

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI – TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

THESE DE DOCTORAT D'ETAT

SPECIALITE : GENIE MECANIQUE

Présentée par : Mr ARBAOUI Mohammed

Faculté des Hydrocarbures et de la chimie
Université M'hamed Bougara – Boumerdés

Etude phénoménologique des surfaces
antagonistes (palier lisse) dans le
processus d'abrasion lubrifié

Devant le jury d'examen suivant :

Mr BACHA Nasreddine	Professeur	Université - Blida	Président
Mr TAIBI Mohamed	Professeur	Université - Boumerdés	Rapporteur
Mr BENAMAR Ali	Professeur	ENSET - Oran	Examineur
Mr DJEBBAR Arezki	Maître de conférences	Université - Tizi Ouzou	Examineur
Mr BILEK Ali	Maître de conférences	Université - Tizi Ouzou	Examineur
Mr SAYAH Tahar	Maître de conférences	USTHB	Invité

Soutenue le : -- / -- / 2009

**THÈME : Étude phénoménologique des
surfaces antagonistes (palier lisse)
dans les processus d'abrasion lubrifié.**

*A ma Femme ;
A mes deux Enfants ;
A ma Mère, mon Père (Que Dieu ait leurs Ames) ;
A la mémoire de mes collègues, victimes du séisme du 21 mai 2003, en particulier M. T.
KIRATI.*

Remerciements :

Ce travail de recherche intitulé: Étude phénoménologique des surfaces antagonistes (palier lisse) dans les processus d'abrasion lubrifié, a été effectué dans sa majeure partie, au sein du Laboratoire de Tribologie de Supmeca / ISMEP (Institut Supérieur de Mécanique de Paris – France), après une première tentative d'exploitation des moyens techniques du Laboratoire de Fiabilité des Equipements et Matériaux relevant de la Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie – Université de Boumerdés. Pour cela je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance à l'ensemble de la direction de tutelle (Département, Faculté) de l'université pour les possibilités offertes dans le cadre de la conduite de cette recherche. Et que Monsieur J.MAILLARD, directeur de Supmeca (France), trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour m'avoir accueilli dans son établissement.

Je remercie vivement Monsieur René GRAS Professeur des Universités et Directeur du Laboratoire de Tribologie (Supmeca) ainsi que Madame Geneviève INGLEBERT Professeur des Universités et Directrice du LISMMA, qui m'ont permis de poursuivre cette recherche avec leur équipe (enseignants et chercheurs) de tribologie. Qu'ils trouvent ici tous mes remerciements et ma reconnaissance pour leurs compétences et disponibilités qui ont constitué pour moi une aide morale, un soutien technique tout au long de mon séjour au sein de leur laboratoire et surtout par le fait d'avoir pris en charge financièrement la réalisation technique des essais et leurs analyses.

Que Monsieur François ROBBE-VALLOIRRE, Professeur des Universités, trouve ici l'expression de ma reconnaissance la plus chaleureuse pour avoir voulu être à mes côtés sans cesser de me prodiguer ses conseils les plus utiles tout au long de mon séjour et l'aide apportée pour acquérir les moyens nécessaires aux études tribologiques. Sa rigueur et ses exigences m'ont fait profiter de sa compétence dans un cadre très amical et surtout ses encouragements à poursuivre cette étude de façon à pouvoir bien cerner l'usure abrasive en examinant tout les paramètres tribologiques auxquels est soumis un couple de matériaux en contact de frottement dans des conditions d'exploitations sévères.

J'exprime ma profonde et respectueuse gratitude à Monsieur Mohammed TAIBI, Professeur à l'université de Boumerdés, Directeur Général de l'ANVREDET, qui m'a encouragé à entreprendre ce travail de recherche et surtout par le fait d'avoir accepté de patronner mes travaux de recherche. Qu'il en soit remercié d'une part pour les conseils scientifiques et techniques qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de la réalisation de ce projet et d'autre part, par son enthousiasme, sa disponibilité, ses indications et observations et surtout par ses conseils qui m'ont permis de mener à terme ce travail de recherche. Aussi je ne le remercierais jamais assez pour les encouragements qu'il n'a cessé de me prodiguer afin de mener à bien ce travail de recherche de longue haleine, d'une part et d'autre part surtout par le fait de vouloir l'entamer après ma première post-graduation initiée dans le domaine de tribologie sous la direction du Professeur Mr Jean BLOUET.

Ma reconnaissance va également à l'encontre du personnel enseignant et de recherche du Laboratoire de Tribologie de Supmeca / ISMEP (Saint-Ouen Paris) pour la contribution de chacun d'eux, à savoir :

- Lionel VAQUIER, veille technologique, pour l'orientation et la recherche des documents nécessaires à la partie bibliographique,

- Robert PROGRI, Professeur chargé de recherche, pour l'aide apporté à la mise au point du banc d'essai et le lancement des campagnes des essais sur le tribomètre : pion/disque, ainsi que les différents conseils et techniques portant sur l'usure abrasive,

- Pierre SEIGE, Responsable du pôle technique, ainsi que le personnel des ateliers de mécanique qui m'ont aidé à la conception des éprouvettes (échantillons) indispensables pour la réalisation des essais,

- Nathalie ISAAC, Chargée de recherche, pour la partie photographique et surtout pour les précieuses analyses effectuées sur le Microscope Electronique à Balayage,

- Murielle QUILLIEN, Professeur des universités, pour l'aide apportée à l'étude sur le surfacscan de la Microgéométrie de surface des pions et disques utilisées pour notre étude,

- Tony DA-SILVA BOTHELHO, Doctorant, qui m'a aidé pour l'utilisation de l'outil informatique afin de pouvoir concevoir ce présent mémoire.

Toute ma gratitude à l'encontre de mon collègue Monsieur GUEBLA Abdelhamid, chargé de cours au sein de la Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie – Université de Boumerdés, pour ses conseils et surtout pour son soutien moral tout au long de cette période.

J'exprime ma profonde et respectueuse gratitude à l'encontre des membres du jury, à savoir :

- Mr BACHA Nasreddine Professeur à l'Université de Blida,
- Mr BENAMAR Ali Professeur à l'ENSET – Oran,
- Mr DJEBBAR Arezki Maître de Conférences à l'Université de Tizi-Ouzou,
- Mr BILEK ALI Maître de Conférences à l'Université de Tizi-Ouzou ;

qui m'ont honoré par leur présence ainsi que Mr SAYAH Tahar Maître de Conférences à l'USTHB d'avoir accepté notre invitation par sa présence parmi les membres du jury.

Enfin, je tiens à remercier toute personne ; de l'université de Boumerdés, de celle de Tizi-Ouzou et de Supmeca - Paris ; ayant contribué de près aussi bien que de loin à ce travail de recherche (par des conseils scientifiques et techniques, soutien moral,.....).

Plan de travail :

Liste des figures et tableaux :

Résumé :

Préambule:

Introduction :

1. Position du problème :

2. Plan du travail :

A. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE :

I. Concept (ou système) tribologique :

1.1- Premiers corps :

1.2- Troisième corps :

1.3- Les surfaces :

1.4- Le contact :

1.5- L'enlèvement de matière par abrasion :

1.5.1- Les modèles d'abrasion :

1.5.2 - Les types d'abrasion :

II. Frottement entre matériaux métalliques :

III. Conséquences du frottement :

IV. Paramètres influents sur le comportement tribologique des matériaux :

V. Usure abrasive :

5.1. Généralités :

5.2. Effet de l'orientation géométrique des particules abrasives :

5.3. Influence de la taille des particules abrasives :

5.4. Influence de la charge :

5.5. Influence du type de circuit :

5.6. Influence de la vitesse :

5.7. Influence de l'ambiance :

5.8. Influence de la nature des matériaux constituant le couple de contact:

5.9. Influence de la dureté de l'abrasif :

VI. Lubrification :

6.1. Son rôle dans le contact mécanique :

6.2. La lubrification limite :

6.3. La lubrification mixte :

6.4. La lubrification hydrodynamique :

6.5. La lubrification hydrostatique :

6.6. La lubrification extrême pression :

VII. Lubrification et usure :

7.1. Problèmes de lubrification :

7.2. Lutte contre le phénomène de l'usure :

VIII. Surfaces et Microgéométrie de contact:

IX. Conclusions sur la synthèse bibliographique :

B. MODELISATION EXPERIMENTALE :

I. Préliminaires :

II. Conduite des essais :

III. Programme d'essais :

IV. Moyens matériels :

4.1. Tribomètre Palier Lisse :

4.2. Tribomètre Pion Disque :

4.3. Matériaux :

4.3.1. Composition du palier :

4.3.2. Compositions chimiques et propriétés mécaniques:

4.3.3. Dureté :

4.3.4. Pistes :

4.3.5. Frotteurs (Pions) :

4.4. Caractérisation morphologique :

4.5. Lubrifiant utilisé dans le cas de notre étude :

4.6. Eléments abrasifs :

V. Types d'essais réalisés sur le tribomètre Pion Disque :

5.1. Essais de frottement avec vitesse de glissement variable :

5.2. Essais de frottement avec vitesse de glissement constante :

C. RESULTATS EXPERIMENTAUX :

I. Introduction à la partie expérimentale :

II. Essais Préliminaires :

III. Analyses des essais à vitesse variable :

IV. Analyses des essais à vitesse constante :

V. Discussions et Interprétations :

5.1. Cas du Bronze au Plomb :

5.2. Cas du Bronze sans Plomb :

VI. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la rugosité :

6.1. Rugosités des frotteurs après essais :

6.2. Rugosités des pistes après essais :

VII. Analyse des huiles :

VIII. Conclusions :

D. CONCLUSIONS GENERALES :

E. PERSPECTIVES D'AVENIR :

F. ANNEXES :

I. Dispositifs expérimentaux : Tribomètre Pion Disque :

1.1. Précision du mécanisme du tribomètre :

1.2. Conditions adoptées pour les essais :

1.3. Liste des opérations à effectuer pour chaque essai :

II. Caractérisation morphologique :

2.1. Microgéométrie des surfaces de contact:

2.1.1. Généralités:

2.1.2. Définition de la rugosité et de l'ondulation :

2.1.3. Norme ISO 12085 (norme 'Ligne Moyenne') :

2.2. Caractérisation géométrique des disques

2.3. Caractérisation géométrique des frotteurs :

2.3. Dessins de définition :

2.3.1. Frotteur (pions):

2.3.2. Disque:

III. Techniques d'analyses des huiles:

3.1. Spectrométrie :

3.2. Ferrographie :

IV. Rôles des additifs :

4.1. Etude de l'influence des huiles actives:

4.2. Etude du comportement des additifs tensioactifs en films discontinus:

G. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

Liste des figures et tableaux :

Figure 1 : Synoptique général d'un système tribologique,

Figure 2 : Schématisation des mécanismes d'usure par abrasion à deux et à trois corps,

Figure 3 : Aire réelle de contact entre deux surfaces chargées,

Figure 4 : Courbe de tendance de l'évolution de l'usure,

Figure 5 : Coupe schématique d'un matériau métallique usuel,

Figure 6 : Représentation schématique de la déformation plastique (labourage) provoquée par une particule abrasive,

Figures 7 : Représentations schématiques : a) de l'angle d'attaque d'une particule, b) forces agissantes dans le cas d'un enlèvement de matière par formation de copeaux,

Figure 8 : Courbes représentatives de la section droite du sillon (rayure) en fonction de l'angle d'attaque de la particule abrasive,

Figure 9: Représentation schématique des zones d'écoulement d'une surface métallique abrasée par une particule,

Figure 10 : Evolution du volume de l'usure en fonction du diamètre moyen des particules abrasives,

Figures 11 : Les différents modes d'usure abrasives : a) à deux corps, b) à trois corps.

Figure 12 : Exemple de pièce usée par abrasion,

Figures 13 : Différentes positions adoptées par le couple arbre-palier lors de la mise en mouvement (démarrage),

Figures 14 : Différents modes de frottement ; du régime sec à celui hydrodynamique ; observés dans les contacts mécaniques,

Figure 15 : Surface somme d'une paire pion-disque,

Figure 16: Déformation des aspérités sous charge statique, avec mouvement (frottement),

Figure 17 : Vue schématique du tribomètre palier lisse,

Figure 18 : Vue générale du tribomètre palier lisse avec le type d'éprouvette et abrasifs employées,

Figures 19 : Schémas représentatifs des positions de l'assemblage arbre-alésage : a) Position idéale ; b) Position concrète,

Figure 20 : Position des surfaces de contact adoptée dans le cas de notre étude,

Figure 21 : Schéma de principe du tribomètre Pion – Disque,

Figures 22: Disque et pion utilisés : a) Piste et pion en position d'essai, b) Pions après essais avec différents niveaux d'usure obtenus,

Figures 23: Micrographies des bronzes : a) sans plomb (CuSn), b) au plomb (CuSnPb),

Figure 24: Microphotographie de la surface du disque en acier 100Cr6, avant essai,

Figure 25 : Schéma du procédé des mesures de profilométrie,

Figure 26 : Photographie du SURFASCAN 3S – Somicronic,

Figure 27 : Aspects des particules abrasives,

Figures 28 : Evolution des surfaces des pions en bronze : a) avant essai ; b) après essai,

Figure 29 : Variation de la vitesse au cours des essais de frottement à vitesse variable réalisés sur le tribomètre Pion-Disque,

Figure 30 : Courbe de Stribeck avec les différents domaines de lubrification,

Figure 31 : Représentation schématique des différents modes de lubrification dans le contact pion – disque,

Figures 32: a) Frictiogramme type ; b) courbe expérimentale résultante - Pion en laiton ; finition : papier abrasif de granulométrie 80 ; Lubrifiant : huile Neutral NS100 ; $p = 10 \text{ MPa}$; $t = 20 \text{ °C}$,

Figure 33 : Courbes de Stribeck pour une huile neuve utilisée à deux températures (75°C et 90°C) à vitesse croissante durant la phase stabilisée [$p=2,5\text{Mpa}$],

Figure 34: Courbes de Stribeck obtenues pour une huile neuve et une huile usagée, utilisées à 75°C , à vitesse croissante durant la phase stabilisée [$p=2,5\text{Mpa}$],

Figure 35 : Exemple de courbe de Stribeck obtenue (CuSn en immersion dans l'huile avec pollutions),

Figure 36 : Courbes de Stribeck obtenues lors des essais à vitesse variable,

Figure 37 : Perte de masse mesurée lors des essais à vitesse variable,

Figures 38 : Aspect des surfaces frottantes des pions après essais à vitesse variable : a) sans abrasifs, b) avec abrasifs,

Figure 39: Valeurs des coefficients de frottement obtenues au cours des essais à vitesse constante pour les deux types de bronzes,

Figure 40 : Usure lors des essais à vitesses constantes (0,65 et 1,0 m/s),

Figures 41: Surface frottantes des pions en bronze au plomb après essais :a) sans abrasifs, b) avec abrasifs,

Figures 42 : Enregistrements profilométriques obtenus sur les pions en bronze au plomb après essai à 1 m/s,

Figures 43 : Aspect des surfaces frottantes des pions après essais à vitesse variables : a) sans abrasifs, b) avec abrasifs,

Figures 44 : Aspect des surfaces frottantes des pions après essais à vitesse variables : a) sans abrasifs, b) avec abrasifs,

Figure 45 : Incrustations des particules sur le pion, à l'entrée du contact,

Figures 46: Analyses de la surface d'un pion en bronze après essai d'usure à 1 m/s, en présence de particules abrasives : a et b) microphotographies de la surface du pion montrant l'incrustation de particule, c) Profil microgéométrique de la surface du pion obtenu par le Surfascan, d) Spectre obtenu sur le M.E.B,

Figure 47 : Surface du disque, en acier 100Cr6 ; après essai d'usure en présence d'abrasifs,

Figure 48 : Profil microgéométrique de la surface du disque obtenu après un essai d'usure lubrifié en présence d'abrasifs,

Figure 49 : Analyses sur M.E.B de la trace observée sur la piste 7,

Figure 50 : formation de copeau par roulement-indentation.

Tableau 1 : Importance des pertes par usure,

Tableau 2 : Compositions chimiques des poussières (polluants) d'origines diverses,

Tableau 3 : Concentration de l'air en particules abrasives en fonction de la hauteur par rapport au sol (Région In Amenas),

Tableau 4 : Types de matériaux utilisés comme abrasifs,

Tableau 5 : Principales caractéristiques mécaniques des pions (bronze),

Tableau 6 : Compositions chimiques des bronzes,

Tableau 7 : Principales caractéristiques mécaniques de l'acier 100 Cr 6,

Tableau 8 : Composition chimique des disques en acier 100Cr6,

Tableau 9 : Répartitions des dimensions des particules abrasives,

Tableau 10 : Tableau récapitulatif des conditions sélectionnées pour la campagne d'essais pour les différentes paires de matériaux sous une pression de contact de 6,5 MPa

Tableau 11 : correspondance vitesse de glissement – vitesse de rotation pour les essais sur le tribomètre Pion - Disque,

Tableau 12 : Valeurs des vitesses choisies pour les essais à vitesse constante.

Liste des figures et tableaux de l'annexe :

Figure 1: Photographie du banc d'essai : Pion / Disque,

Figure 2 : Forces et moments appliqués au bras articulé.

Figure 3: Décomposition du profil de mesure de la microgéométrie de surface en profils de rugosité et d'ondulation,

Figure 4 : Représentation du paramètre de rugosité "Ligne Moyenne" : R_a ,

Figure 5 : Représentation du paramètre de rugosité "Ligne Moyenne" : R_{sm} ,

Figures 6 : Profils microgéométriques des surfaces des disques obtenus : a) et b) : avant et après un essai d'usure lubrifié des pions CuSn, sans abrasifs, c) et d) : avant et après un essai d'usure lubrifié des pions CuSn, avec abrasifs,

Figures 7 : Profils microgéométriques des surfaces des disques obtenus : a) et b) : avant et après un essai d'usure lubrifié des pions CuSnPb, sans abrasifs, c) et d) : avant et après un essai d'usure lubrifié des pions CuSnPb, avec abrasifs,

Figures 8 : Profils microgéométriques des surfaces des pions en bronze (CuSn) obtenus : a) avant l'essai d'usure ou de frottement lubrifié, b) et c) : après l'essai de frottement lubrifié, sans et avec abrasifs, d) après un essai de frottement lubrifié, avec abrasifs, θ ambiante e) et f) : après l'essai d'usure lubrifié, avec abrasifs, $v = 1$ et $0,65$ m/s,

Figures 9 : Profils microgéométriques des surfaces des pions en bronze au plomb (CuSnPb) obtenus : a) avant l'essai d'usure ou de frottement lubrifié, b) et c) : après l'essai de frottement lubrifié, sans et avec abrasifs, d) après un essai de frottement lubrifié, avec abrasifs, θ ambiante, e) et f) : après l'essai d'usure lubrifié, avec abrasifs, $v = 1$ et $0,65$ m/s,

Figure 10 : Dessin de définition des pions en bronze (avec ou sans plomb) utilisés au cours de nos essais de frottement et d'usure,

Figure 11 : Dessin de définition des pistes en acier utilisées au cours de nos essais de frottement et d'usure,

Figure 12 : Schéma du Ferrographe à Lecture Directe (DR),

Figure 13 : Schéma de l'appareillage utilisé pour la ferrographie analytique,

Figure 14: Schémas des mécanismes : a) d'adsorption physique, b) d'adsorption chimique,

Figure 15 : Schéma de l'interaction d'un lubrifiant avec une surface métallique,

Figure 16 : Volume perdu en fonction du temps,

Figure 17 : Vitesse d'usure en fonction de la pression moyenne,

Figure 18 : Essai de frottement à 75°C du bronze sans plomb en présence d'abrasifs.

Tableau 1 : Caractéristiques du tribomètre utilisé dans l'étude,

Tableau 2 : Valeurs types des moyennes des paramètres de rugosité mesurés sur les surfaces des pistes lors des différents types essais d'usure lubrifié,

Tableau 3 : Valeurs types des moyennes des paramètres de rugosité mesurés sur les surfaces des pions de bronze : CuSn,

Tableau 4 : Valeurs types des moyennes des paramètres de rugosité mesurés sur les surfaces des pions de bronze : CuSnPb,

Tableau 5 : Éléments chimiques détectés par spectrométrie.

Résumé :

Pour une meilleure gestion et diagnostic des équipements statiques et dynamiques, l'usage de la maintenance préventive et de la fiabilité est primordial. On doit contribuer à la résolution des problèmes de résistance mécanique, de rigidité et stabilité des pièces et structures pouvant provoquer la défaillance des équipements. Vu la diversité des équipements existants sur les installations de forage en Algérie, des études comparatives basées sur les données scientifiques s'avèrent nécessaires pour un choix adéquat qui tiendrait compte des conditions spécifiques de l'exploitation de ces installations. Et par la suite les comparer aux conditions optimales exigées par les constructeurs sans avaries de ces équipements dont l'exploitation étant un problème complexe exigeant des études théoriques adéquates pour une mise au point de modèles mathématiques qui décrivent bien l'interdépendance entre les formes tribologiques des surfaces et les matériaux utilisés pour ce type d'équipement pour une meilleure optimisation. Car une meilleure compréhension des formes tribologiques intervenants dans le contact de deux surfaces en mouvement relatif permettrait d'orienter convenablement le choix de ces formes assurant les progrès souhaités, d'une part. Et que d'autre part, le comportement tribologique d'un couple de matériaux est très influencé par les propriétés mécaniques, physico-chimiques des matériaux en contact et par l'existence d'un troisième corps abrasif (extérieur ou produit par l'usure lors du frottement).

La défaillance des matériaux à usage industriel est presque toujours un événement indésirable, et ce, pour plusieurs raisons : elle peut mettre en danger des vies humaines, entraîner des pertes économiques et entraver la production de biens et service. Même lorsque les causes d'une défaillance et le comportement des matériaux sont connus, elle demeure difficile d'assurer la prévention des défaillances. Un choix ou un traitement erroné des matériaux de même qu'une conception, une utilisation inadéquate d'un composant favorisée par le phénomène d'usure, constitue les causes de défaillance les plus fréquentes. La tâche de l'ingénieur de conception consiste précisément à prévoir les défaillances possibles et, si une défaillance se manifeste, à en déterminer les causes et à prendre les mesures de prévention appropriées.

Une grande partie des défaillances techniques s'amorce à la surface de contact des pièces mécaniques en mouvement relatif, de ce fait, le comportement tribologique des matériaux et les performances des lubrifiants ou des revêtements dans un contact glissant déterminent à terme la qualité de la conception initiale ainsi que la fiabilité de fonctionnement de l'équipement. Malgré la technologie atteinte par la performance des moteurs, l'accroissement des contraintes d'exploitation, ainsi que celles économiques ; la longévité des moteurs croît constamment du fait des progrès réalisés dans leur technologie. La durée de vie (ou de fonctionnement) ainsi que la fiabilité des organes et équipements mécaniques sont limitées par des phénomènes d'usure ou de défaillance de graissage et dont les conséquences peuvent être :

- une panne brutale entraînant un arrêt temporaire pouvant conduire à une mise hors service de l'équipement,
- une perte de performances diminuant par conséquent le rendement de l'équipement,
- une augmentation des coûts d'exploitation par suite à la fréquence de remplacement des pièces usées.

Pour une application industrielle, l'usure en premier lieu, et juste après, le frottement restent les deux grandeurs les plus déterminantes de par leurs implications économiques, et la connaissance de la nature exacte des différents mécanismes d'usure, de frottement contribuent à un meilleur choix du matériel mécanique.

Les différentes surfaces des couples de matériaux constituant un équipement sont soumises à un frottement solide ou fluide en présence ou non de lubrifiant, peuvent être très affectées par les formes d'usure allant de l'usure douce, régulière et contrôlable (usure normale) à la détérioration brutale entraînant la mise hors service de l'équipement. Les détériorations obtenues sur ces surfaces fonctionnelles sont dues à des phénomènes isolés ou agissant simultanément et que l'on peut classer en quatre formes fondamentales : usure adhésive, abrasive, corrosive ou par fatigue. Compte tenu de la multiplicité et de l'interdépendance des divers points évoqués, il est indispensable de définir les conditions opératoires de façon à simuler des cinématiques de mouvement les plus proches de la réalité du phénomène étudié.

La situation qui constitue le contexte de cette étude correspond à la présence de particules en suspension dans le lubrifiant. Dans le cas général, cette pollution en particules peut avoir des origines diverses : des contaminations par des suies (moteur à explosion par exemple) [1,2] ou par des débris d'usure du palier considéré voire d'autres contacts partageant le lubrifiant [3] ou provenant du milieu ambiant (environnement). Dans tous les cas, les dégradations peuvent être importantes pour les paliers en particulier lorsque la taille des particules est intermédiaire entre celles correspondant respectivement à l'entrée du convergent du palier et à sa sortie [4]. Le mécanisme principal de dégradation généralement évoqué dans ce cas est l'usure abrasive mais en fait, il est important de noter que peu d'études scientifiques proposent de réelle quantification de l'effet des pollutions (extérieures) dans les lubrifiants [5,6]. Le lubrifiant a pour rôle de chasser les débris d'usure et de pollutions de la zone de glissement (ou de "contact") et un filtrage efficace permettra de les éliminer du circuit de lubrification réduisant ainsi le phénomène d'usure.

L'usure abrasive est un phénomène familier à tous, et comme la plupart qui a trait à la vie réelle, il est commandé par un jeu subtil de nombreux effets. La technologie du frottement et de l'usure reste encore très complexe, et l'ensemble des recommandations proposées ne constituent évidemment que des tendances obtenues à partir d'expériences sur les bancs d'essais et observations effectuées sur des applications (machines et équipements mécaniques).

Dans le cas d'un moteur à combustion interne, l'huile n'est présente dans le contact que par le pouvoir de capillarité de la chemise et elle est partiellement brûlée lors de l'explosion du mélange. De plus, les fortes pressions de contact chassent l'huile, redonnant alors un contact sec ou mixte. La solution consiste à augmenter les surfaces portantes ou à augmenter l'apport d'huile. Cette dernière solution est utilisée dans les moteurs. Si cela n'est pas suffisant, un choix de matériaux comme des céramiques pour les jupes de pistons peut être fait pour atténuer l'impact du frottement sec. Mais toutes ces solutions qui font l'objet de recherches permanentes sont purement passives. La nature du contact est subie et les seuls degrés de liberté sont sur l'emploi de lubrifiant ou de matériaux.

Il faudrait s'intéresser particulièrement aux cas de frottement sec en présence de particules abrasives car ce sont les plus pénalisants pour notre application qu'est le moteur fonctionnant dans des conditions sévères d'environnement. Lors des fortes pressions qui règnent dans la chambre de combustion, le film d'huile de quelques micromètres d'épaisseur se rompt, le piston et la chemise sont alors en contact direct et à cause du mouvement relatif, ils frottent l'un contre l'autre. Quelques études ont été menées sur le sujet et concernent les deux types de contact : secs et lubrifiés.

Dans cette étude on se propose l'étude phénoménologique des surfaces antagonistes lors du frottement lubrifié en présence de particules abrasives dans les paliers lisses. Celles-ci sont des particules de sable dont la dimension est inférieure ou égale à 50 μm et qui arrivent à traverser les filtres dans le cas des moteurs installés sur les chantiers de forage Algériens en provoquant par conséquent des avaries importantes pouvant conduire à un arrêt de l'installation de forage avec toutes ses conséquences.

Sur ces installations sahariennes, les particules en suspension arrivent à pénétrer dans les cylindres des moteurs et s'interposer par la suite entre le segment et la chemise des cylindres, où elles sont fortement écrasées, certaines incrustées, lors du cycle de fonctionnement des moteurs provoquant l'usure abrasive. De plus aux positions des cylindres "Point Mort Haut", vu la température régnante, la lubrification n'est pratiquement pas assurée d'où l'amplification du phénomène de l'abrasion. C'est là sans aucun doute le maillon faible de la grande sensibilité des segments et des chemises à l'usure abrasive comparée à celle plus faible, par exemple des coussinets et lignes d'arbres.

Les contacts lubrifiés jouent un rôle essentiel en construction mécanique, [7;8], car ils permettent d'obtenir des guidages à faible frottement et également une grande durée de vie en raison des faibles niveaux d'usure obtenus. Les applications sont donc très nombreuses et parmi celles-ci, nous pouvons citer les paliers hydrodynamiques dans lesquels, la formation du convergent peut permettre de générer un film continu assurant la séparation continue des deux éléments du contact [9]. Dans une telle situation, le rôle des matériaux solides (1er corps du contact) est généralement secondaire, et le comportement est correctement décrit en adoptant une analyse fine du film d'huile dans le contact, [10]. Pour

cela, nous allons utiliser un tribomètre pion - disque pour les mesures du coefficient de frottement et de l'usure et qui nous permettrait de :

- Prendre en compte la contribution des matériaux solides dans le paramètre étude de la variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse : Courbes de Stribeck,

- Analyser l'évolution de la structure des surfaces des frotteurs sur l'influence de la lubrification en présence de particules abrasives.

Mots-clés : Frottement lubrifié ; usure abrasive ; détériorations de surface ; frottement des bronzes ; usure des bronzes ; palier lubrifié.

Préambule :

Le mot **tribologie**, construit à partir des racines grecques *tribein*, frotter et *logos*, discours, étude, a été proposé en 1968 par **G. Salomon [11]** pour désigner la science qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire lorsque deux corps en contact, quelque soient leurs natures, lubrifié ou non, sont animés de mouvements relatifs. Il recouvre, entre autres, tous les domaines du **frottement**, de l'**usure** et de la **lubrification**. La tribologie s'intéresse aussi aux diverses méthodes qui permettent de donner un "bon comportement" à ces contacts, sachant que les organes mécaniques "lâchent" bien plus souvent aujourd'hui par leurs surfaces que par leur volume [12]. Son étude s'impose pour de nombreuses raisons :

- assurer le bon fonctionnement et la fiabilité des machines et équipements,
- diminuer le coût d'obtention des surfaces frottantes lors de leurs fabrications,
- améliorer le rendement et la longévité d'exploitation des machines et équipements,
- assurer la sécurité des biens et des personnes, particulièrement dans le domaine des transports et sur des sites sensibles (installations de forage, raffinerie,...),
- contribuer à la santé publique et au confort, par exemple en diminuant les bruits, très nombreux, liés aux contacts mécaniques, mise au point des prothèses,...

Donc la tribologie est une science qui étudie l'ensemble des phénomènes qui ont lieu lorsque des corps en contact sont mis en mouvement relatif. Elle présente trois aspects distincts : le frottement qui est la résistance à un déplacement imposé, l'usure suite à la dégradation des surfaces qui se traduit par une perte de matière et la lubrification qui consiste à interposer un lubrifiant (qui peut être liquide, solide ou gazeux et qui est imposé par les conditions environnantes dans lequel doit fonctionner le système) entre les deux corps en contact. C'est une science pluridisciplinaire faisant intervenir des notions de mécanique, de physicochimie et de science des matériaux en général.

L'abrasion des surfaces antagonistes est le résultat de l'action d'une population de particules abrasives de géométries et dimensions différentes. Une

géométrie simple pour modéliser le processus ne trouve donc de sens que dans sa capacité à isoler les paramètres influant sur les modes d'écoulement de la matière autour de la particule. Celle-ci constitue une technique abrasométrique qui se doit d'être extrêmement flexible dans ses capacités d'adaptation, afin de pouvoir répondre de manière optimale à toutes les applications. De ce fait, se pose le problème de la définition d'une technique universelle compatible avec les exigences de la rhéologie, de la tribologie, de la science des matériaux et qui prenne en compte les impératifs industriels et économiques. La déformation de la surface sous l'action de la particule abrasive dépend en effet de plusieurs variables :

- la nature des matériaux antagonistes (couples de matériaux en contact/particules abrasives),
- la forme, la taille et l'orientation de ces particules,
- les forces agissant sur le couple de matériaux,
- les trajectoires et vitesses imposées,
- la nature de l'interface.

L'étude des mécanismes locaux de déformation plastique et de rupture mis en jeu par l'abrasion est alors très importante dans tous les problèmes d'interaction entre surfaces en mouvement. Si, ces dernières années, de nombreuses études ont grandement accru la compréhension de ce procédé, l'évolution constante des caractéristiques métallurgiques, chimiques, mécaniques et structurales des matériaux démontre l'impérative nécessité d'étendre plus en avant le champ d'investigations dans les divers domaines du processus d'abrasion. Celui-ci peut être considéré, dans un cas comme un micro-usinage accompagné d'un taux d'enlèvement de matière (rectification), et dans l'autre comme un phénomène de déformation plastique caractérisé par un certain taux d'enlèvement de matière (usure abrasive).

Ce sujet d'une rare universalité nous conduira à explorer de très nombreux aspects des sciences et des techniques : frottement et adhérence, bien sûr, mais aussi cristallographie, physicochimie des surfaces, thermodynamique, thermochimie, résistance des matériaux, pressions de contact, usure, lubrification, matériaux, traitements thermiques, traitements de surfaces ...

Introduction :

Les applications dans le domaine du frottement, de la lubrification et de l'usure sont actuellement en rapide évolution [11 ; 12 ; 13]. Du fait des températures croissantes auxquelles sont appelés à fonctionner les mécanismes mécaniques, dans des ambiances plus ou moins abrasives, corrosives, certains dispositifs de puissances destinés à la production d'énergie atomique, ou au freinage à grandes vitesses,... ; le problème de l'usure des matériaux dans de telles conditions a pris une grande importance [14]. L'utilisation de mécanismes délicats, (vide spatial, corrosion marine, ...) nécessite un recours extensif à l'emploi de lubrifiants solides et de matériaux autolubrifiants. Dans le même temps, le perfectionnement des dispositifs graissés de manière classique (paliers, engrenages, glissières, roulements,...), n'a pas perdu de son intérêt : bien au contraire, tout progrès dans ce domaine est susceptible d'une incidence économique considérable [15].

Le point qu'il convient de noter tout particulièrement est que les phénomènes de frottement mettent en jeu essentiellement les surfaces [16], et plus précisément les interfaces et les couches superficielles des corps en contact [17]. Une connaissance précise des surfaces et des lois du contact des solides est donc un préalable indispensable à l'étude du frottement et mécanisme d'usure abrasive dans les paliers lisses lubrifiés [18,19].

Lors des phases transitoires de fonctionnement des composants mécaniques tels que les organes de guidage (paliers) ou de transmissions d'énergie (engrenages, anneaux de synchronisation de boîtes de vitesses, organes de réducteurs de vitesses...), les films de lubrifiants ne peuvent séparer totalement les surfaces des composants et celles-ci peuvent entrer en contact. De telles situations se produisent lors des phases transitoires de démarrage et d'arrêt, dans le cas de fonctionnement dans les régimes de ralenti ou de surcharge occasionnelle où l'épaisseur du film d'huile peut être tellement mince que les sommets des aspérités viennent en contact, augmentant ainsi l'usure et le coefficient de frottement,[20]. Dans de telles situations, la charge est supportée en partie par les solides et en partie par le film de lubrifiant. Le régime de lubrification est donc défini comme mixte ou même limite si le film d'huile n'existe plus. Ces situations peuvent également se produire

pendant la période de rodage, c'est à dire pendant la période initiale de fonctionnement des composants mécaniques quand les surfaces, encore vierges, vont subir pendant le contact un changement d'état de leurs microgéométrie de surface sous l'effet de l'usure et de l'écrasement, jusqu'à l'obtention d'une situation stable en régime hydrodynamique où le coefficient de frottement, le taux d'usure et l'état de surfaces restent constants [21].

Donc, cette étude relevant de la tribologie se propose d'étudier le comportement des couples de matériaux en présence afin d'améliorer la performance du contact entre ces surfaces métalliques en présence de particules abrasifs dans le bain du lubrifiant. Ce travail ayant pour objectif d'évaluer les capacités portantes de ces matériaux, le rôle des déformations des aspérités ainsi que l'influence dominante des particules abrasives. Ainsi que l'effet des tribo - réactions physico-chimiques entre les surfaces métalliques ayant pour objectif une meilleure évaluation du système tribologique pendant la période de rodage afin d'analyser le coefficient de frottement ainsi que la conservation de l'intégrité de la surface frottée. Dans cette étude la condition de rodage suppose qu'après le mouvement en contact glissant, la conformité des profils des surfaces est améliorée mais que leur structure initiale est conservée, autrement dit que les stries dues à l'usinage sont encore présentes après essais de frottement.

L'étude des mécanismes locaux de déformation plastique et de rupture mis en jeu par le processus d'abrasion est très importante dans tous les problèmes d'interaction entre surfaces métalliques en mouvement relatif. L'usure abrasive peut notamment engendrer des déplacements rapides de métal (usure) pour des conditions favorisant la coupe. Ainsi il est important d'être capable de prédire la capacité, des caractéristiques (mécaniques aussi bien que géométriques) des éléments abrasifs susceptibles, de former un copeau ou simplement de labourer les surfaces des matériaux antagonistes.

Le glissement se produit en présence d'un film discontinu, autrement dit en régime de lubrification mixte comme déjà indiqué précédemment. La zone où les surfaces sont séparées par un film mince qui supporte les efforts doit être traitée par les équations de Reynolds de la mécanique des fluides, cela s'appelle la partie hydrodynamique du contact. En revanche la zone, où les deux surfaces sont en contact par l'intermédiaire de leurs aspérités c'est à dire par la partie solide, est le domaine de la science des matériaux.

Certaines caractéristiques rhéologiques telles que la viscosité et le coefficient de piezo - viscosité pour le lubrifiant, le module d'élasticité, la dureté et le coefficient de Poisson pour les matériaux interviennent dans le système tribologique. Le domaine du film discontinu relève à fois de la science des matériaux et de la mécanique des fluides. Les interactions lubrifiants - matériaux jouent un rôle essentiel [22]. Elles sont fonctions des corps en présence et des variables tribologiques opérationnelles, [23], telles que la température, la pression, la vitesse et par la présence ou non d'éléments abrasifs.

Donc quelque que soient les conditions choisies, en service le système doit supporter les efforts appliqués et particulièrement du point de vu tribologique garantir certaines fonctions tribologiques, afin d'assurer une fiabilité de fonctionnement et une longévité de service des mécanismes, telles que :

- une bonne résistance au grippage,
- un faible coefficient de frottement,
- un faible taux d'usure,...

Plusieurs raisons déjà citées peuvent amener un système mécanique lubrifié travaillant dans des conditions de service normales à faillir. En effet, si on ne parvient pas à stabiliser les paramètres du contact pendant le rodage, ou le frottement en présence de pollutions abrasives, les conditions de fonctionnement peuvent devenir sévères et conduire à une augmentation du frottement et de l'usure avec toutes ses conséquences. Comme une part importante de l'énergie consommée dans un système mécanique se perd par frottement, ainsi que les phénomènes parallèles comme l'usure, grippage, fatigue, corrosion,..., qui provoquent l'interruption de la vie ou de service des composants mécaniques par la ruine totale ou pour la destruction de son état superficiel. Toutes ces motivations dominant l'intérêt économique de cette étude qui est considérable. La caractérisation des matériaux sélectionnés de façon à approfondir ses capacités tribologiques en fonction des exigences du fonctionnement et surtout en ce qui concerne la période de rodage qui doit être bien étudiée de façon à minimiser les coûts d'entretien et à augmenter la durée de vie des composants mécaniques avec un service fiable et de bonne qualité.

1 - Position du problème :

Les conditions de frottement lubrifié dans l'interface de contact entre la surface et les particules abrasives sont particulièrement complexes et très dépendantes des conditions de fonctionnement du système considéré. Aucune loi de contact universelle n'existe pour modéliser les forces de frottement agissant dans l'interface, et en particulier pour la large gamme de paramètres de fonctionnement et d'environnement possibles. Ce n'est souvent que par des lois macroscopiques de type Coulomb qu'est représenté le phénomène. La tendance dans la littérature est à l'étude des paramètres globaux du processus de rectification, à savoir les efforts ou l'énergie mis en jeu ainsi que la trace rémanente. Cette approche est en revanche limitée du point de vue de la compréhension des mécanismes locaux de part la succession de différents modes de sollicitation (labourage et coupe). Il est donc nécessaire de simplifier la cinématique afin d'isoler ces modes de sollicitation et d'en étudier les spécificités.

D'une façon générale, l'usure peut être considérée comme associant des mécanismes de rupture (cisaillement de jonctions, fatigue,...) à des phénomènes interactifs tels que les effets thermiques, des phénomènes volumiques (déformations plastiques, changement de phase, diffusion) et naturellement des effets de surface (réaction, adsorption, ségrégation...). De nombreuses classifications d'usure existent depuis longtemps et plusieurs types sont reconnus : adhésion, délamination, abrasion, érosion, usure par petits débattements (fretting), par impact, par corrosion et par oxydation, par diffusion... Il faut toutefois reconnaître que la détermination des mécanismes de base est difficile à cerner en raison de la complexité des phénomènes rencontrés en pratique.

Le comportement des surfaces en frottement et en usure sera conditionné par les contraintes extérieures mais également par leurs caractéristiques géométriques, mécaniques et physico-chimiques ou encore par l'introduction éventuelle et non désiré, d'un troisième corps (étranger au couple des matériaux en contact) [24]. L'usure étant un phénomène pratiquement inévitable et nuisible (à l'exception du rodage). Le lubrifiant a pour rôle de chasser les débris d'usure de la zone de glissement (ou de "contact") et un filtrage efficace permettra de les éliminer du circuit de lubrification. Cependant, en

dehors des régimes de lubrification hydrodynamique ou hydrostatique pure, et notamment pendant les périodes de démarrage et d'arrêt ou du régime du ralenti, les pièces en mouvement des mécanismes ne sont pas complètement séparées par un film de lubrifiant, un contact immédiat est inévitable, avec toutes ces conséquences [25].

L'abrasion est une usure typique des régions désertiques (région saharienne) et du génie civil (engins de terrassement,...). Il faut empêcher l'entrée des corps étrangers par une bonne étanchéité et imposer des jeux plus petits que les particules abrasives, si l'on sait que ces dernières sont assez grosses. Il faut aussi donner une dureté maximale à la pièce qui défile devant la zone de contact et faire l'autre aussi "tendre" que possible pour qu'elle puisse "enliser" les particules abrasives. Un coussinet trop dur incrustant des corps étrangers use davantage l'arbre. Il est essentiel que les particules abrasives et les débris d'usure soient évacués des zones frottantes. Il faut impérativement prévoir des sculptures ou des moletages, si aucune circulation de lubrifiant ne permet cette évacuation. Malheureusement, l'emploi de lubrifiant est soumis aux conditions extérieures imposées par le milieu. Par exemple, un milieu sous vide comme l'espace interdit l'emploi de lubrifiant liquide qui se vaporise ou ne peut pas rester confiné dans le contact.

L'usure abrasive se manifeste par des rayures, des arrachements de matière dus à l'action de particules mobiles (produits d'usure ou des pollutions introduites) qui viennent agresser les surfaces solides d'où l'on définit l'usure abrasive comme étant le déplacement de matière, produit par des particules ou des protubérances dures qui heurtent une surface solide ou glissent contre elles. Ces particules peuvent se trouver entre les surfaces en mouvement relatif (véhiculées par le lubrifiant), ou bien être enchâssées dans l'une des surfaces (en général la plus molle), par conséquent on obtient une augmentation de la dureté superficielle [26]. On évaluera donc l'usure abrasive par des pertes de matières. Classiquement celles ci peuvent être quantifiées par :

- des mesures pondérales,
- des mesures dimensionnelles,
- des études de pollution du lubrifiant par les débris ou produits créés dans la zone de contact,

- l'utilisation de traceurs radioactifs,
- des mesures de microgéométrie,
- analyses microscopiques de l'aire de contact.

Les études portant sur les phénomènes d'usure font en générale intervenir un grand nombre de paramètres, de modes d'observation et de processus physiques. Nous présentons un classement comportant trois parties :

a- Les facteurs de l'usure ou paramètres dont le choix définissent les conditions initiales de l'expérimentation et de l'utilisation (mode de contact, état de surfaces microgéométriques, charge, vitesse, ambiance, nature des matériaux),

b- Les mécanismes ou processus élémentaires, mis en jeu dans la détérioration des surfaces au cours du temps, de l'usure abrasive en priorité ou éventuellement des combinaisons de tout ou en partie des divers processus d'usure (adhésion, érosion, corrosion,...),

c- Les effets les plus fréquemment observés pendant la détérioration des surfaces à savoir la variation de masse, résistance au déplacement, transformations mécaniques, géométriques,

2 - Plan de travail :

Sur le tribomètre Pion-Disque, nous avons étudié l'évolution du coefficient de frottement ainsi que les modifications superficielles en milieu lubrifié avec et sans abrasifs et analysé les surfaces après essais ainsi que les huiles testées. Avec différentes techniques complémentaires, nous avons examiné l'évolution de la structure par une caractérisation métallographique. Nous avons ainsi pu établir une méthode permettant d'augmenter la durée de vie des composants mécaniques en présence d'huile additionnée à des particules abrasives.

Les résultats obtenus complètent les données actuelles, [27,28] sur le frottement des matériaux en contact lubrifié en présence de particules abrasives. Des essais de frottement ont été réalisés sur un équipement spécifique, un tribomètre pion -disque, pour un contact de type plan / plan, permettant de reproduire d'une manière bien contrôlée les régimes de lubrification avec l'utilisation des lubrifiants ne contenant pas d'additifs. Le paramètre hydrodynamique proposé par **Emmens [29]** doit être développé pour des études sur le comportement tribologiques des couples de matériaux et de contacts différents de ceux que nous avons étudiés. Cette étude met en évidence le rôle important de variables fonctionnelles telles que la rugosité, la pression de contact et la nature des différents couples de matériaux utilisés.

Les essais sur le tribomètre pion - disque ont permis de mettre en évidence l'influence marquée de la microgéométrie des surfaces en contact sur le comportement tribologique du contact. Nous avons pris en compte cette microgéométrie des surfaces pour évaluer la portance due à la charge normale pendant le contact. Et avec cela, afin d'évaluer l'effet de portance de la hydrodynamique par l'étude de la force de frottement, nous avons utilisé le modèle théorique du contact statique de **Robbe-Valloire [30]** pour connaître le comportement du contact des aspérités lors de l'écrasement sous l'effet de la charge appliquée. L'approche permet de prendre en compte les trois modes principaux de déformation : élasticité, elastoplasticité et plasticité. La prise en compte de la déformation des aspérités des surfaces après essai sans la déformation due à la charge normale permet de déterminer la véritable portance des forces tangentielles.

L'expérimentation, dans ce domaine, comporte toujours un certain degré de schématisation par rapport aux conditions pratiques d'exploitation des machines et équipements mécaniques, qui sont en général très complexes et mal connues [31]. Si à l'aide d'un usuromètre, on peut mesurer en fonction du temps la perte ou le gain de masse d'un échantillon, l'on observe dans le cas le plus général l'existence d'un régime transitoire suivi d'un régime stabilisé et c'est justement notre travail qui consiste, dans le cas du processus d'abrasion lubrifié, à étudier les surfaces antagonistes vis à vis de ce type d'usure. C'est à dire pratiquer une analyse tribologique approfondie du mécanisme dans le but d'évaluer les risques auxquels sont soumis ces matériaux sous certaines conditions. On doit donc définir la meilleure solution technique en tenant compte des aspects économiques, tout en assurant une fiabilité de fonctionnement et une durée de service optimale.

Dans cette étude on se propose l'étude phénoménologique des surfaces antagonistes lors du frottement lubrifié en présence de particules abrasives. Celles-ci sont des particules de sable dont la dimension est inférieure ou égale à 50 μm et qui arrivent à traverser les filtres dans le cas des moteurs en provoquant des avaries importantes [32]. Par contre les particules de plus grandes dimensions n'y participent pas vu qu'elles sont empêchées soit par le système de filtrage ou/et la valeur de l'intervalle de tolérance des ajustements alors que celles de faibles dimensions ($< 10 \mu\text{m}$) sont balayées par le système de lubrification ou se placent entre les aspérités. Et la concentration des grains abrasifs (sable) est de 2 grammes / litre d'huile. L'huile que l'on va utiliser lors des essais est l'huile Neutral 100 qui se rapproche de celle utilisée dans les moteurs sur les chantiers de forage Algériens. Et à la température moyenne de l'huile prélevée dans les carters des moteurs (qui est de l'ordre de 75°C), la viscosité est : $\mu_{\text{huile}} = 27 \text{ cst}$.

La première partie de ce mémoire est constituée d'une étude bibliographique en trois chapitres essentiels présentant, de façon générale, l'état des connaissances sur le frottement en présence de particules abrasives provenant de l'usure, le rodage (pouvant être une source de l'usure abrasive) et l'influence des particules abrasives provenant de l'environnement extérieur:

- le frottement et ses implications sur les surfaces et le fonctionnement des équipements,
- les régimes de lubrification,
- l'influence des abrasifs (sable) sur le frottement, l'usure et sur la microgéométrie des surfaces de contact.

Beaucoup d'organismes ou d'entreprises, de par le monde, sont amenés, pour des raisons diverses, à faire de la **tribologie appliquée** à propos de tel ou tel de leurs produits, de leurs éléments de machines ou de leurs processus de fabrication. Jusqu'à la fin des années 1980, beaucoup de ces recherches étaient publiées dans des revues de haut niveau comme celles qu'éditaient SKF [33], (roulements à billes, à rouleaux et autres produits), Brown - Boveri (construction de gros matériel électrique, de locomotives, de centrales hydrauliques, thermiques, nucléaires, ...), le Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) et bien d'autres. Quand ces périodiques n'ont pas purement et

simplement disparu, ils ne contiennent plus que de la publicité et des informations d'ordre général sans grand intérêt pour réaliser une étude de pointe. D'autres revues techniques plus générales, qui se nourrissaient de ces publications, en faisaient connaître la substance au public, ont vu leurs sources d'informations taries et leur contenu s'est terriblement appauvri. C'est l'une des raisons (pas la seule) pour lesquelles la bibliographie concernant l'usure abrasive à trois corps dans les paliers lisses mise à votre disposition pourra vous sembler relativement pauvre.

La deuxième partie de ce travail sera consacrée à l'étude détaillée de la partie expérimentale:

- l'influence des lubrifiants pollués sur le frottement, l'usure et sur la microgéométrie des surfaces frottantes,
- les matériaux étudiés,
- l'influence de la microgéométrie de surface sur l'usure abrasive.

L'abrasion est un mécanisme complexe impliquant un grand nombre de phénomènes physiques. La simplification du processus permet, par une approche locale, d'isoler les paramètres influant sur son évolution. Ceux-ci peuvent être identifiés, comme dépendant des variables géométriques, cinématiques, rhéologiques et interfaciales des matériaux antagonistes sans pour toutes fois négliger l'influence des pollutions. Ainsi, il est possible d'affecter à ces paramètres un certain nombre de seuils régissant la phénoménologie globale du procédé étudié : identification des modes de sollicitation et de l'abrasion des surfaces de contact en fonction des paramètres du procédé expérimental.

Par conséquent au cours de cette partie expérimentale, les résultats, des essais qui vont caractériser la morphologie des surfaces dans le cas des paliers lisses lubrifiés en présence de particules abrasives, seront représentés sous forme de courbes expérimentale de Stribeck. Celles-ci, caractérisant le frottement lubrifié, nous donne la valeur du coefficient de frottement en fonction d'un groupement de paramètres tels que la viscosité, la vitesse de glissement, le critère de rugosité et la pression. Et d'autre part ces courbes, nous permettent de définir les conditions d'existence des films continus et discontinus.

La faible quantité de travaux et publications relatives au frottement et usure en présence de particules de sable nous pousse donc à dissocier les différentes parties de ce problème et à faire des analogies avec d'autres procédés ou d'autres études. Et, nous nous intéresseront tout particulièrement aux mécanismes de détachement de particules par analyse des débris d'usure, par des examens morphologiques des surfaces frottantes et par caractérisation profilométrique ; ainsi qu'aux particules abrasives (pollutions) incrustées sur les surfaces de contact d'un couple de matériaux.

Enfin la conclusion synthétise les principaux éléments des travaux et présente les perspectives à mettre en œuvre pour aboutir à une modélisation plus complète du comportement des matériaux au début de la vie des composants mécaniques en service. Ce travail permettra dans le futur en utilisant les paramètres hydrodynamiques normalisés en design et / ou en conception de projets et même en production de contrôler les régimes de lubrification et les endommagements superficiels résultants lors d'un frottement lubrifié en présence de particules abrasives.

A. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE:

I. Concept (ou système) tribologique :

Un système tribologique est composé de trois éléments principaux:

- Le matériau étudié ; son antagoniste c'est-à-dire contre lequel il s'use ;
- Les éléments à l'interface ;
- L'environnement (température, humidité, lubrifiant, présence des pollutions).

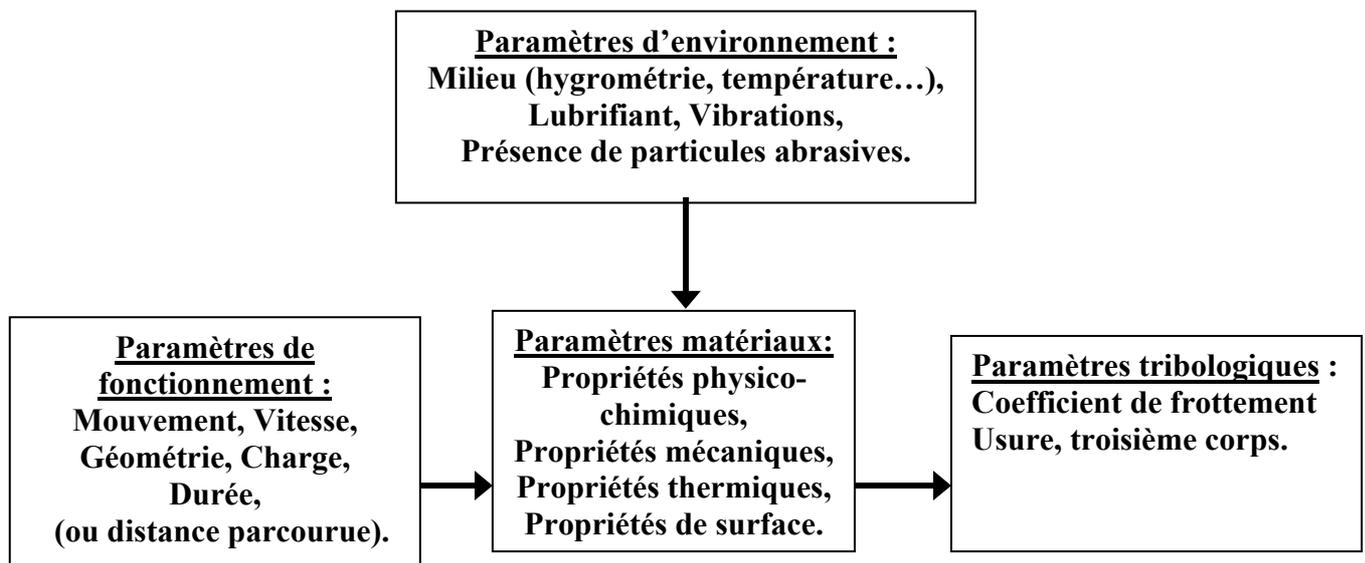


Figure 1 : Synoptique général d'un système tribologique,

En d'autres termes le système tribologique (**figure 1**), se définit comme un système mécanique, formé de deux matériaux antagonistes en contact, animés de mouvements relatifs. Ces deux solides évoluent dans un milieu ambiant et peuvent être séparés par un film intercalaire appelé troisième corps. Sur le plan tribologique, le troisième corps est un opérateur qui transmet la charge (ou portance) d'un premier corps sur l'autre et accommode en s'écoulant (débit) d'une façon dissipative (frottement) l'essentiel de la différence de vitesse entre deux corps. Les troisièmes corps séparent partiellement ou entièrement les premiers corps. Ils sont introduits dans le contact ou bien par entraînement cinématique (lubrifiants solides ou liquides) ou par formation in situ (particules détachées).

L'interface d'un tel système devient alors le siège de phénomènes dissipatifs d'énergie, regroupés sous le terme générique de frottement.

1.1. Premiers corps :

Ce sont les matériaux qui bordent le contact. Ils interviennent par leur géométrie, leurs propriétés thermo élastiques, qui, pour les sollicitations transmises par la charge et le déplacement, conduisent à leurs déformations qui forment les zones élémentaires de contact. Cette intervention des matériaux est indirecte car elle s'effectue via la géométrie des 1ers corps. En revanche, leur action est directe sur les zones élémentaires de contact, où cette fois les matériaux répondent aux sollicitations tribologiques locales. Ces sollicitations sont qualifiées de tribologiques car c'est le seul cas de figure où existe ce type de chargement (force normale et déplacement imposés).

Sur une profondeur allant de quelques nanomètres à une cinquantaine de micromètres, les 1ers corps réagissent à ces sollicitations par : la fissuration, les changements de phases, de structures qui conduisent par fragmentation au détachement de particules d'une taille élémentaire comprise entre le nanomètre et quelques micromètres. Pour attirer l'attention sur le fait que ces changements de phases sont plus induits par la pression et les déformations que par la température, ils sont appelés Transformations Tribologiques Superficielles (TTS).

Un revêtement ou traitement de surface fait partie intégrante des 1ers corps alors que les couches d'oxydes, de pollution présentent initialement sur les 1ers corps font partie du 3ème corps.

1.2. Troisième corps :

Il s'agit du volume de matière présent entre les 1ers corps. C'est un 'opérateur' qui sépare les 1ers corps, transmet la charge (portance) entre les 1ers corps tout en accommodant la majeure partie de leur différence de vitesse. Le 3ème corps est dit

naturel lorsqu'il est issu de l'un ou des deux 1ers corps ou lorsqu'il se forme sur l'un ou les deux 1ers corps. Il est artificiel lorsqu'il est apporté dans le contact comme pour la lubrification solide ou fluide. Un 3ème corps naturel implique une période de formation par détachement de particules des 1ers corps. La présence d'un corps intermédiaire entre les deux surfaces de contact et en particulier les oxydes apportent une amélioration dans le comportement des métaux en abaissant la valeur du coefficient de frottement évitant ainsi le grippage instantané et réduisant l'usure.

1.3. Les surfaces :

Par définition, la surface d'un corps est le lieu des points séparant ce corps du milieu environnant. Elle correspond donc à une discontinuité dans l'aménagement périodique des atomes de celui-ci. En surface, le nombre de plus proches voisins est différent de ce qu'il est en volume. On parle aussi d'interface solide-gaz, solide-liquide, solide-solide. La notion d'état de surface comprend :

- l'état physico-chimique (nature, structure, texture des couches superficielles)
- l'état géométrique (ensemble des écarts géométriques de la surface réelle par rapport à la surface géométrique idéale).

En réalité, le terme surface représente une couche d'épaisseur comprise entre 10^{-2} et 10^{-6} mm. La composition chimique et les propriétés mécaniques de cette zone peuvent être très différentes de celles du cœur du matériau. La surface peut être recouverte de films contaminant (gaz adsorbés, produits organiques), d'oxydes et dans le cas de métaux, peut être écrouie. La présence de ces écrans va modifier le comportement tribologiques des corps en contact.

1.4. Le contact :

Le contact peut être selon les géométries des corps :

- ponctuel (sphère/sphère, sphère /plan,...),
- linéaire (cylindre/plan),
- surfacique (rotule dans sphère),
- conformel (cylindre/cylindre) ou contraformel (cylindre dans cylindre creux).

Le contact statique entre deux solides ne s'effectue donc pas sur la surface apparente commune aux deux solides, mais sur un ensemble de zones discrètes (aussi appelées aspérités) dont la somme des aires donne la surface réelle de contact. Dans le cas d'un frottement de glissement, les zones de contact sont sans cesse renouvelées. Le rapport aire réelle sur aire apparente peut varier de façon significative : il est alors plus facile de raisonner en terme de force appliquée plutôt que de pression. La surface réelle de contact est sensible à la charge appliquée. De nombreuses études se sont intéressées à la variation de l'aire réelle de contact en fonction du mode de déformation des aspérités : élastiques pour le modèle d'**Archard** [34], élasto-plastiques pour le modèle de **Greenwood-Williamson** [35]. Plus récemment, **Robbe-Valloire** [30] a publié un modèle intégrant les déformations élastiques, élasto-plastiques mais aussi totalement plastiques des aspérités.

1.5. L'enlèvement de matière par abrasion :

L'usure est un ensemble complexe de phénomènes, amenant une émission de débris avec perte de masse, de côtes, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces. Elle ne varie généralement pas de manière progressive en fonction de paramètres comme la vitesse, la température ou le temps. Si certaines formes d'usure sont relativement régulières, d'autres au contraire connaissent des sauts très brutaux, dans des rapports pouvant aller parfois de 1 à 100 000 ou plus, lorsque certaines valeurs critiques sont franchies. Le mouvement relatif d'un couple de matériau peut détruire les surfaces de contact et que les débris commencent leur vie dans le contact. Si les débris sont piégés dans le contact, le contact à deux corps devient un contact à trois corps.

1.5.1. Les modèles d'abrasion :

Il est essentiel de comprendre les mécanismes physiques de l'enlèvement de matière

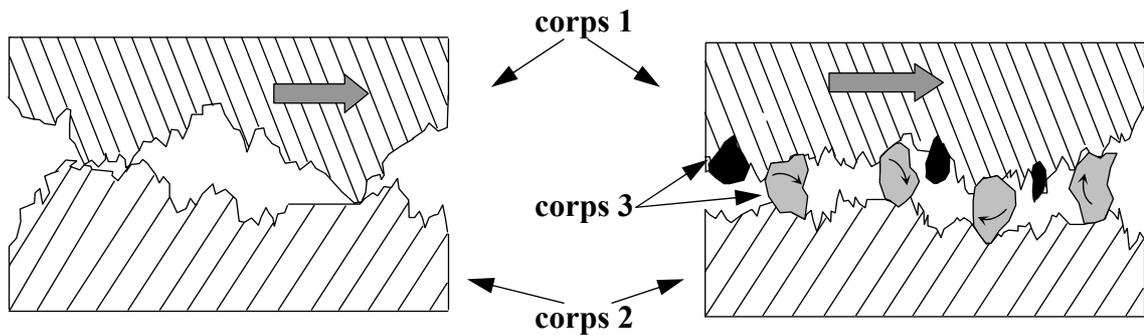
avant de pouvoir expliquer l'influence du rôle de l'environnement dans un concept tribologique donnée. La compréhension et la formalisation de l'usure par abrasion de surfaces en frottement a fait l'objet de nombreux travaux depuis une cinquantaine d'années. **Archard** [34 ; 36 ; 37] en particulier a beaucoup travaillé sur l'usure non lubrifiée des métaux et a développé une loi d'usure applicable dans de nombreuses situations en s'appuyant sur ses travaux antérieurs. La nature des liaisons atomiques détermine le comportement d'un matériau et notamment sa dureté et son module d'élasticité. Elle détermine de plus généralement le mécanisme d'enlèvement de matière. Les métaux, caractérisés par des liaisons métalliques dans lesquelles les électrons de valence sont partagés librement entre les atomes de la structure, sont usinés typiquement en régime ductile, c'est à dire avec un écoulement plastique de la matière et la formation de copeaux.

1.5.2. Les types d'abrasion :

L'usure par abrasion d'un corps est provoquée par le glissement à sa surface d'un autre corps. Sous l'effet de la force normale appliquée entre ces deux corps, les "agents d'abrasion", qui peuvent être, soit des aspérités de l'autre corps, soit des particules plus ou moins libres engendrées par l'un des deux corps ou étrangères aux deux l'indentent et enlèvent des particules en se déplaçant. Quel que soit le mécanisme par lequel une surface s'use, il provoque progressivement la modification de la microtopographie de cette surface. Le microrelief final est bien souvent caractéristique du ou des mécanismes impliqués. Ces agents d'abrasion peuvent être de diverses natures, et liés ou non à l'un des deux corps. Suivant les cas, on distinguera deux cas distincts:

- Si les particules dures qui constituent l'abrasif sont fixées à la surface du corps antagoniste et qu'elles se déplacent à la surface du corps étudié sans rouler, on parlera d'**abrasion deux corps**.

- Si maintenant ces particules sont indépendantes des deux surfaces en mouvement relatif et qu'elles sont libres d'indenter ces deux surfaces, animées d'un mouvement de translation et de rotation, c'est de l'**abrasion à trois corps**.



Abrasion à deux corps

Abrasion à trois corps

Figure 2 : Schématisation des mécanismes d'usure par abrasion,

En général, on observe deux faciès d'abrasion : l'un par stries, analogue à celui de l'abrasion deux corps, l'autre par cratères attribué à l'abrasion trois corps : la matière peut être en effet enlevée par des abrasifs coupants emprisonnés dans le contact mécanique, ou par des particules roulantes qui laissent des traces d'indentations comme nous l'avons vu précédemment. Dans les deux cas, on peut avoir affaire à de la déformation plastique ou à de la rupture fragile si le chargement sur la particule abrasive dépasse le seuil de rupture du matériau,

II. Frottement entre matériaux métalliques:

Le coefficient de frottement peut être défini comme étant " le rapport de la force tangentielle qui s'oppose au mouvement entre deux corps à la force normale qui les appuie l'un sur l'autre "[9]. De nombreux facteurs interviennent dans le frottement et l'usure ; liés tant à la nature constituant les deux corps qu'à leurs géométrie, à la topographie de leurs surfaces, à l'ambiance baignant le mécanisme,... . Un essai de frottement n'est significatif que si tous ces éléments (paramètres) sont précisés. L'usure varie avec la charge pressant les deux corps ; la vitesse de glissement, le rayon de courbure des pièces en contact, la rugosité (valeur et forme) la température, ... [38]. Un système tribologique passe normalement par trois phases de frottement et d'usure successives au cours de son exploitation :

◆ **l'ultime finition** des surfaces lors du **rodage** (ou dès leur première utilisation): les actions sur les grosses aspérités diminuent avec le temps, les pics sont arasés

progressivement tandis que les vallées restent intactes. Le taux d'usure et le facteur de frottement baissent, les portées s'améliorent, les films d'huile s'amincissent. Une nouvelle topographie remplace la rugosité initiale de la pièce. Si l'usure se ralentit lors de la mise en fonctionnement, on constate alors une amélioration de l'état de surface, et réciproquement. Durant cette période l'usure, sensible au début, diminue progressivement à mesure de l'accommodement des surfaces, sans compromettre le fonctionnement, sous réserve de prendre des précautions : mise en vitesse et mise en charge progressives, surveillance de l'échauffement, graissage plus abondant que la normale. L'état de surface s'améliore du fait de la réduction progressive des rugosités.

Il y a modification des jeux d'origine, du fait de la réduction des aspérités; Ces modifications dépendent directement des états de surfaces initiaux. Dans le cas des machines-outils, la conception comme l'usinage doivent permettre le minimum de variation des jeux existant au départ. Il est possible de faciliter le rodage, soit en prévoyant des états de surfaces corrects avant mise en route, soit en effectuant avant montage un pré traitement de surface avec un lubrifiant solide : la durée du rodage et de l'usure en sera diminuée. Il en est de même dans le cas des surfaces transformées par traitement thermochimique ou électrochimique.

◆ la **vie utile** correspond à un régime d'**usure douce** (période d'exploitation rationnelle et fiable): la couche superficielle très dure qui semble se former est éliminée peu à peu sous forme de petites écailles. L'usure douce diminue la rugosité, tandis que l'usure sévère l'accroît. En d'autres termes, c'est la période de marche normale, pendant laquelle l'usure doit être très faible, et demeurer sensiblement constante afin d'assurer une certaine fiabilité et longévité de service.

◆ enfin, la **vieillesse** se caractérise par une usure sévère qui aboutit à la mise hors d'usage de la pièce considérée ou du mécanisme. La période de vieillissement est, plus ou moins rapidement atteinte, selon les valeurs des contraintes admises lors du calcul du mécanisme, pendant laquelle l'usure va commencer à augmenter jusqu'à ce qu'elle compromette le bon fonctionnement ou le rendement mécanique global, sous les effets conjugués de la fatigue des métaux, de l'usure sous ses différentes formes et des jeux accrus. La durée de cette période sera fonction du système de remplacement périodique envisagé dans

le plan d'entretien. Il est évident que, dans le cas d'un élément mécanique dont la carence signifierait une forte perte pour l'entreprise, les dispositions doivent être prises, dès l'origine, pour que le délai d'usure normale couvre largement la période entre deux arrêts volontaires.

Les débris d'usure portent en eux l'histoire de leur formation et l'examen des particules de fer dans les lubrifiants, ou **ferrographie**, apporte de précieuses informations [39]. Les processus d'avarie produisent des particules pouvant atteindre 0,1 mm, mais les débris d'usure douce ont moins de 15 micromètres dans le cas général. Même après une vidange, il y a un rapide rééquilibre dans un lubrifiant entre la production des particules et leur élimination par décantation, filtration, rétention par un bouchon magnétique pour certains types de matériaux,...

Les phénomènes de frottement entre corps solides sont conditionnés en général par les facteurs principaux suivants :

- ◆ conditions cinématiques des déplacements relatifs (nature géométrique des surfaces de contact, nature des mouvements relatifs),
- ◆ influence des corps interposés (nature des lubrifiants, nature de la présence de particules polluantes),
- ◆ nature physico-chimique des surfaces, dans le cas d'un contact direct.

Par contre **Courtel** [40] envisage les phénomènes de frottement et d'usure à deux niveaux d'observation :

a - Echelle microscopique:

C'est l'échelle des interactions moléculaires, des processus élémentaires de contact entre aspérités individuelles (accompagnés ou non de soudures locales), et des mécanismes de déformation plastique des solides (dislocations glissements cristallins, ...). L'observation atteint là les mécanismes élémentaires du frottement, de l'usure, et de l'adhésion.

b - Echelle macroscopique:

Celle ci ne permet de savoir que la résultante statistique des nombreux processus, ci dessus mentionnés, qui ont pris place dans le volume et la durée caractérisant l'observation considérée, les milieux solides se comportent alors comme continus et même souvent comme homogènes.

Le calcul du coefficient de frottement est issu du modèle cinématique local des zones déformées au cours du chargement en mouvement. Toutes les lois du frottement font apparaître des paramètres différents en fonction des besoins des utilisateurs. Il n'existe donc pas de loi généralisée pour décrire le frottement, mais un catalogue de fonctions représentatives d'un système tribologique à un instant donné. Il est difficilement envisageable de considérer un système tribologique dont la nature dépendrait du temps car il faudrait pouvoir raccorder les différents modèles utilisés au fil de l'expérience.

Il est utile de connaître les mécanismes du frottement pour comprendre les processus de l'usure et savoir comment les influencer. Mais le praticien veut surtout calculer la valeur des forces de frottement qui interviennent dans le fonctionnement des machines. L'expérience conduit à formuler les lois de frottement suivantes :

- la force de frottement est proportionnelle à la force normale d'appui;
- la force de frottement entre des surfaces planes est indépendante de l'aire de la surface de contact nominale (apparente);
- la force de frottement est opposée à la vitesse de glissement.

Ces lois s'expriment par la relation fondamentale, dite de **Coulomb**,

$$\mathbf{F} = \mu \mathbf{N}$$

Le coefficient de frottement et la perte de masse sont des caractéristiques essentielles pour caractériser le comportement tribologique des matériaux. Dans la littérature, les résultats rapportés ont été obtenus grâce à des dispositifs souvent

différents et dans des conditions expérimentales assez diverses (pressions, vitesses,...) ainsi que des frotteurs de différentes natures. L'abaissement du coefficient de frottement passe par la maîtrise des efforts résistants d'origine mécanique (effets de la déformation) et physicochimiques (force d'adhérence).

L'étude du frottement se révèle une tâche complexe mettant en jeu plusieurs phénomènes d'origine mécanique ou chimique. Le frottement se manifeste par des forces de frottement qui s'opposent au déplacement relatif des corps en contact, mais aussi par leur usure. Ces deux mécanismes sont très dépendants l'un de l'autre. Les phénomènes de frottement ne sont pas décrits par des propriétés intrinsèques des matériaux, ce qui rend leur prédiction particulièrement délicate. En outre, le frottement et l'usure sont des phénomènes indépendants [41]. Il est en effet possible de concevoir des systèmes à usure faible et frottement élevé (le cas des freins par exemple) ou à usure forte et frottement faible (obtenu au cours de l'usinage par enlèvement de matière).

Les conditions de frottement dépendent considérablement de l'aire de contact. Les surfaces n'étant jamais parfaites géométriquement, la charge appliquée aux solides en contact se répartit sur un petit nombre d'arêtes et de pics. Il s'ensuit que même pour des charges moyennes, la pression de contact est très grande et peut être assez élevée pour provoquer des déformations plastiques au voisinage des points de contact. On considère en général que le frottement met en jeu des interactions atomiques, quelque fois des accrochages mécaniques qui se traduisent par une force qui maintient les solides l'un contre l'autre : force d'adhésion. Il est prouvé que l'effet est d'autant plus marqué qu'il se produit des déformations plastiques locales ou localisés. **Bowden et Tabor [9]** suggèrent que les sommets des irrégularités qui supportent les corps coulent plastiquement et s'écrasent jusqu'à ce que leur section leur permette de supporter la charge appliquée.

La théorie de l'adhérence du frottement est actuellement la plus acceptée, et elle suffit pour expliquer de nombreux résultats obtenus. Elle est basée sur le fait que le contact des surfaces s'effectue par leurs aspérités. La pression au contact de chacune de ces aspérités est très élevée, précisément parce que la surface réelle de contact est très petite. En fait la pression de contact atteint la limite de la résistance de la matière sous pression et il en résulte un écoulement plastique.

Selon cette théorie, le coefficient de frottement est égal à la somme de deux facteurs, l'un de cisaillement et l'autre de labourage.

$$F = F_{adh} + F_{lab}$$

où F : force de frottement,
 F_{adh} : force de cisaillement,
 F_{lab} : force de labourage.

Pour qu'un métal ait de bonnes propriétés de frottement et d'usure, il faudrait concilier simultanément de hautes caractéristiques de résistance telles que le module de **Young**, la limite de fatigue, avec de bonnes caractéristiques de ductilité comme l'allongement, la striction. Mais ces deux groupes de caractéristiques sont antagonistes, vu que les propriétés varient en sens inverse. On fait subir au matériau un traitement de durcissement superficiel afin de palier cette incompatibilité. Ceci provoque, par conséquent, la modification de la structure en surface, le matériau présentera superficiellement une couche très dure tout en ayant au cœur de bonnes caractéristiques de résilience. Le durcissement est dû à la formation superficielle de constituants durs.

Dans le cas du frottement, à haute température par exemple, des matériaux métalliques dans l'état non oxydé, la température a pour effet d'intensifier les phénomènes d'adhésion, d'usure et de frottement sur les surfaces en contact, et, surtout lorsque son action est combinée à des sollicitations mécaniques. Cela se traduit par un accroissement du coefficient de frottement, et s'accompagnent généralement de transferts métalliques et usure importantes ainsi que des détériorations rapides des surfaces pouvant aller jusqu'au grippage [42].

Par contre l'existence des couches d'oxydes qui se forment naturellement sur les matériaux lorsque la température s'élève, a été reconnue par la plupart des chercheurs, comme évitant l'adhésion ou tout au moins comme repoussant son apparition vers des taux de déformations et des températures plus élevées, et un abaissement du coefficient de frottement. La stabilité de l'oxyde à haute température est fonction de l'ambiance: nature et pression. En ambiance oxydante, certains oxydes peuvent se reconstituer suffisamment rapidement, et jouer leur rôle d'inhibiteur d'adhésion, le problème devient plus

délicat sous vide ou en ambiance neutre. Le film doit être créé à l'avance et posséder les caractéristiques qui lui permettront d'une part d'assurer sa fonction de protecteur d'autre part de durer dans le temps afin d'assurer une fiabilité de fonctionnement des mécanismes. Dans le vide, on retrouve pratiquement tous les types d'usure existants tels que l'usure abrasive, adhésive, par fatigue ..., avec une prépondérance pour l'usure adhésive.

Modèle théorique de calcul du coefficient de frottement :

La surface réelle de contact ne peut être facilement mesurée, alors on a imaginé plusieurs modèles théoriques qui permettent de l'évaluer en fonction de la charge totale **P**. Parmi ceux-ci nous avons retenu le modèle plastique qui suppose que les déformations des aspérités en contact appartiennent au domaine plastique. Celui-ci découle des études expérimentales réalisées par **Bowden-Tabor [9]** ainsi que **Kragelsky [43]** qui ont confirmé que la surface réelle de contact est proportionnelle à la charge, indépendante de la surface apparente de contact et ne représente qu'une faible partie de cette dernière. Dans ce cas l'aire réelle de contact s'écrit:

$$A_r = N / P_o \quad \text{où : } A_r: \text{ aire réelle de contact,}$$

$$P_o: \text{ pression d'écoulement du matériau le plus tendre,}$$

$$N: \text{ charge normale.}$$

Si la composante de déformation ou de labourage est négligeable, la force de frottement devient :

$$F = (N/P_o) \cdot \sigma \quad \text{d'où le coefficient } f \text{ devient:} \quad f = F / N = \sigma / P_o$$

où σ : résistance au cisaillement, soit des soudures, soit du matériau (ou de la couche rajoutée) le plus tendre.

En tenant compte de la croissance de l'aire de contact due à l'action combinée de la charge normale et de l'effort tangentiel, on obtient l'expression du coefficient de frottement : (**figure 3**).

$$\mu_{adh} = [(1 / C). [(Ar / Ao)^2 - 1]]^{1/2}$$

sachant que : $F_{adh} = Ao.S$

- où **S** : contrainte au cisaillement,
C: constante caractéristique du matériau, $3 < C < 25$,
Ar: aire réelle de contact sous la charge normale lors du glissement,
Ao: aire réelle de contact sous la charge normale.

Par contre l'expression du coefficient de frottement lors du labourage ou chariotage est donnée par :

$$\mu_{lab} = At / Ar \quad (F_{lab} = At. Pm)$$

- où **At** : projection de l'aire dans un plan normal à l'interface,
pm: pression spécifique de fluage.

Cette relation du coefficient de frottement ne tient pas compte des propriétés physiques, chimiques, métallurgiques et celles physico-chimiques des surfaces. Rabinowicz a complété cette théorie de comportement tribologique (cas particulier de l'adhésion) en introduisant la notion d'énergie de surfaces :

$$f \approx \sigma / [P_0 - (2\omega_{ab} \cdot \cot \theta) / r] \quad \text{avec} \quad \omega_{ab} = \gamma_a + \gamma_b - \gamma_{ab}$$

- Où ω_{ab} : énergie des surfaces dépendants des matériaux, de la température, des films adsorbés et de l'oxydation des surfaces en contact,
 θ : demi- angle au sommet des aspérités,
r : rayon des jonctions,
 γ_a, γ_b : énergies des surfaces unitaires,
 γ_{ab} : énergie interfaciale.

III. Conséquences du frottement:

Pour que le frottement et l'usure entre solides ne soit pas dominant, il faut que les deux surfaces soient maintenues à une distance suffisante. Il est donc nécessaire qu'à l'endroit où le film est le plus mince, la distance entre les surfaces ne descende pas en dessous d'un certain minimum. Si le contact entre deux corps rugueux chargés l'un sur l'autre s'établit sur le sommet des aspérités (**figure 3**), alors dans le cas des métaux élasto - plastiques, les aspérités soumises à de fortes pressions s'écoulent, atteignent rapidement l'état plastique et se stabilisent à un moment donné. En même temps, on obtient des liaisons adhésives très solides, des détachements de matières qui provoquent l'usure abrasive dont l'importance dépend de l'évacuation des particules abrasives par le fluide lubrifiant [44]. Et des fois le rapprochement des atomes de chacun des corps métalliques, constituant le couple de frottement, est suffisant pour donner naissance à des jonctions métalliques qui peuvent constituer de véritables soudures pouvant conduire au grippage [45].

L'usure est un ensemble complexe de phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission de débris avec perte de masse, de cote, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces. De cette approche, un certain nombre de lois d'usure ont vu le jour, souvent seulement valides sur les essais même qui les ont vues naître. Le nombre conséquent de paramètres mis en jeu dans ces lois et la présence de coefficients variant d'une dizaine d'ordre de grandeur ne permettent pas d'appréhender d'usure dans sa globalité, et encore moins de manière prédictive. L'usure est généralement combattue à cause de ses effets négatifs mais elle présente aussi des aspects favorables. L'affûtage d'un outil, la finition d'une surface par rectification, l'écriture de la craie sur le tableau ou du crayon sur le papier sont des exemples d'usures abrasives utiles. Quand il est bien conduit, le rodage d'un mécanisme, c'est-à-dire la phase de fonctionnement où les pièces "apprennent à vivre ensemble" (accommodation des surfaces en contact), provoque des usures qui se révéleront "protectrices" lors des phases suivantes ; assurant par conséquent une meilleure longévité de service du mécanisme. La longévité d'un mécanisme est définie par la durée de fonctionnement jusqu'à ce que le jeu entre des surfaces conjuguées devienne inadmissible par suite à une forte usure ou dégradations des surfaces fonctionnelles.

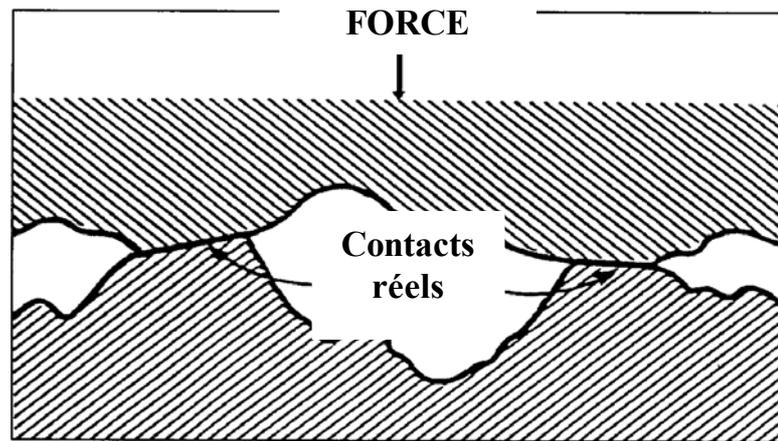


Figure 3 : Aire réelle de contact entre deux surfaces chargées

L'état de surface est un facteur très important dans le comportement de tout le système tribologique. Il est normalement quantifié par les paramètres de rugosité qui caractérisent la surface. Quand les deux surfaces commencent à s'approcher, ce sont les aspérités les plus élevées qui entrent en contact et ensuite elles se déforment. Dans le rapport entre la force normale et l'écrasement des aspérités, on voit que la population des aspérités en contact augmente avec l'effort normal appliqué. La modélisation du contact statique permet de prendre en compte les trois modes principaux de déformation : élastique, élastoplastique et plastique. Sur le plan phénoménologique, différents mécanismes de déformation peuvent être activés à l'échelle de chacune des aspérités :

- Pour les aspérités faiblement sollicitées, les déformations sont suffisamment faibles pour rester réversibles, de telles aspérités travaillent avec un mécanisme de déformation élastique,
- Pour des aspérités plus sollicitées, le seuil de déformation élastique est dépassé localement. Les déformations élastiques et plastiques coexistent et le mécanisme de déformation est du type élastoplastique,
- Pour les sollicitations les plus importantes, la déformation plastique se généralise sur l'ensemble de la zone de contact.

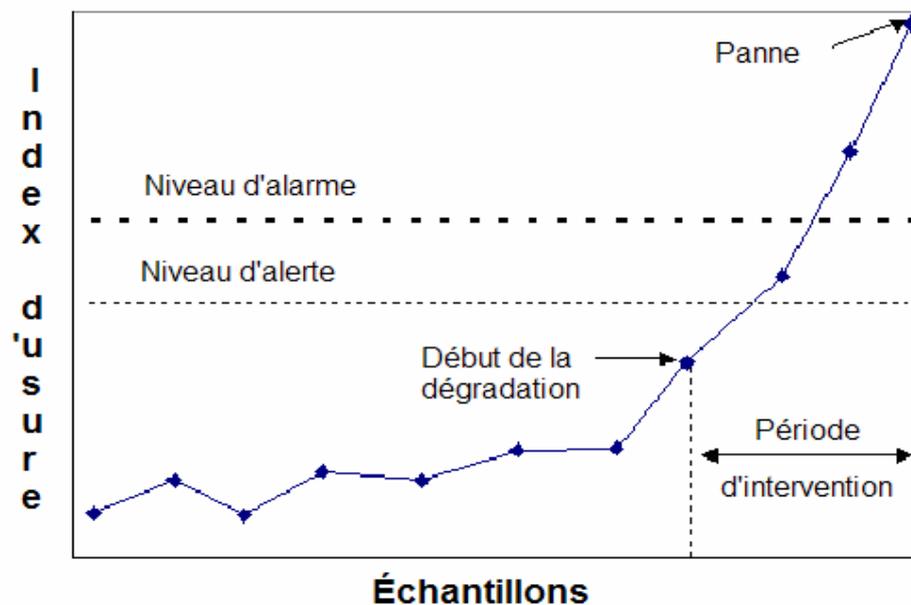


Figure 4 : Courbe de tendance de l'évolution de l'usure [45].

A partir de la courbe de tendance de la **figure 4**, représentant graphiquement les valeurs obtenues par des échantillonnages successifs, il est possible de définir des niveaux d'alarme [45]. Ceci est extrêmement important et permet de définir une période de temps avec une marge de sûreté pendant laquelle les interventions préventives seront effectuées avant l'apparition d'une panne (changement de lubrifiant, changement de composants,).

pertes relatives par le phénomène d'usure	
abrasion	30 %
adhésion	15 %
fatigue de surface	15 %
fatigue thermique	12 %
corrosion de contact	10 %
corrosion	10 %
cavitation	8 %

Tableau 1 : Importance des pertes par usure [47]

Il est admet actuellement que la vie d'un mécanisme comporte normalement trois phases : rodage, vie utile, vieillesse. L'usure est rapide en début de rodage et pendant la vieillesse [46]. L'importance relative des différents modes d'usure est donnée à titre indicatif dans le **tableau [1]** de la page précédente.

Dans la plupart du temps, l'usure globale d'un mécanisme est due à plusieurs processus qui agissent simultanément, plus rarement à un processus bien défini et identifiable. L'effet de ces actions simultanées est souvent plus important que la somme des effets que l'on produirait en faisant agir séparément les divers processus ; ce qui est une source d'incertitude et de complexité dans l'étude. Selon Kragelsky [48], on distingue cinq (05) types de déformation principale:

- ◆ la **déformation élastique** du matériau par les saillies du corps antagoniste ayant lieu si les contraintes ne dépassent pas la limite d'écoulement dans la zone de contact. L'usure n'est alors possible que par fatigue, le passage répété du corps frottant produisant des microfissures de traction perpendiculaires à la surface.

- ◆ un **repoussage plastique** se produit si les contraintes de contact atteignent la limite d'écoulement et si le matériau contourne les saillies du corps antagoniste. L'usure résulte dans ce cas, après un petit nombre de cycles, de la fatigue provoquée par le contact frottant.

- ◆ la **microcoupe** survient si les contraintes dans la zone de contact atteignent la limite de rupture ou si le contournement des saillies par le matériau déformé s'interrompt. La détérioration a lieu alors au début de l'interaction. La coupe est due aux aspérités, aux particules détachées et aux arêtes des cavités déjà formées.

- ◆ la **rupture par cisaillement** de l'interface de friction ne provoque pas de détériorations immédiates mais s'ajoute aux contraintes et aux déformations agissant au contact, favorisant les processus de fatigue.

- ◆ la **rupture par arrachement** a lieu quand la résistance de l'interface dépasse

celle du matériau sous-jacent, ce qui peut conduire à un éventuel grippage. Comme dans le troisième cas (la microcoupe), l'usure intervient dès les premières étapes de l'interaction. L'adhésion des aspérités est favorisée par les déformations plastiques et le raclage des couches oxydées et contaminées.

L'usure est un phénomène évolutif et irréversible ; chaque état d'un système détruit définitivement l'état précédent, de sorte qu'il est très difficile, voire impossible, de reconstituer le passé à partir du constat d'une dégradation. La compréhension d'un phénomène d'usure nécessite que l'on puisse enregistrer, si possible en continu, les divers paramètres permettant de caractériser l'état du système étudié au fil du temps. Malheureusement, ces paramètres sont très nombreux, on estime par exemple qu'il en faut entre 100 et 200 pour définir les seules caractéristiques géométriques d'une des surfaces frottantes et il faut encore caractériser l'autre surface, l'état physicochimique des matériaux sur une profondeur suffisante, l'état et la composition de l'ambiance, les facteurs thermiques et mécaniques, ... [49]. Tout cela n'est réalisable que pour des essais en laboratoire mais qui se révèle en général impossible pour un mécanisme réel en fonctionnement. Bien souvent, l'expert chargé de donner son avis ne peut émettre que des hypothèses, auxquelles il se cantonnera s'il est honnête.

Holm [50] a posé une base logique pour estimer l'amplitude de l'usure : si on estime le taux d'usure comme le volume de matière enlevée par unité de longueur de glissement (soit la dimension d'une aire), la sévérité de ce taux d'usure peut être évaluée en le comparant à l'aire réelle de contact. En effet, deux surfaces en contact ne se touchent que par l'extrémité de leurs aspérités les plus hautes et cette aire de contact est déterminée par la déformation du matériau dans ces régions sous l'effet de la force normale appliquée. L'aire réelle de contact résultante, qui est en général une petite part de l'aire apparente de contact, comprend alors une multitude de petites aires individuelles dont le nombre, la taille et la distance de séparation vont influencer certaines observations (la résistance électrique de contact par exemple).

Archard et Hirst [36] trouvent également le taux d'usure indépendant de l'aire apparente de contact et proportionnel à la force normale. Ils classent alors l'usure des métaux en deux catégories : usures douce et sévère. Dans le premier cas, les

surfaces restent peu attaquées et sont protégées par des couches d'oxyde de surface. Les débris font quelques dizaines de nanomètres. L'usure sévère en revanche est le résultat d'un contact plus marqué : les débris sont des particules métalliques d'une taille de l'ordre du millimètre. **Rabinowicz [13 ; 51]** complète cette classification en y ajoutant une usure minimale, qui représente le plus faible taux d'usure possible, l'usure se faisant à l'échelle moléculaire.

L'expertise dans le cas des paliers des moteurs, par exemple, ne peut rien donner de concret, les matériaux des couches superficielles ont été dénaturés, dispersés dans tout le moteur sous forme de fines particules et pour une bonne part, éliminés lors des vidanges précédentes. La forme « catastrophique » de l'usure constatée le jour du démontage n'a probablement rien à voir avec le phénomène anormal qui est à l'origine de l'endommagement. On ne peut pas savoir par exemple dans le cas d'un mauvais démarrage si cela est dû à un défaut de la came, ou à un défaut du poussoir, ou à une incompatibilité entre les surfaces de ces deux pièces, ou encore à une cause extérieure, ce qui rend délicat la maintenance et l'exploitation des machines et équipements.

Selon les applications mécaniques, le résultat attendu du phénomène de l'usure abrasive est souvent contradictoire, on cherche à obtenir :

- usure et frottement minimaux dans les paliers, engrenages, cames, glissières;
- usure minimale et frottement maximal dans les freins, embrayages, roues;
- usure maximale par les meules et les limes ;
- dans d'autres cas on utilise le frottement combiné avec des dispositions géométriques appropriées pour obtenir le blocage de tout mouvement relatif des pièces en contact : vis et écrous, coins, goupilles.

IV. Paramètres influents sur le comportement tribologique des matériaux :

Dans les paragraphes précédents, on a vu que le frottement, l'usure et l'adhésion sont dépendants de plusieurs paramètres qui interviennent directement

dans le comportement tribologique du couple de matériaux dans des situations bien définies. Dans ce paragraphe on va étudier l'influence du couple de matériaux (nature, systèmes cristallins, différentes températures des diverses transformations structurales éventuelles des matériaux, solubilité, propriétés mécaniques, ...) et ainsi que ceux concernant les paramètres extérieurs à savoir : ambiance du frottement, température, vitesse, charge, ..., dans le cas de contacts mécaniques [49].

Dans le cas d'un contact à deux corps, c'est la mécanique des contacts qui est utilisée. Elle donne en statique pour une charge normale, en fonction des propriétés mécaniques des massifs et de la géométrie des surfaces en contact, la répartition des contraintes normales et tangentielles et les déplacements correspondants. En dynamique cette théorie est difficilement utilisable car le calcul des contraintes tangentielles et les déplacements induits repose sur des hypothèses fort discutées.

Une théorie globale du frottement avec troisième corps solide est pour l'instant délicate à réaliser car c'est un domaine pluridisciplinaire (mécanique, thermique, science des matériaux, physicochimie), où chaque discipline ne peut formaliser le problème à elle seule. Godet [10] ayant élaboré un concept phénoménologique à partir d'observations expérimentales, qui permet de rendre compte du comportement d'un contact en frottement. Ce concept s'appuie sur les notions de triplet tribologique, de mécanisme d'accommodation de vitesse et de circuit tribologique.

Néanmoins, le circuit tribologique global de ce système tribologique à trois contacts, dans le cas des moteurs, met en évidence que ce qui est appelé classiquement "l'usure des segments", c'est à dire l'activation du débit source interne de troisième corps, dépend directement de l'interaction des segments, car le débit d'usure, véritable usure, ne s'effectue qu'au travers des débits externes de troisième corps présent sur le cylindre.

Le choix d'un couple de matériaux de frottement est un problème d'optimisation entre des propriétés et qualités, [52] souvent contradictoires :

◆ propriétés techniques : facilité de mise en œuvre, conformabilité, absorption de particules abrasives, autoréparation par comblement des rayures, dureté minimale de l'antagoniste, un bon comportement tribologique en cas de lubrification déficiente ou d'incident, une meilleure réaction face à l'augmentation du jeu, facilité de réparation ou d'échange, aptitude au soudage sur un support,

◆ propriétés physico-chimiques : masse volumique, température limite d'utilisation, coefficient de dilatation, conductivité thermique, conductivité électrique, résistance à l'oxydation et à la corrosion, mouillabilité par les lubrifiants, aptitude aux traitements,

◆ propriétés mécaniques : dureté, limite élastique, résistance à la compression, au fluage, à la fatigue, résilience, aptitude au vieillissement, amortissement des vibrations et des chocs,

◆ propriétés anti-usure : facilité du rodage, résistance à l'abrasion, à l'adhésion et au grippage, à la corrosion de contact, à l'érosion et à la cavitation, à la corrosion par les lubrifiants,

◆ propriétés d'environnement : caractéristiques du milieu, moyens et possibilités de lubrification, problèmes de pollutions ou contaminations,

◆ propriétés "socio-économiques" : coût de revient, disponibilité sous des formes diverses, facilité d'approvisionnement, indépendance des fournisseurs, évolution prévisible des techniques,

Dans le domaine de la tribologie, il n'existe pas de loi générale ni de méthode cohérente de choix de couples de matériaux de frottement sur les équipements mécaniques, si ce n'est la **règle des couches** [53], sans oublier bien sûr de tenir compte des recommandations d'exploitations données par les différents chercheurs et fabricants de matière première afin de minimiser l'effet du frottement et de l'usure. Le frottement est un

phénomène à trois dimensions qui concerne une certaine épaisseur de matériau sous la surface. À partir de cette dernière, on doit distinguer plusieurs couches successives qui existent sur l'immense majorité des pièces. Empêcher les contacts intermétalliques revient à améliorer la lubrification, ou à renforcer le manteau protecteur naturel d'oxydes, ou à créer un manteau protecteur artificiel. Ces couches possèdent une structure composite. Le contact mécanique de deux pièces réelles s'établit donc par l'intermédiaire de couches complexes dont la nature, la géométrie et les propriétés sont souvent mal connues (**figure 5**).

En allant du volume du matériau vers l'extrême surface, on distingue d'abord le métal intact, non perturbé par l'usinage mais ayant ses propres défauts (impuretés, joints de grains, inclusions). Ensuite, se présente une zone texturée où les modifications induites par la coupe sont essentiellement structurales. Puis vient une zone écrouie caractérisée par un grand désordre des grains et la présence de nouvelles impuretés introduites dans le matériau au moment de l'usinage. Cette région est recouverte d'une couche d'une zone oxydée (oxyde natif) dont l'épaisseur va dépendre du matériau et de la cinétique d'oxydation. Finalement, des couches physisorbées et chimisorbées de molécules organiques sont présentes à l'extrême surface. La zone oxydée au-dessus de la zone écrouie et les couches physisorbées et chimisorbées correspondent aux écrans de surfaces. D'où dans l'étude structurelle traditionnelle d'un matériau on distingue principalement:

- ◆ une zone superficielle mince inhibitrice de soudure et à faibles caractéristiques mécaniques,
- ◆ une sous-couche dure à hautes caractéristiques mécaniques, avec des contraintes résiduelles de compression,
- ◆ une zone intermédiaire entre la sous-couche et le cœur de la pièce avec un gradient progressivement décroissant des caractéristiques mécaniques.

La surface d'un solide le sépare du milieu ambiant. Elle est caractérisée par sa structure physico-chimique et par sa géométrie. La surface est donc l'endroit le plus perturbé d'une pièce. Une surface usinée est une zone complexe qui recouvre la masse du solide comme une peau, où l'on distingue une succession de couches :

Couches (épaisseur) :
 1 : film contaminant et gaz adsorbés (0,3 - 3 nm),
 3: film d'oxyde (1 - 10 μm),
 3: métal écroui (1 - 50 μm)
 4: métal non affecté.
 (matériau volumique non perturbé)

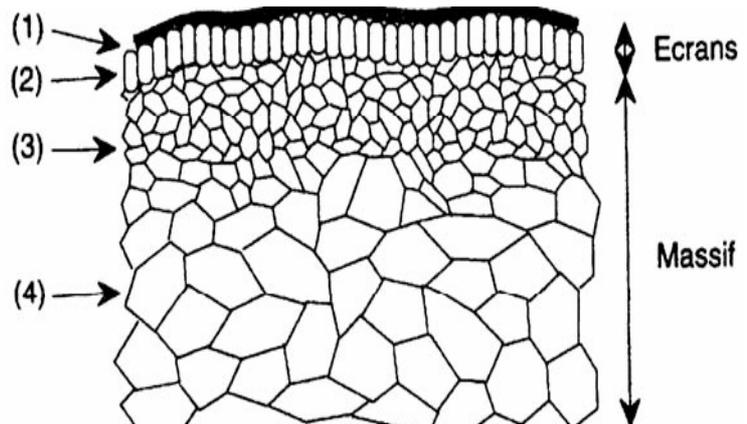


Figure 5 : Vue théorique en coupe d'un matériau métallique usuel,

1 : La couche adsorbée et film contaminant. Les atomes qui forment la surface extérieure possèdent des valences non saturées créant ainsi un champ de force, qui peut s'exercer à plusieurs angströms de la surface. Les gaz ou les liquides ambiants sont adsorbés et peuvent faire une réaction chimique avec le métal, peuvent diffuser ou se juxtaposer. La couche adsorbée est très solide et on ne peut pratiquement pas la détruire. Elle isole le métal de tout contact direct. L'adsorption d'huile ou de graisse joue un rôle important en lubrification. Cette zone est un film de contamination (0,3 à 3 nm) constitués de couches adsorbées.

2 : La couche à structure cristalline amorphe dite de **Beilby**. Cette couche est créée par des opérations de finition de la surface : rectification, polissage. Le frottement dû à l'action des grains d'abrasifs provoque des phénomènes de fusion localisée auxquels s'ajoute l'écrouissage dû aux efforts exercés. La surface cristalline est ainsi finement concassée avec en plus la création de matériaux oxydés. Cette couche bouche les inégalités de surfaces et permet la répartition de la charge sur des surfaces plus grandes. La couche (2) est un film d'oxydes (1 à 10 μm).

3 : La couche écrouie. Le métal est écroui par les opérations d'usinage de la pièce, qu'il s'agisse d'un usinage sans copeau (forgeage, étirage, galetage) ou avec copeaux (tournage, fraisage, etc.). Dans le premier cas, des contraintes de compression existent sur toute la périphérie. La structure cristalline est plus ou moins déformée. Cette couche est une zone mécaniquement perturbée (1 à 50 μm) de structure écrouie ou structure de couche de diffusion.

4 : La couche accessible qui est une couche à structure cristalline normale mais accessible aux efforts de frottement. Cette couche n'a pas été atteinte par l'opération d'usinage, mais elle est soumise aux contraintes qui sont engendrées par le frottement. Sa structure est analogue à celle du cœur de la pièce. Cette couche peut contenir tous les défauts de la structure à cœur porosités, inclusions, ségrégations, contraintes rémanentes de traitement thermique, tapures, etc... . La couche (4) partant de 100 μm est donc le matériau massif. Lorsque l'usure est limitée à l'enlèvement des films de surface, elle est appelée usure douce. Ces écrans détruits peuvent être reconstitués par réaction avec l'environnement. Lorsque l'usure s'étend au massif, elle est appelée usure destructrice ou sévère.

Mais on rencontre toujours en surface, au contact de l'air, une couche de gaz adsorbée. L'adsorption c'est la rétention à la surface d'un solide des molécules d'un gaz ou d'un liquide ambiant. L'adsorption provoque la formation d'un épilamen avec une vitesse variable selon l'état et la nature de la surface, et selon la polarité de ses molécules. L'état physique de l'épilamen monomoléculaire est assimilable à l'état solide, son épaisseur est très faible par rapport aux aspérités de surface. Cet épilamen complète l'entité de la couche amorphe superficielle. Outre l'adsorption physique, la chimisorption peut se produire avec des forces de liaison plus importantes, et l'on obtient dans ce cas des couches plus fortement accrochées.

L'usure abrasive varie de façon très complexe avec les matériaux et leurs traitements. Par exemple, avec un coussinet en bronze au plomb, l'usure est plus forte en présence d'un arbre en acier cémenté qu'avec un arbre chromé. C'est exactement l'inverse avec un coussinet en alliage aluminium - étain. Il faudrait connaître les résultats donnés par toutes les combinaisons possibles de matériaux, de traitements, dans toutes les ambiances imaginables, c'est-à-dire procéder à l'étude de la compatibilité tribologique des matériaux [54]. La nature chimique de l'atmosphère, la présence ou l'absence de vapeur d'eau, la pression, la température de contact et de l'ambiance, ..., peuvent influencer considérablement sur les résultats. Une couche protectrice anti-usure n'est intéressante que si son épaisseur est au moins égale à la perte de matière admissible pendant la durée de vie du mécanisme.

V. Usure abrasive:

5.1. Généralités :

Il y a plus d'une centaine d'années que nous observons que la plupart des défaillances des équipements mécaniques se manifestent soit au démarrage (ou durant la période de l'arrêt ou ralentissement), au cours des premiers cycles de fonctionnement (période appelée rodage [55]), dans des régimes de fonctionnement au ralenti, soit après une longue période d'utilisation (période d'exploitation et d'endurance). Le phénomène de rodage peut être défini comme la période initiale de fonctionnement des composants mécaniques. Cette période se termine quand le coefficient de frottement et l'usure se stabilisent. Lorsque les conditions de fonctionnement pendant la période de rodage sont trop sévères, la durée de vie des équipements mécaniques est fortement diminuée. A l'inverse, un rodage soigneusement réalisé aura pour effet l'augmentation de la tenue en service avec une bonne fiabilité d'exploitation de l'équipement.

Le rodage est important notamment dans les moteurs à combustion mais aussi pour toutes les machines ayant des composants mobiles. En général, le rodage est associé aux conditions limites d'utilisation (charge et vitesse) en régime de lubrification limite jusqu'au moment où la rugosité évoluant en cours d'utilisation arrive à une valeur constante et le taux d'usure devient constant [56].

L'usure considérée dans son sens le plus large, c'est-à-dire comme la détérioration que produit l'usage, peut-être due à plusieurs processus physiques, chimiques et mécaniques indépendants. En fait l'usure abrasive, cas de notre étude considérée comme un phénomène global est très difficile à décrire sous forme quantitative. Les différentes approches théoriques, [57], qui sont faites, le sont à partir d'hypothèses très simplificatrices d'où la nécessité de pratiquer une analyse tribologique approfondie du mécanisme dans le but d'évaluer les risques de détérioration auxquels sont soumis les matériaux. Plus un matériau à une capacité de charge élevée, plus il est exigeant quant aux paramètres suivants : nature du couple de matériaux, épaisseur du film d'huile, états de surfaces,... . Donc on peut affirmer que le fonctionnement correct, dépend du comportement de ses trois éléments constitutifs : couple de matériaux, lubrifiant utilisé et pollué éventuellement par des particules abrasives [58].

L'objet de ce présent travail consiste en une contribution à l'analyse du processus d'abrasion sur les surfaces frottantes : une particule ou une protubérance dure, coupe, raye ou déforme la surface active d'une pièce plus tendre et provoque un déplacement ou un enlèvement de matière. Ce phénomène est connu en tant que mécanisme d'usure abrasive, mais également pour son rôle bénéfique recherché dans de nombreux procédés d'usinage (procédés d'enlèvement de matières par abrasion), qui sont en général des opérations de finition. L'évolution incontrôlée des données telles que l'énergie de surface, la structure cristalline, la microgéométrie de surface, la nature des matériaux ainsi que la nature et l'état des polluants superficiels rendent difficilement reproductibles et simulables les conditions de dégradation d'un système industriel tant que les processus mis en cause n'ont pas été finement définis et analysés. Ce qui représente un domaine où les paramètres sont extrêmement nombreux et les chercheurs du Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM- France) en ont recensé quelques 150 à 200 qui interviennent dans pratiquement tous les problèmes industriels d'usure, y compris ceux qui paraissent les plus simples.

L'usure abrasive ne varie généralement pas de manière progressive en fonction de paramètres comme la vitesse, la température ou le temps comme on a toujours tendance à la schématiser. Cette dernière varie de façon complexe avec les matériaux et leurs traitements [59]. Par exemple, avec un coussinet en bronze au plomb, l'usure est plus forte en présence d'un arbre en acier cémenté qu'avec un arbre chromé. C'est exactement l'inverse avec un coussinet en alliage aluminium-étain. Il faudrait connaître les résultats donnés par toutes les combinaisons possibles de matériaux, de traitements, dans toutes les ambiances imaginables. La nature chimique de l'atmosphère, la présence ou l'absence de vapeur d'eau, la pression la température,..., peuvent influencer considérablement sur les résultats.

L'usure, dans son contexte général, est un phénomène universel se produisant d'une façon inévitable lorsque deux corps en contact glissent l'un sur l'autre, on le rencontre sur toutes les machines existantes, qui ne fonctionnent que grâce aux actions de contact transmettant les forces entre les différentes parties constitutives. L'étude du phénomène de l'usure à trois corps passe par l'explication du rôle prépondérant des particules abrasives dans l'interface lubrifiée séparant les deux pièces en mouvement relatif. L'usure abrasive est définie comme étant l'usure par déplacement de matière, produite par des

particules dures ou des protubérances dures. Les particules dures peuvent se trouver entre les deux surfaces en mouvement relatif ou être encastrées dans l'une des surfaces.

Des études de modélisation de l'abrasion à trois corps ; qui malheureusement ne sont pas nombreuses, ont montré que les particules abrasives roulent dans l'interface en s'incrétant momentanément dans la surface antagoniste. Elles créent ainsi des indentations multiples dues au roulement et au caractère géométriques des particules. Et l'on observe sur la surface de contact soit des sillons ou des rayures dues au glissement. Le processus d'enlèvement de matière est dû aux déformations plastiques répétées qui créent un écrouissage au niveau de la microgéométrie de surface et plus particulièrement des bourrelets latéraux entre deux sillons voisins. Le mouvement relatif des particules abrasives entre les surfaces frottantes est un paramètre essentiel dans le phénomène d'abrasion des surfaces. L'usure est pratiquement nulle lorsque la particule roule sur elle-même à l'interface, elle augmente avec l'accroissement du glissement relatif est devient très forte lorsque la particule s'immobilise sur l'une des deux surfaces par incrustation ou adhésion. Comme on l'avait expliqué précédemment, l'usure abrasive se manifeste par des polissages, des griffures et/ou par des arrachements sous forme de copeaux. Les conditions principales favorisant l'apparition de ce type d'usure sont :

- les particules abrasives doivent être plus dures que la surface abrasée. Et ce type d'usure se produit plus facilement si la dureté Vickers des particules est supérieure ou gale à une fois et demie celle de la surface usée,

- les particules abrasives doivent avoir, d'une part des coins ou des angles aigus et d'autre part être convenablement orientée.

Les pollutions abrasives, [60], sont très diverses d'une région du monde à l'autre, (**tableau 2**), c'est pourquoi le phénomène de l'usure des systèmes mécaniques et en particulier l'abrasion des surfaces de contact est variable. Les conditions d'exploitation des installations de forage dans le Sahara Algérien sont très marquées par la présence des vents de sable (présentant une grande abrasivité des particules) qui augmentent le taux de particules abrasives avec même des fois la formation de nuages composés de grosses particules de poussières.

Poussières Constituants	Régions Dureté de MOHS	Poussière de la région Parisienne (France)	Poussière d'URSS (région non précisée)	Poussière fine de l'Arizona (U.S.A)	Poussière de la région saharienne (Algerie)
SiO ₂	7	70	95	67 - 69	80 - 82
CaCO ₃	3]	2,2	2 - 4	0,1- 0,2
MgO	4 - 5	10	-	0,5- 1,5	-
Fe ₂ O ₃	6		1,0	3 - 5	-
Al ₂ O ₃	9		0,8	15 - 17	-
Produits Alcalins	-]	-	3 - 5	-
Matières organiques	-	20	1,0	2 - 3	-
Feldspaths	6]	-	-	16 - 18
Zircone	7 - 8	-	-	-]
Tourmaline	7 - 7,5	-	-	-	
Grenat	6,5 - 7,5	-	-	-	
Epidote	6,5	-	-	-	
Piroxène	5,5 - 6	-	-	-	1,8 - 2
Liménite	5 - 6	-	-	-	
Hernbende	5,5 - 6	-	-	-	
Disthène	4,5 - 6	-	-	-	
Apatite	5 - 6	-	-	-	
Leucoxène	4,5 - 5	-	-	-	
Limonite	3,5	-	-	-	
autres éléments	5 - 6	-	-	-]

Tableau 2 : Composition chimique des poussières (polluants) d'origine diverses [60].

L'analyse des données, [61], témoignent de la diminution de la concentration de particules dans l'air au fur et à mesure que l'on s'éloigne du sol (**tableau 3**). Donc, en élevant la hauteur du niveau de la prise d'air pour l'alimentation des moteurs (conduite d'aspiration), on arrive à diminuer considérablement la concentration en particules abrasives d'où une éventuelle diminution de l'usure abrasive.

Hauteur par rapport au sol (m)	Concentration des particules abrasives dans l'air
0,5	1,6
1,0	1,4
1,5	0,8
2,0	0,2
2,5	0,05

Tableau 3 : Concentration de l'air en particules abrasives en fonction de la hauteur par rapport au sol (Région In Amenas) [61].

La connaissance des différentes transitions d'écoulement autour d'une particule abrasive, dans des conditions bien établies, permet de mieux maîtriser les mécanismes d'usinage par abrasion et d'usure abrasive. Ceux-ci visent, soit à enlever une certaine quantité de matière en respectant une cote et/ou un état de surface bien définis, soit à limiter les phénomènes d'endommagement engendrés. La complexité géométrique de la particule abrasive rend difficile la compréhension de ces transitions d'écoulement. C'est pourquoi les analyses du contact élémentaire entre une particule et une surface antagoniste ont émergé. Ce type d'approche s'affranchit du problème en affectant à la particule abrasive une géométrie bien définie : cône, sphère, cylindre, pyramide, dièdre... .

L'analyse microscopique du processus de coupe par abrasion consiste à étudier l'action d'une particule abrasive élémentaire sur une surface antagoniste. Cette approche est à la base de la compréhension des phénomènes locaux de déformations plastiques et de rupture, mis en jeu au cours du processus d'abrasion. Le grain, en rectification, ou l'aspérité, en usure abrasive, ont des géométries et des orientations particulières et peuvent posséder plusieurs arêtes et faces de coupe. Ceci engendre un écoulement complexe autour de la particule abrasive pouvant mener à un micro-usinage (rectification) et à un phénomène de déformation plastique (usure abrasive).

5.2. Effet de l'orientation géométrique des particules abrasives :

L'objet de l'étude initiée dans ce paragraphe est la compréhension des phénomènes locaux de déformation plastique et de rupture mis en jeu au cours du processus d'abrasion. L'approche locale du contact élémentaire, entre une particule abrasive et une surface antagoniste, est utilisée afin d'analyser les mécanismes intervenant dans ce processus et plus particulièrement sur le mode d'usure par abrasion. La plupart des études traitant du phénomène de l'usure abrasive s'accordent sur une décomposition du mode de travail du grain ou particule abrasive en trois phases successives : déformation élastique, déformation plastique, formation du copeau.

Le frottement au cours de cette phase engendre une compression de la matière en avant de la particule abrasive. Ceci provoque des déformations plastiques

importantes et, au fur et à mesure du déplacement, la matière comprimée s'écoule dans la direction de moindre résistance : en avant du grain ou sur les cotés. Ainsi, la phase de labourage engendre une rayure de la surface conduisant à la formation de bourrelets frontaux et latéraux. Au fur et à mesure de la pénétration, le bourrelet avant a tendance à se transformer en copeau traduisant la transition du labourage vers la microcoupe.

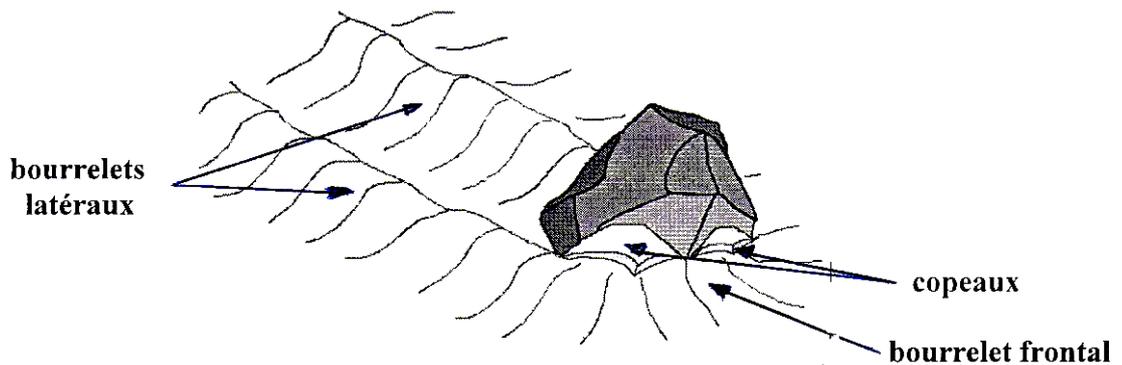


Figure 6 : Représentation schématique de la déformation plastique (labourage) provoquée par une particule abrasive,

L'influence de l'orientation et de l'angle des particules abrasives peut être mise en évidence par l'expérience suivante : le déplacement, sous une charge donnée, d'une tige à pointe pyramidale parallèlement à la surface plane d'un échantillon métallique (**figure 7a**), la raye. Sur la courbe de la (**figure 8**), nous obtenons l'évolution de la section droite de la rayure en fonction de l'angle d'inclinaison α de la face d'attaque du frotteur par rapport au plan. Sur celle-ci, on observe qu'à partir d'un certain angle critique α_C , une augmentation brusque de la largeur de la rayure qui correspond à l'apparition d'un copeau. L'existence de cet angle, explique le fait que seulement une partie des particules abrasives soient convenablement orientées pour produire l'usure, c'est-à-dire couper le matériau antagoniste (**figure 7b**). Les autres particules ne peuvent exécuter (ou produire) que des rayures.

Cette dernière phase est donc caractérisée par l'évolution du bourrelet frontal en un copeau. C'est au cours de cette phase que l'usure abrasive par enlèvement de matière s'effectue. Cette transition suit à nouveau le principe du moindre effort entre le labourage et la coupe : le mode d'écoulement (bourrelet frontal ou copeau) nécessitant

le moins d'énergie est celui qui prend effectivement place au cours du processus.

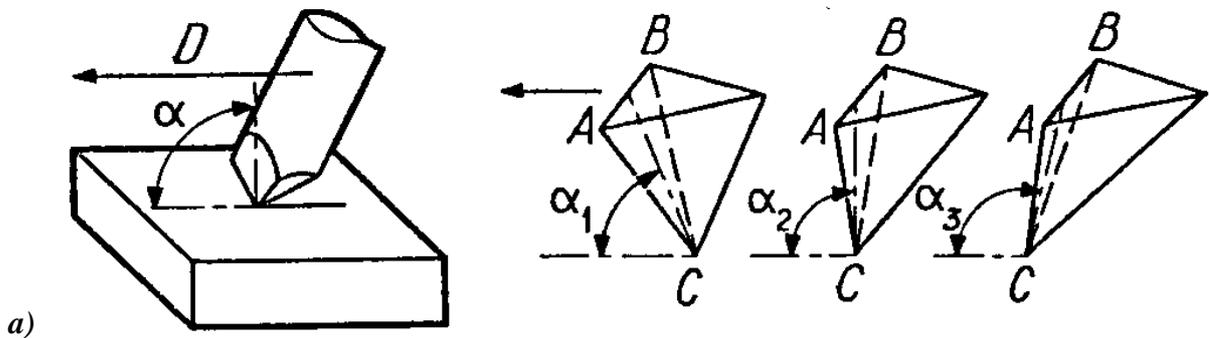
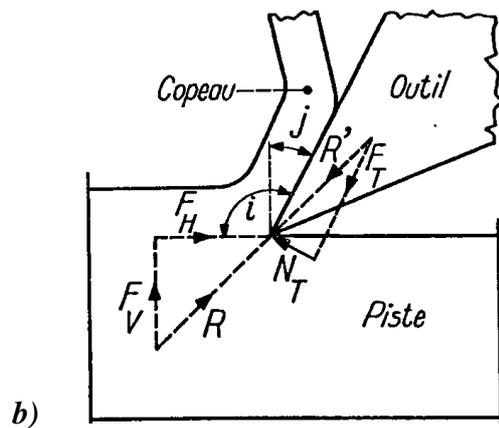


Figure 7 : Représentations schématiques :
a) de l'angle d'attaque d'une particule [62],
b) forces agissantes dans le cas d'un enlèvement de matière par formation de copeaux [63]



La compréhension de la phénoménologie locale, propre à chacun des modes de sollicitation, reste encore un enjeu majeur dans l'étude du processus d'abrasion. Le recours aux études relatives à la coupe orthogonale est l'une des pistes explorées pour expliquer les mécanismes mis en jeu au cours du processus d'enlèvement de matière par abrasion dans le cas du frottement en présence de particules abrasives. L'utilisation de cette technique nécessite néanmoins de prendre en compte un certain nombre de paramètres spécifiques. En tout état de cause, ces spécificités (angle fortement négatif, vitesse relative élevée, forte charge,...) semblent, dans leur ensemble, faire converger le processus vers la formation du copeau.

Si on s'intéresse à l'évolution de la section droite du sillon en fonction de cet angle α , on constate, à partir d'un certain angle α_c , une augmentation de la section du sillon : cet angle α_c "critique" correspond à l'apparition du "copeau".

Le calcul de l'aire de la section droite de la rayure, peut être évalué analytiquement dans deux cas :

* Quand il y a naissance d'un copeau, on utilise la théorie de Merchant dans laquelle on considère que le copeau est dans un état d'équilibre stable sous l'action d'un système de force. On supposant que :

$F_V = P$ et $F_H = C.H_M.A$, comme $f = F_T / N_T$ on obtient :

$$A = \frac{P}{C.H_M} \left(\frac{1+f.tg\alpha}{f-tg\alpha} \right)$$

où :
 A : largeur de la rayure,
 P : charge,
 C : constante géométrique,
 H_M : dureté de Meyer,
 f : coefficient de frottement.

* Quand il y a formation d'une rayure sans enlèvement de métal, la force de frottement est constituée de deux composantes. La première représente la force nécessaire pour cisailer les jonctions superficielles, et la seconde celle pour obtenir la rayure.

$$A = \frac{f.P}{C.\tau.\cot\alpha + C.H_M}$$

τ : résistance au cisaillement du matériau de la piste,

Figure 8 : Courbes représentatives de la section droite du sillon (rayure) en fonction de l'angle d'attaque de la particule abrasive [62].

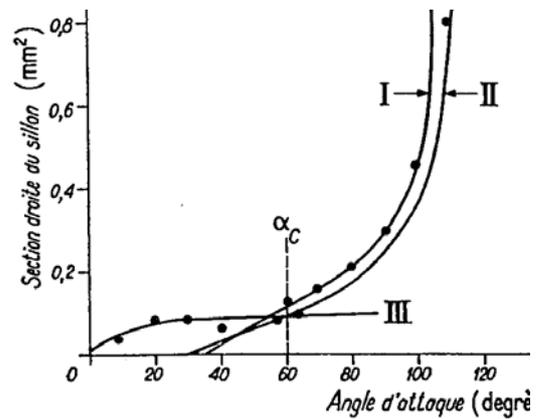
Courbes I et II : $f=0,7$

Courbe III : $f=0,5$

Paramètres des essais : charge : 2 N ; vitesse d'abrasion : 0,5 m/s ; pion : carbure ; piste : plomb.

$\alpha \leq \alpha_c$: pas de formation de copeau,

$\alpha \geq \alpha_c$: observation de la formation de copeau.



Dans leur étude **Sedriks et Mulhearn [64]**, montrent que le volume de matière sollicité n'est abrasé que si l'angle d'attaque α des particules est supérieur à un certain angle critique dépendant de la nature des abrasifs, qui n'est pas le cas des pollutions que nous allons introduire dans le contact mécanique au cours de nos essais.

Compte tenu des données issues de la coupe, du point de vue mécanique en approche microscopique, quatre zones peuvent être distinguées dans l'écoulement d'un matériau métallique autour de la particule abrasive (**figure 9**) :

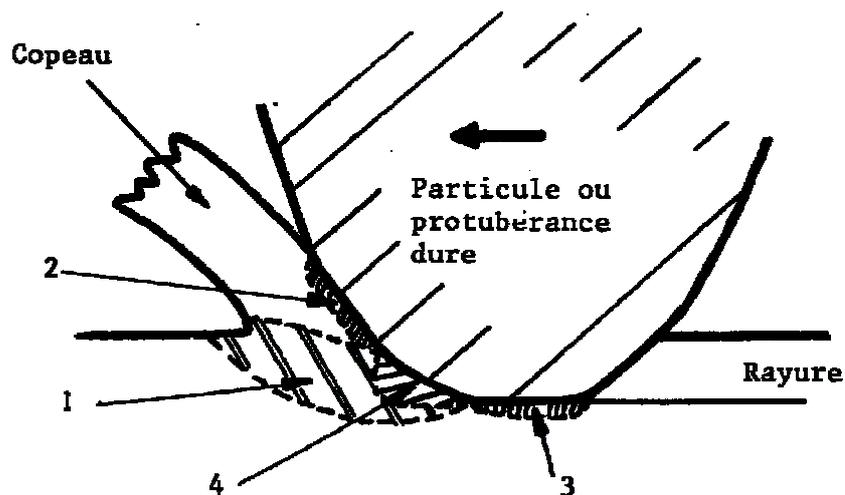


Figure 9: Représentation schématique des zones d'écoulement d'une surface métallique abrasée par une particule [65].

- la zone de cisaillement primaire en avant de la particule abrasive (**zone 1**), c'est la zone de formation du copeau, elle s'étend de l'arête de coupe à la surface libre de la pièce. Son existence est directement liée au changement de direction d'écoulement de la matière. Elle est le siège de cisaillements et de taux de cisaillements intenses donnant lieu à une élévation de température due à la dissipation mécanique.

- une bande où la matière du copeau est fortement sollicitée par le frottement intense du glissement copeau-particule (**zone 2**), le copeau ainsi formé frotte sur la face coupante du grain abrasif. Appelée zone de cisaillement secondaire, elle aussi est le siège d'un frottement intense induisant également de forts taux de cisaillement et une élévation de température.

- la particule abrasive et la surface de la pièce sont en contact une bande étroite et engendrent à nouveau une zone de cisaillement où la matière qui constituera la surface de la pièce est sollicitée d'une façon analogue à la (zone 2) mais d'une manière moins intense (**zone 3**), avec toutes les conséquences qui en découlent sur l'état final de la pièce. Cette troisième zone représente une sous-couche fortement écrouie.

- une zone qui entoure l'arête de la particule en se développant légèrement en amont, généralement appelée zone morte (**zone 4**), identifiée comme le lieu de séparation de la pièce et du copeau.

Des expériences réalisés ont montré que cette zone morte ne se sépare pas nettement du reste de l'écoulement et que, de ce fait, le qualificatif de '**zone stagnante**' (dont la matière se renouvelle lentement) serait plus approprié. Dans le cas des particules abrasives à faible angle d'attaque, la zone stagnante est peu développée et instable à faible vitesse. Elle disparaît au-delà d'une certaine vitesse d'autant plus élevée que la dureté du métal est faible. La position de cette zone correspond au point neutre de transition du labourage à la formation du copeau.

5.3. Influence de la taille des particules abrasives :

Les études de l'influence de la taille des particules abrasives sur l'usure, (**figure 10**) montrent que la perte de masse augmente rapidement quand la taille moyenne de celles-ci croît de 35 à 70 μm , puis au-delà de 150 μm , la croissance est beaucoup plus lente [66]. L'existence de particules d'usure, dans le cas général, a tendance à diminuer l'efficacité des particules abrasives, d'autant plus que les particules abrasives sont de dimensions plus faibles. L'influence de la taille des particules sur les pertes par l'usure abrasive est aussi fonction de la charge. Par contre pour les faibles charges, l'usure est presque indépendante de la taille des particules.

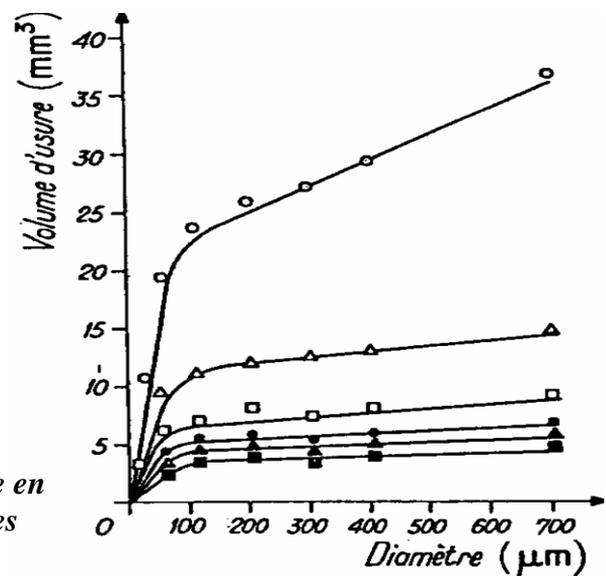
Conditions d'essais :

Contact : plan / plan,
Frotteur cylindrique de 5 mm de \varnothing
Piste en toile abrasive,
Charge : 2 daN, Vitesse : 0,5 m/s
Déplacement du frotteur : circuit ouvert de
6 m de long.

Matériaux :

○ Aluminium △ Laiton □ Cuivre
● Bronze ■ Acier ▲ Acier suédois

Figure 10 : Evolution du volume de l'usure en fonction du diamètre moyen des particules abrasives [20].



5.4. Influence de la charge :

L'usure, de manière générale dans un contact mécanique, augmente avec l'augmentation de la charge. Mais dans le cas de l'usure abrasive pour les fortes charges cette observation n'est pas valable car les particules ont tendance à s'enfoncer profondément dans le matériau le plus mou et sont déchaussées sous l'effet du mouvement relatif. Ce phénomène entraîne une augmentation de la dureté superficielle du matériau subissant l'incrustation de ces particules (dans le cas général il s'agit du matériau présentant la plus faible dureté), d'où une très forte possibilité de la diminution de l'usure abrasive et augmentation de celle du matériau antagoniste. Alors pour les charges plus faibles, on observe au cours des essais que le volume d'usure augmente avec celles des polluants abrasifs.

5.5. Influence du type de circuit :

Dans les systèmes de lubrification liquide, on distingue deux types de circuit de circulation qui ont une très forte incidence sur le phénomène de l'usure abrasive. En circuit ouvert la perte de masse augmente avec la distance parcourue (ou le temps), car les particules abrasives incrustées, en plus de celles ramenées dans le contact par le lubrifiant, rencontrent une surface fraîche dont les caractéristiques sont constantes.

Par contre, en circuit fermé, les particules abrasives s'écrouissent et les débris d'usure tendent à s'accumuler entre ces particules, ce qui fait que l'abrasion diminue et finit par devenir très faible après plusieurs passages. De plus la concentration en polluants abrasifs étant constante d'une part, et que d'autre part ils ont tendance à s'incruster dans le matériau le plus mou (qui est sujet à l'usure abrasive), augmentant par conséquent sa dureté superficielle d'où une éventuelle résistance à l'usure abrasive.

5.6. Influence de la vitesse :

Avec l'augmentation de la vitesse du mouvement, on observe une augmentation du volume d'usure. Et cet accroissement est dû non seulement à l'augmentation de la distance parcourue mais aussi et surtout à une baisse des caractéristiques mécaniques par suite de l'accroissement de la température dans le contact au niveau des microgéométries de surface.

Des simulations réalisées, [26], montrent que trois types de déformations et d'écoulements de matière peuvent être distingués au cours des essais d'abrasion en fonction de la géométrie de contact et de la vitesse :

- déformation en amont du frotteur,
- écoulements latéraux de matière de chaque côté de la trace abrasive (sillon),
- écoulement sous forme ' ' d'ailes latérales' '.

L'apparition des "ailes latérales" ("éjection" latérale de la matière refoulée) coïncide avec un accroissement de la force tangentielle. L'ampleur relative de ces trois domaines est variable selon la géométrie de contact et la vitesse. Alors que la possibilité et la facilité d'écoulement de la matière apparaissent déterminantes sur la morphologie des détériorations des surfaces en contact.

5.7. Influence de l'ambiance :

Dans le cas d'un frottement lubrifié en présence de particules abrasives, le lubrifiant a pour rôle d'évacuer les débris d'usure et l'introduction des pollutions du milieu extérieur dans la zone de contact, ce qui favorise la conservation de l'efficacité des particules abrasives donc conduisant à une augmentation de l'usure abrasive. D'où l'on voit la nécessité d'un filtrage efficace permettant de les éliminer du contact ainsi que du circuit de lubrification. Alors que dans certains cas, on a tendance à favoriser l'usure abrasive pour assurer la lubrification : la lubrification des roulements cryotechniques des turbopompes spatiaux est assurée par un polymère transféré sur les billes à partir de la cage et qui se transfère par la suite des billes sur les bagues. Et actuellement, des études sont menées dans le but d'approfondir le rôle du polymère contenu dans la cage et d'analyser les phénomènes de surface et transfert mis en jeu afin d'améliorer ce type de lubrification par transfert. Ce modèle s'articule autour d'un troisième corps qui est la base de la tribologie des interfaces et qui permet de passer de façon unitaire du frottement sec à la lubrification hydrodynamique.

5.8. Influence de la nature des matériaux constituant le couple de contact:

Dans le cas d'un frottement métal-métal, il faudrait avoir des couches superficielles de grande dureté possible afin de pouvoir résister à l'action des particules abrasives, car la résistance à l'usure abrasive est fonction croissante de la dureté. Mais la proportionnalité n'étant pas la même pour tous les matériaux utilisés, car dans le cas d'addition d'éléments d'alliage au métal de base nous permet d'augmenter la dureté d'où une meilleure tenue et résistance à l'usure abrasive. Dans certaines utilisations, cela n'est pas possible, dans le cas par exemple d'un arbre dur glissant sur un coussinet mou, il est nécessaire que la dureté du matériau constituant le coussinet soit au moins de trois à quatre

fois celle de l'arbre. Pour ce type de couple de matériaux, les débris d'usure, qui peuvent se comporter comme des particules abrasives, auront tendance à s'incruster dans la pièce la plus molle sans pour autant détériorer la pièce antagoniste.

L'abrasion a tendance à produire des modifications superficielles importantes dans la structure et l'orientation des couches. Quelques fois des changements de phases peuvent ainsi se produire. Dans l'étude des métaux, la structure de l'abrasion est semblable à celle produite lorsque le matériau est laminé [67].

Actuellement les travaux de recherche sont surtout axés sur les céramiques vu que leurs propriétés tribologiques présentent un très grand nombre d'avantages par rapport aux métaux. Ces céramiques thermomécaniques peuvent trouver des solutions aux problèmes tribologiques des machines et équipements mécaniques fonctionnant dans des conditions climatiques et technologiques sévères par la conception de nouveaux couples de frottement. L'avantage principal des céramiques réside dans leurs comportements tribologiques qui porte sur les mécanismes de déformation de surfaces plutôt que de l'enlèvement de matière et cela malgré leurs propriétés mécaniques : caractéristique de fragilité.

5.9. Influence de la dureté de l'abrasif :

Les études de l'évolution de la perte de masse par le phénomène de l'usure abrasive [65] nous montrent que le premier critère valable pour qu'une usure abrasive appréciable se produise, est que la particule soit plus dure que la surface abrasée. En d'autres termes on peut dire que :

- l'usure est très faible tant que la dureté de l'abrasif est inférieure ou égale à celle de la pièce abrasée. Dans ce cas les particules abrasives sont écrasées, concassées et perdent leurs caractéristiques d'éléments coupants,

- quand la dureté de l'abrasif augmente jusqu'à une certaine valeur (de l'ordre de $2,3 \times 10^3 \text{ daN/mm}^2$) et qui est égale à celle du matériau abrasée, la perte par abrasion croit

très rapidement. Les particules peuvent se détériorer mais ils deviennent plus résistants à leurs dégradations,

- pour des valeurs de dureté plus élevées des particules abrasives, la perte de masse en ait indépendante, et avec le mouvement relatif celles-ci conservent leurs qualités de dureté et de forme qui favorisent l'abrasion dans le contact.

- dans le cas des supports abrasifs de différentes granulométrie ; cas particulier des papiers abrasifs employées pour le polissage de surface ; ceux-ci doivent conserver le plus longtemps possible leurs formes et duretés afin de pouvoir maintenir un taux d'usure uniforme (constant) pendant une longue utilisation. Le résultat attendu par l'effet du polissage est l'amélioration de l'état de surface géométrique de la pièce à polir. Dans ce cas le polissage serait une abrasion par de petites particules, (*Tableau 4*), en fonction de l'indice granulométrique choisi ; sous faible charge. Les surfaces obtenues sont finement rayées et on observe la formation de petits copeaux sur certaines rayures. Dans ce cas l'abrasion de pièce étant souhaitée, par conséquent, il faudrait employer des grains durs d'une taille adéquate et opérer en circuit ouvert, en présence d'un fluide qui permet d'évacuer la chaleur produite par le phénomène du frottement ainsi que les particules d'usure de la zone d'abrasion. Et à titre d'exemples, on peut citer (*Tableau 4*) certains types d'abrasifs les plus utilisés.

<i>Matériau</i>	<i>Composition</i>	<i>Dureté daN/mm²</i>
Diamant	C	8.000
Carbure de bore	B ₄ C	2.750
Carborundum, carbure au silicium	SiC	2.600
Carbure de titane	TiC	2.450
Corindon, alumine	Al ₂ O ₃	2.100
Carbure de zirconium	ZrC	2.100
Carbure de tungstène	WC	1.900
Garnet	Al ₂ O ₃ .3FeO.3SiO ₂	1.350
Zircone	ZrO ₂	1.150
Quartz, silice, sable	SiO ₂	800
Verre	silicate	500

Tableau 4 : Exemples de matériaux utilisés comme abrasifs [68].

Nous allons aborder ce travail dans le souci de séparer et d'analyser les influences de différents paramètres dans le processus d'abrasion "à trois corps" : le contact élémentaire abrasif est considéré à l'échelle de la protubérance de surface dans les applications technologiques (rugosité des surfaces usuelles, grains abrasifs des meules, pâtes pour polissage,...). L'usure peut résulter des protubérances d'une des pièces ou des particules qui circulent dans l'interface [69]. On peut distinguer deux modes d'usure par abrasion, (**figure 11**), [70] :

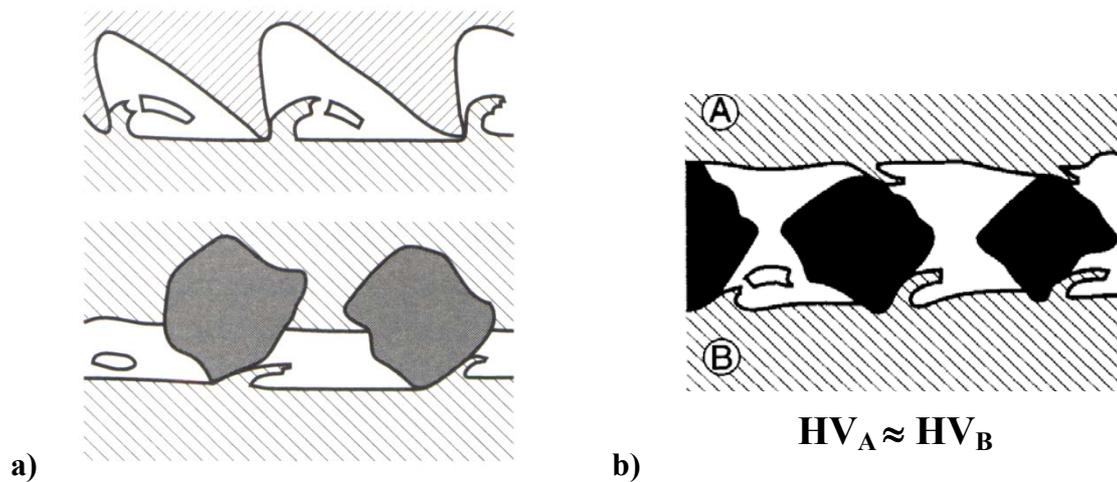


Figure 11 : Les différents modes d'usure abrasives :
a) à deux corps, b) à trois corps.

♦ **l'abrasion à deux corps (figure 11a)**, dans laquelle la pièce la plus dure "lime", "râpe" la plus tendre, on est dans le cas des aspérités dures ou particules enchâssées sur l'une des deux surfaces et usant l'autre surface [71].

♦ **l'abrasion à trois corps (figure 11b)**, dans laquelle des éléments (grains abrasifs) plus durs que les pièces en présence s'incrustent dans la pièce la moins dure ou se retrouvent véhiculés entre les deux surfaces frottantes en provoquant ainsi l'usure dans le contact, [72]. Sur la **figure 12** est représenté un exemple typique de l'usure abrasive à trois corps nettement plus sévère. Elle s'est produite sur un arbre au niveau d'un joint d'étanchéité qui au cours de l'exploitation a provoqué une zone d'accumulation de particules abrasives.



Figure 12 : Exemple de pièce usée par abrasion,

La perte de matière, selon [73] dépend à la fois, dans le cas général, du matériau usé et de l'abrasif et l'aspect des sillons (**figure 12**), et les analyses des surfaces de contact permettent de nous fournir de précieuses indications concernant les matériaux en contact:

- ◆ s'ils sont brillants et très peu profonds, les aspérités de la pièce antagoniste ont raclé les couches d'oxydes,
- ◆ s'ils sont isolés, et brusquement interrompus, des particules dures introduites entre les surfaces se sont plus ou moins incrustées,
- ◆ s'ils sont ininterrompus et rayent la pièce dure, des particules abrasives sont enchâssées dans la pièce tendre,
- ◆ s'ils sont ininterrompus et marquent la pièce tendre, la pièce antagoniste plus dure est trop rugueuse.

Pendant la phase initiale du mouvement entre deux surfaces en contact glissant, la conformité et la topographie des surfaces ainsi que leur compatibilité en frottement évoluent [74]. Des processus chimiques et métallurgiques (systèmes lubrifiés : réaction chimique des surfaces avec l'huile contenant des additifs ; durcissement par écrouissage) peuvent contribuer à une amélioration des paramètres cités ci-dessus.

Initialement les surfaces ne sont pas encore accommodées et leur capacité à supporter la charge n'est pas totale [75]. Pendant la phase de rodage ou de première utilisation les conditions de fonctionnement doivent être les plus douces possibles de façon à éviter au maximum des pics de vibrations et de charge.

Et c'est surtout pendant le rodage que les effets du frottement et de l'usure des surfaces neuves sont accentués, jusqu'à l'obtention d'une situation tribologique stable c'est-à-dire une accommodation des surfaces en contact. La rugosité des surfaces en contact diminue alors pour d'atteindre un équilibre dépendant de la rugosité initiale. Cependant les surfaces très polies sont sujets, quant à elles, à des endommagements considérables si la lubrification devient défaillante. Donc pendant le rodage l'utilisation de lubrifiants adéquats est importante pour que cette phase de fonctionnement se fasse sans endommagement et qu'elle ne compromette pas la durée de vie du mécanisme c'est-à-dire lui assurer une certaine longévité de service.

VI. Lubrification :

6.1. Son rôle dans le contact mécanique :

Pour résumer les principaux résultats expérimentaux présentés dans la littérature concernant l'usure abrasive lubrifiée, nous avons présenté dans ce paragraphe les effets de la lubrification. L'étude du phénomène de l'usure est inséparable de celle de la lubrification, du fait que le frottement sec est l'exception et le frottement lubrifié, la règle dans les machines et équipements mécaniques [76]. La théorie hydrodynamique basée sur l'hypothèse de surfaces absolument lisses est inapplicable. Dans ce cas, seule l'étude expérimentale permet de déterminer avec une bonne précision les conditions à imposer. Elle peut être orientée par les analyses du problème tribologique donné.

La fonction de la lubrification (solide, liquide ou gazeuse) dans un mécanisme c'est l'interposition d'un film entre les surfaces de contact des pièces en mouvement relatif. Ce film a pour but de réduire les résistances passives dues au phénomène

de frottement ce qui permet de limiter la puissance dissipée (perdue) dans le contact et de diminuer ainsi l'usure des pièces, d'augmenter le rendement du mécanisme et dans la plupart des cas d'en assurer un fonctionnement durable et fiable. La démarche la plus classique consiste à interposer dans le contact un matériau spécifique dénommé lubrifiant. Aussi le système de lubrification doit assurer la fonction protection et étanchéité : c'est l'interdiction, ou le contrôle des fuites lorsqu'on utilise un fluide sous pression, c'est aussi l'interdiction de laisser pénétrer dans un mécanisme des éléments étrangers à son fonctionnement. Donc la lubrification est le processus qui permet de diminuer le frottement et l'usure entre les surfaces de deux solides. Il n'existe pas un processus unique de lubrification et de nombreux facteurs tels que la rugosité des surfaces, la géométrie des corps en contact. Les propriétés du lubrifiant, la température et les vitesses de glissement vont intervenir.

Parmi les spécificités principales d'un lubrifiant, on peut noter son aptitude à présenter des comportements très différents suivant les directions considérées :

- ◆ suivant la direction normale, le lubrifiant doit résister à l'effort normal,
- ◆ suivant la direction tangentielle, le lubrifiant présente au contraire la résistance la plus faible possible au cisaillement.

Traditionnellement, l'emploi d'une lubrification liquide permet de limiter le frottement et toutes ses conséquences par création d'un film d'huile possédant une contrainte de cisaillement faible. Dans le cas où le contact doit rester sec, la solution revient à choisir un couple de matériaux au coefficient de frottement faible ou de changer la nature du contact. En effet, l'emploi d'un troisième corps (dans ce cas, jouant le rôle d'un lubrifiant) permet de faire rouler les solides entre eux à la manière d'un roulement à bille [77]. Cependant cette solution n'est pas la plus préconisée car elle implique souvent l'apparition de nouvelles dégradations ou l'augmentation de certaines comme la composante de labourage.

En situation de frottement, le phénomène prédominant pour les surfaces en contact est l'altération de leur état de surface, c'est à dire de la rugosité, par l'action simultanée de l'usure et de la déformation plastique des aspérités de la surface jusqu'à l'obtention d'un profil qui favorise une meilleure stabilité du film d'huile et par conséquent ceci entraîne la diminution du coefficient de frottement.

Mais le critère le plus important du point de vue conception, pour une application donnée, est de savoir si les conditions qui prédominent au niveau de l'interface de glissement sont des conditions de frottement sec ou lubrifié. Différents régimes de lubrification existent et peuvent être classés comme suit : hydrostatique, hydrodynamique, élastohydrodynamique mixte et limite [78]. Et en général, on peut définir les régimes de lubrification selon :

- l'épaisseur du film d'huile existant à l'interface de contact,
- le taux d'usure défini selon Archard,
- la valeur du coefficient de frottement observée sur les courbes de Stribeck.

Cependant, en dehors des régimes de lubrification hydrodynamique et hydrostatique purs, et notamment pendant les périodes de démarrage et d'arrêt, les pièces en mouvement ne sont pas complètement séparées par le film lubrifiant ; un contact immédiat est inévitable avec toutes les conséquences que peut faire prévoir le frottement sec (**figure 14a**), [79].

Mais dans notre présente étude de contact à trois corps, on assurera, dès le début du mouvement relatif des surfaces, une lubrification, qui va être un lubrifiant non solidaire des surfaces en frottement. Et dont l'un des rôles parmi les plus importants est de diminuer le nombre et la dimension des jonctions métalliques en constituant des films protecteurs et en supportant tout ou une partie de la charge ; tout en évitant le contact direct au niveau des aspérités, d'une part. Et d'autre part on sait que le lubrifiant a pour rôle, aussi, de véhiculer et de chasser les débris d'usure, ce qui favorise la conservation de l'efficacité des particules abrasives dans le cas d'un circuit fermé de la lubrification. D'où la nécessité d'un filtrage efficace pour permettre de les éliminer du circuit de la lubrification dans le cas des machines et équipements mécaniques.

Concernant la lubrification dans un palier lisse, (**figure 13**), l'établissement du film d'huile se fait de la manière suivante : au démarrage, le tourillon, qui repose sur le demi-coussinet inférieur commence à gripper sur celui-ci mais son poids le fait

rapidement retomber en entraînant de l'huile, ce qui amorce la formation du coin d'huile. Lorsque la vitesse de rotation est devenue suffisante, le coin d'huile est capable de supporter l'arbre et l'on observe que celui-ci prend une position excentrée dans le sens opposé à celui qui correspond au grippage.

Dans le cas des paliers fortement chargés on doit les soulager pendant la période du démarrage par l'introduction d'huile sous pression à la partie inférieure du coussinet afin d'éviter le phénomène de grippage [80].

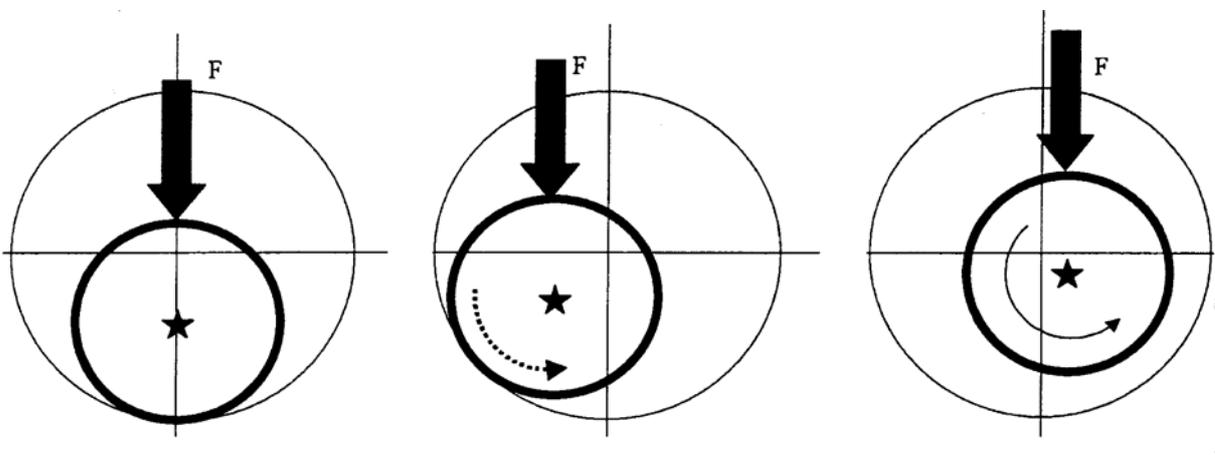


Figure 13 : Différentes positions adoptées par le couple arbre-palier lors de la mise en mouvement (démarrage),

En dehors du régime de lubrification hydrodynamique, la rugosité intervient principalement par la forme des aspérités [81]. La capacité de charge du film formé par le lubrifiant est augmentée si les sommets des aspérités offrent une pente convergente dans la direction de l'écoulement. Et d'autre part, des études réalisées au laboratoire du CETIM [82] montrent, que l'accroissement de la viscosité du lubrifiant a un effet d'autant plus bénéfique sur la capacité de charge, que la rugosité est moindre, aussi la rugosité influe également sur l'accrochage des lubrifiants. Dans le cas des lubrifiants liquides, les surfaces plus rugueuses ont meilleure mouillabilité par rapport à celles présentant un bon polissage.

Le modèle des régimes de lubrification que nous allons présenter va nous permettre de comprendre les courbes de frottement de Stribeck et permettre de proposer des paramètres influents qui seront discutés plus loin comme la rugosité, la charge, la vitesse et le couple de matériaux choisis.

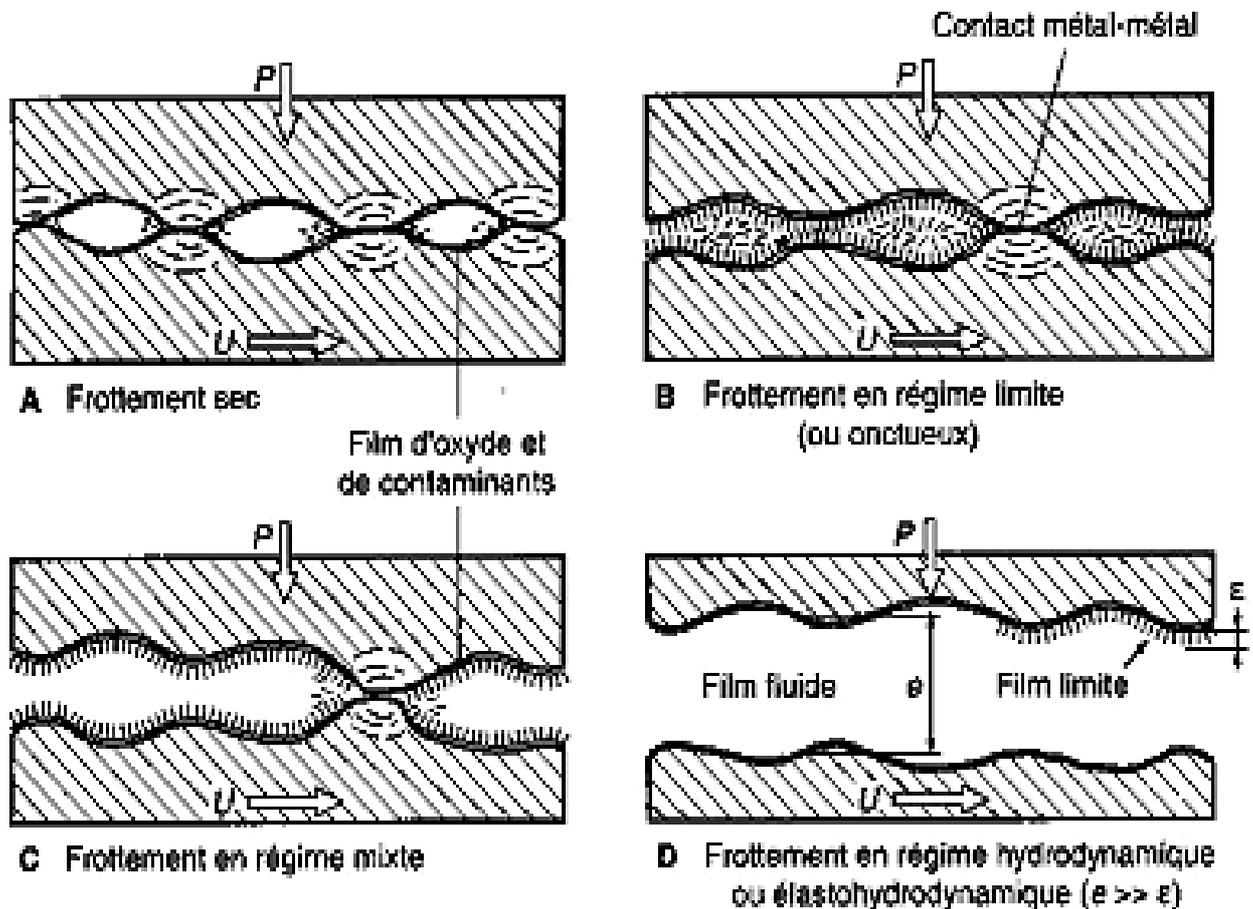


Figure 14 : Différents modes de frottement, du régime sec à celui hydrodynamique observés dans les contacts mécaniques,

6.2. La lubrification limite :

Dans le cas d'un couple de matériaux en mouvement relatif, lorsque la vitesse relative des pièces est assez faible (lors des mises en marche ou de l'arrêt, régime de fonctionnement au ralenti, ou lorsque les conditions d'alimentation en lubrifiant

sont aléatoires ;...); l'épaisseur du film lubrifiant devient inférieure à la hauteur des aspérités et la charge est totalement supportée par les aspérités en contact (**figure 14b**). Ces aspérités étant recouvertes d'un film complet ou partiellement rompu de lubrifiant adsorbé. On dit alors que l'on se trouve en régime de lubrification limite ; il subsiste entre les pièces des molécules de lubrifiant, en couches extrêmement minces, qui viennent modifier considérablement les phénomènes de frottement entre les deux surfaces antagonistes [83]. A faible vitesse et pour des pressions de contact modérées, la séparation des surfaces est essentiellement due aux molécules d'huile adsorbées.

Ce type de lubrification est assuré par des molécules d'huile polaire qui 's'accrochent' aux surfaces. Les liaisons ne correspondent pas à de véritables réactions chimiques. En fait les molécules lubrifiantes forment soit des monocouches épilâmes de substances polaires (acides gras ou savons) qui adhèrent aux surfaces par adsorption ou par chimisorbsion soit des colloïdes compacts (carbonate de calcium amorphe par exemple) qui forme un film qui sépare les surfaces. Ce type de lubrification concerne directement la physico-chimie des surfaces et des lubrifiants. L'épaisseur des couches adsorbées de lubrifiant est de l'ordre de quelques centaines d'Angstrom ($\sim 10^{-8}$ m). Le frottement est relativement important, le coefficient de frottement est compris entre 0.05 et 0.15 ; selon la nature du lubrifiant et les matériaux qui forment le contact. Ce type de lubrification se rencontre le plus souvent dans les petits mécanismes ou lors des faibles régimes de fonctionnement.

Dans les systèmes qui travaillent en régime de lubrification limite comme dans les paliers, butées et cames, on croit que le rodage est beaucoup plus influencé par la rugosité de la surface initiale du composant le plus dur. L'expérience montre que si la rugosité de la surface initiale n'a pas été sélectionnée correctement, [84], le procédé peut ne pas conduire à un état stable avec un taux d'usure faible et constant mais à une rapide détérioration des surfaces frottantes. **Masouros et al.** [56] ont développé un modèle analytique du processus de rodage sur le régime de condition limite. Le modèle a donné une équation de l'usure linéaire comme une fonction de la rugosité de la surface initiale de contact et de la distance de glissement.

6.3. La lubrification mixte :

Cette lubrification peut être considérée comme une transition entre la lubrification limite et la lubrification hydrodynamique. Pour les contacts à haute pression cette transition s'effectue entre la lubrification extrême pression et la lubrification élastohydrodynamique. Sous l'effet du déplacement des surfaces il se forme, dans les zones convergentes du film, une génération de pression qui lorsque la vitesse augmente sépare progressivement les surfaces. En fait, à cause de la rugosité des surfaces il existe des zones convergentes dans le film fluide qui permettent la génération de pression hydrodynamique. Ainsi une partie de la charge est supportée par des zones fluides et l'autre partie par des zones où le contact est en lubrification limite (**figure 14c**). Dans les zones fluides, le frottement, dû au cisaillement du fluide, est directement proportionnel à la viscosité du lubrifiant. Généralement ce frottement est nettement plus faible que le frottement existant en lubrification limite. Ainsi lorsque la vitesse augmente, les zones de lubrification hydrodynamique se développent et celles en lubrification limite se réduisent ce qui entraîne une diminution du frottement.

Ce type de lubrification existe jusqu'à ce que la vitesse des surfaces soit suffisante pour que, par effet hydrodynamique, le film lubrifiant sépare totalement les surfaces. Actuellement la modélisation de la lubrification mixte est en cours de développement et elle fait l'objet de recherches actuelles car il s'agit d'associer des phénomènes physicochimiques à des phénomènes mécaniques afin de développer des modèles qui prennent en compte ces différents comportements [85]. Le contact piston-segments-chemise au point mort haut et au point mort bas du cycle des moteurs à combustion interne correspond à ce type de lubrification.

Dans le cas plus précis des surfaces de contact très fortement chargées ou proches des zones de combustion, l'hypothèse d'une lubrification par film d'huile n'est pas vérifiée, nous parlons plutôt de lubrification mixte pendant certaines phases de fonctionnement qui sont la source majoritaire de pertes par le phénomène de l'usure abrasive. La stabilité de ce régime au niveau des aspérités est fonction des phénomènes suivants :

- l'élasticité des contacts concernés,
- la présence dans le lubrifiant de film de polymères produit lorsque la température au sein de celui-ci est supérieure à sa température d'oxydation,
- l'adsorption de l'huile à la surface du matériau,
- la formation d'oxydes par l'oxygène présent dans le milieu ou dissout dans le lubrifiant.

6.4. La lubrification hydrodynamique :

En fait, lorsque deux pièces de géométrie donnée sont en contact sous une certaine charge, on a la lubrification fluide qui est un régime où il y a établissement d'un film liquide de lubrifiant entre les surfaces frottantes (**figure 14d**). Si l'épaisseur de ce film se trouve supérieure à la hauteur des aspérités présentes sur les surfaces de frottement, il n'a pas de contact solide - solide, on dit que le mécanisme fonctionne en régime de lubrification hydrodynamique [81]. Le lubrifiant visqueux est entraîné dans le contact qui forme un espace convergent dans lequel se développe une pression hydrodynamique. Cette pression permet la séparation totale des surfaces du contact et équilibre la charge. L'exemple classique de la lubrification hydrodynamique est le coin d'huile ou blochet représentatif en deux dimensions des paliers de bielles et de vilebrequin des moteurs.

La rugosité intervient dans l'établissement du régime de lubrification hydrodynamique. Ce régime n'est pas stable que si l'épaisseur du film d'huile ou de graisse est supérieure à la somme des rugosités des surfaces antagonistes [86 ; 87]. Des études réalisées par le CETIM [81] montrent l'accroissement considérable de la portance d'un film hydrodynamique qui peut être obtenue par l'augmentation du poli des surfaces. Il est donc nécessaire que la morphologie des surfaces permette l'existence de petits réservoirs d'huile de façon à éliminer les débris et à répartir le lubrifiant. Pour le cas des rugosités faibles, dans les paliers et butées, la réalisation de sculptures sur la surface est très fréquente et même conseillée afin de pouvoir diminuer l'effet de l'usure abrasive [88].

Les surfaces sont totalement séparées par un film fluide et la durée de vie du mécanisme peut dépasser 50.000 heures. Les seules avaries ou détériorations possibles sont dues à une abrasion liée aux impuretés en suspension dans le lubrifiant, aux phénomènes de cavitations qui peuvent exister dans le film sous charges dynamiques, à la fusion du régule sous l'effet de températures trop élevées et à des piqûres par décharges électriques s'il existe une différence de potentiel entre les deux surfaces du contact [89]. Mais cela n'est possible que si l'on assure une très bonne étanchéité contre les polluants et un filtrage très efficace de l'air nécessaire au fonctionnement des moteurs à combustion interne.

6.5. La lubrification hydrostatique :

En lubrification limite et en lubrification mixte il y existe toujours une usure abrasive (même sans l'introduction de polluants), et selon les conditions de fonctionnement il peut se produire du grippage des surfaces en contact. Ainsi lorsque l'on veut une sécurité de fonctionnement importante ou si l'on souhaite réduire le frottement et cette usure abrasive, surtout lorsque la vitesse relative entre les deux surfaces est trop faible pour générer une pression dans le fluide susceptible de séparer les surfaces en contact, il est possible d'utiliser la lubrification hydrostatique. Ce type de lubrification permet de séparer totalement les surfaces en injectant dans le contact du fluide de lubrification sous pression. Des résistances hydrauliques (capillaires, diaphragmes ...) placées en amont du film, à l'entrée du contact, permettent d'assurer un fonctionnement stable du mécanisme. Dans un système hydrostatique le frottement dépend essentiellement du déplacement des surfaces et est quasi indépendant de la charge appliquée au mécanisme ; ainsi lorsque les surfaces sont immobiles, le frottement est nul [90]. Selon le fluide utilisé et les conditions de fonctionnement, le régime d'écoulement dans le film peut être laminaire ou non laminaire.

6.6. La lubrification extrême pression :

En lubrification extrême pression (EP), les surfaces sont séparées par un film réactif formé par réaction chimique entre les additifs extrême pression contenus dans le lubrifiant. Ces additifs sont des macromolécules comportant des atomes de soufre, de chlore ou de phosphore. L'un des plus utilisés actuellement est le dithiophosphate de zinc ou DTPZn qui possède à la fois des propriétés anti usure et extrême pression. Sous

l'effet des pressions, des températures et des forts taux de cisaillement existant dans le contact, les macromolécules sont détruites ; il se forme alors des radicaux libres de soufre et de phosphore extrêmement actifs qui réagissent avec le métal des surfaces et forment une véritable liaison chimique. Ainsi les macromolécules sont liées à la surface et les protègent. Les mécanismes d'action de ces additifs sont complexes et ne sont pas encore entièrement connus. Les lubrifiants utilisés actuellement pour les engrenages et les roulements à billes des boîtes de vitesse automobiles contiennent des additives extrêmes pressions qui permettent d'éviter le phénomène du grippage pouvant avoir lieu surtout lors des démarrages.

Au cours de la période du rodage ou de démarrage beaucoup de contacts non-conformistes des machines, travaillant en régime de lubrification élastohydrodynamique partiel (LEHP), autrement dit la force de contact est partagée entre le film d'huile et le contact entre les aspérités. L'épaisseur du film d'huile est de même ordre de grandeur que la rugosité de la surface. Au cours de ce régime de lubrification, le contact entre les aspérités ainsi que l'usure sont inévitables. La variation de la rugosité des surfaces par l'usure au niveau des aspérités affecte l'épaisseur du film d'huile et par conséquent le comportement des particules abrasives [91]. À son tour, la lubrification et le procédé d'usure sont aussi affectés par la variation du film d'huile [92]. La contribution des aspérités sur la force de contact diminue pour des conditions idéales de fonctionnement d'un système, donnant une séparation complète des surfaces par l'interposition d'un film de lubrifiant [93].

En ce qui concerne l'impact des additifs, **Rowe [94]** montre que l'introduction de ces derniers dans la composition du lubrifiant, réduit les vibrations provenant lors des changements de charge ou de vitesses intempestifs et diminue le taux d'usure, ce qui a pour conséquence la diminution de l'adhésion locale des surfaces, donc une amélioration du frottement réduisant ainsi l'usure des couples de matériaux en contact. L'auteur souligne que la température de la surface en contact est fonction du temps de glissement lors de la période de rodage. Cette température augmente rapidement pour dépasser (50 ÷ 60) °C. Si les conditions de l'effet hydrodynamique sont réunies, la température diminue jusqu'à environ 40 °C et le coefficient de frottement est minimal aussi ainsi qu'une tendance à la baisse de l'usure [95].

VII. Lubrification et usure :

7.1. Problèmes de lubrification :

La défaillance des matériaux à usage industriel est presque toujours un événement indésirable, et ce, pour plusieurs raisons : elle peut mettre en danger des vies humaines, entraîner des pertes économiques et entraver la production de biens et service. Même lorsque les causes d'une défaillance et le comportement des matériaux sont connus, elle demeure difficile d'assurer la prévention des défaillances. Un choix ou un traitement erroné des matériaux de même qu'une conception ou une utilisation inadéquate d'un composant constitue les causes de défaillance les plus fréquentes. La tâche de l'ingénieur de conception consiste précisément à prévoir les défaillances possibles et, si une défaillance se manifeste, à en déterminer les causes et à prendre les mesures de prévention appropriées.

L'abrasion est une usure typique des régions désertiques et du cosmos. Il faut empêcher l'entrée des corps étrangers par une bonne étanchéité et imposer des jeux plus petits que les particules abrasives, si l'on sait que ces dernières sont assez grosses. Il faut aussi donner une dureté maximale à la pièce qui défile devant la zone de contact et faire l'autre aussi "tendre" que possible pour qu'elle puisse "enliser" les particules abrasives. Un coussinet trop dur incrustant des corps étrangers use davantage l'arbre [96]. Il est essentiel que les particules abrasives et les débris d'usure soient évacués des zones frottantes. Il faut impérativement prévoir des sculptures ou des moletages, si aucune circulation de lubrifiant ne permet cette évacuation [97].

Malheureusement, l'emploi de lubrifiant est soumis aux conditions extérieures imposées par le milieu. Par exemple, un milieu sous vide comme l'espace interdit l'emploi de lubrifiant liquide qui se vaporise ou ne peut pas rester confiné dans le contact. Dans le cas d'un moteur à combustion interne, l'huile n'est présente dans le contact que par le pouvoir de capillarité de la chemise et partiellement brûlée lors de l'explosion du mélange. Selon les cas extrêmes de fonctionnement d'un système mécanique, souvent on a recours à la lubrification solide. Les lubrifiants sont alors utilisés soit seuls, en substitution des huiles et graisses ; soit associés aux lubrifiants conventionnels pour améliorer leurs performances en régime de lubrification limite ou assurer une lubrification temporaire.

Pour certaines applications (aérospatiale, nucléaire, cryogénique,...), il n'y a pas d'alternative à l'utilisation de certains de ces types de lubrifiants solides du fait de leur tenue sous vide, en présence de radiations, à très basses ou très hautes températures,... Ces lubrifiants sont mis en œuvre sous forme de poudres, de dispersions dans un fluide (huile, eau, solvant), dans les graisses et pâtes lubrifiantes, sous forme de vernis de glissement et de matériaux composites autolubrifiants. Par exemple, la lubrification des roulements cryotechniques des turbopompes des lanceurs spatiaux étant assurée par un polymère transféré sur les billes à partir de la cage. Ce matériau se transfère ensuite des billes sur les bagues, d'où l'intérêt d'approfondir le rôle du polymère contenu dans la cage et d'analyser les phénomènes mis en jeu afin d'améliorer la lubrification par transfert.

De plus, les fortes pressions de contact chassent l'huile, redonnant alors un contact sec ou mixte. La solution consiste à augmenter les surfaces portantes ou à augmenter l'apport d'huile. Cette dernière solution est utilisée dans les moteurs. Si cela n'est pas suffisant, un choix de matériaux comme des céramiques pour les jupes de pistons peut être fait pour atténuer l'impact du frottement sec. Mais toutes ces solutions qui font l'objet de recherches permanentes sont purement passives. La nature du contact est subie et les seuls degrés de liberté sont sur l'emploi de lubrifiant ou de matériaux. Actuellement, cette recherche semble s'essouffler et ne garantit plus une progression rapide, pénalisant la compétitivité. Dans son étude du frottement des céramiques dans les moteurs industriels, **M. Taibi [98 ; 99]**, a permis de mettre sur pied un modèle phénoménologique s'articulant autour du troisième corps qui est la base de la tribologie des interfaces et qui permet de passer de façon de minimiser l'usure abrasive dans le système chemise-piston des moteurs diesel fonctionnant dans des conditions d'exploitation sévères.

Il faudrait s'intéresser particulièrement ici aux cas des frottements secs en présence de particules abrasives car ce sont les plus pénalisants pour notre application qu'est le moteur. Lors des fortes pressions qui règnent dans la chambre de combustion, le film d'huile de quelques micromètres d'épaisseur se rompt. Le piston et la chemise sont alors en contact direct et à cause du mouvement relatif, ils frottent l'un contre l'autre dans un régime de lubrification sec avec toutes ses conséquences. Quelques études ont été menées sur le sujet et concernent les deux types de contact : secs et lubrifiés.

7.2. Lutte contre le phénomène de l'usure :

En règle générale lors du choix des matériaux constituant le couple de frottement, un examen de leurs compatibilités est nécessaire, c'est-à-dire vérifier s'il ne se produit pas du simple fait de leurs conditions de mise en contact, de fonctionnement, des grippages épidermiques, des destructions superficielles immédiates pouvant amener les mécanismes à faillir. Les expériences réalisées dans les différents laboratoires de tribologie, nous indiquent que les meilleurs couples de frottement sont généralement composés d'un matériau dur en présence d'un antagoniste plus tendre.

Par contre les circonstances et conditions d'observation de l'usure abrasive sont multiples dans les procédés industriels :

- Organes mécaniques sollicités lors du traitement des roches et minéraux de toute nature (outils de forage des puits, concasseurs, engins de terrassement,...),
- Installations des appareils et équipements de forage en zone saharienne,
- Pneumatiques de véhicules automobiles,
- Pièces fonctionnant en contact glissant pour des applications mécaniques, électriques (cas des têtes de lecture magnétique),
- Domaines de l'aérospatial.

Les trois premiers cas de sollicitation de l'usure, illustrent l'importance de l'abrasion en ce qui concerne l'économie de matières premières élaborées, qu'ils s'agissent de métaux ou alliages métalliques aussi bien que de polymères. Le passage du diagnostic à la prévision dans la défaillance des machines et équipements nécessite la connaissance et la rationalisation des lois de l'usure et en particulier les phénomènes favorisant l'abrasion au niveau des surfaces de contacts.

Pour limiter l'abrasion, on préconise de donner une dureté maximale à la pièce qui est en mouvement devant la zone de contact et faire l'autre aussi "tendre" que possible pour qu'elle puisse "absorber" les particules abrasives comme fait le

plomb lorsqu'il "beurre" une lime, la rendant inopérante. L'abrasion apparaît comme un processus interfacial évolutif concernant les volumes superficiels des matériaux en regard. Généralement l'abrasion est diminuée en augmentant la dureté superficielle de la matière sur une profondeur importante. Pour cela, les pièces du contact sont écrouies (procédé mécanique) ou traitées en surface par voie thermique ou thermochimique (ex. dépôt de chrome, nitruration,...).

Pour certaines applications dans l'industrie (lorsque par exemple des grandes vitesses de rotation sont nécessaires, l'usinabilité du matériau de base est un critère de choix, ...), il est nécessaire de travailler avec des matériaux légers comme l'aluminium ou ses alliages. Bien que ces matériaux légers offrent de nombreuses propriétés intéressantes, ils sont caractérisés par des propriétés de surface médiocres qui sont synonymes de faible résistance à l'usure par abrasion. Pour pallier à ce problème des revêtements mis en forme par projection thermique peuvent alors être réalisés.

Le frottement est un phénomène à trois dimensions qui concerne une certaine épaisseur de matériau sous la surface. À partir de cette dernière, on doit distinguer plusieurs couches successives qui existent sur l'immense majorité des pièces. Empêcher les contacts intermétalliques revient à améliorer la lubrification, ou à renforcer le manteau protecteur naturel d'oxydes, ou à créer un manteau protecteur artificiel. Ce dernier peut être sécrété par le métal lui-même, comme le graphite des fontes, ou apporté de l'extérieur, comme le sulfure de fer engendré par le Sulfinuz. Les deux buts essentiels des traitements et revêtements de surface sont la lutte contre le frottement et la limitation de l'usure. Une couche protectrice anti-usure n'est intéressante que si son épaisseur est au moins égale à la perte de matière admissible pendant la durée de vie du mécanisme. L'objectif est d'optimiser les conditions utilisées pour la réalisation de dépôts durs résistants à l'usure par abrasion.

L'usure des matériaux purs est à peu près inversement proportionnelle à leur dureté mais le rapport de proportionnalité varie avec leur structure. Généralement on diminue l'abrasion en augmentant la dureté superficielle sur une profondeur importante. Une meilleure résistance à l'oxydation et à la corrosion donne moins d'oxydes abrasifs, l'écrouissage augmente la dureté et la résistance à l'usure. Il y a 30 ans on n'utilisait

que les fontes et les aciers spéciaux, avec le chrome comme élément d'alliage privilégié. Depuis, la palette s'est élargie à certaines matières plastiques et céramiques. **M. Taibi**, après une synthèse bibliographique critique, [98], nous montre dans la suite de ses travaux de recherche la diminution de l'effet de l'abrasion du couple céramique-métal dans des conditions de frottement lubrifié aux hautes températures dans le cas des moteurs diesel industriels en concluant que l'utilisation de la zircone permet l'obtention d'une usure plus faible (de l'ordre de 3 à 4) par rapport à l'utilisation des matériaux types pour les segments et cylindres constituant les forces motrices utilisées dans des conditions d'exploitation très abrasives [99]. Alors que pour les métaux ferreux on peut utiliser des structures martensitiques ou apporter un fort pourcentage de phases dures, carbures ou nitrures [100].

M. Taibi [32 ; 61 ; 98 ; 99], conclue, dans ses divers travaux de recherches et synthèses sur le phénomène de l'usure abrasive dans les moteurs diesel, que la zircone ; céramique thermomécanique ; peut être utilisée comme solution au problème de l'usure abrasive. C'est-à-dire que celle-ci, formant le revêtement de la partie haute des chemises de cylindres des moteurs diesel exploités dans les conditions sahariennes, va entraîner une meilleure tenue à l'usure par conséquent une augmentation de la longévité d'exploitation des machines et équipements mécaniques d'où l'impact économique.

Des dépôts de natures différentes peuvent être employés efficacement pour combattre l'usure abrasive, adhésive ou érosive, y compris pour des applications qui nécessitent une résistance à l'usure et à la corrosion, aux températures ambiantes ou élevées. Les dépôts de carbure se révèlent souvent un excellent choix pour des applications contre l'usure et la corrosion. Ces dépôts se composent de petites particules en céramique incrustées dans une phase intermédiaire métallique. Ainsi, les dépôts à base de WC-Co et Cr_3Co_2 , sont utilisés en remplacement des dépôts de chrome dur. Les matériaux à base de carbure de tungstène avec un liant cobalt (WC-Co) sont employés intensivement dans l'industrie dans leur forme massive ou sous forme de dépôts réalisés par projection thermique pour des applications nécessitant une résistance à l'abrasion, au glissement, à la corrosion et à l'érosion [101]. Les particules dures de WC sont le constituant majeur dans la résistance à l'usure, alors que le liant de cobalt apporte la ténacité et le support. Des propriétés telles que la dureté et la résistance à l'usure sont influencées principalement par la taille des grains de WC et leur fraction volumique et par la porosité et la composition de la phase liante [102].

Les traitements de surface répondent à des besoins réels d'amélioration des performances des matériaux. Leur fonction étant d'améliorer la tenue du matériau vis-à-vis des sollicitations externes, tout en préservant ses propriétés volumiques. Les agressions dues à l'usure ou à la corrosion sont un problème commun en ingénierie, que la pièce, le dispositif, le système, soient en contact avec des solides, des liquides ou des gaz. En général, l'endommagement causé par l'usure ou la corrosion peut être atténué, voire évité, par la substitution de matériaux plus résistants. Cependant, de tels matériaux ont un coût souvent très élevé. Compte tenu de ces impératifs, on est amené à envisager les techniques de traitement et revêtement de surface, lesquelles offrent une autre voie pour combattre l'usure et la corrosion. Depuis plusieurs décennies, divers procédés et matériaux d'apport ont été employés pour modifier les surfaces afin d'accroître leur résistance aux agressions extérieures.

Les divers traitements ou revêtements préconisés dans le traitement des surfaces, peuvent être classés dans l'une des catégories suivantes :

- traitements avec transformations structurales par des procédés mécaniques mettant en compression les zones superficielles : galetage, brunissage, grenailage de précontrainte...

- traitements thermiques proprement dits, qui modifient la structure métallurgique : trempe à cœur ou superficielle.

- traitements thermochimiques de diffusion qui mettent en jeu des métalloïdes (cémentation, nitruration, carbonitruration, boruration...) ou des métaux (Forez, Delsun, Zinal, Stanal, Sulficad, chromisation...)

- traitements thermochimiques de conversion, souvent en bains de sels fondus, qui forment à la surface des pièces des composés capables de faciliter le glissement et de prévenir le grippage.

Les demandes des industries pour des revêtements techniques sont de plus en plus contraignantes. L'impact environnemental des procédés de mise en forme

des revêtements est aussi de première considération. Pour satisfaire des contraintes de compétitivité économique liées à un impact environnemental faible, les ingénieurs de conception sont portés à tourner leur attention vers des procédés qui utilisent le minimum de ressources. La projection thermique est une technique attrayante pour la réalisation de revêtements puisqu'elle offre la possibilité d'une grande variété de matériaux à mettre en forme et les procédés mis en œuvre ont un impact environnemental réduit en comparaison avec les autres procédés conventionnels de traitement de surface.

De nos jours les procédés de projection thermique font partie de la panoplie des techniques de traitements de surface préconisées par les bureaux d'études. En comparaison avec les procédés traditionnels de traitements des surfaces, les techniques de projection thermique offrent des capacités d'épaisseurs supérieures, la possibilité de traiter des pièces de très grandes dimensions, la possibilité de faire du traitement sur site, tout ceci sans produire de déchets encombrants.

Ces procédés de traitement de surfaces à hautes températures permettent de déposer des matériaux à haut point de fusion sur un substrat maintenu à une température faible. On distingue deux grands domaines d'application en tribologie de ces procédés à savoir l'amélioration du frottement et la diminution de l'usure. Pour ce dernier, le volume d'application le plus important concerne la protection contre le phénomène de l'usure par abrasion. Ce type d'usure se traduit par un déplacement de matière sur la surface en contact avec des particules abrasives ou des protubérances dures de l'autre surface en vis à vis. Il peut être fortement limité en protégeant la surface de la pièce avec un revêtement dur avec une forte adhérence au substrat et une bonne cohésion [103]. Pour un dépôt réalisé par projection thermique qui présente une microstructure lamellaire, cette cohésion exige une très bonne qualité de contact entre les lamelles et une certaine homogénéité. Cette dernière impose la réalisation de dépôts peu poreux et pour les dépôts métalliques, contenant peu d'oxydes. En effet si la présence d'oxydes dans le dépôt se traduit généralement par une élévation de sa dureté, elle entraîne aussi sa fragilisation car les lamelles oxydées sont généralement peu ou mal liées avec les autres lamelles [104].

Un cas intéressant de la protection des mécanismes ; (devant notamment avoir des caractéristiques de frottement et de tenue à l'usure excellentes) ; contre

L'usure abrasive provoquée par des éléments étrangers au contact, est un graissage uniquement au montage avec des espacements de lubrification très importants. Dans le cas d'articulations ou de paliers travaillant dans des conditions et environnements difficiles, (à titre indicatif les travaux publics, la sidérurgie, les machines agricoles, les véhicules de transport, ...), en étant fortement chargés et travaillant en ambiance abrasive, et éventuellement corrosive, l'utilisation d'organe de guidage autolubrifiant trouve une application avantageuse. Généralement, ces systèmes mécaniques concernées fonctionnent uniquement sous fortes charges avec des mouvements oscillants de faible vitesse et sont préalablement graissées. Ces conditions de fonctionnement ne peuvent en aucun cas créer un régime hydrodynamique mais fonctionnant plutôt en régime de lubrification de type onctueux. Mais la préconisation de ce type de solution n'est hélas pas applicable pour tous les contacts mécaniques.

Dans les conditions de notre étude, on peut résumer la lutte contre l'usure abrasive des installations sahariennes (moteurs des groupes de force ou électrogènes en particulier) par :

- assurer une filtration efficace des fluides : air comprimé (en priorité, par l'installation de système de filtration de très grande efficacité), huile moteur (en assurant une éventuelle décantation des particules abrasives tout en respectant les périodes de vidange et rinçage du réservoir), les vidanges d'huile doivent être plus fréquentes (toutes les 400 heures de fonctionnement). Par contre pour les filtres, on préconise leur changement toutes 2.000 heures d'utilisation dans les conditions sahariennes normales, mais il est fortement conseillé de diminuer celle-ci en cas d'exploitation durant les saisons de vents de sable.

- une bonne étanchéité au niveau des joints dynamiques aussi bien que statique afin d'empêcher l'introduction des particules et poussières atmosphériques dans les zones de contact mécanique des pièces,

- un choix de métallurgie de surface résistant bien à l'abrasion du fait de leur dureté et de la cohésion de leur structure. Les traitements de surface, examinés précédemment, peuvent avoir des effets bénéfiques,

- une réduction de l'intervalle de tolérance des ajustements assurés avec jeu : dans ce cas prévoir des jeux de faibles valeurs, dans la mesure du possible, de façon à diminuer la possibilité d'introduction des particules abrasives,

- une conception des pièces mécaniques munies de formes d'usinage (rainures, trous,...) pour une meilleure évacuation des particules abrasives introduites à partir du milieu ambiant et/ou de celles produites par le phénomène de l'usure.

- Protéger les surfaces de travail des pièces conjuguées contre la pénétration des poussières et des copeaux en installant des protections des volets, des carters et d'autres dispositifs similaires.

- Le mécanisme de filtration de l'air nécessaire pour la combustion dans les moteurs est assuré par l'emploi de filtre multi-cyclone. L'introduction et la mise en rotation du flux d'air provoque un déplacement périphérique des particules sous l'effet de la force centrifuge. L'efficacité de ce type de filtre (90 à 95 %), a été établie pour les particules solides dont les dimensions sont supérieures à 10 μm . D'où, pour diminuer l'effet de l'usure abrasive, une amélioration du procédé de ce type de filtre doit être envisagée.

VIII. Surfaces et microgéométrie de contact:

En tribologie, la surface (ou l'interface) ne se limite pas uniquement à la notion d'aire d'appui des corps, mais concerne plus généralement les éléments de contact qui jouent un rôle sur le frottement, c'est-à-dire sur les contraintes mécaniques, les températures, le comportement du troisième corps (lubrifiants, débris d'usure,...). L'état de surface réel des pièces est un paramètre, qui, en régime de lubrification hydrodynamique ou hydrostatique par un fluide (liquide le plus souvent, parfois gazeux), caractérise l'épaisseur minimale du film permettant d'assurer la formation d'un film continu et de séparer totalement les solides [105 ; 106].

L'étude à l'échelle microscopique des pièces mécaniques montre que les surfaces de contact ne sont pas totalement et parfaitement parallèles. Il est

donc nécessaire de prendre en compte l'effet de la rugosité mais également l'effet des petites variations d'épaisseur du lubrifiant dans l'étude du comportement tribologique d'un couple de matériaux. Dans ce concept il est également important de considérer la géométrie du sommet des aspérités et la distance entre la ligne moyenne de la surface rugueuse et celle de la surface plane (**figure 15**). La force normale est transmise par le contact solide (avec un coefficient de frottement élevé aux sommets des aspérités les plus élevées) et par le contact fluide (avec un bas coefficient de frottement, les aspérités sont situées au-dessous de la hauteur requise pour le contact direct). Dans le cas d'une absence totale ou partielle du lubrifiant les deux corps frottent directement l'un sur l'autre, les aspérités des surfaces sont seules en contact ; les pressions locales peuvent devenir très élevées et dépasser les limites élastiques des matériaux en contact. La rugosité du matériau le plus tendre diminue habituellement, celle des matériaux le plus dur s'atténue moins vite.

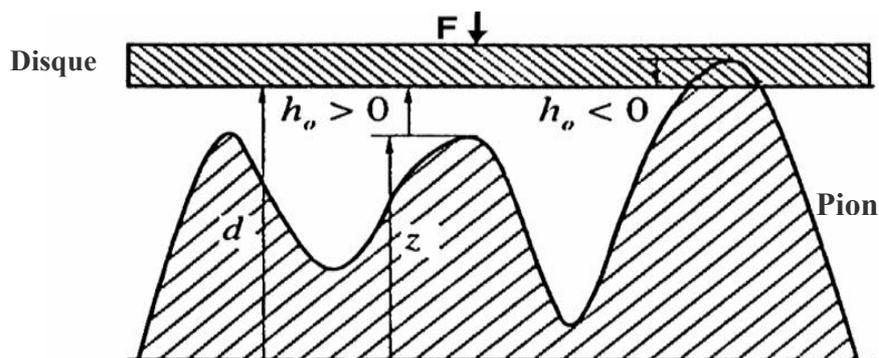


Figure 15 : Surface somme d'une paire pion-disque.

Il n'est plus à démontrer que les propriétés des surfaces de contact jouent un rôle essentiel dans tout processus où la surface est impliquée en tant qu'interface. Parmi les principaux domaines concernés on peut citer : les contacts en mouvements relatifs qu'ils soient lubrifiés ou non, les contacts électriques, la transmission des efforts par les assemblages,... . La caractérisation des propriétés de surface constitue un domaine extrêmement vaste qui englobe entre autres des caractéristiques physiques, chimiques et géométriques. Ces caractéristiques sont indispensables car, du fait de la transformation des pièces (procédés d'usinage, transformations superficielles ayant lieu lors de leur utilisation,...), les propriétés en surface peuvent être très différentes de celles en volume.

A l'heure actuelle, les travaux réalisés sur les microgéométries de surface se poursuivent. Ils portent à la fois sur la caractérisation et la modélisation de manière à mieux formaliser l'incidence de ce paramètre dans de nombreux domaines tels que l'optique (pouvoir réfléchissant), le toucher ou la mécanique (comportement des pièces en contact) et la corrosion.

De toutes ces caractéristiques, la microgéométrie ou rugosité des surfaces ne doit pas être négligée d'autant plus que les procédés de fabrication de pièces peuvent induire des microgéométries de surface de grandes variétés qui sont capables de générer des comportements totalement différents. L'enregistrement direct du profil d'une pièce peut révéler différents types de défauts qui sont de nature et d'origines très différentes. Et, on distingue les variations microgéométriques de grandes amplitudes caractérisées par les défauts de forme et d'ondulation qui proviennent soit de la non planéité de la pièce, soit des vibrations basses fréquences causées par l'usinage. Alors que les défauts de plus faibles périodes constituent la rugosité proprement dite de la pièce et sont causés directement par les caractéristiques de l'usinage de la pièce (type de mise en forme ou usinage, forme de l'outil, avance,...). Et l'objectif du traitement du signal est séparer ces deux types de défauts pour pouvoir les quantifier séparément. Il est fondamental de souligner qu'à l'heure actuelle, une très large majorité des caractérisations microgéométriques de surface est réalisée avec entière satisfaction en utilisant une exploration et analyse suivant une génératrice.

Les solutions technologiques classiques du frottement et de l'usure consistent en la formulation d'un couple de matériaux et d'une géométrie de contact adaptée aux contraintes tribologiques du système mécanique (pressions, vitesses). De plus, dans de nombreuses situations, il est nécessaire d'introduire une lubrification réalisée par des lubrifiants solides ou liquides. La tribologie s'est tournée vers l'étude des surfaces grâce aux concepts de la physique des surfaces. Depuis une vingtaine d'années, la recherche en tribologie porte sur l'étude de la dynamique des interfaces avec la prise de conscience du rôle fondamental des éléments interfaciaux dans un contact mécanique. L'ensemble des détériorations de la surface et la perte de matériau nous donnent les caractéristiques du phénomène de l'usure. Ce processus se traduit par un enchaînement d'événements liés essentiellement à la présence du troisième corps : détachement des particules, piégeage et formation de débris pour aboutir à l'établissement d'un régime stationnaire traduisant

l'équilibre entre détachement et élimination des particules. La notion de surface est définie par l'ensemble des propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux en présence mais aussi par les caractéristiques géométriques du contact.

La topographie des surfaces de contact mécanique influence un certain nombre de phénomènes tribologiques comme la pression de contact, l'adhérence, le frottement, l'usure et la lubrification. Les surfaces sont issues de processus de finition qui travaillent la surface de manière régulière (ex. machine outil). Le profil a tendance à présenter une périodicité qui dépend de la qualité de la finition, la vitesse d'exécution, la qualité de l'outil,... (ex. un tournage engendre un sillon en spirale de forme régulière). De même, la direction prise pour cette longueur est essentielle : les surfaces sont rarement isotropes et présentent des axes topographiques privilégiés (ex. dans le sens normal au passage de l'outil).

La topographie est une caractéristique géométrique de grande importance. La rugosité joue un rôle essentiel puisqu'elle détermine l'aire effective de contact et donc la distribution des pressions superficielles. Il faut aussi garder à l'esprit qu'un état poli miroir ne correspond pas forcément à la rugosité idéale des surfaces pour conférer une vie saine au système tribologique. Par exemple, dans le cas de deux matériaux frottant de dureté différente, la diminution de la rugosité du corps le plus dur est une bonne solution pour diminuer le frottement et l'usure par abrasion alors qu'une certaine rugosité du corps le moins dur facilite la rétention d'un lubrifiant et limite également le frottement et l'usure par adhésion [107].

IX. Conclusions sur la synthèse bibliographique :

L'analyse et la synthèse de la recherche bibliographique nous a permis de dresser un bilan des phénomènes qui contribuent au processus de l'usure abrasive. Le souci de synthétiser ces phénomènes de surfaces (usure et abrasion en particulier) en une théorie spécifique nous conduit à l'étude de la "mécanique physico-chimique" : science qui progresse à la frontière de la chimie - physique des surfaces, de la mécanique des corps déformables, de la physique des solides et de la technologie des matériaux. C'est une mécanique, parce qu'elle opère avec les notions d'état de contraintes, déformations,

glissements, écoulements, viscosité,... . Mais en plus, elle étudie spécialement les facteurs physico-chimiques dans leurs actions directes ou indirectes sur les propriétés d'un corps ou plus, généralement d'un système durant sa phase de création [108 ; 109]:

* les dégradations issues d'un contact abrasif en milieu lubrifié peuvent être classer en configurations types suivantes:

- avec enlèvement de matière (formation de copeaux),
- sans enlèvement de matière (déformation ou refoulement de matière).

* le comportement réel d'un matériau en abrasion est intermédiaire entre les cas extrêmes fragiles et ductiles.

L'apport des modélisations expérimentales, [110], effectuées consiste en l'observation de phénomènes de transition dans le comportement du contact abrasif lubrifié : des structures singulières de morphologies d'écoulement et de dégradation de surface séparent des domaines d'équilibre aux structures bien définies. Le système en frottement peut évoluer au cours du temps sans perturbation extérieure avant d'atteindre un état stabilisé, notamment lorsque les particules d'usures s'incrustent ou adhèrent l'une sur l'autre des surfaces en regard, transformant l'abrasion "à trois corps" en abrasion "à deux corps". Les règles empiriques, c'est-à-dire l'évolution de l'usure avec la charge, le temps de mouvement, la température de fonctionnement,..., sont difficilement généralisables car elles dépendent en général du type d'essai effectué [111] :

* en "circuit ouvert " : la surface abrasive rencontre une surface fraîche, de caractéristiques constantes ; ce qui peut conduire à une usure croissante linéairement avec la distance parcourue (ou du temps),

* en "circuit fermé " : l'éventuelle apparition d'un produit interfacial (accumulation de débris d'usure, de lubrifiants ou de produits de réaction,...) fait que l'évolution de l'usure est à priori inconnue.

D'autre part cette étude bibliographique nous a montré que les régimes de lubrification mixte et limite sont régis par une partition des efforts normaux entre efforts transmis par des contacts quasi-directs et le reste transitant via un film lubrifiant. L'origine de cette partition au sein même du contact est à attribuer à la microgéométrie qui module l'épaisseur du film d'huile allant jusqu'à la réduire de quelques molécules d'huile au niveau des aspérités les plus hautes [112]. Et il est à noter que la frontière entre la lubrification mixte et la lubrification limite est extrêmement délicate à identifier, ce qui, des fois, facilite la confusion entre les deux.

L'analyse de la lubrification mixte ou limite, déjà compliquée en situation de fonctionnement stationnaire, révèle une difficulté supplémentaire lorsqu'on la couple à l'étude du rodage (début des essais de frottement ou d'usure), car cette phase de fonctionnement d'un avis unanime, se traduit par des évolutions microgéométriques très importantes et va probablement créer de multiples synergies avec les régimes de lubrification mixte ou limite [84].

Ainsi comme le montre cette étude bibliographique, depuis un peu plus de dix ans à présent, de nombreuses recherches ont été menées dans le but d'incorporer des particules solides inertes dans une matrice métallique afin d'en améliorer les propriétés telles que la résistance à l'usure ou la capacité de glissement des surfaces selon les particules utilisées [113]. L'inclusion de PTFE, diamants naturels et synthétiques, céramiques, carbures de chrome, carbures de silicium, oxydes d'aluminium, carbures de tungstène, zirconium, nitrure de bore etc. fait partie de certaines offres commerciales et techniques préconisées dans le but d'améliorer le frottement et surtout de diminuer le phénomène de l'usure abrasive.

Nous n'avons pas pu trouver de bibliographie qui nous puisse présenter de pareilles expériences de fonctionnement et de rodage sur un banc d'essai. Alors nous avons varié la vitesse de glissement en deux intervalles : le premier à vitesse décroissante et le deuxième à vitesse croissante. Et à chaque intervalle nous avons mesuré le coefficient de frottement en des valeurs de vitesses prédéfinies. À chaque fois que la vitesse varie nous avons une nouvelle période de rodage, la valeur du coefficient de frottement

change, puis se stabilise. Entre les périodes successives de fonctionnement, d'essais de frottement ou de rodage on retrouve toujours les phases transitoires qui sont très complexes à étudier.

La thématique de cette recherche était de répondre à un besoin industriel fort qui consiste à rechercher des solutions pour accroître la fiabilité, la qualité et le coût de mise en œuvre de pièces mécaniques soumises à des sollicitations extrêmes (usure abrasive dans les cas de lubrification limite ou mixte).

A l'aide de la synthèse de cette recherche bibliographique et de modélisations expérimentales (techniques d'essais simples et adéquats permettant d'étudier l'influence de différents paramètres sur le phénomène de l'usure abrasive à trois corps en milieu lubrifié), nous allons essayer de comprendre les mécanismes de l'abrasion et les lois qui les régissent pour des conditions d'exploitation données.

De ces conclusions traitant les phénomènes d'usure abrasive des pièces composants les équipements mécaniques des installations de forage, l'on déduit l'importance incontestable des résultats présentés dans cette première partie de la recherche, et surtout l'actualité ainsi que l'impact économique indiscutables du sujet traité.

B. MODELISATION EXPERIMENTALE :

I. Préliminaires :

L'objectif de ce travail est de mettre en évidence l'importance de l'introduction d'un troisième corps abrasif à l'interface sur le comportement mécanique des microgéométries des matériaux étudiés. La caractérisation des phénomènes d'abrasion est difficile à quantifier: en effet dans la plupart des applications technologiques, on rencontre une combinaison des différents phénomènes d'usure :

- * des aspérités de surfaces créent des rayures sur la pièce antagoniste : abrasion à deux corps,

- * les fragments abrasifs transférés d'un corps à l'autre ou libérés ou encore introduits peuvent après écrouissage dans certains cas, engendrer des déformations supplémentaires : abrasion à trois corps ; dès lors la distinction de la surface abrasive - surface abrasée est impossible.

Nous, nous proposons d'analyser d'un point de vue phénoménologique les mécanismes de l'usure abrasive à trois corps et la déformation des surfaces. Notre but est principalement d'étudier les influences physico-chimiques, rhéologiques et mécaniques du contact sur les modes de dégradations des surfaces sollicitées. Dans notre cas nous aborderons les matériaux métalliques dont l'hétérogénéité et la rugosité des surfaces sont également prises en considération. La méthode adoptée présente l'originalité de synthétiser des modèles d'abrasion existants (l'aspect tribologique interfacial du processus est particulièrement abordé) et d'analyser par le truchement de modélisations expérimentales simples, les influences relatives de différentes données du contact abrasif lubrifié. Les conséquences des processus microscopiques locaux (initiation à la rupture ductile ou fragile de la déformation plastique,...) sur la déformation macroscopique globale du contact abrasif sont discutées.

D'où dans notre étude, pour notre approche expérimentale, on s'intéresserait particulièrement au comportement de la surface abrasée sous l'action d'une protubérance dure, indéformable et rigide. Si on considère le contact entre une pointe rigide (de forme tronconique à extrémité de calotte sphérique) et un espace limité par un plan curviligne, nous obtenons une schématisation de l'usure abrasive par une aspérité (usure abrasive à trois corps).

Lorsque le rodage et le frottement se déroule sans problème, on observe automatiquement une diminution de la rugosité. Ceci est dû au fait que, si une surface plane et dure est appuyée avec une charge P sur un autre corps réel rugueux d'un matériau de limite d'élasticité R_e , les aspérités de la surface vont s'écraser plastiquement (**figure 16**) jusqu'à ce que les déformations aient engendré une somme de microaires $\sum s$ telle que :

$$R_e = \frac{P}{\sum s} \quad (1)$$

Au sommet de toute aspérité entrée en domaine plastique, il règne donc une pression R_e .

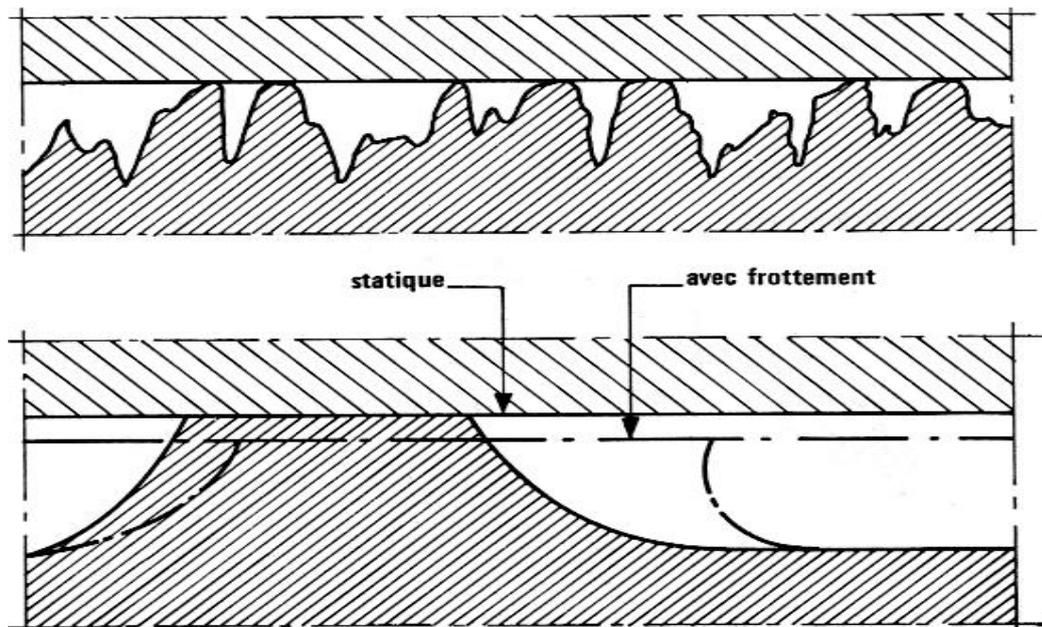


Figure 16: Déformation des aspérités sous charge statique ; avec mouvement (frottement) [82],

Par contre, s'il y a déplacement et introduction de forces tangentielles de frottement, cela introduit le long de la surface une contrainte de cisaillement τ et le critère de plasticité permet d'écrire cette fois :

$$R_e = \sqrt{\left[\frac{P}{\sum s'} \right] + 3\tau^2} \quad (2)$$

Re et P étant conservées, on obtient donc: $\sum s' > \sum s$

Autrement dit : l'aire réelle de contact est plus grande en frottement qu'en contact statique (**figure 16**). Bien entendu, selon les résultats obtenus par le CETIM [82], d'autres facteurs concourent à l'accroissement de $\sum s$, en particulier :

- L'arasement mécanique des sommets des aspérités,
- Leur consommation chimique par les additifs Extrême Pression des lubrifiants lorsque le frottement fait préférentiellement de ces sommets des points chauds.

En l'absence de tout grippage le frottement et l'usure se stabilisent lorsque la rugosité a atteint son état d'équilibre, qui dépend principalement des énergies superficielles mises en jeu, des vitesses, charges et ambiances, mais surtout de la rugosité initiale [114]. La rugosité n'évolue pas, l'usure restant normalement faible et constante. Le passage, pendant le frottement, de la rugosité initiale à la rugosité stable spécifique doit se faire sous charge croissante et atteindre en fin de cycle une valeur plus grande que la charge normale de fonctionnement [110].

Selon cette dernière référence, pendant le cycle de frottement il existe trois modes différents de diminution de la rugosité :

- Émissions de débris, soit par l'action mécanique de "râpage", soit par adhésion et

arrachement,

- Formation des films protecteurs par l'utilisation de lubrifiants avec l'addition d'additifs EP, d'acides gras,
- Plastification des aspérités par traitements de surface inhibant totalement l'adhésion.

Le choix des affections des duretés, rugosités, ... à l'une et à l'autre des surfaces frottantes, peut être perturbé par les phénomènes d'érouissage. Des aciers à haute teneur en manganèse et molybdène, des aciers inoxydables austénitiques, certains alliages de titane, [115],..., durcissent beaucoup lorsqu'on les déforme plastiquement à froid. Il est important que, lors du cycle de rodage et frottement de telles pièces, la conformité ait été obtenue non seulement avant disparition totale des rugosités mais encore avant la fin de l'érouissage [116].

Pendant le rodage la concentration de débris d'usure des composants mécaniques en contact lubrifié augmente jusqu'à obtention d'un équilibre. La valeur de la concentration des débris d'usure peut être déterminée par ferrométrie, selon **Ming** [117] cette technique nous donne une indication de la performance du contact des mécanismes. Aussi elle nous aide à évaluer l'usure de beaucoup de composants mécaniques, en particulier pistons, cylindres, engrenages et roulements.

Selon les constructeurs de machines le facteur principal qui affiche la période initiale de vie des composants mécaniques est la rugosité des surfaces, [118]. L'existence ou non de défauts géométriques dans les surfaces comme la rugosité, l'ondulation et les erreurs de conformation sont déterminantes pour un fonctionnement normal des surfaces [119]. Il est donc nécessaire de minimiser ces défauts, [120]. Il y'a eu des efforts dans le sens de l'optimisation de la géométrie des structures et ses états de surfaces pour assurer simultanément non seulement les propriétés de glissement mais aussi la capacité de retenir l'huile sur les surfaces [121].

(**Sreenath, Raman** [122]) ont montré expérimentalement que dans le cas de deux surfaces en contact en régime lubrifié se déplaçant à vitesse constante en

présence d'une charge constante, l'adoucissement des surfaces, pendant le rodage ou à la première utilisation, se fait en deux stades :

- Pendant le premier stade appelé phase primaire de rodage, les sommets des surfaces sont aplanis et les débris résultants sont éliminés de la région de glissement. L'adoucissement des surfaces est dû principalement au transport du matériau.

- Pendant le deuxième stade (période secondaire de rodage), ou période d'exploitation du mécanisme tribologique, l'adoucissement des surfaces est principalement due à trois mécanismes qui peuvent se produire simultanément par remplissage des creux par les débris d'usure des sommets produits durant cette période, par la déformation plastique des aspérités, ou par l'autoformation d'un film superficiel avec des propriétés d'usure supérieures.

Concernant la déformation plastique des aspérités, les auteurs indiquent que l'adoucissement des aspérités est possible seulement quand les sommets sont écrasés par une force normale [123]. Aussi les sommets peuvent tomber sur les creux adoucissant de cette manière la surface, mais seulement si le mouvement est unidirectionnel. Les aspérités peuvent se déformer dans les deux directions et éventuellement se fracturer par fatigue si le mouvement est alternatif. Si l'adoucissement de la surface est engendré par l'écrasement des aspérités soumises à une charge normale, ce mécanisme peut être éliminé par aplanissement des surfaces pendant la période primaire de rodage ou par augmentation graduelle de la charge pendant le deuxième stade de rodage jusqu'à la charge maximale, afin d'éviter de possibles endommagements.

L'adoucissement des surfaces par le rodage est dû à l'action combinée des mécanismes associés aux deux périodes de rodage. Les changements engendrés au niveau du profil augmentent l'aire apparente de contact, ainsi que le rayon de courbure du profil de la surface, [124]. Pendant l'adoucissement de la surface, le processus de déformation des aspérités se produit, cependant le rayon de courbure du profil de la surface est augmenté et la pression de contact réduite. La déformation plastique continue et atteint donc un équilibre résultant en une meilleure conformité des surfaces. Quand cet équilibre est achevé le processus de déformation se termine.

Il faut préciser qu'un remplissage des creux par les particules d'usure provenant des sommets, particules qui n'ont été pas éliminées par l'écoulement de l'huile, peut se produire un certain laps de temps très court, après l'usure des sommets.

Plusieurs investigateurs ont trouvé des résultats quantitatifs particuliers concernant la rugosité finale des surfaces et le taux d'usure. **Rowe [94]**, **Rowe et al [125]** et **Roy Chowdhury et al [126]** ont étudié le changement de la topographie des surfaces pendant le rodage avec plusieurs conditions expérimentales en utilisant la technique de la profilométrie. Ils ont vérifié par des suppositions simples et mis en évidence que la rugosité initiale de la surface peut avoir un effet dominant sur les résultats. Ils ont conclu que d'une part, la rugosité de la surface de glissement est un facteur déterminant et que d'autre part, la surface la plus douce aurait tendance à acquérir les caractéristiques de la surface la plus dure.

Ces auteurs concluent que le procédé de frottement et d'usure est dû essentiellement à l'abrasion. L'aplanissement par déformation plastique est obtenu surtout sur les aspérités les plus élevées. Ils ont observé une augmentation de la déformation plastique au cours de la dernière période de rodage. La dépendance, l'histoire de l'usure pendant le rodage sur la rugosité de la surface a été observée par **Stout et al [127]** qui ont appliqué une étude analytique sur la topographie des surfaces pendant le rodage en contact lubrifié. Ils ont indiqué les variations dramatiques (pertes de l'ordre de 60% en rapport aux valeurs initiales de R_a , R_q et R_{max}) sur les surfaces frottantes.

Kang [128] affirme que tous les changements au niveau des surfaces dépendent de l'état initial de la surface d'une part et par la présence ou non des particules abrasives. La sélection correcte de la rugosité initiale de la surface contribue pour une meilleure variation linéaire du frottement pendant le rodage. Après la rugosité prend une valeur stable, à cette situation correspond un minimum du coefficient de frottement, qui a été calculé par (**Kragelsky et al. [129]**). Cependant le même auteur est d'accord que cette rugosité dépend des conditions de service et des propriétés mécaniques des matériaux, et ne dépend pas de la rugosité initiale. En conséquence **Noguchi [124]** ayant étudié le changement du profil de la surface des roulements en fonction du temps pendant le procédé de rodage a

remarqué qu'il est possible de prédire quantitativement le changement du profil des surfaces par le procédé de rodage quand on connaît les conditions de service ou d'exploitation du système tribologique.

Tous ces auteurs sont d'accord sur le fait que l'usure pendant le rodage est très fortement influencée par la rugosité. L'usure de la surface rugueuse est rapidement obtenue sans grippage pendant le rodage, produisant rapidement une bonne conformation des surfaces. Selon **Pawlus [130]**, l'usure pendant le rodage dépend de la hauteur de la rugosité mais aussi de la forme de la distribution du profil de la rugosité. **Hutchings [131]** affirme que l'usure, après rodage quand les conditions d'équilibre de la surface sont établies, dépend de la nature du procédé de rodage, l'usure pendant ce rodage, surtout au cours de la période primaire du rodage.

Les progrès réalisés en construction et fabrication mécaniques permettent d'obtenir des surfaces lisses, ayant une résistance élevée à l'usure pendant le rodage affirme **Sudarshan [132]**. La majorité des recherches, sur le sujet du frottement et de l'usure, indique qu'une surface initiale moins rugueuse assure pendant le rodage une faible usure linéaire. Selon **Baumgarten [133]**, **Wiemann [134]**, les surfaces rugueuses présentent une meilleure capacité à supporter des charges plus élevées. Le rôle du rodage dans la performance des mécanismes pendant son exploitation a été mis en évidence par **Ostvik et Christensen [135]**. Ils ont observé que le rodage consiste en un écrasement des aspérités les plus élevées, de cette façon on obtient plus aspérités arrivant en contact (obtention d'une plus grande surface réelle de contact), et que pendant le rodage, la rugosité n'ai pas été fortement changé bien que les surfaces ont acquis une plus grande capacité de portance de la charge. Ils ont confirmé la copilance de la surface douce sur la rugosité de la surface la plus dure.

Sakurai et al. [136] qui ont étudié l'usure du cuivre sous des conditions de lubrification limite, ont dérivé une équation du taux d'usure comme fonction de la force de lubrification hydrodynamique critique; au-dessous de cette force le taux d'usure ne s'observe presque pas. Concernant les surfaces plus fines, **Andersson et al. [137]** ont observé le rodage de surfaces (avec une qualité de surface très fine ainsi qu'une géométrie correcte) en environnement lubrifié avec un film lubrifiant de faible viscosité. Avec les tests, ils ont

montré l'influence de la rugosité initiale des surfaces sur le coefficient de frottement, d'usure et sur la distance de rodage nécessaire pour réduire le coefficient de frottement, autrement dit les surfaces sont rendues plus polies et les conditions de lubrification ont changé de limite ou mixte pour un film continu (coefficient de frottement de 0,01 à partir d'un $R_a \leq 0,3\mu\text{m}$).

En ce qui concerne la déformation plastique **Johnson [138]**, trouve que les pressions de contact local des aspérités qui ont été déformées plastiquement sont égales ou plus petites que les pressions qui ont conduit à la défaillance des composants mécaniques. **Archard [139]** affirme que les déformations des aspérités pendant le rodage, arrivent à la limite d'élasticité. D'autres investigateurs affirment que pendant le rodage il existe une augmentation graduelle sur la composition élastique de la déformation de l'aire de contact et une diminution proportionnelle de la déformation plastique.

II. Conduite des essais :

La discussion autour des essais de tribologie peut s'articuler autour de deux axes principaux à savoir le choix des paramètres expérimentaux et le rôle du premier corps en l'occurrence le frotteur dans le cas d'un frottement lubrifié en milieu abrasifs. De plus, le choix d'un frotteur en 100Cr6 se justifie pour les essais à température ambiante.

Afin de pouvoir procéder à l'élaboration ou au choix d'un banc d'essai, il faudrait tout d'abord tenir compte que le comportement tribologique d'un couple de matériaux est déterminé par six facteurs principaux : Charge, Vitesse, Mode de contact, Nature des matériaux et Etat de surface. La grandeur et la nature de ces facteurs produisent des effets qui sont essentiellement des efforts de frottement, des usures, des transformations structurales et superficielles, des phénomènes thermiques et vibratoires qu'il faudrait mesurer ou quantifier afin de pouvoir répondre aux questions posées. La connaissance et l'analyse de ces paramètres nous permettent d'énoncer des règles simples de construction de banc d'essai afin de pouvoir aboutir à des résultats palpables et cohérents.

On évaluera la déformation des surfaces des éprouvettes à partir des résultats obtenus avec les essais sur le tribomètre pion / disque. Avec deux paires des matériaux différents et des vitesses variables (croissantes et décroissantes), on va construire des courbes (de Stribeck) en fonction du coefficient de frottement pour une pression de contact donnée et deux états de surface, les essais sont réalisés un milieu abrasif lubrifié (les surfaces en contact sont totalement émergées dans de l'huile avec une viscosité donnée). Dans ce système tribologique il y a deux types de forces en jeu et qui sont responsables de la déformation résultante des surfaces : des forces tangentiels (usure) et des forces normales de compression dans le contact.

Le but attendu par les essais sur le tribomètre est de déterminer :

- la morphologie des enlèvements de matière et des déformations de surface qui doit être étroitement liés aux conditions énergétiques de réalisation du processus d'abrasion,
- la géométrie du contact élémentaire et la nature rhéologique du corps sollicité qui sont des paramètres déterminants,
- les modes d'enlèvement de matière et de dégradations de surfaces qui évoluent lorsque sont franchis certains seuils dépendant des paramètres géométriques ou cinématiques.

III. Programme des essais :

Le banc d'essai choisi, va nous permettre de déterminer l'influence du processus d'abrasion lubrifié (frottement à trois corps) en fonction :

- de la charge : obtenue par la variation de poids accrochés sur un bras de levier qui la transmet sur le coussinet dans le cas du tribomètre palier lisse ;
- de la vitesse de rotation : en agissant sur le moteur d'entraînement (du banc d'essai)

par l'intermédiaire d'un régulateur de vitesses ;

- de la température ambiante de fonctionnement : température du bain d'huile assurant la lubrification des éprouvettes en contact lors des essais ;

- du type d'abrasifs et du lubrifiant introduits au contact des deux corps : choisis en fonction du cas réel d'exploitation d'équipements (de forage par exemple) dans des conditions sahariennes.

Les échantillons utilisés, Bronze de grande pureté, sous forme de coussinet ; après avoir subi un lavage au trichloréthylène puis séchés à l'éther ; subissent d'abord les mesures de microgéométrie puis de pesée (en utilisant une balance de grande précision) avant d'être soumis aux conditions des essais de frottement et d'usure.

IV. Moyens matériels :

Cette partie de l'étude expérimentale est consacrée à la description des matériaux utilisés. Ces matériaux sont volontairement très largement inspirés de ceux fonctionnant sur les moteurs [140]. Ensuite, l'ensemble des moyens expérimentaux est présenté (moyens et déroulement des essais). Les résultats obtenus au cours des essais sont ensuite commentés et analysés. L'analyse et la comparaison des essais réalisés dans les mêmes conditions, avec et sans pollution dans le lubrifiant, montre clairement que dans certaines situations, un matériau adopté peut même permettre de tirer un léger avantage des pollutions. Les moyens expérimentaux utilisés s'appuient essentiellement sur un tribomètre pion - disque pour les mesures du coefficient de frottement et de l'usure. Les analyses des surfaces frottantes feront appel, pour la caractérisation dimensionnelle, aux techniques de surfométrie, et pour l'analyse des faciès, aux microscopies optique et électronique.

Le tribomètre ; que nous allons utiliser dans notre présente étude phénoménologique des surfaces antagonistes (palier lisse), dans les processus d'abrasion lubrifiée ; doit nous permettre d'une part la réalisation de notre objectif, dans un palier lisse

lubrifié et dans lequel on peut introduire une certaine quantité de particules abrasives mélangées avec le lubrifiant utilisé (de l'huile sans additifs dans notre cas). L'installation doit d'autre part nous permettre une variation de paramètres tels que : vitesse de rotation, charge appliquée, "caractéristiques" du lubrifiant (pression, débit, qualité,...), au cours même de l'essai et dont les valeurs d'essai seraient prises en fonction de la synthèse bibliographique et des objectifs visés dans cette présente étude.

4.1. Tribomètre palier lisse:

Cet appareil de construction très rigide (**figure 18**), représenté schématiquement sur la (**figure 17**), a été conçu pour étudier, sous différentes conditions de charge, de vitesse et de lubrification, le couple de torsion développé par un arbre tournant dans un coussinet. Il est équipé d'un moteur shunt à courant continu et d'un entraînement par courroie. Le boîtier de commande comprend un régulateur de vitesse sur lequel est ajusté des redresseurs, ce qui permet d'obtenir un réglage fin des vitesses jusqu'à une valeur maximum de 1800 tr/min.

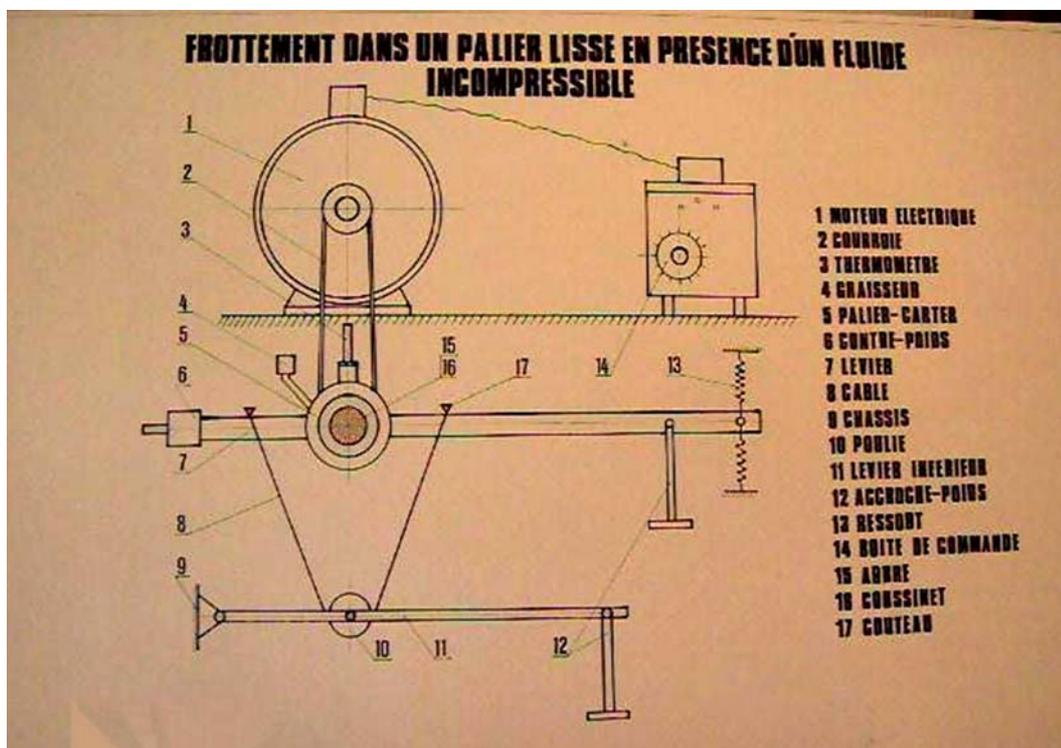


Figure 17 : Vue schématique du tribomètre palier lisse,

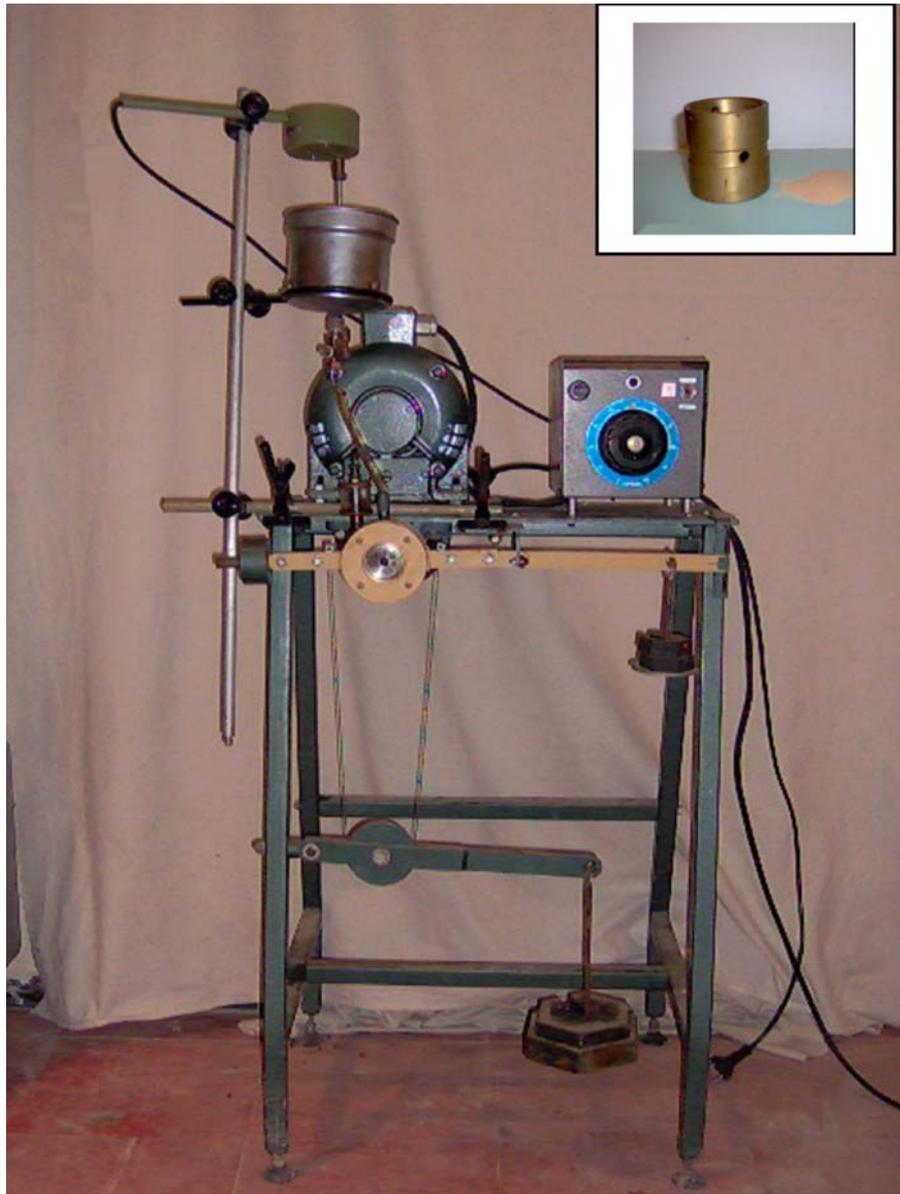


Figure 18 : Vue générale du tribomètre palier lisse avec en médaillon le type d'éprouvette et abrasifs employées,

Le coussinet, (**figure 18**), d'une longueur de 50 mm et d'un diamètre intérieur égal à 40 mm est verrouillé par un embout vissé sur le couvercle du carter. Celui-ci fournit ainsi une poche pour recevoir un thermomètre classique. De ce fait le bulbe du thermomètre se trouve près de la surface de frottement et permet d'étudier la variation du frottement du coussinet avec la température (ne devront pas dépassant pas les 110°C).

Pour obtenir un bon contact thermique, il est conseillé de verser dans le logement quelques gouttes d'huile de lubrification avant d'y placer le thermomètre. Mais cette température ne doit en aucun cas dépasser 75°C (température des essais envisagées

dans le cadre de cette étude). L'arbre, rectifié, est supporté par des paliers. Le carter du coussinet est équipé d'un couvercle amovible et d'un graisseur à niveau variable, l'ensemble étant conçu pour éviter les projections d'huile. Le bras de levier (**figure 18**), est attaché à une distance de 300 mm du centre du coussinet. Le carter est maintenu en position latérale par deux roulements à billes montés de chaque côté du bras de levier.

Ce montage permet de considérer le coussinet flottant, en effet, le frottement dû aux contacts des extrémités est inexistant. Le bras de levier (**figure 18**), est équilibré par un contre poids mobile. Les poids ajoutés sur " l'accroche poids inférieur" appliquent une charge sur le coussinet dans un rapport de "4" à l'aide d'une liaison avec une poulie montée sur un roulement à billes. Un câble muni de couteaux aux extrémités, passe au dessous de la poulie et par ce moyen on arrive à maintenir une charge constante sur le coussinet et ce malgré les faibles mouvements angulaires du carter naissant au cours des essais de frottement et d'usure.

Ce tribomètre, fonctionnant sur du courant 220 volts en alternatif, est conçu pour supporter des charges sur le coussinet allant jusqu'à 140 kg, la charge maximale appliquée étant donc de 35 kg. Et il est monté sur un châssis tubulaire et rigide en acier munis de vérins de réglage. Les poulies et la courroie d'entraînement sont protégées par un carter métallique. La charge effective sur le coussinet due aux poids du carter, des leviers et accroches poids est de 5,5 kg. Le bras inférieur ayant un rapport de quatre, une masse de 2 kg provoque une charge sur le carter de 8 kg. Par conséquent le coussinet est soumis à une force W égale à :

$$W = 5,5 \text{ kg} + 4 \times m$$

où m : masse placé sur l'accroche poids.

Afin d'assurer une homogénéité du fluide de lubrification pollué (huile neuve avec les abrasifs), dans le réservoir supérieur, un agitateur en mouvement durant toute la durée de l'essai de frottement lubrifié et d'usure, est placé dans le réservoir d'huile. Une première série d'échantillons sous forme de bagues circulaires, testés sur banc d'essai en frottement abrasif, a montré que celles-ci, en présence de particules abrasives de dimensions

moyennes comprises entre 0 μm et 50 μm , qui correspond en général à la réalité (sable du Sahara Algérien), présente une perte de masse qui semble augmenter très rapidement pour une charge donnée. Car les grosses particules ne pouvant traverser les systèmes de filtration d'une part et que d'autre part on a un faible jeu dans les paliers d'où la présence de ces particules dans le tribo-système.

Concernant les particules de plus faibles dimensions ($\leq 10\mu\text{m}$) ; elles ne participent pas directement, dès leur introduction entre les surfaces frottantes, à l'usure abrasive, car elles se mettent dans un premier temps entre les aspérités avant d'être véhiculer par le lubrifiant ou chasser par d'autres particules abrasives ou des débris d'usure. A ce stade de l'expérimentation, des pertes de masse ont été observées dans de l'huile noirâtre présentant des particules brillantes (particules de bronze et de plomb), à l'aide d'une loupe binoculaire.

La deuxième partie des essais de l'étude de la déformation de la surface réalisée en fonction de la vitesse de glissement des particules abrasives de dimensions moyennes de 35 μm nous a donné un écoulement de la matière sur les cotés de la trace de l'usure abrasive pour des faibles vitesses ($V \leq 1,5 \text{ mm/s}$). Par contre à des vitesses supérieures la matière "abrasée", enlevée, est détachée et se retrouvant par la suite en mélange avec le lubrifiant.

Mais ces essais préliminaires, sur tribomètre palier lisse du Laboratoire de Fiabilité des Equipements et Matériaux (Faculté des Hydrocarbures et de la chimie – Université de Boumerdés), réalisés ont présenté une très grande dispersion des valeurs enregistrées au cours de ces essais. On a obtenu des différences importantes sur les valeurs de l'usure et coefficient de frottement au cours des essais répétitifs (essais de validation), et cela est du à la variation du jeu dans les couples d'éprouvettes utilisés (existence d'un intervalle de tolérance de fabrication qui nous donne des valeurs très variables du jeu dans les différents couples d'éprouvettes employés).

D'où la nécessité de poursuivre cette recherche par une étude statistique afin de pouvoir tenir compte de l'influence de la variation du jeu dans les paliers

considérés sur leur comportement tribologique mais qui nécessite un investissement financier très important.

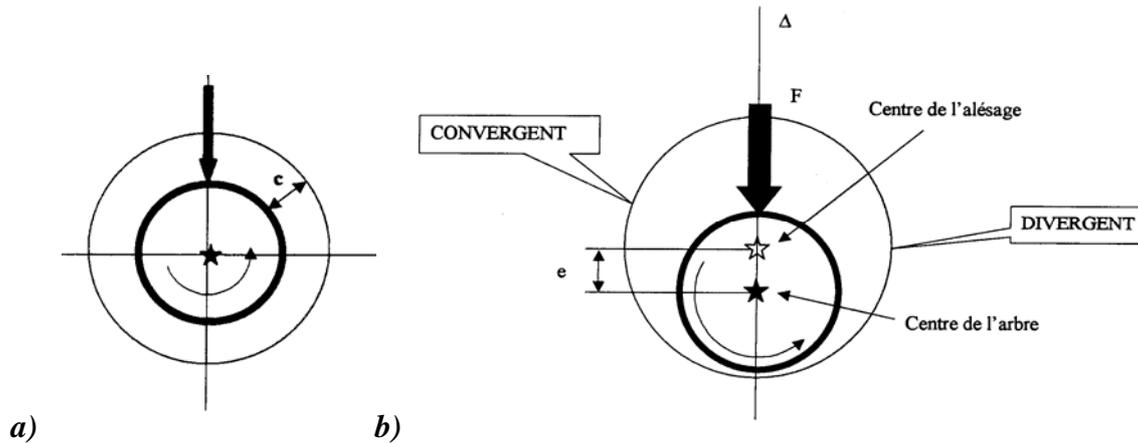


Figure 19 : Schémas représentatifs des positions de l'assemblage arbre-alésage :
a) Position idéale ; b) Position concrète.

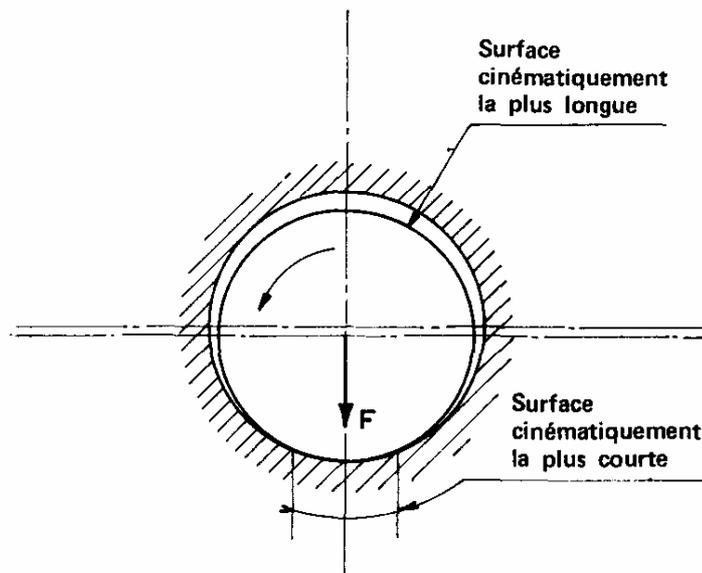


Figure 20 : Position des surfaces de contact adoptée dans le cas de notre étude.

Après de fructueuses discussions avec Mr. Pr. TAIBI (université de Boumerdés - Algérie) et Messieurs Pr. GRAS et ROBBE-VALLOIRE (laboratoire de tribologie Supmecca - Paris France), il a été convenu d'une part de poursuivre cette étude dans le cas critique d'un Δe_{mini} . Cela correspond à un contact linéaire de faible valeur (**figure 20**); alors que théoriquement pour un bon fonctionnement, on devrait avoir une certaine épaisseur de film d'huile entre les deux pièces constituant le palier lisse afin de pouvoir assurer une certaine longévité et fiabilité du système tribologique considéré.

4.2. Tribomètre pion-disque :

Pour obtenir ce modèle, nous avons étudié le frottement entre surfaces planes en contact, en milieu lubrifié, sur un tribomètre pion / disque. Ce type d'appareillage a été choisi pour des raisons de simplicité de fonctionnement, de géométrie des éprouvettes, de rapidité de mise en œuvre des expériences alliées à une bonne reproductibilité des résultats [141 ; 142 ; 143].

Le tribomètre pion / disque nous permet de caractériser rapidement de nombreuses solutions et d'obtenir les valeurs du coefficient de frottement pour les différents régimes de lubrification. Le contact entre les surfaces est de type plan / plan. Il est représentatif de nombreux cas pratiques de contact surfacique entre composants mécaniques. Le modèle est validé par l'analyse expérimentale des différentes paires de matériaux.

Le tribomètre pion / disque retenu pour réaliser nos essais (**figure 1**, en annexe), représenté schématiquement sur la **figure 21** a été construit par le Groupe Tribologie de l'ISMEP / Supmeca (ex.I.S.M.C.M) avec la coopération de la régie Renault. Il permet d'obtenir les variations du coefficient de frottement en fonction de la vitesse, température du milieu ambiant, charges,..., ce qui correspond à nos souhaits pour la réalisation des essais envisagées. Cet appareillage a été utilisé pour la première fois par **H. Ghaem [141]**, qui a examiné la possibilité d'étudier les différents régimes de lubrification. Le tribomètre mesure avec précision la force de frottement.

La mise au point de l'appareillage permet de minimiser les réponses vibratoires du système mécanique excité principalement par le contact et le moteur d'entraînement de la broche mobile. En effet, il est nécessaire de minimiser les effets de bruits de fond de façon à pouvoir mesurer les forces de faibles intensités notamment dans les régimes de bas coefficients de frottement. Le schéma de principe de l'appareillage est donné sur la **figure 21**.

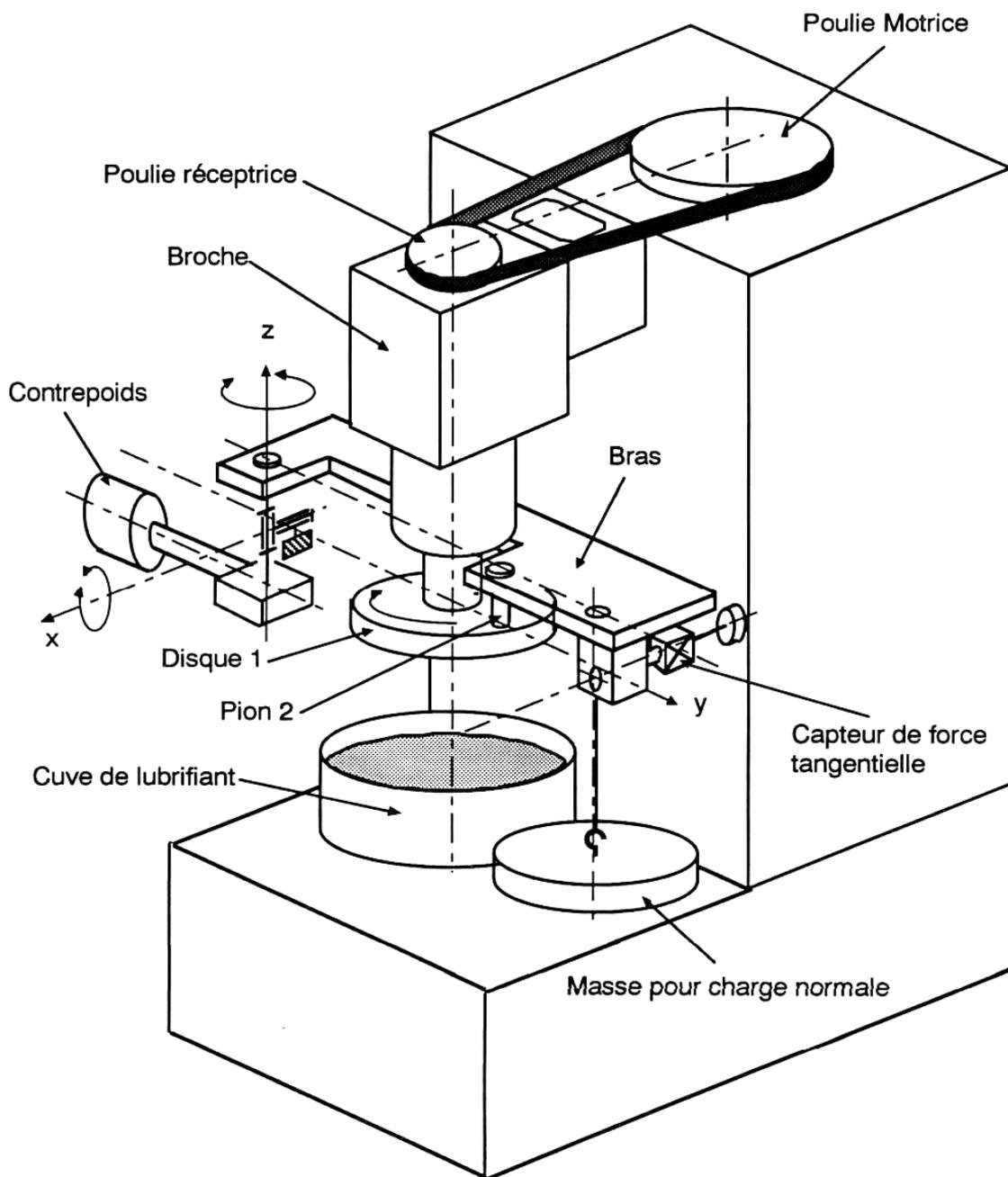


Figure 21 : Schéma de principe du tribomètre Pion - Disque

La **figure 22a** présente un couple d'éprouvettes, dans la position d'essai utilisé. Le frotteur, en bronze, a une géométrie de révolution. Il se termine par une surface frottante de 4 mm de diamètre. La piste, en acier, a un diamètre de 80 mm pour une épaisseur de 10 mm et le rayon moyen de glissement a pour valeur 35 mm. La surface frottante des pistes est obtenue par rectification. Le contact plan/plan de diamètre 4 mm étant

délicat à réaliser, une procédure spécifique de rodage a été employé afin d'assurer un parfait parallélisme entre la surface du pion et celle du disque, l'obtention de l'état de surface des pions étant réalisée sur le tribomètre. Par contre sur la **figure 22b**, où l'on observe une variation (différence) d'usure, représente un échantillonnage de pions après des essais différents de frottement et d'usure.

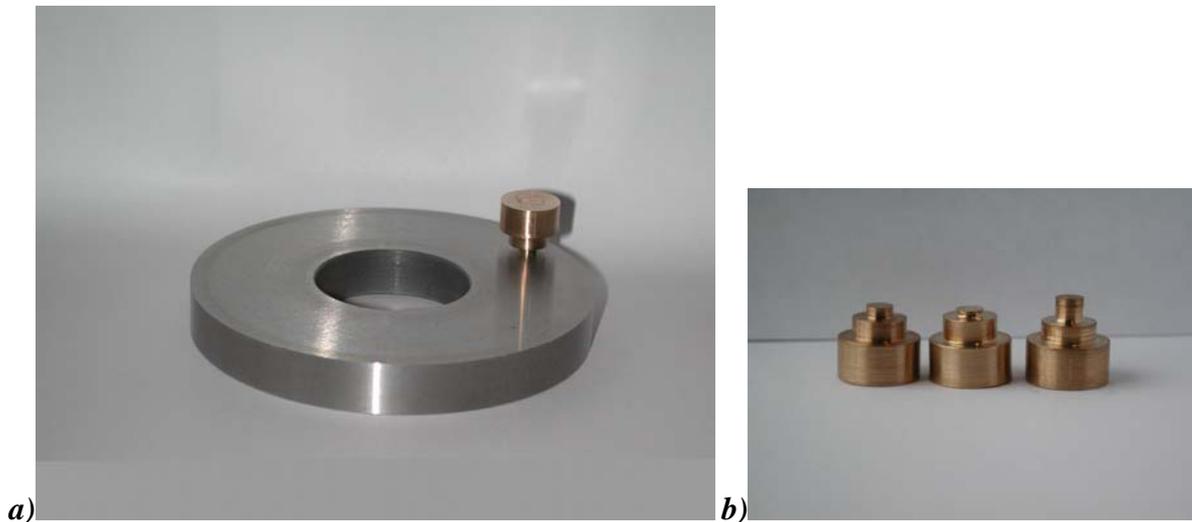


Figure 22: Disque et pion utilisés : a) Piste et pion en position d'essai, b) Pions après essais avec différents niveaux d'usure obtenue.

4.3. Matériaux :

4.3.1. Composition du palier :

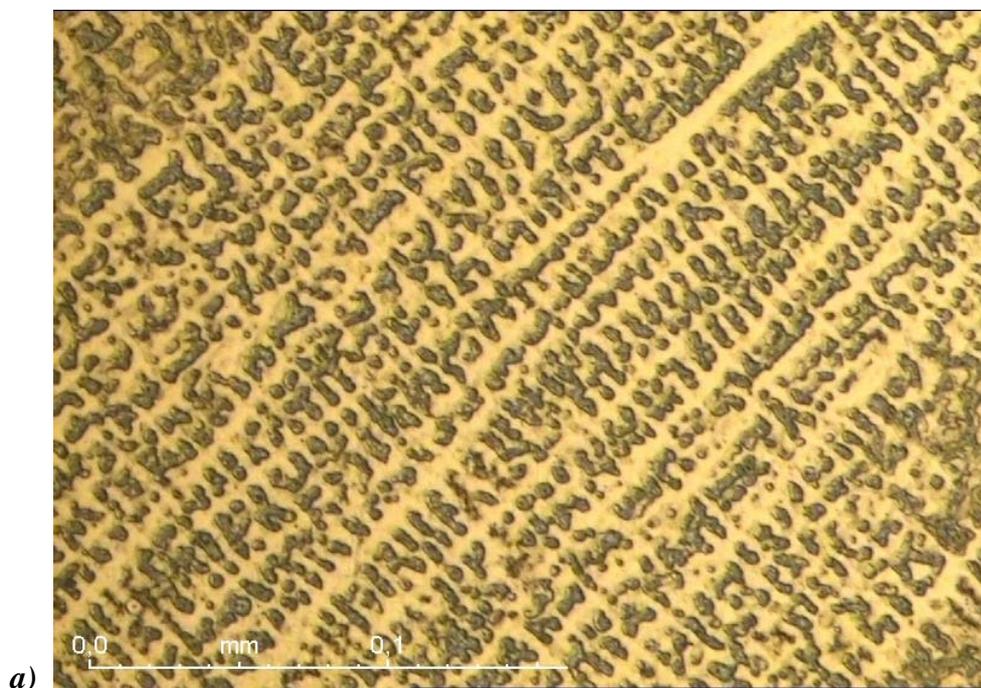
Cette étude ayant pour objectif de la compréhension des phénomènes de dégradation observés sur une installation industrielle, nécessite d'être conduite, dans la mesure du possible, avec les mêmes matériaux ou, éventuellement, les mêmes familles de matériaux que ceux utilisées sur site. Ceci va s'appliquer tant pour les matériaux des paliers, que pour l'huile et sa pollution (éléments abrasifs).

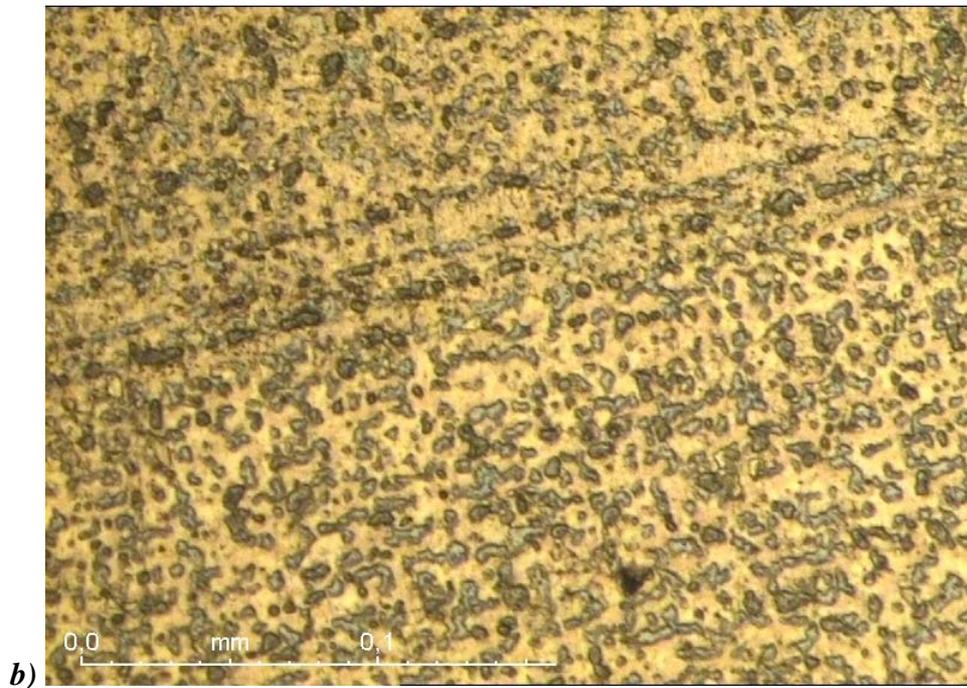
Dans l'industrie mécanique, une solution éprouvée pour les paliers est souvent constituée par le couple : arbre en acier traité face à une bague (ou coussinet) en bronze. Cette solution permet d'atteindre des pressions projetées de contact de l'ordre de 25 MPa [4], ce qui correspond parfaitement au domaine de fonctionnement des paliers étudiés dans le cas de notre recherche.

Nous avons retenu un seul type d'acier (faiblement allié, traité avec une limite à la rupture de 1200 MPa), mais deux types de nuances de bronze se distinguant par la présence ou non de plomb.

Le bronze sans plomb (**figure 23a**), monophasé (jusqu'à 13.5% d'étain) présente une structure dendritique alors que l'addition de plomb, qui n'est pas soluble dans le bronze à l'état solide, permet d'obtenir une structure plus fine avec le plomb réparti de manière homogène dans la matrice, sous forme globulaire.

Le plomb, présent sous forme de nodules (**figure 23b**) permet d'améliorer les propriétés de frottement et d'usinabilité. Il est généralement préconisé pour les conditions de lubrification dites sévères. Par contre, les nodules de plomb sont très tendres, ils contribuent donc à une baisse de dureté qui pourrait être préjudiciable en présence dans un contact lubrifié pollué en particules abrasives. Un des objectifs de l'étude est, à travers la comparaison des nuances avec et sans plomb, d'établir si les bronzes au plomb présentent également un potentiel d'utilisation en présence de pollutions abrasives.





Figures 23: Micrographies des bronzes :
a) sans plomb (CuSn), b) au plomb (CuSnPb).

Les valeurs de dureté résultent d'une moyenne de neuf mesures réalisées avec une pointe Vickers sous une charge de 100g. Elles confirment la dureté plus faible pour la nuance au plomb ($H_v = 115 \pm 10$) en comparaison avec celle sans plomb ($H_v = 160 \pm 12$). L'acier présente, dans les mêmes conditions de mesure, une dureté de (305 ± 20).

4.3.2. Compositions Chimiques et Propriétés mécaniques des matériaux utilisés :

Dans l'industrie mécanique les paliers sont souvent constitués par : acier traité / bagues ou coussinets en bronze. Par conséquent dans cette étude on a opté pour : Deux couples de matériaux de différents alliages métalliques qui vont être testé afin de comparer leur comportement tribologique vis à vis du frottement lubrifié en présence de particules abrasives. Ces matériaux ont été choisis car ils sont fréquemment utilisés dans la réalisation de composants mécaniques classiques :

- Pistes : Acier traité, 100 Cr 6
- Frotteurs: Bronze CuSn et pour une deuxième nuance, notre choix s'est porté sur le bronze au plomb (CuSnPb10) qui présente :

- de bonnes propriétés de frottement,
- une bonne résistance à l'usure sous de fortes charges,
- une bonne tenue à la corrosion,
- une utilisation remarquable dans des conditions de lubrification difficiles.

Les **tableaux (5 ; 6 ; 7 et 8)** ci-après, (données du fournisseur des matériaux utilisés [144]) représentent respectivement les principales caractéristiques mécaniques des bronzes (frotteurs) et acier (disques) utilisés et leurs compositions chimiques.

Pions	Rm Mpa	Rp0.2	A5 %	Hb
CuSnPb10	>230	>110	>12	>70
CuSn	250	120	5	90

Tableau 5 : Principales caractéristiques mécaniques des pions (bronze)

Matériaux	Eléments chimiques				
	Cu	Sn	Pb	Zn	Ni
CuSnPb10 DIN 1716	78-82	9-11	8-11	.	<1.5
CuSn DIN 1795	reste	10.5-13.0	<2.5	<2	<2

Tableau 6 : Compositions chimiques des bronzes

Matériau	Module d'élasticité	Coefficient de poisson	Dureté Hv_{0,3/30}
Acier 100Cr6	210 (GPa)	0,3	855

Tableau 7 : Principales caractéristiques mécaniques de l'acier 100 Cr6

Matériau	Eléments chimiques				
	C	Si	Mn	Cr	Fe
Acier 100Cr	1,0	0,25	0,3	1,5	Balance

Tableau 8 : Composition chimique des disques d'acier

4.3.3. Dureté :

La dureté dépend à la fois de la limite d'élasticité et de la capacité de durcissement par déformation. Afin de compléter l'étude mécanique, l'évolution de la dureté en profondeur est un outil indispensable pour évaluer la constitution des couches. Nous avons procédé à la mesure de la microdureté Vickers des matériaux choisis pour les pions et le disque avant essais, avec une charge de 100 grammes pendant 30 secondes. Les valeurs moyennes de la dureté sont présentées ci-dessous. Sur les neuf (09) mesures de microduretés (Vickers) réalisées sous une charge de 100g on a les valeurs moyennes suivantes:

CuSn: $H_v = 160 \pm 12$; **CuSnPb:** $H_v = 115 \pm 10$; **Acier 100Cr6:** $H_v = 305 \pm 20$

4.3.4. Pistes:

Les pistes utilisées sur le tribomètre pion - disque ont la forme de disques (figures 22a et 25), obtenues à partir d'un matériau plus dur que les frotteurs. Le matériau sélectionné étant l'acier 100Cr6 utilisé dans la construction des pièces soumises à des efforts de compression et de l'usure, c'est un acier souvent employé pour les roulements. Ce type de matériau est utilisé pour tous les essais que nous allons réaliser sur le tribomètre pion / disque. C'est un acier martensitique ; à 1% de C et 1,5% de Cr ; caractérisé par une extrême dureté ($H_v=855$). Le traitement thermique réalisé est le suivant : recuit à 760 °C, trempe à l'huile après austénitisation à 830 °C et un revenu à 150 °C.

Tous les disques ont été prélevés dans un même lot de matière. Les surfaces des disques présentent un état de surface très fin, les paramètres de rugosité seront présentés en annexe, **pages 189 à 191**. La planéité des disques doit être contrôlée et être impérativement inférieure à $1\mu\text{m}$. Le plan des disques est donné en **page 196**. Les disques en (100 Cr 6) présente un seul état de surface pour tous les types d'essais réalisés. Ils ont été rectifiés très finement dans une seule direction sur les deux faces. Ces deux faces présentent des raies très fines, adoucies, et unidirectionnelles sur les deux faces. La **figure 24** présente une micrographie de la surface du disque avant essai.

Les mesures de la rugosité des disques, réalisées avant et après essais sont faites suivant des profils perpendiculaires au sens des raies de rectification et sont effectuées au voisinage de quatre zones de référence à 90° repérées sur la surface des disques (figure 22).

Les **figures (3 et 4 en annexe)** présentent les profils type perpendiculaire au sens des stries de rectification. Les valeurs des paramètres de rugosité des disques présentées dans l'annexe (**tableau 2**) correspondent à la moyenne arithmétique des mesures réalisées sur les faces des disques avant et après essai.



Figure 24: Microphotographie de la surface du disque en 100Cr6 avant essai

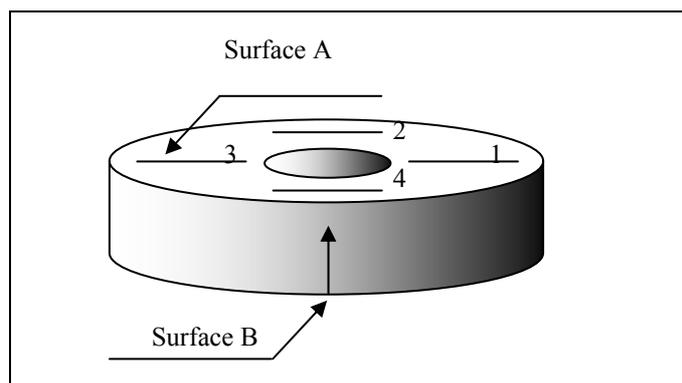


Figure 25 : Schéma du procédé des mesures de profilométrie

4.3.5. Frotteurs (Pions) :

Les matériaux choisis pour les frotteurs sont des alliages métalliques classiques plus mous que le matériau constituant la piste (disque) avec des applications en mécanique. Les frotteurs ont la forme de pions (**figures 22a et b**) et ils ont été usinés à partir d'une barre selon le plan donné en **page 195**. La surface de contact des pions permet d'obtenir une section de 4 mm de diamètre.

Afin d'obtenir des pions présentant des microgéométries de surface différentes, du papier abrasif de granulométrie (ou grade) 400 ou 1200 a été utilisé. Pour assurer un parfait parallélisme entre la surface du pion et celle du disque, l'obtention de l'état de surface des pions est réalisée sur le tribomètre même. La procédure consiste à recouvrir un disque avec du papier abrasif (de granulométrie souhaitée) et à faire tourner ce disque à basse vitesse (0.25 m/s) en contact avec un pion sous une charge normale de 5 N pendant 60 secondes : 20 secondes dans un sens (sens de rotation des essais), 20 secondes en sens inverse et à nouveau 20 secondes dans le sens de rotation des essais. Le pion peut ensuite être démonté, nettoyé, et pesé. Compte tenu de la forme cylindrique du pion, le remontage se fait dans la même position en utilisant une indexation de la position angulaire réalisée lors du montage pour l'obtention du polissage de surface.

Les matériaux des pions utilisés ont été décrits dans les paragraphes précédents. Les (**figures 22a et b**) présentent un disque et un ensemble de pions utilisés. L'état initial de la surface des pions est réalisé par polissage in situ sur tribomètre ;

avec le papier abrasif grain 400 déposé sur un disque afin d'assurer la planéité de la surface du pion et son parallélisme par rapport au disque de l'essai ; pour tous les matériaux. Pour chaque condition d'essai, trois pions sont testés. Sur chaque pion, deux mesures au centre de la surface du pion sont effectuées avec un pas de 0,2 mm perpendiculairement aux stries de polissage. Les valeurs mesurées sont uniformes et les valeurs moyennes des paramètres de rugosité les plus représentatifs sont présentés dans l'annexe (**tableaux 3 et 4**) pour les différents matériaux. La **figure 28** présente à titre d'exemple les surfaces des pions en bronze avant et après essai. Les (**figures 5 et 6**), dans l'annexe, présentent quelques profils des surfaces des pions avant et après essais.

4.4. Caractérisation morphologique :

La caractérisation morphologique a été obtenue par l'analyse de la rugosité avec l'appareil **SURFASCAN 3S Somicronic (figure 26)**, qui est un instrument tactile utilisant un stylet de diamant. Il permet d'acquérir les paramètres de rugosité et les profils des surfaces de façon à évaluer la dégradation des surfaces [145]. Les techniques de traitement du signal usuelles (filtres numériques, concepts statistiques) ont été appliquées aux enregistrements profilométriques et ont conduit à la définition de différents paramètres d'états de surface. Mais par ailleurs, compte-tenu de la spécificité des microgéométries de surfaces, des techniques originales de traitement du signal ont été développées et ont vu leurs utilisations se généraliser.

L'importance de la microgéométrie de surface n'a pas échappé aux pionniers de la recherche dans ce domaine, et qui ont fait progresser la mécanique des contacts tels que **Léonard de Vinci** (1480), **Amontons** (1699), **Bélibor** (1737), **Coulomb** (1787). La caractérisation de la rugosité se faisait uniquement par comparaison visuelle et tactile avec des étalons de microgéométries variables obtenues par les méthodes d'usinage les plus courantes. Par la suite, la métrologie des rugosités a fait appel à des appareils de mesure directe des défauts grâce à des enregistrements de profils de surfaces. La mise au point du premier profilomètre par contact fut accomplie en 1933 par **Abott** et **Firestone**. Cet appareil s'est régulièrement perfectionné notamment avec l'amélioration de la résolution verticale résultant de l'utilisation de capteurs de déplacement de plus grande sensibilité.

Récemment, des appareils de mesure sans contact sont apparus et le dernier progrès significatif est la possibilité de caractériser la rugosité non pas sur une génératrice mais sur une portion de surface. Les travaux normatifs actuels consistent justement à standardiser la procédure de dépouillement de ce type de mesure.

Sur l'appareil *SURFASCAN 3S Somicronic* la mesure du déplacement vertical est faite à l'aide d'un capteur inductif avec un stylet constitué d'un diamant conique avec un rayon de courbure de la pointe de 10 μm et un angle au sommet de 90°. Le capteur inductif se déplace mécaniquement, à vitesse constante, sur la surface à analyser. La rugosité est donnée par la variation de la hauteur du palpeur, due aux ondulations de la surface mesurée et calculée par le système informatique et peut être visualisée et enregistrer. Les zones d'exploration ont systématiquement des dimensions relativement limitées (ne dépassant qu'exceptionnellement la centaine de millimètre). On trouvera les deux types d'exploration suivants :

- l'exploration est faite sur une ligne ou une génératrice. On parle alors de profilométrie,

- l'exploration est réalisée sur une zone ou une surface. La terminologie est en cours de normalisation mais de nombreux utilisateurs adoptent le terme de "surfométrie" ou de caractérisation tridimensionnelle de la rugosité.

Si nous voulons obtenir une représentation 3D d'une surface il faut faire des palpées successifs. L'analyse réalisée par cet appareil est faite selon la norme **ISO 4287** [146]. La méthode de ce type d'instrument a des limitations liées au principe même comme l'erreur commise dans les creux en raison du rayon de courbure du stylet.

Les paramètres de rugosité normalisés, **NFE 05-015** [147], ont été utilisés dans une phase préliminaire pour choisir les conditions de polissage qui ont permis, par la suite, de donner un état de surface initial ou qui a été obtenu par polissage in situ dans les essais sur le tribomètre pion- disque.



Figure 26 : Photographie du SURFASCAN 3S – Somicronic

Après avoir obtenu le profil réel de la surface de la pièce, on constate plusieurs défauts d'état de surface. De façon à pouvoir mesurer la rugosité, on a supprimé les défauts d'écart de forme et d'ondulation grâce au logiciel utilisé sur le SURFASCAN, comme suit :

1) La suppression des défauts d'écart de forme : L'horizontalité des différents éléments de Surfascan (plan, bras et stylet) n'est pas assurée ainsi que la coupe horizontale de la pièce elle-même. Ces imperfections se matérialisent par une inclinaison du profil obtenu. On peut corriger ces défauts par la droite des moindres carrés pour obtenir la ligne moyenne du profil. Cette dernière est alors prise comme référence d'horizontalité pour retracer le nouveau profil. On obtient ainsi le profil primaire.

2) La suppression des défauts d'ondulation : A partir du profil primaire on continue notre correction du profil à l'ordre supérieur. On utilise comme valeur de longueur de cut-off (filtre) 0.8 mm, ce qui permet d'éliminer les ondulations de grande période. On obtient ainsi le profil de rugosité.

Comme on l'a déjà cité, une moyenne de trois mesures sur les disques a été effectuée sur chaque surface usinée par rectification. D'après les résultats de mesure de microgéométrie des échantillons, conférés dans l'**Annexe** (pages 189 à 191 pour les pistes), on peut considérer que l'allure des profils des éprouvettes est identique aux deux surfaces par chaque disque. Pour ce qui est des surfaces usinées (pions ou frotteurs) ; puis polis in situ avec du papier abrasif de granulométrie 400 comme support sur les disques, on a obtenu des valeurs de paramètres de rugosité assez reproductibles (pages 192 à 194). Les valeurs moyennes de la rugosité initiale R_a pour chaque cas étudié et son écart type, avant et après essai, sont représentées dans l'**Annexe**. En accord avec l'étude faite par **F. Robbe-Valloire et. Al. [148]** qui ont développé une modélisation de la rugosité et de l'ondulation basée sur la norme **NFE 05-052 [149]**, on a pris la Norme Motif pour utiliser quelques paramètres dans l'étude de la modélisation théorique du contact tribologique entre deux surfaces planes.

4.5. Lubrifiant utilité dans le cas de notre étude :

L'huile utilisée dans les moteurs est une huile de type "monograde" avec une base minérale comportant naturellement un grand nombre d'additifs qui modifie sensiblement son comportement, en l'absence de pollution et, très probablement, en présence de pollution. La présence d'additifs a des comportements vis-à-vis des phénomènes tribologiques et conséquences difficiles à prévoir. L'action attendue de la pollution risque donc d'être très complexe avec notamment une composante donnée par la base minérale (action principalement mécanique en raison de la faible réactivité de la base), et de plus une composante plus physico- chimique imposée par la présence d'additifs. Pour séparer ces effets, nous avons choisi de privilégier, dans un premier temps, la composante mécanique, en choisissant une huile minérale sans additifs.

A titre de perspective nous pourrions étudier par la suite les modifications de comportement engendrées par la présence d'additifs. Vu la diversité des additifs utilisés dans les huiles de lubrification pouvant agir sur le comportement tribologique d'un couple de matériaux donné, notre choix s'est porté sur une huile sans additifs afin d'avoir uniquement l'influence des éléments abrasifs en milieu lubrifié.

L'huile que l'on va utiliser lors des essais est l'huile Neutral Solvent NS 100 qui se rapproche de celle utilisée dans les moteurs (huile Chiffa SAE 40) sur les chantiers de forage algériens. Cette huile employée sur les installations de forage, conforme à la spécification du constructeur des moteurs (CATERPILAR SUPERIOR LUBRICANT Série 3). Elle est caractérisée par un pouvoir de détergence élevé, une qualité supérieure à haut indice de viscosité, ainsi que de larges pouvoirs anti-usure, anticorrosion, antioxydant et anti-mousse. La température moyenne de fonctionnement de l'huile dans les carters des moteurs étant de 75°C, nous avons retenu celle-ci pour la réalisation des essais. La viscosité mesurée à cette température est de $(27 \pm 1 \text{ mm}^2/\text{s})$ d'après [32].

Ce lubrifiant de base minérale paraffinique, l'huile Neutral Solvent NS 100 ; qui dans cet état est considérée comme non additivée ; est obtenu directement à partir du fractionnement du pétrole. Il est utilisé dans des applications automobiles où les températures de certains composants métalliques sont très élevées. Les procédures d'obtention de ce type de bases exigent une série de procédés de séparation et de raffinage du pétrole brut à des températures d'ébullition supérieures à 340°C. Les bases paraffiniques contiennent de longues chaînes hydrocarbonées réticulées et un indice de viscosité très élevé voisin de 100 [150]. Nous avons toujours utilisé l'huile Neutral 100 à la température de 20 et 75°C, température à laquelle sa viscosité cinématique est respectivement égale à 36 et 27 cst. La structure moléculaire des hydrocarbures typiques du lubrifiant de base minérale paraffinique tels que le Neutral Solvent NS100 est :



4.6. Eléments abrasifs :

L'étude proposée a pour cadre, un certain type de pollution rencontrée sur les équipements de forage et de production et en particulier sur les moteurs à explosion, fonctionnant en environnement désertique. Dans ce cas, malgré les efforts réalisés pour filtrer l'air à l'admission, ceux-ci comportent de fines particules de sable qui vont se mêler par la suite à l'huile moteur [32 ; 151]. Ces particules sont de nature spécifique (mélange composé principalement de silice et de zircone (figure 27 a et b)), présentant

une morphologie relativement sphérique [152]. Pour caractériser l'impact de la présence de ces particules sur le frottement et l'usure de contacts tribologiques lubrifiés, nous avons choisi de nous écarter du régime de fonctionnement en film épais (qui donne les frottements et les usures les plus faibles) pour privilégier les phases de fonctionnement en régime sévère [18]. Pour ce faire, nous utilisons un tribomètre pion - disque avec un contact du type plan sur plan présentant des surfaces parallèles qui vont permettre de minimiser les effets hydrodynamiques et favoriser ainsi les régimes mixte et éventuellement limite.

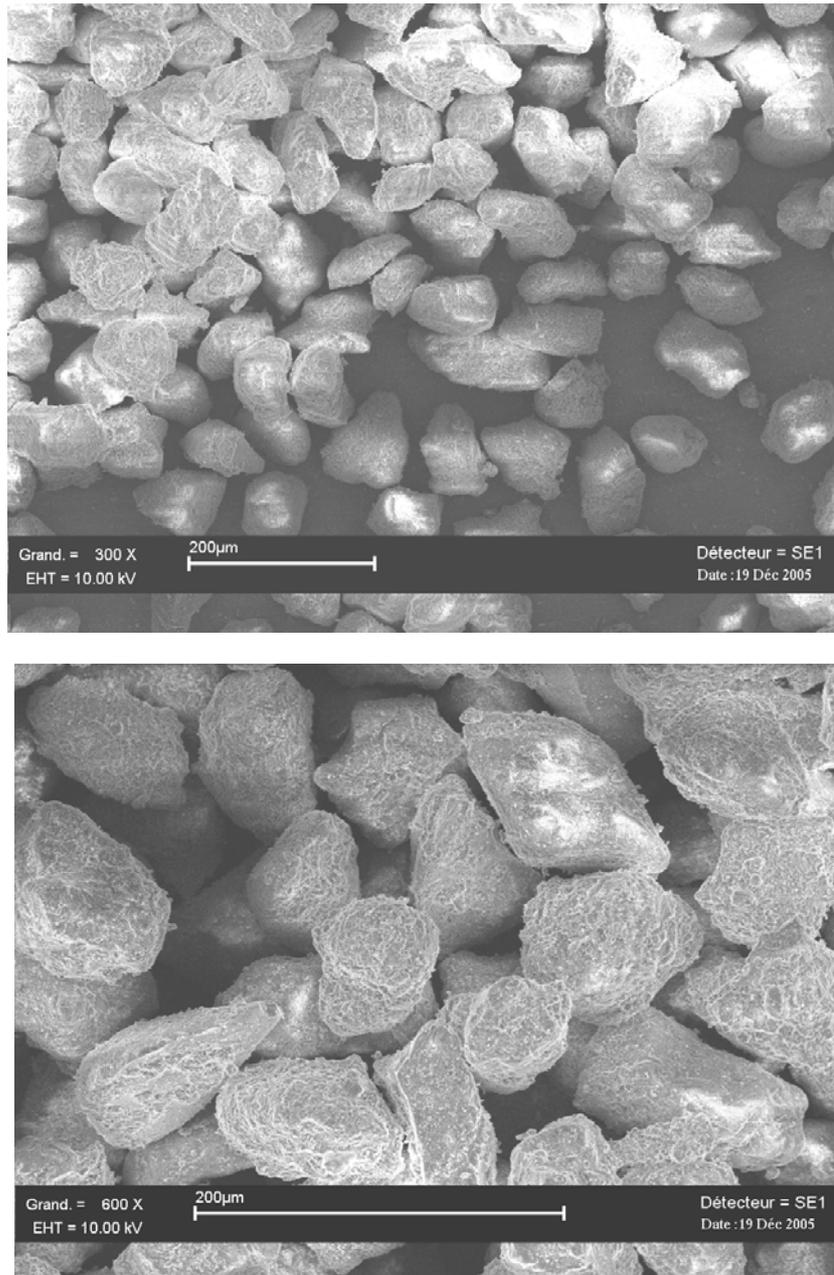


Figure 27 : Aspects des particules abrasives utilisées dans nos essais.

Ces particules abrasives, qui peuvent être assimilés à des outils de coupe élémentaires, en fonction de leurs dimensions et formes, peuvent se comporter de trois manières différentes dans le contact lubrifié pion / disque :

- ils s'incrument dans le pion (ayant une dureté plus faible que celle de la piste) lorsque leur dimension est grande;
- ils se défragmentent puis, soit ils s'incrument dans le pion, soit ils circulent entre les aspérités représentant la microgéométrie de contact;
- ils circulent entre les aspérités des deux surfaces avant d'être chassé du contact par le lubrifiant.

Donc, pour les pollutions, nous choisis de reproduire le plus fidèlement possible la situation rencontrée sur les paliers des équipements sollicités. L'analyse des huiles, dans le cas de l'étude des moteurs, nous a permis de déterminer que la concentration des grains abrasifs (sable) est de 2 grammes / litre d'huile et l'analyse du sable retrouvé dans les huiles des moteurs, nous donne essentiellement la composition:

- ◆ 84 à 88 % de particules de Silice de dimensions comprises entre 3 et 86 μm ,
- ◆ 6 à 8 % de particules de Zircon de dimensions comprises entre 10 et 50 μm

La présence de particules de faibles dimensions dans les filtres à air, (**tableau 9**), nous indique leurs efficacités élevées. Donc afin de pouvoir diminuer l'introduction de ces particules dans les zones de contact mécanique, il faudrait changer périodiquement ces filtres pour assurer une filtration efficace et par conséquent affaiblir les conditions favorisant l'abrasion. En comparant la teneur en particules dans les dunes de sable, les filtres à air et l'huile usagée des moteurs, on constate que toutes les particules de dimensions inférieures à 50 μm arrivent à passer au travers des filtres à air, dans le fluide de graissage. D'autre part la comparaison et l'étude de la composition chimique du sable prélevé sur différents sites de la le monde a montré une abrasivité très élevée de notre sable saharien.

C'est l'une des raisons pour laquelle la durée de vie de nos installations de forage en général, et des moteurs en particulier, est dans la majorité des cas de trois fois inférieure à celle préconisée par les constructeurs de ces installations ou équipements.

<i>Dimensions des particules μm</i>	<i>Quantité en %</i>			<i>Huile usagée</i>
	<i>Sol</i>	<i>Dune</i>	<i>Filtre à Air</i>	
< 2 μm	-	-	- 10,00	-
2 à 4 μm	-	-	-	- 5
4 à 10 μm	- 0,02	- 0,02	- 1,00	-
10 à 20 μm	-	-	- 1,00	- 25
20 à 50 μm	-	-	- 3,25	- 30
> 50 μm	- 99,98	- 99,98	- 84,75	- 40

Tableau 9 : Répartitions des dimensions des particules abrasives [32].

Nous avons donc choisi de retenir cette concentration de pollution, (2 grammes / litre d'huile), que l'on va obtenir directement par tamisage de sable puis additionner à l'huile neuve. Afin de garder une homogénéité du mélange, un système d'agitateur a été conçu pour la cuve contenant l'huile pollué par ces abrasifs. Les figures 16 présentent l'aspect de ces particules abrasives.

V. Types d'essais réalisés sur le tribomètre pion-disque :

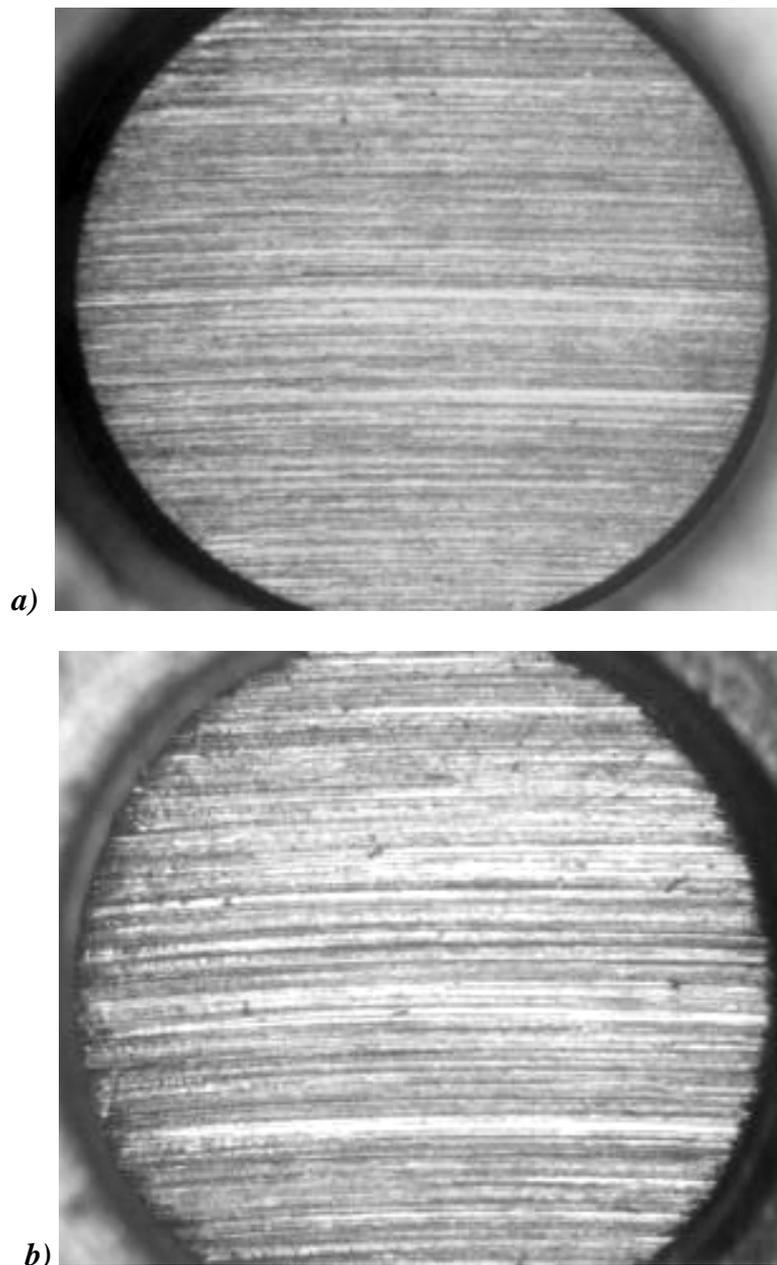
Les essais de glissement sur ce type de tribomètre consistent à faire frotter deux surfaces planes, présentant une certaine microgéométrie, qui sont totalement immergées dans l'huile à une température et charge normale constantes. Un capteur mesure en continue la force tangentielle, autrement dit la force de frottement. Et dans le cadre de notre recherche, nous avons envisagé deux types d'essais à savoir les essais à vitesse variable pour l'étude du frottement et les essais à vitesse constante afin de pouvoir quantifier l'usure et étudier la variation de la microgéométrie des surfaces en contact.

Plusieurs conditions expérimentales initialement testées ont été éliminées car elles n'apportaient pas de nouveaux résultats ou des résultats significatifs tels que, par exemple, l'obtention d'un fini de surface avec un papier abrasif de grade 120 ou l'application de pressions supérieures ou égales à 10 MPa conduisant, dans les conditions choisies, à la disparition de l'état de surface initial. D'autres conditions ont été envisagées mais elles étaient expérimentalement impossibles à réaliser comme par exemple un champ de vitesse plus étendu.

Les essais préliminaires ont également permis de mettre en évidence des problèmes de parallélisme entre les surfaces en contact lors de l'obtention de l'état de surface voulue du pion. Cet état de surface est obtenu in situ sur le tribomètre lors d'un essai pion/disque à basse vitesse (0,5 Hz) sous une force normale de 5 N pendant 60 secondes avec le disque recouvert d'un papier abrasif. A l'issue de ces 60 secondes de polissage, l'observation des surfaces frottantes a mis en évidence un défaut de parallélisme, la surface des frotteurs n'ayant pas été totalement en contact avec le disque. L'augmentation de la force normale n'a apporté aucune amélioration. Le problème a pu être résolu après plusieurs tentatives en remplaçant la procédure expérimentale ci-dessus par celle décrite au **paragraphe 4.3.5**, en **page 121**.

Le problème de parallélisme corrigé, ces essais préliminaires ont permis de vérifier la fiabilité des essais et de valider les conditions expérimentales qui seront utilisées pour simuler la phase de rodage et du frottement. Après l'obtention de l'état de surface souhaité (**figures 28**), les pions sont démontés, pour évaluer la perte de masse engendrée par cette opération. Le nombre d'essais réalisés est suffisant pour confirmer la reproductibilité des résultats dans les différentes conditions testées.

Pour des raisons de commodité, les résultats sont donnés sous forme de courbes pour le coefficient de frottement et d'usure. Les conditions d'essais sont choisies de façon à simuler une certaine situation de frottement de telle façon que l'état de surface initial des pions doit être encore visible à la fin de l'essai pour les essais de frottement. Les résultats les plus significatifs sont donnés sous forme de graphiques représentant l'évolution du coefficient de frottement en fonction des paramètres expérimentaux.



**Figures 28 : Evolution des surfaces des pions en bronze :
a) avant essai ; b) après essai.**

En situation de frottement, le phénomène prédominant pour les surfaces en contact est l'altération de leur état de surface, c'est à dire de la rugosité, par l'action simultanée de l'usure et de la déformation plastique des aspérités de la surface jusqu'à l'obtention d'un profil qui favorise une meilleure stabilité du film d'huile et entraîne par conséquent la diminution du coefficient de frottement.

Pour pouvoir étudier cette phase de frottement, les pressions de contact appliquées sont faibles et la durée de chaque essai est très courte. Les éprouvettes

étant totalement immergées dans l'huile et l'état de surface des pistes en acier très dur étant très fin, l'usure des frotteurs, construits en matériaux plus mous, est facilement quantifiable. Aucun changement significatif de la surface des matériaux des pistes n'est observable. La variation de la perte de masse avant et après essai est négligeable, de l'ordre de 10^{-4} gramme (égale à la précision de la balance). Cette opération de pesée a été supprimée après avoir obtenu la certitude qu'il était impossible de quantifier systématiquement l'usure sur les disques. D'autres techniques d'analyse doivent alors être utilisées.

Les deux campagnes d'essais récapitulées dans le **tableau 10** suivant, ont permis de mesurer la force de frottement (ou le coefficient de frottement), la valeur des pertes de masse (usure) pour les frotteurs en fonction de la charge appliquée et de la vitesse de glissement pour une paire de matériaux et un lubrifiant donné à une température ambiante de 20 °C et à une certaine température de 75°C, qui est la température moyenne relevée de l'huile dans les carters des moteurs diesel.

La caractérisation du comportement tribologique fait intervenir deux types d'essais: le premier à vitesse de glissement variable et le second à vitesse de glissement constante pour le régime mixte de lubrification. Ces deux types d'expériences répondent à des objectifs bien distincts c'est-à-dire qu'ils nous permettent d'analyser d'une part la variation du coefficient de frottement dans les différents régimes de lubrification et d'autre part d'étudier l'influence du régime mixte de lubrification sur l'évolution morphologique des surfaces en contact ; et en particulier celle des frotteurs présentant une plus faible dureté d'où leurs prédispositions à l'usure comparativement aux pistes.

Les essais à vitesse variable permettent d'analyser la variation du coefficient de frottement induite par les changements de vitesse et d'en déduire par la suite la succession des différents régimes de lubrification. L'essai est constitué d'une série de variation de la vitesse de glissement (de 0,25 et 3,5 m/s) sous forme de paliers de vitesse.

Les essais à vitesse constante permettent de sélectionner un régime de fonctionnement et d'obtenir une quantification de l'usure (mécanisme en vigueur et

intensité) qui permettra d'identifier le rôle des matériaux et l'impact de la présence ou non de pollutions abrasives sur les surfaces de frottement lubrifié.

Types d'essai	Matériau	Température de l'huile	Etat initial de surface du pion	Vitesses
I	Pistes : acier 100 Cr 6 Frotteurs : Bronzes - CuSn - CuSnPb	Neutral 100 à : - 20 °C - 75°C	Papier abrasif : 400	Croissante / Décroissante
				Constante 0,65 - 1 m/s
II			Papier abrasif:1200	Croissante / Décroissante
				Constante 0,65 - 1 m/s

Tableau 10 : Tableau récapitulatif des conditions sélectionnées pour la campagne d'essais pour les différentes paires de matériaux sous une pression de contact de 6,5 MPa.

5.1. Essais de frottement avec vitesse de glissement variable :

$$\mu = f(v_g), \quad v_g \in [0,1; 3,5] \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

Pour ce type d'essai la charge appliquée est constante, nous avons retenu une pression moyenne de contact de 6,5 MPa qui est en accord avec les propriétés mécaniques des alliages étudiés mais qui permet également d'assurer une usure mesurable des pions à la fin de chaque essai. Le coefficient de frottement est mesuré en continu lors de l'essai, ce qui permet de mesurer les modifications de frottement provoquées par chaque changement de vitesse. La charge appliquée étant constante, le coefficient de frottement est mesuré pour chaque palier de vitesse de glissement.

À chaque changement de vitesse (**figure 29**), on observe une modification immédiate de la valeur du coefficient de frottement et par conséquent une

modification du nombre d'aspérités en interaction. A chaque palier de vitesse correspond une nouvelle période de frottement. Entre deux paliers, il existe des phases transitoires. Les essais comportent trois séquences principales:

- **Séquence de rodage** : Cette séquence, d'une durée de 40 minutes est réalisée à la vitesse de 0,25 m/s. Elle a pour objectif de réaliser un rodage des surfaces frottantes afin que la suite des caractérisations correspondent à des surfaces accommodées.

- **Séquence à vitesse croissante** : La vitesse de glissement croît de la valeur minimale : 0.25 m/s jusqu'à la valeur maximale de 3.5 m/s. Cette séquence comprend neuf paliers de vitesse de glissement ayant chacun une durée de quatre minutes.

- **Séquence à vitesse décroissante** : La vitesse de glissement décroît de la valeur maximale jusqu'à la valeur minimale et passe successivement par les neuf valeurs de vitesse de glissement examinées lors de la séquence à vitesse croissante.

Pour le positionnement choisi du frotteur sur la piste, à chaque palier correspond une rotation de l'arbre de sortie du moteur électrique et contrôlée par la commande du tribomètre. Le **tableau 11** montre la correspondance vitesse de glissement – vitesse de rotation utilisée dans les essais sur ce type de tribomètre.

v_g (ms ⁻¹)	0.1	0.2	0.3	0.5	1	1.5	2	2.5	3
rpm	100	200	400	700	1100	1600	2100	2700	3535

Tableau 11 : correspondance vitesse de glissement – vitesse de rotation pour les essais

Les essais avec des vitesses de glissement variables permettent d'établir des courbes de type **Stribeck (figures 30; 32b)**. Les courbes correspondant aux vitesses décroissantes présentent toujours un coefficient de frottement très légèrement inférieur à celles correspondant aux vitesses croissantes. Ceci prouve que l'adaptation des

surfaces en contact pendant la séquence de rodage (40 minutes à 0,25 m/s) n'est pas rigoureusement parfaite. Ce comportement a été confirmé pour tous les essais, quelles que soient les paires de matériaux testées, mais la différence reste tellement faible que nous avons retenu, dans la suite de notre travail, uniquement les valeurs moyennes obtenues pour chaque palier de vitesses sur les deux séquences.

La **figure 32a** représente un frictiogramme type obtenu à partir d'un essai réel [143]. La durée de l'essai est représentée en abscisses et la valeur du coefficient de frottement en ordonnées. La valeur de la vitesse de glissement est indiquée pour chaque palier. La durée de chaque palier de vitesse est de quatre (4) minutes. Pour le déroulement de nos essais, nous allons adopter la même méthodologie qui avait donné de bons résultats.

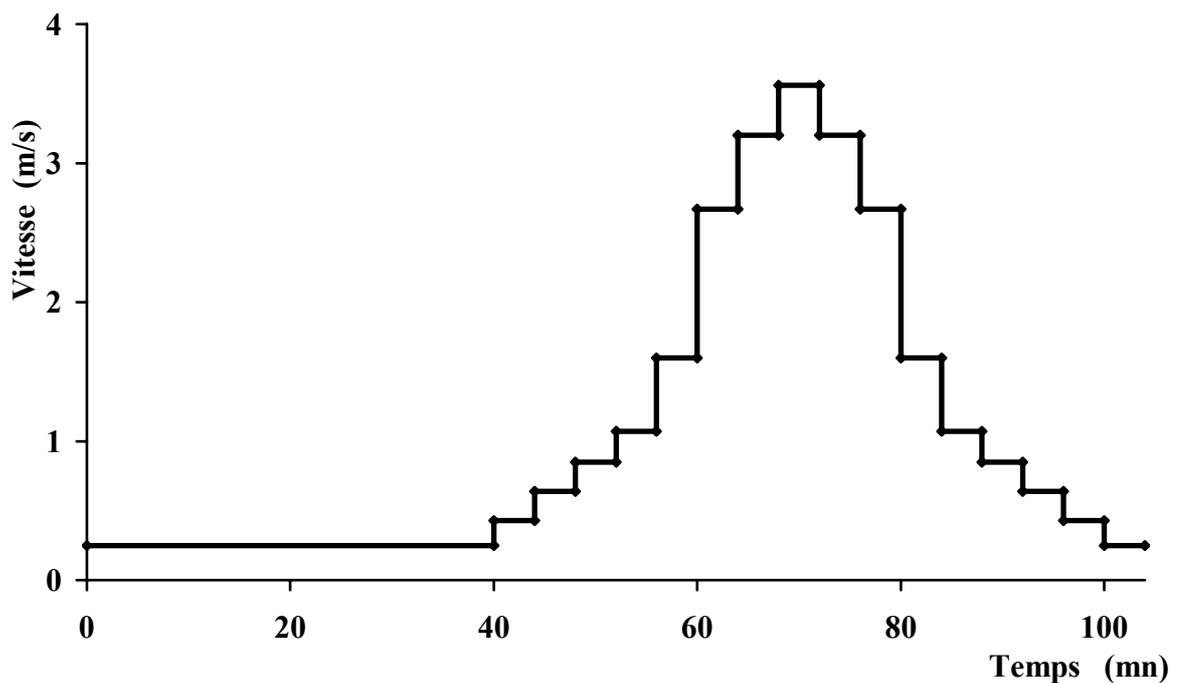


Figure 29 : Variation de la vitesse au cours des essais de frottement à vitesse variable réalisés sur le tribomètre Pion-Disque.

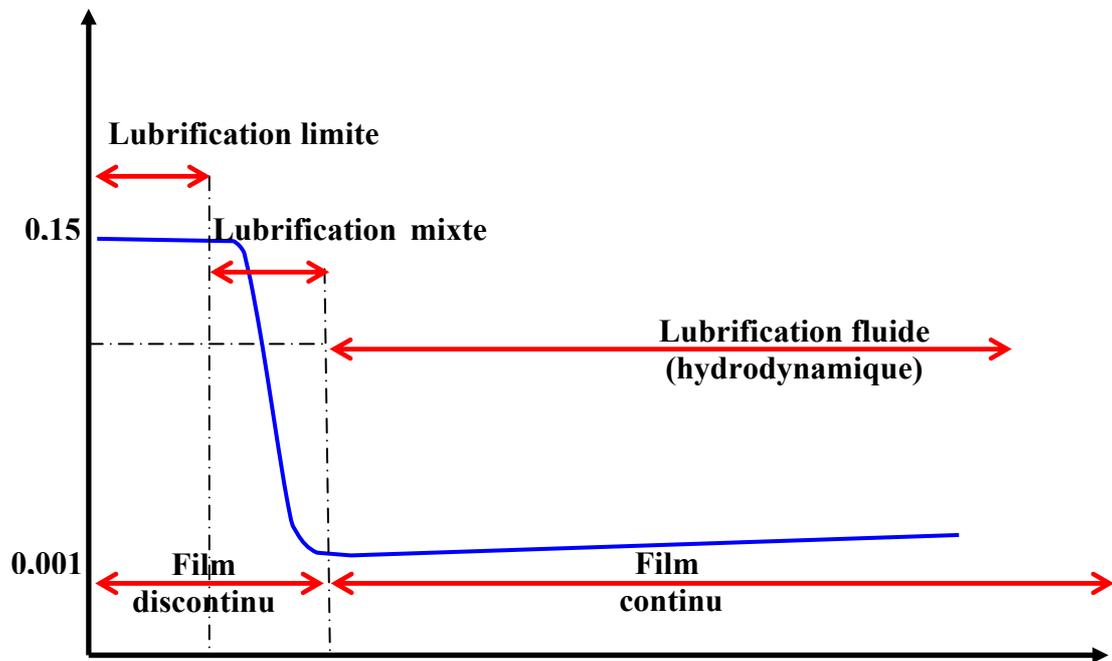


Figure 30 : Courbe de Stribeck avec les différents domaines de lubrification

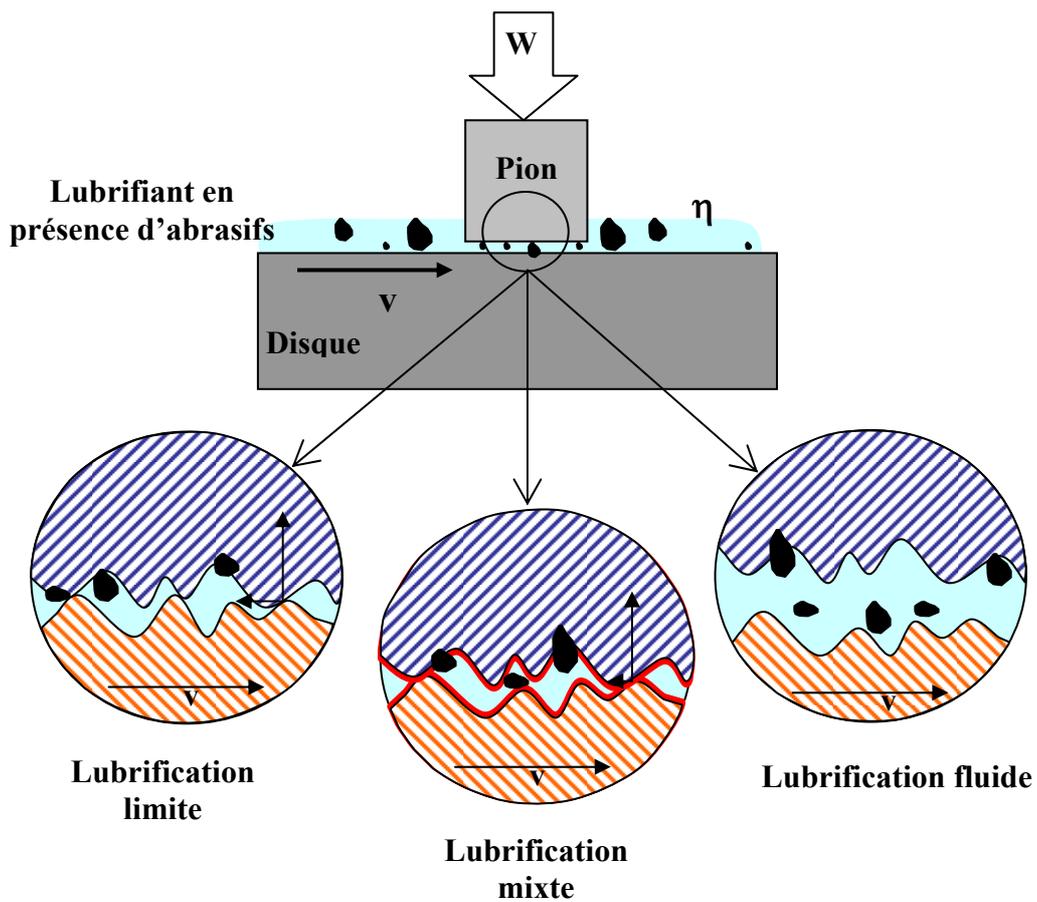


Figure 31 : Représentation schématique des différents modes de lubrification dans le contact pion – disque,

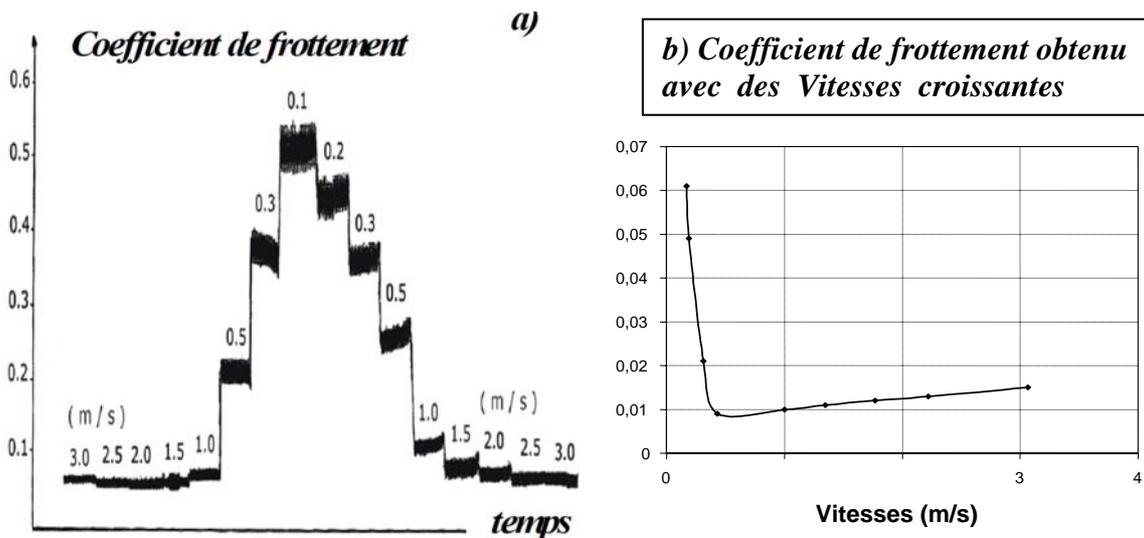


Figure 32 : a) Frictiogramme type ; b) courbe expérimentale résultante - Pion en laiton ; finition : papier abrasif 80 ; Lubrifiant : huile Neutral 100 ; $p = 10 \text{ MPa}$; $T = 20 \text{ °C}$ [143].

5.2. Essais de frottement avec vitesse de glissement constante : $\mu = f(t)$

Les essais à vitesse variable sont très complexes à interpréter vis à vis de l'usure car l'historique du contact est rendu complexe en raison des multiples changements de vitesse. Par conséquent, pour simplifier l'analyse du contact nous avons envisagé des essais à vitesse constante afin de mieux étudier l'impact des pollutions abrasives sur la microgéométrie de surface.

Pour étudier l'influence de la rugosité, l'évolution de la morphologie, quelques expérimentations ont été réalisées avec une vitesse de glissement constante. Ces expérimentations ont permis de comparer l'influence du régime de lubrification mixte sur les changements morphologiques de la surface des pions soumis au glissement.

Pour les essais à vitesse de glissement constante, nous conservons la pression moyenne de 6,5 MPa et nous avons sélectionné les deux niveaux de vitesse : 0,65 et 1,0 m/s qui présentent un double avantage. D'une part, elles se situent,

comme nous venons de le voir dans le régime de lubrification mixte qui est une période de fonctionnement (ou de frottement) très défavorable pour les matériaux constituant le couple tribologique. D'autre part, elles correspondent à des vitesses de glissement rencontrées sur le moteur dans les phases de fonctionnement à bas régime (régime du ralenti). La durée de l'essai a été fixée à 60 minutes soit une distance parcourue respectivement de 2340 et 3600 mètres. Elle permet d'obtenir, en fin d'essai, une usure significative, quantifiable de manière fiable par pesée (précision de la balance 0,1 mg) et par contrôle dimensionnel de la longueur du pion.

C. RESULTATS EXPERIMENTAUX:

I. Introduction à la partie expérimentale :

Ce présent chapitre des résultats d'essais nous permet de connaître les altérations pendant la phase de frottement et d'usure des couples d'échantillons testés en employant plusieurs techniques et méthodes d'analyse : microscopie optique, microscopie électronique, filiation de la dureté, analyse des surfaces frottantes, analyse des débris d'usure. Nous pouvons faire une étude mécanique et métallurgique des couches structurales. Avec les éprouvettes utilisées comme dans les essais sur le tribomètre pion / disque, nous avons comparé l'état initial de la surface de surface avec l'état obtenu après essai. Les altérations de l'intégrité superficielle que nous devons étudier sont : les altérations mécaniques avec les variations de dureté et la création de contraintes résiduelles ; les altérations métallurgiques avec les apparitions de couche blanche, d'inclusions sur le matériau et les changements de phase.

L'intégrité superficielle implique l'étude et le contrôle tant de la rugosité que de la métallurgie superficielle. Les deux facteurs contribuent pour la qualité de la surface et deviennent extrêmement significatifs lors de la fabrication des composants structurels qui doivent supporter des tensions statiques et dynamiques élevées. Par conséquent, la nature de la surface d'un point de vue topographique et métallurgique est importante dans la conception et la fabrication de composants critiques.

Les essais sur le tribomètre pion – disque ont permis de voir une déformation sur la surface plus douce. Plusieurs facteurs dans le système tribologique sont responsables pour cette déformation: le force tangentielle, le force normale, les propriétés du lubrifiant qui sépare les deux surfaces, l'état de surface, la présence ou non de particules abrasives et les propriétés mécaniques des matériaux utilisés.

L'état de finition initial des surfaces de contact est un facteur très important dans le comportement de tout le système tribologique. Il est normalement quantifié pour les paramètres de rugosité qui caractérise la surface. Quand les deux surfaces

du couple de matériaux sont mises en contact, ce sont les aspérités les plus élevées qui entrent en contact et ensuite elles se déforment. Dans le rapport entre la force normale et l'écrasement des aspérités on voit que la population des aspérités en contact augmente avec l'effort normal appliqué.

Un tel fonctionnement en film continu du palier va disparaître dans les deux situations principales suivantes. La première concerne les phases au cours desquelles, soit la vitesse est réduite (démarrages par exemple), soit les efforts du contact qui augmentent. Alors l'épaisseur du film diminue ce qui provoque des contacts directs entre les points hauts des surfaces : les aspérités les plus hautes. Le film lubrifiant est rendu discontinu et le fonctionnement se fait en régime mixte. Les modélisations de ce mode de lubrification commencent à se développer. Elles font clairement apparaître la nécessité de décrire en plus du film d'huile, les premiers corps en terme de caractéristiques mécaniques et microgéométriques [153 ; 154].

Au plan général, les rayures et les arrachements observés sur les surfaces frottantes sont attribués soit à des particules d'usure enchâssées dans l'une des pièces [155] (abrasion à 2 corps), soit à des particules véhiculées par le lubrifiant (abrasion à 3 corps) [156]. Les particules abrasives pouvant être assimilés à des outils de coupe élémentaires dont l'angle de coupe peut être positif ou négatif ; provoquant sur les surfaces antagonistes un déplacement de matière par déformation plastique et un enlèvement de matière par formation de micro-copeaux [62].

II. Essais préliminaires:

Lors de la phase initiale des essais (c'est-à-dire au cours du rodage), une adaptation des surfaces se produit en faisant intervenir principalement:

- la déformation élastique des aspérités sous charge,
- l'usure des sommets des aspérités (déformation élastique / plastique) due à l'adaptation des surfaces.

A partir de deux surfaces parallèles, présentant une certaine rugosité, baignant dans un milieu lubrifié, un modèle est ici proposé dans lequel le coefficient de friction est contrôlé par un unique paramètre hydrodynamique. Cette analyse expérimentale tient compte d'une vaste diversité de facteurs qui influence les conditions dans lesquelles le contact fonctionne : paramètres opérationnels (la charge normale, la vitesse de glissement, la viscosité du lubrifiant), les propriétés mécaniques du couple de matériaux en contact (module d'élasticité, coefficient de Poisson) et la microgéométrie de la surface (exprimée par les paramètres de rugosité normalisés). Ce modèle de frottement prédit le comportement tribologique des régimes de lubrification. Ainsi par un choix judicieux des matériaux (en accord avec les propriétés mécaniques et la rugosité des surfaces) il est possible de prédire le régime de lubrification et également de réduire l'usure. L'usure ou la perte de masse des pièces frottantes dépend du nombre de jonctions métal-métal et de leur taille.

Le frottement des organes mécaniques a lieu en général en présence de lubrifiants liquides. L'un des rôles les plus importants de ces lubrifiants liquides est de diminuer le nombre et la dimension des jonctions métalliques en constituant des films protecteurs qui supportent une partie de la charge [3] et de cette façon réduire le frottement et l'usure des interfaces. En génie mécanique on emploie souvent un fluide pour lubrifier les composants mécaniques qui sont en contact dans une situation de lubrification limite. Même en présence d'un lubrifiant, le contact solide-solide entre les surfaces en glissement peut se produire avec toutes ses conséquences. Pendant le rodage l'épaisseur du film d'huile peut être tellement mince que les sommets des aspérités des surfaces peuvent être en contact. Cela se traduit par un accroissement du frottement et de l'usure. Ces régimes sont appelés régime de lubrification mixte ou même limite. Dans ces conditions le coefficient de friction n'est pas continu et par conséquent il est nécessaire de le calculer à chaque instant afin de connaître son évolution.

Un lubrifiant liquide devra être capable de tenir la pression du contact de façon à ce que les surfaces solides se maintiennent avec de hautes qualités. La surface, après frottement, doit être extrêmement polie, cela est nécessaire surtout pour le frottement continu dans les machines de précision. Les lubrifiants qui plastifient par tensio-activité c'est-à-dire par adsorption moléculaire donnent les résultats suivants :

- un coefficient de frottement bas,
- une usure très faible,
- une bonne qualité des surfaces par plastification et aplanissement des rugosités.

Pour faciliter le frottement, on peut améliorer cette adaptation en introduisant un additif tensioactif dans la composition du lubrifiant [157]. On crée ainsi une meilleure adhérence des épilâmes, les sommets des aspérités des surfaces sont plastifiés par adsorption d'agents chimiques qui facilitent l'adaptation.

Les additifs sont normalement ajoutés aux lubrifiants afin d'obtenir une propriété spécifique et une interaction avec la surface. Les acides gras sont souvent utilisés comme additifs grâce aux améliorations apportées dans le contact. L'acide oléique a été utilisé dans différents travaux : [88], [142], [158]; qui ont montré que la concentration en acide oléique dans le lubrifiant accroît la plastification des couches superficielles en abaissant sa limite élastique.

Dans le cas d'un faible frottement de contact sous une pression assez grande, on observe toujours un soudage ou un frittage complet sous l'action de la pression normale et des tensions de cisaillement intervenant dès les premiers instants du frottement, au moment du glissement des surfaces l'une contre l'autre. Supposons que l'un des solides soit infiniment plus rigide que l'autre, il existe alors une répartition des vitesses de déformation dans le corps le moins rigide qui devient plastique sous une pression élevée. Dans ce cas on observe l'écoulement du corps le plus mou, le moins rigide, sous l'action de l'autre corps qui sert d'instrument pour donner une répartition de vitesses et de contraintes. Aucune application industrielle n'est possible dans ce genre de considération.

Pour les pressions plus faibles, on peut toujours réaliser à grande vitesse un frottement dans les conditions de lubrification hydrodynamique. La théorie hydrodynamique nous permet de calculer les coefficients de frottement en fonction seulement de la répartition de vitesse (dans les conditions d'un fluide newtonien) mais aussi de la viscosité.

Pour éliminer les effets négatifs dans le travail mécanique, particulièrement pour les travaux de tréfilage, laminage,..., etc. **Rehbinder [159]** dit qu'il est nécessaire de changer les conditions d'interface des deux surfaces en contact en utilisant les propriétés d'action des lubrifiants actifs qui contiennent des substances tensioactives s'adsorbant à la surface du métal déformé, plastifie une couche superficielle extrêmement fine du métal, abaissant ainsi sa limite élastique et permettant des pressions très grandes. La barrière énergétique à la surface est toujours abaissée par adsorption en facilitant la sortie des dislocations.

Les huiles lubrifiantes contiennent en général des additifs de différents types, les plus usuels sont des agents anti-mousses, anticorrosion, antioxydants, anti-usure et Extrême Pression. Les molécules tensioactives permettent d'obtenir des résultats intéressants en modifiant la microstructure des éprouvettes. Pour certains matériaux les propriétés de mouillage et d'absorption sont améliorées ce qui conduit à un meilleur comportement tribologique avec pour conséquence une nette diminution du coefficient de frottement et d'usure.

L'huile utilisée pour tous nos essais sur tribomètre est l'huile Neutral NS 100. Ce lubrifiant de base minérale paraffinique est obtenu directement à partir du fractionnement du pétrole. Il est utilisé dans des applications automobiles où les températures de fonctionnement de certains composants mécaniques sont très élevées. Les procédures d'obtention de ce type de bases exigent une série de procédés de séparation et de raffinage du pétrole brut à des températures d'ébullition supérieures à 340°C. Les bases paraffiniques contiennent de longues chaînes hydrocarbonées réticulées et un indice de viscosité très élevé voisin de 100.

Les essais préliminaires ont été réalisés dans le souci de mener à bien notre campagne d'essai dans le cadre de l'étude phénoménologique des surfaces en contact lubrifié par de l'huile polluée par des particules abrasives. On a tout d'abord, dans un premier temps étudié l'influence de la température du lubrifiant sur le comportement des bronzes. Et il est à noter que les paliers étant chargés faiblement afin de ne pas trop polluer le fluide lubrifiant qui a été utilisé pour deux essais (en plus des essais de validation). Par contre, dans un deuxième temps, en utilisant des huiles neuves et des huiles usagées (et qui ont servis précédemment), on a comparé leur influence sur le frottement de nos couples d'échantillons.

Ces essais sont importants pour la suite de nos travaux car ils vont permettre de caractériser les surfaces après essai du point de vue mécanique et métallurgique de façon à déterminer quel couple présente le meilleur comportement en frottement dans les conditions appliquées en imposant un programme des essais valide nous permettant d'atteindre le but fixé de cette recherche.

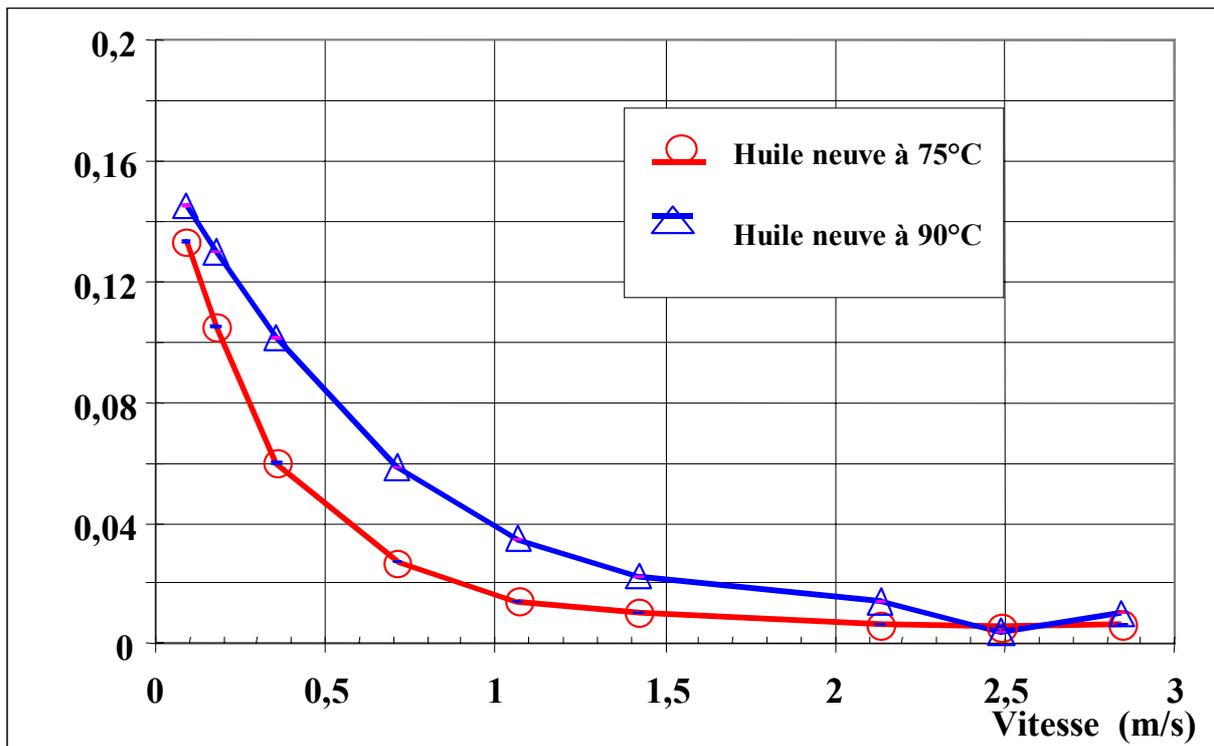


Figure 33 : Courbes de Stribeck pour une huile neuve utilisée à deux températures (75°C et 90°C) à vitesse croissante durant la phase stabilisée [$p=2,5\text{Mpa}$].

La **figure 33** confirme qu'avec l'augmentation de la température on a obtention d'une baisse de la viscosité entraînant des usures et frottements plus importants dans les régimes de lubrification mixte et limite. Par contre sur la **figure 34** (en page suivante), on peut voir qu'avec une huile usagée, le coefficient de frottement est plus élevé qu'avec une huile neuve. Ceci peut être expliqué par la perte des propriétés lubrifiantes de l'huile c'est-à-dire une dégradation au cours des essais, par une oxydation et un cisaillement intense de l'huile (qui brise les chaînes moléculaires). Aussi il faudrait savoir que la présence probable de polluants produits par l'usure des matériaux formant le couple de frottement, ont aussi tendance à augmenter le coefficient de frottement ainsi que l'usure.

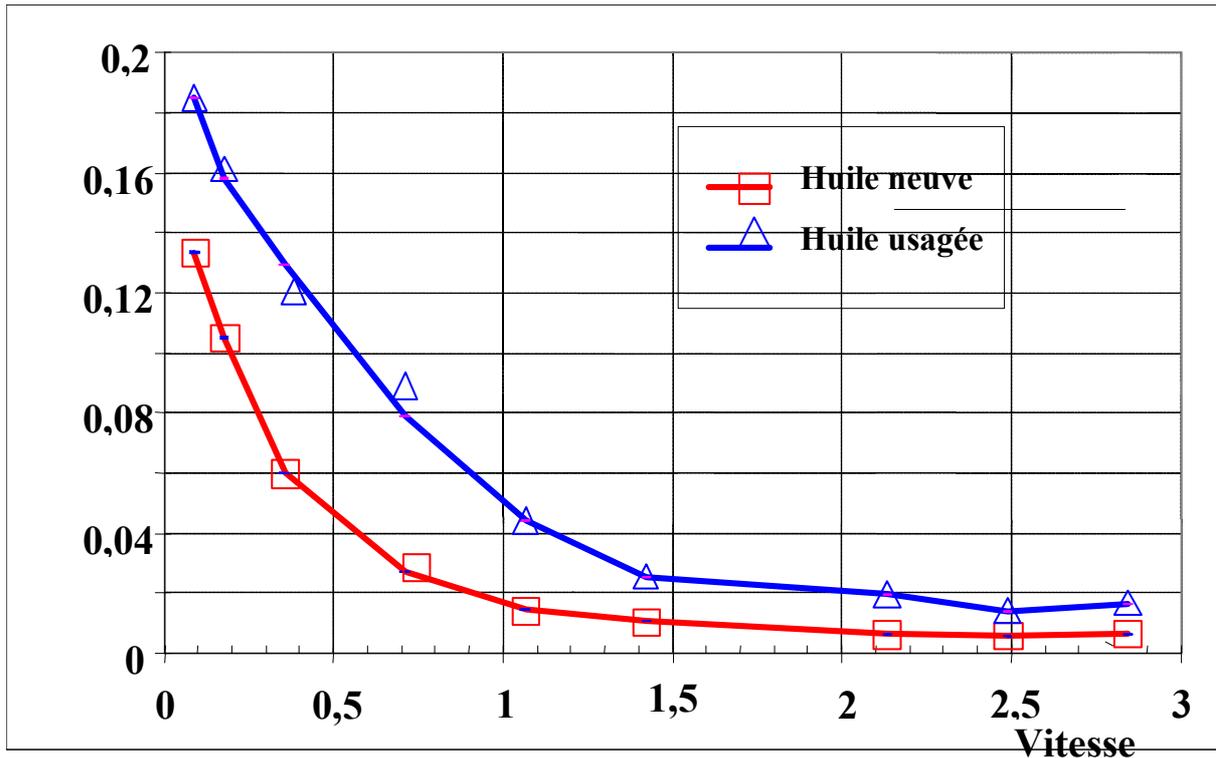


Figure 34: Courbes de Stribeck obtenues pour une huile neuve et une huile usagée, utilisées à 75°C, à vitesse croissante durant la phase stabilisée [p=2,5Mpa].

Les essais ultérieurs seront réalisés avec des huiles neutres (sans additifs) et par conséquent l'étude expérimentale sera poursuivie par une modélisation afin de prendre en compte la nature des matériaux ainsi que leurs microgéométries en présence de particules abrasives. Alors dans ce cas de figure on s'attend, en effet, à ce que le coefficient de frottement soit plus élevé dans les régimes de lubrification limite et mixte lorsque l'huile ne contient pas d'additifs d'une part, et polluée par des particules abrasives d'autre part. Nous allons utiliser l'huile Neutral NS 100 aux températures : 20°C et 75°C.

Le bain lubrifiant peut être réutilisé pour plusieurs essais en fonction de l'état de sa coloration (viscosité, concentration en pollutions,...), c'est à dire de ses propriétés lubrifiantes. Si les conditions expérimentales ou le matériau du pion changent, l'huile doit être remplacée impérativement par de l'huile neuve. Après le dernier essai avec un lubrifiant ou une condition donné, la cuve doit être vidée, bien nettoyée et dégraissée à l'acétone pour éliminer toutes traces de présence de particules d'usure ou de sable.

III. Analyses des essais à vitesse variable :

Les essais de frottement ; à vitesse variable (**figure 32**) sur tribomètre pion/disque, permettent d'établir des courbes de type **Stribeck** (**figure 33 ; 34**) ils nous donnent la possibilité d'enregistrer en continue et suivre l'évolution de la variation du coefficient de frottement. Par contre l'étude et l'analyse de la surface dans ce cas ne nous donnent pas une image réelle du frottement et de l'usure sur les surfaces en contact.

Parmi les résultats les plus classiques, on retrouve une différence de la valeur du coefficient de frottement entre les vitesses croissantes et celles décroissantes (**figure 35**). Cette différence de comportement traduit une évolution significative des surfaces en cours de contact de frottement durant l'essai et qui correspond au processus de rodage de ces surfaces. On remarque que la courbe du coefficient de frottement aux vitesses décroissantes (à partir de la deuxième partie de l'essai) est systématiquement en dessous de celle obtenue aux vitesses croissantes (début de l'essai). Et ce phénomène, nous indique que le contact initial de frottement se traduit par une réduction du frottement avec un mécanisme d'accommodement des surfaces.

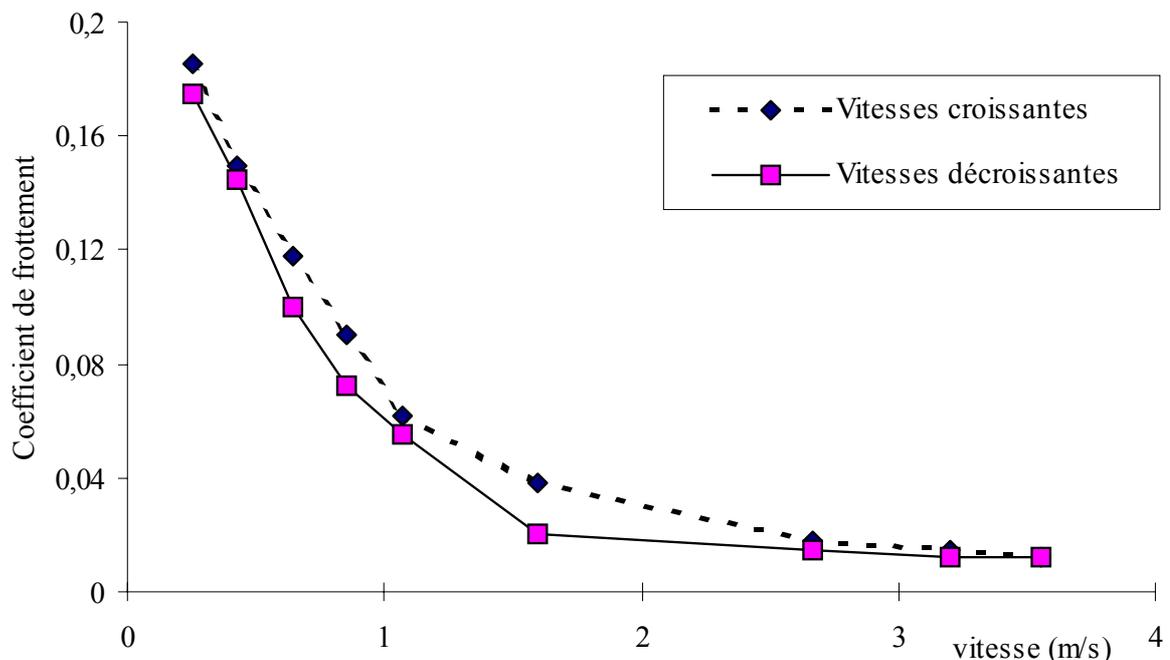


Figure 35 : Exemple de courbe de Stribeck obtenue (CuSn en immersion dans l'huile avec pollutions).

Ces courbes expérimentales de type **Stribeck**, nous permettent d'obtenir la variation du coefficient de frottement pour les différents régimes de lubrification en fonction d'un ensemble de paramètres expérimentaux. Ces courbes représentent la valeur moyenne du coefficient de frottement obtenu pour chaque palier en fonction de la vitesse de glissement (vitesses croissantes et décroissantes). Les valeurs des coefficients de frottement obtenus au cours de nos différents essais sont présentés sur **les figures : 33 ; 34 ; 35**.

Par ailleurs, ces courbes couvrent un large domaine de coefficient de frottement (0,01 à 0,25) ce qui montre que les conditions expérimentales permettent d'analyser une grande partie des régimes de lubrification limite ou mixte. La zone à faible frottement (vitesse de glissement supérieure ou égale à 2 m/s) est révélatrice du phénomène de lubrification microhydrodynamique généré au niveau des aspérités de la microgéométrie des surfaces. Cette zone, où les contacts sont à dominante fluide, comme le prouve le niveau de frottement, correspond généralement à des usures très faibles, le plus souvent, insuffisantes pour générer des niveaux caractérisables par les moyens classiques [159]. Inversement dans la partie de gauche de la courbe de Stribeck, le niveau plus important du coefficient de frottement traduit des contacts plus sévères et donc un niveau d'usure plus important.

Donc sur les deux zones observables sur cette dernière figure, on peut dire que la zone de droite correspond aux vitesses les plus élevées c'est à dire en général à des vitesses supérieures à $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Cette zone correspond au régime hydrodynamique et le pion se comporte comme un patin en régime hydrodynamique. Ce phénomène peut être attribué :

- à des effets de type microdynamique. Les rugosités des surfaces jouent le rôle d'un grand nombre de patins microscopiques et la résultante totale des efforts de portance et de résistance générée par les aspérités équivaut aux forces de portance et de résistance d'un patin unique incliné,

- aux jeux internes du système pion / disque susceptibles de conduire à l'inclinaison du pion par rapport au disque,

- aux effets d'écrasement du film (squeeze film) dus aux défauts de planéité du disque.

Dans la même zone le coefficient de frottement varie avec la vitesse et il atteint une valeur minimale quand cette vitesse diminue. Le coefficient de frottement hydrodynamique varie entre 0,01 et 0,02.

Dans la zone de gauche de la **figure 35** ; la diminution de la vitesse conduit à une diminution de l'épaisseur du film porteur et à l'augmentation du nombre de contacts entre les aspérités. Le régime mixte commence et l'on observe que le coefficient de frottement croît très rapidement avec la diminution de la vitesse de glissement. La valeur maximale du coefficient de frottement mixte est obtenue pour une vitesse de glissement d'environ $0,1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Après le régime mixte, il existe un troisième à savoir le régime limite, caractérisé par la quasi-indépendance du frottement vis-à-vis de la vitesse de glissement. Mais les conditions expérimentales choisies ne permettent pas d'atteindre ce régime. La **figure 36** ci-dessous présente les courbes de Stribeck des quatre situations testées : utilisation des deux matériaux de frotteur couplée à la présence ou non d'abrasifs dans l'huile.

Les conditions communes à ces essais sont les suivantes :

- * La pression moyenne de contact est de 6.5 MPa ,
- * $\theta_1 = \theta_{\text{ambiante}}$, $\theta_2 = 75\text{ }^\circ\text{C}$
- * Lubrifiant : huile Neutral Solvent NS100,
- * Particules abrasives : sable tamisé dont les dimensions sont $\leq 50\text{ }\mu\text{m}$
- * Pistes (disques) en Acier : 100 Cr 6
- * Frotteurs (pions) en bronze :
 - ◆ CuSn,
 - ◆ CuSnPb.

La **figure 36** ; montre que les deux matériaux constituant les pions se comportent sensiblement de la même façon en l'absence d'introduction d'éléments abrasifs. Par contre, la présence d'abrasifs induit des comportements différents pour les deux matériaux. L'addition du plomb (qui est un élément favorisant une bonne tenue au frottement), provoque une légère augmentation de la valeur du coefficient de frottement pour les vitesses de glissement supérieures à 1,5 m/s.

L'effet le plus spectaculaire est obtenu avec le bronze sans plomb. La présence d'abrasifs, pour ce matériau engendre une réduction spectaculaire du coefficient de frottement sur pratiquement l'ensemble du domaine de vitesse de glissement exploré.

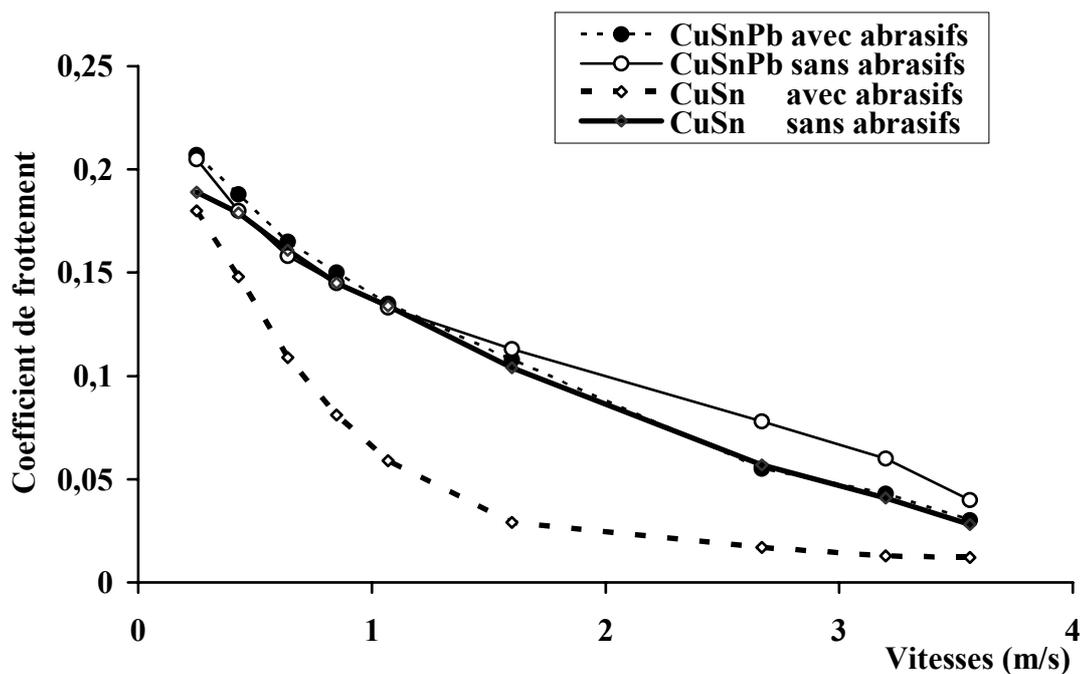


Figure 36 : Courbes de Stribeck obtenues lors des essais à vitesse variable.

La **figure 37** (page suivante), montre les valeurs d'usure mesurées sur les pions à l'issue des essais à vitesse variables.

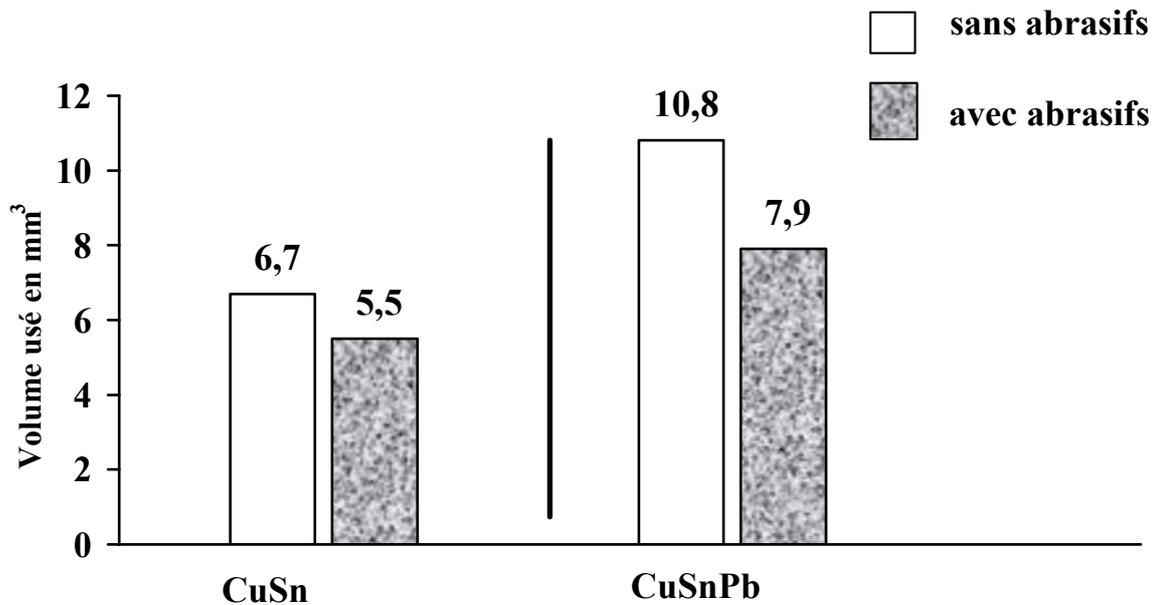
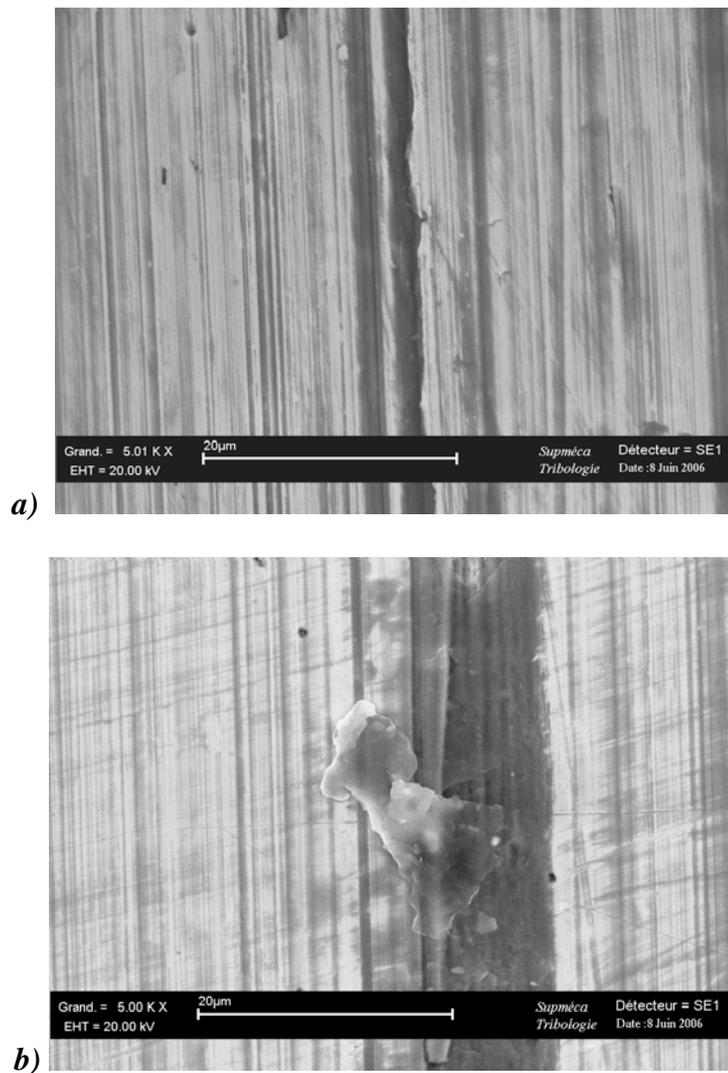


Figure 37 : Perte de masse mesurée lors des essais à vitesse variable.

Sans abrasif, nous retrouvons fort logiquement une usure plus importante sur le bronze au plomb en comparaison avec son homologue sans plomb. Ce résultat est cohérent avec les données bibliographiques et s'explique par l'adoucissement induit par les nodules de plomb. Le bronze au plomb est depuis fort longtemps catalogué comme un matériau ayant un meilleur comportement tribologique, pour les paliers, que le bronze classique [159].

La plus forte usure que nous obtenons (**figures 38**) ; n'est pas contradictoire avec ce point, car le principal avantage du bronze au plomb se situe avec des pressions plus élevées et/ou lors de vitesses plus faibles, pour lesquelles, il permet de repousser le seuil de grippage. Les conditions expérimentales que nous avons retenues ne nous ont pas permis d'identifier ce type de différence entre les deux matériaux car aucun n'a conduit au grippage.



Figures 38: Aspect des surfaces frottantes des pions après essais à vitesse variable :
a) sans abrasifs, b) avec abrasifs

L'incorporation d'abrasif au lubrifiant induit ici encore des résultats contrastés sur les deux matériaux testés. Le frotteur en bronze sans plomb est relativement insensible à l'addition d'abrasif ce qui constitue une relative surprise car nous pouvions être en mesure d'attendre une usure plus importante en présence d'abrasif.

Un résultat encore surprenant est obtenu avec le frotteur en bronze au plomb. En effet, nous constatons un niveau d'usure nettement plus faible en présence d'huile additionnée d'abrasif. Un tel comportement n'a pas été évoqué dans la bibliographie et pour tenter de l'expliquer, nous avons procédé à des essais classiques à vitesses constantes qui facilitent l'analyse tribologique en raison de paramètres de contact (vitesse, charge,...) constants tout au long de l'essai.

IV. Analyse des essais à vitesse constante :

Pour étudier l'usure des pions, et principalement son interaction avec la présence d'abrasifs dans le lubrifiant, nous avons réalisé des essais avec une vitesse de glissement constante (0,65 et 1,0 m/s) (**figure 39**), et mesuré l'usure correspondante (**figure 40**). Et, à partir de ce type d'essai nous pouvons voir et analyser l'évolution de la morphologie de surfaces ainsi que sa microgéométrie lors du frottement lubrifié en présence d'abrasifs.

La proportionnalité du volume d'usure et de la longueur de glissement et de la force normale est traduite par la formulation classique de la **loi d'Archard** [37].

$$\text{vu que } A = \frac{N}{H_v} \quad \text{donc } \frac{v}{d} = \frac{K \cdot N}{3 \cdot H_v} \quad \text{et finalement } v = \frac{K}{3 \cdot H_v} \cdot N \cdot d$$

où :

d : longueur de glissement (distance parcourue) ;

N : charge normale ;

H_v : dureté Vickers,

A : aire de contact ;

v : volume usé,

K : peut être interpréter comme la probabilité que chaque événement donné produise une particule d'usure, ou encore la proportion des contacts qui participent à l'usure. Cette constante adimensionnelle résume en fait l'influence de tous les paramètres non pris en compte par ailleurs (géométrie des abrasifs, cinématique, etc...). La constante K introduite à ce stade traduit le fait que toutes les aspérités ne donnent pas systématiquement une particule d'usure au cours du frottement.

Cette loi nous montre également que l'usure est indépendante de l'aire apparente de contact, mais proportionnelle à l'aire réelle de contact. Si cette aire de contact est formée par des déformations plastiques, l'usure est inversement proportionnelle à la dureté et l'aire réelle de contact est proportionnelle à la force normale. Cette loi s'applique

dans bien des domaines, la difficulté résidant dans le choix d'une valeur de K appropriée. La prédiction de l'usure d'un système donné passera en effet par une évaluation de cette constante de vitesse d'usure K . De nombreux travaux sont en effet consacrés à cette prédiction.

L'usure, pour ce type d'essai, est quantifiée par la vitesse d'usure k_u (en mm^3/Nm), définie par le quotient du volume usé v (en mm^3) par la force normale N (en N) et la distance d parcourue lors de l'essai (en m) :

$$k_u = \frac{v}{d N}$$

Hors utilisation des abrasifs, on retrouve que la notion de vitesse d'usure a un sens car la valeur est relativement voisine pour les essais à 0,65 et 1m/s, pour le bronze et le bronze au plomb. Par ailleurs, on trouve des vitesses d'usure plus importantes avec le bronze au plomb.

Le bronze (CuSn), semble réagir d'une façon relativement logique lorsque l'on ajoute des particules abrasives. En effet, nous observons sur la (**figure 40**) une augmentation ou une stabilité de l'usure lorsqu'il y a ajout de polluants au lubrifiant. L'augmentation de l'usure est observée principalement à basse vitesse de glissement (0,65 m/s) tandis que l'on constate une quasi stabilité de l'usure à plus haute vitesse (1 m/s). Le bronze au plomb (CuSnPb) réagit différemment à l'addition de particules abrasives. A petite vitesse de glissement, l'introduction des particules abrasives provoque une augmentation de la perte de masse. Un résultat très surprenant obtenu à la vitesse de 1 m/s, car l'usure est plus faible en présence de particules abrasives.

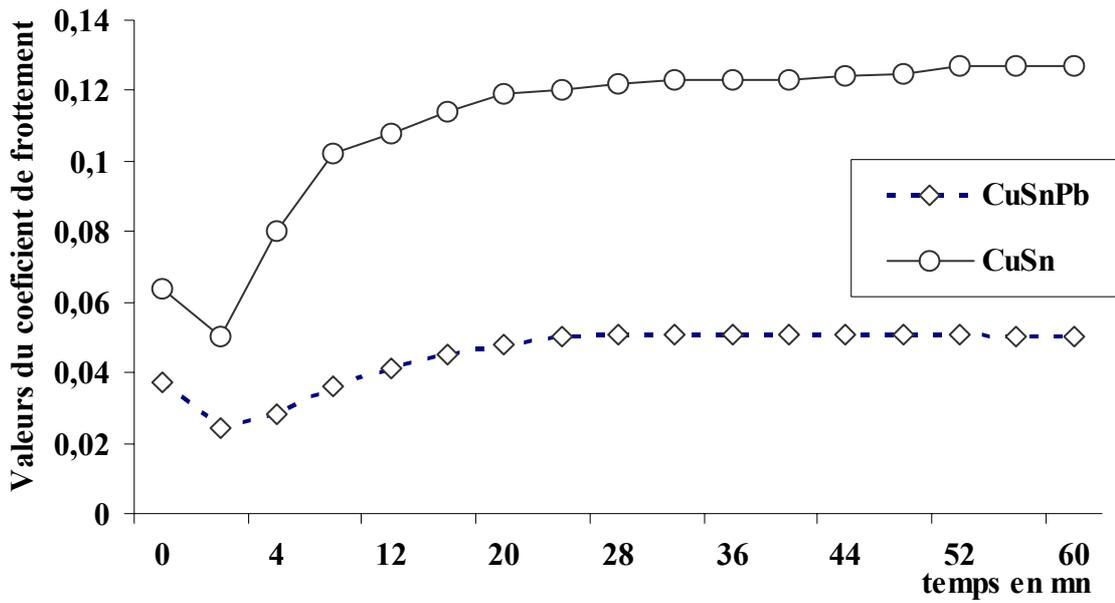


Figure 39: Valeurs des coefficients de frottement obtenues au cours des essais à vitesse constante pour les deux types de bronzes,

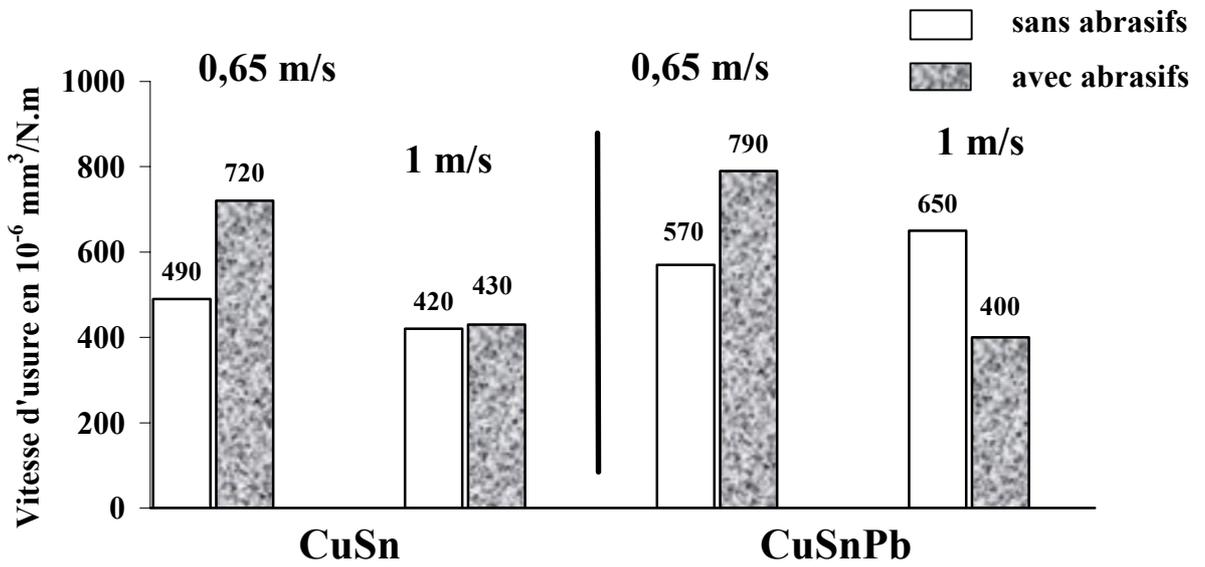


Figure 40 : Usure lors des essais à vitesses constantes (0,65 et 1,0 m/s).

V. Discussions et Interprétations :

Les essais réalisés révèlent, dans certaines circonstances une réduction de l'usure en présence de lubrifiant avec des particules. Un tel comportement peut être attribué à deux effets distincts : la présence d'un effet hydrodynamique, ou la modification superficielle des matériaux induite par les actions de contact :

- En présence du régime de lubrification mixte, le coefficient d'usure n'est pas constant. A partir d'une valeur très faible pour la partie proche de la lubrification complète, il augmente régulièrement au fur et à mesure que l'on se rapproche de la lubrification limite [152], [153]. Ainsi, tout moyen permettant d'augmenter la fraction de portance fluide peut conduire à une réduction de l'usure. Dans le cas présent, les pollutions peuvent modifier la microgéométrie des surfaces. Une éventuelle réduction de la microgéométrie décale la courbe de Stribeck vers la gauche ce qui augmente la portance fluide à une vitesse donnée.

- Il est maintenant admis que les matériaux dans la zone de contact peuvent être de nature relativement différente de celle existant à cœur. Ces différences peuvent être induites par les conditions d'usinage (écrouissage en surface), de stockage (film d'oxydation ou/et d'adsorption) [142], mais également par les phases de contact, on parle alors de Transformations Induites par le contact [143].

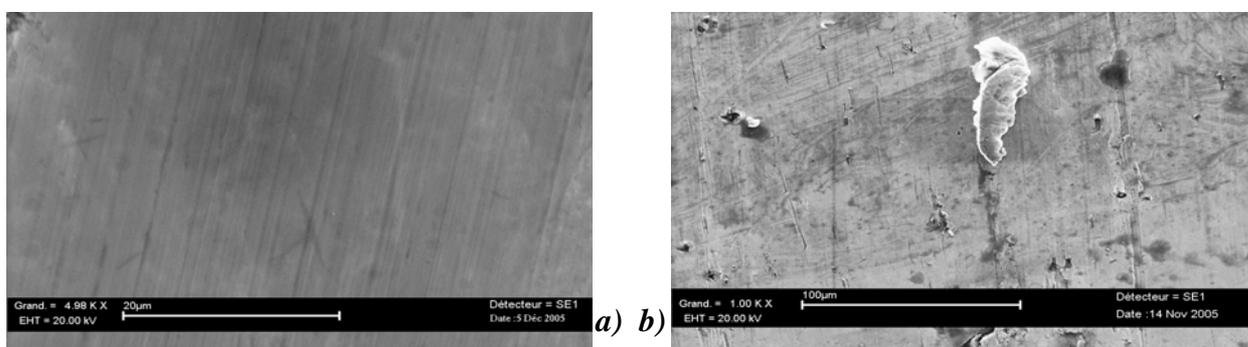
Ces deux effets distincts vont être détaillés successivement en analysant les comportements obtenus avec les deux types de matériaux étudiés. Le bronze (CuSn) semble réagir d'une façon logique point de vue usure lorsque les particules abrasives sont en mélange dans le fluide lubrifiant. C'est-à-dire que l'on observe l'effet des particules abrasives sur le comportement tribologique de ce type de bronze et surtout aux basses vitesses où l'usure a pratiquement diminuer de moitié. Pour ce type de matériau, on obtient une augmentation de la perte de masse (usure) quelle que soit la vitesse d'essai en milieu lubrifié et pollué contrairement au cas d'utilisation d'une huile neuve sans abrasifs.

Alors que dans le cas du bronze au plomb (CuSnPb), les frotteurs réagissent différemment vis-à-vis des particules abrasives en fonction de la valeur de la vitesse de glissement. Aux faibles vitesses d'essai, l'introduction des particules abrasives provoque une augmentation de l'usure, mais cette dernière diminue avec l'augmentation de la vitesse d'essai.

5.1. Cas du Bronze au Plomb :

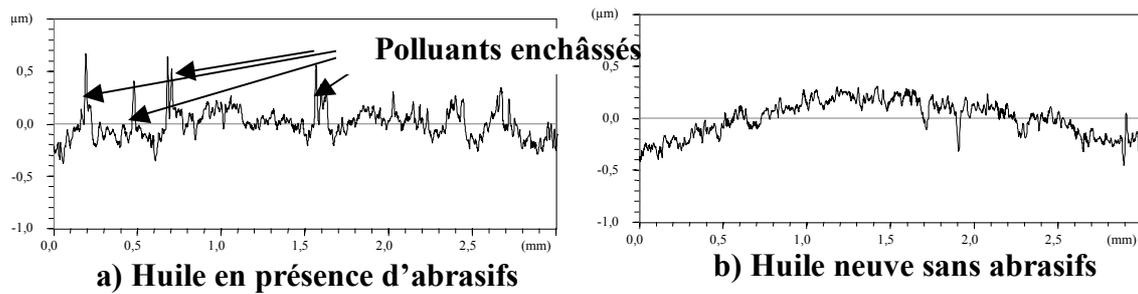
Pour ce matériau, la situation est relativement idéale car les résultats obtenus lors des essais à vitesse variable montrent clairement que la présence des particules dans le lubrifiant ne modifie pas le frottement. Ainsi, le premier effet décrit précédemment (diminution de l'usure par effet hydrodynamique) semble peu significatif.

L'examen des surfaces frottantes amène une information intéressante. En effet, elle révèle, lors de l'utilisation d'une huile polluée, l'apparition d'incrustations de particules sur les surfaces frottantes des pions (**figures 41 et 43**). L'analyse par dispersion d'énergie sur Microscope Electronique à Balayage (MEB) (EDAX), réalisée au sein du laboratoire de tribologie de l'I.S.M.E.P, (**figures 43**) a confirmé que ces particules incrustées correspondaient bien au polluant ajouté à l'huile mais nous pouvons aisément remarquer sur cette figure que ces particules ont des dimensions relativement faibles par rapport aux dimensions moyennes de pollutions (**figure 27**).



**Figure 41: Surface frottante des pions en bronze au plomb après essais :
a) sans abrasifs, b) avec abrasifs**

En fait, une analyse systématique des surfaces frottantes a confirmé cette faible taille des particules incrustées qui selon nous est à l'origine de la diminution d'usure. La réduction d'usure peut provenir, soit d'un durcissement, soit d'une portance privilégiée sur ces particules, surtout si elles sont légèrement en surépaisseur comme cela semble, quelquefois, être le cas sur les enregistrements profilométriques réalisés sur les pions après essais (figures 42).

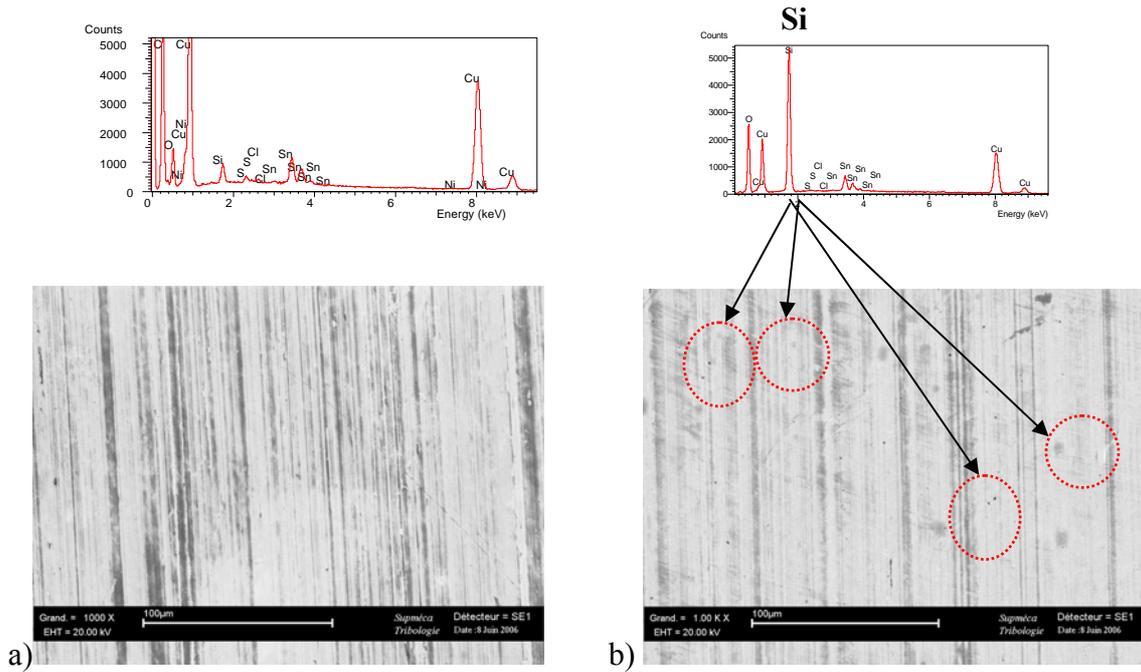


Figures 42 : Enregistrements profilométriques obtenus sur les pions en bronze au plomb après essai à 1 m/s

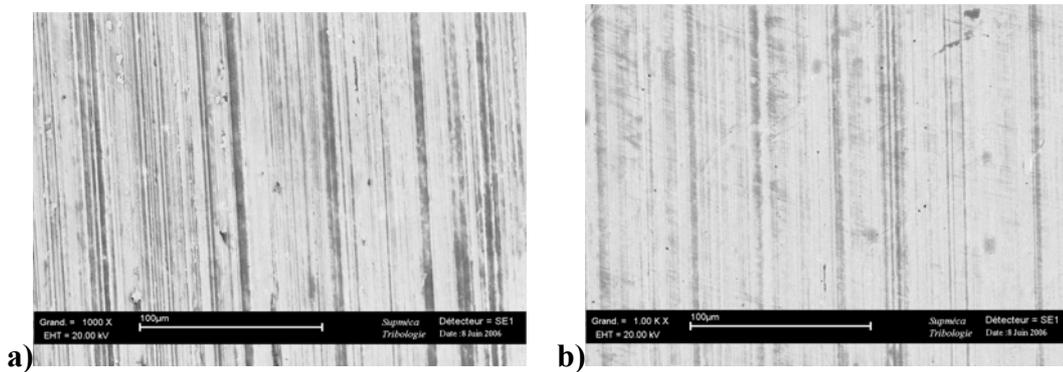
Ce phénomène existe également lors des essais de frottement réalisés à vitesse variables par palier (voir Chapitre précédent) comme le prouve la figure 13 qui montre parfaitement un réseau de fine particules, (**figures 43**), de pollution incrustées à la surface du frotteur ayant travaillé en huile polluée. Ces particules sont probablement à l'origine de la plus faible usure mesurée en présence de polluant (**figures 44**).

L'incrustation de plus grosses particules se retrouve en bord de contact et fort logiquement à l'entrée du contact (**figures 45**).

L'usure résultante est donc la compétition entre l'effet favorable lié au durcissement du matériau et l'effet défavorable induit par le comportement abrasif des polluants. Il est fondamental de noter que le résultat de ces deux tendances dépend grandement des conditions de contact. A 1m/s, l'effet favorable l'emporte car l'usure baisse avec l'ajout de polluant. Par contre, à 0,65m/s, la tendance s'inverse car l'usure augmente en présence d'huile avec polluants.



**Figures 43 : Aspect des surfaces frottantes des pions après essais à vitesse variables :
a) sans abrasifs, b) avec abrasifs**



**Figure 44 : Aspect des surfaces frottantes des pions après essais à vitesses variables :
a) sans abrasifs, b) avec abrasifs**

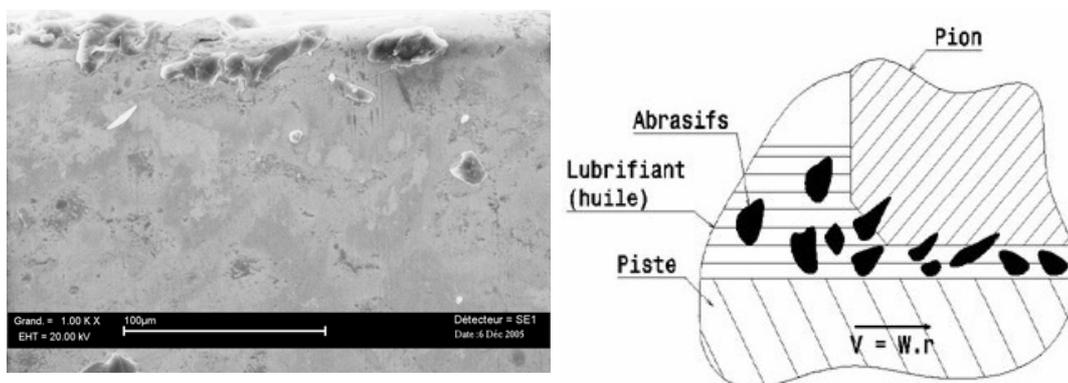
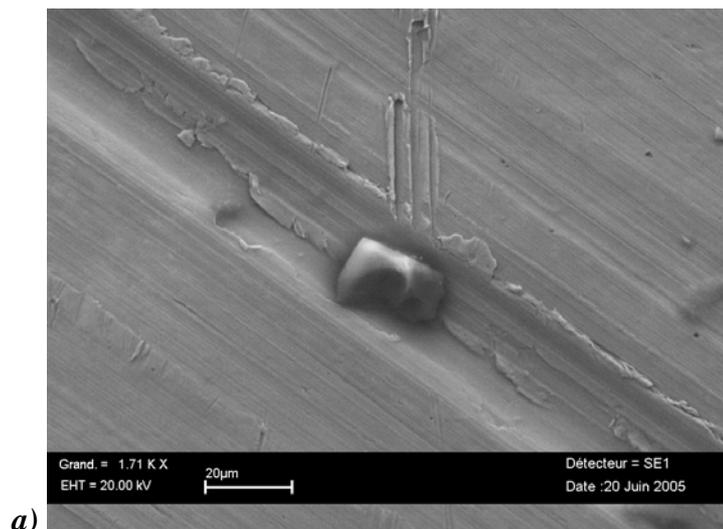


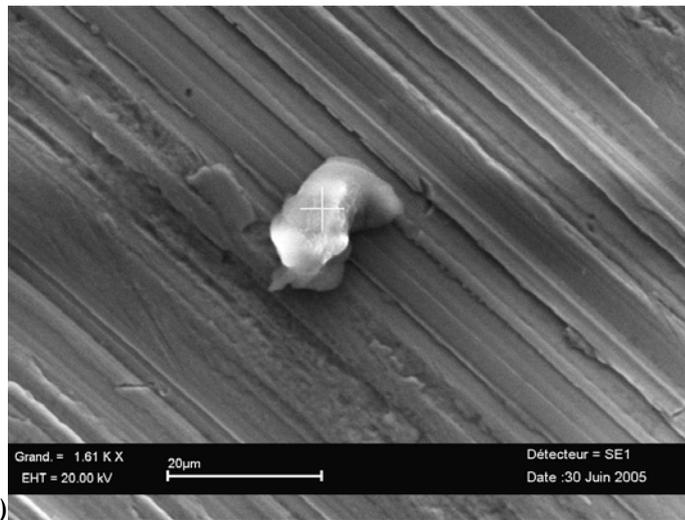
Figure 45 : Incrustations des particules sur le pion à l'entrée du contact

5.2. Cas du Bronze sans plomb:

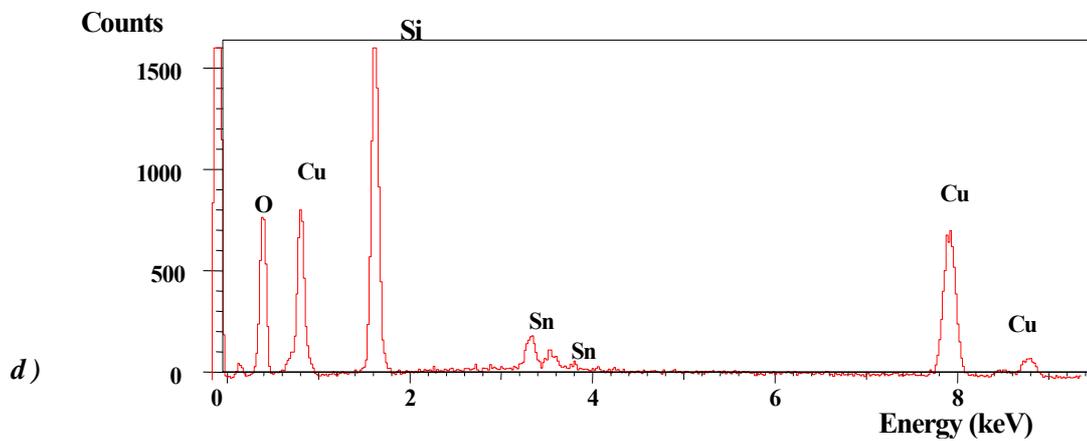
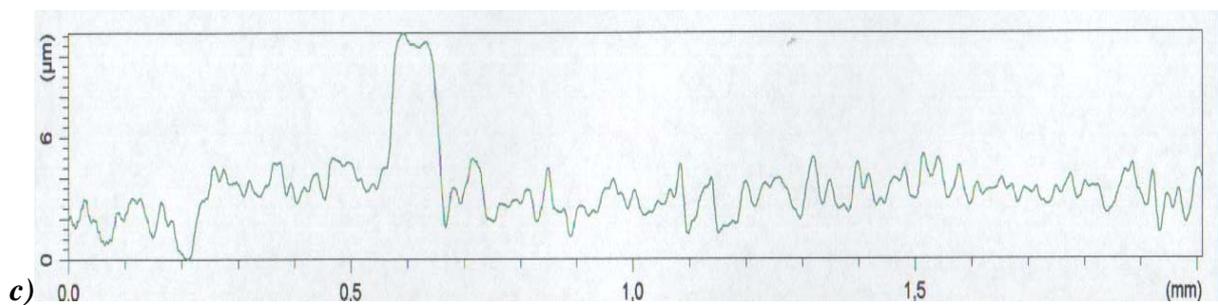
Ce qui vient d'être précisé pour le Bronze au Plomb est valable pour l'alliage sans plomb. De plus, en présence des pollutions dans l'huile, ce matériau présente une courbe de Stribeck très nettement décalée par rapport à celle obtenue avec une huile neuve. En présence d'abrasif, ce matériau génère donc, à conditions équivalentes, une portance hydrodynamique renforcée qui apporte un effet de réduction du frottement et de l'usure.

Malgré la présence d'un effet favorable complémentaire, il est important de noter que, au final, le matériau Bronze ne se comporte pas de manière significativement bien meilleure que Bronze au Plomb. Au lieu d'observer une diminution d'usure en présence des pollutions (cas du Bronze au Plomb à 1m/s), nous observons tout au plus, pour la même condition de vitesse, une relative stabilité de la valeur de l'usure. Nous pouvons donc conclure, pour ce matériau et en comparaison au bronze au plomb, à une moins bonne aptitude à l'amélioration de la résistance à l'usure par incrustation de particules polluantes (**figures 46**), ce qui n'est pas contredit par les observations des surfaces frottantes. Ce point est vraisemblablement lié à la plus forte dureté du bronze sans plomb.





b)



Figures 46: Analyses de la surface d'un pion en bronze après essai d'usure à 1 m/s, en présence de particules abrasives :

*a et b) microphotographies de la surface du pion montrant l'incrustation de particules,
c) Profil microgéométrique de la surface du pion obtenu par le Surfscan,
d) Spectre obtenu par l'analyse sur le M.E.B.*

VI. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la rugosité :

Une campagne d'essais sur tribomètre a été réalisée pour caractériser l'influence de la rugosité de la surface sur le comportement d'un couple tribologique, bronze / acier, sous différentes conditions expérimentales. Ces essais permettent également d'obtenir la variation du paramètre hydrodynamique en fonction du coefficient de frottement pour deux états de surface initiaux. Cela nous permettra de déterminer les différents régimes de lubrification et d'évaluer, en condition de frottement lubrifié en présence d'abrasifs, les transformations subies par la surface suite aux efforts mécaniques appliqués.

Cette première campagne d'essais a permis de mettre en évidence les problèmes relatifs aux choix et à l'optimisation des conditions à tester. Après l'obtention de l'état de surface souhaité, les pions sont démontés, pour évaluer la perte de masse engendrée par cette opération. Le nombre d'essais réalisés est suffisant pour confirmer la reproductibilité des résultats dans les différentes conditions testées.

Ce modèle expérimental est appliqué au contact entre des surfaces soumises à des faibles pressions. Dans ces conditions, le frottement est gouverné par l'écoulement du lubrifiant dans les micros canaux à la surface des aspérités.

Les résultats sont tout d'abord analysés en fonction de l'état de surface initial des frotteurs (papier abrasif 400 ou 1200). La (**figure 36**) représente, pour des frotteurs en bronze, l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement pour deux conditions de pressions 6,5 MPa. On observe que le coefficient de frottement suit l'allure des courbes type de **Stribeck** : le coefficient est élevé pour les vitesses les plus basses et diminue peu à peu avec l'augmentation de la vitesse. Les courbes correspondant aux vitesses croissantes présentent toujours un coefficient de frottement inférieur à ceux correspondant aux vitesses décroissantes, (**figure 35**). Ceci est dû à une adaptation des surfaces en contact pendant l'essai. Ce comportement a été confirmé pour tous les essais quelles que soient les paires de matériaux testées.

6.1. Rugosité des frotteurs après essais :

Les surfaces des pions testés ont subi un polissage et présentent parfois une topographie non uniforme. Les essais préliminaires ont permis d'obtenir des résultats plus uniformes et plus reproductibles avec l'amélioration du parallélisme entre les surfaces du pion et du disque. Après les essais de frottement avec une vitesse de glissement variable, nous avons étudié l'influence de la rugosité sur le régime mixte de lubrification en imposant une vitesse de glissement constante.

Deux valeurs de vitesse ont été sélectionnées dans le régime de lubrification mixte à partir des courbes de **Stribeck (Tableau 12)**. Pour chaque type de bronze, et un état de surface donné, nous avons étudié l'influence de ces deux vitesses de glissement pour un même temps (2340 m pour la vitesse de 0,65 m/s et 3600 m pour la vitesse de 1,0 m/s) sous une pression de 6,5 MPa, à température constante. Les valeurs de Ra avant et après essai, présentées en annexe dans les (**tableaux 3 et 4, page 192**) sont des valeurs moyennes.

Tableau 12 : Valeurs des vitesses choisies pour les essais à vitesse constante

Nature du Pion	Vitesse (m.s ⁻¹)	Ra _{av} (µm)	Ra _{ap} (µm)	Distance (m)	Temps (min.)
CuSn	0,65	0,047	0,098	2340	60
	1,0		0,067	3600	
CuSnPb	0,65	0,055	0,333	2340	
	1,0		0,229	3600	

Les (**figures 6 et 7 ; page 189 et 190 ; en annexe**) présentent, les profils des surfaces avant et après essai de frottement et d'usure et les paramètres de rugosité des pions testés (filtre 0,25, traitement normalisé ISO) sont résumés dans les (**tableaux 3 et 4 en annexe, page 192**). Les profils mettent en évidence le polissage du centre de la surface des pions. Cependant, ce polissage est peu prononcé puisque les raies du profil initial sont toujours visibles sur la surface des pions.

La (**figure 27**) présentent un pion testé dans les conditions citées dans le (**tableau 10**). L'observation par microscopie optique permet comparer les différences entre les surfaces après essai notamment au niveau de la bande polie au centre des pions. Cette bande est plus large pour les essais aux plus faibles les vitesses. Pour les pions avec les états de surface initiaux les plus fins, cette zone est plus uniforme.

6.2. Rugosité des pistes après essais :

La trace de frottement des pistes en acier est quant à elle pratiquement imperceptible (**figure 47**). On observe la présence de quelques stries mais l'analyse du profil de la surface, (**figure 48**), ne montre pas de différence notable en rapport à la surface avant essai. Les traits sont des altérations de coloration due à un échauffement. L'absence d'empreintes, (ou la timide présence de traces), était attendue vu la dureté très élevée de l'acier, des pressions de contact insuffisamment élevées et un contact lubrifié. Mais l'analyse sur le M.E.B (**figure 49**), a montré un faible transfert de matière constituant les pions sur ces disques.

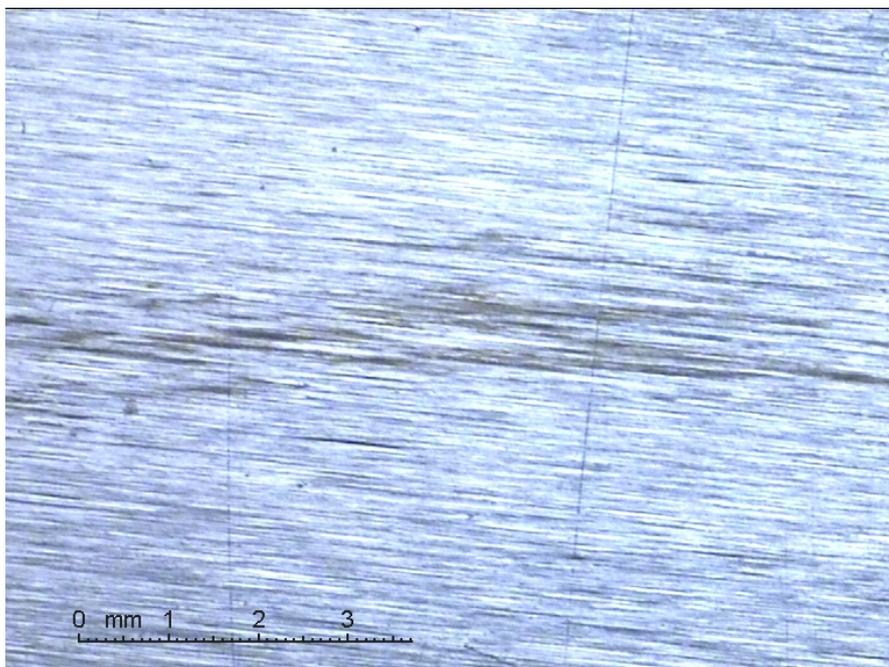


Figure 47 : Surface du disque après essai d'usure en présence d'abrasifs.

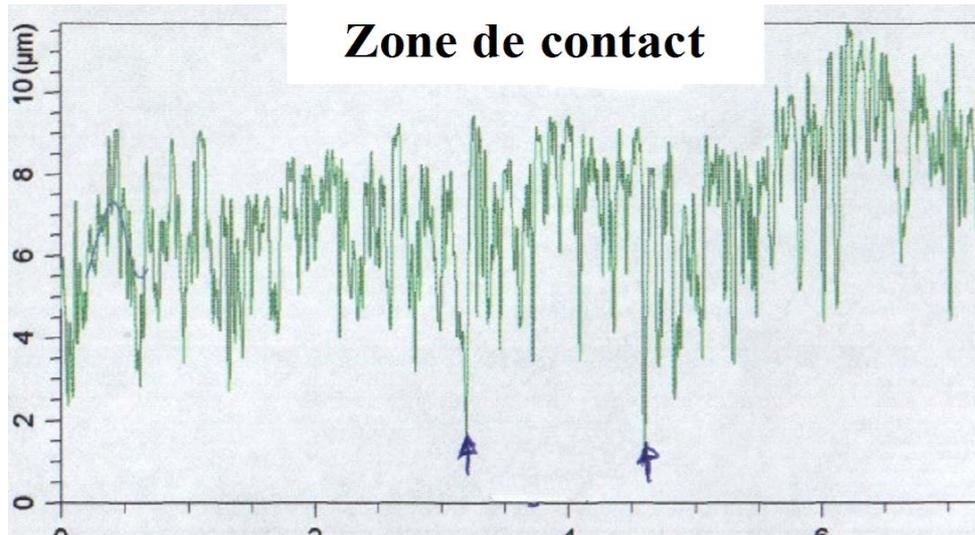
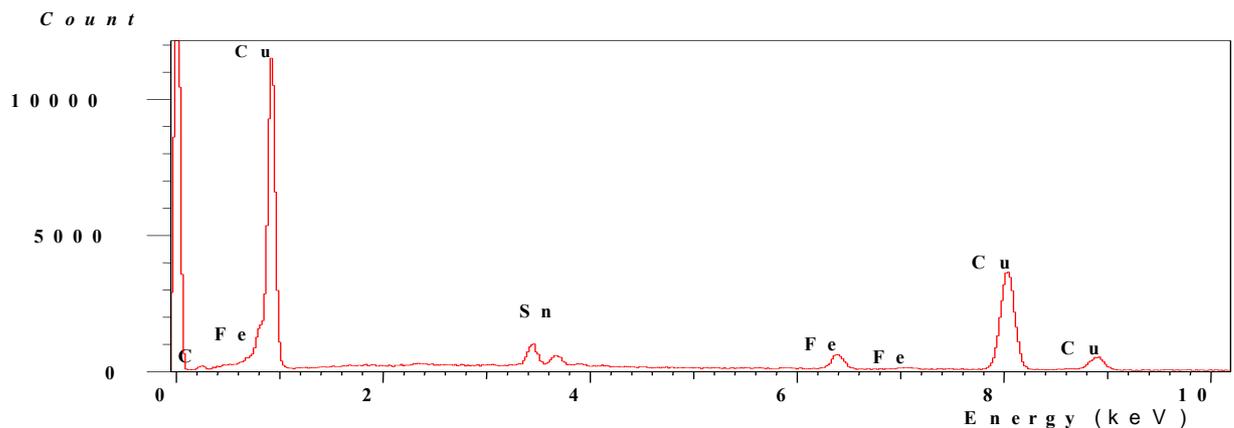


Figure 48 : Profil microgéométrique de la surface du disque obtenu après essai d'usure lubrifié en présence d'abrasifs

Figure 49 : Analyses sur M.E.B de la trace observée sur la piste 7



Cette partie de l'étude permet d'établir les remarques suivantes :

a - Avec l'état de surface initial le plus fin, l'augmentation de la pression de contact n'entraîne pas de variation significative du coefficient de frottement (0,012 à 0,016) dans l'intervalle de 1,5 à 3 m·s⁻¹. Ces valeurs correspondent au régime de lubrification hydrodynamique, dans ce cas, la pression du fluide lubrifiant est engendrée par l'écoulement à travers des micros canaux dus aux aspérités de surfaces. Le lubrifiant est une faible source de

frottement et la pression du fluide va faire diminuer la charge sur les sommets des aspérités et ainsi diminuer le frottement entre les surfaces.

b - Avec l'état de surface le plus grossier, la transition entre régime mixte et hydrodynamique n'est pas observée dans le domaine de vitesse considéré. La contribution du contact solide sur le coefficient de frottement pour les surfaces plus rugueuses est plus grande, *ce qui entraîne une prédominance du régime mixte de lubrification.*

VII. Analyses des huiles :

L'analyse des huiles est réalisée afin de nous permettre de suivre l'évolution de l'usure des pièces mobiles d'un mécanisme ou d'une machine, en observant les dimensions, la forme, la concentration et la nature des particules métalliques entraînées par l'huile. Pendant le rodage, la quantité de débris est d'abord très importante, puis elle diminue rapidement. En marche normale, l'usure douce provoque la contamination par un faible nombre de petites particules, au contraire, en cas d'usure sévère ou avant une avarie on observe de grosses particules dont le nombre croît rapidement ; leur forme varie beaucoup, plaquettes, écailles, sphérules de fatigue, microcopeaux

La dégradation des lubrifiants est essentiellement due à l'oxydation, qui augmente si la température s'élève et si le phénomène d'aération et d'évacuation de la chaleur est mauvais. La contamination est provoquée par des débris d'usure, des particules solides, de l'eau ou d'autres fluides provenant de l'extérieur ... Des analyses et contrôle de l'huile doivent être effectués en utilisant des techniques qui permettent de quantifier la quantité de débris et de déterminer leurs composition chimiques. L'analyse des huiles de lubrification et des fluides hydrauliques permet en outre d'évaluer leur degré de dégradation et d'effectuer les vidanges à bon escient, en particulier pour les huiles chargées d'additifs extrême pression consommables.

Ces techniques, classiquement utilisées pour diagnostiquer des défauts de fonctionnement des mécanismes ; permettent dans le cas de l'analyse de l'huile ; utilisée dans le cas d'une lubrification des surfaces de contact en mouvement relatif, de comprendre les processus de dégradation des matériaux. Les techniques les plus employées

sont celle de spectrométrie et ferrographie (dont le principe est expliqué en annexe **page 197 à 200**). Cette dernière est utilisée pour les échantillons qui présente les indices d'usure les plus élevés.

Le comptage des particules en suspension dans un lubrifiant permet de se faire une idée du degré de pollution du mécanisme et des performances du système de filtration. Les boues et autres impuretés qui s'accumulent dans le lubrifiant diminuent ses performances, tandis qu'un système de filtration efficace augmente sa durée de vie. Le remplacement s'impose lorsque les particules deviennent trop nombreuses.

VIII. Conclusions :

Cette étude concerne l'analyse de l'impact de polluant sur le frottement et l'usure d'un contact lubrifié. Dans ce travail, nous avons cherché à présenter, comprendre et modéliser l'effet des mécanismes du frottement sur les surfaces antagonistes. L'étude du frottement se révèle une tâche complexe mettant en jeu plusieurs phénomènes d'origine mécanique. Cependant pour les contacts lubrifiés avec un film d'huile, en des situations critiques (rodage, présence de polluants abrasifs, surcharges occasionnelles,...), le contact peut surgir aux sommets des aspérités en contact et la charge est supportée d'une part par le film lubrifiant et d'autre part par le solide.

Dans ces régimes de lubrifications mixte ou limite où les films sont discontinus, nous avons entrepris de caractériser quelques couples d'alliages métalliques en contact glissant en environnement abrasif lubrifié afin de déterminer l'évolution des propriétés tribologiques du couple de matériaux et en particulier les surfaces de contact. Le polluant utilisé est du sable tamisé, provenant du Sahara algérien, de faible granulométrie (représentatif de la fraction traversant le système de filtrage d'un moteur à explosion) et nous avons privilégié le régime de lubrification mixte en utilisant un tribomètre pion - disque avec un contact de type plan sur plan. Les essais à vitesse constante ont confirmé les valeurs du coefficient de frottement obtenues lors les essais à vitesse variable. Un minimum de deux essais répétitifs a été effectué dans des conditions identiques afin de confirmer la reproductibilité des résultats.

Les essais ont été réalisés sur un tribomètre pion / disque et nous avons révélé quelques difficultés initiales au niveau de la planéité des surfaces de contact, et cela à cause de l'état de surface obtenu sur le banc d'essai même. Nous avons amélioré l'emplacement du pion sur le tribomètre de façon à obtenir une meilleure reproductibilité des résultats ainsi que l'aire de contact du pion soit toute uniforme. Pendant les essais de frottement nous ne pouvons pas observer l'évolution du profil du contact. Cela est possible de quantifier, seulement, avant et après chaque essai.

Ces essais nous ont permis d'avoir une déformation sur la surface la plus douce, à savoir les pions en bronze. Plusieurs facteurs dans le système tribologique sont responsables de cette déformation: la force tangentielle, la force normale, les propriétés du lubrifiant qui sépare les deux surfaces, l'état de surface et les propriétés mécaniques des couples de matériaux utilisés ainsi que la présence des particules abrasives. Le processus d'abrasion trois corps est dominant. Il se traduit par le roulement des particules abrasives entre le pion et la piste et par leurs indentations (incrustations) sur les bronzes, ce mouvement de roulement-indentation générant les copeaux comme le montre la **figure 50**.

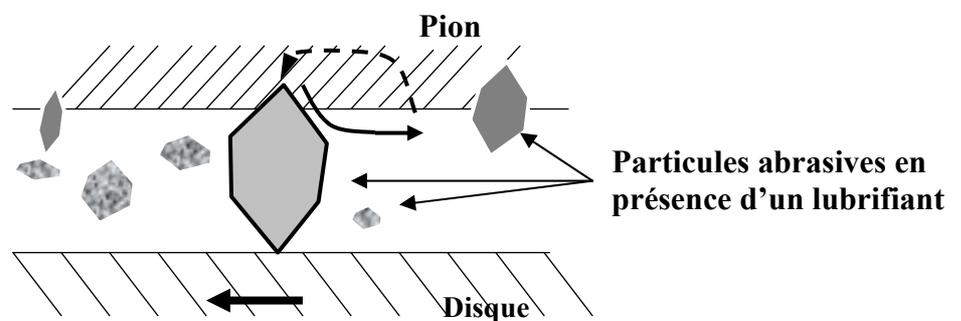


Figure 50 : formation de copeau par roulement-indentation,

Dans les premiers instants du frottement, ce sont les écrans superficiels qui subissent l'ensemble des mécanismes inhérents au frottement (effets thermiques, mécaniques ou chimiques). Ensuite, ces mécanismes se relaient ou s'interpénètrent en fonction des multiples conditions présentes. Dans le cas des métaux les conditions de frottement dans les premiers instants sont différentes de celles qui s'établissent

après une longue période de glissement. Les premiers instants du frottement, ou période de rodage, sont difficiles à reproduire d'un essai à l'autre à cause de la sensibilité aux faibles changements dans la géométrie ou la préparation de surface. Ceci justifie de la dispersion importante que l'on mesure sur les essais.

Le contact des aspérités est valable pour le début du frottement, mais les surfaces deviennent vite extrêmement lisses et présentent des rugosités relativement faibles pour des surfaces en frottement. L'évolution d'un "contact ponctuel" initial vers une surface de contact se traduit par une usure importante dans les premiers instants associée à des pressions de contact importantes que subissent les aspérités. À l'opposé, sur les essais de longues durées, les couches transférées éventuellement à la surface du disque auraient un effet protecteur et limiteraient l'endommagement par perte de côte.

Avant d'émettre des particules d'usure, la surface du pion se déforme en compression cisaillement. Cette déformation s'accumule jusqu'à un niveau critique ou seuil de déformation maximale, fonction de la température et du chargement. Nous supposons donc qu'il existe un seuil de déformation maximal au-delà duquel le cumul de déformation n'est plus possible et la rupture de la couche déformée intervient. Donc, un débris peut ensuite être émis. Ceci traduit la succession des phénomènes de déformation et d'abrasion des surfaces. Ce cycle se répète pendant toute la durée du frottement. Ce point permet d'introduire deux notions importantes : le cumul de la déformation localement et l'existence d'un cycle conduisant à l'émission de débris.

Nous pouvons dire, conformément à la théorie du frottement, que l'évolution des surfaces, dans le cas de notre concept tribologique, se décompose en trois grandes phases :

a - En partant d'un contact aspérités/aspérités, la surface du pion initialement moins dure que celle du disque, se déforme pour former une zone de contact relativement lisse, quelle que soit la température d'essai. La différence de dureté, pion/disque, dans les premiers instants étant la plus importante, cette étape, consistant au lissage des aspérités du pion doit être relativement rapide et ne nécessiter que quelques rotations du disque.

b - Une fois la surface du pion lissée, le contact devient : aspérités du disque sur surface plane du pion, et la rigidité de ces aspérités est suffisante pour empêcher leur déformation, indépendamment de la différence des propriétés mécaniques. Les efforts liés au chargement et au frottement sont donc pris en charge par la microgéométrie du pion qui s'use.

c - Le contact entre le pion et le disque se fait alors sur une plus grande surface. De plus, la surface du pion est sollicitée en permanence et doit accommoder la vitesse de glissement entre le pion et le disque. Les surfaces de contact de deux corps frottant peuvent ne pas jouer des rôles symétriques. Car, dans le cas du glissement d'un pion sur un disque : un point de la surface de contact du pion est constamment sollicité, alors qu'un point de la piste du disque ne l'est qu'au passage du pion. Les distances cinématiques sont alors différentes. L'exposition au champ de contraintes développées dans le pion et le disque ne sera pas la même, et les effets de fatigue vont être différents. Les usures du pion et du disque différeront par conséquent.

Dans certaines conditions (généralement les basses vitesses), l'usure augmente en présence des polluants en raison du caractère abrasif des particules de sable. Curieusement pour des vitesses plus importantes, l'usure est relativement stable ; elle peut même diminuer en présence d'abrasifs avec l'utilisation du bronze au plomb. Ce comportement spectaculaire est lié directement à l'incrustation de particules de sable de faibles dimensions (quelques microns de diamètre) qui contribuent à une augmentation de portance hydrodynamique. Vis à vis des abrasifs, le bronze au plomb a un meilleur comportement que son homologue sans plomb en raison de l'adoucissement créé par les modules de plomb qui favorise probablement l'incrustation quasi-complète des particules.

Nous avons observé que l'état de surface a une très forte influence sur le coefficient de frottement. Pour les surfaces les plus rugueuses, on obtient un coefficient de frottement plus grand pour une même vitesse de glissement. Ces remarques montrent la nécessité d'introduire la rugosité comme variable d'un paramètre hydrodynamique dont le coefficient de frottement dépend.

On a remarqué aussi que, quelque soit l'état de surface initial, la bande polie centrale est plus basse que les sommets des raies de l'état de surface initial. Cela est la conséquence de phénomènes mécaniques (usure et déformation plastique). La bande centrale présente encore des raies dues à l'état initial des échantillons, confirmant ainsi que nous étions bien en situation de rodage pendant l'essai. Le coefficient de frottement est plus faible pour les essais aux vitesses les plus petites. Le polissage des surfaces est plus important et la bande polie plus grande. En conséquence, les paramètres de rugosités enregistrées après les différents essais sur tribomètre ont des valeurs plus petites.

D. CONCLUSIONS GENERALES :

Dans le contexte techno-industriel actuel la durée de vie des composants mécaniques et leurs performances en service est de plus en plus associée à l'optimisation des coûts d'entretien, la sélection des matériaux, le bon choix de l'état de surface (en particulier le profil de rugosité des surfaces). Et tout cela afin de minimiser les endommagements qui surviennent souvent dans la phase initiale de contact entre deux surfaces neuves des composants mécaniques : taux d'usure élevé, adhésion, grippage,..., et d'assurer une certaine longévité et fiabilité de fonctionnement du système.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude de la microgéométrie de contact lubrifié entre deux surfaces animées d'un mouvement relatif en présence de particules abrasives. Nous avons analysé, en particulier l'évolution de la morphologie de surface ; présentant une certaine rugosité ; après des essais de frottement et d'usure dans de l'huile polluée. Cette étude intègre de multiples aspects mécaniques (contacts directs et lubrifiés, nature du régime de lubrification,..), mais également physiques ou chimiques (transformation à la surface des pièces) sans oublier le caractère non stationnaire de l'évolution de contact pendant la période initiale des essais de frottement et d'usure, c'est-à-dire le rodage, en présence des particules abrasives.

Afin de séparer ces effets, nous avons décidé de commencer d'abord par l'étude du contact lubrifié entre deux surfaces en l'absence de ces particules, abrasives, polluants l'huile de graissage et de lubrification utilisée. Nous avons fait varier la vitesse de glissement, l'état de surface initial et les matériaux en contact. Cette étude à été réalisée sur un tribomètre pion – disque, les résultats établis sous formes graphiques sont analysés au moyen des courbes de Stribeck.

Afin de pouvoir mener à bien notre recherche sur le thème : *Étude phénoménologique des surfaces antagonistes (palier lisse) dans les processus d'abrasion lubrifié*, nous avons décidé de réaliser une précampagne d'essais ; c'est-à-dire procédé à des essais préliminaires. Ces derniers sont réalisés, pour nous permettre de

connaître les altérations pendant la phase de rodage et frottement des couples d'échantillons testés, mais sans pollution extérieure du lubrifiant. Mais il faudrait bien avoir en vue qu'une pollution du bain lubrifiant existe toujours par suite d'usure des éprouvettes. Les résultats (valeurs et observations) obtenus au cours de ces essais préliminaires ont été d'un très grand soutien pour la suite de notre travail.

De ces essais, qui nous ont permis d'obtenir une méthode rationnelle et fiable d'essai de frottement et d'usure des pions (avec une bonne reproductibilité de la microgéométrie) in situ ; c'est-à-dire sur le banc d'essai même on a pu conclure que :

- le frottement et l'usure prennent de l'importance avec l'augmentation de la température du lubrifiant qui provoque la diminution des propriétés de lubrification (en particulier celle de la viscosité de l'huile),

- la perte des propriétés de l'huile par suite de son utilisation ('vieillessement') provoque un frottement élevé et une usure plus accentuée que dans le cas de l'augmentation de la température. Ceci s'explique par le cisaillement des chaînes moléculaires du lubrifiant,

- une augmentation initiale de la valeur du coefficient de frottement a été observée pour tout les essais sur le tribomètre pion / disque, qui s'explique par le phénomène d'adaptation des surfaces en contact pendant l'essai.

Avec l'introduction des particules abrasives (sable de dimension granulométrique $\leq 50 \mu\text{m}$) ; représentatives de la fraction traversant le système de filtrage d'un moteur à explosion ; dans le bain lubrifiant utilisé sur le tribomètre pion – disque, nous avons étudié et analysé leurs impacts sur le frottement et l'usure des pions de bronze sur des pistes en acier. Les valeurs enregistrées au cours des essais de frottement et d'usure sont données sous formes graphiques pour des raisons de commodité et de comparaison. Et à partir des valeurs des coefficients de frottement, on a établi des courbes de type Stribeck qui nous permettent d'établir les différents régimes de lubrification observés au cours des essais de

frottement de notre système : pion – disque – lubrifiant – particules abrasives. Et concernant les différents résultats trouvés, on peut les résumer par :

◆ L'analyse, sur le microscope électronique à balayage, des surfaces de contact des différents pions et disque, nous a permis d'ores et déjà de préciser que le processus d'usure abrasive étudié favorise largement la coupe au labourage et ce tout au long de la rayure. En effet, l'examen des profils latéraux a permis de conclure à l'inexistence d'écoulement latéral de la matière, ce qui signifie que soit la matière est refoulée en amont de l'outil jusqu'à éjection du bourrelet frontal sous la forme d'un copeau, soit la formation d'un bourrelet sur les bords de la rayure qui va disparaître peu à peu sous le passage répété des particules abrasives. Dans ces deux cas, le faciès d'usure est constitué de rayures fines parallèles à la direction de glissement.

◆ Pour les pistes en acier, l'analyse des surfaces de contact nous a permis de détecter des traces de frottement pratiquement imperceptibles. On observe la présence de quelques stries mais l'analyse du profil de la surface, ne montre pas de différence notable en rapport avec la microgéométrie de la surface de celle-ci avant essai. La timide présence de traces, était attendue vu la dureté très élevée de l'acier par rapport à son antagoniste le pion en bronze, des pressions de contact insuffisamment élevées et malgré le contact lubrifié en présence d'abrasifs.

◆ Concernant le comportement des frotteurs (pions) en bronze, on a déduit que le bronze au plomb (CuSnPb) présente une meilleure résistance à l'usure par l'incrustation des particules polluantes (grâce à la présence du plomb sous forme de nodules très tendres). Et les relevés microgéométriques des états de surfaces montrent, que le bronze au plomb (CuSnPb) tolère mieux le frottement en présence d'abrasifs que celui sans plomb (CuSn), ce qui se traduit par un frottement plus faible. D'où son utilisation remarquable dans des conditions de lubrification difficiles. Et que d'autre part on n'obtient pas de très grandes différences sur les valeurs des coefficients de frottement avec les deux microgéométries de départ obtenues in situ dans le tribomètre. Pour un frotteur donné (CuSn ou CuSnPb) les résultats nous montrent d'une part, la dégradation des états de surface après essais avec abrasifs et d'autre part des microgéométries très voisines malgré des géométries de départ très différentes.

Les résultats obtenus sur le tribomètre pion – disque nous ont permis de voir sur les courbes de Stribeck une très nette influence de plusieurs facteurs (rugosité, pression de contact, vitesse de glissement, viscosité, influence des caractéristiques mécaniques des matériaux, présence de pollutions dans le circuit du lubrifiant,...) sur le coefficient de frottement et d'usure. Et cette influence se répercute directement sur la morphologie des surfaces en contact lubrifié en présence de particules abrasives. On obtenu une grande influence sur l'usure des surfaces des pions aux faibles vitesses de glissement ce qui nous montre l'abrasivité importante des particules de sable.

E. PERSPECTIVES D'AVENIR :

Vu les résultats satisfaisants obtenus au terme de cette recherche sur le thème : *Étude phénoménologique des surfaces antagonistes (palier lisse) dans les processus d'abrasion lubrifié* et pour une meilleure finalité du travail entamé, il serait souhaitable de le poursuivre afin de l'améliorer. Et cela doit se faire sur les différentes remarques ou suggestions que nous proposons. La réduction de l'usure, dégradation surfacique souvent associée à une perte de matière non contrôlée est un enjeu clé dans le contexte actuel où la réduction des pertes énergétiques (dépenses énergétiques supplémentaires et des pertes économiques) est une préoccupation majeure. Comme une part importante de l'énergie consommée dans un système mécanique se perd par frottement, ainsi que les phénomènes parallèles ; comme l'usure, grippage, fatigue, corrosion,..., qui provoquent l'interruption de la vie ou de service des composants mécaniques par la ruine totale ou pour la destruction de son état superficiel ; aggravés par la présence de pollutions très abrasives contenues dans l'atmosphère. Et ceci dans un souhait de minimiser les coûts d'entretien et augmenter la durée de vie des composants mécaniques avec un service fiable et de bonne qualité.

■ Dans notre étude, nous avons privilégié l'emploi de l'huile **Neutral Solvent NS 100**, ayant des propriétés lubrifiantes similaires à celles de l'huile (chiffa SAE 40) utilisée dans les moteurs, sur les chantiers de forage au Sahara Algérien. Ce choix, d'utilisation comme lubrifiant une huile sans additifs, est argumenté par la nécessité de l'étude basée sur l'influence mécanique. D'où il serait préférable de poursuivre cette étude afin de connaître les modifications engendrées par la présence d'additifs.

■ Ce travail présente des perspectives à mettre en œuvre en vue d'aboutir à une modélisation plus complète du comportement des matériaux des composants mécaniques en service dans de sévères conditions. L'étude des huiles actives doit nous apporter une meilleure connaissance des phénomènes d'adsorption surtout qu'elle est effectivement importante pour un environ lubrifié en présence d'abrasifs afin de déterminer l'évolution des propriétés tribologiques du couple de matériaux.

■ Amélioration de l'efficacité d'étanchéité d'une part, au niveau des différentes parties où l'on dispose de joints et du système de filtrage (filtre à air,...) d'autre part, dans le souci d'éliminer les particules abrasives du circuit de la lubrification.

■ Nos essais, ayant donné les résultats intéressants et cohérents ont été réalisés sur le tribomètre pion / disque du Laboratoire de Tribologie de l'Institut Supérieur de Mécanique de Paris. Et sur ce banc d'essai, nous avons employé comme surface de contact un plan et dont la situation tribologique correspond au cas des paliers lisses où le contact est obtenu sur une faible portion du palier. Afin d'avoir des résultats plus "pointues", c'est à dire reflétant exactement la situation du palier lisse; il serait nécessaire de poursuivre cette étude par une approche réelle. Cette dernière serait par conséquent une étude statistique afin de pouvoir tenir compte de l'influence de la variation du jeu, induit par l'intervalle de tolérance de fabrication, d'ajustement et de positionnement, sur le comportement tribologique d'un couple de matériau constituant les paliers lisses. Nous n'avons pas pu faire cette étude à cause d'un nombre élevé de couple de matériaux que l'on devrait tester ; et qui doit représenter un apport financier conséquent. Actuellement, dans un souci de bien faire, on est à la recherche d'un industriel (privé ou étatique), qui prendrait en charge financièrement la suite de ce travail de recherche que nous avons ébauché.

■ De façon à prévenir une transition brutale dans le régime de lubrification pendant le contact en général et pendant la période de rodage en particulier, l'étude de l'amélioration que peut apporter l'addition d'un acide gras dans le lubrifiant de base est nécessaire. Ces essais sont importants pour caractériser les surfaces après essai du point de vue mécanique et métallurgique de façon à déterminer quel couple présente le meilleur comportement en frottement dans les conditions appliquées. L'acide gras est un additif tensioactif qui engendre la formation d'une couche protectrice sur les surfaces actives par un phénomène d'adsorption chimique. Cette couche formée par les épilâmes empêche les aspérités des surfaces d'entrer en contact, produisant des conditions favorables à l'augmentation de la durée de vie des équipements et composants mécaniques.

F. ANNEXES

I. Dispositifs expérimentaux :

1.1. Tribomètre pion - disque :

Le principe de fonctionnement du tribomètre (**figure 1**) consiste à mettre en contact deux surfaces : un pion (2) stationnaire et un disque (1) mobile (mouvement rotatif continu). Le pion allié à un bras de charge équilibré (3) avec une double articulation (liaison rotule) est appuyé sur la surface mobile du disque. Le disque est monté sur une broche (5). La mesure, avec une grande précision, de la vitesse de rotation du disque se fait au niveau de la broche par un tachymètre électronique à capteur inductif. La plage de vitesse est obtenue à l'aide d'un groupe de motorisation. Le moteur à courant continu nous permet d'obtenir des vitesses linéaires de glissement comprises entre 0,1 et 3,5 m·s⁻¹ (**tableau 1**).

Contact	Surfacique : plan / plan
Mouvement	Circulaire, continu
Vitesse	Variable de 0,1 et 3,5 m·s ⁻¹
Charge	Constante pour chaque essai
Ambiance	Liquide, -30°C à +120°C
Mesures (en continue)	Force de frottement Vitesse de glissement Température

Tableau 1 : Caractéristiques du tribomètre utilisé dans l'étude

Le bras articulé applique sur le disque un effort constant et connu. La force tangentielle de frottement est mesurée par un capteur de force extensométrique choisi en accord avec la force appliquée (4). Le signal issu du capteur de force est amplifié et envoyé sur une table traçante qui permet l'enregistrement de la variation du coefficient de frottement. La force normale est appliquée par des masses, étalonnées, marquées suspendues à l'extrémité du bras articulé.

Le pion et le disque sont totalement immergés dans l'huile d'étude contenue dans une cuve thermostatée en inox à double paroi (6) dans laquelle circule

en continu un fluide caloporteur (huile silicone). Cela permet de maintenir le lubrifiant à une température moyenne constante, étant entendu que la température du lubrifiant au contact est beaucoup plus élevée et dépend du régime de lubrification. La température du lubrifiant au contact peut varier d'une dizaine de degrés en régime limite. En régime hydrodynamique, l'élévation de température peut être considérée comme négligeable. Le cryothermostat auquel la cuve thermostatée, contenant 400 ml de lubrifiant, est reliée permet des températures de travail de -30°C à $+120^{\circ}\text{C}$. Le contact entre le pion et le disque est du type plan-plan. La force normale, la température du lubrifiant et la vitesse de rotation sont réglées en fonction des conditions expérimentales requises. Les principales caractéristiques du tribomètre utilisé dans cette étude sont présentées dans le tableau 1.



Figure 1: Photographie du banc d'essai : Pion / Disque

1.1.1. Précision du mécanisme du tribomètre :

Il est intéressant de faire une description de l'analyse mécanique du bras de charge équilibré (**figure 2**), du tribomètre. Ce bras de charge, doublement articulé, a deux fonctions : application de l'effort normal par un mouvement de rotation au tour de l'axe x et mesure de l'effort de frottement (tangential) à l'aide d'un capteur situé à l'extrémité du bras, par un mouvement de rotation au tour de l'axe z. La (**figure 2**), montre une schématisation des efforts et des couples résultant des liaisons appliquées au bras en O.

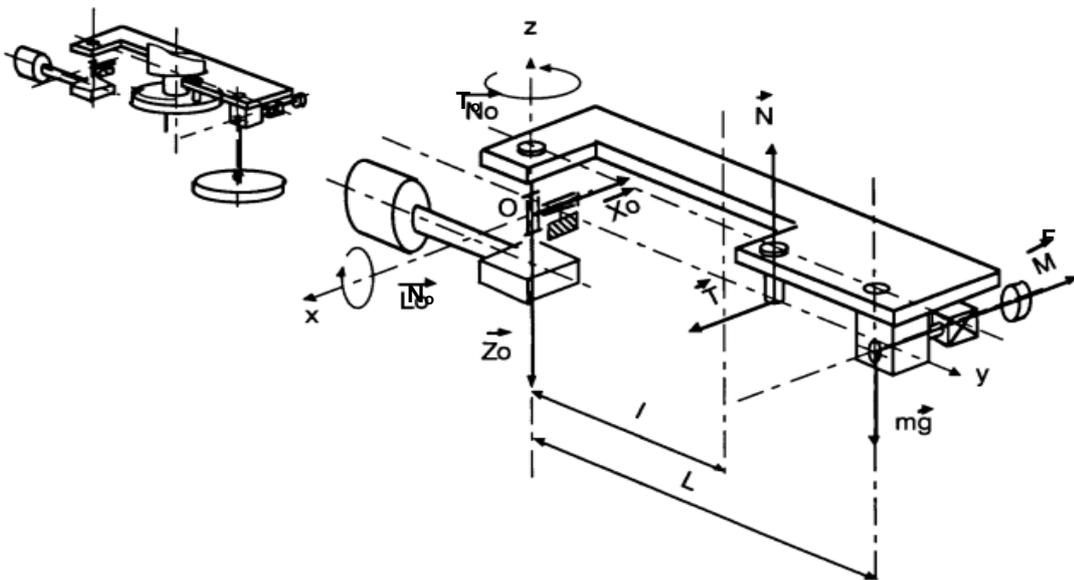


Figure 2 : Forces et moments appliqués au bras articulé.

L'application du principe fondamental de la dynamique donne les quatre équations suivantes qui représentent l'équilibre des efforts sur x, des efforts sur z, du moment en O sur x et du moment en O sur z respectivement :

$$X_o - T + F = 0 \quad (2)$$

$$Z_o + N - mg = 0 \quad (3)$$

$$N_o + Nl - mgL = 0 \quad (4)$$

$$T_o + Tl - FL = 0 \quad (5)$$

La réécriture des équations (4) et (5) donne les relations suivantes :

$$N = \frac{mgL}{l} - \frac{N_o}{l} \quad (6)$$

$$T = \frac{FL}{l} - \frac{T_o}{l} \quad (7)$$

La force normale est donc connue à partir des valeurs des longueurs $L = 0,580$ mm et $l = 0,353$ mm soit :

$$N = 1,643mg - \frac{N_o}{0,353} \quad (8)$$

La précision de mesure du coefficient de frottement sur cet appareillage a été calculée pour la première fois par **Ghaem [141]**. Les hypothèses utilisées sont les suivantes :

1.1.1.1. Calcul du coefficient de frottement :

L'équation du coefficient de frottement est donnée par :

$$\mu = \frac{T}{N} \Leftrightarrow \mu = \frac{F}{mg} \left[\frac{\left(1 - \frac{T_o}{FL}\right)}{\left(1 - \frac{N_o}{mgL}\right)} \right] \quad (9)$$

Le coefficient de frottement s'écrit, en première approximation, en ne tenant compte que du premier terme de l'équation (9). L'erreur de la mesure dépend donc du deuxième terme de l'équation (9) dans lequel interviennent les couples de frottement interne des roulements, c'est à dire, N_o et T_o qui sont tous les deux du même ordre de grandeur. Les valeurs des forces N_o/L et T_o/L sont très petites devant les forces de travail. Comme en limite le coefficient de frottement sera égal à 1, le développement limité à l'ordre 1 du deuxième terme de l'équation (9) devient :

$$\mu = \frac{F}{mg} \left(1 - \frac{T_o}{FL} + \frac{N_o}{mgL} \right) \quad (10)$$

La précision s'obtient à partir de l'équation suivante:

$$\mu \frac{mg}{F} \leq \left(1 - \left| \frac{T_o}{FL} \right| + \left| \frac{N_o}{mgL} \right| \right) \quad (11)$$

La précision de mesure pour un coefficient de frottement de l'ordre de 1/100 (régime hydrodynamique) est d'environ 6,0 % mais par contre pour un coefficient de frottement supérieur à 0.15 ; l'erreur est inférieure à 0,3%.

1.1.1.2. Erreur due à la conception de l'appareillage :

L'erreur due à la conception de l'appareillage et de la mesure est au maximum de l'ordre de 6% dans le cas le plus défavorable, selon [141], ce qui est une valeur très acceptable pour notre étude.

1.1.1.3. Erreur de lecture sur F :

La valeur sur la table traçante présente une certaine dispersion due à la grosseur du trait de stylo. On considère $f = F / mg$; la force lue sur la table traçante vaut $F = T c / s$ avec T la force exercée pour obtenir une déviation de « s » subdivisions c'est-à-dire de 100 mm +/- 1 mm et « c » le nombre de subdivisions dues à l'application de la force F. T est pris égal à mg/10. L'erreur de la lecture de F s'écrit : $\Delta F / F = \Delta T / T + \Delta c / c + \Delta s / s$. L'erreur de $(\Delta T / T)$ est inférieure à 1 %. Les erreurs de lecture sont $\Delta c = \Delta s = 0,5$ mm. La valeur c est comprise entre 10 mm et 200 mm ce qui conduit à une erreur maximale de 5 % sur $\Delta c / c$. L'erreur de lecture sur F est alors inférieure à 6 %.

L'erreur maximale totale sera la somme de toutes les erreurs. Elle est de l'ordre de 10 à 12 % sur la mesure du coefficient de frottement dans les cas les plus défavorables.

1.1.1.4. Capteur de Force :

La force de frottement est enregistrée en continu pendant tout l'essai grâce à la présence d'un capteur de force appliqué sur le bras du tribomètre, conformément à la description du tribomètre. Avant d'être enregistré, le signal est traité dans un galvanomètre de référence TC1 SEDEME. Le frictiogramme enregistre la valeur moyenne mais aussi les fluctuations par rapport à cette valeur moyenne.

Après le montage des éprouvettes, le capteur de force est étalonné. L'étalonnage consiste à équilibrer le conditionneur de façon à obtenir un signal de sortie proportionnel à la force tangentielle appliquée. La force d'étalonnage correspond généralement au dixième de la force normale, ceci permet d'obtenir un coefficient de frottement de 0,1. L'étalonnage du capteur est vérifié en fin d'essai. La dérive de l'étalonnage est d'ordre du 1/1000, en termes de coefficient de frottement, dans le cas le plus défavorable.

1.1.2. Conditions adoptées pour les essais sur le tribomètre : pion – disque :

Les principales opérations réalisées lors de chaque expérience (quel que soit le type : Frottement ou Usure), sont les suivantes :

- Caractérisation microgéométrique des surfaces frottantes avant essai : cette opération permet d'obtenir et de vérifier que les rugosités sont conformes aux spécifications. Les principaux paramètres contrôlés sont Ra, Rq, Rsm et Rt.

- Montage des éprouvettes sur le tribomètre pion - disque,

- Nettoyage des éprouvettes : les éprouvettes sont soigneusement nettoyées avec de l'alcool à brûler et de l'éther avant de procéder aux expériences.

- Etalonnage du dispositif expérimental : le capteur de force sera étalonné pour différents efforts (en fonction de la charge à appliquer). Cette opération a deux objectifs :

- Le contrôle d'une dérive éventuelle de l'appareillage de mesure,
- L'assurance d'obtenir la précision de mesure souhaitée.

- On procède à l'essai, de frottement ou d'usure, proprement dit,

- Vérification de l'étalonnage à la fin de chaque essai : la procédure est identique à celle réalisée avant essai,
- Démontage des éprouvettes,
- Examen visuel des surfaces frottantes : après synthèse des essais, on procède par la suite à l'examen sur microscope ou/et microscope électronique à balayage,
- Caractérisation microgéométrique des surfaces frottantes après essai : la procédure est en général identique à celle réalisée avant l'essai,
- Analyse et dépouillement des frictiogrammes.

Avant chaque essai, il convient tout d'abord de vérifier l'étalonnage des capteurs de force et de déplacement. La reproductibilité des essais est fortement dépendante du comportement des capteurs dans la zone de mesure, car ils sont très sensibles à des facteurs parasites comme par exemple les vibrations. Après il faudrait nettoyer avec soins tous les éléments de la machine afin d'éviter que des impuretés ne viennent perturber les mesures.

Quelques conditions peuvent changer au cours d'une campagne d'essais, ces différences seront décrites au moment voulu. En général, les conditions usuelles adoptées pour le contact, l'ambiance et les conditions opérationnelles sont :

1. **Le contact** : superficiel, de type plan sur plan, la surface apparente de contact suivant le diamètre du pion [(3,5-3,9) mm] ; est comprise entre $9,62 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ et $11,946 \times 10^{-6} \text{ m}^2$.
2. **L'ambiance** : tous les essais sont réalisés à une température constante. La paire d'éprouvettes en contact est totalement immergée dans un bain d'huile lubrifiant Neutral NS100 à 20°C ou 75°C selon les cas, avec ou sans particules abrasives.
3. **Les conditions expérimentales** :

a - vitesse de glissement : La plupart des essais de cette étude ont été réalisés dans un domaine de vitesses de glissement comprises entre 0,1 et 3,1 m.s⁻¹, valeurs caractéristiques de plusieurs mécanismes. Ces valeurs permettent de parcourir tous les

régimes de lubrification. Des essais ont été réalisés à vitesse constante afin de pouvoir caractériser l'usure des échantillons.

b - Pression normale de contact : Les valeurs des pressions ont été choisies en accord avec les propriétés mécaniques des alliages étudiés mais aussi de façon à préserver le plus possible l'état initial de surface des pions à la fin de chaque essai. C'est pourquoi ces valeurs dépendent également de la capacité de mouillage du lubrifiant.

c - Etats de surface : Deux papiers abrasifs de granulométrie différente (400 et 1200) ont été utilisés pour obtenir un état de surface des frotteurs différent : un plus fin et un autre plus grossier. Les paramètres d'état de surface des pions sont très variables et dépendent du matériau. Les disques, utilisés dans tous les essais, sont rectifiés et présentent un seul état de surface très fin.

1.1.3. Liste des opérations à effectuer pour chaque essai (avant et après) :

Avant tout essai, le pion et le disque sont numérotés. Sur la surface du disque, quatre zones de référence sont repérées. Ces zones sont utilisées lors de la mesure des états de surface. La procédure expérimentale appliquée, avant, pendant et après les essais, peut varier mais elle est en général la suivante :

Avant essai :

1. Nettoyage des éprouvettes par ultrasons à l'acétone. Le trichloréthylène est à proscrire car le chlore a des effets sur le frottement,
2. Mesure de la dureté des éprouvettes,
3. Réalisation des micrographies des éprouvettes,
4. Montage du pion et du disque de polissage pour l'obtention de l'état de surface souhaité du pion,
5. Obtention du fini de surface du pion in situ sur le tribomètre pour assurer un bon parallélisme entre les deux surfaces (du pion et du disque) en contact. Les pions démontés, sont nettoyés une dernière fois avant l'essai. Lors du démontage des pions, une indexation doit être réalisée pour le repositionnement par la suite,

6. Les pions sont pesés avant essai sur une balance de précision à 10^{-4} g,
7. Caractérisation microgéométriques des surfaces de contact avant essai des pions et disques. Cette opération a pour but : d'abord de vérifier que les rugosités sont conformes aux spécifications et ensuite d'obtenir les paramètres de rugosité des surfaces. Les principaux paramètres contrôlés sont Ra, Rp, Rq, Rt et Sm. La procédure de caractérisation des surfaces a été présentée précédemment,
8. Etalonnage de la force de frottement,
9. Montage du pion (en respectant l'indexation réalisée au cours de l'opération 5) et du disque pour l'essai considéré,
10. Les éprouvettes sont immergées dans le bain lubrifiant, sans contact entre le pion et le disque,
11. Application de la charge choisie.

Pendant l'essai proprement dit :

1. Stabilisation de la vitesse de départ,
2. La mise en rotation du disque étant effectuée, le pion est mis en contact sur le disque avec précaution puis l'on procède à la variation de la vitesse de glissement à intervalle de temps déterminé,
3. Mesure de la force de frottement et détermination du coefficient de frottement pour chaque valeur de vitesse de glissement,
4. En fin d'essai, suppression du contact pion / disque par soulèvement du pion,
5. Vérification de l'étalonnage réalisé avant l'essai.

Après l'essai :

1. Démontage des éprouvettes.
2. Les éprouvettes sont essuyées et dégraissées à l'acétone.
3. Les pions sont pesés après essai.
4. Examens visuels des surfaces frottantes (utilisation de la binoculaire, des microscopes optique et électronique).

5. Caractérisation microgéométriques des surfaces frottantes après essai, avec une procédure identique à celle réalisée avant l'essai, pour quantifier l'évolution des rugosités.
5. Analyse des frictiogrammes.

II. Caractérisation morphologique :

2.1. Microgéométrie des surfaces de contact:

2.1.1. Généralités:

Pendant la phase initiale du mouvement, entre deux surfaces en contact glissant, la conformité et la topographie des surfaces ainsi que leur compatibilité en frottement évoluent. Des processus chimiques et métallurgiques (systèmes lubrifiés : réaction chimique des surfaces avec l'huile contenant des additifs ; durcissement par écrouissage) peuvent contribuer à une amélioration de leurs comportements tribologiques. Initialement ces surfaces ne sont pas encore accommodées et leurs capacités à supporter la charge n'est pas totale. Pendant la phase de rodage les conditions de fonctionnement doivent être les plus douces possibles de façon à éviter au maximum des pics de vibrations et de charge. Les effets du frottement et de l'usure des surfaces neuves sont accentués, jusqu'à l'obtention d'une situation stable. La rugosité des surfaces en contact diminue pour d'atteindre un équilibre dépendant de la rugosité initiale, [161].

Les surfaces très polies, cependant sont sujettes à des endommagements considérables si la lubrification devient défailante. La rugosité intervient dans l'établissement du régime hydrodynamique. Ce régime n'est pas stable que si l'épaisseur du film d'huile ou de graisse est supérieure à la somme des rugosités des surfaces antagonistes. Une analyse plus fine du mécanisme de frottement est nécessaire, prenant en compte la rugosité de surface, car les procédés de fabrication de pièces peuvent induire des microgéométries de surface de grandes variétés qui sont capables de générer des comportements tribologiques totalement différents. Il est donc indispensable de décrire plus finement la topographie et la composition des surfaces, [162].

Toutes les surfaces portent des imperfections microscopiques même si elles paraissent lisses au toucher et à la vue. Les défauts d'une surface peuvent se diviser en deux catégories : les défauts de formes dont l'ordre de grandeur est du millimètre à la centaine de micromètre et les défauts de rugosité de l'ordre du micromètre. Différentes normes coexistent aujourd'hui définissant chacune leurs critères de rugosité et la méthode de calcul de ceux-ci [système **ISO**]. Parmi ces normes, notons l'ISO 13565 qui depuis 1997 unifie les conventions en Europe. En France, la norme NF E 05-015/20 est encore utilisée et définie notamment Rq et Ra.

Les surfaces sont issues de processus de finition qui travaillent la surface de manière régulière (ex. machine outil). Le profil a tendance à présenter une périodicité qui dépend de la qualité de la finition, la vitesse d'exécution, la qualité de l'outil,... (ex. un tournage engendre un sillon en spirale de forme régulière). De même, la direction prise pour cette longueur est essentielle : les surfaces sont rarement isotropes et présentent des axes topographiques privilégiés (ex. dans le sens normal au passage de l'outil). Il convient alors d'exécuter plusieurs analyses en deux dimensions pour extraire des gabarits de paramètres tribologiques. L'étude des propriétés des surfaces rugueuses s'effectue traditionnellement en deux dimensions à cause des appareils de mesures (palpeur, laser) qui génèrent des profils de coupe de surface. Aujourd'hui les appareils permettent d'analyser directement des surfaces entières et permettent une étude en trois dimensions [145].

2.1.2. Définition de la rugosité et de l'ondulation :

L'enregistrement direct du profil de la pièce peut révéler différents types de défauts. On distingue des variations de hauteur de grandes périodes, auxquelles se superposent des défauts de plus faibles amplitudes. Ces deux types de défauts sont de nature et d'origine très différente :

- les défauts de grande périodicité sont des défauts de forme ou d'ondulation. Ils proviennent soit de la non planéité de la pièce (qui peut être voulue, par exemple avec des pièces courbes comme des sphères ou des cylindres), soit des ondulations provenant de basses fréquences causées par l'usinage.

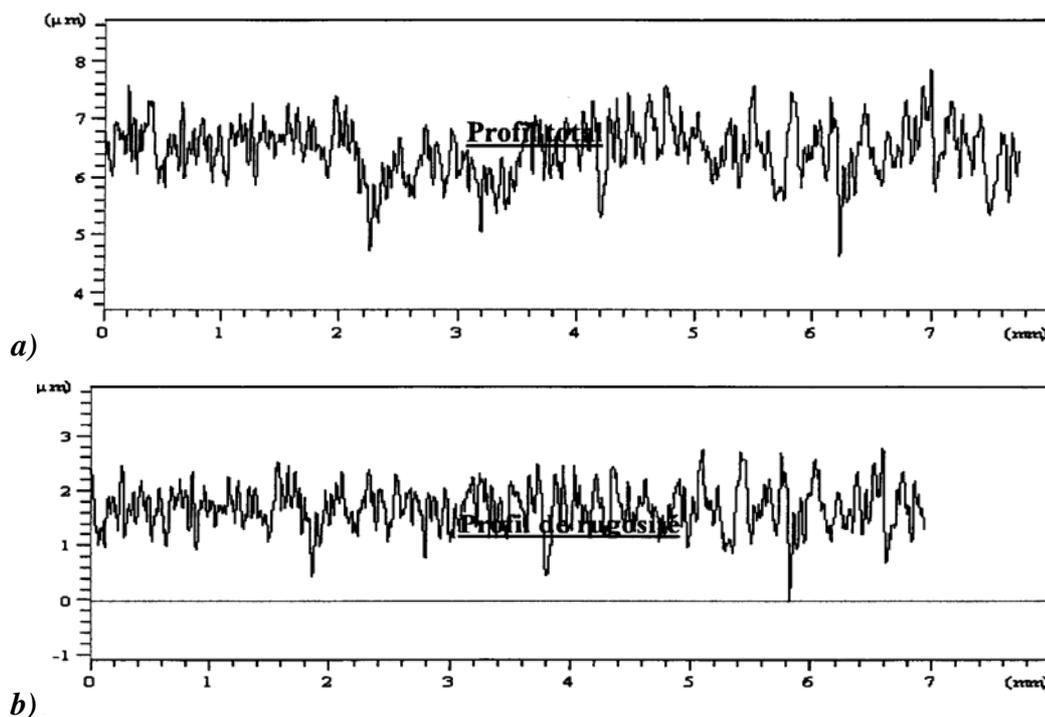
- les défauts de plus faibles périodes constituent la rugosité proprement dite de la pièce et sont causés directement par l'usinage de la pièce (forme de l'outil et avance ou arrachement de matière).

L'objectif du traitement du signal est de séparer ces deux types de défauts pour les quantifier séparément. Pour cela, on précisera les deux normes principales, techniques utilisées ainsi que les frontières pour distinguer les deux types de défauts.

2.1.3. Norme ISO 12085 (norme "Ligne Moyenne") :

Les différents types de relevés de défauts sont obtenus par un filtrage du profil de la surface. La frontière couramment utilisée pour séparer les défauts de la rugosité et d'ondulations se situe à 0,8 mm. Les valeurs également utilisées sont les suivantes : 0,08 ; 0,25 et 2,5 mm. A l'issue de ce filtrage, on obtient les différents profils suivants (**figure 3**):

- profil total,
- profil de rugosité : qui est le profil total filtré des variations de grandes périodes,
- profil d'ondulation : c'est le profil total filtré des variations de petites périodes.



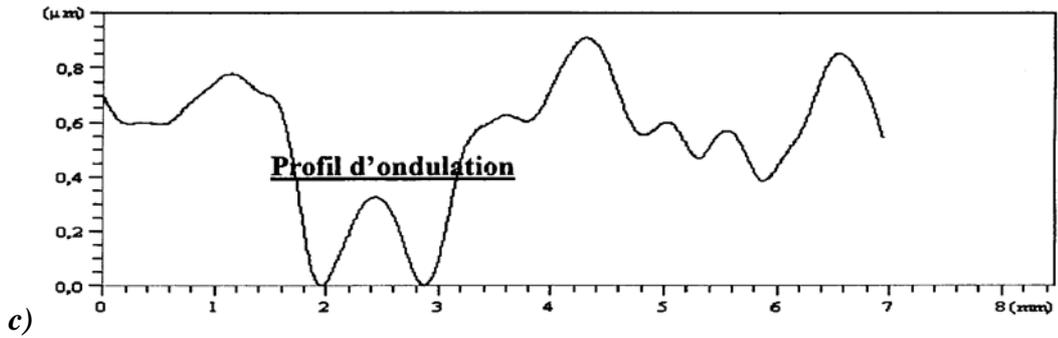


Figure 3: Décomposition du profil de mesure en profils de rugosité et d'ondulation.

La norme I.S.O. prévoit deux familles de paramètres :

- Les paramètres géométriques : Le paramètre de rugosité le plus classique est le R_t . Il correspond à la différence d'altitude entre le point le plus élevé du profil et le point le plus bas. C'est l'étendue des mesures d'altitude du profil.

- Les paramètres statistiques : Le principal paramètre statistique utilisé est le R_a . Il représente la moyenne arithmétique des ordonnées des points du profil par rapport à la ligne moyenne (droites des moindres carrés). Le paramètre R_a décrit l'amplitude moyenne de dispersion des valeurs autour de la ligne moyenne.

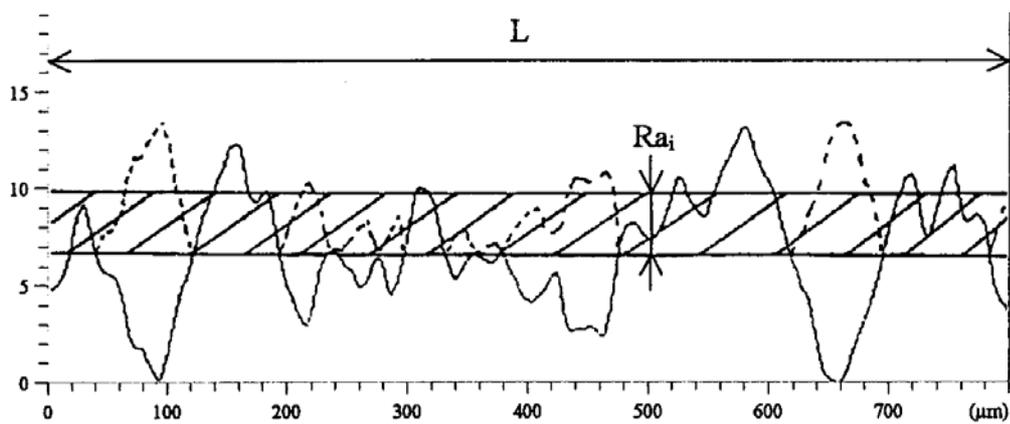


Figure 4 : Représentation du paramètre de rugosité "Ligne Moyenne" : R_a .

$$R_{a_i} = (1/L) \cdot \int_0^L [y(x)] dx \quad R_a = \sum_{i=1}^n R_{a_i} \quad \text{avec } n = 5 \text{ selon la norme}$$

Par ailleurs, un paramètre est utile pour caractériser l'étendue des défauts dans le sens de la direction de mesure. Le paramètre le plus pertinent est le Rsm qui est la périodicité des défauts au niveau de la ligne moyenne. Ce paramètre est défini comme la distance moyenne entre deux intersections, en front montant, du profil avec la ligne moyenne.

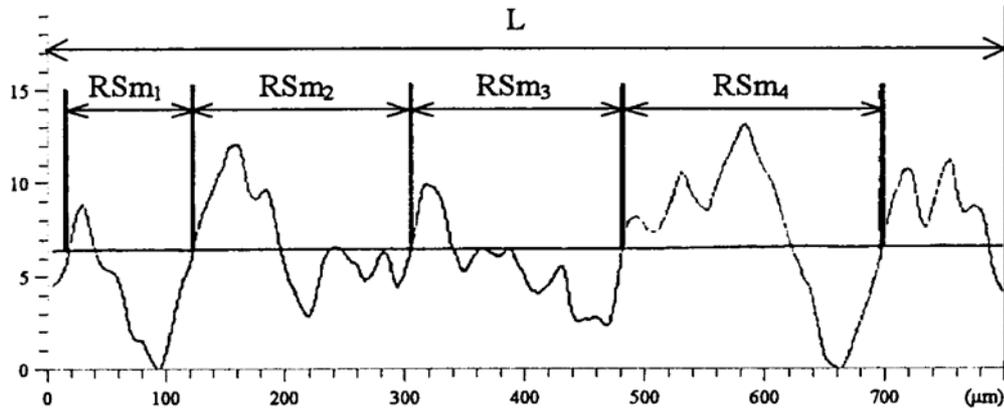


Figure 5 : Représentation du paramètre de rugosité "Ligne Moyenne" : Rsm .

$$Rsm_i = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k Rsm_i \quad k \text{ est le nombre des irrégularités du profil sur la longueur de base } L \text{ et}$$

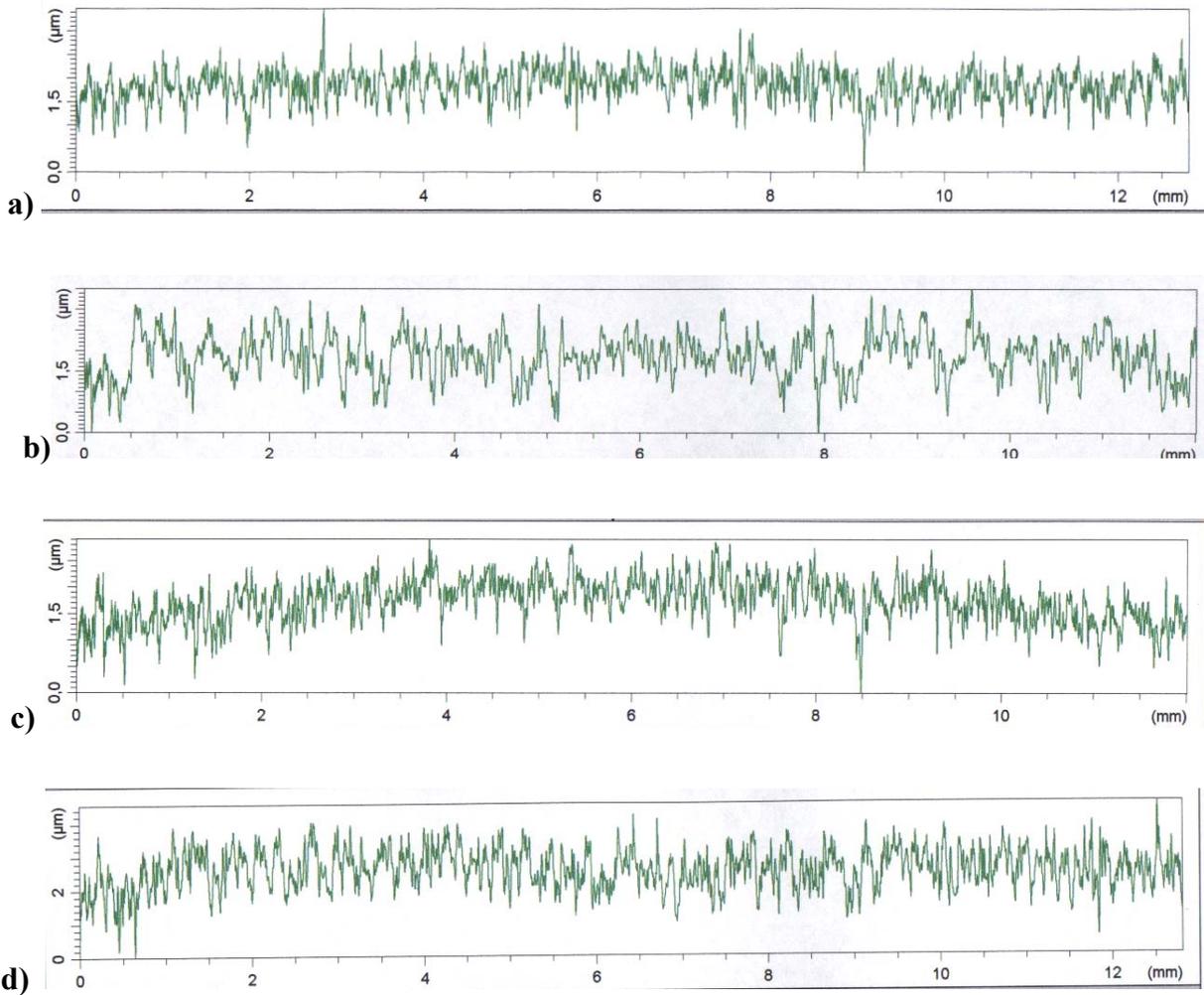
$$Rsm = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Rsm_i \quad \text{avec } n = 5 \text{ selon la norme}$$

2.2. Caractérisation géométrique des disques :

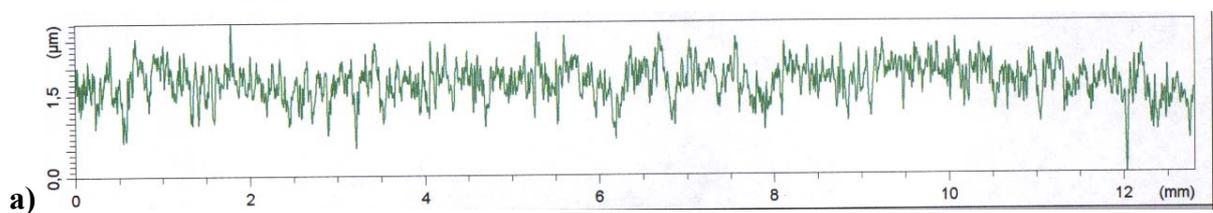
La rugosité des disques est mesurée avant et après les essais. Elles sont faites suivant des profils perpendiculaires au sens des stries de rectification et sont effectuées au voisinage de quatre zones de référence à 90° repérées sur la surface des disques (**figure 25 page 121**). Pour chaque zone repérée, 3 mesures sont effectuées perpendiculairement avec un pas de 0,2 mm entre chaque mesure.

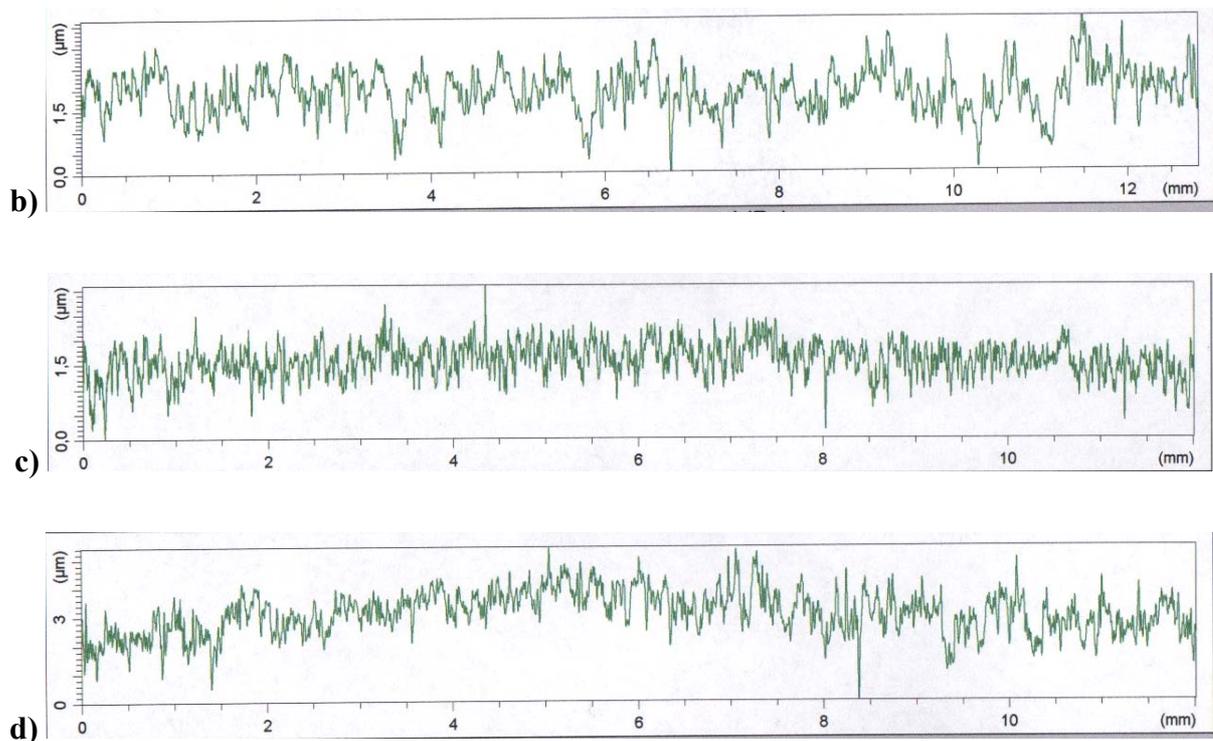
Les (**figures 6 et 7**) présentent les profils type perpendiculaire au sens des stries de rectification. On peut donc observer que tous les disques ont des profils

relativement uniformes avec une dispersion de mesures très faible avec un écart type sur la mesure inférieure à $0,01 \mu\text{m}$. Les valeurs des paramètres de rugosité des disques présentées dans le **tableau 2** correspondant à la moyenne arithmétique des mesures réalisées sur les faces des disques :



Figures 6 : Profils microgéométriques des surfaces des disques obtenus :
a) avant essai d'usure lubrifié des pions CuSn, sans abrasifs,
b) après essai d'usure lubrifié des pions CuSn, sans abrasifs.
c) avant essai d'usure lubrifié des pions CuSn, avec abrasifs,
d) après essai d'usure lubrifié des pions CuSn, avec abrasifs.





Figures 7 : Profils microgéométriques des surfaces des disques obtenus :
a) avant essai d'usure lubrifié des pions CuSnPb, sans abrasifs,
b) après essai d'usure lubrifié des pions CuSnPb, sans abrasifs.
c) avant essai d'usure lubrifié des pions CuSnPb, avec abrasifs,
d) après essai d'usure lubrifié des pions CuSnPb, avec abrasifs.

Types d'essais	paramètres avant essais (μm)					paramètres après essais (μm)				
	Ra	Rp	Rq	Rt	RSm	Ra	Rp	Rq	Rt	RSm
1	0,251	0,943	0,327	2,738	70,02	0,384	1,111	0,474	2,684	129,2
2	0,239	0,791	0,303	2,188	99,37	0,339	0,802	0,409	2,302	182,3
3	0,234	0,768	0,296	2,029	81,04	0,430	1,129	0,526	3,200	100,4
4	0,237	0,958	0,300	2,381	70,84	0,335	0,901	0,423	3,050	91,19

Essais **Type 1** : Essais d'usure lubrifié Bronze / Acier sans abrasifs,

Essais **Type 2** : Essais d'usure lubrifié Bronze au Plomb / Acier sans abrasifs,

Essais **Type 3** : Essais d'usure lubrifié Bronze / Acier avec abrasifs,

Essais **Type 4** : Essais d'usure lubrifié Bronze au Plomb / Acier avec abrasifs,

Tableau 2 : Valeurs types des moyennes des paramètres de rugosité mesurés sur les surfaces des pistes.

2.3. Caractérisation géométrique des frotteurs :

Les surfaces des pions, testés, ont subi un polissage et présentent parfois une topographie non uniforme. Les essais préliminaires ont permis d'obtenir des résultats plus uniformes et plus reproductibles avec l'amélioration du parallélisme entre les surfaces du pion et du disque. L'état initial de la surface des pions est réalisé par polissage in situ au tribomètre, avec le papier abrasif grain 400 pour tous les frotteurs. Pour chaque condition d'essai, trois pions sont testés. Sur chaque pion, trois mesures au centre de la surface du pion sont effectuées avec un pas de 0,2 mm perpendiculairement aux stries de polissage.

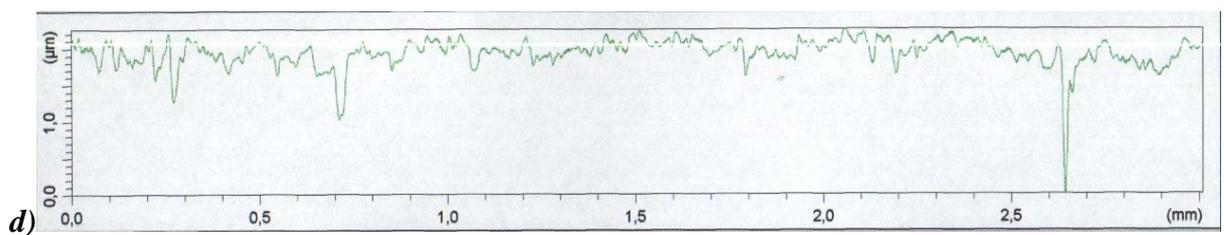
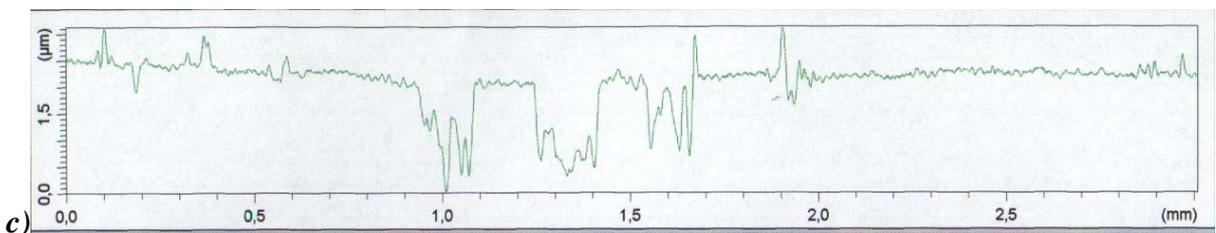
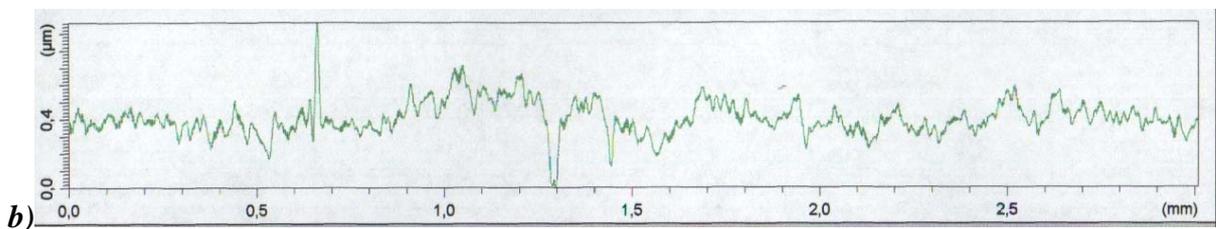
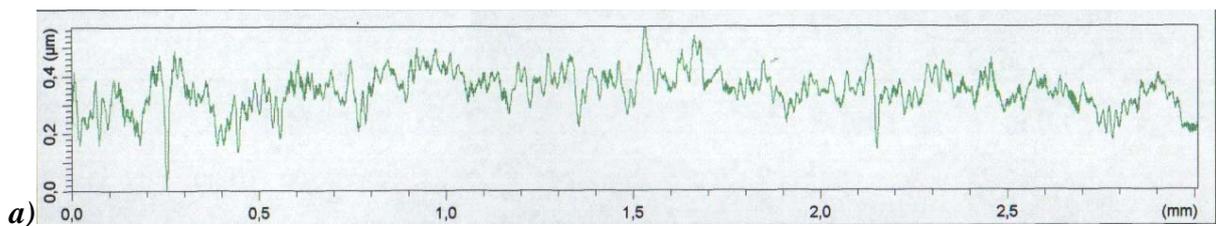
Les valeurs mesurées sont uniformes et les valeurs moyennes des paramètres de rugosité les plus représentatifs sont présentés dans les (**tableaux 3 et 4**) pour les deux types de bronzes utilisés au cours de nos essais. La **Figure 28 page 131** présente à titre d'exemple les surfaces des pions en bronze avant et après essai d'usure à 75°C. Les (**tableaux 3 et 4**) et (**figures 8 et 9**) et présentent quelques profils des surfaces des pions utilisés.

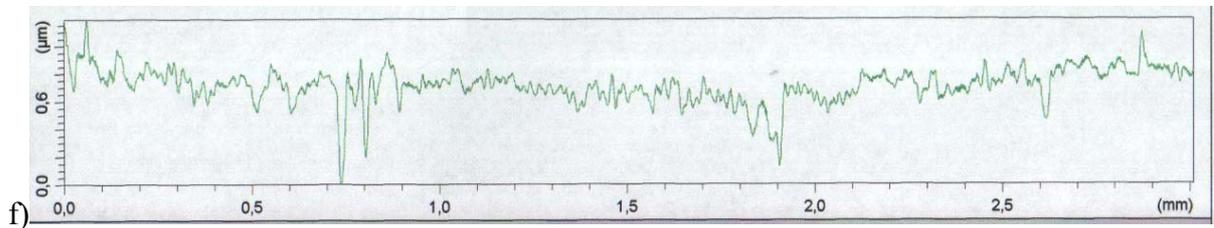
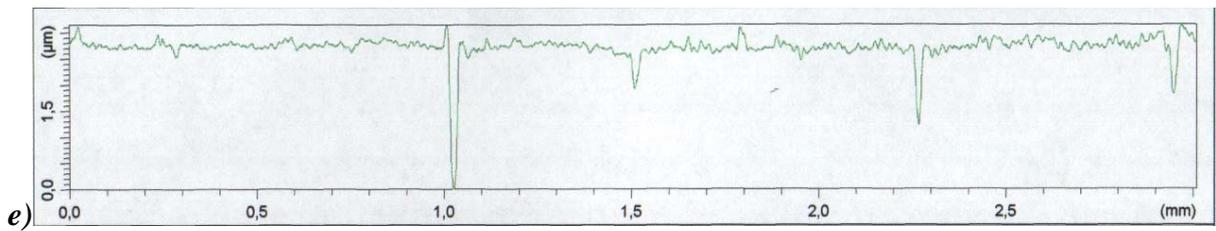
Type d'essai	paramètres de rugosité (μm)			
	Ra	Rq	Rt	RSm
Avant essai lubrifié de frottement ou d'usure	0,047	0,060	0,397	68,2
Après essai de frottement lubrifié sans abrasifs	0,061	0,085	0,891	97,1
Après essai de frottement lubrifié avec abrasifs	0,332	0,419	2,781	198
Après essai de frottement lubrifié avec abrasifs à 20°C	0,097	0,142	1,130	132,2
Après essai d'usure lubrifié avec abrasifs ($v= 300\text{m/s}$)	0,067	0,102	1,027	70,3
Après essai d'usure lubrifié avec abrasifs ($v= 180\text{m/s}$)	0,098	0,225	3,140	199,9

Tableau 3 : Valeurs types des moyennes des paramètres de rugosité mesurés sur les surfaces des pions de bronze : CuSn

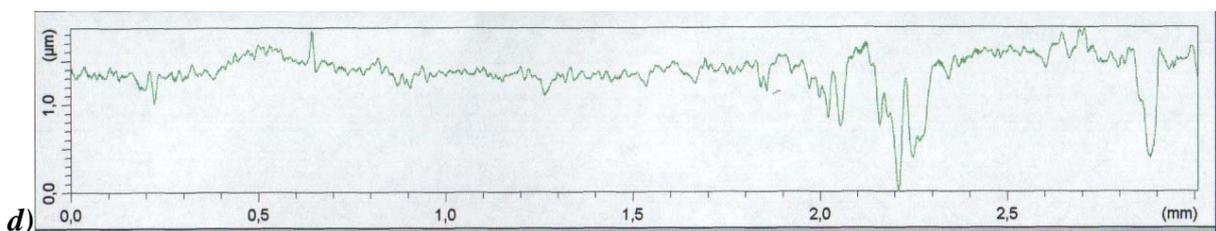
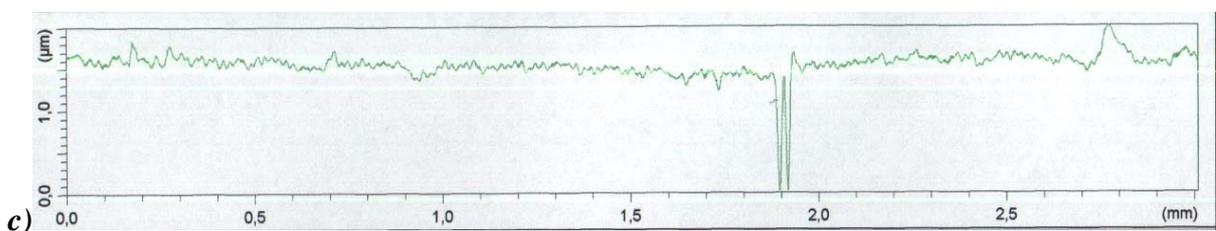
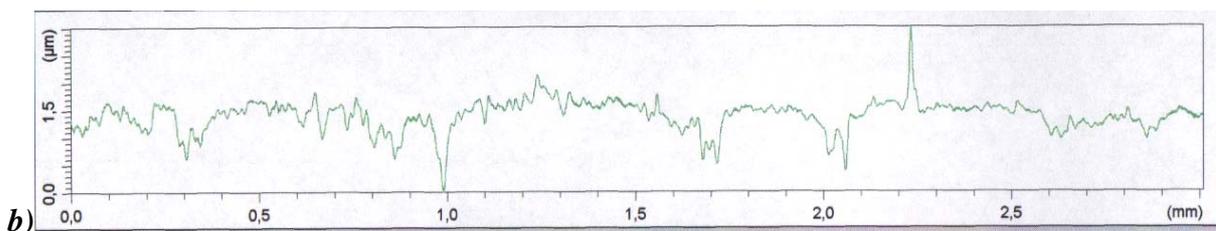
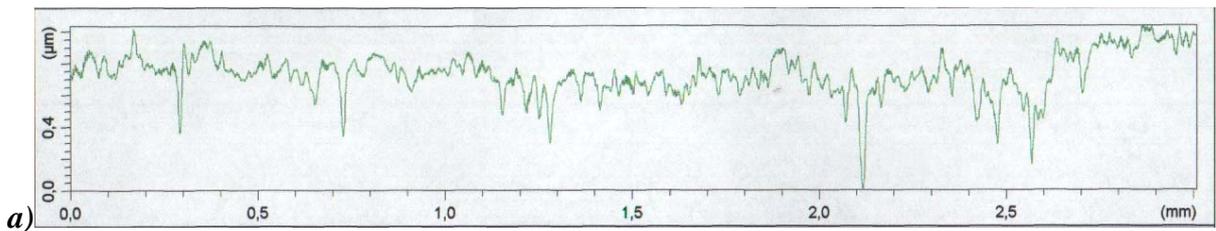
Type d'essai	paramètres de rugosité (μm)			
	Ra	Rq	Rt	RSm
Avant essai lubrifié de frottement ou d'usure	0,055	0,075	0,569	90,5
Après essai de frottement lubrifié sans abrasifs	0,153	0,207	1,492	163,9
Après essai de frottement lubrifié avec abrasifs	0,058	0,079	0,580	87,82
Après essai de frottement lubrifié avec abrasifs à 20°C	0,047	0,077	0,784	59
Après essai d'usure lubrifié avec abrasifs ($v= 1 \text{ m/s}$)	0,229	0,394	3,973	70,67
Après essai d'usure lubrifié avec abrasifs ($v= 0,65 \text{ m/s}$)	0,333	0,393	1,829	158,86

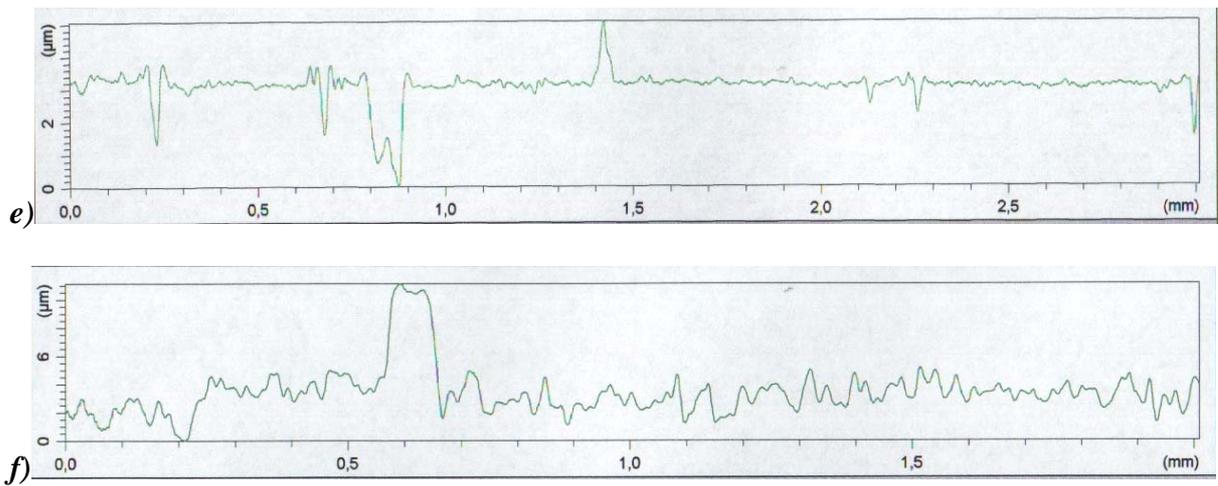
Tableau 4 : Valeurs types des moyennes des paramètres de rugosité mesurés sur les surfaces des pions de bronze : CuSnPb.





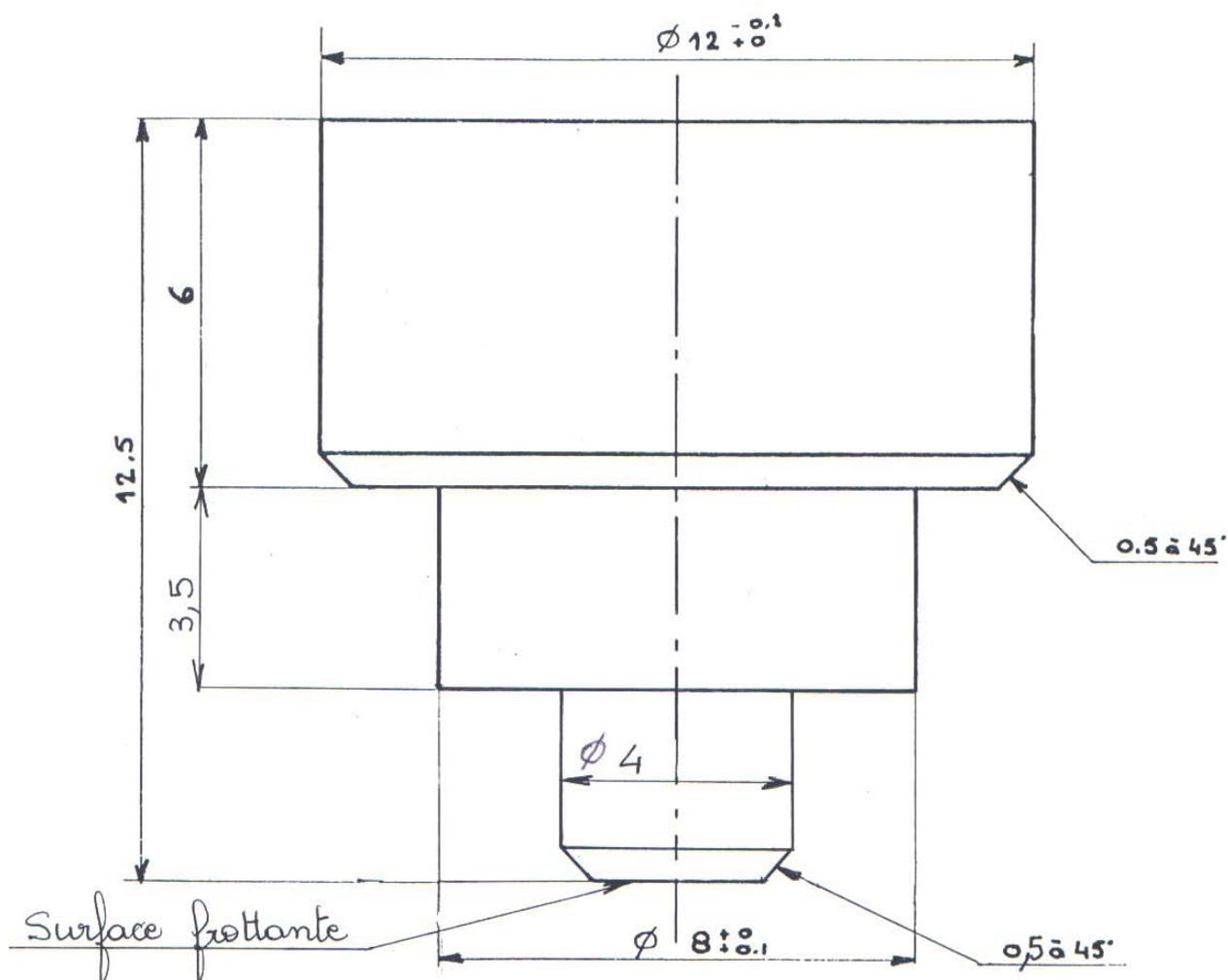
Figures 8 : Profils microgéométriques des surfaces des pions en bronze (CuSn) obtenus :
a) avant essai d'usure ou de frottement lubrifié,
b) après essai de frottement lubrifié, sans abrasifs,
c) après essai de frottement lubrifié, avec abrasifs,
d) après essai de frottement lubrifié, avec abrasifs, et à θ ambiante,
e) après essai d'usure lubrifié, avec abrasifs, $v = 1$ m/s,
f) après essai d'usure lubrifié, avec abrasifs, $v = 0,65$ m/s.





Figures 9: Profils microgéométriques des surfaces des pions en bronze au plomb (CuSnPb) obtenus :

- a) avant essai d'usure ou de frottement lubrifié,*
- b) après essai de frottement lubrifié, sans abrasifs,*
- c) après essai de frottement lubrifié, avec abrasifs,*
- d) après essai de frottement lubrifié, avec abrasifs, et à θ ambiante,*
- e) après essai d'usure lubrifié, avec abrasifs, $v = 1$ m/s,*
- f) après essai d'usure lubrifié, avec abrasifs, $v = 0,65$ m/s.*



Observation: Pion adapté à des essais tribologiques sous une pression moyenne comprise entre 3 et 50 MPa.

Prévoir 1 pion par essai

tolérance générale : ± 0.1

TRIBOMETRE	Le 11-2-06	SEIGE
PION	Modif 05.06	
	I.S.M.C.M	Ech:10

Figure 10 : Dessin de définition des différents pions en bronze (avec ou sans plomb) utilisés au cours de nos essais de frottement et d'usure

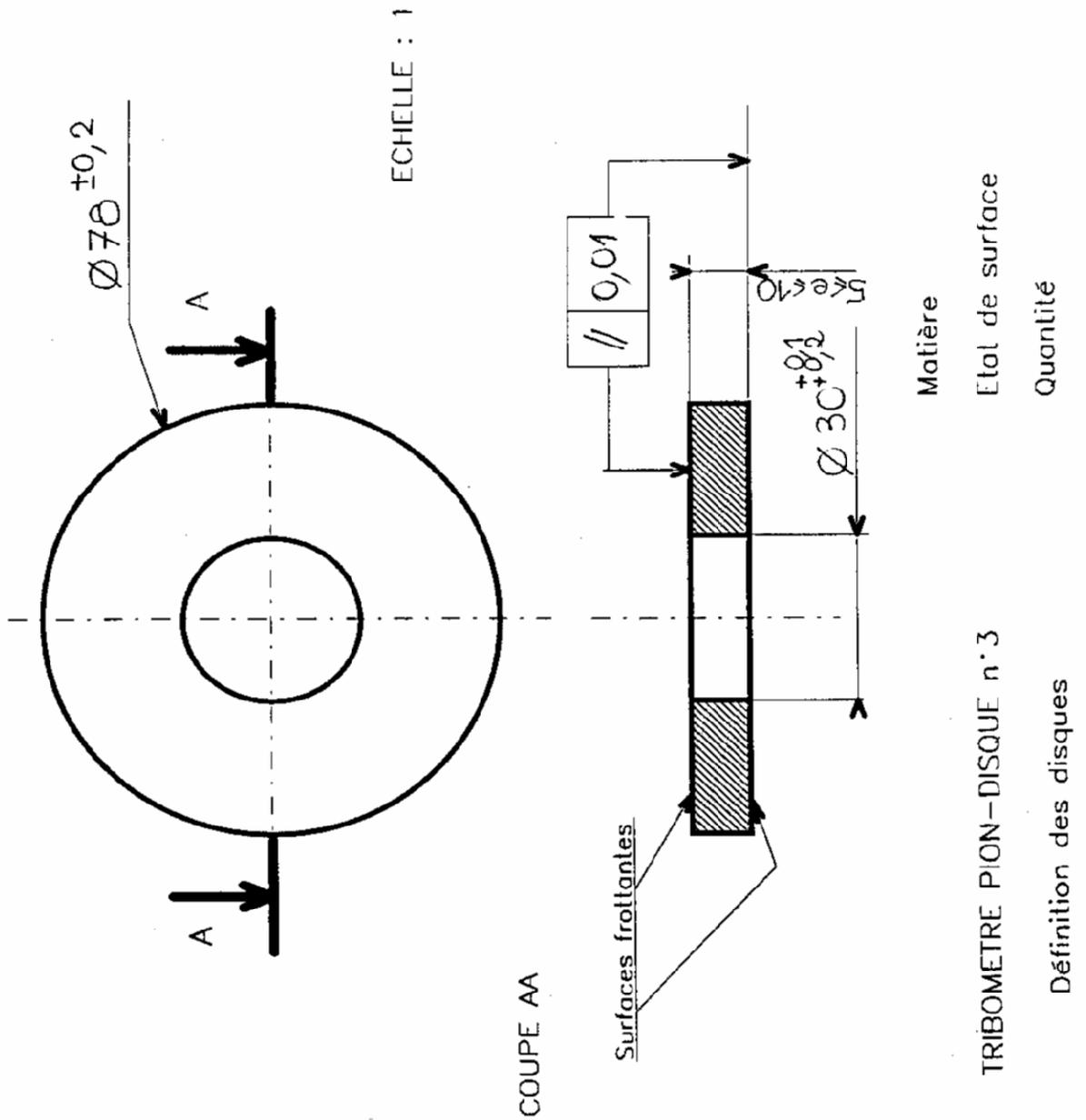


Figure 11 : Dessin de définition des pistes en acier utilisées au cours de nos essais de frottement et d'usure,

III. Techniques d'Analyse des Huiles :

3.1. Spectrométrie :

Il existe deux types de spectrométrie : la spectrométrie d'émission et la spectrométrie d'absorption atomique. Ces deux méthodes sont basées sur les principes de la physique atomique : les variations d'énergie à l'intérieur des atomes donnent lieu à l'émission ou l'absorption de lumière avec des longueurs d'onde caractéristiques des éléments chimiques présents dans l'échantillon.

L'analyse des éléments par ICP (Inductively Coupled Plasma) permet de détecter et de quantifier les éléments d'usure contenus dans l'échantillon d'huile en parties par million (ppm). La combinaison des éléments détectés est utilisée pour identifier les éléments constitutifs des alliages métalliques des surfaces en contact qui peuvent éventuellement être endommagés par l'usure. En plus de la détection des éléments d'usure, la spectrométrie permet de déterminer la teneur en contaminants provenant de l'extérieur ainsi que la teneur en additifs contenus dans le lubrifiant. Ceci est très important pour évaluer la capacité du lubrifiant.

La spectrométrie par fluorescence X est aujourd'hui largement utilisée pour l'analyse des huiles. Elle permet de doser non pas les composés chimiques qui s'y trouvent, mais les éléments chimiques qui les constituent, en particulier les atomes lourds des métaux, mais aussi le soufre, le phosphore, etc.... . L'opération est rapide à réaliser mais les appareils utilisés sont très coûteux.

La variation de la concentration des éléments du lubrifiant peut être un indicateur de la génération de particules d'usure, contaminants extérieurs ou consommation d'additifs. La présence de métaux dans un lubrifiant donne de précieuses informations sur le mode d'usure d'un mécanisme et les performances de certains additifs. Comme pour l'eau, la tolérance des lubrifiants à une charge en métaux tels que le fer, le cuivre ou l'aluminium est très variable selon leur composition chimique et il n'est pas inutile de consulter les fournisseurs à ce sujet. Les éléments les plus fréquemment quantifiés par spectrométrie sont représentés dans le **tableau 5**.

L'efficacité de cette technique varie en fonction de la dimension des particules. Si les particules ont une taille supérieure à 5 μm , elles ne sont pas bien détectées. Or la taille des particules d'usure peut être comprise entre 0 et 100 μm , la spectrométrie doit donc être utilisée avec d'autres techniques d'analyse.

Éléments	Usure	Contamination	Additif
Fer (Fe)	X	X	
Cuivre (Cu)	X	X	X
Chrome (Cr)	X		
Étain (Sn)	X		
Aluminium (Al)	X	X	
Plomb (Pb)	X		
Silicium (Si)		X	X
Sodium (Na)		X	X
Bore (B)		X	X
Calcium (Ca)		X	X
Magnésium (Mg)		X	X
Zinc (Zn)	X		X
Phosphore (P)		X	X
Molybdène (Mo)			X
Potassium (K)		X	

Tableau 5 : Éléments chimiques détectés par spectrométrie [39].

3.2. Ferrographie :

La technique de ferrographie comprend deux types d'analyse : la *ferrographie à lecture directe* et la *ferrographie analytique*.

3.2.1. Ferrographie à lecture directe (Ferrométrie) :

Le Ferrographe, (**figure 12**), à Lecture Directe (DR) mesure quantitativement la concentration des particules ferreuses contenues dans un lubrifiant. On fait passer environ 1 ml de l'échantillon d'huile par un tube capillaire soumis à un fort champ magnétique et à deux faisceaux lumineux. Les particules plus grandes que 5 μm sont les premières à se déposer. Les plus petites sont déposées 5 mm au dessus du tube. La densité du dépôt est mesurée par un système optique qui quantifie l'intensité de lumière traversant le tube, intensité qui est inversement proportionnelle à la densité des particules déposées.

A partir des valeurs des quantités de grandes particules « D_l » et de petites particules « D_s », il est possible déterminer les deux indices d'usure suivants :

$$\text{Concentration de particules d'usure, CPUC} = \frac{D_l - D_s}{d} \quad (12)$$

$$\text{Sévérité d'usure, ISUC} = \frac{D_l^2 - D_s^2}{d^2} \quad (13)$$

où d : représente le facteur de dilution de l'échantillon dans les cas où la contamination est excessive.

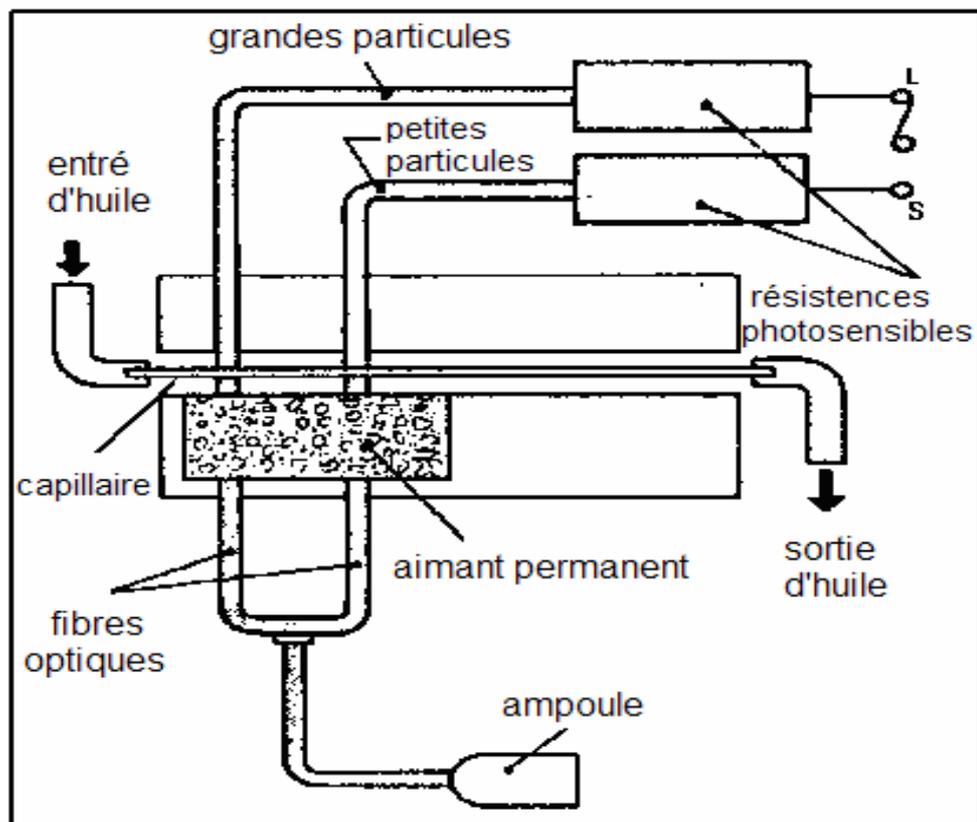


Figure 12 : Schéma du Ferrographe à Lecture Directe (DR) [163].

3.2.2. Ferrographie analytique:

La Ferrographie Analytique (**figure 13**) est utilisée pour obtenir des informations plus détaillées sur les particules contaminantes du lubrifiant. Les particules sont déposées et fixées selon le même principe que celui de la ferrographie à lecture directe,

mais dans ce cas sur une surface en verre sur laquelle on peut lire le ferrogramme.

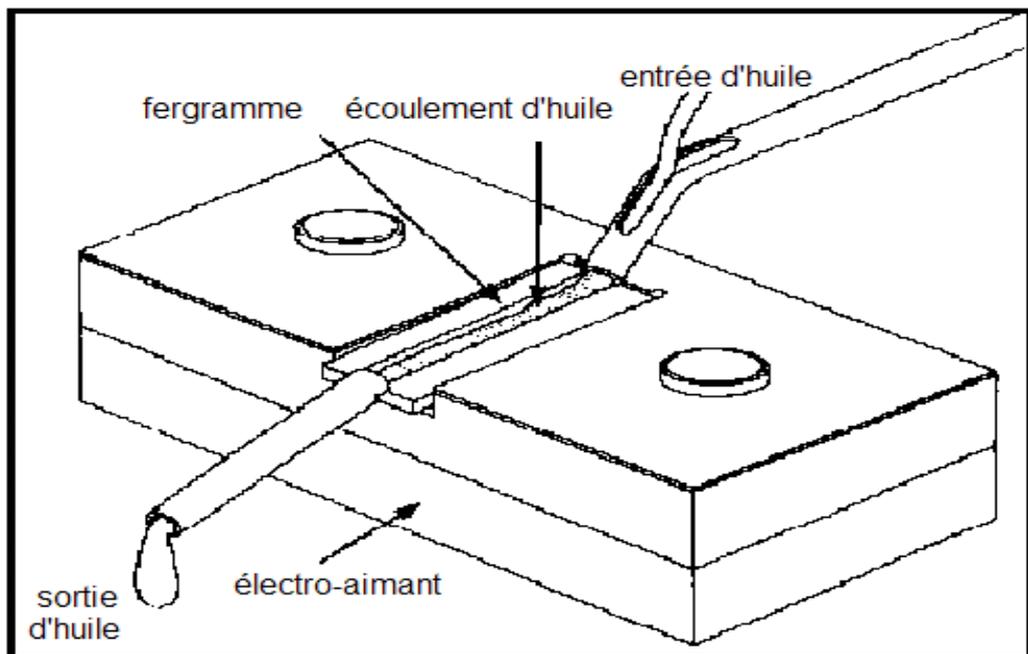


Figure 13 : Schéma de l'appareillage utilisé pour la ferrographie analytique [164].

Les particules les plus grandes sont déposées à l'entrée du ferrogramme et diminuent progressivement en taille le long du parcours. Cette technique est efficace pour la détection des particules ferreuses mais possède un inconvénient. Effectivement, certaines particules possédant des caractéristiques non ferromagnétiques, comme par exemple des particules d'alliages de cuivre, d'aluminium,..., se déposent également parce qu'elles ont acquis un certain magnétisme par frottement avec l'acier car elles sont retenues entre les filaments des particules ferreuses ou tout simplement par sédimentation.

La phase analytique du ferrogramme est réalisée par un microscope bi-chromatique et permet d'observer les caractéristiques des particules suivantes : dimension ; morphologie ; couleur et éclat ; type de surface ; type de bords... . Certaines caractéristiques sont associées aux différents types d'usure (normal, fatigue, abrasive, corrosive,...) et d'autres à l'identification du composant du matériau qui est endommagé par usure. Cela nécessite un traitement thermique du ferrogramme à différentes températures, ce qui permet d'identifier les alliages de fer, cuivre, aluminium grâce aux différents changements de couleur.

IV. Rôle des additifs :

4.1. Etude de l'influence des huiles actives:

Lors de la phase de rodage (ou phase primaire du frottement et de l'usure), une adaptation des surfaces se produit en faisant intervenir :

- la déformation élastique des aspérités sous charge,
- l'usure des sommets des aspérités (déformation élastique / plastique) due à l'adaptation des surfaces).

Pour faciliter le rodage et minimiser le frottement, on peut améliorer cette adaptation en utilisant un additif tensioactif. On crée ainsi une meilleure adhérence des épilâmes, les sommets des aspérités des surfaces sont plastifiés par adsorption d'agents chimiques qui facilitent leur adaptation.

L'usure ou la perte de masse de pièces en contact frottant dépend du nombre de jonctions métal-métal et de leur taille. Le frottement des organes mécaniques a lieu en général en présence de lubrifiants liquides. L'un des rôles les plus importants de ces lubrifiants liquides est de diminuer le nombre et la dimension de ces jonctions métalliques en constituant des films protecteurs qui supportent une partie de la charge [3] et de cette façon réduire le frottement et l'usure des interfaces.

Les additifs sont normalement ajoutés aux lubrifiants pour obtenir une propriété bien spécifique et une interaction avec la surface. Les acides gras sont souvent utilisés comme additifs grâce aux améliorations obtenues dans le contact. L'acide oléique a été utilisé dans différents travaux [88 ; 157; 158], qui ont montré que la concentration en acide oléique dans le lubrifiant accroît la plastification des couches superficielles en abaissant sa limite élastique.

Dans le cas d'un faible frottement de contact sous une pression assez grande, on observe toujours un soudage ou un frittage complet sous l'action de la

pression normale et des tensions de cisaillement qui interviennent dès le premier instant du frottement au moment du glissement des surfaces l'une contre l'autre. Supposons que l'un des solides soit infiniment plus rigide que l'autre, il existe alors une répartition de vitesse de déformation dans le corps le moins rigide qui devient plastique sous une pression élevée. Dans ce cas on observe l'écoulement du corps le plus mou, le moins rigide sous l'action de l'autre corps qui sert d'instrument pour donner une répartition de vitesses et de contraintes. Aucune application industrielle n'est possible alors.

Pour les pressions plus faibles, on peut toujours réaliser à grande vitesse un frottement dans les conditions de lubrification hydrodynamique. La théorie hydrodynamique nous permet de calculer les coefficients de frottement en fonction seulement de la répartition de vitesse (dans les conditions d'un fluide newtonien) et de la viscosité.

La réduction de l'usure et du frottement est généralement obtenue par l'introduction dans la composition chimique de base d'éléments additifs très diversifiés conçus dans des buts bien précis. Dans le cas du souhait d'une réduction de l'usure, des produits anti-usure (organo-dithiophosphates, organophosphates, di-sulfures organiques,..., provoquent la formation de films réactionnels tribochimiques solides sur les surfaces frottantes. La formation de ces films solides n'existe qu'en présence d'un frottement (obtenu suite à un mouvement). Le phénomène de lubrification limite permet l'établissement d'un film mince, d'épaisseur bien inférieur au micromètre, dans le contact entre corps solides. Ces additifs très réactifs vis-à-vis des solides, se décomposent et leurs éléments réagissent avec la surface solide, créant ainsi en surface une couche formée de composés de soufre ou de phosphore facilement cisailable [165] et qui limiterait les risques d'adhésion (ou de grippage) au cours du fonctionnement [166].

Un lubrifiant liquide devra être capable de tenir la pression du contact de façon à que les surfaces solides se maintienne avec haute qualité. La surface, après frottement, doit être extrêmement polie, cela est nécessaire surtout pour le frottement continu dans les machines de précision. Les lubrifiants qui plastifient par tensio-activité c'est-à-dire par adsorption moléculaire donnent suivant les trois résultats suivants :

- une faible valeur du coefficient de frottement,

- une usure très faible,
- une bonne qualité des surfaces par plastification et aplanissement des rugosités.

4.2. Etude du comportement des additifs tensioactifs en films discontinus:

Les molécules tensioactives comprennent deux parties de polarité différente :

- une première partie polaire hydrophile (soluble dans l'eau) ;
- une deuxième partie apolaire hydrophobe, lipophile (soluble dans l'huile).

La partie lipophile est constituée par une ou plusieurs chaînes hydrocarbonées, aliphatiques, linéaires ou ramifiées, ou aromatiques ou encore alkylaromatique. Le caractère hydrophobe croît avec le nombre d'atomes de carbone, et diminue avec le nombre d'insaturations. La partie hydrophile ou partie polaire est constituée par un ou plusieurs groupements polaires ioniques ou non ioniques.

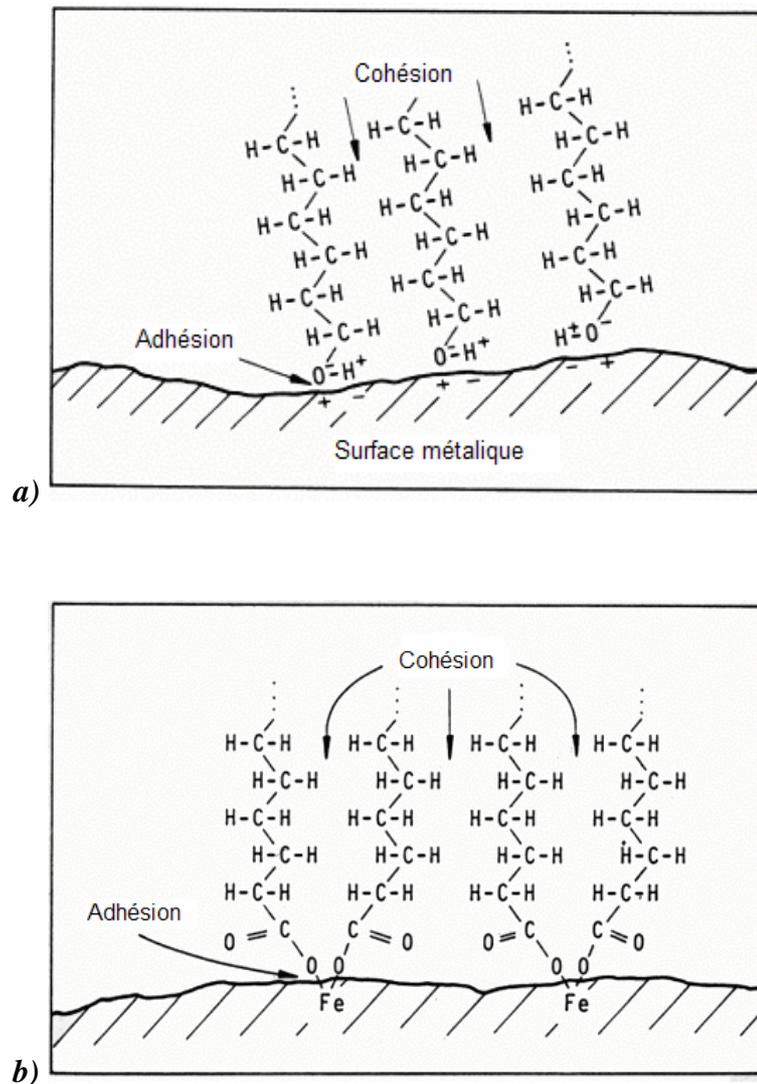
La surface réagit avec une solution liquide et aussi avec un gaz par adsorption. L'adsorption peut être physique ou chimique. La valeur de la chaleur d'adsorption Q_{ads} , qui dépend de l'énergie des liaisons formées entre les atomes adsorbés et la surface, permet de distinguer deux formes d'adsorption :

- L'adsorption physique ou physisorption (**figure 14a**): est due aux forces faibles, du type Van der Waals, entre les espèces adsorbées et la surface. Le phénomène est réversible et n'implique aucune énergie d'activation. La chaleur d'absorption ne dépasse pas 50 kJ / mole, ce qui est comparable à la condensation d'un gaz. Lors de la physisorption, plusieurs couches d'atomes (molécules) peuvent se superposer. Les molécules des tensioactifs se condensent sur la surface solide et se présentent comme des films solides. Les forces cohésives entre les molécules permettent à ce que ces films soit extrêmement résistants à la pénétration des aspérités [3]. L'inconvénient majeur est la sensibilité à la température, qui peut produire la désorption, désorientation ou fusion du film. Donc la physisorption est limitée aux basses vitesses de glissement et ainsi qu'aux charges modérées.

- L'adsorption chimique ou chimisorption (**figure 14b**): met en jeu une chaleur d'adsorption plus élevée (de l'ordre à 500 kJ / mole), qui implique des liaisons fortes.

Ce processus nécessite parfois une énergie d'activation. Généralement une seule couche d'atomes ou de molécules est adsorbée. Les films qui sont formés par adsorption chimique ont un point de fusion très élevés. Ces films assurent une meilleure lubrification des surfaces pour des conditions d'exploitations sévères.

Le lubrifiant et ses additifs forment une couche qui s'interpose entre les matériaux métalliques pour empêcher le contact direct au niveau des aspérités. Si la charge n'est pas trop élevée, la couche protectrice se forme à partir du lubrifiant lui-même qui possède une certaine affinité avec la surface. Il s'agit d'un phénomène d'absorption physique, réversible, mettant en jeu des forces de cohésion faibles entre les molécules absorbées et les surfaces.



**Figure 14 : Schémas des mécanismes: a) d'adsorption physique
b) d'adsorption chimique [3].**

Dans des conditions de charges et de températures plus pénalisantes, les énergies de liaison entre les hydrocarbures et les surfaces métalliques sont trop faibles pour assurer la cohésion de cette couche. Il faut alors utiliser des additifs plus solidement absorbés sur les parois. Ce type d'additifs se trouve dans les corps polaires tels que les alcools, acides, savons, esters.

Les molécules polaires s'orientent perpendiculairement aux surfaces métalliques ou soit les surfaces épilâmes. En pratique, la solution de polymères est en régime semi-dilué et une partie de la chaîne préfère la surface au solvant, (**figure 15**). L'ajout de telles molécules renforce donc la capacité de charge du lubrifiant liquide et diminue le frottement jusqu'à des températures d'environ 100 °C [3].

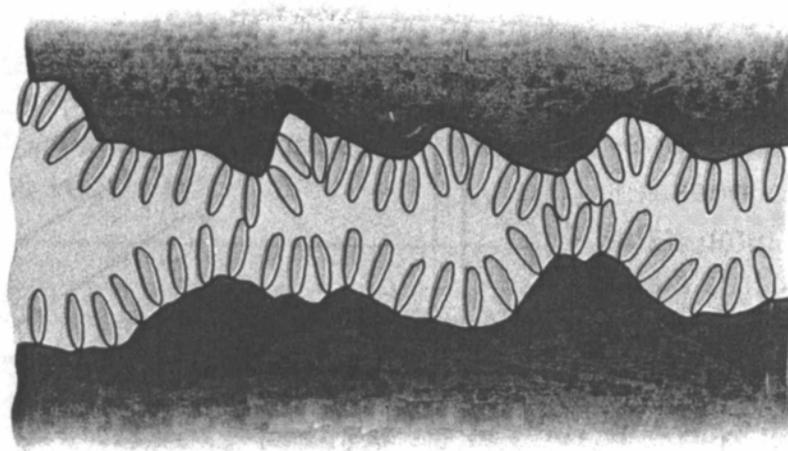


Figure 15: Schéma de l'interaction d'un lubrifiant avec une surface métallique [3].

De l'adsorption physique on peut passer à la chimisorption. Les forces de liaison sont plus importantes. La réversibilité des réactions diminue et on obtient des couches très résistantes. Les lubrifiants EP (Extrême - Pression) sont parmi les plus actifs. Si les conditions de charge et de température sont sévères, les lubrifiants doivent contenir des additifs dits Extrême - Pression qui servent à limiter les endommagements par une sorte de corrosion contrôlée. On peut citer les additifs chlorés, soufrés, phosphorés. En présence de ces additifs la surface des pièces devient le siège de véritables réactions chimiques avec formation locale de couches de produits de réactions : chlorures, sulfures, phosphates, oxydes [22]. Les paramètres importants sont la vitesse de la réaction chimique qui conduit à la formation d'une couche et la vitesse d'usure de cette couche. Les impuretés jouent un rôle important en tant qu'initiateurs ou relais des réactions chimiques [22].

La concentration superficielle en additif est très grande comparée à la concentration moyenne dans le lubrifiant [167]. On a en fait une sorte de couche solide, comme si l'additif était seul. L'efficacité de cette couche est fonction de la température de fusion de l'additif pur correspondant. Ainsi, la cohésion de la couche chute complètement à la température de transition qui dépend de la température de fusion de l'additif pur. A la température de fusion de l'additif, le coefficient de frottement commence à augmenter jusqu'à une valeur maximale correspondant à la désorption du film lubrifiant. Lorsque l'additif appartient à la famille des acides gras, qui inclut l'acide oléique tant que la température est inférieure à la température de transition le coefficient de frottement, dépend de la longueur de la chaîne jusqu'à une certaine limite puis il devient stable [13].

Alors que la possibilité d'une réduction du frottement est obtenue avec l'addition d'agents tensioactifs dans la composition de l'huile de lubrification. Les huiles végétales et animales ont une structure moléculaire optimale, parce qu'elles présentent une longue chaîne hydrocarbonée. Par contre, les huiles minérales ont besoin d'addition de faible quantité d'un composé polaire actif, acides gras par exemple. Ceux-ci sont constitués par des molécules tensioactives.

La grande affinité chimique entre l'acide gras et les surfaces métalliques oxydées produit une couche d'épilâmes par réaction chimique (chimisorption). En général, il suffit d' 1% d'additif pour former une couche et réduire ainsi le coefficient de frottement [167]. Ces additifs vont réagir avec la surface et produire ainsi des composants qui vont protéger la surface (et augmenter la plastification). Les produits chimiques résultants de la décomposition de la molécule tensioactive ont tendance à être rénovés sur les surfaces ce qui occasionne, pendant les conditions d'activation, une usure progressive de la surface. L'efficacité d'un acide gras en lubrification est assurée par la longueur de la chaîne et par la linéarité de la molécule.

Donc, les lubrifiants tensioactifs travaillant par adsorption moléculaire, conduisent à une diminution du coefficient de frottement, à une usure plus faible et à une bonne qualité des surfaces par plastification et aplanissement des rugosités.

Rehbinder [45], a comparé l'effet d'un lubrifiant tensioactif et d'un lubrifiant non tensioactif (**figure 16**) sur le volume d'usure de la surface rugueuse d'un disque tournant à vitesse constante avec de très fortes contraintes localisées en fonction du temps.

Sur la courbe correspondant au lubrifiant tensioactif (**figure 17** courbe **a**), on remarque que le volume d'usure initiale correspondant à la période de rodage est important. La vitesse d'usure diminue ensuite et devient constante. Cette vitesse d'usure élevée pendant le rodage provient d'un effet de plastification par adsorption. La surface devient polie, les rugosités disparaissent, les contraintes sont alors réduites au minimum et la vitesse d'usure est considérablement abaissée.

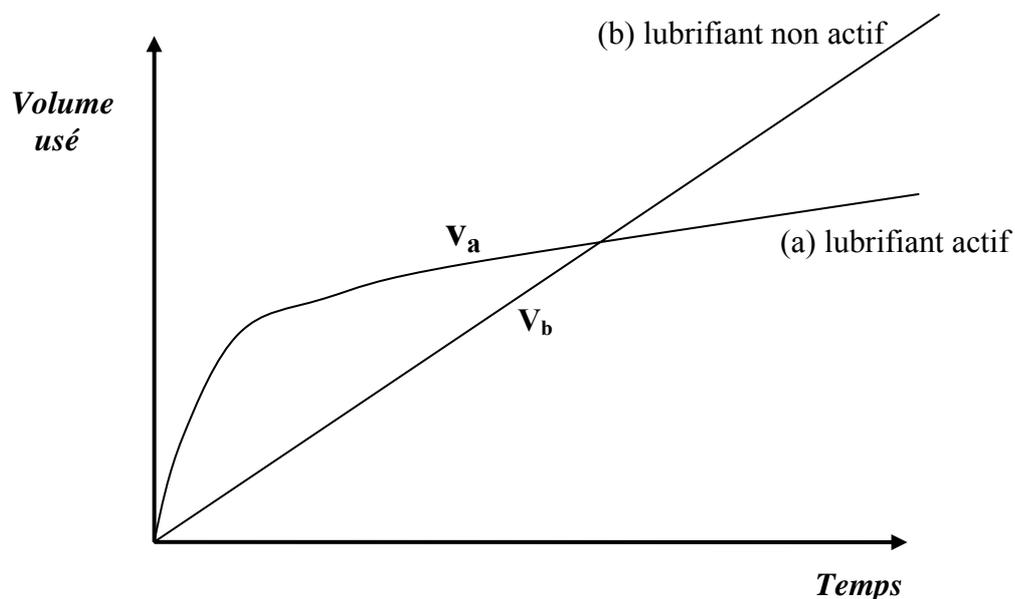


Figure 16: Volume perdu en fonction du temps [154].

Avec un lubrifiant inactif (**figure 19** courbe **b**) la vitesse d'usure initiale est plus faible comme il n'y a pas d'action du tensioactif du lubrifiant, la rugosité est conservée et la vitesse d'usure reste constante. Après le rodage elle est supérieure à la vitesse d'usure d'un lubrifiant très actif. Si on mesure la vitesse d'usure en fonction de la pression moyenne, on constate qu'il y a une pression critique pour laquelle il y a inversion de l'usure par effet tensioactif. Donc quand on utilise un lubrifiant actif il ne faut surtout pas dépasser la charge critique sinon la fragilisation par adsorption prend le pas sur la plastification par adsorption et l'usure augmente.

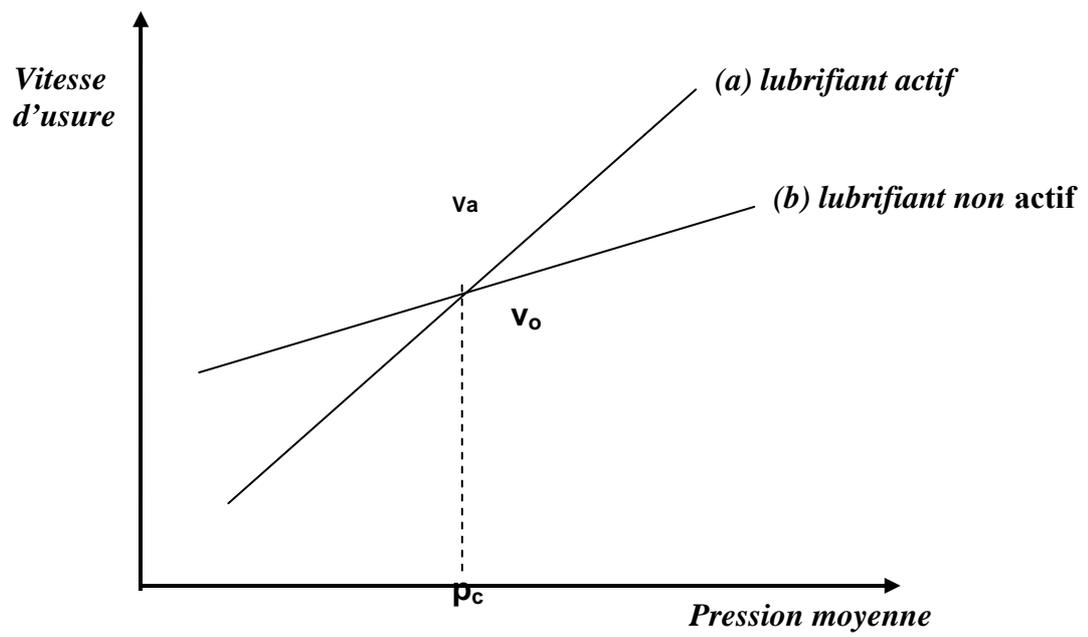


Figure 17: Vitesse d'usure en fonction de la pression moyenne [160].

G. Références Bibliographiques:

- [1] **R.J.K. Wood , P. Ramkumar , L. Wang , T.J. Harvey** , “Invited paper Electrostatic Monitoring of the effects of carbon black on lubricated Steel/Steel Sliding contacts“, actes du 30th Leeds–Lyon Tribology Symposium : Life cycle Tribology and interface engineering series n° 48 , Elsevier, (2004), pp. 109-121.
- [2] **P.R. Ryason, L.Y. Chan, J.T. Gilmore**, “Polishing wear by soot“, *Wear*, 137 (1990), pp. 15-24.
- [3] **H. Czichos**, “Tribology” ; Elsevier, Amsterdam, 1978.
- [4] **J.L. Ligier**, “Lubrification des paliers moteurs“, Éditions TECHNIP (1997).
- [5] **J.D. Gates**, “Two body and three-body abrasion: a critical discussion” *Wear* 214 (1998), pp. 139-146.
- [6] **M. Godet**, “Third-bodies in tribologie” *Wear* 136 (1990) pp.29-45.
- [7] **K.L. Johnson, J.A. Greenwood, S.Y. Poon**, “A Simple Theory of Contact in Elastohydrodynamic Lubrication”, *Wear*, 19, Ed. Elsevier, pp. 91-108, 1972.
- [8] **S. Singhal**, “Asperity Welding - An Aspect of Scuffing of a Lubricated Sliding Contact” *Wear*, 24, p. 391-394, 1973.
- [9] **F. Bowden, D. Tabor**, “The friction and lubrication of solid” Part I et II Oxford Press, 1984.
- [10] **M. Godet**, “Extrapolation in tribology” *Wear* 7 (1982) pp. 29-44.
- [11] **G. Salomon**, cité par **H. P. Jost**, “Tribology: Origin and Futur” *Wear* 136 (1983) pp.1-18.
- [12] **J. M. Georges**, “Frottement, Usure et Lubrification” Edition Eyrolles Paris 2000.
- [13] **E. Rabinowicz**, “Friction and wear of materials”, Ed. Wiley and Sons, New-York, p.370, 1965.
- [14] **P. Kapsa, M. Cartier**, “Usure des contacts mécaniques : Manifestations de l’usure” *Techniques de l’Ingénieur- Traité de mécanique BM 5 067*.
- [15] **G. W. Stachowiak, A. W. Batchelor**, “Engineering tribology” *Tribology Series*, vol. 24, Ed. Elsevier, (1994).

- [16] **D. Berranger, H. Mazille**, “Approche scientifique des surfaces” Techniques de l’Ingénieur – Traité de Matériaux M 1 425.
- [17] **P. A. Kosenko**, “ Optical Microroughness of Frictioning Surfaces ” in Proc. 2nd Leningrad Conf. on Quality of Processed Surfaces, LONITOMASH, Vol.34, Mashgiz, Moscow, 1954.
- [18] **J. Bozet**, “Fonctionnement limite des coussinets des paliers lisses, Courbe de Stribeck et variable de Leloup” Journée de la société de tribologie de France – Liège 1994.
- [19] **M.B. Peterson, W.O. Winer**, “Wear control handbook” ASME 1980.
- [20] **G.K. Nathas, J.D. Jones**, “The empirical relation between abrasive wear the applied condition” Wear 9 (1966) pp.300-309.
- [21] **K.L. Johnson**, “Contact mechanics” Cambridge University Press 1985.
- [22] **P. I. Sanin, E. S. Shepelova, A. O. Mannick, B. V. Kleimenov**, “Chemical modification of friction surfaces”, Journal of basic engineering transaction of the ASME, Series D, September, 1965, pp. 771-777.
- [23] **M. Godet**, “L’apport hydrodynamique dans le frottement lubrifié”, Thèse Paris, Février, 1967.
- [24] **A. Misra, L.Finnie**, “An experimental study of three-body abrasive wear” Wear 85 (1983) pp.57-69.
- [25] **D. A. Rigney**, “Sliding wear of metals” Annals review materials science 18 (1988) pp.141-163.
- [26] **Lamy. B**, “ Contribution à l’étude de l’enlèvement de matière dans les processus d’abrasion” Thèse de Doctorat d’Etat es sciences – Université de Haute Alsace - 5 Avril 1982.
- [27] **A.A. Torrance**, “Modeling abrasive wear” Wear 258 (2005) pp.281-293.
- [28] **R.S. Dwyer-Joyce, R.S. Sayles, E.Ioannides**, “An investigation into the mechanisms of closed three-body abrasive wear” Wear 175 (1994) pp.133-142.
- [29] **W.C. Emmens**, “ The Influence of Surface Roughness on Friction ” Proc. 15th IDDRG Int. Conf. on Controlling Steel Metal Forming Process, Michigan, pp. 63-70, 1988.
- [30] **F. Robbe-Valloire, B. Paffoni, R. Progri**, “Prediction of the amount of load transmitted by elastic, elastoplastic or plastic deformed asperities at a rough interface”, Mechanics of Materials, 33, pp. 617-633, 2001.

- [31] **A. A. Torrance**, ‘‘The correlation of abrasive wear tests’’ *Wear* 63 (1980) pp.359-370.
- [32] **M. Taibi**, ‘‘Etude de l’usure abrasive à trois corps, sur site, sur tribomètre alternatif ; des fontes et des aciers utilisées dans les moteurs diesel fonctionnant en environnement saharien’’ Thèse de Doctorat-Ingénieur, ISMCM – Paris Février 1987.
- [33] **Publications SKF**, ‘‘Usure et Lubrification des Roulements’’, Information produit 400/I, Ed. SKF, pp. 36, 2003.
- [34] **J.F. Archard**, ‘‘Contact and rubbing of flat surfaces’’, *Journal of Applied Physics*, 24 (8), p.981-988, (1953).
- [35] **J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson**, ‘‘Contact of nominally flat surfaces’’ *Proc. Roy. Soc. London, Serie A*, 295, pp 300-319 (1966).
- [36] **J.F. Archard, W. Hirst**, ‘‘The wear of metals under unlubricated conditions’’, *Proc. Roy. Soc. London, Serie A*, 236, p.397-410, (1956).
- [37] **J.F. Archard**, ‘‘Wear : Interdisciplinary approach to friction and wear’’, *Proceedings of a NASA sponsored symposium, San Antonio Texas*, (1967).
- [38] **M. Arbaoui, J. Blouet, R. Gras, M. Taibi**, ‘‘Comportement tribologique des métaux et alliages binaires’’ *Journées Francophones de Tribologie 2005, Tarbes- France*.
- [39] **T. M. Hunt**, ‘‘Handbook of wear debris analysis and particle detection in liquids’’ Elsevier Applied Science, UK, 1993.
- [40] **R. Courtel**, ‘‘Frottement - Lubrification - Usure connaissance de base’’. *Techniques de l’Ingénieur B585*.
- [41] **M.C. Shaw**, *Principles of Abrasive Processing*, OUP, Oxford, 1996.
- [42] **M. Arbaoui**, ‘‘Mécanismes de frottement, d’usure et d’adhésion des métaux ; en particulier, l’étude du comportement d’alliages binaires à l’adhésion’’ Thèse de Docteur-Ingénieur, Décembre 1987, ISMCM – Saint Ouen- France.
- [43] **I.V. Kragelsky**, ‘‘Calcul de l’usure’’ ; *mécanique-matériaux-électricité n°1 Hors série Paris*, 1977.
- [44] **T. Hisakado**, ‘‘Surface roughness and deformation of contact asperities between a rough and flat surface’’ *Wear* 35 (1975) pp.53-61.
- [45] **P. A. Rehbinder**, ‘‘Application au rodage et au broyage fin’’, *Séminaire de Mécanique des Surfaces*, ISMCM, Paris, 1971.
- [46] **H. Czichos**, ‘‘Tribology’’ Elsevier, Amsterdam, 1978.

- [47] **I.V. Kragelsky**, "Friction and wear" Butterworth – London 1965.
- [48] **I.V. Kragelski**, "Trenie i izsnos" Moscou 1968.
- [49] **A.C. Magnée**, "Abrasive wear: structural and morphological fundamentals operating parameters", Proceedings of the Second World Tribology Conference (Abstracts) Vienna 2001, 2001, p. 148.
- [50] **R. Holm**, "Electric contacts handbook" Springer, Berlin 1958.
- [51] **E. Rabinowicz**, "The least wear", Wear, 100, p.533-541, (1984).
- [52] **J. Blouet, R. Gras**, "Application de l'analyse tribologique au choix des matériaux constitutifs des paliers", Revue TIDSCHIFT Vol.29, n° 1-2.
- [53] **D. Berranger, H. Mazille**, "Approche scientifique des surfaces" Techniques de l'Ingénieur – Traité de Matériaux M 1 425.
- [54] **P.J. Mutton, J.D. Watson**, "Some effects of microstructure on the abrasion resistance of metals", Wear 48 (1978) 385.
- [55] **M. Taibi, S. Chabouev**, "Etude du rodage d'un moteur diesel sur banc d'essai" Revue El Hindiss n° 7 / 8 – U.I.A. – Alger 1981.
- [56] **G. Masouros, A. Dimarogonas, K. Lefas**, "A Model for Wear and Surface Roughness Transients During the Running-in cold Bearings" Wear, 45, p. 375, 1977.
- [57] **A. A. Torrance, J. d'Art**, "A study of lubricated abrasive wear" Wear 67 (1981), pp.253-257.
- [58] **K. Kato**, "Abrasive wear of metals" Tribology International 30 (5) (1997) pp.333-338.
- [59] **J. Blouet, R. Gras, D. Arnaud, R. Courtel**, "Essais d'usure des bronzes " Mécanique - Matériaux - Electricité n° Spécial (Juin 1972).
- [60] **ONEMA**, " Conditions climatiques du Sahara algérien", Laboratoire de l'Office National d'Exploitation de la Météorologie Algérienne, Décembre 1986 Alger.
- [61] **M. Taibi, S. Chabouev, M.M. Martirossian**, "Caractères et mécanismes d'usure des cylindres des moteurs diesel dans les champs de pétrole d'Algérie" Revue n°4 de l'E.N.S.E.T, Tunis 1980.
- [62] **T.O. Mulhearn, L.E. Samuels**, "The abrasion of metals: A model of the process" Wear 5, 1962 pp 457-466.

- [63] **M.E. Merchant**, ‘‘Mechanics of the metal cutting process, orthogonal cutting and type two chip’’ *Journal Applied Physics* 16, 1945 pp 267-275.
- [64] **A.J. Sedriks , T.O. Mulhearn** , ‘‘ Mechanics of cutting and rubbing in simulated abrasive processes’’ *Wear* 6 (1963) pp.457-466.
- [65] **J. Pomey**, ‘‘Le frottement lubrifié sous conditions sévères’’ *Mécanique – Matériaux - Electricité*, n° 256 (1971).
- [66] **J. Blouet**, ‘‘Usure’’ *Techniques de l’Ingénieur – Traité de Mécanique B 585 et B586*.
- [67] **H. Wilman, J. Goddard**, ‘‘A theory of friction and wear during the abrasion of metals’’ *Wear* 12, 1968 pp 114-135.
- [68] **M.A. Babichev**, ‘‘Investigation of the abrasive wear of metals by the Brinell methods’’ *Friction and wear in machinery – 14*, 1960 pp 1-29.
- [69] **J.A Williams, A.M. Hyncica**, ‘‘Mechanisms of abrasive wear in lubricated contacts’’ *Wear* 152 (1992) pp.57-74.
- [70] **G.B. Stachowiak**, ‘‘The effects of particle characteristics on three-body abrasive wear’’ *Wear* 249 (2001) pp.201-207.
- [71] **M.S. Bingley, S. Schnee**, ‘‘A study of the mechanisms of abrasive wear for ductile metal under wet and dry three-body condition’’ *Wear* 258 (2005) pp.50-61.
- [72] **R.L. Devis, C. Subrammanian, J.M. Yellup**, ‘‘Three- body abrasive wear of composite coatings in dry and wed environments’’ *Wear* 214 (1998) pp.112-130.
- [73] **K. Koji**, ‘‘Wear in relation to friction – A review’’, *Wear* 241 (2000) pp.151-157.
- [74] **M. Arbaoui, M. Taibi, A. Guebla, F. Robbe-Valloire**, ‘‘Influence de l’état de surface initial sur le comportement tribologique de contacts lubrifiés en présence de pollutions abrasives’’ *Journées Francophones de Tribologie 2007, Poitiers- France*.
- [75] **D. J. Whitehouse, J. Archard**, ‘‘The properties of random surface of significance in their contact’’ *Proceedings of the Royal Society* 316 A (1970) pp.97-121.
- [76] **A.S.M. Handbook**, ‘‘Friction Lubrication and Wear Technology’’ 10th edition Volume 3 ASM International 1992.
- [77] **J.L.F. Groff**, ‘‘A.B.C du graissage’’, Ed. Imprimerie Louis-jean, Paris, 1970.
- [78] **R. Lefevre**, ‘‘Graissage et tribotechnique, T1(lubrifiants et processus de graissage)’’, Société des éditions TECHNIP, Paris , 1975.

- [79] **J. Frêne, M. Arghir,**” Les contacts lubrifiés : différents régimes de lubrification” Université de Poitiers - Faculté des Sciences - SP2MI.
- [80] **J. Frêne,** “Butées et paliers hydrodynamiques” Les Techniques de l’Ingénieur, Traité Génie Mécanique, B5 320, B5 321, B5 347.
- [81] **K. Lee, H. S. Chang,** “Effects of Surface Asperity on Elastohydrodynamic Lubricant NASA Contract. Rep. NASA CR-2195, 1973.
- [82] “**Manuel Industriel de l’Usure et du Grippage,**” Centre Technique des Industries Mécaniques, CETIM, Edition Science et Industrie, Paris, 1973.
- [83] **A. Cornet, J.-P. Deville,** “Physique et Ingénierie des Surfaces” Ed. EDP Sciences, 1998.
- [84] **B.Paffoni, F. Robbe-Valloire, R. Progri, R.Gras,** “Theoretical Analysis For Wear Rate In Mixed Lubrication” actes du 30th Leeds–Lyon Tribology Symposium: Life cycle Tribology and interface engineering series n° 48, Elsevier, (2004), pp. 555-561.
- [85] **J.M. Challen, P.L.B. Oxley,** “An explanation of the different regimes of friction and wear using asperity deformation models”, Wear 53 (1978) 229.
- [86] **P. E. Diachenko,** “ Effect of surface Roughness on the Surface Wear ” in Quality of Surfaces of Machine Details, Mashgiz, Moscow, 1950.
- [87] **J. Blouet,** “ Contribution à l’étude de l’évolution initiale de l’usure dans le cas du frottement de certains métaux ”Thèse de Doctorat d’Etat es Sciences Appliquées, 1973.
- [88] **J. Frêne, D. Nicolas, B. Degueurce, D. Berthe, et M. Godet,** “Lubrification hydrodynamique – Paliers et butées“, Collection de la Direction des Etudes et recherches d’Electricité de France N° 72 (1990), Editons Eyrolles.
- [89] **J. Frêne, D. Nicolas, B. Degueurce, D. Berthe, M. Godet,** “ La lubrification hydrodynamique” Collection de la direction des Etudes et de Recherche d’Electricité de France, Editions Eyrolles.
- [90] **I.V. Kragelsky, V.V. Alicin,** “Frottement, Usure et graissage : Formulaire en 2T”, Ed, MACHINOSTROENIA, MOSCOU, 1979.
- [91] **T. Akagaki, K. Kato,** “ Plastic Flow Process of Surface Layers in Flow Wear under Boundary Lubricated Conditions ” Wear, 117, p. 179-196, 1987.
- [92] **K. L. Johnson, J. A. Greenwood, S.Y. Poon,** “ A Simple Theory of Contact in Elastohydrodynamic Lubrication ” Wear, 19, p. 91-108, 1972.

- [93] **F. Robbe-Valloire**, “Modélisations des Microgéométries de Surface – Application a la Modélisation du Comportement Tribologique” Travail de l’Habilitation à Diriger les Recherches, ISMCM-CESTI, 2000.
- [94] **G. W. Rowe**, “Surface Topographic Changes at Breakdown of Thin-Film Lubrication” *Wear*, 28, p. 125-130, 1974.
- [95] **L. Arizmendi, P. Martín, A. Rincón**, “ The Vibrating effect on the Running-in and in Use Life of Mechanisms ” Eurotrib, 4ème Congrès Européen de Tribologie, 1985.
- [96] **E. Rabinowicz, L.A. Dunn, P.G. Russel**, “A study of abrasive wear under three-body conditions”, *Wear*, 4, p.345-355, (1961).
- [97] **M.M. Khrushev, M.A. Babichev**, “Research on Wear of Metals”, NEL Translation 893, East Kilbride, 1960.
- [98] **M. TAIBI**, “ Frottement des céramiques dans les moteurs industriels : Synthèse bibliographique critique” Thèse de Doctorat, sous la direction de G. Chalant, présentée à l’Ecole National des Arts et Métiers (Paris) en 1993.
- [99] **M. TAIBI**, “ Effet de l’abrasion du couple céramique-métal en frottement lubrifié aux températures élevées dans les moteurs diesel industriels” Thèse de Doctorat d’Etat présentée à l’Université des Sciences et de la Technologie (USTHB), en 1994.
- [100] **B.W.E. Avient, J. Goddard, H. Wilman**, “An experimental study of friction and wear during abrasion of metals”, *Proc. R. Soc. A* 258 (1960) 159.
- [101] **S. Nourouzi**,” Contribution à l’étude du procédé Arc-Fil pour la réalisation de dépôts métalliques durs résistants à l’usure abrasive” Thèse de Doctorat – Université de Limoges Novembre 2004.
- [102] **K.H. Zum Gahr**, “ Wear by hard particles”, in: IM Hutchings (Ed.), *New Directions in Tribology*, Institute of Mechanical Engineers, London, 1997.
- [103] **Y. Xie, J.A. Williams**, “The prediction of friction and wear when a soft surface slides against a hard rough surface”, *Wear* 196 (1996) 21–34.
- [104] **S. Jacobson, P. Wallen, S. Hogmark**, “Fundamental aspects of abrasive wear studied by a new numerical simulation”, *Wear* 123 (1988) 207–233.
- [105] **D.V. De Pellegrin, G.W. Stachowiak**, “Evaluating the role of particle distribution and shape in two body abrasion by statistical simulation”, *Tribol. Int.* 37 (2004) 255–270.

- [106] **T. Kayaba, K. Kato, K. Hokkirigawa**, ‘‘Theoretical analysis of the plastic yielding of a hard asperity sliding on a soft flat surface’’, *Wear* 87 (1983) 151–161.
- [107] **I. Jordanoff, B. Seve, Y. Berthier**, ‘‘Solid third body analysis using a discrete approach: influence of adhesion and particle size on macroscopic properties’’, *Trans. ASME J. Tribol.* 124 (2002) 530–538.
- [108] **K.L. Johnson**, ‘‘Contact Mechanics’’, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- [109] **J. I. Mc Cool**, ‘‘Comparison of models for the contact of rough surface’’, *Wear*, 107, Ed. Elsevier, pp. 37-60, 1986.
- [110] **T.S. Eyre**, ‘‘Development of tribo test methods’’ Présenté au 5th International Congress on Tribology, EUROTRIB 89, Ed. Holmberg et Niemine (1989).
- [111] **I. Nogueira, A. Morão Dias, R. Gras, R. Progri**, ‘‘Influência do Par de Materiais em Contacto no Parâmetro Hidrodinâmico de Lubrificação’’, *Proc. of 7th Portuguese Journeys of Tribology, Porto, 2000*, pp. 75-78.
- [112] **T. Akagaki, K. Kato**, ‘‘Plastic Flow Process of Surface Layers in Flow Wear under Boundary Lubricated Conditions’’, *Wear*, 117, Ed. Elsevier, pp. 179-196, 1987.
- [113] **Y. Yang, A.A Torrance, P.L.B. Oxley**, ‘‘Modelling mechanical wear processes in metallic sliding friction’’, *J. Phys. D Appl. Phys.* 29 (1996) 600–608.
- [114] **F. Robbe-Valloire**, ‘‘Statistical analysis of asperities on a rough surface’’, *Wear*, 249/5-6, Ed. Elsevier, pp. 401-408, 2001.
- [115] **A. Wells, M. P. Shaw**, ‘‘ An Investigation Into Dry Sliding Wear Behaviour of the Ferritic Nitrocarburized Surface of a Plain Low Carbon Steel ’’ *Wear*, 103, p.29, 1985.
- [116] **G.J. Gore , J.D. Gates** , ‘‘Effect of hardness on three very different of wear’’ *Wear* 203-204 (1997) pp. 544-563.
- [117] **N. Ming, C.-W. Qiu**, ‘‘Ferrography for Evaluating Production Engines During Running and Durability Tests’’ *Lubrication Engineering*, vol. 47, n°2, p. 98-100, 1991.
- [118] **R. A. Day, T. J. Reid, D. C. Evans**, ‘‘Development in Liner Technology’’ AE Technical Symp. Paper 28, 1986.
- [119] **F. Robbe-Valloire, J. Blouet**, ‘‘Traitement statistique des données – Application à la métrologie des surfaces’’, *Mécanique – Matériaux – Electricité*, 443, pp. 19-24, 1992.

- [120] **A. V. Sreenath, N. Raman**, “Running-In Wear of a Compression Ignition Engine: Factores Influencing the Conformance Between Cylinder Line and Piston Rings” *Wear*, 38, p. 271-289, 1976.
- [121] **F. Robbe-Valloire, B. Paffoni, R. Gras, J. Blouet**, “ Statistical Repartition of Asperities on a Surface Using Roughness and Waviness Parameters” *Proc. Of the 7th Int. Conf. On Metarology and Properties of Engineering Surfaces, Part 2*, pp. 471-478, Goteborg, 1997.
- [122] **A. V. Sreenath, N. Raman**, “ Mechanism of Smoothing of Cylinder Liner Surface During Running-In ” *Tribology International*, April, p. 55-62, 1976.
- [123] **K.L. Johnson, J.A. Greenwood, S.Y. Poon**, “A Simple Theory of Contact in Elastohydrodynamic Lubrication”, *Wear*, 19, Ed. Elsevier, pp. 91-108, 1972.
- [124] **S. Noguchi, T. Sawamoto**, “Surface Observation of a Tapered Roller Bearing in Running in Process (Part 1): Non-Particules in Oil” *Japness Journal of Tribology*, vol. 37, 2, p. 193-204, 1992.
- [125] **G. W. Rowe, H. Kaliszer, G. Trmal, A. Cotter**, “Running-In of Plain Bearings” *Wear*, 34, p. 1-14, 1975.
- [126] **S. K. Roy Chowdhury, H. Kaliszer, G. W. Rowe**, “ An Analysis of Changes in Surface Topography during Running-In of Plain Bearings ” *Wear*, 57, p. 331, 1997.
- [127] **K. J. Stout, T. G. King, D. J. Whitehouse**, “Analytical Techniques in Surface Topography and their Application to a Running-In Experiment” *Wear*, 43, p. 99, 1977.
- [128] **S. C. Kang, K. C. Ludema**, “Oxide Film Growth and Loss in Lubricated Sliding”. *Int. Conf. On Wear of Materials, Vancouver*, 1985.
- [129] **I. V. Kragelski, V. S. Kombalov**, “ Calculation of Value of Stable Roughness After Running-in (Elastic Contact) ” *Wear*, 14, p. 137-140, 1969.
- [130] **P. Pawlus**, “ A Study on the Functional Proprieties of Honed Cylinders Surface During Running-In ” *Wear*, 176, p. 247-254, 1994
- [131] **I. M. Hutchings**, “Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials” *Butterworth-Heinemann, Oxford*, p. 84, 1992.
- [132] **T. S. Sudarshan, S. B. Bhaduri**, “Wear in Cylinder Linear” *Wear*, 91, p. 269-277, 1983.
- [133] **J. Baumgarten**, “ Reibung und Verschleiss am Kolbenring und Zylinderbuchsen” *Dissertation, TU Berlin*, 1968.

- [134] **L. Wiemann**, “ Die Bildung von Brandspuren auf den Laufflächen der Paarung Kolbenrig- Zylinder in Verbrennungsmotoren ” *Motortechnische Z.*, 32, 2, p. 43, 1971.
- [135] **R. Ostvik, H. Christensen**, “ Changes in Surface Topography with Running-In ” *Proc. Inst. Mech. Eng.*, London, Part 3P, 183, p. 57–66, 1968-1969.
- [136] **T. Sakurai, H. Okabe**, “ Wear Rate of Copper under Boundary Lubrication ” *ASLE Trans.*, 14, 3, p. 221-225, 1971.
- [137] **P. Andersson, J. Juhanko, A.-P. Nikkilä, P. Lintula**, “ Influence of Topography on the Running-In of Water-Lubricated Silicon Carbide Journal Bearings ” *Wear*, 201, p. 1-9, 1996.
- [138] **K. L. Johnson**, “Contact Mechanics and the Wear of Metals” *Wear*, 190, p. 162-170, 1995.
- [139] **J. F. Archard**, “Surface Topography and Tribology” *Tribology International*, October, p. 213-220, 1974.
- [140] **J.L. Ligier**, “Matériaux pour paliers lisses” *Techniques de l’Ingénieur – Traité : Génie Mécanique B5 330*.
- [141] **H. Gahem**, “Contribution à l’étude de matériaux de synchronisation” Thèse de doctorat de l’Université de Paris VI (1994).
- [142] **L. Havet**, “Caractérisation tribologique de biolubrifiants” Thèse de doctorat de l’Université de Technologie de Compiègne (1998).
- [143] **L. Nogueira**, “Transformations des couches superficielles des matériaux induites par la phase de rodage lors des régimes de lubrification mixte et limite” Thèse de Doctorat ENSAM Paris 2004.
- [144] “**F R W Carobronze**” Fournisseur de matière première : 36, Rue André Lemonier 95870 Bezons France Téléphone : 00.331 39 47 86 96.
- [145] **Surfascan 3S** Notice d’exploitation.
- [146] **ISO (1998)** : International Organisation for Standardisation ISO 12085.
- [147] **Système I.S.O**
- [148] **F. Robbe-Valloire, R. Proгри, B. Paffoni, R. Gras**, “ Modélisation de la topographie microgéométrique – Application à la prévision de l’écrasement des surfaces” *Matériaux et Techniques*, 3-4, pp. 33-40, 2000.
- [149] **NF (1986)** : Norme Française NF 05 052.

- [150] **“Total Lubrifiant”** Fournisseur de l’huile de lubrification : 16, Rue de la République
92922 Paris La Défense Téléphone : 00.331. 41. 35. 40. 00.
- [151] **M. Taibi, S. Chabouev, V. Kintchak**, “Etude de l’usure d’un moteur diesel utilisé dans
les installations de forage au Sahara algérien“ Mécanique-Matériaux-Electricité n°382
Octobre 1981, Paris.
- [152] **A.O. Lebeck**, “Parallel sliding Load Support in the mixed lubrication - Part 2:
Evaluation of the mechanisms“, ASME Trans., Vol. 109 (1987), 196-205.
- [153] **F. Robbe-Valloire , B. Paffoni , R. Progri , R. Gras** , “An asperity based Model for
Mixed Lubrication“, International Journal of Applied Mechanics, Vol. 7, N. 3 (2002), pp
973-992.
- [154] **J. Ayel**, “Usure dans les moteurs – formes fondamentales“, Les Techniques de
l’Ingénieur, BM2753 (2004), vol. BL1.
- [155] **A. Magnée**, “Tribologie du frottement sec par abrasion : paramètres directeurs
d’endommagement structuraux et morphologiques“, Actes Journées Francophones de
Tribologie (2002), 22 pages.
- [156] **T. E. Tallian**, “ The Theory of Partial Elastohydrodynamic Contacts” Wear, 21, p. 49-
101, 1972.
- [157] **P. A. Rehbinder, E. D. Scukin**, “ Les phénomènes de surfaces dans la déformation et la
fracture de solides ”, Séminaire de Mécanique des Surfaces, ISMCM, 1971.
- [158] **P. A. Rehbinder**, “Mécanique physico-chimique du frottement dans le travail des
métaux”, Séminaire de Mécanique des Surfaces, ISMCM, Paris, 1971.
- [159] **M. Arbaoui, M. Taibi, F. Robbe-Valloire, R. Progri**, “ Impact de la présence de
pollutions abrasives sur le comportement tribologique de contacts lubrifiés “ Matériaux
et Techniques 94, 279–291 (2006) EDP Sciences- France.
- [160] **B. Lunn**, “The wear resistance of tin bronzes and related alloys“, Wear, Vol. 8 (1965),
pp. 401-406.
- [161] **D. David, R. Caplain**, “Méthodes usuelles de caractérisation des surfaces“ (1988),
Editions Eyrolles.
- [162] **T. Tsukaba, T. Kanado**, ”Evaluation of two and three dimensional surface roughness
profils and their confidence” Wear 109, 1986 pp 69-78.

- [163] **Product Data, Standard Oil Engineered Materials**, Instrument Technologies, Cleveland, Ohio, USA, 1986.
- [164] **B. M. Graça, J. Seabra**, “Oil lubrificante e a manutenção condicionada” Revista Manutenção, 50/51, Julho / Outubro, 1996, pp.13-24.
- [165] **J. J. Trillat et R. Vaille**, “L’adsorption des huiles en relation avec le graissage”, Journal de chimie physique, Tome 33, 1986, pp. 742-758.
- [166] **E. D. Scukin**, “Mécanismes de la plastification par adsorption”, Séminaire de Mécanique des Surfaces, ISMCM, Paris, 1971.
- [167] **J. Ayel, M. Born**, “Lubrifiants et fluides pour l’automobile”, Publications de l’Institut Français du Pétrole, Edition Technip, 1998.

Egalement pour la rédaction de cette thèse, nous avons utilisé comme documentation :

- Polycopies des Cours de Tribologie (période : 1983-1988) donnés par J. Blouet, R. Gras ; ainsi que ceux actualisés par R. Gras, F. Robbe-Valloire (2006/2007),
- Traités de Mécanique : Techniques de l’Ingénieur ;
- **Biceri** : Site Web “<http://www.biceri.co.uk/products/wear>;
- **Wikilivre**: Site Web <http://fr.wikibooks.org/wiki/Tribologie>.