] Berthier Y., "Mécanismes et Tribologie", thèse de doctorat d'état, Sci., Intitut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1988, 156 p.
- [Bert4] Y. Berthier, Dubourg M-C., Godet M. et L. Vincent, " Wear data: What can be made of it? Simulation tuning" , Tribology series, "Wear particles : From the cradle to the grave", Edited by D. Dowson and al, Amsterdam : Elsevier, 1992, N° 21, p. 161-172.
- [Bert5] Berthier Y., Wehbi D., Wack J., et al, "Fractals : A method of characterisation of third body morphology". Interface Dynamics - 14ème Leeds-Lyon Symposium. Ed. Dowson D. et al, Amsterdam : Elsevier, 1987, p. 105-108.
- [Blan] P. Blanchard, "Usure induite en Petits Débattements : Transformation Tribologique Superficielle d'alliage de Titane", thèse de doctorat, Mécanique, Ecole Centrale de Lyon 1991, 134 p.
- [Blau] Blau P.J., Simpson W.A. Jr., " Application of scanning acoustic microscopy in analyzing wear an single-point abrasion damage ", Wear, 1995, N° 181-183, p. 405-412.
- [Bone] Boness R.J. et al, "Wear studies using acoustic emission techniques", Tribology International, 1990, p. 291-295.
- [Bowd] Bowden F.P. et Tabor D., "The friction and lubrication of solids", Oxford Univ Press, Oxford : Clarendon Press, 1950, 231 p.
- [Brig] Briggs A. " Advances in Acoustic Microscopy", New York and London : Plenum Press, 1990, 325 p.
- [Burw] Burwell J.T. et strang C.D., "On Empirical Law of Adhesive Wear", J. Appl. Phys., 1952, Vol. 23, p. 18-29.

- [Cast] Castagnede B., Conway H. et Sachse W., " Coefficient de Poisson en plasticité linéaire pour solides isotropes à partir de données acoustiques", Mécanique des solides, Paris : C.R. Acad. Sci., 1988, T307, série II, p. 123-127.
- [Chal1] Challen J.M. et Oxley P.L.B., "An explanation of the different regimes of friction and wear using asperity deformation models", Wear, 1979, N° 53, p. 229-243.
- [Chal2] Challen J.M., Oxley P.L.B. et Doyle E.D., "the effect of strain hardening on the critical angle for abrasive (chip formation) wear", Wear, 1983, N° 88 p. 1-12.
- [Coel] Coelho-Mandes H., "Microscopie Acoustique : Influence des Ondes Latérales sur la Signature Acoustique V(z)", Thèse de doctorat, Sci., Univ. de Montpellier II, 1990, 104p.
- [Colo] Colombier Ch., "Usure induite sous petits débattements". Thèse de doctorat, Sci, Ecole Centrale de Lyon, 1986, 152 p.
- [Eyre] Eyre T.S. et Baxter A., "The formation of white layer at rubbing surfaces", Tribology, dec 1972, p. 256-261.
- [Faye] Fayeulle S., Vannes A.B., et Vincent L., "First Body Behavior Before Debris Formation", Tribology series, "Wear particles : From the cradle to the grave", Edited by D. Dowson and al, Amsterdam : Elsevier 1992, N° 21 p. 229-235.
- [Gode1] Godet M., "Aspet mécanique de la tribologie", compte rendu des journées matériaux, Arcueil : établissement technique de l'armement, fev 1984, p. 1-18.
- [Gode2] Godet M., "Third-bodies in Tribology". Proceedings of the 5th International Congress on Tribology, EUROTRIB 89, 12-15 Juin 1989, Vol. 1, p. 1-15.
- [Gree] Green A.P., "The plastic yielding of metal junction due to combined shear and pressure", Journal of the Mechanics and the Physics of Solids, 1954, Vol. 2, p. 197-211.
- [Guet] Y. Guetteche "Matériaux dits de frottement", Diplôme des Etudes Approfondies, Mécanique, Labo. Méca. des Contacts, INSA de Lyon, oct 1990, 267 p.
- [Hall1] Halling J., "A contribution to the theorie of mechanical wear", Wear, 1975, N°34 p. 239-249.
- [Hall2] Halling J., "Introduction to tribology", the Wykeham engenering and tribologie serie, London : Wykeham publications, 1976, 225 p.

- [Hanc] Hanchi J. et Klamecki B.E., "Acoustic emission monitoring of the wear process", *Wear*, 1991, N° 145, p. 1-27.
- [Hira1] Hiratsuka K., Sugahara A. et Sasada T., "Studies on the formation mechanism of adhesive wear particles by scanning electron microscope (first rapport) : abrasive wear and adhesive wear", *Japanese Journal of Tribology*, 1991, Vol.36, N° 3, p. 275-282.
- [Hira2] Hiratsuka K., Sugahara A. et Sasada T., "Studies on the formation mechanism of adhesive wear particles by scanning electron microscope (second rapport) : abrasive wear and adhesive wear", *Japanese Journal of Tribology*, 1991, Vol.36, N° 3, p. 299-307.
- [Hopp] Hoppe M. et Hahn J.B., " Applications of Scanning Acoustic Microscopy - severy and new aspects. ", *IEEE Tansactions on sonics and ultrasonics*, March 1985, Vol. SU 32, N°2, p.289-301.
- [Hurr] Hurricks P.L., "some metallurgical factors controllng the adhesive and abrasive wear resistance of steels. A review", *Wear*, 1973, N°26, p. 285-304.
- [Kacz]1 Kaczmarek H., "Détection et visualisation par ultrasons des endommagements critiques des matériaux composites en Carbone-époxy", *La recherche aerospatiale*, mars-avril 1990, N°2, p. 59-71.
- [Kaya] Kayaba T., Hokkirigawa K. et Kato K., "Analysis of the abrasive wear mecanism by successive observations of wear processes in a scanning electron microscope"; *Wear*, 1986, N°110 p. 419-430.
- [Kimu] Kimura Y. et Shima M., "Mechanics of wear particle detachment - analysis with a longitudinal contact", *Tribology series*, "Wear particles : From the cradle to the grave", Edited by D. Dowson and al, Amsterdam : Elsevier, 1992, N° 21 p. 427-436.
- [Komv] Komvopoulos K., Saka N. et SUH N.P., "Plowing friction in dry and lubricated metal sliding", *A.S.M.E, Journal of Tribology*, 1986, Vol.108, p. 301-312.
- [Kong] Kong K.M. et Song J.T., "A metallographic study on the subsurface zones of high carbon Cr-Ti alloy steel worn by rolling contact", *Wear*, 1990, N° 140, p. 119-134.
- [Kröl1] Krölikowski J. et al, "Ultrasonic investigation of contact between solids under high hydrostatic pressure", *Ultrasonic*, January 1989, Vol. 27, p. 45-49.
- [Kröl2] Krölikowski J. et J. Szecepek, "Prediction of contact parameters using ultrasonic method", *Wear*, 1991, N° 148, p. 1-27.

- [Kröl3] Krölikowski J. et al, "High pressure in ultrasonic study of contact of solids", Physica, 1986, Vol. 139 & 140B, p. 803-805.
- [Krus] Krushov M.M. et Babichev M.A., "The effect of Heat Treatment and Work Hardening on the Resistance to Abrasive off some Alloys Steels", Friction and Wear in Machinery, 1965, N° 19 p. 1-8.
- [Kush] Kushibiki J., Hori K. et Chubachi N., " Materiel characterization, by forces bean acoustic microscopic ", IEEE Transactions on sonics and ultrasonics, mars 1985, Vol. SU 32, N° 2, p.189-212.
- [Lace] Lacey P., "Boundary lubricated Friction and Wear", Thèse de PhD, Sci., Université de Dublin, Ireland, 1988, 215 p.
- [Ling] S. Lingrad et al, "An investigation of acoustic emission in sliding friction and wear of metals" , Wear, 1989, N° 130, p. 367-379.
- [Loff] Lofficial G., "Simulation en tribologie, étude de l'usure par petits débattements des conduits armés", thèse de doctorat, Mécanique, INSA de Lyon, 1986, 147 p.
- [Matt] Matthaie E., Veters H. et Mayr P., " Reflective scanning acoustic microscopy for imaging subsurface structures in solid state materials ", Advanced Materials and Process, Edited by Exner M. E. and Schmacher V., Obsursel : DGM Informations Gesllschalt MBH, 1990, p.1415-1420.
- [Meng] Meng H.C. et Ludema K.C., "Wear Models and Predictive equations : their form and content", Wear, 1995, N° 183 p. 443-457.
- [Magn] Magnée A., "Modelization of damage by abrasion", Wear, 1993, N°164 , p. 848-855.
- [Mina] Minakuchi Y. et al, "Contact pressure measurement by means of ultrasonic waves (on a method of quantitative measurement)", Bulletin of JSME, January 1985, Vol. 28 N° 235, p.40-45.
- [Mind] Mindlin R.D., "Compliance of Elastic Bodies in Contact", Journal of Applied Mechanics, sept 1949, p. 259-268.
- [Mizu] Mizumoto M. et Kato K., "Size distribution and number of particles generation by the abrasive sliding of a model asperity in the SEM-Tribosystem", Tribology series, "Wear particles: From the cradle to the grave", Edited by Dowson D. and al, Amsterdam : Elsevier, 1992, N° 21, p. 523-530.

- [Muro] Muro H. et Tsushima N., "Microstructural, microhardness and residual stress changes due to rolling contact", *Wear*, 1970, N° 15, p. 309-330.
- [Naka] Nakajima K. et Mizutani Y., "Structural change of the layer of low carbon steels due to abrading", *Wear*, 1969, N° 13, p. 283-292.
- [Noll] NOLL N., "Rôle des écrans de surface en tribologie", thèse de doctorat, Mécanique, à paraître en fev. 1997, INSA de Lyon.
- [Pedr] Pedrix M., "Contrôle non destructif par émission acoustique", Centre d'Actualisation Scientifiques et Technique, INSA de Lyon 1977. Chap. : I, Physique des ultrasons, p. 1-24.
- [Play1] PLAY D., "Usure et frottement sec". Frottement Usure et lubrification dans l'industrie. Journées d'Ecully, septembre 1978, p. 81-83.
- [Play2] Play D. et Godet M., "Self-protection of high wear materials". *ASLE Transactions*, 1979, Vol. 22, n°1, p. 56-64.
- [Pilo] Pillon G., "Tribologie d'un amortisseur d'embrayage", thèse de doctorat, Mécanique, INSA de Lyon, 1993, 158 p.
- [Pras] Prasard B.K. et Prasard S.V., "Abrasion-induced microstructural changes during low stress abrasion of a plain carbon (0.5%C) steel", *Wear*, 1991, N° 151, p. 1-12.
- [Quat] Quate C. F., " Le microscope acoustique ", *Pour la science*, décembre 1979, p. 94-103.
- [Raou] I. Raou, "Anneau de Mindlin : Mythe ou Réalité ?", DEA, Mécanique, Labo. Méca. des Contacts, INSA de Lyon, 1993, 61 p.
- [Reda] Reda A.A., Bowen R. et Westcott V.C., "Characteristics of particles generated at the interface between sliding steel surfaces", *Wear*, 1975, N° 34, p. 261-273.
- [Rice1] Rice S.L., Nowotny H. et Wayne S.F., " Characterisation of metallic subsurface zone in sliding and impact wear", *Wear*, 1981-82, N°74, p. 131-142.
- [Rice2] Rice S.L., Moslehy F.A. et Zhang J., "The role of wear particles in modifying of friction", Tribology series, "Wear particles : From the cradle to the grave", Edited by Dowson D. and al, Amsterdam : Elsevier, 1992, N° 21, p. 463-468.
- [Rign1] Rigney D.R. et Hirth J.P., "Plastic deformation and sliding friction of metals", *Wear*, 1979, N°53 p. 345-370.

- [Rign2] Rigney D.A., "The role of characterization in understanding debris generation", Tribology series, "Wear particles : From the cradle to the grave", Edited by Dowson D. and al, Amsterdam : Elsevier, 1992, N° 21, p. 405-413.
- [Saie] Saied A. et al, "Microacoustic characterization method of resin used in electronic components encapsulation", La qualité des composants électroniques, Bordeaux - France, 1989, 4ème colloque international, p. 25-34.
- [Saur] Saurel J.M. et al, " Possibilité d'investigation de l'adhérence par des méthodes microacoustiques". Le vide, les couches minces. Aout.-sept.-oct.1993. Supplément au N°268, p. 204-206.
- [Shuk] Shukla B.M., Singhal S. et Singh D.V., "Residual stress induced wear particle generation", Tribology series, "Wear particles : From the cradle to the grave", Edited by Dowson D. and al, Amsterdam : Elsevier, 1992, N° 21, p. 419-426.
- [Suh] Suh N.P., "The delamination theory of wear", Wear, 1973, N° 25, p. 111-124.
- [Vinc] Vincent L., Berthier Y., Dubourg M. C., et Godet M., " Mechanics and materials in fretting", Wear, 1992, N°153, p. 135-148.
- [Ving] Vingsbo O. et al, "Generation of wear particles under mixed stick-slip condition in fretting contacts", Tribology series, "Wear particles : From the cradle to the grave", Edited by Dowson D. and al, Amsterdam : Elsevier, 1992, N° 21, p. 509-514.
- [Zmih] Zmihorsky E., "The Influence of Heat Treatment Factors on the Wear resistance of Dies", Wire, 1967, N° 87 p. 15-28.

ANNEXE A
EMISSION ACOUSTIQUE

Les émissions acoustiques sont une autre application des ultrasons, qui se distingue de la micro-caractérisation acoustique par le fait que les ondes acoustiques sont générées par le frottement des premiers corps. En tribologie, les chercheurs intéressés par les émissions acoustiques ont essayé de trouver des relations entre les intensités des signaux provenant de ces émissions, et les paramètres de frottement (coefficient de frottement et taux d'usure).

D'après J. Hanch et B.E. Klamecki [Hanc], les émissions acoustiques permettent de suivre l'évolution de l'usure en temps réel, ici le taux d'usure est considéré équivalent à la quantité de matière perdue. Les auteurs ont trouvé que le taux de l'émission acoustique croît avec le taux d'usure. Cependant ils répliquent que si la mesure de l'émission acoustique est facile, son interprétation est difficile. Ils notent que d'importants paramètres physiques influent sur l'émission acoustique dont les effets sont difficiles à isoler.

Dans le même contexte, R.J. Bones et al [Bone], ont étudié les signaux des émissions acoustiques obtenus lors du frottement, ils ont trouvé que le signal RMS (Root Mean Square) pouvait caractériser différents types de contact (lubrifié, sec, abrasion...). Ils ont obtenu une relation entre l'intégrale du signal RMS et le taux de matière perdue (taux d'usure), (fig. III-34) qui se présente sous la forme :

$$\text{Taux d'usure [mm}^3] = \text{constante} \times \int (RMS)^x dt.$$

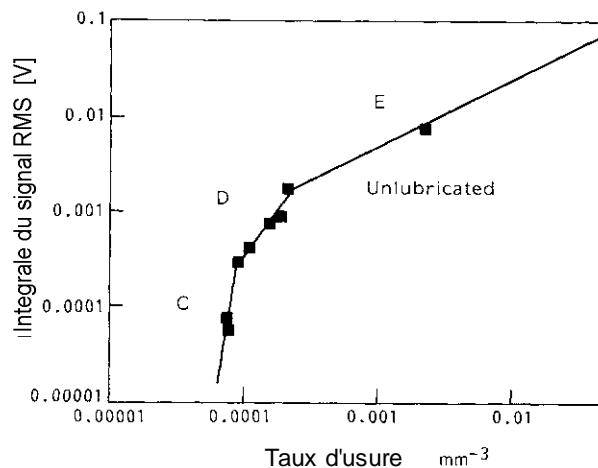


Fig. III-34 : L'intégrale du signal RMS en fonction du taux d'usure [Bone].

Les travaux de S. Lingrad et al [Ling] qui ont étudié les relations entre l'émission acoustique, le frottement et l'usure, ont abouti aux résultats suivants:

1. - l'émission acoustique (EA) est bien détectable en frottement sec;
2. - l'EA varie systématiquement avec la charge, la vitesse et le couple de matériaux;
3. - aucune relation n'est trouvée entre l'EA et le taux d'usure dans le travail actuel;
4. - une corrélation existe entre l'EA cumulée et le travail du frottement effectué;
5. - le taux de l'EA augmente avec la longueur de l'air apparent de contact dans la direction de glissement.

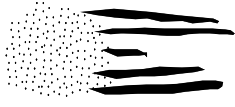

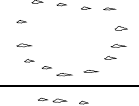


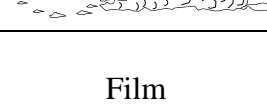

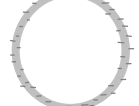
Cette étude diverge avec celle de [Hanc] principalement sur le point N°3, qui montre que dans les conditions des essais aucune relation n'a été trouvée entre l'EA et le taux d'usure. Cette divergence n'est



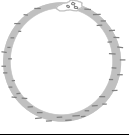



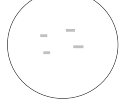
pas forcément contradictoire, car selon les premiers corps utilisés, et les conditions de charge, de vitesse et d'ambiance, le comportement vibratoire du contact n'est pas toujours le même.


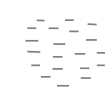



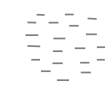
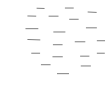


III.8.1 Conclusion


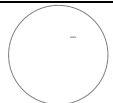

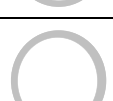
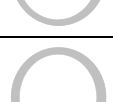
L'émission acoustique détectable en frottement sec, a pour handicap l'exploitation et le traitement des signaux obtenus. En effet, les chercheurs cités sont d'accord sur la difficulté de l'interprétation des résultats expérimentaux. L'EA offre l'avantage de la richesse des signaux obtenus en informations tribologiques. Leur exploitation efficace suppose le développement des outils théoriques et matériels. L'autre problème de l'exploitation des EA réside dans la définition même de l'usure, c'est à dire, quel paramètre faut-il mesurer pour corréler entre les EA et ce qu'on appelle taux d'usure ?

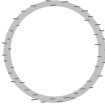
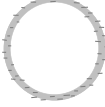
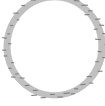

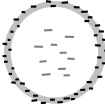
ANNEXE B
TABLEAUX RECAPITULATIFS DES ESSAIS
EFFECTUES SUR LE TRIBOMAB

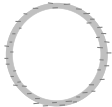
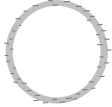



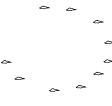


N°	V (mm/s)	Charge (N)	Pmax (MPa)	D (µm)	Nb cycles	fmax	SCHEMA	ECRAN	ANNEAU
3	2.5	40	215	10 x 200	1	-		Présent sur la zone de contact initiale	Non
5	0.01	50	246	300	1	1		Un peu partout sur la zone de contact, mais peu visible	Non
6	0.01	10	185	200	1	0.82		Même chose	Oui
7	1	"	327	200	1	1.01		Pas visible	Oui
8	0.5	70	275	200	1	0.87		"	Oui
9	"	24	212	50 x 40	1	1.3		"	Oui
10	"	24 150	390 718	10 x 200	500 x2	-	Film	Essai de visualisation par caméra	
11	"	70 150	718	10 x 200	500 x100	-	Film	"	
12	"	24	390	±25	1000	0.45		Très large, en grande quantité sur l'anneau	Oui
13	"	70	500	±2.5	1000	0.33		Très peu large, petite quantité sur l'anneau	Oui

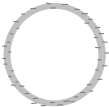
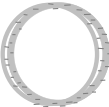
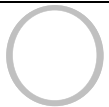
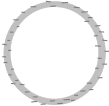

N°	V (mm/s)	Charge (N)	Pmax (MPa)	D (µm)	Nb cycles	f _{max}	SCHEMA	ECRAN	ANNEAU
14 15	0,5	150	681	±2.5 ±5	1000 1000	0.12 0.13		Sur toute la la zone de contact, en grande quantité	Pas visible
16	"	"	668	±10 ±12.5 ±15 ±20	100 " " "	0.33 0.43 0.57 0.69		Sur l'anneau plus dense, moins dense au centre	Oui
17	"	150	637	±25	1000	0.91		Sur l'anneau, + présence d'un grand écran	Oui
18	"	24	508	100	1	0.4		Pas visible.	Non
19	"	100	846	±50	100	1.55		Pas visible	Pas visible
20	"	60	740	±25	500	1.58		"	"
21	0.5	150	1000	10	1	0.16	RAS	Pas visible	Non
22	"	"	"	20	"	0.17	RAS	"	Non
23	"	"	"	30	"	0.18	RAS	"	Non
24	"	"	"	40	"	0.25		"	Non

N°	V (mm/s)	Charge (N)	Pmax (MPa)	D (μ m)	Nb cycles	f _{max}	SCHEMA	ECRAN	ANNEAU
25	"	"	1000	50	"	0.46		Très peu visible sur toute la zone de contact	Non
26	"	75	610	40	"	0.12		Pas visible	Non
27	"	70	600	\pm 25	50	1.73		Peu visible sur la partie de la zone de contact non dégradée	Non
28	"	"	"	"	25	1.6		Pas visible	Non
29	"	150	770	"	"	0.96		Sur l'anneau	Oui
30	"	100	560	25	1	0.19		Pas visible	Non
31	"	"	"	20	"	0.14		"	Non
32	"	150	825	"	"	0.25		"	Non
33	Film								
34	Film								
35	"	144	"	\pm 25	2	-		peu visible sur toute la zone de contact	Non

N°	V (mm/s)	Charge (N)	Pmax (MPa)	D (μm)	Nb cycles	fmax	SCHEMA	ECRAN	ANNEAU
36	"	86	"	"	10	0,28		Peu sur l'anneau.	Oui
37	"	118	"	± 10	"	0,12		Pas visible	Non
38	"	140	400	± 15	100	0,12		Oui	Oui
39	"	"	"	"	"	0,12		Oui	Oui
40	"	170	"	"	"	0,12		Oui	Oui
41	"	184	"	± 25	10	"	--	--	--
42	"	200	"	"	"	"	--	--	--
43	"	200	"	"	"	"	--	--	--
44 et 45	"	200	2000	1000	1	0,85	50 passages voisins à 20 μm d'incrément	Non	Non

N°	V (mm/s)	Charge (N)	Pmax (MPa)	D (μm)	Nb cycles	fmax	SCHEMA	ECRAN	ANNEAU	
46	"	200	400	± 2.5 -- ± 25	50	0,15		Oui	Oui	
47	"	135	400	"	10	0,15		Oui	Oui	
48	"	125	400	"	10	0,15		Oui	Oui	
49	"	118	400	± 5 --- ± 50	10	0,28		Oui	Oui	D
50	"	70	400	± 5 ± 10 ± 25	5, 5, 20	-	↓	"	"	
51		100	284.5	"	"	-	--	--	--	
52		"	"	"	"	-	--	--	--	
53		"	"	"	5, 5, 10	-	--	--	--	
54		"	328	"	"	-	--	--	--	
55		40	275	"	"	-	--	--	--	
56		100	460	"	"	0,15		Oui	Oui	D q

N°	V (mm/s)	Charge (N)	Pmax (MPa)	D (μm)	Nb cycles	f _{max}	SCHEMA	ECRAN	ANNEAU	
57		"	345	"	1, 1, 5	0,13		Oui	Oui	F
58		"	332	"	1, 1, 1	-	↓	--	--	
59	0,5	"	"	"	1, 1, 2	-	↓	--	--	
60	"	"	"	"	1, 1, 3	0,15		Oui	Oui	F
61	"	43	500	500	1	0,56		Non	Non	Dég
62	"	23	250	± 10	100	0,49		Oui	Oui	Pas de
63	"	16	250	± 5 , ± 10	1, 50	0,37		Oui	Oui	Qu
64	"	13	250	± 5 , ± 10	1, 20	0,32		Oui	Oui	Qu
65	"	270	1000	± 5 --- ± 10	100--- 500	0,12		Oui	Oui	
66	"	100	--	± 5 , ± 5 , ± 10	100, 500	0,13		Oui	Oui	Ecr

N°	V (mm/s)	Charge (N)	Pmax (MPa)	D (μm)	Nb cycles	f _{max}	SCHEMA	ECRAN	ANNEAU	D
67	0,5	"	-	± 10	100,50 0	0,15		Oui	Oui	I
68	"	"	-	"	500 x2	0,15		Oui	Oui	Dépl inf
69	"	180	-	"	500	0,12		Oui	Oui	I
69a	"	200	-	± 15	1000	0,14		Oui	Oui	I
70	"	"	-	"	" x2	0,16		Oui	Oui	Pas de ép

Thèse GUETTECHE

Mots clés:

TRIBOLOGIE, FROTTEMENT, USURE, TROISIEME CORPS, MICROSCOPIE ACOUSTIQUE, VITESSE ACOUSTIQUE, PROPRIETE ELATIQUE.

Résumé

La vie tribologique d'un "contact sec" se joue dès les premiers mouvements relatifs des premiers corps. Il s'agit de la phase de conception du contact qui détermine localement pour une force normale imposée, la force tangentielle subie. Ces forces déterminent le champ de contraintes auxquelles répondront les premiers corps. Cette réponse ou phase de naissance se traduit par des comportements des premiers corps qui vont de l'amorçage de fissures au détachement brutal des particules qui constitueront le troisième corps. L'étude de cette réponse implique la mesure des caractéristiques élastiques des revêtements et de la peau des premiers corps puis la localisation et le suivi à la fois, de la propagation des fissures, et des changements de structure qui conduisent au détachement de particules. Jusque-là, ce travail était conduit à partir de méthodes destructrices. L'originalité ici, a été d'utiliser la microcaractérisation acoustique qui permet de visualiser les variations locales des propriétés élastiques de la surface et de la sous-surface des premiers corps et de les quantifier à partir de la mesure de la signature acoustique. Pour cela, un simulateur de frottement a été adapté aux impératifs de la microcaractérisation acoustique. En parallèle, un laboratoire extérieur adaptait un microscope acoustique aux impératifs de la tribologie. Il s'agit donc d'une première qui allie un outil de caractérisation très récent à un domaine d'étude tout aussi neuf. Par conséquent le travail a demandé une très forte implication en microscopie acoustique et en tribologie ainsi qu'une grande constance pour résoudre de nombreux aléas scientifiques et techniques puis enfin d'évaluer les performances du microscope acoustique en regard de la réponse des premiers corps. Ce travail a transformé une idée en une réalité.

Abstract

The tribological life of a "dry contact" takes place from the first relative movements of the first bodies. It concerns the phase of conception of the contact that determines locally, for an imposed normal force, the tangential force generated. These forces determine the stress field endured by the first bodies. This response or phase of birth is translated in the first bodies behaviour that goes from crack initiation to the brutal particle detachment that constitutes the third body. The study of this response implies the measurement of elastic characteristics of coatings and the skin of the first bodies, then the location and of the propagation of cracks, and the changes of structure that lead to the particles detachment. Up to-there, this study has been performed using destructive methods. The originality of the current work, has been to use the acoustic microcharacterization that allows to visualize local variations of elastic properties of the surface and the subsurface of the first bodies and to quantify these properties from the measurement of the acoustic signature. For this, a rubbing simulator has been adapted to the acoustic microcharacterization. In parallel, an external laboratory adapted an acoustic microscope to the tribological purposes. It concerns therefore a first study, that combines a tool of very recent characterization to an area of study all as new. Consequently, the work has demanded a very strong implication in acoustic microscopy and in tribology as well as a great persistence to solve many technical and scientific problems in order to evaluate performances of the acoustic microscope with regard of the first body responses. This work has transformed an idea into a reality.