

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOUKHTAR- ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

Faculté des sciences de l'ingénierat  
Département de génie mécanique

Année : 2018

## THESE

Présentée en vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences

---

---

### Simulation Numérique de l'Usure Superficielle du Carbure Métallique sous Hautes Sollicitations Thermomécaniques

---

---

#### Option

Construction Mécanique

#### Par

Riad Harouz

**DIRECTEUR DE THÈSE :** Pr. Said. Boudebane

Université Badji Mokhtar Annaba

#### DEVANT LE JURY

##### **PRESIDENT :**

Abdel aziz .Mahmoud Bouchelaghem Professeur

Université Badji Mokhtar Annaba

##### **Co-rapporteur**

Noureddine Abdelbaki

Professeur

Université Akli oulhadj Bouira

##### **EXAMINATEURS :**

Hamid .Boucherit

Professeur

Université 8 Mai 1945 Guelma

Azzedine .Bouzaouit

Professeur

Université 20 Aout 1955 Skikda

Amar .Dib

Dr .MCA

Université Badji Mokhtar Annaba

## **Remerciements**

Le présent travail a été effectué sous la direction de Monsieur le Professeur **Said Boudebane**, enseignant à l'université d'Annaba département de métallurgie. Je tiens à lui exprimer ma reconnaissance pour la confiance qu'il m'a accordée et pour l'intérêt qu'il a constamment porté à mes travaux de recherche. Ainsi je remercie mon co-encadreur Monsieur le Professeur **Noureddine Abdelbaki**, Directeur de l'institut de technologie, à l'université de Bouira pour toutes ses contributions.

Je tiens à remercier très sincèrement Monsieur le Directeur général **Mohamed Rehamnia**, ERIS BATNA, de m'avoir accepté et facilité les procédures de séjour au sein de l'établissement pour préparer mes éprouvettes (cermets), ainsi que toute l'équipe de l'unité carbure pour leurs suggestions et conseils durant le séjour.

Je tiens aussi à remercier très sincèrement Madame le Professeur **Jacqueline Lecomte Beckers** de m'avoir accepté pour deux stages de court séjour au sein du laboratoire ainsi qu'à toute l'équipe du laboratoire Sciences des Matériaux Métalliques du Département de Génie Mécanique et Aérospatiale de Liège Belgique, particulièrement à **Olivier Dedry, Henri-Michel Montrieux et Jérôme Tchoufang Tchuindjang**.

Mes remerciements à l'équipe de jury de soutenance de ma thèse de doctorat en science à leur tête le président Professeur **Abdel aziz Bouchelaghem** à l'université Badji Mokhtar d'Annaba pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de la commission d'examen de ma présente thèse de doctorat. Je remercie profondément les membres de jury d'avoir aimablement accepté d'examiner ma thèse, Monsieur le Professeur **Azzidine Bouzaouit** de l'université de Skikda, Monsieur le Professeur **Hamid Boucherit** de l'université de Guelma et le Docteur Maître de conférence classe A **Amar Dib** de l'université Badji Mokhtar d'Annaba.

Je voudrais associer à ces remerciements toutes les personnes qui ont contribué de près et de loin à l'aboutissement de ce travail, à leurs têtes les enseignants et les collègues (**Abdel aziz Lakehal, Adel Bouchareb, Khaled Khelil**).

Mes dernières pensées à mes parents, à ma femme et à mes enfants pour leur soutien moral, auprès des quels j'ai trouvé soutien et encouragement durant la préparation de cette thèse.

### Résumé :

Pour L'industrie, la maîtrise de l'usure des organes d'équipements industriels est d'une importance capitale, surtout si l'impact est économique. L'usure d'un matériau est un processus complexe, étroitement lié à différents facteurs mécaniques, thermiques et autres. L'usure, est avant tout un problème d'interface (tribologie). Ce qui justifie le choix de ce thème de recherche. Le travail de thèse est donc consacré à l'étude de l'usure dans les conditions thermomécaniques sévères, des céramiques métalliques (cermets), de compositions (WC-Co-TiC). Pour faire, nous proposons, dans le cadre de cette thématique de développer les parties suivantes :

- La première partie est consacrée aux résultats expérimentaux et dans laquelle, on s'intéresse tout particulièrement au volume d'usure en fonction des paramètres thermomécaniques.
- La deuxième partie sera consacrée à une méthodologie de simulation numérique de l'usure sous hautes sollicitations thermomécaniques.

Ce travail vise à étudier le comportement tribologique, à température relativement élevée, des cermets préparés selon la procédure de la métallurgie des poudres. Quatre cermets WC/TiC-Co ont été préparés : trois avec différentes additions de TiC (5%, 10% et 15%), et une quatrième WC-Co sans TiC, considérée comme matériau de référence. Des essais de frottement ont été effectués, à deux températures de contact différentes de (450°C et 650°C) et deux vitesses de glissement (0.75, 0.5m/s) en utilisant un tribomètre à haute température en contact avec une bille d'alumine sous une charge de 20 N. Les résultats ont montré une nette influence des ajouts de TiC sur le comportement thermomécanique de cermet WC-Co.

**Mots clés** : usure, thermomécanique, tribologie, simulation numérique, WC-Co-TiC

### **Abstract :**

In industry, the control of the wear of industrial equipments is of paramount importance, especially if the impact is economic. The wear of a material is a complex process, closely related to mechanical and thermal factors, and wear is primarily an interface problem (tribology). This work is devoted to the study of the wear under severe thermo-mechanical conditions of metallic ceramics (cermets) of compositions (WC-Co-TiC). To do this end, we propose developing the following parts:

- The first part is devoted to the experimental results. We are particularly interested in the volume of wear as a function of the thermo-mechanical parameters.
- The second part will be dedicated to a numerical simulation of wear under high thermo-mechanical stresses.

This work aims at studying the tribological behavior, at relatively high temperatures, of cermets prepared according to the procedure of powder metallurgy.

Four WC / TiC-Co cermets were prepared with three different TiC additions (5%, 10% and 15%), and a WC-Co grade without TiC considered as reference material. Friction tests were carried out at two different contact temperatures of (450 °C and 650 °C) and two slip speeds (0.75, 0.5 m/s) using at high temperature tribometer in contact with a ball of alumina with a load of 20 N. The results showed a clear influence of TiC additions on the thermomechanical behavior of WC-Co cermet.

**Key words:** wear, thermo-mechanical, tribology, numerical simulation, WC-Co-TiC.



## خلاصة

بالنسبة للصناعة يكون التحكم في تآكل المعدات الصناعية ذي أهمية قصوى خاصة إذا كان التأثير ذو أبعاد اقتصادية. إن تآكل المادة عملية معقدة فيزيائياً ترتبط ارتباطاً وثيقاً بالعوامل الميكانيكية والحرارية. والتآكل في المقام الأول هو مشكلة التصاق (علم التلامس). هذه الأطروحة مكرسة لدراسة التآكل تحت الظروف الحرارية الميكانيكية الشديدة السيراميك **الأمعدي** (سيرميت او خزف) من التراكيب (WC-Co-TiC). للقيام بذلك نقترح تطوير الأجزاء التالية:

- الجزء الأول مخصص للنتائج التجريبية ، وأهمها يهتم بشكل خاص بحجم التآكل كدالة في الوسائط الحرارية.
- سيتم تخصيص الجزء الثاني للمحاكاة العددية للتآكل تحت تأثيرات عالية من الحرارة و الضغط.

يهدف هذا العمل إلى دراسة التصرف التلامسي ، في درجة حرارة عالية نسبياً ، من سيرميت أعدت وفقاً لطريقة تعدين المساحيق. تم إعداد أربعة أطباق خزفية (WC / TiC-Co) بثلاثة إضافات مختلفة (TiC 5% و 10% و 15%) ، وتدرج WC-Co بدون TiC كمادة مرجعية. أجريت اختبارات الاحتكاك في درجتين مختلفتين من درجات الحرارة (450 درجة مئوية و 650 درجة مئوية) وسرعتين (0.5، 0.75 م / ث) باستخدام مقياس درجة حرارة عالية على اتصال مع الكرة من الألومينا مع حمولة من 20 N. أظهرت النتائج تأثيراً واضحاً على إضافات TiC على السلوك الحراري لسلك WC-Co

**كلمات البحث:** تآكل ، الميكانيك الحرارية ، علم لاحتكاك, اختبارات تجريبية, محاكاة عددية, WC-Co-TiC.

## Tables des matières

<b>Remerciements</b> .....	<b>1</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>2</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>خلاصة</b> .....	<b>4</b>
<b>Tables des matières</b> .....	<b>5</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>10</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>14</b>
<b>Principales notations</b> .....	<b>15</b>
<b>Introduction Général</b> .....	<b>17</b>

### Chapitre I :Recherche Bibliographique :.....21

<b><u>I-1 : Problématiques et endommagement des surfaces</u></b> .....	<b>22</b>
I-1-1 Introduction .....	22
I-1-2 Histoire de la tribologie .....	23
I-1-3 Problématique et contexte industriel .....	26
I-1-3-1 Problématique.....	26
I-1-3-2 Contexte industriel.....	27
I-1-4 Procédure et objectif de l'étude: .....	28
I-1-5 Les causes de l'usure .....	28
I-1-6 Problématique des différents contacts relatifs et endommagements des surfaces...	30
I-1-6-1 Notion de surface .....	30
I-1-6-2 Surfaces et environnement de contact .....	31
I-1-6-3 Action de contact de surface.....	32
I-1-6-4 Différents modes de contacts.....	33
I-1-7 Endommagement des surfaces .....	34
I-1-7-1 Définition de l'endommagement.....	34
I-1-7-2 Différents types d'endommagements .....	36
Endommagement par fatigue thermique.....	36
Endommagement par déformation plastique.....	36
Endommagement par formation de couches de « transfert ».....	37
Endommagement par usure abrasive .....	38
I-1-8 Mécanismes d'usure.....	38
I-1-8 -1 L'usure par abrasion .....	38
I-1-8 -2 L'usure par transfert ou adhésion.....	39

I-1-8 -3 L'usure par fatigue cyclique .....	39
I-1-8 -4 L'usure par réactions tribochimiques.....	40
I-1-9 Approches quantitatives de l'usure et loi d'usure.....	41
I-1-9-1 Comportement de l'interface dans un contact thermomécanique.....	41
I-1-9-2 Loi d'usure.....	42
I-1-9-3 Aspect thermique du contact.....	42
I-1-9-4 Procédure de calcul du taux d'usure.....	43
I-1-9-5 Méthodologie de la prédiction d'usure.....	44
Influence de la force normale appliquée W et la force tangentielle.....	44
Influence du comportement thermique.....	44
I-1-10 Techniques d'analyses du frottement et de l'usure des surfaces des cermets après tests d'usure.....	45
I-1-10-1 Démarche d'analyse du frottement de l'usure.....	45
I-1-10-2 Analyse des surfaces par profilométrie.....	45
I-1-10-3 Caractérisation des surfaces usées .....	46
I-1-10-4 La prédisposition des matériaux pour créer des débris d'usure .....	47
La création et l'évolution de ces débris .....	48
Le comportement du lit de débris.....	48
I-1-10-5 Types de régimes de frottement.....	49
I-1-10-6 Processus de vieillissement d'un matériaux frottant.....	50

<b><u>I-2 :Préparation et caractérisations des cermets :</u>.....</b>	<b>52</b>
I-2-1 Métallurgie des poudres.....	52
I-2-2 Elaboration de la poudre.....	52
I-2-1-1 La poudre WC-Co.....	52
I-2-1-2 La poudre TiC.....	53
I-2-1-3 Caractéristiques et propriétés des TiC.....	54
Caractéristiques atomiques du carbone et du titane .....	54
Propriétés et caractéristiques du carbone et du titane (TiC) .....	54
I-2-3 Le processus de préparation de la poudre avant le frittage.....	55
I-2-4 Procédure de frittage, tests de dureté et caractérisation des échantillons (cermets).....	56
I-2-4-1 Techniques de préparation de la poudre et de l'échantillon avant frittage.....	56
I-2-4-2 Opération de frittage.....	57
I-2-4-3 Processus du frittage dans le four.....	58
I-2-4-4 Caractérisation des échantillons après frittage.....	58
I-2-5 Objectif et protocole des tests de frottement.....	59

I-2-5-1 Objectif des tests de frottement.....	59
I-2-5-2 Protocole des tests de frottement.....	59

<b>I-3: Procédure de Simulation de l'Usure.....</b>	<b>61</b>
I-3-1 Modèle d'usure utilisé par les codes de calcul.....	61
I-3-2 Processus de la simulation d'un Modèle d'usure .....	61
I-3-2-1 Définition de l'usure sévère et légère considérée dans les codes .....	61
I-3-1-2 Modèle de contact de simulation l'usure .....	62
I-3-1-3 Modèle d'usure de glissement dans un contact .....	63
I-3-3 Condition d'état d'un Processus d'usure .....	64
I-3-4 Répartition de la pression par la MEF .....	64
I-3-5 Organigramme général d'une simulation numérique de l'usure par un code .....	66
I-3-6 Exemple de simulation de l'usure de deux rouleaux cylindriques en contacts ...	67
I-3-7 Conclusion .....	69

<b><u>Chapitre II : Techniques d'élaboration et analyses des (Cermets) :.....</u></b>	<b>71</b>
---	-----------

<b>II-1 <u>Technique de préparation des matériaux par la métallurgie des poudres</u>.....</b>	<b>72</b>
II-1-1 Introduction .....	72
II-1-2 Composition des échantillons .....	73
II-1-3 Granulométrie des poudres .....	73
II-1-4 Pesée des nuances .....	74
II-1-5 Broyage de la poudre.....	74
II-1-6 Opération de séchage et tamisage.....	74
II-1-7 Compression et étuvage de la poudre.....	75
II-1-8 Procédure de frittage des échantillons .....	75
II-1-9 Mesures et techniques de caractérisation des éprouvettes.....	76
Mesures des caractéristiques.....	76
Préparation des échantillons avant les tests de frottement .....	77
II-1-10 Caractérisation des éprouvettes .....	77
II-1-10-1 Analyse de la microstructure par MEB des éprouvettes cermets avant les tests d'usure .....	77

II-1-10-2 Analyse de la microstructure des cermets par DRX des éprouvettes avant les tests d'usure .....	80
--	----

<b>II-2 : <u>Procédure du protocole expérimental</u> :</b> .....	<b>83</b>
II-2-1 Descriptions du dispositif expérimental .....	83
II-2-1-1 Description du tribomètre pion sur disque .....	83
II-2-2-2 Paramètres thermomécaniques du tribomètre .....	85
II-2-2 Procédure des tests de frottement et d'usure .....	85
II-2-2-1 Processus et objectif des tests de frottement des éprouvettes .....	85
II-2-3 Procédure de mesure des taux d'usure.....	86
II-2-3-1 Processus d'analyse de la piste d'usure .....	86
II-2-3-2 Les étapes de calcul du volume d'usure des pistes usées par un programme de discrétisation sur Excel .....	88
II-2-4 Exemple de calcul du taux d'usure d'une piste usée sectionnée en quatre tronçons .....	90
II-2-5 Conclusion .....	92

<b><u>Chapitre III : Méthodologie d'analyse et simulation numérique de l'usure</u></b> .....	<b>93</b>
--	-----------

<b>III-1 : <u>Algorithme de simulation de l'usure par un code basé sur la méthode des éléments finis</u> :</b> .....	<b>94</b>
III-1-1 Introduction .....	94
III-1-2 Etapes d'analyse de l'usure par la méthode des éléments finis .....	95
III-1-3 Les étapes principales pour une simulation numérique de l'usure de deux surfaces en contact.....	95
III-1-4 Organigramme de la méthode de simulation numérique de l'usure par un code...97	
Code de calcul multi-physis pour analyse de l'usure (Ansys).....	98

<b>III-2 : <u>Modèle d'Archard modifié utilisé pour la simulation de l'usure dans les Conditions thermomécaniques</u></b> .....	<b>100</b>
III-2-1 Modèle d'Archard modifié utilisé par le code de simulation de l'usure.....	100
III-2-2 Procédure de calcul du volume d'usure par simulation numérique .....	101
Procédure itérative du modèle.....	101
III-2-3 Procédure de la mise à jour de la géométrie.....	102

III-2-4 Les commandes de l'usure utilisées par le code .....	104
III-2-5 Exemple d'un fichier de données utilisé par le code de calcul pour une simulation de l'usure et affichage des résultats (géométrie).....	105
III-2-6 Conclusion.....	106

<b>Chapitre IV : Résultats et Analyses .....</b>	<b>107</b>
--	------------

<b>IV-1 Résultats du Frottement et des Taux d'Usure : .....</b>	<b>108</b>
IV-1-1 Introduction .....	108
IV-1-2 Résultats et analyse de la comparaison du coefficient de frottement des différentes nuances en fonction des deux températures .....	109
IV-1-3 Résultats et analyse de la comparaison du coefficient de frottement de chaque paramètre en fonction des différentes nuances.....	111
IV-1-4 Résultats et analyse de comparaison de l'évolution de coefficient de frottement des deux vitesses de glissement pour les paramètres (P2) et (P3) des deux nuances (NC) et (ND) .....	113
IV-1-5 Analyses de l'évolution des coefficients de frottement des différentes nuances en fonction des paramètres (P2), (P3) et (P4).....	114
IV-1-6 Résultats et analyses des taux des volumes usés.....	116
IV-1-6-1 Résultats et analyses du taux d'usures des différentes nuances en fonction du paramètre (P4).....	116
IV-1-6-2 Résultats du taux de volume usé des différentes nuances en fonction des deux paramètres (P2) et (P3).....	116
IV-1-7 Résultats de comparaison des taux de volume usé des différentes nuances en fonction des deux paramètres (P3) et (P4) .....	118

<b>IV-2 Résultats de la Microstructure :.....</b>	<b>119</b>
IV-2-1 Résultats et analyse de la microstructure de la piste d'usure par MEB .....	119
IV-2-2 Résultats et Analyse de la microstructure de la piste d'usure par EDX .....	121
IV-2-3 Analyse du mécanisme de dégradation tribologique et la résistance à l'usure à haute température des cermets.....	127
IV-2-4 Conclusion .....	128
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>129</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>134</b>

## Liste des figures

<b>Figure.(I-1.1)</b> : Géométries de contacts.....	22
<b>Figure. (I-1.2)</b> :Surface usée sous sollicitation fatigue thermique.....	28
<b>Figure.(I-1.3)</b> :Système tribologique et débit de troisième corps.....	29
<b>Figure.(I-1.4)</b> ): La topographie d’une surface.....	31
<b>Figure.(I-1.5)</b> : Empreinte d’un contact sous pression sphère – plan.....	32
<b>Figure.(I-1.6)</b> : Principes des dispositifs de laboratoire pour l’étude expérimentale des différents modes de contacts.....	34
<b>Figure.(I-1.7)</b> : Fissuration superficielle de surface par endommagement thermique.....	36
<b>Figure.(I-1.8)</b> : Microstructure d’une déformation plastique sous sollicitations thermomécaniques.....	37
<b>Figure.(I-1.9)</b> ): Microstructure d’un endommagement par usure abrasive sous sollicitations thermique.....	38
<b>Figure.(I-1.10)</b> : Différents mécanismes d’usure (a) usure adhésive (b) usure abrasive (c) usure par fatigue (d)décohésion de renfort.....	41
<b>Figure.(I-1.11)</b> : Lignes de flux thermiques traversant le contact pion disque.....	43
<b>Figure.( I-1.12)</b> : a/ Profilomètre d’analyse de la surface b/Profil d’usure .....	46
<b>Figure.(I-1.13)</b> ): Modes de frottement : tangentiel, radial, rationnel, torsion.....	47
<b>Figure.(I-2.1)</b> : Microstructure de la poudre comprimée WC et Co.....	53
<b>Figure.( I-2.2)</b> ): Microdureté d’un échantillon Wc-Co-TiC.....	59
<b>Figure.(I-3.1)</b> : Modèle de contact de simulation de l’usure.....	62
<b>Figure.(I-3.2)</b> : Deux surfaces de contact glissant se déplacent avec des vitesses périphériques de $v_1$ et $v_2$ provoquant une déformations tangentielle(usure)....	63
<b>Figure.(I-3.3)</b> : Organigramme générale d’une simulation numérique de l’usure par un code .....	67
<b>Figure.(I-3.4)</b> : Modèle de contact entre deux rouleaux.....	68

<b>Figure.(I-3.5 ):</b> Résultat de la simulation de l'usure d'une surface de contact du rouleaux pendant un cycle.....	69
<b>Figure.(II-1-1):</b> Broyeur à bille de la poudre.....	74
<b>Figure.(II-1-2):</b> Tamisage de la poudre.....	75
<b>Figure.(II-1-3):</b> Presse hydraulique utilisée pour le pressage des échantillons.....	75
<b>Figure.(II-1-4):</b> Four de frittage.....	76
<b>Figure.(II-1-5):</b> Echantillon cermet obtenu après frittage.....	76
<b>Figure.(II-1-6):</b> ( a),(b),(c),(d) Microstructure par MEB de la nuance (NB) 5% TiC avant tests d'usure.....	77
<b>Figure (II-1-7):</b> ( a),(b),(c),(d) Microstructure par MEB de la nuance (NC) 5% TiC avant tests d'usure .....	78
<b>Figure.( II-1-8):</b> ( a),(b),(c),(d) Microstructure par MEB de la nuance (ND) 5% TiC avant tests d'usure.....	79
<b>Figure.(II-1-9):</b> Microstructure par MEB de la nuance (NA) sans TiC avant tests d'usure .	80
<b>Figure.(II-1-10):</b> Résultats d'intensité de l'analyse de l'échantillon de la nuance (NA) par DRX.....	81
<b>Figure.(II-1-11):</b> Résultats de l'analyse de l'échantillon nuance (NB) par DRX.....	82
<b>Figure.(II-2.1):</b> Tribomètre à haute température( CSM Instruments Suisse) .....	83
<b>Figure.(II-2.2):</b> Processus de l'essai de frottement entre la bille en Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Pin) et les cermets (Disc).....	84
<b>Figure.(II-2.3):</b> Interface du tribomètre utilisé (le module / Version 4.4.Q) .....	84
<b>Figure.(II-2.4):</b> Profil mètre d'analyse des surface.....	87
<b>Figure.(II-2.5):</b> Trace de la piste d'usure après essai de frottement.....	87



<b>Figure.(II-2.6):</b> (a),(b),(c),(d) Profils de la profondeur( $\mu\text{m}$ ) et largeur en (mm)de la piste d'usure de chaque tronçons prise par le profilomètre optique .....	88
<b>Figure.( II-2.7 ):</b> Les quatre tronçons prises par le profilomètre optique de chaque piste espacés de $90^\circ$ pour mesurer le volume moyen usé.....	88
<b>Figure.(III-1-1):</b> Modèle de contact et maillage de la géométrie.....	96
<b>Figure.(III-1-2):</b> Maillage rectangulaire raffiné au niveau de la zone de contact usée.....	97
<b>Figure.(III-1-3):</b> Résultats d'une surface usé (déformation plastique) pour une géométrie de contact de 6 mm après un cycle pour des paramètres ( $T=650^\circ\text{C}$ , $F= 20\text{N}$ , $V=0.5\text{m/s}$ )... ..	94
<b>Figure.( III-1-4 ):</b> Organigramme de la méthode de simulation numérique de l'usure par un code.....	95
<b>Figure.(III-2-1):</b> Géométrie de la mise à jour profondeur d'une surface.....	103
<b>Figure.(III-2-2 ):</b> Résultat d'un contact usé par une simulation.....	105
<b>Figure.(IV-1-1):</b> Comparaisons des coefficients de frottements des différents nuances en fonction des deux températures ( $450^\circ\text{C}$ et $650^\circ\text{C}$ ) des paramètres (P3) et (P4)... ..	109
<b>Figure.(IV-1-2 ):</b> Evolutions des coefficients de frottements pour les différentes nuances en fonctions des paramètres (P2), (P3) et (P4).....	111
<b>Figure.(IV-1-3):</b> Evolution du coefficient de frottement pour les deux vitesses des paramètres (P2) et (P3) des nuances (NC) et (ND).....	113
<b>Figure.(IV-1-4):</b> Résultats de la comparaisons de l'évolutions des coefficients de frottements des différents nuances en fonction des paramètres (P2),(P3) et (P4).....	114
<b>Figure.(IV-1-5 ):</b> Evolution des taux des volumes usées des différentes nuances en fonction du paramètre (P4) .....	116
<b>Figure.(IV-1-6):</b> Comparaison du taux de volumes usés des différentes nuances en fonctions des deux vitesses de glissements ( $0.75\text{m/s}$ et $0,5\text{m/s}$ ) des paramètres (P2) et (P3).....	117
<b>Figure.( IV-1-7):</b> Résultats de la comparaison du taux de volume usé de différentes nuances en fonction des deux températures des paramètres (P3)et (P4).....	118

**Figure.(IV-2-1):** Images de la microstructure par MEB avec un grossissement (500  $\mu\text{m}$ ) des différentes pistes usées en fonctions des paramètres (P1(a), P2(b),P3(c),P4(d) de la nuance (NB) 5% TiC après les tests de frottements.....119

**Figure.( IV-2-2 ):** Images de la microstructures par MEB avec un grossissement ( 8, 20, 50  $\mu\text{m}$ ) des différentes pistes usées en fonctions des paramètres (P1(a), P2(b),P3(c),P4(d) de la nuance (NB) 5% TiC après les tests de frottements.....122

**Figures.(IV-2-3 ):**(a) ,(b),(c) : Image par MEB/EDX de la microstructure de la piste de frottement de la nuance (NB) en fonction des paramètres (P1)... .....122

**Figure.(IV-2-4 )(a) ,(b):** Image par MEB/EDX de la microstructure de la piste de frottement de la nuance (NB) en fonction des paramètres (P2)..... 123

**Figure.(IV-2-5) (a),(b),(c) :** Image par MEB/EDX de la microstructure de la piste de frottement de la nuance (NB) en fonction des paramètres .....125

**Figure.( IV-2-6) (a),(b),(c),(d):** Image par MEB/EDX de la microstructure de la piste usée de la nuance (NB) en fonction des paramètres (P4)..... 126

## **Liste des tableaux**

<b>Tableau.( I-2.1 ):</b> Propriétés thermomécaniques du TiC.....	<b>55</b>
<b>Tableau.(II-1-1):</b> Compositions des nuances.....	<b>73</b>
<b>Tableau.(II-1-2):</b> Tailles des grains de la poudre (TiC-WC) des cermets.....	<b>73</b>
<b>Tableau.(II-1-3):</b> Poids massiques des différents nuances.....	<b>74</b>
<b>Tableau.(II-1-4):</b> Caractéristiques (densité et dureté) des échantillons mesurés après frittage.....	<b>76</b>
<b>Tableau.( II-1-5):</b> Résultats d’analyse par DRX de l’échantillon cermet référence (NA).....	<b>80</b>
<b>Tableau.(II-1-6):</b> Résultats d’analyse par DRX de l’échantillon (ND).....	<b>81</b>
<b>Tableau.(II-2.1):</b> Densité et dureté de la bille en alumine Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	<b>84</b>
<b>Tableau.( II-2-2 ):</b> Paramètres thermomécaniques des tests de frottements appliqués sur chaque nuances.....	<b>86</b>
<b>Tableau.(II-2.3):</b> Les données introduites dans un code de calcul par Excel pour calculer le volume utilisé .....	<b>90</b>
<b>Tableau.(II-2.4):</b> Résultats moyens de calcul le volume utilisé, coefficients d’usure et ecart-type.....	<b>91</b>
<b>Tableau.(III-2-1):</b> Dureté en pourcentage du matériau WC-Co en fonction de la température .....	<b>101</b>
<b>Tableau.(IV-2-1):</b> Différents pourcentages d’éléments de la microstructure MEB/ EDX de la piste usée.....	<b>123</b>
<b>Tableau.(IV-2-2):</b> Différents pourcentages d’éléments de la microstructure MEB/ EDX de la piste usée.....	<b>124</b>
<b>Tableau.(IV-2-3 ):</b> Différents pourcentages d’éléments de la microstructure MEB/EDX de la piste usée en fonction.....	<b>125</b>
<b>Tableau.(IV-2-4):</b> Différents pourcentages d’éléments de la microstructure MEB/ EDX de la piste usée après test de frottement en fonction des paramètre (P4).....	<b>127</b>

**Principales notations**

P	:Pression de contact sur une surface.
$F_N$	:Force normale de contact.
A	:L'aire de contact entre deux surfaces.
a	:Rayon de contact de deux surfaces.
R	:Rayon de la sphère en contact des deux matériaux.
$\varepsilon$	:Coefficient de poisson.
E	:Module de YOUNG.
V	: Volume usé.
K	: Coefficient d'usure.
S	: Distance parcourue.
$\Delta h$	:Variation de la profondeur d'usure après un cycle.
$\Delta t$	:Variation du temps après un cycle.
v	: Vitesse de glissement.
H	:Dureté de la surface de contact la plus douce.
$S_i$	:Point de surface de contact d'itération(i) requis à l'initiation.
$v_i$	:Vitesse de glissement au point de contact.
$h_{i,new}$	: Profondeur d'usure obtenue sur la surface i.
$h_{i,old}$	:Profondeur d'usure initial au points i.
$\omega$	:Vitesses angulaires.
t	:Temps de contact.
$p_m$	:Pression moyenne de contact.
$\gamma$	:Conductivité thermique.
$\mu$	:Coefficient de frottement.

## **Principales notations**

---

$N_t$	: Cycle d'usure total.
$\Delta N$	: Différence des nœuds déplacés par cycle.
$\sigma$	: Contrainte appliquée sur la surface.

# Introduction Générale

# Introduction Générale

Les céramiques métalliques (cermets), faisant l'objet de notre étude, sont composées de poudres (WC-Co-TiC) fabriquées par la technique de la métallurgie des poudres conventionnelles[1,2]. Ces cermets sont initialement prévus comme outils de coupe, connaissent ces dernières années un développement considérable, pour des utilisations sous hautes sollicitations thermomécaniques [3,4]. Les cermets qui sont généralement composés d'une céramique et d'un liant métallique, présentent une dureté élevée, une excellente résistance à l'usure, un faible coefficient de frottement à haute température, une résistance à l'oxydation, et une haute stabilité thermique et chimique. La microstructure de ces cermets et leurs comportements tribologiques ont déjà fait l'objet de plusieurs travaux [5-11]. Ces cermets sont utilisés dans de nombreux champs d'applications industrielles, à titre d'exemple, comme filières et galets de laminage à chaud pour l'obtention du fer rond à béton, comme outils de forages, matrices d'estampage à chaud, et équipements pour l'aérospatiale [12-17].

Lorsque deux corps en contact sont animés d'un mouvement relatif, une force de frottement s'oppose au mouvement. On observe, une modification géométrique des surfaces de contact. Cette modification géométrique est un endommagement (usure) qui a été classiquement défini comme une perte de masse pour l'un ou l'autre des solides en contact. Cette perte de masse provoque un endommagement de l'un de surface en contact, qui est reliée à plusieurs paramètres ( fonctionnement, contact et d'environnement).

Les céramiques (WC-Co) présentent plusieurs types endommagement d'ordre tribologique (oxydation, usure), sous hautes sollicitations thermomécaniques, vitesse de glissement, charge appliquée et température de contact[18-19]. Cependant, ces céramiques (WC-Co) ont un certain nombre de limitations de performances, telles que la mauvaise résistance à l'oxydation, à la corrosion [20-24], l'aptitude à la décarburation ce qui conduit à l'apparition de phases fragiles altérant les propriétés mécaniques du matériau [25,26]. D'autres études sur l'usure des cermets sont concentrées sur les applications de coupe de métal, qui sont clairement loin des conditions des processus sévères de contacts et de fonctionnements [27-29].

Parmi les voies susceptibles d'améliorer le comportement tribologique à chaud de ces céramiques, l'incorporation de carbure stable tel que TiC, est une voie prometteuse [30-33].

Le carbure de titane (TiC) est largement utilisé comme composant céramique dans les cermets en raison de son point de fusion élevé (3065°C), de sa dureté et de sa résistance à l'usure[34-39].

Plusieurs travaux récents ont signalé une amélioration sensible des performances tribologiques à température ambiante suite à l'introduction du carbure de titane (TiC) dans le mélange de poudres de départ (WC-Co) [22,24-26]. Les carbures cémentés (WC-CO-TiC) présentent aussi une forte dureté à haute température [40-43]. Plusieurs auteurs ont signalé une amélioration de la résistance de l'usure des cermets (WC-Co) par l'incorporation de particules de carbure, telles que le TiC, pour former des composites à matrice métallique[44-49].

C'est dans ce contexte que s'inscrit l'objectif de cette thèse de recherche. Ce travail se décompose en quatre chapitres. Le premier chapitre présente une recherche bibliographique détaillée sur l'usure, des surfaces, sur la préparation et la caractérisation des cermets. Le deuxième chapitre s'intéresse à la technique de l'élaboration du matériau (cermet), les techniques de caractérisations et d'analyses. Dans le troisième chapitre, une méthodologie de simulation de l'usure utilisant un code (Ansys) est proposée. Le quatrième chapitre est consacrée à la présentation et l'analyse des résultats expérimentaux obtenus.

- **Le premier chapitre se décompose en trois sous chapitres :**

- Dans le premier sous chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique des principaux éléments tribologiques nécessaires à l'étude du contact sec en partant des notions tribologiques. Ce sous chapitre traite de différentes problématiques d'endommagements et comportements des surfaces rencontrées dans le domaine industriel, provoquées par des sollicitations sévères (thermomécaniques) aux contacts de deux matériaux.
- Le deuxième sous chapitre présente une synthèse bibliographique sur la méthodologie d'élaboration, des tests et des analyses du matériau (cermet) mis en œuvre au cours de cette étude.
- Le troisième sous chapitre présente la procédure de simulation de l'usure par le code de calcul (Ansys).

- **Le deuxième chapitre se décompose en deux sous chapitres :**

- Le premier sous chapitre présente le processus d'élaboration des éprouvettes (cermets), les moyens techniques, et de caractérisation.
- Le deuxième sous chapitre présente le protocole expérimental des tests de frottement des échantillons (cermets), les moyens et dispositifs utilisés pour ces



tests. Les processus des tests de frottement, leurs différentes caractérisations, par l'analyse des pistes usées, sont également présentés.

- **Le troisième chapitre se décompose en deux sous chapitres :**

- Le premier sous chapitre présente une procédure d'analyse de l'usure par la méthode des éléments finis qui comporte.
  - Les différentes étapes de simulation d'un contact de deux matériaux.
  - Calcul de la pression de contact puis introduction du modèle et des paramètres d'entrées (sous programme).
  - Affichages des résultats de simulation.
- Le deuxième sous chapitre aborde, le modèle d'Archard modifié pour une simulation de l'usure, dans des conditions thermomécaniques sévères. Ce modèle qui a été développé pour être injecté dans un code Multi physique (Ansys) afin de prédire l'évolution de la géométrie de contact (usure).

- **Le quatrième chapitres se décompose en deux sous chapitres :**

- Dans le premier sous chapitre, nous avons analysé les résultats des tests de frottement, afin de comprendre l'évolution des coefficients de frottement pour les différentes nuances en fonction des différents paramètres.
- Dans le deuxième sous chapitre, nous avons analysé les résultats de la microstructure par (MEB/EDX) du matériau (cermet) pour différentes conditions. Cette analyse de la microstructure, des pistes usées pour les différents paramètres a pour objectif de comprendre le comportement tribologique de dégradation du cermet.

# Chapitre I : Recherche Bibliographique

## I-1 Problématiques et endommagements des surfaces :

### I-1-1 **Introduction**

I-1-2 Histoire de la tribologie

I-1-3 Problématique et contexte industrielle

I-1-4 Procédure et objectif de l'étude

I-1-5 Les causes de l'usure

I-1-6 Problématique des différents contacts relatifs et endommagements des surfaces

I-1-7 Endommagements des surfaces

I-1-8 Mécanismes d'usure

I-1-9 Approches quantitatives de l'usure et loi d'usure

I-1-10 Techniques d'analyses le frottement et l'usure des surfaces des cermets après tests d'usure.

## I-2 Préparation et caractérisation des cermets :

I-2-1 Métallurgie des poudres

I-2-2 Elaboration de la poudre

I-2-3 Le processus de préparation la poudre avant le frittage

I-2-4 Procédure de frittage, tests duretés et caractérisations les échantillons (cermets)

I-2-5 Objectif et protocole des tests de frottements

## I-3 Procédure de Simulation de l'Usure :

I-3-1 Modèle d'usure utilisé par les codes commerciaux

I-3-2 Processus de la simulation d'un Modèle d'usure

I-3-3 Condition d'état d'un Processus d'usure

I-3-4 Détermination de la répartition de la pression par la MEF

I-3-5 Organigramme générale de simulation numérique de l'usure par code

I-3-6 Exemple de simulation l'usure de deux rouleaux cylindriques en contacts

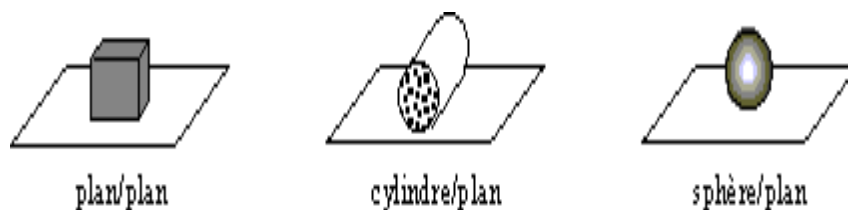
I-3-7 **Conclusion**

## I-1 Problématiques et endommagements des surfaces :

### I-1-1 Introduction:

Le terme usure désigne généralement un phénomène complexe d'enlèvement de matière d'une surface en glissement par rapport à une autre, de différentes géométries de contact **Fig.(I.1.1)**. L'usure concerne toutes installations industrielles, portent des pièces en contact avec glissement relative soumises à des différents paramètres tribologiques. Les industries concernées par l'usure sont :

L'aéronautique, le biomédical, les industries nucléaires, le génie civil, les constructions mécaniques, la fabrication mécanique... etc.



*Figure.(I-1.1) : Géométries de contact.*

Dans ce premier chapitre nous présentons une synthèse bibliographique des principaux éléments tribologiques nécessaires à l'étude du contact sec selon les notions tribologiques [50-54]. Dans ce chapitre une étude bibliographique sur les différents problèmes d'endommagement et comportement des surfaces, rencontrés dans le domaine industriel, provoqués par des sollicitations sévères (thermomécaniques) au contact des deux matériaux. Une synthèse sur la méthodologie de l'élaboration, tests et analyses du matériau (cermet).

Le chapitre aborde une recherche bibliographique sur le processus de la simulation numérique de l'usure par un modèle d'Archard modifié. Ce processus montre la méthode d'itération pour déterminer le volume d'usure, et expliquer la méthode numérique d'enlèvement de la matière.

Les paramètres qui influencent sur le comportement de l'usure des surfaces sont :

- La charge appliquée.
- La température en contact.
- La vitesse de glissement.
- L'environnement.
- Les matériaux en contact.

- Le nombre de cycles ou le temps de contact.

Ce chapitre vise à présenter les dommages identifiés sur les surfaces qui ne sont pas tous au même niveau, l'usure induisant la formation d'oxydes et de débris, les rayures, les transferts, la déformation plastique, la fissuration en sous-couche et la fissuration en surface.

### **I-1-2 Histoire de la tribologie:**

Le nom tribologie est apparue en Angleterre, il a été utilisé pour la première fois dans le rapport (présenté par Jost, c'est une étude sur les pannes d'usure commissionnée par le gouvernement anglais). Depuis, il est utilisé dans le contexte du frottement, de l'usure et de la lubrification, présenté le 23 novembre 1965 au (Minister of State for Education and Science) et publié en février 1966. Ce nom vient du grec τριβειν (tribein : frotter) et λόγος (logos: parole, étude ou science), ainsi la tribologie est l'étude ou la science du frottement. Plus généralement, la tribologie concerne l'étude des surfaces en contact et en mouvement relatif, elle regroupe ainsi la lubrification, le frottement et l'usure des éléments de machine. Si l'usure est principalement le sujet de cette étude, elle se trouve souvent corrélée à des notions de frottement ou de lubrification.

L'idée de remplacer le frottement de glissement par le frottement de roulement remonte à très loin dans l'histoire des civilisations. L'homme du néolithique (4000–1800 av.J.-C.) a pensé, pour diminuer le frottement, à utiliser des « lubrifiants » (bitume, huiles animales et végétales, eau) pour la construction de traîneaux, pour transporter des pierres lourdes et pour effectuer des forages à l'aide de mouvements de rotation. Le palier à roulement doit son nom et son origine aux « corps de roulement » comme le bois rond que les Égyptiens utilisaient pendant la période des Pharaons.

Ce procédé permettait d'augmenter la vitesse de travail, de résoudre le problème du frottement et de rendre les tâches moins fatigantes. L'ingénieur grec Diades 330 av.J-C développa un des premiers paliers à roulement qui servit à la construction des béliers de navires de guerre. L'étude scientifique du sujet commença seulement dans l'histoire plus récente. Léonard de Vinci se consacra à l'étude du frottement autour de 1500 il a particulièrement étudié le coefficient de frottement (coefficient d'adhérence) sur un plan incliné. De Vinci calcula aussi la valeur du coefficient de frottement et formula les lois du frottement sec.

De Vinci a analysé le frottement sur un plan horizontal et incliné et l'usure de paliers de glissement. Il en résulta la première et la deuxième loi du frottement selon Léonard de Vinci.

En 1490, il remplaça le raccordement mobile entre deux pièces d'un palier à roulement presque exclusivement par un frottement de roulement plus faible. Il utilisa alors des billes en déduisit que le frottement est moins fort si les billes ne se touchent pas. Il développa alors des éléments de séparation permettant aux billes de se déplacer librement.

Guillaume Amontons était un physicien Français et gouverneur de Lille. Il mena des recherches dans le domaine du frottement mixte et il constata que la force de frottement dépend de la force normale et que la rugosité de surface doit être considérée comme source du frottement. Amontons attribua le frottement à des causes mécano-géométriques pour le cas d'un engrenage. Cette théorie d'engrenage indique, que le procédé d'accouplement mécanique freine le mouvement relatif. Il en résulte une force de frottement dans le sens opposé au sens du mouvement.

Les deux lois d'Amontons constituent la base de la compréhension empirique de la tribologie (loi du frottement). Il les a redécouvertes et en 1699, il les présenta à l'Académie Royale à Paris. C'est en fait Léonard de Vinci (1452-1519) qui les avait découvertes environ deux cents ans auparavant. Selon ces lois, la force de frottement est proportionnelle à la force normale et indépendante de la surface de contact apparente. En outre, il faut prendre en compte que la force de frottement ne dépend pas seulement de l'adhérence, mais également de l'abrasion. L'influence de l'abrasion est notamment très forte si le partenaire de contact est un matériau plus dur ou si des résidus d'abrasion sous forme de particules de métal durs et oxydés se trouvent au point d'assemblage.

John Theophilus Desaguliers développa un modèle pour expliquer le frottement et il attribua le frottement à l'influence de la cohérence ou de l'adhérence. Il présenta un nouvel aspect et constata que les forces de frottement sont plus élevées lorsque les surfaces sont plus polies et il montra aussi que deux corps en plomb bien polis et pressés fortement l'un contre l'autre peuvent uniquement être séparés par une force d'une intensité importante : il reconnut ainsi la signification de l'adhérence ou de la cohérence pour le processus du frottement, mais il n'arriva pas encore à concilier son idée avec les lois quantitatives du frottement. Newton (1687) définit la viscosité et la théorie de l'adhérence. Euler étudia le frottement sur un plan incliné et il constata que le frottement d'adhérence est environ deux fois plus élevé que le frottement de glissement. En outre, il introduisit le coefficient de frottement «  $\mu$  ». (Aujourd'hui, le coefficient de frottement est désigné par «  $f$  »).

Coulomb développa d'avantage les idées fondamentales d'Amontons concernant la rugosité de surface et le frottement mixte et il examina le rapport entre la force horizontale

nécessaire et le pourcentage en poids. Selon le modèle de Coulomb, le coefficient de frottement d'une telle surface ne dépend pas de la charge, c'est-à-dire que la force de frottement est proportionnelle au poids. De plus, le frottement est indépendant de la surface car il n'est qu'une fonction de l'angle d'inclinaison moyen des rugosités. Plus la surface est lisse, plus le coefficient de frottement devait être petit. Cette conséquence correspondait aux idées de l'époque et contribua à la reconnaissance du modèle de Coulomb.

L'énergie qui doit être apportée pour glisser les plans inclinés vers le haut doit resurgir quand les plans inclinés glissent vers le bas de l'autre côté. Le frottement de glissement selon Coulomb ne présente donc pas un processus absorbant de l'énergie.

Premier brevet connu d'un roulement rigide à billes par Philip Vaughan, en Angleterre vers 1791, il inventa le roulement à billes et il le breveta en 1794. Ce brevet d'une invention qui rendent les véhicules plus efficaces en réduisant la friction entre les pièces en mouvement.

L'histoire de la lubrification (à l'aide d'un film fluide) se sépare de celle du frottement, de l'usure et de la lubrification solide, lorsque Reynolds (1882) concentre tout ses efforts avec succès dans l'établissement d'un modèle analytique pour la lubrification, fondé sur les équations de la mécanique des fluides. On trouve donc aujourd'hui des modèles pertinents et éprouvés pour la lubrification. L'étude du frottement et de l'usure est alors largement laissée aux spécialistes des sciences des matériaux. Ceux-ci développent des îlots de connaissance (en réalisant des essais de frottement et d'usure au besoin, sur des cas particuliers), plutôt qu'une compréhension globale du phénomène d'usure. Pour le frottement, Bowden et Tabor ont développé cependant une approche originale du glissement entre surfaces rugueuses en prenant en compte les interactions entre rugosités, ainsi que leur comportement élasto-plastique. On citera également les travaux de plusieurs auteurs qui prennent en évidence les instabilités de frottement (stick-slip). En termes d'usure, les principales avancées concernent l'identification et l'établissement d'une liste de différents phénomènes suivant les conditions d'essais utilisées.

La véritable époque de la tribologie débuta après la première guerre mondiale. Contraintes, vitesse et températures élevées furent les signes d'une charge croissante du couple de frottement. La limite des anciennes propriétés physiques des lubrifiants a dut être adaptée à des conditions plus sévères.

Même si les premiers pas du développement technologique et de l'ajout de composants aux lubrifiants remontent au 19ème siècle, les concepts modernes de cet ajout virent

seulement le jour dans les années 30 du siècle passé. Les correcteurs d'index de viscosité appaurent, ainsi que les correcteurs de point d'écoulement, antioxydants, inhibiteurs de corrosion, etc., toute une gamme de dispositifs de protection. Parallèlement, le développement des huiles de synthèse fit son apparition, développement induit par les contraintes extrêmes dues aux températures élevées et maximales. Malgré leur grande importance, la part des lubrifiants de synthèse ne constituent qu'environ 5 % des lubrifiants conventionnels. Après la seconde guerre mondiale, on commença à se confronter au lubrifiant solide, le bisulfure de molybdène ( $\text{MoS}_2$ ), un lubrifiant exceptionnel pour des conditions exceptionnelles exactement ce qu'il fallait pour l'application dans la recherche spatiale.

### **I-1-3 Problématique et contexte industriel :**

#### **I-1-3-1 Problématique :**

Dans l'ensemble des secteurs industriels concernés par l'usure et le frottement, plus de deux tiers des problèmes rencontrés relèvent de la mécanique (dans ce domaine, 30 % des avaries sont imputables à l'usure). Liée aux déplacements de deux corps l'un par rapport à l'autre, l'usure se rencontre plus particulièrement sur toutes les machines dont les fonctions utilisent les actions de contact thermomécaniques.

L'étude des problèmes de frottement-usure en mécanique fait appel au concept de système tribologique dont les principales composantes sont les différents éléments (propriétés et interactions) et les variables opératoires (solllicitations). Les paramètres du contact, dont l'étude fait appel à des disciplines aussi diverses que la mécanique, la métallurgie, la physique du solide, la chimie, sont très nombreux et sont liés par un réseau de relation complexes. Aussi, les propriétés tribologiques, telles que les caractéristiques de frottement, la résistance à l'usure, ne peuvent s'exprimer par des critères et valeurs simples, ni se modéliser facilement, contrairement à certains domaines telles que la résistance des matériaux. La tribologie n'étant pas une science exacte, il s'ensuit également que la résolution des problèmes de frottement usure ne repose que sur des lois générales, souvent empiriques l'étude de ces problèmes, même au stade de l'approche industrielle (sélection, validation des solutions...), fait largement appel à l'expérimentation, les résultats d'expériences sont difficilement extrapolables d'une situation à l'autre.

Malgré sa complexité, l'analyse du système tribologique constitue l'outil de référence d'aide à la définition et à l'étude d'une configuration de frottement. Cette analyse doit permettre en particulier d'exprimer rationnellement le cahier des charges du problème

à résoudre, condition préalable à l'étape de recherche et de sélection des solutions possibles d'identifier les situations à risques, les probabilités d'incidents, pour arrêter certains choix de conception, d'appréhender les implications liées à telle ou telle option technologique (conception géométrique, cinématique...). À cet égard, il est important de prendre conscience que les matériaux ne constituent qu'une des composantes du système tribologique, c'est-à-dire qu'une partie de la solution à un problème d'usure.

Le contact répété entre le matériau et le composant du système tribologique est à l'origine de divers processus d'endommagements de types thermomécanique (contrainte, frottement), thermo-physique (réactions de surface, diffusion de la chaleur et de la matière) et thermo-chimique (formation des phases intermétalliques et d'oxydes). L'action simultanée de ces processus entraîne l'endommagement très complexe du matériau.

### **I-1-3-2 Contexte industriel:**

#### **✓ La fatigue surfacique dans les installations industrielles:**

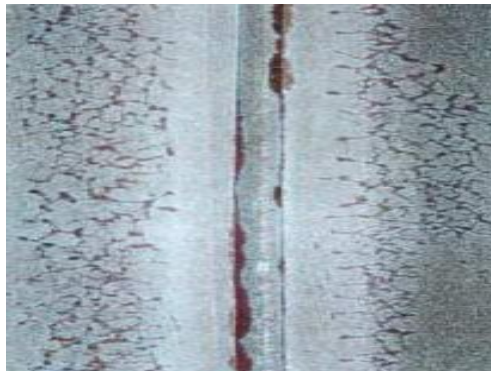
Les installations industrielles sont soumises à une grande variété de sollicitations thermomécaniques. Actuellement, les préoccupations dans le milieu industriels en tenant des différents équipements (matrice, galets, de forgeage et laminage à chaud....etc.) portent sur les dégradations surfaciques, dues à la fatigue thermique et surtout aux états de surfaces des éléments de machines en contact, qui sont mieux contrôlés avec des spécificités plus sévères afin d'éviter les avaries non programmées. L'usure des surfaces par la fatigue thermomécanique mène à une avarie, de degré de gravité très important, des autres avaries. Ces avariés créent un problème de cout de maintenance de surfaces usées, peut entrainer à une perte de l'installation.

La fatigue thermique est la détérioration graduelle et la fissuration d'un matériau par chauffage et refroidissement alternés. La répétition des séquences chauffage-refroidissement à la surface d'un matériau entraîne la formation d'une couche usée et une contrainte-déformation appliquée sur la surface. La surface d'un matériau peut passer à une déformation plastique qui peut apparaître après une durée de vie de fonctionnement. Généralement la fatigue thermique est décomposée en deux catégories:

- La fatigue thermomécanique: les entraves à la dilatation libre sont externes (structure hyperstatique. Il s'agit en général de fatigue thermique associée à un chargement mécanique.



- La fatigue sous contraintes thermiques: les entraves à la dilatation libre sont internes et liées à un gradient de température **Fig.(I-1.2)**. C'est le plus souvent le cas des structures industrielles. Ceux-ci peuvent être des fluctuations thermiques rapides, des gradients liés au mode de fonctionnement.



*Figure. (I-1.2) :Surface usée sous sollicitation fatigue thermique*

### **I-1-4 Procédure et objectif de l'étude:**

D'un point de vue industriel, cette étude vise l'élaboration d'un nouveau matériau (cermet), soumis à des sollicitations sévères de contact (température, charge, vitesse de glissement).

L'étude de ce nouveau matériau a principalement deux objectifs :

- La caractérisation du comportement tribologique (frottement, taux d'usure) et les mécanismes d'endommagement du matériau sous sollicitations proches des conditions industrielles de contact surfacique telles que la pression de contact, la vitesse de glissement et la température à l'interface.
- La prédiction de la durée de vie du matériau par l'application des différents paramètres thermomécaniques et sélectionner les meilleurs d'entre eux (température, vitesse de glissement, charge).

### **I-1-5 Les causes de l'usure:**

Dans un contact mécanique frottant, les causes possibles de l'usure sont extrêmement variées. Les différents types de phénomènes pouvant intervenir, séparément ou simultanément, appartiennent à deux groupes de facteurs:

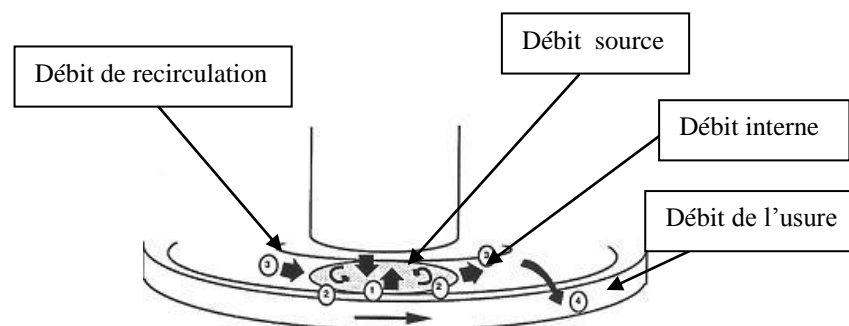
- Effets du contact proprement dit: interactions mécaniques, chimiques et métallurgiques, entre les deux corps en présence.

- Effets de l'environnement (atmosphère, lubrifiant...) actions physicochimiques dues à la composition du milieu, actions mécaniques induites par la nature, la propreté de ce milieu (caractère abrasif d'une ambiance polluée par exemple).

L'étude des problèmes de frottement-usure en mécanique fait appel au concept de système tribologique (éléments de tribologie) **Fig.(I-1.3)** [55-57]. Selon la plupart des glossaires et définitions appartenant à la littérature technique spécialisée, l'usure correspond à la perte progressive de matière de la surface active d'un corps, par suite du mouvement relatif d'un autre corps sur cette surface [58,59].

La notion d'usure est beaucoup moins restrictive car elle s'applique plus généralement à tout évènement conduisant à une perte de fonction des composants ou systèmes, ce point de vue corroborant d'ailleurs les définitions plus communes qui associent à l'usure la détérioration due à l'usage. La perte de fonction correspond aux dysfonctionnements qui peuvent résulter :

- Des évolutions dimensionnelles, géométriques des pièces, telles que l'accroissement des jeux dû à une perte de cote (dégradation de la précision...) ou au contraire, le colmatage des interfaces par l'accumulation de débris (blocage, coincement...).
- Des phénomènes de dégradation des surfaces (rayures, sillons, cavités, excroissances...) dont l'influence peut être dommageable à plusieurs égards : déficience d'une étanchéité, altération des propriétés mécaniques des composants ou encore détérioration de l'aspect.



*Figure.(I-1.3) :Système tribologique et débit de troisième corps*

La diversité des formes possibles de détérioration pose, en pratique, le problème des critères de l'usure, en effet, dans les cas où l'usure ne correspond pas à une évolution dimensionnelle quantifiable (perte de cote), elle ne peut être corrélée à des grandeurs directement mesurables sur les éléments de machine, en particulier, la notion de taux d'usure, qui exprime la perte de matière en fonction de la distance parcourue, est totalement inadaptée

pour un grand nombre de situations, de sorte que l'on préférera souvent parler de durabilité qui fait référence au temps, ou au nombre de cycles d'utilisation pendant lequel la fonction est maintenue. Cependant, si l'usure est, dans le cas général, dommageable, il y a un cas au moins où le phénomène, pris exclusivement sous l'angle des évolutions géométriques, est favorable. Ainsi, et à condition qu'elle soit contrôlée, l'usure est exploitée pour assurer le rodage des mécanismes.

Le frottement-usure ne repose que sur des lois générales, souvent empiriques l'étude de ces problèmes, même au stade de l'approche industrielle (sélection, validation des solutions...), fait largement appel à l'expérimentation, les résultats d'expériences sont difficilement extrapolables d'une situation à l'autre.

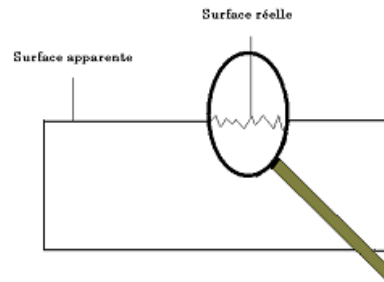
À cet égard, il est important de prendre conscience que les matériaux ne constituent qu'une des composantes du système tribologique, c'est-à-dire qu'une partie de la solution à un problème d'usure.

De nombreux exemples de la pratique industrielle montrent que des solutions rationnelles (tant sur le plan des performances que sur l'aspect économique) peuvent être mises en place en agissant prioritairement sur l'optimisation de la géométrie des contacts, sur une meilleure gestion du milieu environnant (incluant la lubrification).

### **I-1-6 Problématique des différents contacts relatifs et endommagements des surfaces:**

#### **I-1-6-1 Notion de surface :**

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. Citons par exemple l'énergie superficielle, elle influe sur les propriétés de frottement à sec des matériaux au travers des forces d'adhésion mais aussi sur le comportement du contact en régime lubrifié à travers des phénomènes de mouillage et d'étalement. 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 **Fig.(I-1.4)**. 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 [60-61].



**Figure.(I-1.4) : La topographie d'une surface.**

D'une façon générale, les caractéristiques d'une surface diffèrent de celles du matériau dans la masse, d'une part parce que la symétrie de la structure atomique est rompue (modification des forces de liaison, de la concentration en défaut, etc.), d'autre part, l'effet des contraintes extérieures et notamment de l'environnement peut modifier considérablement les couches superficielles en créant des concentrations d'éléments très différents des valeurs moyennes volumiques. En effet, la présence de couche adsorbée à la surface concerne la plupart des matériaux. L'environnement (température, pression, humidité, nature du milieu : air, gaz,...) entourant les surfaces en contact, est donc un facteur majeur du comportement tribologique de ces dernières, car il modifie la composition et les éléments entrant dans leurs compositions.

### **I-1-6-2 Surfaces et environnement de contact:**

La surface d'un corps est le lieu des points séparant ce corps du milieu environnant, la surface de contact peut donc être définie comme la zone d'interaction et de séparation entre deux éléments. Une notion importante lorsque l'on s'intéresse à la surface d'un corps est l'ordre de grandeur auquel s'arrête l'observation. Trois « types » de surface peuvent être distingués:

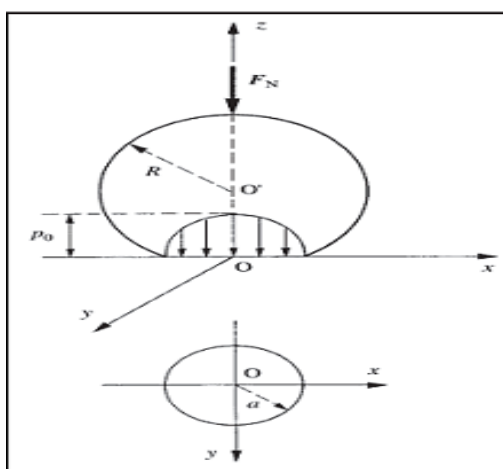
- La surface nominale, conçue et dimensionnée sur un dessin.
- La surface apparente visible à l'œil nu.
- La surface réelle qui n'est jamais parfaitement lisse et où s'effectue le contact entre deux éléments **Fig.(I-1.4)**.

Le contact entre deux objets s'effectue donc par l'intermédiaire de micro-zones plus ou moins nombreuses en fonction de la rugosité des surfaces réelles. Lorsque les deux surfaces en contact se mettent à glisser l'une par rapport à l'autre, les zones discrètes de contact sont sans cesse renouvelées. La compréhension d'un contact dynamique nécessite donc d'avoir des informations sur la morphologie globale et la rugosité des surfaces en interactions.

**I-1-6-3 Action de contact de surface:**

Le terme général actions de contact désigne l'ensemble des efforts extérieurs, forces et moments appliqués sur un système mécanique par d'autres objets qui le touchent. Le contact entre les surfaces idéales de deux corps sous l'action d'une force  $F_N(N)$  normale à l'interface, va créer dans chaque corps un champ de contraintes et de déformations **Fig.(I-1.5)**. Une distribution de la pression de contact  $P$  (Pa) apparaît sur l'aire de contact  $A$  ( $m^2$ ) entre ces deux surfaces est définie par:

$P=F_N/A$	(I-1.1)
-----------	---------



*Figure.(I-1.5): Empreinte d'un contact sous pression sphère – plan.*

Du point de vue de leur géométrie, les contacts peuvent être divisés en deux grandes familles: Le contact hertzien qui concerne toutes les situations où les contacts ne sont pas «surfariques», c'est-à-dire où l'aire (théorique) d'appui est limitée à un point, une génératrice. Il s'agit par exemple des contacts mettant en jeu les géométries suivantes : bille / plan, cylindre / plan, cylindre / cylindre, ce type de contact intervient dans les roulements, les engrenages freins, embrayages...etc. La détermination des champs de déformation et des contraintes engendrés dans les contacts de la première famille relève des calculs développés par HERTZ. Lorsque la bille vient au contact du plan **Fig.(I-1.5)** et que la force normale  $F_N$  est nulle, le contact a lieu au point O. Lorsqu'on applique une charge  $F_N$  (N) non nulle, les matériaux se déforment et les deux corps sont en contact dans toute la zone circulaire de rayon  $a$  (m). La valeur de  $a$  est donnée par l'expression suivante:

$a = \sqrt[3]{\frac{3F \cdot R}{4E}}$	(I-1.2)
$\frac{1}{E} = \frac{1 - \nu}{E1} + \frac{1 - \nu}{E2}$	(I-1.3)

R(m) est le rayon de la sphère, et E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> (N.m<sup>-2</sup>), sont respectivement les modules de YOUNG et ν<sub>1</sub>, ν<sub>2</sub> les coefficients de Poisson des matériaux constituant les corps 1 et 2. L'aire de contact A est donc :

$A = \pi \cdot a^2$	(I-1.4)
---------------------	---------

La pression maximale P<sub>max</sub> subie à la verticale de O, vaut :

$P_{max} = \frac{3 \cdot F}{2\pi \cdot a^2}$	(I-1.5)
--	---------

Et la pression moyenne, ou pression d'Hertz, P<sub>m</sub> :

$P_m = \frac{F}{\pi \cdot a^2}$	(I-1.6)
---------------------------------	---------

La répartition de la pression P sur la surface, qui a une symétrie radiale (P = P(r)), est de la forme :F<sub>N</sub>

$P(r) = P_{max} \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2}$	(I-1.7)
--	---------

#### I-1-6-4 Différents modes de contacts:

Les principaux dispositifs de laboratoire pour l'étude expérimentale des différents types de contacts **Fig.(I-1.6)**:

- Mouvement circulaire du pion sur l'échantillon.
- Mouvement alternatif du pion sur l'échantillon.
- Sphère fixe sur un disque tournant avec injection d'électrolyte d'en bas.
- Micro tube céramique tournant servant comme tube pour l'électrolyte.

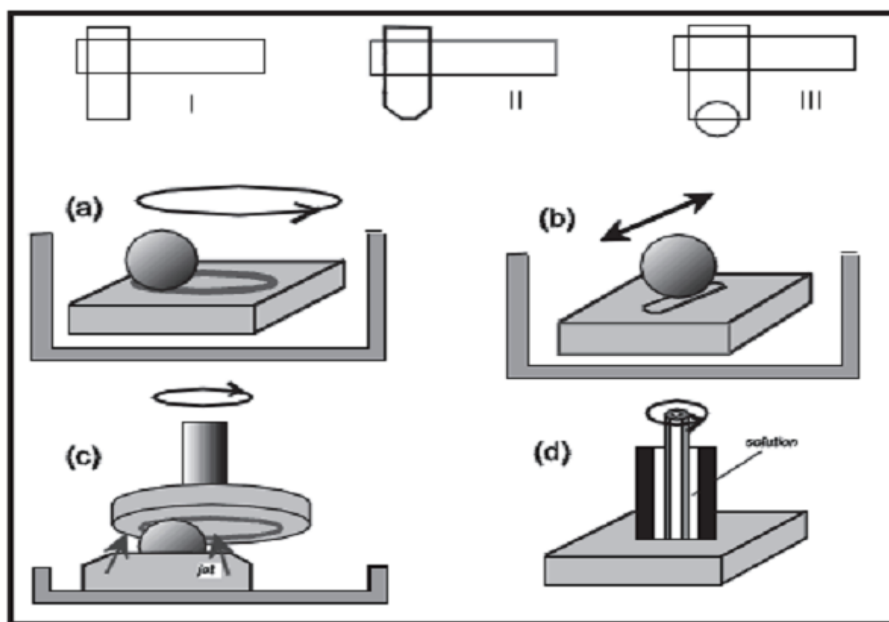
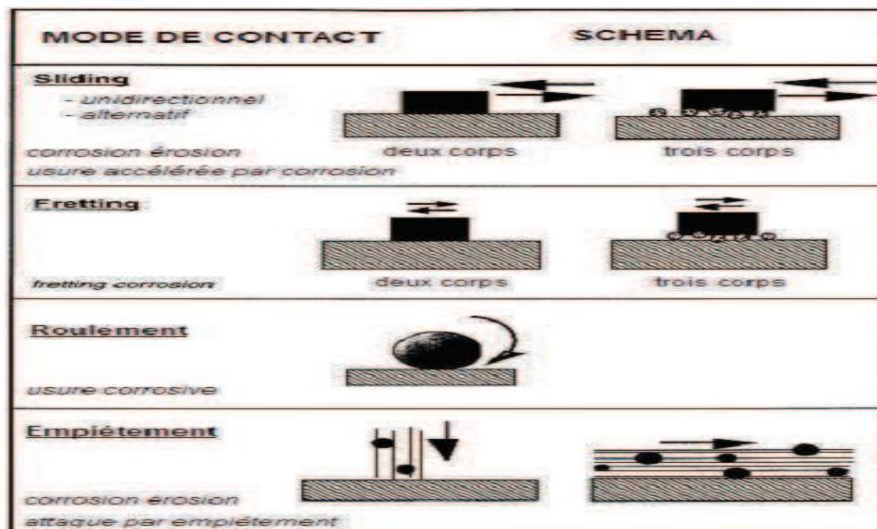


Figure.(I-1.6): Principes des dispositifs de laboratoire pour l'étude expérimentale des différents modes de contacts

## I-1-7 Endommagement des surfaces:

### I-1-7-1 Définition de l'endommagement:

L'endommagement est l'apparition dans un matériau de dommages causés par l'usure ou une attaque physique ou chimique. Il conduit à une dégradation de ses capacités physiques pouvant conduire à la rupture. Les déformations élastiques et permanentes qui se situent respectivement au niveau des atomes et des plans cristallins respectent la cohésion de la matière. L'endommagement détruit cette cohésion par création de discontinuités surfaciques ou volumiques au sein de la matière. Ces micro-vides peuvent, par des phénomènes successifs (nucléation-croissance-coalescence), conduire à l'amorçage d'une macro-fissure qui, en se

propageant, mène à la ruine complète de la structure. Les mécanismes de formation de ces défauts dépendent de nombreux facteurs qui peuvent être aussi bien intrinsèques au matériau (influence de la microstructure) que liés aux sollicitations mécaniques ou à la température appliquées. De ce fait, il existe différents mécanismes de rupture. La rupture peut intervenir brutalement quasi sans déformation préalable pour les matériaux qualifiés de fragiles (c'est la rupture fragile obtenue par clivage), tandis qu'elle n'intervient qu'après une étape de grande déformation permanente pour les matériaux qualifiés de ductiles (on parle de rupture ductile), parmi ces mécanismes celui de la rupture en fatigue cyclique [62-64].

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).

Les endommagements peuvent être décrits simplement en faisant appel à un nombre réduit de phénomènes élémentaires mécaniques, physiques ou chimiques :

- Déformations plastiques, lorsque les contraintes créées par le contact glissant dépassent la limite d'élasticité ces déformations plastiques induisent des modifications de géométrie des surfaces frottantes.
- Fissurations, sous l'effet de contraintes dépassant la limite à la rupture, ou de phénomènes de fatigue.
- Transformations physicochimiques de surface transformations structurales sans intervention de l'environnement ou réaction tribochimique entre les corps frottant et cet environnement.
- Adhésion entre les corps frottant, conduisant à la formation de transferts d'un des matériaux sur l'antagoniste. Les surfaces présentent des défauts géométriques de différents ordres :
  - Ordres macroscopiques, liés à des écarts de grande amplitude dus généralement aux défauts géométriques.



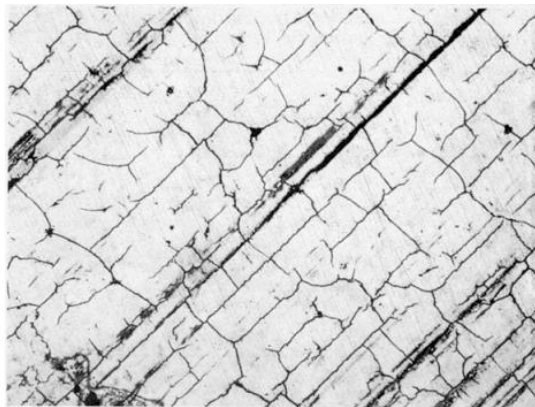
- Ordres microscopiques, liés à des écarts de faibles amplitudes dus à l'outil de coupe, aux grains abrasifs, aux particules de sablage ou grenailage, aux vibrations de la machine ou encore aux piqûres de corrosion.

### I-1-7-2 Différents types d'endommagements :

#### ✓ Endommagement par fatigue thermique:

Lors du contact avec le métal chaud, les couches superficielles de l'outil subissent une expansion qui se trouve contrariée par la sous-couche restée plus froide. Les contraintes de compression résultantes peuvent conduire à la plastification de la surface. Ensuite, lors du refroidissement du cycle de forgeage, les couches superficielles subissent un retrait qui, s'il ya eu déformation plastique lors du chauffage et du contact, créent des contraintes de traction importantes susceptibles de conduire à une plastification, voire une fissuration superficielle.

Une étude récente montrerait que, aussi paradoxal que cela puisse paraître, des contraintes résiduelles initiales de tension d'une certaine intensité dans l'acier à outil retarderaient l'initiation des fissures par fatigue thermique. En revanche, des contraintes de compression de toutes intensités favorisent la formation des fissures. De plus, les auteurs remarquent que le préchauffage de l'outil n'accroît pas la résistance à la fatigue thermique. On trouve généralement ces faïençages dans les zones centrales des matrices où le transfert thermique est le plus important **Fig.(I-1.7) [65-69]**.

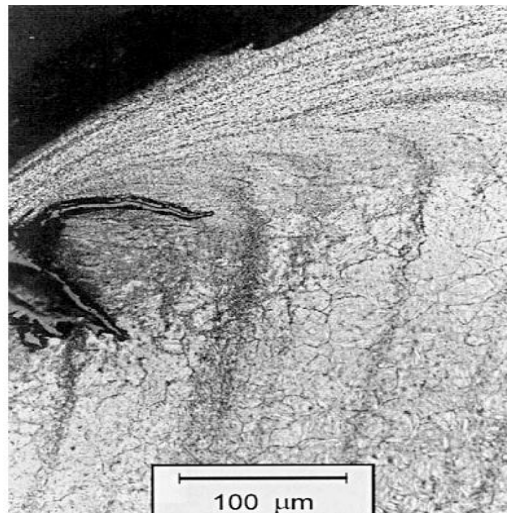


*Figure.(I-1.7): Fissuration superficielle de surface par endommagement thermique.*

#### ✓ Endommagement par déformation plastique:

Les sollicitations thermomécaniques sévères créent des conditions propices au dépassement de la limite d'élasticité de l'outil à la température de travail. Ceci génère une plastification parfois assimilée à tort à du fluage. Ce sont les surfaces actives très sollicitées à la fois thermiquement et mécaniquement (écoulement intense du métal forgé) qui sont

concernées. La plastification intéresse une épaisseur comprise entre (1et250) $\mu\text{m}$ . Seul un examen micrographique permet de l'identifier avec certitude. La plastification superficielle est fréquemment associée à des fissures de fatigue thermique, à des évolutions métallurgiques des couches superficielles des outils et à de l'usure par abrasion **Fig.(I-1.8)**. La consolidation des surfaces actives des outils par un traitement ou revêtement superficiel est une voie de solution à ce type d'endommagement



*Figure.(I-1.8): Microstructure d'une déformation plastique sous sollicitations thermomécaniques.*

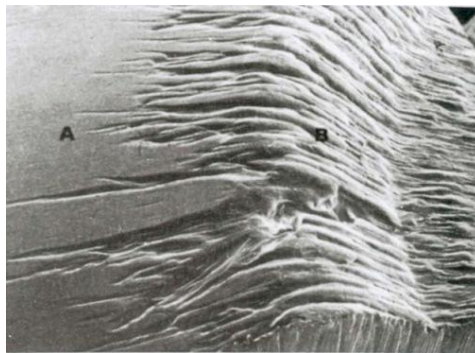
### ✓ **Endommagement par formation de couches de « transfert »:**

L'endommagement forme des surfaces (couches) actives qui sont fréquemment recouvertes d'une pellicule plus ou moins adhérente constituée essentiellement d'oxydes issus du métal forgé et de résidus éventuels de lubrification. L'épaisseur de cette couche, appelée couche de transfert, peut varier de quelques micromètres à plusieurs dizaines de micromètres. La formation de couches de transfert est liée à la forte activité chimique des surfaces en contact du fait de la température élevée, de la pression et de la déformation plastique. En forgeage de précision, la formation de couches de transfert modifie les côtes et l'état de surface des pièces et peut contrarier l'éjection de pièces. Tout traitement ou revêtement de surface qui contribue à diminuer la formation de la couche de transfert est potentiellement intéressant pour les outils de forge à chaud et à mi-chaud. Les contraintes mécaniques induites lors de l'opération de forgeage peuvent accroître les chemins de diffusion favorisant l'oxydation de la matrice. Cette oxydation joue un rôle important dans l'usure des outils. L'endommagement produit par le frottement peut être très différent selon la nature et les propriétés physiques des couches d'oxydes formées.

### ✓ Endommagement par usure abrasive:

De façon générale, on observe l'usure abrasive dans les zones de fort glissement, l'écoulement de matière du lopin à la surface induit des vitesses de glissement élevées qui, conjuguées à l'application de fortes charges, conduisent à l'endommagement abrasive. Cette endommagement se traduit essentiellement par un enlèvement de matière, jusqu'à 2 mm au rayon, qui peut être assimilé à un micro-usinage **Fig.(I-1.9)**. L'abrasion est également localisée sur les rayons de matrices dont la raideur est moindre ce qui favorise l'écoulement de la matière de la matrice.

L'usure abrasive est conditionnée par la dureté et la structure à la température de travail de l'outil. Au niveau du procédé de forgeage, la température superficielle de l'outil, la pression normale, la nature de l'interface (présence ou non d'oxydes durs) et la longueur de glissement ont une influence sur l'usure abrasive. En pratique, l'usure abrasive est fréquemment associée à d'autres modes d'endommagement des surfaces en particulier, la fatigue thermique, fluage superficiel et des évolutions métallurgiques, ce qui complique singulièrement le diagnostic et la recherche d'une solution. Il arrive que l'abrasion soit si importante qu'elle masque les dégradations par fissuration du fait de l'écoulement de la matière.



*Figure.(I-1.9): Microstructure d'un endommagement par usure abrasive sous sollicitations thermique.*

### I-1-8 Mécanismes d'usure:

#### I-1-8-1 L'usure par abrasion:

Elle se caractérise par la présence dans le contact d'un état de surface rugueux ou par pénétration dans le matériau le plus tendre de particules dures provenant des débris d'usure du contact ou lié à la pollution du milieu **Fig.(I-1.10)**. Ce mécanisme de dégradation qui fait intervenir dans les premiers instants uniquement les corps antagonistes, devient rapidement une usure à trois corps. Cette forme d'usure se manifeste par des polissages, des griffures, des

micro- labourages, des arrachements de particules. Le micro labourage (ou micro usinage) se manifeste par des rayures à la surface du matériau le plus tendre sans arrachement de matière mais provoquant sur les bords du sillon une déformation plastique. Le plus souvent pour lutter contre l'usure abrasive, on cherche à durcir les matériaux (au moins leur surface) [70,71].

### I-1-8-2 L'usure par transfert ou adhésion:

Elle se caractérise par un transfert de débris d'un des deux antagonistes vers l'autre soit par un mécanisme d'origine purement mécanique, soit suite à une réaction physico-chimique Fig.(I-1.10). Pour le transfert mécanique, plusieurs hypothèses ont été développées. Les micros aspérités présentes dans le contact, peuvent conduire à la diminution des zones en contact et générer aux jonctions, des énergies très élevées, qui peuvent favoriser les réactions physico-chimiques (micro soudage des aspérités en contact). Lors du frottement, il existe entre les matériaux antagonistes, une multitude de microcontacts qui supportent l'ensemble de la charge normale. En effet, dans ces régions, une construction des lignes de forces engendre des concentrations de contraintes et une augmentation de la température (températures flashes). L'évolution de ces aspérités dépend des conditions de sollicitations et de l'environnement. Un équilibre est atteint dès que l'adhérence des films de transfert est supérieure à la force de frottement. Sinon, les contraintes de cisaillement générées, provoquent la rupture à l'interface surface/film transféré il y a formation des débris. Ces derniers peuvent être progressivement évacués du contact en laissant une surface très réactive siège d'un nouveau processus de dégradation. Ces débris restent piégés dans le contact, des aires réelle et s'accroissent, assurent un rôle de portance (supportent les pressions) [72].

### I-1-8-3 L'usure par fatigue cyclique:

Elle est liée à l'action d'un mouvement cyclique et à la capacité des matériaux à absorber les énergies de déformation et les contraintes thermiques générées par frottement Fig.(I-1.10). L'usure par fatigue se manifeste par des fissures, des écailles et des changements de structure métallurgique. Les comportements face à ce mécanisme d'usure dépendent de la nature du matériau. Dans le cadre des matériaux ductiles (matériaux métalliques ou polymères), la rupture par fissuration (ou Mécanisme de délaminage) a lieu en sous-couche, parallèle à la surface de frottement, dans les zones où les contraintes de cisaillement sont maximales. La théorie de Hertz indique la répartition des contraintes de cisaillement en sous-couche. L'analyse des transferts thermiques sur la microstructure (déplacement des lacunes, des dislocations, des plans de glissement, l'effet des joints de grains...) explique la formation de fissure associée à un écrouissage ou à un adoucissement de la surface. Ce phénomène peut

se décomposer en plusieurs phases. Dans un premier temps, il y a augmentation de la densité de dislocation en surface provoquant un écrouissage superficiel [73].

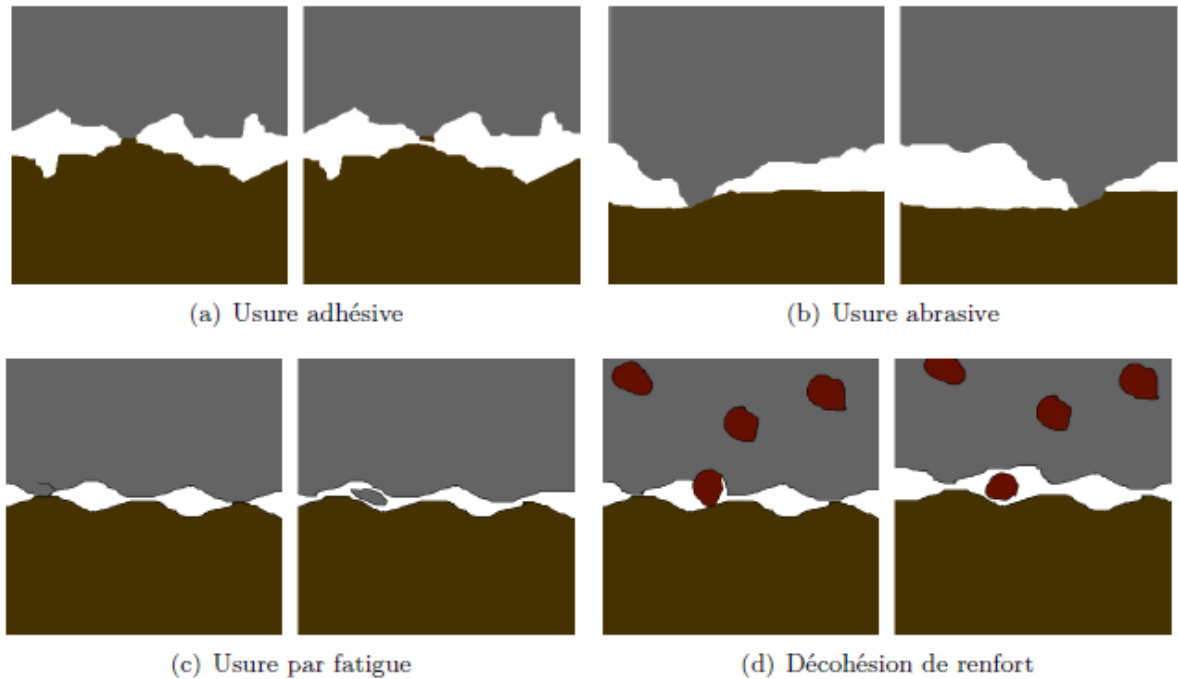
Dans un deuxième temps, l'énergie de frottement transmise à la surface de ce matériau a pour effet de redistribuer cette densité de dislocations en un réseau plus stable par glissement ou montée de dislocations. Il existe alors un déséquilibre entre les contraintes internes. En surface, suite à une densité plus élevée de dislocations, des contraintes de compression sont générées alors qu'en sous-couches, la densité de dislocations étant moindre, des cavités se forment, favorisant la fissuration[74-76].

#### I-1-8-4 **L'usure par réactions tribochimiques:**

C'est un système à trois composantes, où interviennent la réactivité chimique entre les surfaces, la réactivité chimique avec le milieu environnant et la réactivité physico-chimique avec les débris. Ce type de dégradation résulte d'une seule ou de plusieurs réactions chimiques sous l'effet d'agent corrosif (environnement, lubrifiant) et des contraintes mécaniques pendant le frottement.

Suivant l'état structural superficiel, il se crée des oxydes réactionnels dépendant de l'environnement. Le frottement entre les surfaces, rompre les aspérités qui s'oxydent, formant des débris en général très stables et très durs. Ces derniers jouent alors un rôle abrasif et viennent dégrader les surfaces antagonistes et donc entretenir l'usure. Par contre, il est possible de rencontrer une configuration moins agressive par la formation de films d'oxydes adhérents à la surface d'un des antagonistes et suffisamment résistants au cisaillement pour jouer un rôle protecteur a densité de dislocations en surface provoquant un écrouissage superficiel [52,58,60,61,70-76].

Dans un deuxième temps, l'énergie de frottement transmise à la surface de ce matériau a pour effet de redistribuer cette densité de dislocations en un réseau plus stable par glissement ou montée de dislocations. Il existe alors un déséquilibre entre les contraintes internes. En surface, suite à une densité plus élevée de dislocations, des contraintes de compression sont générées alors qu'en sous-couches, la densité de dislocations étant moindre, des cavités se forment, favorisant la fissuration.



*Figure.(I-1.10): Différents mécanismes d'usure (a)usure adhésive(b)usure abrasive(c)usure par fatigue(d)Décohésion de renfort. [65]*

### I-1-9 Approches quantitatives de l'usure et loi d'usure:

#### I-1-9-1 Comportement de l'interface dans un contact thermomécanique:

Les causes de l'usure dans un contact thermomécanique sont extrêmement variées et dépendent d'un ensemble complexe de paramètres. Les conditions de sollicitations mécaniques, thermiques et environnementales influent sur la prépondérance d'un mécanisme d'usure ainsi que sur la rigidité et la ténacité des surfaces frottées.

Par définition, la surface d'un corps est le lieu des points de contact de ce corps avec le 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).

## I-1-9-2 Loi d'usure:

L'usure est influencée par un nombre élevé de facteurs et son évaluation conduit souvent à des résultats dispersés. La comparaison des résultats de l'usure obtenus avec différents paramètres est difficile de la comparée avec une référence. La résolution des problèmes frottement usure ne repose que sur des lois générales, souvent empiriques. Selon Kapsa[ ], les résultats d'expériences sont difficilement extrapolables d'une situation à une autre. Mais la possession de lois d'usure aide à prédire le comportement et la durée de vie d'un système. Plusieurs de ces équations sont fondées sur l'hypothèse qu'une propriété conventionnelle des matériaux. Le module de Young E, ou la dureté H, sera importante dans le processus d'évaluation de l'usure.

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 en particulier, a beaucoup travaillé sur l'usure non lubrifiée des métaux et a développé une loi d'usure appréciable dans de nombreuses situations[77,78].

Archard a établi expérimentalement une relation (loi macroscopique d'usure) permettant d'estimer pour un contact pion/disque **Fig.(II-2.2)**, le volume de matière usée dans le cas d'un contact glissant à vitesse constante et pour des matériaux de duretés très différentes. A partir de cela, il a mesuré différentes usures de matériaux frottant à sec [70]. Il a considéré l'usure d'un frotteur rugueux contre un plan rugueux, en adoptant l'hypothèse suivante :

- L'amplitude des rugosités ne varie pas pendant le processus.
- L'aire réelle de contact reste toujours la même.

La loi d'usure établie par Archard pour déterminer le volume usé :

$V = K.F.S$	(I-1.8)
-------------	---------

V : volume usé en (mm<sup>3</sup>), K : coefficient d'usure (mm<sup>2</sup>/N), F<sub>N</sub> : la charge normale appliquée au contact (N), S : distance parcourue en (mm).

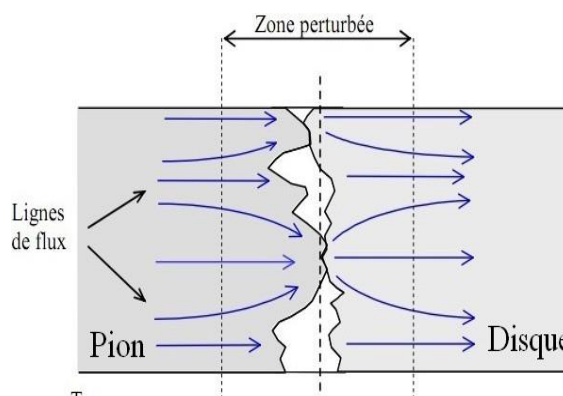
C'est la formulation classique de la loi d'Archard, elle traduit la proportionnalité du volume d'usure avec la longueur de glissement et la force normale.

## I-1-9-3 Aspect thermique du contact:

Génération de la chaleur au niveau du contact glissant, lors de l'application matériau fixe sur un matériau en rotation, l'effort tangent résultant de la pression de contact et du

coefficient de frottement propre au système, induit la dissipation de l'énergie cinétique du corps en mouvement sous forme de chaleur. La déformation plastique des aspérités, qui admet une chaleur générée au niveau de l'interface qui est égale à l'énergie dissipée.

Dans le cadre d'un contact glissant, le flux thermique traversant le pion est composé d'une partie de l'énergie générée par frottement et d'un transfert de chaleur par conduction à travers des débris et des aspérités formant une barrière thermique. La différence de température entre les surfaces et de la résistance thermique de contact glissant dont les propriétés sont fonction de la nature de l'interface. Le flux thermique dans le disque se calcule de manière similaire. Cette notion traduit des phénomènes à échelle microscopique de transfert de chaleur entre les surfaces par le biais d'un paramètre macroscopique comme représentée par la zone perturbée de la **Fig.(I-1.11)**.



*Figure.(I-1.11): Lignes de flux thermiques traversant le contact pion disque*

#### I-1-9-4 **Procédure de calcul du taux d'usure:**

Le taux d'usure représente une donnée tribologique principale de prescription relative à la résistance d'usure d'un matériau candidat. Un système tribologique (tribosystème) peut être conçu en vue d'assurer une résistance contre l'usure, d'assurer des transitions d'usure douce vers une usure sévère de paramètres opérationnels susceptibles d'engendrer l'usure adhésive.

La valeur de la pression à une vitesse de glissement décrit une limite entre l'usure douce et sévère. Elle s'apparente ainsi à la limite d'utilisation des matériaux au dessus de laquelle le matériau connaît un changement de mécanisme d'usure, qui peut aller jusqu'au grippage. Le volume usé ( $V$ ) ou la hauteur usée ( $h$ ) sont en fonction de la distance de glissement ( $S$ ), du chargement normal appliqué ( $F_N$ ) et de la dureté du matériau le moins dure ( $H$ ). Fouvry et al. ont développé la loi de l'usure d'Archard dans le quel un coefficient de frottement(I-1.9) [79,80].



$\frac{\Delta h}{\Delta t} = k \cdot \frac{F}{A} \cdot v$	(I-1.9)
---	---------

I-1-9-5 **Méthodologie de la prédiction d'usure:**

La méthodologie de la prédiction de l'usure, considérant une loi d'usure de différents type semi-analytique ou empirique dans des conditions de glissement total qui sont les conditions les plus critiques en termes d'usure. La prédiction de l'usure nécessite d'injecté dans une loi les données suivantes:

- Les géométries de contact, propriétés des matériaux des deux corps en contact
- Le cycle, force normal, Coefficient de l'usure, Vitesse de glissement, Température de contact.

✓ **Influence de la force normale appliquée  $F_N$  et la force de frottement:**

La force normale est un paramètre qui détermine le taux d'usure, ainsi que les conditions de contact, le rayon de contact et la pression de contact. Une force de contact plus élevée favorise une plus grande aire de contact avec une pression plus importante. Il est démontré que les paramètres de contact de chargement jouent un rôle important sur la prédiction de l'usure. La pression moyenne apparaît comme un facteur clé modifiant la cinétique d'usure, plus la pression moyenne est élevée, plus le taux d'usure est important. D'un point de vue de l'usure mécanique, il est préférable que la force de contact soit la plus faible possible, toutefois une faible force normale favorise le régime de frottement en glissement total, et donc la création de particules d'usure.

La force de frottement est la résultante d'une force nécessaire au cisaillement des jonctions formées aux aspérités de contact et d'une force dont l'amplitude dépend de la déformation de la piste de frottement[81].

✓ **Influence du comportement thermique:**

Le comportement de l'interface étant fortement influencé par les conditions thermiques, une revue des techniques expérimentales et numériques permettant d'accéder à la température de contact et à l'énergie dissipée est développée. Pour identifier les flux thermiques et essayer de prendre en compte les effets de conduction et de frottement, les zones de contact ont été décomposées en 3 zones .Cela permet d'identifier le flux pour chaque zone.

### I-1-10 **Techniques d'analyses du frottement de l'usure des surfaces des cermets après tests d'usure:**

#### I-1-10-1 **Démarche d'analyse du frottement de l'usure:**

La démarche des analyses micromécaniques des interfaces est basée sur la thermodynamique des processus irréversibles. Les théories considèrent l'usure comme un phénomène dissipatif, afin d'établir, dans un cadre théorique cohérent, un critère d'évolution du mécanisme de détachement des particules. En se plaçant dans le cas le plus général, ils appliquent les lois connues de la mécanique (conservation de la masse et de la quantité de mouvement, énergie cinétique, 1er et 2nd principe de la thermodynamique) à un ensemble constitué de deux corps en contact et perdant de la matière, afin de dégager un critère d'évolution de l'usure, critère associé à une frontière mobile le front d'usure.

#### I-1-10-2 **Analyse des surfaces par profilométrie:**

L'analyse permet de balayer la surface à mesurer à l'aide d'un palpeur physique en enregistrant ses variations de hauteur c'est un contact entre le palpeur et la surface **Fig.(I-1.12(a))**. Obtention d'un profil **Fig.(I-1.12(b))** en une seule fois contrairement aux méthodes précédentes, qui nécessitent l'acquisition point par point.

Pour obtenir le volume usé des plans, sphères, cylindres, nous avons utilisé un profilomètre interférométrique, qui permet de fournir rapidement des mesures précises de la topographie 3D sur une profondeur comprise entre 0.1 nanomètre et 10 millimètres. Les possibilités de balayage étendues rendent ce système idéal pour les échantillons de grandes dimensions. Les axes motorisés XYZ couplés à la possibilité d'inclinaison de l'axe Z permet une analyse très facile des échantillons et des traces d'usure. Le logiciel d'analyse permet de multiples fonctionnalités et en particulier la mesure des volumes d'usure sur des plans mais aussi sur des sphères ou des cylindres.

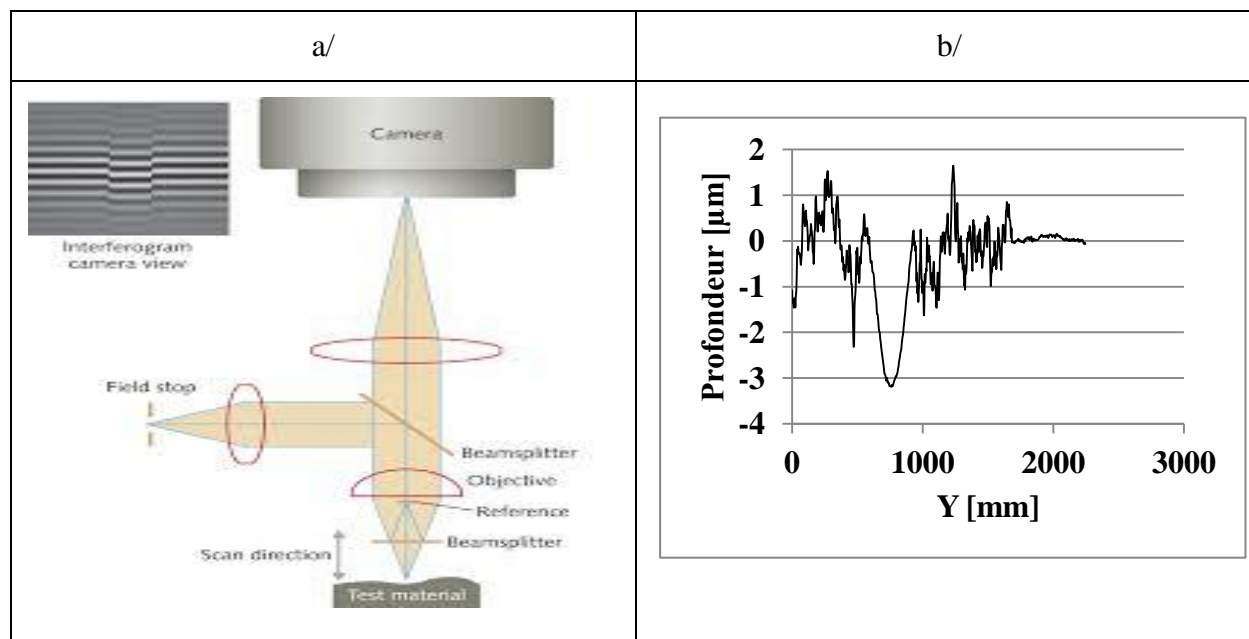


Figure.(I-1.12): a/ Profil-mètre d'analyse de surface b/ Profil d'usure affiché par le profil-mètre.

### I-1-10-3 Caractérisation des surfaces usées:

Les surfaces frottées plan bille, ont été observées par microscopie optique et microscopie électronique à Balayage (MEB) couplée à un analyseur EDX. Le microscope optique permet de visualiser la couleur de l'oxyde formé sur l'échantillon et sur la bille.

Le MEB est utilisé pour une analyse topographique et chimique. Les analyses chimiques ont été effectuées en différents endroits de la trace d'usure et en dehors de la trace.

Pour quantifier le volume usé du système, on applique la procédure suivante :

Sur chaque trace, on détermine le volume situé en dessous du plan de base soit  $V_-$  et le volume situé au dessus du plan de base soit  $V_+$ . Le volume  $V_-$  est associé à la quantité de matière enlevée de la surface frottée alors que le  $V_+$  peut être associé au transfert sur l'interface. Le volume usé total est donc exprimé par model mathématique en détermine le volume total sur le plan  $V_{tplan}$  et sur le contre corps  $V_{tcc}$  ici la sphère ou le cylindre. L'usure par frottement peut amener différents problèmes de pertes de côtes entraînant des modifications géométriques, des pertes de résistance des matériaux comme une diminution de la résistance à la fatigue,...etc.

Selon la direction du mouvement relatif, on distingue quatre grands modes de frottement **Fig.(I-1.13)** :

- Le frottement tangential lorsque le mouvement des corps en contact est tangential et rectiligne.

- Le frottement radial lorsque l'effort normal change de sens, et où les deux corps considérés restent en contact permanent.
- Le frottement rotationnel qui peut être assimilé à un roulement oscillatoire d'un corps sur l'autre.
- Le frottement en torsion (ou pivotement) où les surfaces des premiers corps en contact sont sollicitées en torsion.

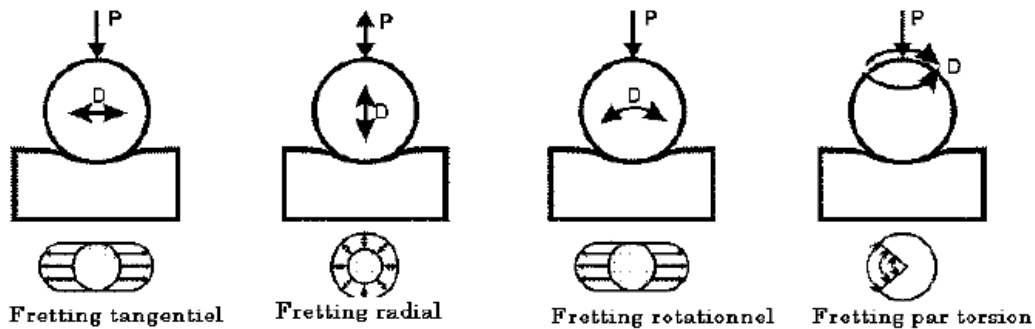


Figure.(I-1.13 ): Modes de frottements : tangentiel, radial, rotationnel, torsion.

Dans un contact tribologique ces quatre modes de frottements peuvent intervenir simultanément et interagir les uns par rapport aux autres, l'intérêt d'une telle décomposition est alors de pouvoir les considérer individuellement pour mieux les appréhender[82,83].

#### I-1-10-4 La prédisposition des matériaux pour créer des débris d'usure:

Ce premier stade correspond à l'aptitude des matériaux constituant les premiers corps à accommoder les vitesses et les déformations locales imposées. En effet, cette faculté d'accommodation va déterminer la vitesse de détachement et la quantité des débris. Pour un même matériau, la profondeur des dégradations va dépendre de la durée de cette première étape.

Dans un frottement par petits débats, plusieurs situations peuvent se présenter en fonction de la géométrie de contact et de l'effort normal ou tangentiel. En effet, sous l'action de l'effort tangentiel des zones de déformations superficielles intenses peuvent apparaître, et sous l'action de l'effort normal des fissures peuvent se propager dans les zones de cisaillements. Dans cette première étape, il faut aussi prendre en compte le rôle des couches superficielles de « polluants » que l'on trouve en surface des premiers corps, ainsi que des couches adsorbées qui contribuent à la prédisposition des matériaux à créer des débris [83-85].

### ✓ **La création et l'évolution de ces débris:**

La création de débris en condition de frottement peut être très particulière, elle suppose souvent l'existence d'une zone « source » difficilement mesurable. Néanmoins, des études ont montré que cette zone était le siège de nombreuses modifications tribologiques, physico-chimiques, mécaniques, ou encore thermiques qui sont à l'origine du détachement des particules et de la création de débris au sein du contact.

Ces débris vont alors jouer un rôle similaire aux débris que l'on peut trouver lors d'autres types de frottement que le frottement, néanmoins dans une sollicitation de frottement les débris séjournent toujours un certain temps dans le contact, ils ne sont jamais directement évacués en débris d'usure. Ils sont en effet dans un premier temps capturés et piégés dans le contact, ils vont alors continuer à se déformer plastiquement et à être broyés. Leur taille moyenne va en général diminuer et ils vont se fragmenter augmentant ainsi leur surface spécifique et les rendant encore plus sensibles à l'environnement. Comme dans de nombreux cas de frottement sec, et c'est la même chose en petits débattements, les débris durant la période où ils restent piégés dans le contact peuvent jouer un rôle de « lubrifiant » et de protection entre les surfaces des premiers corps.

### ✓ **Le comportement du lit de débris:**

Les particules dans le contact jouent un rôle de protection des surfaces des premiers corps, mais sous certaines conditions, elles peuvent également avoir un effet inverse des particules détachées très dures et très rigides peuvent avoir tendance à labourer les surfaces des premiers corps et à augmenter l'abrasion. Ces particules ont également un rôle de portance entre les deux premiers corps dans les contacts par petits débattements. De plus, la séparation des premiers corps due au lit de débris peut être totale ou partielle.

Ces différents comportements du lit de débris sont dus au fait que les particules détachées peuvent varier en taille, en composition et donc en comportement mécanique pendant qu'elles sont dans le contact avant d'en être éliminées définitivement et d'être considérées comme des particules d'usure. Ces débris peuvent, lorsqu'ils sont dans le contact, se fixer dans les creux, aux sommets des aspérités, créer des ponts entre les aspérités, être réduits sous forme de poudre, ou encore jouer un rôle de portance comme il a été évoqué auparavant lorsqu'ils bouchent puis débordent des volumes libres entre les creux et les sommets des surfaces. Ce piégeage étant gouverné par l'aptitude du troisième corps à adhérer aux surfaces des premiers corps, à former des intercalaires continues et cohésifs. Les

piégeages sont également dépendant de l'aptitude du lit de débris à rester cohérent en présence d'un champ vibratoire.

Chacun de ces processus a sa propre cinétique mais ils interagissent fortement les uns avec les autres. Une liste des différents dommages identifiés sur les surfaces soumises à des sollicitations de frottement a été établie : piqures, oxydes, débris, rayures, transfert, déformation plastique, fissuration en sous couches, cratères, fissure s'amorçant sous diverse formes en surface.

L'usure par frottement de la même manière que tous les autres types d'usure par frottement sec n'est pas une propriété des matériaux. Elle découle et dépend de nombreux autres paramètres. Il faut en effet pour pouvoir étudier ce phénomène d'usure par petits débattements, prendre en compte comme dans tout contact sec l'environnement chimique, la géométrie du contact, l'environnement vibratoire (qui peut être la source même des frottements par petits débattements), le compactage des débris, la corrosion, les mécanismes de transfert, le couplage des aspects mécaniques, thermodynamiques et physico-chimiques.

Une liste de plus de cinquante paramètres plus ou moins interdépendants, influençant la résistance au frottement a été établie par Beard en 1982[84-86]. Des études ont notamment été faites sur l'influence des débattements, la température de contact, etc.

### I-1-10-5 **Types de régimes de frottement:**

En ce qui concerne les différents régimes de frottements, les sources bibliographiques établissent que lors d'un frottement sous petits débattements on peut classiquement en mettre en évidence trois différents régimes d'un contact de deux solides[86-89] :

#### ✓ **Le régime de collage:**

Lors de cette phase, l'interface entre les deux solides en contact accommode les déplacements par déformations élastiques. Le domaine de collage est maintenu par des aspérités fermées qui peuvent se partager plastiquement dans la direction des micromouvements et rompre ainsi le collage. Le collage total génère une destruction plus ou moins importante des matériaux.

### ✓ **Le régime mixte:**

Dans ce type de régime le cycle prend une forme elliptique globale (contact hertzienne), mais il peut évoluer au cours des cycles et prendre des formes complexes lorsque l'on s'intéresse à son évolution dans le temps. Généralement, ce type de régime est caractérisé par des bûches de frottement (couches superposés) de formes complexes et irrégulières qui finissent par prendre une forme elliptique (voir quasi rectangulaire) après un certain nombre de cycles. C'est l'étape intermédiaire entre le collage et le glissement total, et sûrement la plus complexe et celle qui produit le plus de dommages.

### ✓ **Le régime de glissement total:**

A ce stade le cycle prend et conserve une forme rectangulaire, mais le coefficient de frottement peut avoir des variations importantes. L'énergie dissipée dans le contact par frottement est représentée par l'aire du cycle et peut permettre de quantifier la durabilité des contacts selon certains auteurs[90-91].

Ces différents régimes permettent d'élaborer des cartes de frottement ou des cartes de réponses des matériaux permettant de définir à partir de quelles conditions un couple de matériaux passe du collage, au régime mixte et ensuite au régime de glissement total et quelles sont les dégradations associées (amorçage de fissure, débris, etc.). Visuellement ces différents régimes se retrouvent sur les faciès d'usure des pièces en contact.

### I-1-10-6 **Processus de vieillissement d'un matériaux frottant:**

La notion de vieillissement des composants dans les installations soumises à des frottements (usure), leurs durées de vie est liées par trois facteurs principaux :

- L'usure normale et vieillissement des composants dépendent en particulier de leurs âge, conditions de fonctionnement et des actions de maintenance dont ils font l'objet.
- Le niveau de sûreté, qui doit rester en permanence conforme au référentiel des exigences de sûreté auquel la centrale est soumise et qui est susceptible d'évoluer en fonction de nouvelles réglementations.
- La compétitivité qui doit demeurer satisfaisante vis-à-vis de celle des autres moyens de production.

Le vieillissement peut être mieux maîtrisé en connaissant bien ses mécanismes. Ceux-ci peuvent être classés en deux grandes catégories :

- Evolution des propriétés des matériaux (perte des caractéristiques physiques, mécaniques, électriques).
- Dégradation des structures (fatigue, corrosion, usure).



## I-2 Préparation et caractérisation des cermets :

### I-2-1 Métallurgie des poudres:

La métallurgie des poudres peut être caractérisée par les trois mots clés suivants : poudre, pression et température. Les différents modes de fabrication sur laquelle elle repose, permettent l'obtention de pièces poreuses ou non, de formes, dimensions et masses variées. Les techniques employées successivement au cours de l'élaboration d'un composant peuvent se résumer de la façon suivante[92-94]:

- Elaboration de la poudre.
- Densification et mise en forme.
- Frittage.
- Caractérisation de la dureté et la micro-dureté.

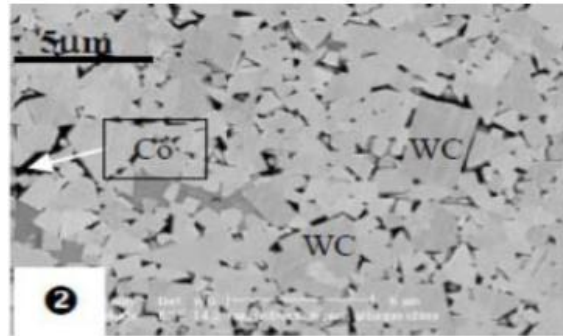
### I-2-2 Elaboration de la poudre:

Les poudres utilisées ne sont pas des produits naturels au sens où elles ne sont pas issues directement du milieu naturel. Elles sont produites suivant différentes méthodes dont chacune se distingue par les propriétés conférées non seulement à la poudre en terme de granulométrie, microstructure, coulabilité, compressibilité, mais également à la pièce finale. Ces méthodes peuvent être dissociées en deux classes différentes : les méthodes mécaniques et chimiques.

#### I-2-2-1 La poudre WC-Co:

La poudre WC-Co est une poudre à base de carbure de tungstène elle constitue une base pour la fabrication des outils de coupe et des pièces d'usure. C'est un matériau extra fin puisque la taille des grains est inférieure à 1  $\mu\text{m}$ . De ce fait, le matériau présente une très mauvaise coulabilité, particulièrement gênante lors du remplissage automatique industriel des matrices. Le mélange est alors transformé sous forme de granules **Fig.(I-2.1)** qui présente une micrographie. Ces granules, de forme sphérique, ont un diamètre qui varie de 40 à 220  $\mu\text{m}$ , avec une valeur moyenne d'environ 200  $\mu\text{m}$ . La cohésion des constituants, carbure de tungstène WC et cobalt Co, est assurée par un liant organique, généralement du polyéthylène glycol (PEG). La masse volumique apparente  $\rho$  du matériau est de 3.20  $\text{g}/\text{cm}^3$  tandis que la masse volumique théorique est  $\rho_{\text{th}} = 14.40 \text{ g}/\text{cm}^3$ [25,27].

La poudre WC-Co "Micrograin tungstene carbide grade" : C'est un mélange de poudres de carbure de tungstène et de cobalt largement utilisé industriellement notamment pour la fabrication d'outils de coupe et de pièces d'usure.



*Figure.(I-2.1): Microstructure de la poudre comprimé WC et Co*

### I-2-2-2 La poudre TiC:

Structure cristalline du carbure de titane cristallise, dans le système cubique à faces centrées (CFC), le paramètre de leur maille proche ( $a = 0.4328 \mu\text{m}$ ). Dans la maille, les atomes de titane forment un réseau cubique à faces centrées, alors que les atomes de carbone ou d'azote sont localisés dans les interstices octaédriques. Bien que le TiC soit classé comme matériau à liaison métallique, il a aussi un degré de liaison covalente et de liaison ionique. La structure covalente (entre les atomes métal-carbone et métal-métal) résulte de l'interaction entre l'état 2p du carbone et l'état d du métal, et aussi de l'interaction entre les atomes métalliques. La nature ionique résulte du transfert d'électrons du métal vers le carbone. La dureté élevée est expliquée par le caractère covalent, par contre, les conductivités électriques et thermiques sont liées au caractère métallique de la liaison. Ce comportement est expliqué par la présence de lacunes de carbone dans le réseau. La valeur maximale du paramètre « a » de TiC, est obtenue pour un rapport C/Ti  $\approx 0,85$  et non pour TiC stœchiométrique. Le carbone est un élément stabilisant de la phase  $\alpha$  du titane. Sa solubilité maximale dans la phase hexagonale de titane, est très faible (d'environ 1,6% at) à une température inférieure à  $920^\circ\text{C}$  et la solubilité dans la phase  $\beta$  de titane est inférieure à 0,7% at. à une température inférieure à  $1670^\circ\text{C}$  [95].

### I-2-2-3 Caractéristiques et propriétés des TiC:

#### ✓ Caractéristiques atomiques du carbone et du titane:

Il est à noter que l'électronégativité d'un élément n'est pas une valeur fixe car elle dépend de l'état de covalence et que le rayon atomique de C et Ti peut aussi varier, car la taille est associée à une fonction d'onde et à son état d'hybridation.

Les facteurs qui déterminent la nature d'un composé sont les caractéristiques atomiques jouant un rôle important dans la formation d'un carbure, parmi ces facteurs nous citons:

- La différence d'électronégativité entre un élément et un autre : il est à noter que pour la formation du carbure de titane, cette différence est importante.
- La taille respective des atomes : le carbone possède un rayon atomique très petit, lorsque la différence de taille est grande, la formation d'un composé interstitiel est favorisée et lorsque cette différence est faible, la formation d'un composé covalent est présente (par exemple SiC).
- La nature de la liaison chimique de ces atomes est d'une grande différence en électronégativité favorisant une liaison ionique, alors qu'une faible différence favorise la liaison covalente.

#### ✓ Propriétés et caractéristiques du carbone et du titane(TiC) :

Le TiC possède une énergie de liaison et un caractère réfractaire relativement élevé. Ces propriétés, telles que le point de fusion, la dureté, la résistivité électrique, sont fortement liées à cette énergie de liaison. Etant donné le large domaine de composition et la présence de défauts cristallins dans les réseaux, il existe une grande diversité des valeurs trouvées dans la littérature concernant les propriétés du carbure de titane. Une autre raison de cette diversité provient de l'effet des impuretés, comme par exemple la présence d'oxygène, qui a tendance à noircir le matériau selon la proportion présente [96-100]. Le **Tab.(I-2.1)** comporte un résumé des propriétés de TiC.

Tableau.( I-2.1 ): Propriétés thermomécaniques du TiC.

Caractéristiques et propriétés	TiC
Structure cristallin	CFC de type NaCl a=0.4328nm
Masse moléculaire	59.91 (g/mol)
Densité	4.91
Points de fusion	3067 (°c)
Chaleur spécifique $c_p$	33.8 (j/mol.K)
Conductivité thermique	21K (w/m.°c)
Coefficient de dilatation thermique	$7.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Dureté de Vickers	28-35 (GPa)
Module d'élasticité	410-150 (GPa)
Coefficient de poisson	0.3
Résistance à l'oxydation	A l'aire 800°C

### I-2-3 Le processus de préparation de la poudre avant le frittage:

- **Le broyage** : Repose sur la fragmentation d'un matériau solide sous l'effet de chocs répétés. Des éléments étrangers tels que des billes sont généralement utilisés afin d'accroître l'intensité du broyage sous l'effet des impacts, de la pression et des frottements mutuels. Le broyage peut être réalisé à sec ou par voie humide.
- **L'atomisation** : Consiste à désintégrer et solidifier un métal liquide sous l'effet d'un gaz, d'un liquide sous pression, ou d'ultrasons. Le degré de dispersion, de forme et de structure des particules de poudre peuvent varier en changeant l'énergie mise en jeu, la température, la viscosité, la tension de surface et les conditions de refroidissements de l'alliage liquide. Les méthodes chimiques sont beaucoup plus nombreuses et variées. On peut citer comme exemple :
  - **La réduction** : Le procédés utilise principalement le carbone et l'hydrogène comme milieu réducteur. Une partie des poudres est réduit par l'intermédiaire d'un agent réducteur solide, subit diverses opérations de séchage, séparation magnétique, recuit. Néanmoins, le procédé d'atomisation tend aujourd'hui à supplanter ce procédé : nous verrons que la poudre, étudié dans ce manuscrit, est une poudre atomisée.
  - **L'électrolyse** : Une solution aqueuse d'un sel de métal est réservée à la production de poudres très pures (fer, cuivre, nickel par exemple). Son utilisation est également limitée par son coût relativement élevé.

- **Séchage des poudres** : Un processus effectué pour éliminer l'humidité contenue dans les poudres sous formes de molécules simples ( $O_2$ ) ou composées ( $H_2O$ ) adsorbées à la surface des particules de poudres. Pour cela il subit le séchage selon les conditions suivantes :
  - Température de séchage  $150^{\circ}C \div 200^{\circ}C$
  - Temps de séchage 6 heures.

La méthode par plasma permet de produire des poudres ultrafines. Les particules de poudres sont produites sous l'action d'un jet d'argon ionisé à très haute température,  $4500^{\circ}C$  à  $5000^{\circ}C$ .

### **I-2-4 Procédure de frittage, tests de dureté et caractérisation des échantillons (cermets):**

#### **I-2-4-1 Techniques de préparation de la poudre et de l'échantillon avant frittage:**

La technique de préparation de l'échantillon à partir des mélanges de poudres de départ, destinée à l'élaboration de la céramique (WC-Co-TiC) a été réalisée selon les opérations suivantes :

- **préparation de la poudre** : calcul du poids massique de la composition WC, Co, TiC pour les quatre échantillons en fonction de leurs pourcentages massiques.
- **Pesée** : La pesée des poudres WC, Co, et TiC est effectuée par une balance électrique de type OHUMS. Ces mesures sont effectuées selon le pourcentage massique des échantillons et ses géométries.
- **Broyage** : Le broyage a pour but la réduction des agglomérats formés lors de la synthèse à différentes distributions granulométriques. Le temps de broyage de 22 à 24 heures à une vitesse 60 tr/min, permet l'obtention d'une distribution granulométrique moyenne dans un milieu humide d'alcool  $C_2H_5OH$ .
- **Séchage des poudres** : Séchage des poudres dans un four pour un temps de 20 à 40 min à une température de  $100^{\circ}C$ .
- **Mélange** : Les mélanges de poudres ont été réalisés à l'aide d'une colle pour assurer une bonne homogénéisation des poudres et surtout une bonne répartition des fines particules.
- **Tamissage** : Le mélange broyé est tamisé à travers des tamis avec des mailles de 500  $\mu m$ , 400  $\mu m$ , 315  $\mu m$ , 200  $\mu m$ , 160  $\mu m$ , 125  $\mu m$ , 100  $\mu m$ , 63  $\mu m$ , 50  $\mu m$ , 32  $\mu m$ .

L'opération de tamisage faite par vibration dans un tamiseur, suivant les conditions : une fréquence  $f = 60$  Hz et un temps  $t = (30, 45)$  min.

- **Compactage à froid** : Dans la pratique la plus courante, on comprime la poudre par compression uni-axiale à froid par une presse hydraulique de valeur de pressage adapté selon plusieurs paramètres, pour notre cas 15 MPa afin d'obtenir un compactage ayant une cohésion suffisante (densité de l'ordre de 45-50%). On vise la mise en contact des particules et la création des interfaces particule, nécessaires aux réactions.
- **Étuvage** : L'opération d'étuvage c'est un procédé de vaporisation de la colle se trouvant dans les échantillons dans un four pendant une durée de 3 à 4 Heures.
- **Calcination** : Les poudres d'oxydes sont calcinées dans un four à 800°C pendant une durée de 2 heures à 4 heures.
- **Pressage à froid** : La mise en forme de nos poudres céramiques obtenues par combustion se fait par pressage à froid dans le but de limiter la porosité pendant la densification au frittage à chaud. Le cycle de pressage se résume en une montée contrôlée en pression (MPa).
- **Synthèse** : La synthèse des poudres est réalisée à l'air libre. Les échantillons sont disposés sur un support réfractaire dans une position permettant le chauffage de l'agglomérat et l'amorçage.

### I-2-4-2 Opération de frittage:

Le frittage est une opération importante au cours de laquelle le matériau acquiert les propriétés physiques et mécaniques requises. Dans notre cas, il sera simplement vu comme un procédé permettant de transformer un corps dispersé en un solide métallique. L'opération de frittage consiste à chauffer la pièce à une température telle que les grains de poudre se soudent entre eux :

- Par des déplacements d'atomes à l'état solide (diffusion de matière à l'état solide) : on parle dans ce cas de frittage en phase solide.
- Par une sorte de brasage lorsque la température de fusion d'un des constituants a été dépassée de telle sorte qu'une phase liquide apparaisse : on parle alors frittage avec phase liquide. Le frittage est réalisé industriellement dans des fours dont la conception est déterminée par le matériau, la forme, la taille et la quantité de pièces mais aussi la température de frittage, la durée du traitement thermique.

- Un lubrifiant utilisé lors de la compression uni axiale est éliminé sous une atmosphère généralement oxydante. Cette opération doit être réalisée avec soin car les produits carbonés qui se forment lors de la décomposition constituent des obstacles sérieux au soudage des grains.

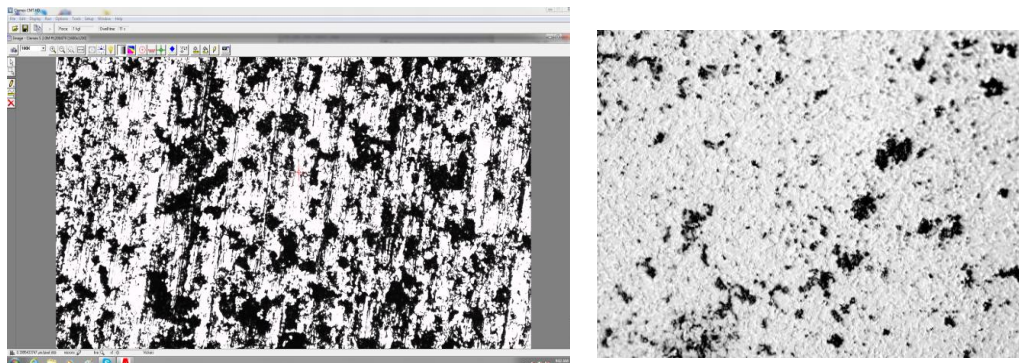
### I-2-4-3 **Processus du frittage dans le four:**

- Les échenillons sont préchauffés jusqu'à la température exigée dite de frittage (phase de montée en température), la température de frittage est maintenue pendant une durée variable de quelques minutes à plusieurs heures suivant le matériau considéré.
- Un refroidissement lent s'opère dans un premier temps, suivi par un refroidissement rapide. Le maintien d'une atmosphère adaptée est l'un des paramètres importants contrôlant le succès du frittage des pièces de poudres métalliques. Le milieu dans le four sous vide afin d'éviter toute oxydation des pièces, accompagné par un gaz (argan) sous pression dans l'enceinte du four pour éliminer (oxygène) et les oxydes entre les particules des pièces frittés. Dans la plupart des cas, le frittage entraîne une augmentation de la densité du matériau. A cette densification correspond un retrait global de la pièce généralement anisotrope, dont la maîtrise constitue un enjeu économique important. D'autre part, les hétérogénéités de densités induites à la compression peuvent fissurer les pièces [101-103].

### I-2-4-4 **Caractérisation des échantillons après frittage:**

Des essais de caractérisations de la "dureté" des échantillons sont menés en mesurant la pression de contact pendant l'enfoncement d'un indenteur (pyramidal, conique ou sphérique). La dureté des surfaces est mesurée après l'élaboration des échantillons après frittage. Ces essais sont faciles à mettre en œuvre, puisqu'ils ne nécessitent qu'un polissage et peuvent être réalisés sur des échantillons de petites tailles. Les essais de dureté peuvent porter sur des échelles millimétriques ou nanométriques, selon le dispositif expérimental utilisé. Les essais classiques sont peu coûteux et selon les applications ils peuvent être considérés comme non destructifs. Cependant, contrairement aux essais de frottements les essais de dureté sont d'une interprétation beaucoup plus délicate et ne permettent pas d'accéder directement aux paramètres de la loi de comportement d'un matériau mais nécessitent une analyse inverse. Ces mesures sont indispensables afin de connaître la dureté superficielle moyenne des échantillons (cermets), et les comparer avec les valeurs aux normes de duretés en (SI).

Une caractérisation de la micro dureté consiste à utiliser des indenteurs de taille submillimétrique. Les empreintes ne couvrent alors qu'un à quelques grains, et les résultats présentent une dispersion significative, ce qui nécessite de multiplier les mesures **Fig.(I-2.2)**.



*Figure.( I-2.2 ): Micro dureté d'un échantillon WC-Co-TiC*

### **I-2-5 Objectif et protocole des tests de frottement:**

#### **I-2-5-1 Objectif des tests de frottements:**

Des tests de frottements ont été effectués sur les différentes nuances (cermets), par un tribomètre (pin on disc) à haute température dans des conditions thermomécaniques sévères. Ces tests ont pour objectif la détermination des coefficients de frottements et le volume de la matière enlevé en fonction des différents paramètres  $V = f(T^{\circ}, V_g, F)$ . Ces tests permettent aussi de:

- Suivre l'évolution des coefficients de frottements en fonction des paramètres c'est à dire en variant les paramètres thermomécaniques pour les différentes nuances (charge, température, vitesse de glissement, cycle).
- Analyser par MEB/EDX la microstructure de chaque piste usée.

#### **I-2-5-2 Protocole des tests de frottements:**

Une gamme de tests de frottements pour chaque nuance, testée par un tribomètre à haute température toute en variant les paramètres thermomécaniques. Le protocole des tests de frottements, a pour objectif de programmer des tests de frottements pour différents paramètres sévères aux (conditions industriels) durant un cycle très long. Pour chaque cycle des tests de frottements, on adapte la charge, la température de contact et la vitesse de glissement dans le but de mesurer le volume usé ou le taux d'usure (matière enlevée), et le coefficient de frottements en fonction des différents paramètres thermomécaniques.



Une comparaison entre le taux d'usure et les nuances sous un régime thermomécanique sévère permet de:

- Mesurer l'influence de la température et la vitesse de glissement sur le coefficient de frottement et la nuance.
- Mesurer l'influence de la température en fonction du volume (matière enlevée) pour chaque nuance.
- Analyser les pistes d'usure par profilemètre.
- Analyser les différentes résolutions de la microstructure par MEB/EDX.
- Comparer le volume d'usure entre les différentes nuances
- Comparer le volume d'usure en fonction des différents paramètres (vitesse de glissement, température de contact)

**I-3 Procédure de simulation de l'usure :**

**I-3-1 Modèle d'usure utilisé par les codes de calcul:**

Des expériences telles que celles montrent que l'usure est linéaire, proportionnelle à la distance de glissement, au moins après une période de rodage, une période qui peut être difficile à mesurer pour diverses raisons. La plupart des modèles d'usures supposent la linéarité, et souvent aussi supposent que l'usure est directement proportionnelle à la pression de contact locale. Le modèle d'usure le plus commun est appelé loi d'usure d'Archard, bien que Holm formulé le même modèle beaucoup plus tôt que Archard. Le modèle d'Archard modifié est de la forme général suivante:

$V = k_u \frac{F \cdot S}{H_V}$	<b>(I-3.1)</b>
---------------------------------	----------------

où V est le volume d'usure, K est le coefficient d'usure sans dimension F, est la charge normale, H est la dureté de la surface de contact plus douce et S est la distance de glissement. Le model **(I-3.1)** est souvent reformulé en divisant les deux côtés par la surface de contact apparente A et en remplaçant  $K_u / H_V$  par k [104-110].

**I-3-2 Processus de la simulation d'un modèle d'usure:**

**I-3-2-1 Définition de l'usure sévère et légère considérée dans les codes:**

L'usure peut être définie comme l'élimination du matériau des surfaces solides par une action mécanique. L'usure peut apparaître de plusieurs façons, en fonction du matériau des surfaces de contacts et les conditions de fonctionnements. En termes d'ingénierie, l'usure est souvent classé comme douce ou sévère. Les ingénieurs visent une usure légère, qui peut être obtenu par création de surfaces de contacts, de formes et de topographies appropriées.

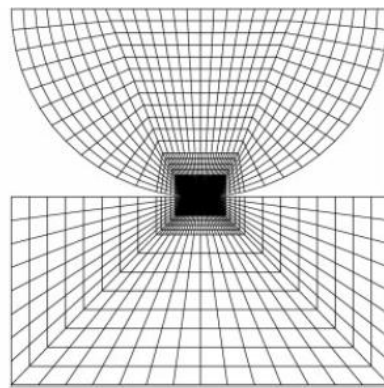
Cependant, pour obtenir une usure légère, nous devons souvent durcir et lubrifier les contacts d'une manière ou d'une autre. La lubrification a pour objectif souvent de réduire l'usure, et donner un faible frottement. L'usure légère entraîne des surfaces lisses qui peut parfois produire des surfaces rugueuses ou entaillées. L'usure sévère plutôt plus vaste, entraîne des surfaces de contact entre les aspérités, cette usure apparait aux conditions thermomécaniques.

L'usure par fatigue superficielle, que l'on peut rencontrer dans les contacts roulants, apparaît sous forme de piqûres ou de flocons sur les surfaces de contact; dans une telle usure, les surfaces se fatiguent en raison des contraintes de contact élevées répétées.

I-3-2-2 **Modèle de contact de simulation l'usure:**

Les simulations d'usure excluent normalement la fatigue de surface et ne traitent que de l'usure par glissement, même s'il semble improbable que le composant coulissant soit le seul mécanisme actif. Pourtant, les contacts roulants et glissants sont courants dans les machines à hautes performances.

On considère un modèle de contact (sphère/plan) de simulation de l'usure maillé, les surfaces sont pas séparer par un film d'huile (contact sec) **Fig.(I-3.1)**. Un glissement relatif entre les deux surfaces, durant un cycle, le phénomène d'usure se produit dans la surface moins dure.



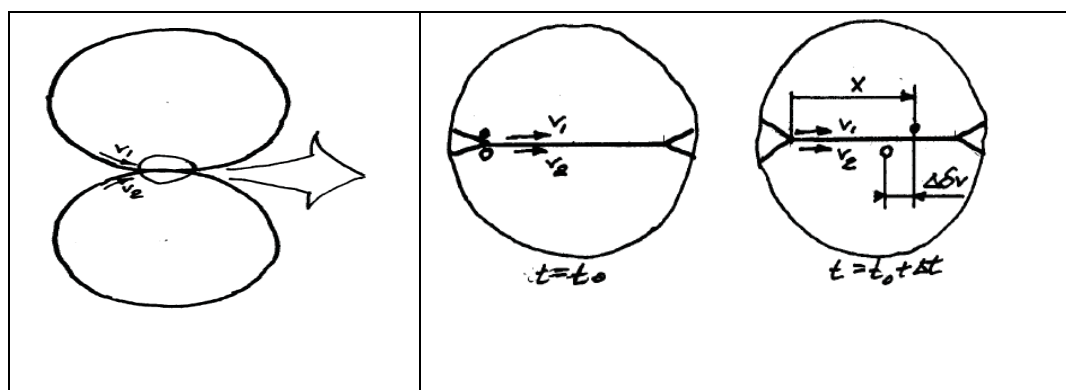
*Figure.(I-3.1): Modèle de contact de simulation de l'usure.*

Lors des interactions de glissement entre les surfaces de contact, ces dislocations forment des fissures qui se propagent parallèlement aux surfaces. Le volume d'usure total est supposé égal à la somme du volume d'usure de chaque surface de contact. Pour une simulation du volume d'usure  $V$ , en considère  $N_i$  le nombre de couches d'usure de la surface  $i$ ,  $A_i$  est le surface moyenne de chaque couche,  $h_i$  est l'épaisseur de la couche délaminée,  $s_i$  est la distance de glissement nécessaire pour générer des couches et  $s$  est la distance de glissement réelle. Il est à noter que le volume d'usure de chaque surface de contact (représenté par le nombres de noeux  $i$  en contacts déplacés) c'est le volume d'usure total.

Les observations expérimentales indiquent que l'usure est presque directement proportionnelle à la distance de glissement dans des conditions douces stables. La méthode d'observation en un seul point peut être illustrée par le type de pin-on-disc expérience illustrée

sur la **Fig.(II-2.2)**. Un point sur la surface de contact de la broche est en contact tout le temps, mais un point de contact sur le disque est seulement en contact avec le pion lorsque le pion passe ce point. Même si les deux surfaces de contact ont la même résistance à l'usure, la goupille usera beaucoup plus que le disque[111].

Les surfaces de contact se déplacent avec des vitesses périphériques de  $v_1$  et  $v_2$ , avec  $v_1 > v_2$  **Fig.(I-3.2)**. La contrainte de cisaillement par frottement dans le contact dépend du processus, ce qui signifie qu'au début, il dépendra principalement des déformations élastiques. Pour des couples plus élevés ou à un glissement plus élevé, la contrainte de cisaillement dépendra principalement du glissement entre les surfaces. Puisque ces phénomènes sont toujours actifs dans les contacts roulants et glissants, il est intéressant d'analyser dans quelle mesure la zone de collage, représentée par la déformation élastique, influence le frottement et l'usure dans un contact. Les résultats montrent que dans de nombreux cas, l'effet de la déformation élastique sur le frottement et l'usure peut être négligé[112].



*Figure.(I-3.2): Deux surfaces de contact glissant se déplacent avec des vitesses périphériques de  $v_1$  et  $v_2$  provoquant une déformations tangentielle(usure). [112]*

### I-3-2-3 Modèle d'usure de glissement dans un contact:

L'usure d'un contact roulant et coulissant peut être de différents types, si une surface est soumise à une charge dynamique élevée répétée, une fatigue de surface peut se produire et des piqûres peuvent se former sur la surface.

Des résultats de tests simples sur les broches indiquent que la distance de glissement est un paramètre important pour déterminer l'usure par glissement. Pour les contacts roulants et glissants, la partie coulissante des interactions de surface, bien que non évidente, présente donc un intérêt. Certains chercheurs soutiennent que l'effet du glissement est négligeable dans la plupart des contacts roulants et glissants. Diverses études ont démontré, cependant, que les distances que les contacts glissant contre les surfaces en interaction opposées pendant une

maille sont suffisantes pour former des débris d'usure dans la plupart des contacts de roulement et de glissement. Pour cette raison, nous allons montrer à quel point un point sur une surface de contact glisse contre une surface de contact opposée pendant un maillage [113-115].

Considérons deux disques pressés ensemble et fonctionnant à des vitesses périphériques différentes. C'est une situation typique dans les contacts roulants de traction. La valeur absolue de la distance de glissement, avec  $i = 1$  un point sur la surface de contact du corps 1 et  $i = 2$  un point sur la surface de contact du corps 2. La distance de glissement,  $S_i$  pendant une maille en un point l'une des surfaces de contact glissant contre la surface d'interaction opposée est égale à :

$S_i = 2a \left  (v_1 - v_2) / v_i \right $	<b>(I-3.2)</b>
---	----------------

où  $a$  est la demi-largeur du contact,  $v_1$  est la vitesse périphérique de la surface 1, et  $v_2$  est la vitesse périphérique de la surface 2. Les distances de glissement dans le contact de roulement et de glissement selon l'équation (I-3.2) s'appliquent aux rouleaux pour les contacts entre d'autres organes, tels que les engrenages et les roues et les rails de chemin de fer. La détermination des distances de glissement peut être plus compliquée. Le principe est cependant le même, à savoir, l'étude de la distance d'un point sur une surface de contact glisse contre la surface opposée au cours d'un seul maillage.

### I-3-3 Condition d'état d'un processus d'usure:

L'usure est rarement un processus en régime permanent, même si les conditions d'état stable sont souhaitables et prédominent souvent dans le processus d'usure. Normalement, l'usure de rodage est supérieure à l'usure qui s'ensuit. Les formes des surfaces de contact sont souvent telles que la profondeur d'usure varie avec le temps. de plus, une légère usure des surfaces de contacts provoque des changements géométriques qui initient d'autres processus d'usure. Par exemple Olofsson [116], a constaté qu'une légère usure des surfaces de contacts des roulements à rouleaux sphériques augmente la pression de contact aux points de roulement purs. La pression de contact accrue signifie que l'usure par fatigue de surface aux points de roulement purs commence beaucoup plus tôt que prévu.

Nous avons constaté que les simulations de processus d'usure peuvent être considérées comme des problèmes de valeur initiale [114]. Nous connaissons assez bien les conditions initiales et les propriétés des contacts, et si nous pouvons également formuler comment les

surfaces changent, il devrait être possible de prédire les états des surfaces à tout moment pendant le fonctionnement. Le taux d'usure peut alors être formulé selon le modèle **(I-3.3)** suivant:

$dh/dt = f(\text{matériaux , topographie, lubrification, charge, vitesse, température, .....})$	<b>(I-3.3)</b>
---	----------------

où  $h$  est la profondeur d'usure en un point particulier sur une surface en interaction et  $t$  est le temps. Cette formulation est en accord avec le comportement dynamique des systèmes mécaniques et peut facilement être intégrée numériquement.

### I-3-4 **Répartition de la pression par la MEF:**

Lorsque l'on travaille avec la relation linéaire entre l'usure, la pression et la distance de glissement, la détermination de la pression de contact en un point particulier est souvent la partie la plus délicate et la plus longue de la simulation. La déformation en un point particulier dépend de la déformation de tous les autres points autour du point observé, ce qui implique un processus assez complexe pour calculer avec précision la répartition de la pression. Aujourd'hui, il existe plusieurs approches différentes pour déterminer la pression de contact.

La méthode de calcul par éléments finis (FE) devient un outil nécessaire pour la résolution des problèmes multi-physiques (structuraux...), complexes par un code de calcul et un ordinateur puissant. Le principal inconvénient de la méthode FE, est la détermination de la distribution de la pression implique souvent de considérer un grand nombre de petits éléments sur les surfaces. Ceci est souvent difficile à faire, car la combinaison avec les modèles corporels conduit souvent à un grand nombre d'éléments et à un temps de calcul très long. La méthode EF sera probablement utilisée plus à l'avenir pour les problèmes liés aux interfaces

Les méthodes de l'éléments aux frontières (BE) sont couramment utilisées pour déterminer la microtopographie dans la zone de contact. Par conséquent, la plupart des programmes (BE) ne peuvent pas être utilisés pour toutes les applications. La méthode (BE) devient un processus numérique qui est résolu de différentes manières afin d'obtenir un résultat raisonnablement précis le plus rapidement possible Certaines combinaisons intelligentes de méthodes BE et FE seront probablement utilisées à l'avenir.

Intégration numérique d'un modèle d'usure L'équation **(I-3.4)** est une simulation d'usure couramment utilisée. Intégrer numériquement un modèle d'usure implique une géométrie et un temps discrétisant. La méthode d'intégration numérique la plus simple est la méthode

d'Euler. La profondeur d'usure à un point choisi sur une surface de contact est déterminée par :

$h_{i,new} = h_{i,old} + k_i \cdot p_i \cdot  v_1 - v_2  \cdot \Delta t$	<b>(I-3.4)</b>
--	----------------

Où  $h_{i,new}$  est la profondeur d'usure obtenue sur la surface  $i$ ,  $h_{i,old}$  est la profondeur d'usure sur  $i$  dans la boucle de simulation précédente,  $k_i$  est le coefficient d'usure dimensionnel multiplié par le nombre de mailles ou de révolutions avant la géométrie la pression locale à  $i$  lorsque le pas de temps réel commence, et  $\Delta t$  est le pas de temps. Bien entendu, d'autres méthodes d'intégration numérique peuvent être utilisées de manière similaire, car différents schémas sont utilisés dans des simulations comportementales de systèmes techniques dynamiques.

Après une simulation, il faut toujours vérifier son exactitude. Les tests courants pour ce faire sont les vérifications  $k$  et  $\Delta t$ . Cependant, si les valeurs choisies pour celles-ci sont trop grandes, les résultats peuvent ne pas être corrects. Une façon courante de gérer cela est de vérifier si les mêmes résultats sont obtenus en utilisant la moitié des valeurs de  $k$  ou  $\Delta t$  [113-120].

I-3-5 **Organigramme général d'une simulation numérique de l'usure par un code:**

L'organigramme est un model général pour une simulation numérique de l'usure par un code commercial (Ansys), il passe par les étapes suivantes (paramètres d'entrés, calcule de la pression, calcule de la hauteur d'usure au niveau de chaque nœuds, puis le test nombre de cycle **Fig.(I-3.3)**).

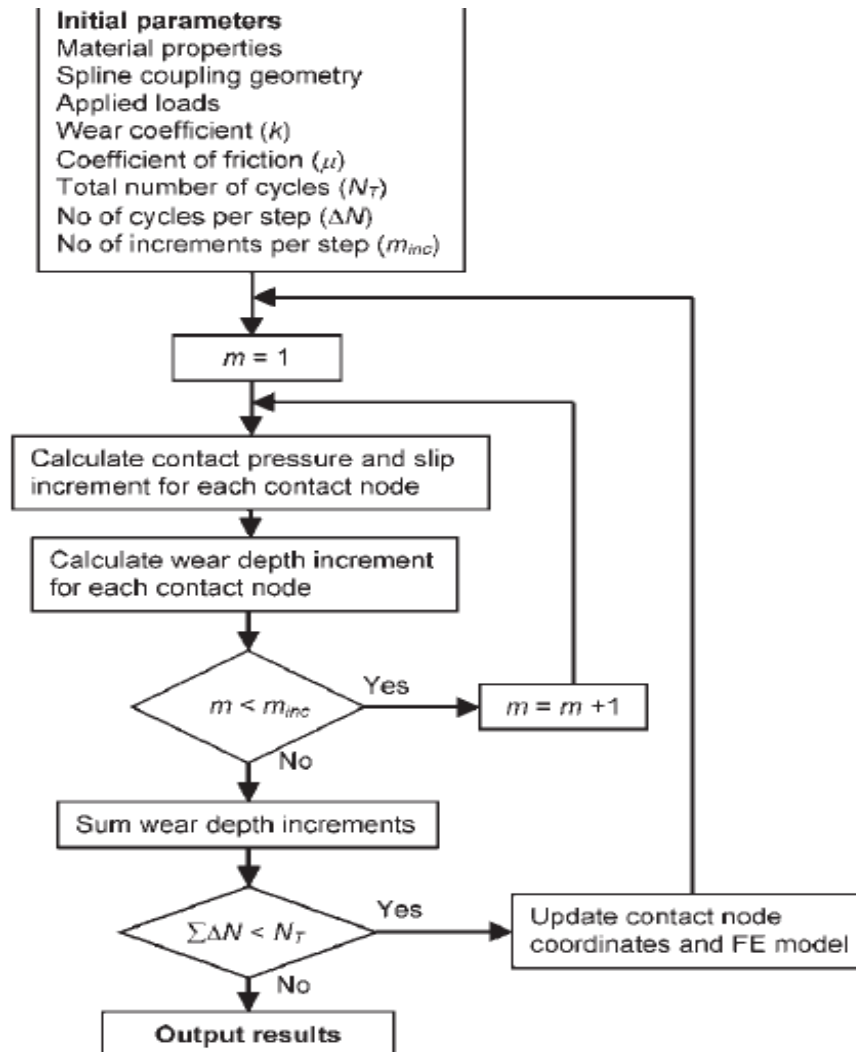


Figure.(I-3.3): Organigramme général de simulation numérique de l'usure par un code. [115]

### I-3-6 Exemple de simulation de l'usure de deux rouleaux cylindriques en contacts:

Nous considérons deux rouleaux cylindriques de rayon  $R$ . Les rouleaux sont pressés ensemble par la force  $F_N$  et tournent aux vitesses angulaires  $\omega_1$  et  $\omega_2$ , respectivement. Les vitesses périphériques des surfaces de contact sont  $v_1 = \omega_1 \cdot R$  et  $v_2 = \omega_2 \cdot R$ . L'usure des surfaces de contact est supposée être correctement décrite par le modèle d'usure suivant **Fig.(I-3.4)**:



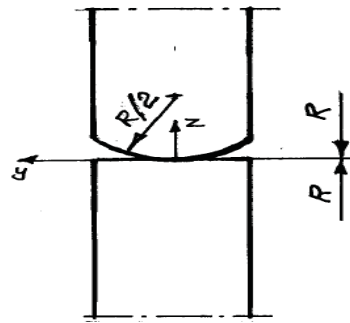


Figure.(I-3.4): Model de contact entre deux rouleaux [112]

$dh_i / dt = k_i \cdot p \cdot v_{s,i}$	<b>(I-3.5)</b>
---	----------------

où  $i = 1$  pour le rouleau 1 et  $i = 2$  pour le rouleau 2;  $h_i$  est la profondeur d'usure à un point sur la surface  $i$  quand il frotte contre la surface de contact opposée,  $k_i$  est le coefficient d'usure pour un point sur la surface  $i$  lorsqu'il frotte contre la surface de contact opposée,  $p$  est la pression de contact locale, et  $v_{s,i}$  est la vitesse de glissement (glisser contre la surface en interaction opposée).

$v_{s,i} =  v_1 - v_2 $	<b>(I-3.6)</b>
-------------------------	----------------

Nous supposons que les rouleaux sont soumis à une charge constante et que les vitesses angulaires sont constantes. Le modèle d'usure aura alors la forme suivante après intégration:

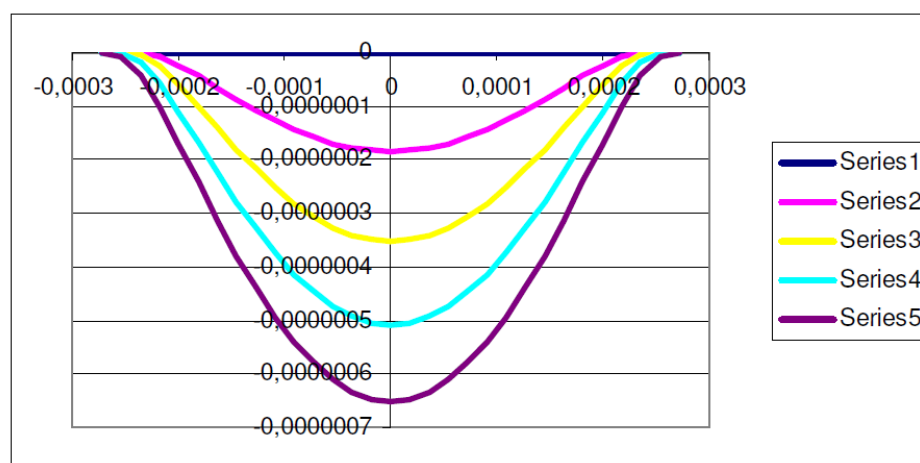
$\int_0^{h_i} dh_i = k_i \cdot  v_1 - v_2  \int_0^t p \cdot dt$	<b>(I-3.7)</b>
---	----------------

$h_i = k_i \cdot  v_1 - v_2  \int_0^t p \cdot dt$	<b>(I-3.8)</b>
---	----------------

Si nous étudions des maillages complets, la pression de contact,  $p$ , peut être remplacée par la pression de contact moyenne,  $p_m$ . La profondeur d'usure est faible par rapport au rayon des rouleaux;  $p_m$  peut donc être déterminé une fois et utilisé pour toutes les révolutions simulées. L'équation intégrale peut donc être reformulée comme suit:

$h_{i,new} = h_{i,old} + k_i \cdot p_m \cdot  v_1 - v_2  \cdot \Delta t$	<b>(I-3.9)</b>
--	----------------

Nous supposons que nous pouvons simplifier la simulation d'usure en déterminant l'usure de chaque tranche de la même manière qu'avant. La pénétration  $d$  du rouleau supérieur modifié contre le rouleau cylindrique inférieur est déterminée de sorte que la somme de la charge de chaque support de coupe soit égale à la force appliquée,  $F_N$ . L'usure locale peut maintenant être déterminée et la géométrie des surfaces de contact modifiée. Par la suite, une nouvelle pénétration  $d$ , est déterminée. La figure **Fig.(I-3.5)** présente quelques résultats de simulation de la recherche bibliographique (séries 1,2...5 différentes étapes d'un cycle) pour un rouleau supérieur modifié (zone usé) interagissant avec un rouleau cylindrique.



*Figure.(I-3.5) : Résultat de simulation de l'usure d'un changement de forme de la surface de contact du rouleaux pendant la course. [119]*

### I-3-7 **Conclusion:**

Ce chapitre présente une description des travaux bibliographiques liés aux comportements tribologiques aux frottements et analyses des matériaux. Ce chapitre a permis de faire le point sur l'évolution de recherches concernant les problématiques des différents aspects : notions de surfaces, endommagements des surfaces, types et analyses d'usures, contacts thermomécaniques, analyses des endommagements.....etc.

Sur le plan tribologique le frottement et l'usure des matériaux la recherche indique sont des phénomènes complexes, qui ont été étudiés par de nombreux auteurs. Ces phénomènes mettent en jeux, de nombreux mécanismes de toutes formes d'usures élémentaires obtenus dans la littérature à une géométrie complexe.

Cette recherche bibliographique que nous avons aborder montre les problématiques de contacts thermomécaniques de deux surfaces de différents matériaux Pour ce faire l'objectif de ces travaux de recherches confirme, que notre étude doit passer par les étapes suivantes:

- Une analyse des matériaux en contacts (résistance thermomécanique à l'usure et au frottement).
- Une analyse des paramètres liés à l'usure de contact (l'état de surface) et paramètres de fonctionnements (vitesse de glissement, charge, cycle, température).

Cette recherche bibliographique montre qu'il existe de nombreuses étapes d'élaborations des cermets qui sont :

- Le choix de la géométrie et grandeur des grains qui participent à la formation de la structure des cermets.
- Le processus de préparation du cermet avant frittage (temps, paramètres, grandeurs, broyage de la poudre, séchage des poudres, tamisage, compactage...).

Pour la simulation de l'usure la littérature indique aussi qu'ils existent de nombreuses méthodes et codes de calculs, qui comportent les étapes suivantes:

- Modèle de contact (géométrie, maillage, condition initial, paramètre tribologiques.).
- Méthode de calcul de la pression aux éléments finis (EF).
- Modèle et méthode d'itération par une sous-routine (sous programme).

## **Chapitre II :**

### Techniques d'élaboration et analyse des cermets

#### **II-1 Technique de préparation des matériaux par la métallurgie des poudres :**

##### II-1-1 Introduction

II-1-2 Composition des échantillons

II-1-3 Granulométrie des poudres

II-1-4 Pesée des nuances

II-1-5 Mise de la poudre au broyeur

II-1-6 Opération de séchage et tamisage

II-1-7 Compression et étuvage de la poudre

II-1-8 Procédure de frittage des échantillons

II-1-9 Mesures et Techniques de caractérisation des éprouvettes

II-1-10 Caractérisation des éprouvettes

#### **II-2 Procédure du Protocole Expérimentale :**

II-2-1 Descriptions du dispositif expérimental

II-2-2 Procédure des tests de frottement et d'usure

II-2-3 Procédure de mesures des taux d'usure

II-2-4 Exemple de calcul du taux d'usure d'une piste usée sectionnée en quatre tronçons

II-2-5 **Conclusion**

### **II-1 Technique de préparation des matériaux par la métallurgie des poudres :**

#### **II-1-1 Introduction :**

Ce chapitre présente le processus d'élaboration les éprouvettes (cermets) et les moyens techniques, ainsi leurs différentes caractérisations et les analyses appliquées au cours de cette étude:

- Techniques de la préparation de la poudre (métallurgie de la poudre).
- Processus de frittage.
- Caractérisation des éprouvettes.

Le chapitre traite aussi un protocole expérimentale des tests de frottements des échantillons (cermets) et les moyens et dispositif utilisés pour ces tests. Le déroulement des tests leurs différents caractérisations , et analyses des pistes usées. Ces étapes abordés dans ce chapitre sont :

- Descriptions du dispositif expérimental (pin-on-disc à haute température), et ses caractéristiques.
- Procédure des tests de frottements et d'usures, dominé par un processus de la gamme des tests, avec tous les paramètres tribologiques et thermomécaniques utilisés durant les tests.
- Procédure d'analyse de la piste usée, et déterminer le taux du volume d'usure.

**II-1-2 Composition des échantillons :**

Les échantillons ont été préparés à partir de mélanges fabriqués au laboratoire (ERIS Batna) par mélanges de poudres reçus des fournisseurs extérieurs. Le mélange des poudres de taille de grain moyenne voir **Tab.(II-1-2)** est formé de trois différentes poudres : carbure de tungstène (WC), cobalt (Co) et de carbure de titane (TiC) qui forment une composition (WC-Co-TiC) de quatre nuances (composites céramiques métalliques ou cermets), **Tab.(II-1-1)**.

*Tableau.(II-1-1): Compositions des nuances*

Nuances	Compositions		
	%WC	%CO	%TiC
NA (référence)	85	15	-
NB	80	15	5
NC	75	15	10
ND	70	15	15

**II-1-3 Granulométrie des poudres :**

La granulométrie des poudres utilisées dans les nuances et leurs densités sont indiquées dans le **Tab.(II-1-2)**, montre des valeurs moyennes qui sont données par le fournisseur

*Tableau.(II-1-2): Tailles des grains de la poudre (TiC-WC) des cermets*

Catégorie des poudres	WO3		WO2		W		WC	Co	TiC-WC
	D	μ	D	μ	D	μ	D	D	D
Grains moyens	0.69	0.37	1.08	1.55	0.38	1.89	3.5-5.0	<0.75	3-3.5

**D** : Densité apparente (g/cm<sup>3</sup>), **μ** : Grosseur des grains en microns

**II-1-4 Pesée des nuances :**

Chaque pourcentages massiques des nuances est calculer selon la géométrie des échantillons (diamètre 30mm épaisseur  $e = 12$  mm) ce qui nos donne les résultats massiques suivantes voir **Tab.(II-1-3)**:

*Tableau.(II-1-3): Poids massique des différents nuances*

Nuances	Poids (g)
NA	116
NB	105
NC	100
ND	95

**II-1-5 broyage de la poudre :**

Afin de garantir l’homogénéité de la microstructure de chaque nuance, un broyage de la poudre préparée en pourcentage massique des nuances et versée dans un broyeur à bille **Fig.(II-1-1)**. Cette opération permet d’obtenir une homogénéité des différents mélanges de la poudre des échantillons, préparés dans un milieu humide formé d’alcool  $C_2H_5OH$  pendant un broyage en moyenne de 24 heures.



*Figure.(II-1-1): Broyeur à bille de la poudre*

**II-1-6 Opération de séchage et tamisage :**

Le mélange des poudres séchées dans un séchoir oscillant (four) destiné au séchage des poudres de la composition (WC-Co-TiC). Le séchage de durée moyenne de 30 à 40 min, provoque une vaporisation de l’alcool  $C_2H_5OH$ , puis la poudre séchée est mélangée à une colle afin d’assurer une bonne agglomération des trois différentes poudres de la composition. En fin un tamisage forcé à travers un tamis de la poudre agglomérée, permet de séparer d’autres éléments (grain de gros tailles) et l’obtention des grains de la même taille **Fig.(II-1-2)**.



*Figure.(II-1-2): Tamisage de la poudre*

### **II-1-7 Compression et étuvage de la poudre :**

La compression de la poudre séchée et tamisée s'effectue par une presse hydraulique. Les valeurs de pressage sont reliées à la densité (compactage) et à la géométrie de l'éprouvette **Fig.(II-1-3)**. Notre géométrie de l'éprouvette est calculée toute en considérant le retrait de l'éprouvette après le refroidissement de valeur (de 15 mm d'épaisseur et 35mm de diamètre) avec un pressage moyen de 15MPa. Enfin une opération d'étuvage est effectuée dans un (four) dans le but de vaporiser la colle des éprouvettes pendant une durée moyenne de (3 à 4) heures.



*Figure.(II-1-3): Presse hydraulique utilisé pour le pressage des échantillons*

### **II-1-8 Procédure de frittage des échantillons :**

#### **✓ Cycle de frittage :**

Le cycle de frittage des échantillons (cermets) est un cycle standard à trois paliers: échauffement à 600°C puis une montée jusqu'à 1430°C, et un refroidissement durant un temps moyen global de 10 heures dans le four **Fig.( II-1-4)**. L'opération de frittage consiste à chauffer les éprouvettes à une température telle que les grains de poudre se soudent entre eux .Le cycle de frittage est réalisé dans une chambre tubulaire dans le four soufflé par un gaz d'argon avant le début du frittage, dans une atmosphère non oxydante (Ar+H<sub>2</sub>).





Figure.(II-1-4): Four de frittage

II-1-9 Mesures et techniques de caractérisation des éprouvettes :

✓ Mesures des caractéristiques:

Le **Tableau(II-1-4)** regroupe les valeurs des caractéristiques de la micro dureté et de la densité pour les quatre nuances (cermets) **Fig.(II-1-5)** obtenues après le frittage. On constate en ce qui concerne la dureté (HRC), augmente légèrement lorsque la teneur en TiC augmente. Concernant les valeurs de la densité des quatre cermets, on note une diminution de la densité avec l'augmentation de la teneur en TiC. Ces densités des éprouvettes ont été mesurées selon la méthode d'Archimède.

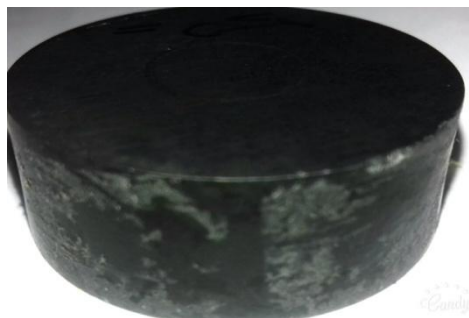


Figure.(II-1-5): Echantillon cermet obtenu après frittage

Tableau.(II-1-4): Caractéristiques (densité et dureté) des échantillons mesurés après frittage

Nuances	Densités	Duretés (HRC)
NA(référence)	13.86	69
NB	13.48	71.6
NC	11.74	74.4
ND	10.7	77.7

✓ **Préparation des échantillons avant tests de frottement :**

Avant de procéder ces échantillons aux tests de frottements, ils sont soumis à une opération de rectification, avec une rectifieuse plane abrasifs. La rectification permet d'obtenir des surfaces prêtes pour des tests de frottements, ce qui forme une bonne référence pour avoir des résultats d'usure acceptables scientifiquement. Puis les échantillons passent par un nettoyage à l'acétone dans un bain ultrasons pendant une durée moyenne de 15 minutes.

II-1-10 **Caractérisation des éprouvettes :**

II-1-10-1 **Analyse de la microstructure par MEB des éprouvettes cermets avant tests d'usure :**

1- **Cermet WC-Co (avec 5% de TiC):**

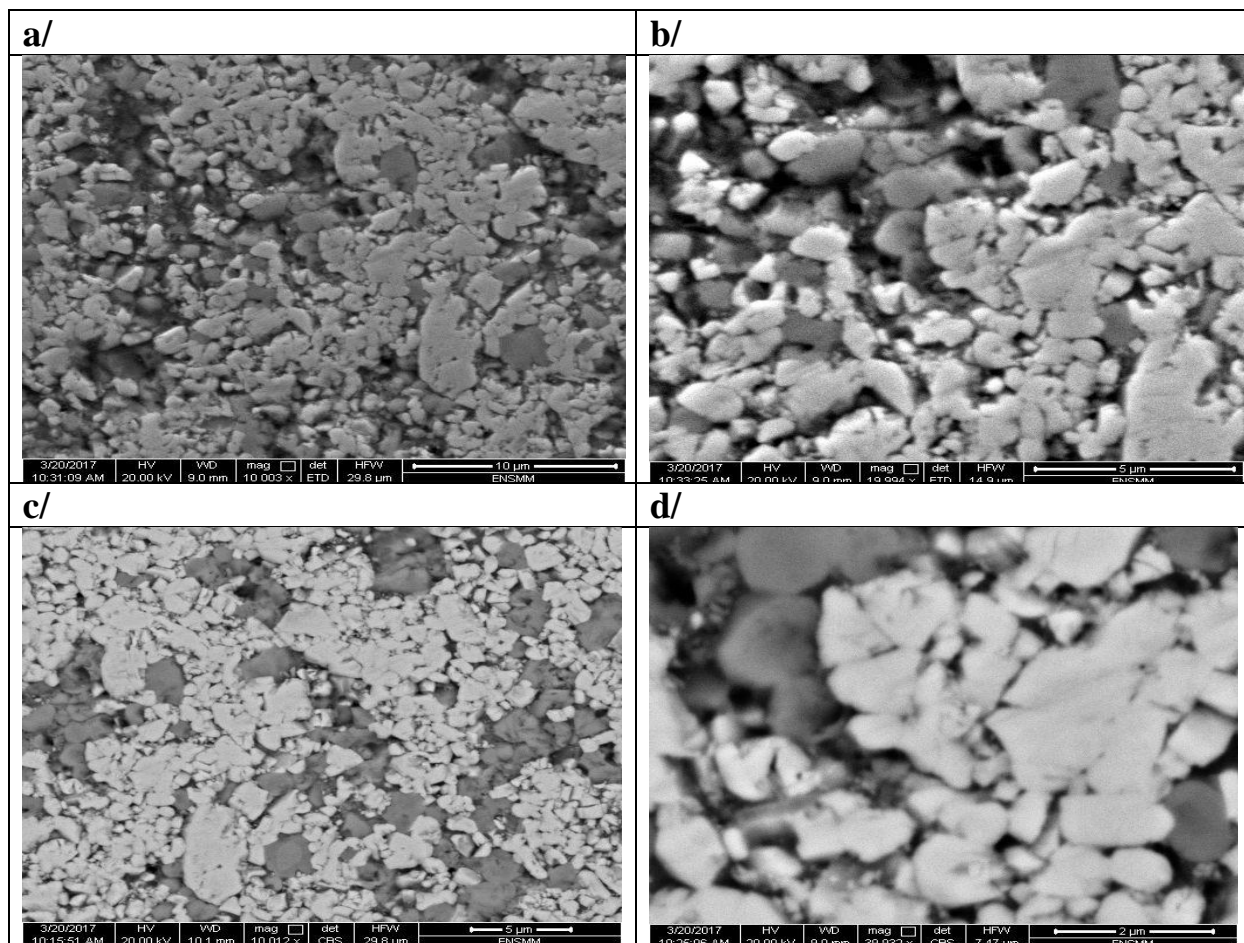


Figure.(II-1-6): ( a),(b),(c),(d) Microstructure MEB de la nuance (NB) 5%TiC avant tests d'usure

La figure(II-1-6) présente une microstructure au MEB du cermet (NB) 5%TiC, avec une résolution différente après un frittage en phase liquide. On constate la présence de deux phases : une phase carbugeine (constituant clair ) et le liant métallique (constituant sombre). L'analyse de la microstructure a révélé une morphologie spécifique du carbure de tungstène. Il y a apparition lors du frittage en phase liquide d'un anneau constitué du carbure mixte (W,Ti) C, provenant de la solubilité entre WC et TiC , à la température de frittage (structure core rime ).

2- Cermet WC-Co (avec 10% de TiC) :

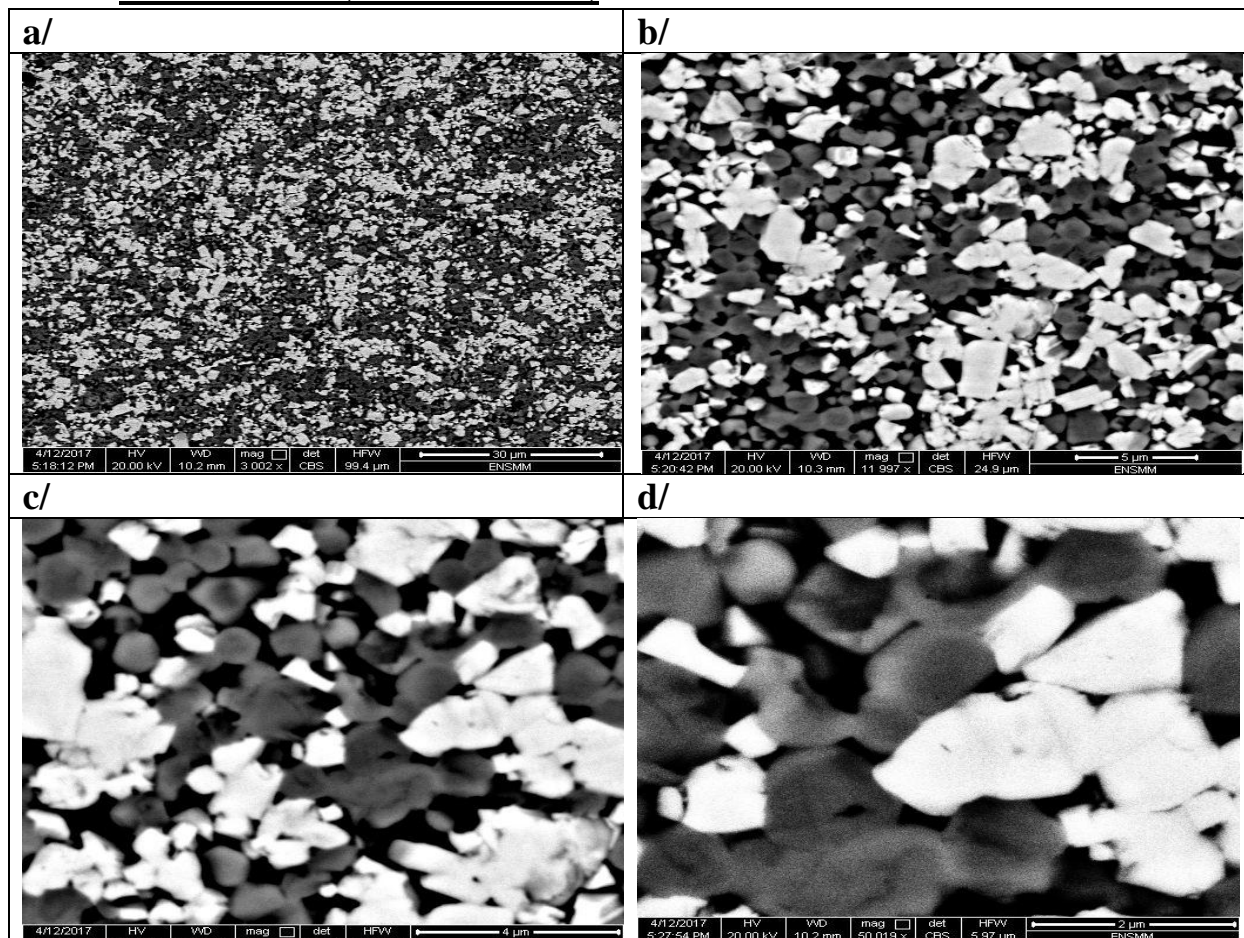


Figure (II-1-7): ( a),(b),(c),(d) Microstructure MEB de la nuance (NC) 5%TiC avant tests d'usure

La figure(II-1-7) de la nuance (NC) 10% de TiC présente une microstructure au MEB après frittage en phase liquide, de résolution différente montre l'augmentation de la quantité de particules ayant une morphologies (core rime).

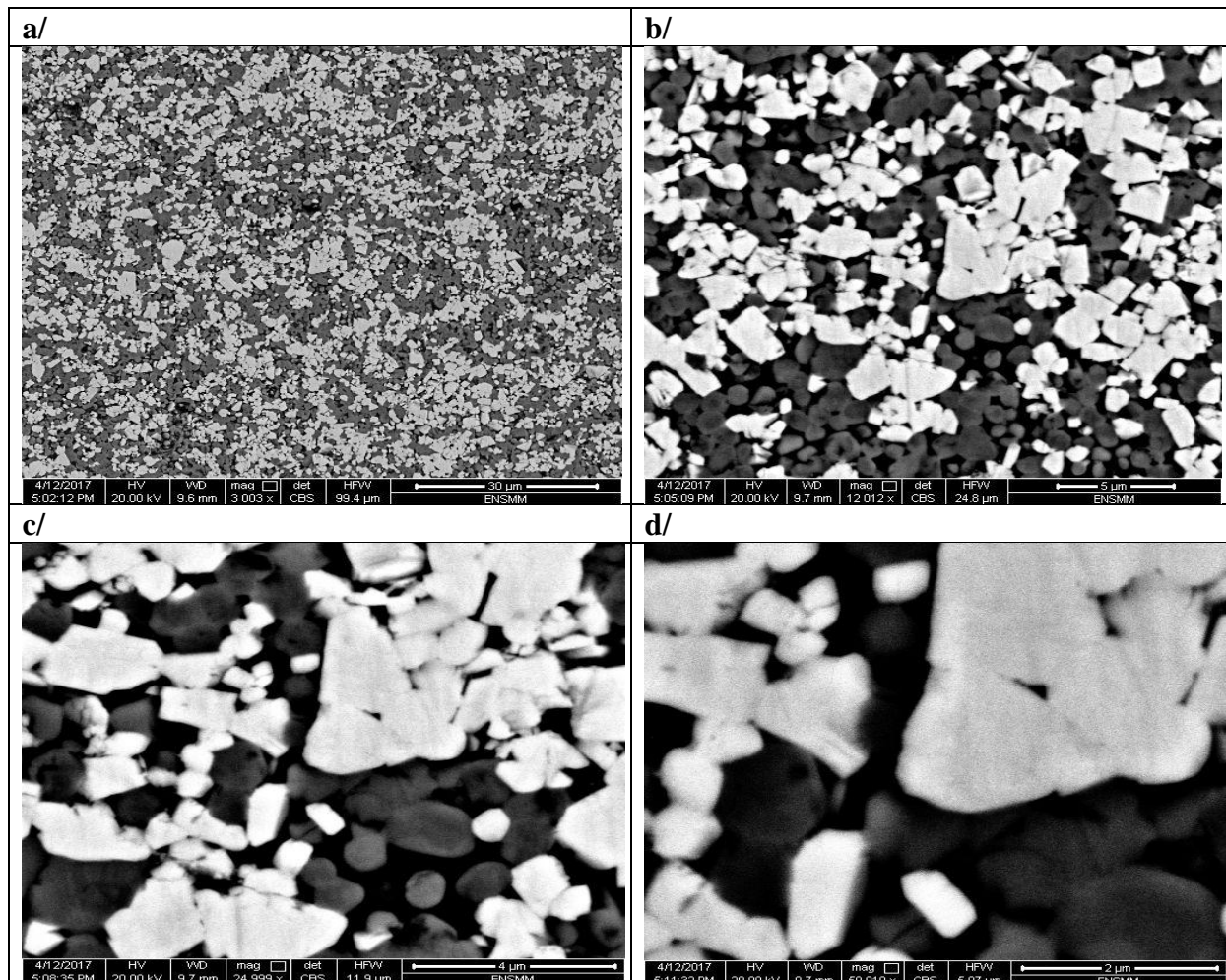
3- Cermet WC-Co (avec 15% de TiC) :

Figure.( II-1-8): ( a),(b),(c),(d) Microstructure MEB de la nuance (ND) 15%TiC avant tests d'usure

La figure(II-1-8) de la nuance (ND) 15% de TiC présente une microstructure au MEB après frittage en phase liquide, de résolution différente montre une même constatation que (NC) avec une augmentation de la quantité de particules ayant une morphologie (core rime) plus importante que la nuance (NC).

4- Cermet référence WC-Co (NA) :

La figure(II-1-9) de la nuance (NA) sans TiC présente une microstructure au MEB après frittage en phases solide.

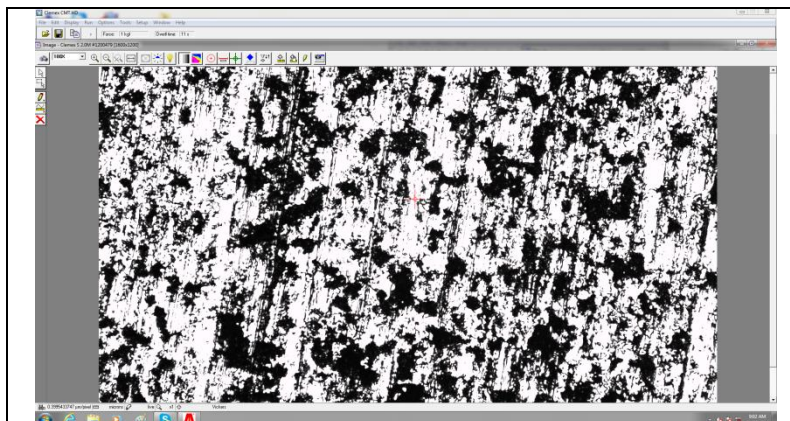


Figure.(II-1-9): Microstructure MEB de la nuance (NA) sans TiC avant tests d'usure

II-1-10-2 Analyse de la microstructure par DRX des éprouvettes cermets avant tests d'usure :

1-Cermet référence (NA) :

Les résultats d'analyses par diffraction de rayon X (DRX) de la microstructure des deux nuances référence (NA) Tab.(II-1-5), Fig.(II-1-10) et la nuance (ND) Tab.(II-1-6), Fig.(II-1-11) sont les suivantes :

Tableau.( II-1-5): Résultats d'analyse par DRX de l'échantillon cermet référence (NA)

N° de pic	2θ	d <sub>calculé</sub>	d <sub>théorique</sub>	hkl	Phase
1	31,781	2,8227	2,84	001	WC
2	35,854	2,5025	2,518	100	WC
3	36,168	2,4816	2,5	331	Co <sub>6</sub> W <sub>6</sub> C
4	42,038	2,1476	2,13	511	Co <sub>3</sub> W <sub>3</sub> C
5	48,504	1,8753	1,884	101	WC
6	60,781	1,5227	1,526	551	Co <sub>6</sub> W <sub>6</sub> C
7	64,218	1,4492	1,454	110	WC
			1,444	731	Co <sub>3</sub> W <sub>3</sub> C
8	65,957	1,4151	1,42	002	WC
9	72,757	1,2987	1,306	822	Co <sub>3</sub> W <sub>3</sub> C
10	73,336	1,2911	1,306	822	Co <sub>3</sub> W <sub>3</sub> C
11	75,624	1,2565	1,259	200	WC
12	76,524	1,2439	1,236	102	WC
13	44,254	1,234	1,236	102	WC
14	84,226	1,1487	1,1377	202	W <sub>2</sub> C

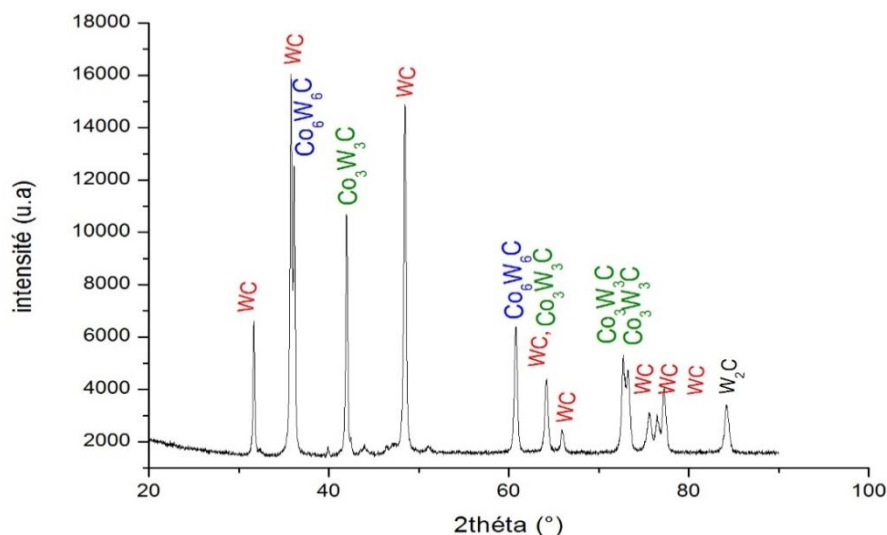


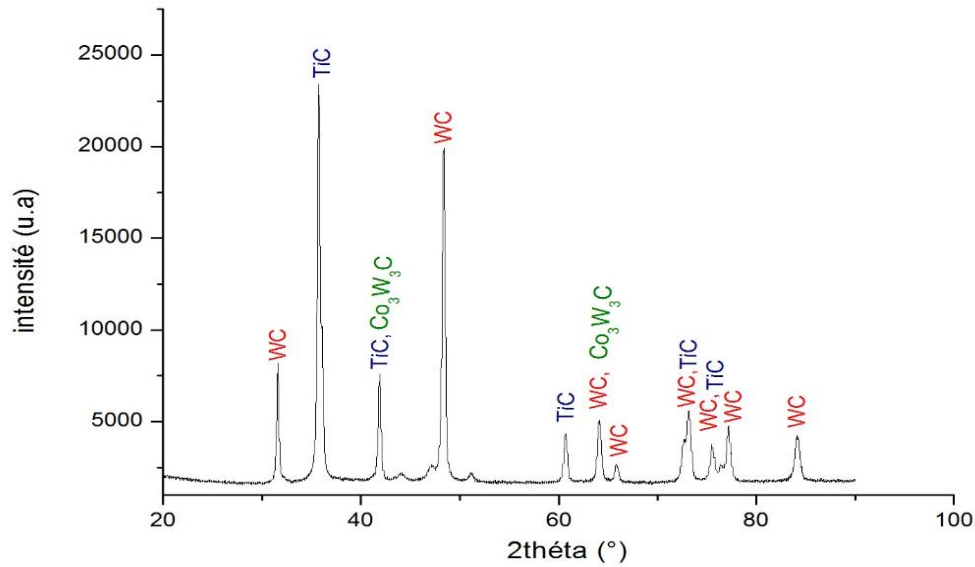
Figure.(II-1-10): Résultats d'intensité de l'analyse de l'échantillon de la nuance (NA) par DRX.

2- Cermet (ND) 15% TiC :

Tableau.(II-1-6): Résultats d'analyse par DRX de l'échantillon (ND)

N° de pic	2θ	d <sub>calculé</sub>	d <sub>théorique</sub>	hkl	Phase
1	31,678	2,8223	2,84	001	WC
2	35,832	2,504	2,499	111	TiC
3	42,012	2,1489	2,1637	200	TiC
				511	Co <sub>3</sub> W <sub>3</sub> C
4	48,497	1,8756	1,884	101	WC
5	60,717	1,5341	1,5302	220	TiC
6	64,231	1,449	1,454	110	WC
			1,444	731	Co <sub>3</sub> W <sub>3</sub> C
7	65,937	1,4155	1,42	002	WC
8	73,171	1,2924	1,294	111	WC
			1,3047	311	TiC
9	75,568	1,2573	1,259	200	WC
			1,2492	222	TiC
10	77,197	1,2347	1,236	102	WC
11	84,147	1,1496	1,151	201	WC





*Figure.(II-1-11): Résultats de l'analyse de l'échantillon nuance (NB) par DRX.*

L'analyse par diffraction des rayons X de la référence sans TiC (NA) et du cermet à 15% TiC (ND) a révélé plusieurs pics de fortes intensités:

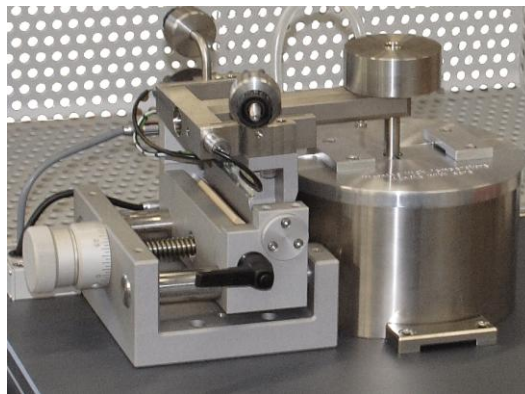
- Pour la nuance (NA) référence ces pics correspondent à WC (carbure principale) et des composés complexes  $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$  et  $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ , issus de l'interaction entre WC et le carbure transitoire  $\text{Co}_3\text{C}$  qui apparait à haute température.
- Dans le cas des ajouts des TiC, le spectre de diffraction à 15% TiC (ND) a révélé la présence de WC, TiC et des composés complexes  $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$  et  $\text{Co}_6\text{W}_6$ .

### II-2 Procédure du Protocole Expérimental

#### II-2-1 Descriptions du dispositif expérimental :

##### II-2-1-1 Description du tribomètre pion sur disque :

Le moyen d'essai utilisé pour les tests de frottements est un pin-on-disc, c'est un Tribomètre à haute température de la firme ( *CSM Instruments Suisse* du Laboratoire MMS liège Belgique). Le tribomètre capable d'augmenter la température des tests jusqu'à (1000°C) avec un meilleur refroidissement par un circuit interne. Une acquisition de plusieurs informations le long du test (coefficient de frottement, humidité, température initiale de l'éprouvette ...), possibilité d'une combinaison de vitesse de glissement, de charge et du temps de contact **Fig.(II-2.1)**.



*Figure.(II-2.1): Tribomètre à haute température( CSM Instruments Suisse)*

Le pin testeur utilisé pour les tests de frottements qui est en contact avec les éprouvettes est une bille en alumine ( $Al_2O_3$ ) de diamètre 6mm **Fig.(II-2.2)**, et de propriétés **Tab.(II-2.1)**. Ces tests de frottements effectuent par une bille contre la surface de l' éprouvette par un mouvement de rotation de rayon 5mm du centre de l'éprouvette qui forme une piste d'usure. Les résultats obtenues à la fin du test la force de frottement, le coefficient de frottement, l'humidité, la température de la piste d'usure et du four sont régulièrement enregistrées tout le long des tests d'usures grâce au logiciel qui se trouve à l'interface (Tribometer module/Version 4.4.Q) **Fig.(II-2.3)**.



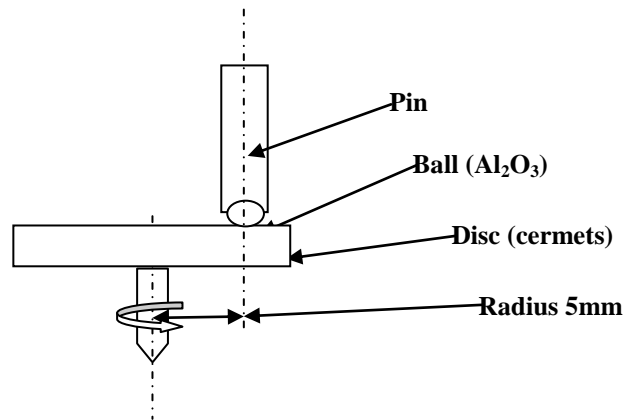


Figure.(II-2.2): Processus de l'essai de frottement entre la bille en  $Al_2O_3$  (Pin) et les cermets (Disc)

Tableau.(II-2.1): Densité et dureté de la bille en alumine  $Al_2O_3$

Ball $Al_2O_3$	Densité D	Dureté HV
	3.15	1800

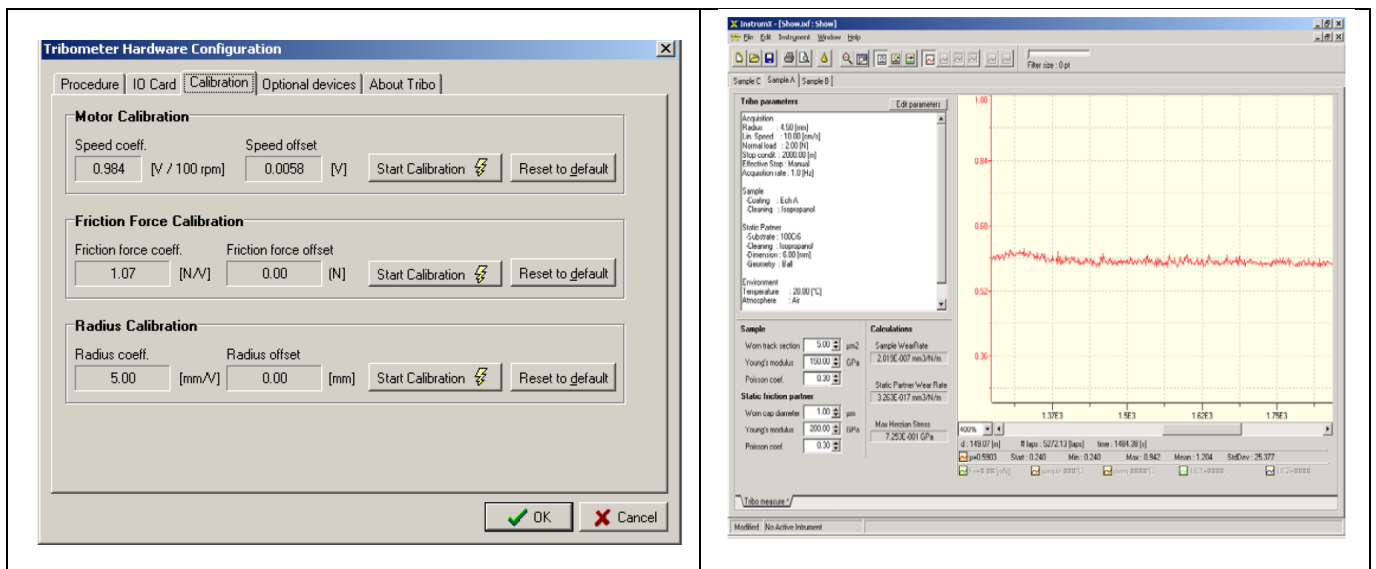


Figure.(II-2.3): Interface du Tribomètre utilise (le module / Version 4.4.Q)

### II-2-1-2 Paramètres thermomécaniques du tribomètre :

Le tribomètre offre une possibilité de plusieurs paramètres tribologiques et thermomécaniques utilisés durant les tests de frottements :

- Vitesse de rotation : 1 à 500 tr / min (en option 1500 tr / min).
- Couple maximal : 450 N.mm
- Force de frottement : jusqu'à 10 N (en option 20 N).
- Charge normale maximale: 10 N (60 N en option).
- Température jusqu'à 1000°C un thermocouple
- Affichage des résultats du test le long du test pour chaque seconde.

### II-2-2 Procédure des tests de frottement et d'usure :

#### II-2-2-1 Processus et objectif des tests de frottement des éprouvettes (cermets) :

Le processus des tests de frottements effectués sur les surfaces des éprouvettes (cermets) pour des différents paramètres thermomécaniques sévères **Tab.(II-2.2)** des quatre nuances, **Tab.(II-1-1)** ont été réalisés sur un tribomètre à haute température. Chaque nuance a été testé pour les quatre paramètres thermomécaniques( charge constante de (20N), deux vitesses de glissements (0.5 et 0.75 m/s), trois températures (20, 450, 650 C°), pour une distance parcourue de 5000m de contact sec (contact non lubrifié).

Le processus des tests des cermets a pour objectif d'effectuer des tests de frottement pour les différentes nuances avec des teneurs en TiC (5%,10%, et 15%) et en comparant avec la nuance référence sans TiC (NA) dans différentes conditions thermomécaniques. Ces tests de frottement effectuent dans le but d'évaluer le coefficient de frottement et les taux d'usures, des pistes des différentes nuances. Ces tests de frottement permettront de tirer des analyses du processus de dégradation tribologique du matériau et de la microstructure des différentes nuances.

Les cermets ont été testés avec un matériau céramique (alumine) qui répond aux objectifs des tests sévères compte tenu de sa dureté très élevée, sa bonne résistance au frottement et à l'usure à haute température **Tab.(II-2.1)**. Le choix des paramètres

thermomécaniques utilisés pour les tests ont été bien étudiés et adaptés aux utilisations industrielles des éléments machines.

Tableau.( II-2-2 ): Paramètres thermomécaniques des tests de frottement appliqués sur chaque nuances

Paramètres	Paramètres thermomécaniques des tests de frottement				Temps (s)
	Charge (N)	Vitesses (m/s)	Températures (c°)	Distance (m)	
P 1	20	0.5	20	5000	9.94.10 <sup>3</sup>
P 2	20	0.75	450	5000	6.64.10 <sup>3</sup>
P 3	20	0.5	450	5000	9.94.10 <sup>3</sup>
P 4	20	0.5	650	5000	9.94.10 <sup>3</sup>

### II-2-3 Procédure de mesure des taux d'usure :

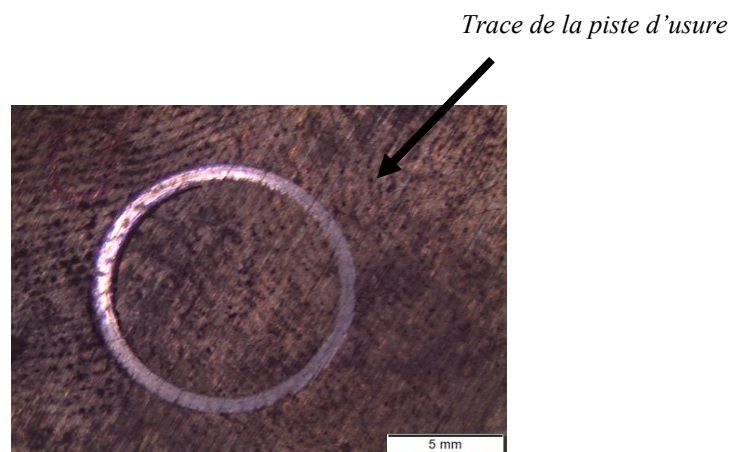
#### II-2-3-1 Processus d'analyse de la piste d'usure :

La procédure de mesure les taux d'usures des pistes est effectuée à l'aide d'un profilomètre de surface (un microscope optique 3D Contour GT-I Bruker Nano Surfaces Division Tucson, AZ. USA) Fig.(II-2.4). Cette procédure d'analyse de la piste d'usure consiste à l'utilisation d'un logiciel (vision) c'est un interface d'analyse de l'image de la piste d'usure Fig.(II-2.5), permettre d'obtenir un relief de la piste (profil de la surface usée ) de l'éprouvette. Cette mesure permet de estimer le volume moyen usé par rapport à une référence (le profil moyen), ce dernier est présenté par un profondeur (en µm) et une largeur (en mm) de la piste d'usure Fig.(II-2.6). La procédure d'estimer le volume moyen usé consiste à prendre quatre mesures sur le périmètre de la piste usée espacées de 90° entre deux mesures successives sur la section transversale Fig.(II-2.7) .Un calcul permet de discrétiser les quatre sections du profil de la piste pour déterminer la surface moyenne usée et le volume moyen usé de la piste. Le taux d'usure moyen K du modèle Archard (II-2.1 ) est calculé à partir du volume usé (V) de la piste pour une distance parcourue (S=5000 m) sous une charge appliquée (F<sub>N</sub>=20 N) [43,48,49] [121-125].

$K=V/(P.S) (\mu\text{m}^3/\text{N}/\text{m})$	<b>(II-2.1 )</b>
---	------------------



*Figure.(II-2.4): Profil-mètre d'analyse les surface*



*Figure.(II-2.5): Trace de la piste d'usure après essai de frottement*

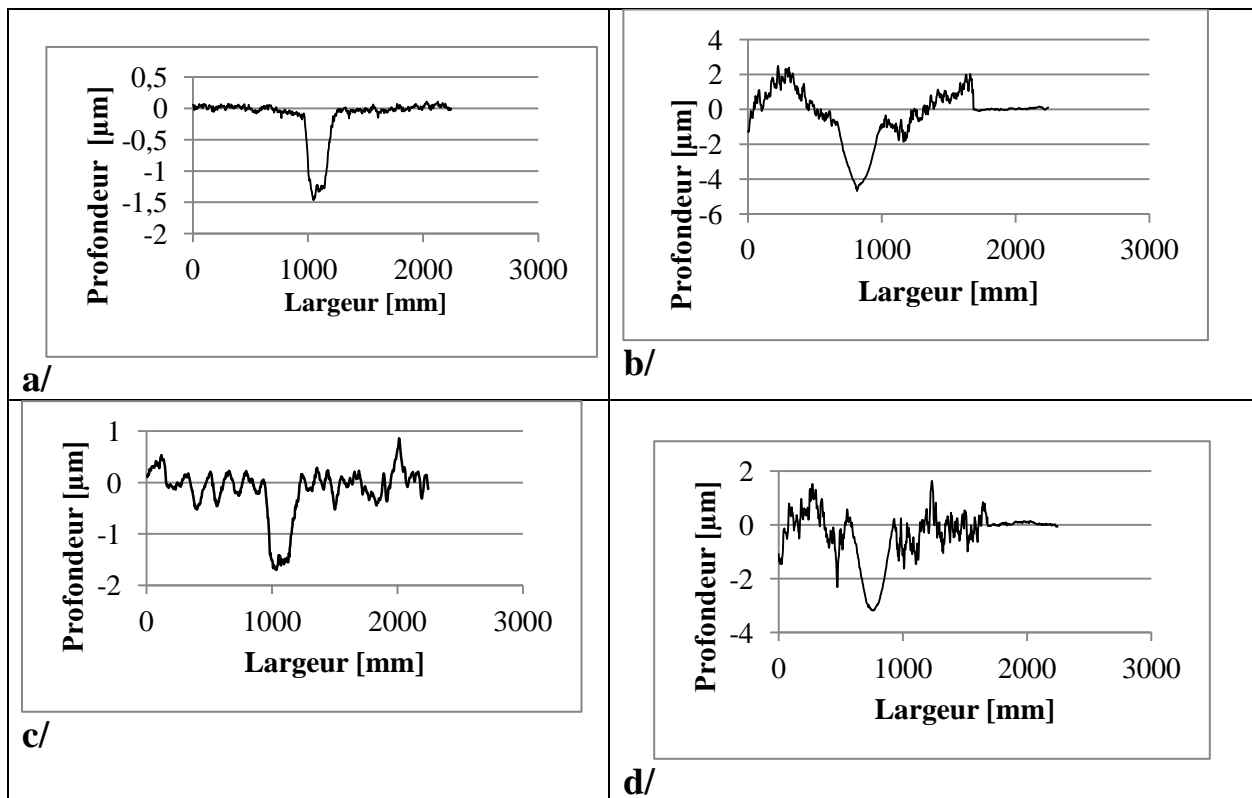


Figure.(II-2.6): (a),(b),(c),(d) Profils de la profondeur ( $\mu\text{m}$ ) et largeur en (mm)de la piste d'usure de chaque tronçons pris par le profil-mètre optique

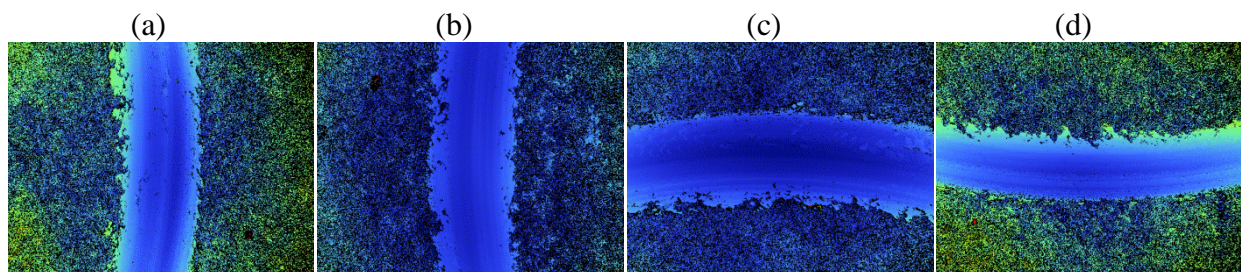


Figure.( II-2.7 ): Les quatre tronçons pris par le profil-mètre optique de chaque piste espacés de  $90^\circ$  pour mesurer le volume moyen usé

**II-2-3-2 Les étapes de calcul du volume d'usure des pistes usées par un programme de discrétisation sur Excel :**

Le calcul du volume d'usure par une méthode de discrétisation de la géométrie de la piste usée (trace) pour les différentes paramètres mesurés par un profil-mètre optique. Le profil est déterminé par un logiciel c'est un interface (vision), permet d'interpréter et d'exporter les données du profil vers Excel.

Les étapes d'interprétations et d'analyses de chaque piste usée par la manière suivante : :

- Sectionner la piste d'usure en 4 section (tronçon) de  $90^\circ$  entre eux **Fig.(II-2.7)**.
- Prendre les 4 profils **Fig.( II-2.6)**.
- Analysé les 4 profils par vision puis sélectionné la zone de la piste et mètre à la ligne 0
- Exporter le profile de la piste vers Excel.
- Discrétisé la zone creuse de chaque section de la piste pour calculé l'aire (insérer la borne inf et la borne sup).
- La même manière pour les autres sections.
- Une page (donné) de calcule par Excel, le volume usé de la piste **Tab.(II-2.3)**, le coefficient de frottement et le taux d'usure.
- Une page (résultats) de calcule par Excel, affiche le résultats du volume usé de la piste, le coefficient de frottement et le taux d'usure **Tab.(II-2.4)**.

### II-2-4 Exemple de calcul du taux d'usure d'une piste usée sectionnée en quatre tronçons :

Un exemple pour calculer le volume usé moyen d'une piste usée avec les paramètres suivantes :

*Tableau.(II-2.3) : Les données introduites dans un code de calcul par Excel pour calculer le volume usé*

Profondeur initiale (Référence)		Bornes inf et sup des profondeurs usés de chaque profils		Informations sur les paramètres pin-on-disc	
		Inf	Sup	Bille	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Profil (a)	00	936	1356	Diamètre [mm]	6
				Temp [°C]	650
Profil (b)	00	977	1377	Rayon traj [mm]	6
				Vitesse [cm/s]	50
Profil (c)	00	611	1223	Charge [N]	20
				Distance [m]	5000
Profil (d)	00	580	921		

- Les résultats affichés par le code de calcul Excel :

Tableau.(II-2.4) : Résultats moyens de calcul le volume usé, coefficients d'usure et écart-type

Résultats du volume moyen usé				
Les 4 Profils de la piste	Aire totale usé de chaque profil [ $\mu\text{m}^2$ ]	Volume usé [ $\mu\text{m}^3$ ]	Coefficient d'usure [ $\mu\text{m}^2\text{tr}^{-1}$ ]	
a)	1029.7	38819.5	0.103	
b)	207.8	7834.9	0.021	
c)	1265.5	47708.2	0.127	
d)	654.7	24680.7	0.065	<b>Ecart-type</b>
<b>Moyenne</b>	<b>789.4</b>	<b>29760.8</b>	<b>0.079</b>	<b>0.046</b>

- La valeur (**789.4  $\mu\text{m}^2$** ) indique l'aire moyenne des 4 tronçons de la piste sectionné **Figure.(II-2.6)**, chaque aire déterminé par une fonction intégrale limité par les bornes inf et sup dans une page Excel **Tableau.(II-2.3)**.
- La valeur (**29760.8  $\mu\text{m}^3$** ) le volume moyen d'une piste usée, obtenu en multipliant (**789.4 x Périmètre de la piste usé**).
- La valeur (**0.079**) coefficient d'usure moyen des 4 profils.
- **Ecart type(0.046) obtenu** (coefficient d'usure max - coefficient d'usure moyen).



### II-2-5 **Conclusion :**

Au terme de ce chapitre nous pouvons dégager quelques remarques, quant à la préparation des échantillons (cermets) à partir de la poudre jusqu'à la caractérisation. Tout d'abord l'élaboration des cermets par la métallurgie des poudres et leur frittage est très délicate, le nombre de paramètre à considérer pour répondre à des propriétés thermomécaniques du cermet qui sont:

- Caractéristiques des grains de la poudre (humidité,...) et géométrie.
- Broyage pour une bonne homogénéité ( temps, vitesse du broyeur).
- Compactage (densité) et valeurs de pressage.
- Processus de frittage (température, temps d'échauffement et refroidissement).

La caractérisation de nos échantillons (cermets) montre qu'ils répondent aux norme (SI), concernant la duretés, micro dureté, et densité des différents nuances. L'analyse de la micro structure des nuances indique une homogénéité acceptable, donc ce type d'échantillons sont capables d'être utilisés pour des tests de frottements et qui donnent des résultats scientifiques  
suivante :

- Les caractéristiques du tribomètre à haute température répondent à nos objectifs scientifiques est être utilisé dans notre étude et pourrait assurer des résultats scientifiques de qualités.
- Une séries des tests de frottement a permis de tester différentes nuances, en appliquant des paramètres thermomécaniques sévères.
- Originalité de la démarche des tests de frottement le temps de contact ou cycle des tests (5000 m) et la température.
- Une analyse des pistes usées a permis d'apprécier les volumes usés.

**Chapitre III :**  
**Méthodologie d'analyse et simulation  
numérique de l'usure**

**III-1 Algorithme de simulation de l'usure par un code basé sur la méthode des éléments finis :**

**III-1-1 Introduction**

III-1-2 Étapes d'analyse de l'usure par la méthode des éléments finis

III-1-3 Les étapes principales pour une simulation numérique de deux solides en contacts

III-1-4 Organigramme de la méthode de simulation numérique de l'usure par un code

**III-2 Modèle d'Archard modifié utilisé pour la simulation de l'usure dans des conditions thermomécaniques :**

III-2-1 Modèle d'Archard modifié utilisé par le code de simulation de l'usure

III-2-2 Procédure de calcul du volume d'usure par simulation numérique

III-2-3 Procédure de mise à jour de la géométrie

III-2-4 Les commandes de l'usure utilisée par le code

III-2-5 Exemple d'un fichier de données utilisé par un code de simulation de l'usure et affichage des résultats

**III-2-6 Conclusion**

### **III-1 Algorithme de simulation de l'usure par un code basé sur la méthode des éléments finis**

#### **III-1-1 Introduction :**

Ce chapitre présente un algorithme de simulation de l'usure par un code basé sur la méthode des éléments finis d'un comportement thermomécanique pour un contact géométrique. Cette simulation de l'usure qui est influencée par les interactions entre les paramètres de fonctionnement (chargement, vitesse de glissement, température de contact) et les propriétés de surface. Les contacts roulants ou glissants sont particulièrement exposés à la fatigue de surface et aux dommages structurels qui en résultent, plusieurs variables peuvent être utilisées pour décrire ce dommage (fatigue thermomécanique). L'objectif de ce chapitre est de présenter un modèle pour une simulation de l'usure par un code basé sur la méthode des éléments finis. Le modèle de contact est nécessaire pour déterminer le champs des contraintes de contact des deux surfaces, suivi par une analyse des points de contact déplacés de la surface la moins dure. Enfin, une analyse des résultats obtenus exprimée en volume ou en hauteur d'usure.

Ce chapitre consiste a aborder les étapes suivantes :

- Une analyse de l'usure par la méthode des éléments finis.
- Présentation des étapes de simulation d'un contact de deux matériaux.
- Un calcul de la pression de contact puis en injectant un modèle d'itération avec les paramètres d'entrées (sous programme).
- Un affichage des résultats.

### III-1-2 Etapes d'analyse de l'usure par la méthode des éléments finis :

L'analyse de l'usure par la méthode des éléments finis d'une surface consiste à calculer les pressions aux nœuds de la surface soumis à l'usure. Après un cycle de fonctionnement (contact relative des deux surfaces), un déplacement des nœuds se produit indique de la matière enlevé (usure). Un modèle (soubroutine) injecté dans un code de calcul (Ansys) permis de calculer le volume usé. Ces étapes de cette analyse plus en détail sont présenté de la manière suivante :

- Chaque nœud est déplacé (sous la pression et le frottement de la surface en mouvement relative) , incité à l'enlèvement de matière localisée (au niveau du nœud).
- Après un cycle de fonctionnement, le déplacement des nœuds au niveau du contact se rapproche (superposition de deux nœuds), une géométrie révisée du contact indique un point de surface usée.
- Un modèle (Archard modifié) permettant de calculer le volume usé, est injecté dans un code de calcul (Ansys).
- La géométrie du modèle est mise à jour à chaque cycle.

### III-1-3 Les étapes principales pour une simulation numérique de l'usure de deux surfaces en contact:

Les étapes principales pour une simulation numérique de l'usure d'une surface sont :

- **Géométrie de contact et type du solide :**
  - La géométrie de contact spécifier le ( type de contact des deux surfaces, plans, ponctuel,...).
  - Modèle de contact de deux surfaces (modèle 2D).
  - Type de solide (rigide déformable pour le matériau étudié pour le cas usure).
  - Comportement du matériau (élasto-plastique).

**Fig.(III-1-1).**

- **Propriétés de matériaux en contact :**

Spécifier au code de calcul les propriétés suivantes :

Module de Young (E), coefficient de poisson ( $\epsilon$ ), conductivité thermique ( $\gamma$ ) , coefficient de frottement ( $\mu$ ).

- **Maillage :**

Le maillage est un choix très important pour une simulation numérique de l'usure, il est basé sur plusieurs paramètres :

- La géométrie de maillage (maillage de nœud triangulaire, maillage de nœud rectangulaire,...),
- La géométrie de maillage, responsable à la convergence et divergence des résultats (volume usé).
- La zone de contact des deux matériaux qui provoque l'usure, nécessite un raffinement du maillage **Fig.(III-1-2)** [110]. Ce raffinement du maillage augmente le nombre de nœuds, ce qui demande un temps de calcul plus important, et une utilisation d'un ordinateur de bon performance .

- **Les conditions aux limites et initiales :**

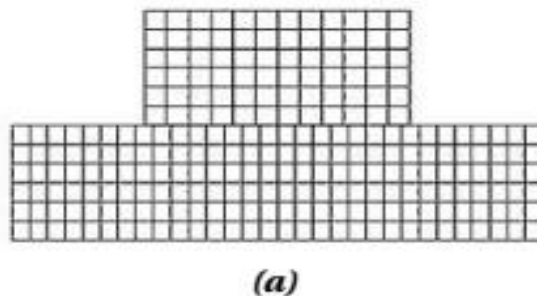
La simulation exige de limiter les grandeurs géométriques des deux matériaux (surface de contact, limiter la zone de glissement), le temps de contact (nombre de cycles), les grandeurs thermomécaniques (pression, température..).

- **Les conditions de fonctionnement :**

Le code de simulation utilisé (Wear Model Ansys), pour le cas d'un contact glissant nécessite l'introduction des paramètres de fonctionnements (charge, vitesse de glissement, température de contact..), cycle (temps de contact).

- **Solution et analyse des résultats :**

Après toutes ces étapes, notre logiciel (code de simulation Wear Modèle Ansys) affiche des résultats numériques qui répondent à notre modèle injecté (modèle Archard). L'analyse des résultats de simulation numérique est l'étape la plus importante (out put results), et surtout pour le cas de l'usure (qui prend en considération plusieurs paramètres et qui demande un processus particulier pour estimer le volume usé comme résultat) **Fig.(III-1-3)**.



*Figure.(III-1-1): Modèle de contact et maillage de la géométrie*

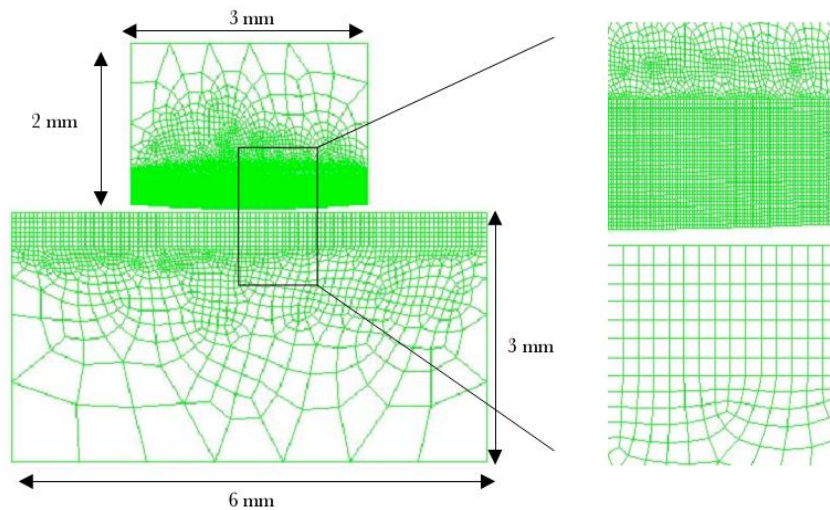


Figure.(III-1-2): Maillage rectangulaire raffiné au niveau de la zone de contact usée.[110]

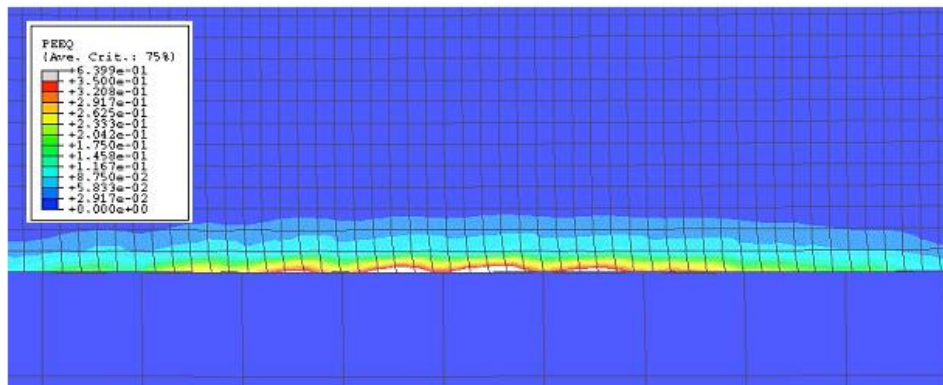


Figure.(III-1-3): Résultats d'une surface usée (déformation plastique) pour une géométrie de contact de 6 mm après un cycle pour des paramètres ( $T=650^{\circ}\text{C}$ ,  $F=20\text{N}$ ,  $V=0.5\text{m/s}$ )

#### III-1-4 Organigramme de la méthode de simulation numérique de l'usure par un code:

L'organigramme comporte les étapes utilisés par le code de calcul **Fig.(III-3-4)** :

- Les paramètres d'entrée.
- Modèle de contact maillé par éléments finis (EF).
- Calcul de la pression de contact par (EF).
- Un modèle d'Archard permet de calculer le volume usé.
- Un test de mise à jours les nœuds déplacés ( $\Delta N$ ) par rapport au cycle total d'usure ( $N_t$ ).
- Affichage des résultats (volume usé), pour un cycle total ( $N_t$ ).

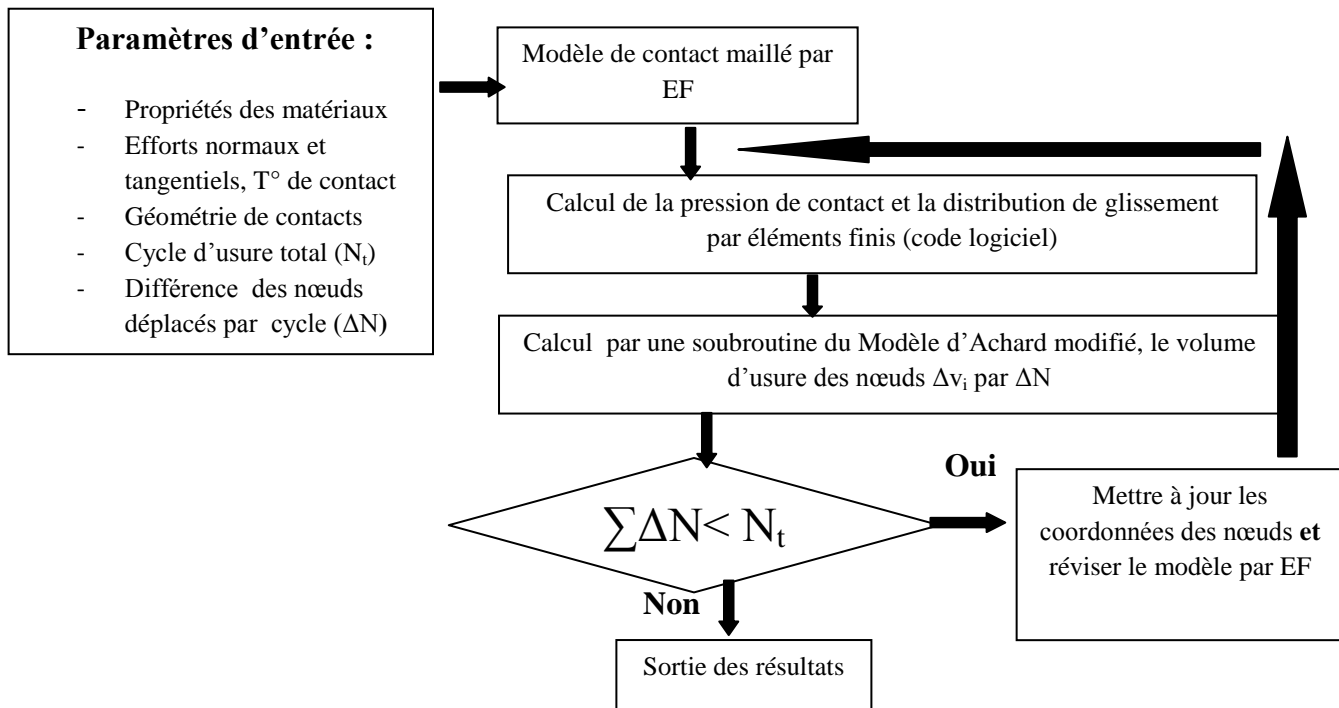


Figure.( III-1-4 ):Organigramme de la méthode de simulation numérique de l'usure par un code

✓ **Code de calcul multi-physique pour analyse l'usure (Ansys):**

Un code de calcul multi-physique pour une simulation numérique, d'un cas de structure dans les domaines (mécaniques, thermiques, chimiques, ..... etc), passe par les étapes suivantes:

- Spécifier le type de la solution pour notre cas (usure).
- Appel de l'interface du code de l'usure afin d'entrer (les conditions aux limites et initiales, propriétés mécaniques et thermiques, nombre de cycles, temps de contact).
- Créer la géométrie du modèle et de maillage.
- Identifier les paires de contacts.
- contact désigné et les surfaces cibles.
- Définir la surface cible (zone de contact).
- Déterminations des constantes réelles (module de Young, coefficient de Poisson.....).
- Définir (paramètres de fonctionnements) et type de solide (contact rigide et flexible uniquement).
- Appliquer des conditions aux limites nécessaires.

- Résoudre le problème de contact.
- Examiner les résultats.



**III-2 Modèle d'Archard modifié utilisé par la simulation de l'usure dans les conditions thermomécaniques:**

**III-2-1 Modèle d'Archard modifié utilisé par le code de simulation de l'usure :**

La simulation numérique par la méthode des éléments finis de l'usure superficielle d'un matériau en contact par glissement relatif sous haute sollicitation thermomécanique a pour but de calculer le volume d'usure. Un modèle d'Archard (III-2-1) modifié et injecté dans le code permet de calculer le volume d'usure en fonction des paramètres thermomécaniques (température de surface, pression de contact et de la vitesse de glissement). Ce modèle d'Archard modifié prend en considération l'influence de la température de surface du matériaux et qui agit sur la dureté  $H(T)$  et le coefficient d'usure  $K(T)$  [102].

$V = \frac{K(T)}{H(T)} \int V_g \cdot S \cdot \sigma \cdot dt$	<b>(III-2-1)</b>
--	------------------

Avec :

**V** : Volume d'usure (mm<sup>3</sup>).

**t** : Temps de contact (Heurs).

**K** : Coefficient d'usure en fonction de la température T.

**H** : Coefficient de dureté (Vickers, Rock-well) en fonction de la température T.

**V<sub>g</sub>** : Vitesse de glissement entre les deux matériaux (m/s).

**S** : Surface de contact (mm<sup>2</sup>).

**σ** : Contrainte appliquée sur la surface(N/mm<sup>2</sup>).

**K(T)** : Coefficient d'usure du matériaux sa valeur est déterminer en fonction de la température

**H<sub>v</sub>(T)** : Dureté du matériau de Vickers du matériau le moins dur soumis à l'usure (N/mm<sup>2</sup>)

$f(T) = \frac{K}{H}$	<b>(III-2-2)</b>
----------------------	------------------

$K(T) = -1.6025 \cdot 10^{-4}T + 1.74643 \cdot 10^{-7}$	<b>(III-2-3)</b>
$H(T) = 3659T - 2.9452$	<b>(III-2-4)</b>

La fonction **(III-2-2)** est déterminée en fonction de la température de contact, nécessite la détermination du coefficient d'usure ( $K$ ) et dureté du matériau le moins dur ( $H_V$ ) pour la même température.

Le tableau **Tab.(III-2-1)** montre la dureté en pourcentage de notre matériau référence (WC- Co) en fonction de la température surfacique. Nous constatons dans le tableau que la dureté en décroissance en pourcentage inversement avec de la température :

*Tableau.(III-2-1): Dureté en pourcentage du matériau WC-Co en fonction de la température*

Température C°	Dureté $H_V$ en %(WC-Co)
20	100%
100	90%
200	85%
400	70%
800	50%

**III-2-2 Procédure de calcul du volume d'usure par simulation numérique:**

✓ **Procédure itérative du modèle :**

La procédure de l'itération la plus largement utilisée pour simuler l'usure se produisant à une interface de contact est une procédure itérative décrite par l'intégration numérique du modèle pour calculer le volume usé **(III-2-1)**. Le mode opératoire d'itération pour prédire l'usure d'un contact de deux matériaux frottant incorpore les étapes précitées. Comme on a mentionné plus haut, l'ensemble des deux surface en contact sera utilisé pour illustrer la procédure de simulation. La simulation de l'usure à l'interface du contact est réalisée en tenant compte de chaque cycle séparément. L'usure dans un cycle quelconque peut être obtenu par discrétisation du cycle en un certain nombre d'étapes et l'application par **(III-2-5)** . A chaque étape, une analyse par éléments finis est exécutée pour déterminer la pression de contact.

Le volume d'usure pendant un cycle en tout point de la surface de contact peut alors être déterminée par l'équation **(III-2-6)**, qui est une modification de **(III-2-5)**.

$V_{i,j} = V_{i-1,j-1} + \frac{K(T)}{H(T)} \cdot v_g \cdot \Delta s_{i,j} \cdot \sigma_{i,j}$	<b>(III-2-5)</b>
---	------------------

$V_{i,j}$  : volume d'usure à (i,j) itération

$V_{i-1,j-1}$  : volume d'usure de l'itération précédente.

La variation de la surface de contact après un certain nombre itérations (n itération) comme cela est exprimé dans l'équation(III-2-6) .est déterminée en fonction de la vitesse de glissement, dureté du matériau, coefficient d'usure du matériau et la température de contact.

$V_{n,i,j} = V_{n,i-1,j-1} + \frac{K(T)}{H(T)} \cdot v_g \cdot \Delta s_{i,j} \cdot \sigma_{n,i,j}$	<b>(III-2-6)</b>
---	------------------

n : Désigne le nombre de nœuds à la surface de contact (du modèle d'éléments finis) qui peut ou qui ne peut pas établir un contact avec la surface opposée.

i et j : Indices indiquent l'étape en cours et le cycle, respectivement.

Tous les autres termes sont tels que définis précédemment, La géométrie est alors mis à jour pour refléter le degré d'usure et de préparer le modèle pour la prochaine étape. Les détails de la procédure de mise à jour de la géométrie seront discuté au paragraphe suivant. Les procédés décrits ci-dessus sont répétées jusqu'à ce que toutes les étapes d'un cycle sont terminées. Le terme mise à jour de l'étape est adopté pour cette procédure car la géométrie est mis à jour après chaque étape. Le processus de simulation pour la procédure de mise à jour de l'étape est résumé dans l'organigramme **Fig.(III-1-4)**.

### **III-2-3 Procédure de mise à jour de la géométrie:**

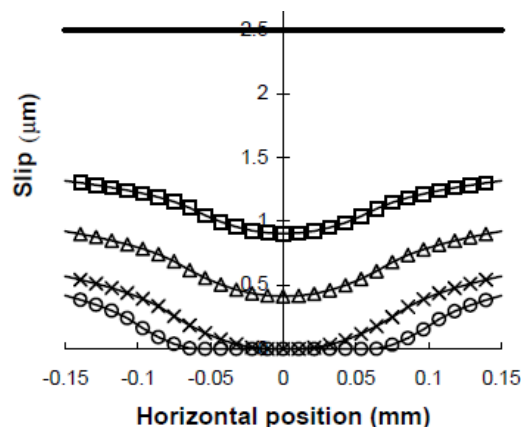
Le processus de mise à jour de la géométrie est nécessaire afin de simuler correctement et prédire l'usure, se produisant à l'interface de contact. En effet, l'enlèvement de matière modifie la surface de contact et provoque une redistribution de la pression de contact résultant du contact. Ces modifications ne peuvent être capturées si la surface est modifiée par le biais d'une mise à jour de la géométrie. L'estimation de l'usure grâce à une extrapolation fondée sur la surface d'origine a été montré pour produire des prédictions. Il est donc de plus

en plus en tant que norme, comme on le voit dans la littérature que les mises à jour de la géométrie sont inclus dans le processus de simulation de l'usure. La procédure proposée pour mettre à jour la géométrie dans cette recherche comporte deux étapes.

- Déterminer la direction normale (vecteur) de la surface de contact à l'emplacement de chaque nœud de surface (nœud de contact).
- Déplacer la position des nœuds de surface dans la direction du vecteur normal d'un montant égal à l'incrément d'usure.

La direction normale des nœuds de surface à l'emplacement des nœuds de contact peut être obtenu en tenant compte des emplacements des éléments de contact. Les éléments de contact à la surface ont trois nœuds chacun. Les fonctions de forme correspondantes pour cet élément peuvent être rédigées comme suit:

Le procédé de mise à jour de la géométrie est représentée **Fig.(III-2-1)**, la profondeur d'usure est très exagérée pour illustrer le concept. La procédure de la mise à jour de la géométrie a été utilisée avec succès dans le processus d'usure simulation. Un problème possible qui pourrait être rencontré lors des mises à jour du modèle. Le modèle de la méthode (FE) est d'abord créé d'une manière telle que tous les vecteurs normaux aux nœuds de surface, avant toute mise à jour est effectuée, sera dans une direction parallèle au bord de l'élément. Après plusieurs mises à jour de géométrie, il peut être prévu que le vecteur ne sera plus parallèle au bord[108,111,112].



*Figure.(III-2-1): Géométrie(en profondeur la géométrie du contact  $\mu\text{m}$  et horizontal en mm) de la mise à jour profondeur d'une surface.[112]*

### III-2-4 Les commandes de l'usure utilisées par le code :

Un code de calcul a ses propres commandes pour une simulation, pour le cas de l'usure le code (Ansys) utilise les commandes suivantes :

- Les éléments de contacts (modèle de contact) qui prennent en charge l'usure CONTA171, CONTA172, CONTA173, CONTA174, et CONTA175.
- Pour activer l'usure par contact de surface, définir l'usure comme un modèle de matériau par une commande (TB, PORTER commande) et l'affecter à des éléments de contact.
- Les propriétés du matériau et d'usure via la commande (TBDATA).
- Vous pouvez utiliser la commande (TBFIELD) en collaboration avec (TBDATA) pour définir les propriétés en fonction de la température ou de temps.
- **La mise en œuvre de l'usure comporte deux étapes :**
  - Tout d'abord, le degré d'usure est calculé par un modèle d'usure.
  - La géométrie est mise à jour pour tenir compte de l'usure.
  - Le code appelle une sous-routine d'usure définie par (USERWEAR) Cette option est activée par la (TB, PORTER) commande avec (TBOPT, USER).
  - Les constantes matérielles requises par le modèle sont spécifiés comme éléments de données sur la commande (TBDATA).
- **Les constantes injectées dans un fichier donné dans le code sont :**
  - Coefficient d'usure C1, K
  - Matériau dureté C2, H
  - C3 exposant de pression
  - Vitesse de glissement exposant C4, n
  - C5 une option pour utiliser le modèle d'usure et activer cette option, par la commande (TBDATA).

Vous pouvez spécifier une usure, option définie par l'utilisateur qui utilise le sous-programme de USERWEAR..

**III-2-5 Exemple d'un fichier de donné utilisé par le code de calcul pour la simulation de l'usure et l'affichage des résultats (géométrie):**

Exemple d'un fichier de donné (paramètres d'entrée) injecté dans un code multi physique (Ansys) pour une simulation de l'usure.

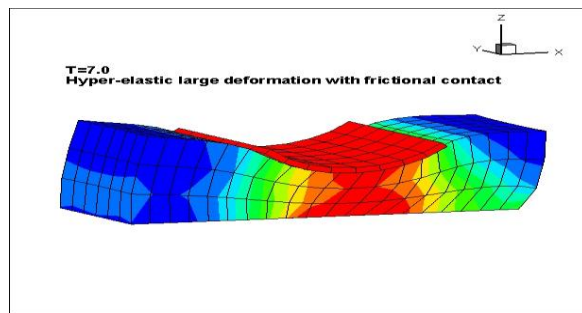
Cette exemple répond aux conditions de contact thermomécanique de notre étude :

**input Parameters**

Exemple d'un fichier donner :  
 Element types: Slider-Contact-  
 Vitesse de glissement 0.75m/s  
 Tempé:650°C  
 Force= 20N  
 Co-efficient of friction=0.14  
 Young's modulus=0.8E5  
 Density Matériau Slider=1490 kgm<sup>-3</sup>  
 Base=1400 kgm<sup>-3</sup>  
 Possion ratio: 0.3  
 Conditions initiales et aux limites (géométrie de contact, cycle)

- **output Results Fig.(III-2-2).**

Résultat d'un contact frottant d'un matériau élastique après un cycle de fonctionnement



*Figure.(III-2-2 ): Résultat d'une déformation d'un matériau élastique par une simulation [112]*

### **III-2-6 Conclusion :**

Au terme de ce chapitre, nous avons utilisé un algorithme pour simulation de l'usure d'un contact de deux matériaux de nature différent. Nous remarquons que plusieurs paramètres interviennent, et qui rendent la simulation de l'usure très délicate, (divergence du code), ces paramètres sont:

- Géométrie et type de contact.
- Type de maillage (géométrie), nombres de nœuds et éléments.
- Les conditions aux limites et initiales (paramètres tribologiques).
- Le cycle de fonctionnement.

nous avons utilisé aussi un modèle d'Archard modifié dans le but de calculer le volume d'usure d'un contact de deux matériaux par simulation, dans des conditions thermomécaniques sévères. Nous remarquons que l'originalité d'utilisation de ce modèle est la formulation qui prend en considération l'influence de la température, de la dureté  $H_v(T)$  et du coefficient d'usure  $K(T)$  en fonction de la température. Ce modèle calcule le volume d'usure par itération pendant un cycle, en tout point de la surface de contact par l'équation **(III-2-6)**, qui est une modification du modèle **(III-2-1)**.

**Chapitre IV :**  
**Résultats et Analyses**

**IV-1 Résultats du frottement et taux d'usure :**

**IV-1-1 Introduction**

IV-1-2 Résultat et analyse de la comparaison du frottement des différents nuances en fonctions des deux températures

IV-1-3 Résultat et analyse de la comparaison de l'évolution des coefficients de frottements des différentes nuances pour les paramètres (P3) et (P4)

IV-1-4 Résultat et analyse de la comparaison de l'évolution de coefficient de frottement en fonction des deux vitesses de glissements (P2) et (P3) des deux nuances (NC) et (ND)

IV-1-5 Analyses de l'évolutions des coefficients de frottements des différents nuances en fonction des paramètres (P2),(P3)et(P4)

IV-1-6 Résultats et analyses des taux d'usures

IV-1-7 Résultats de comparaison du taux des volumes usées des différentes nuances en fonctions des deux paramètres (P3) et (P4)

**IV-2 Résultats de la Microstructure :**

IV-2-1 Résultats et analyses de la microstructure de la piste d'usure par MEB

IV-2-2 Résultats et analyses de la microstructure de la piste d'usure par EDX

IV-2-3 Analyse du mécanisme de dégradation tribologique et la résistance à l'usure à haute température des cermets

**IV-2-4 Conclusion :**



### **IV-1 Résultats du frottement et des taux d'usure :**

#### **IV-1-1 Introduction :**

Dans ce chapitre, nous abordons une analyse de plusieurs résultats concernant l'évolution des coefficients de frottement pour les nuances étudiées en fonction des différents paramètres. L'évolution du coefficient de frottement pour les différentes nuances a été analysé dans le but de comprendre l'influence des paramètres (température et vitesse de glissement). Ces analyses comportent aussi des taux des volumes usés pour les différentes paramètres et nuances.

Nous abordons aussi une analyse de plusieurs résultats obtenus de la microstructure du matériau (cermet) en fonction du cycles de test pour des différentes résolutions de la nuance (NB). Ces analyses de la microstructure, des pistes ont été réalisés dans le but de comprendre le comportement tribologique et le mode de de dégradation du cermet. Ces analyses de la microstructure comportent:

- Une analyse par microscopie Electronique à Balayage (MEB).
- Une Analyse par électro diffraction par rayon X (EDX).

IV-1-2 **Résultats et analyse de la comparaisons des coefficients de frottements des différentes nuances en fonctions des deux températures :**

La Figure(IV-1-1) montre la comparaison du coefficient de frottement des différentes nuances en fonction des deux températures des paramètres (P3) et (P4).

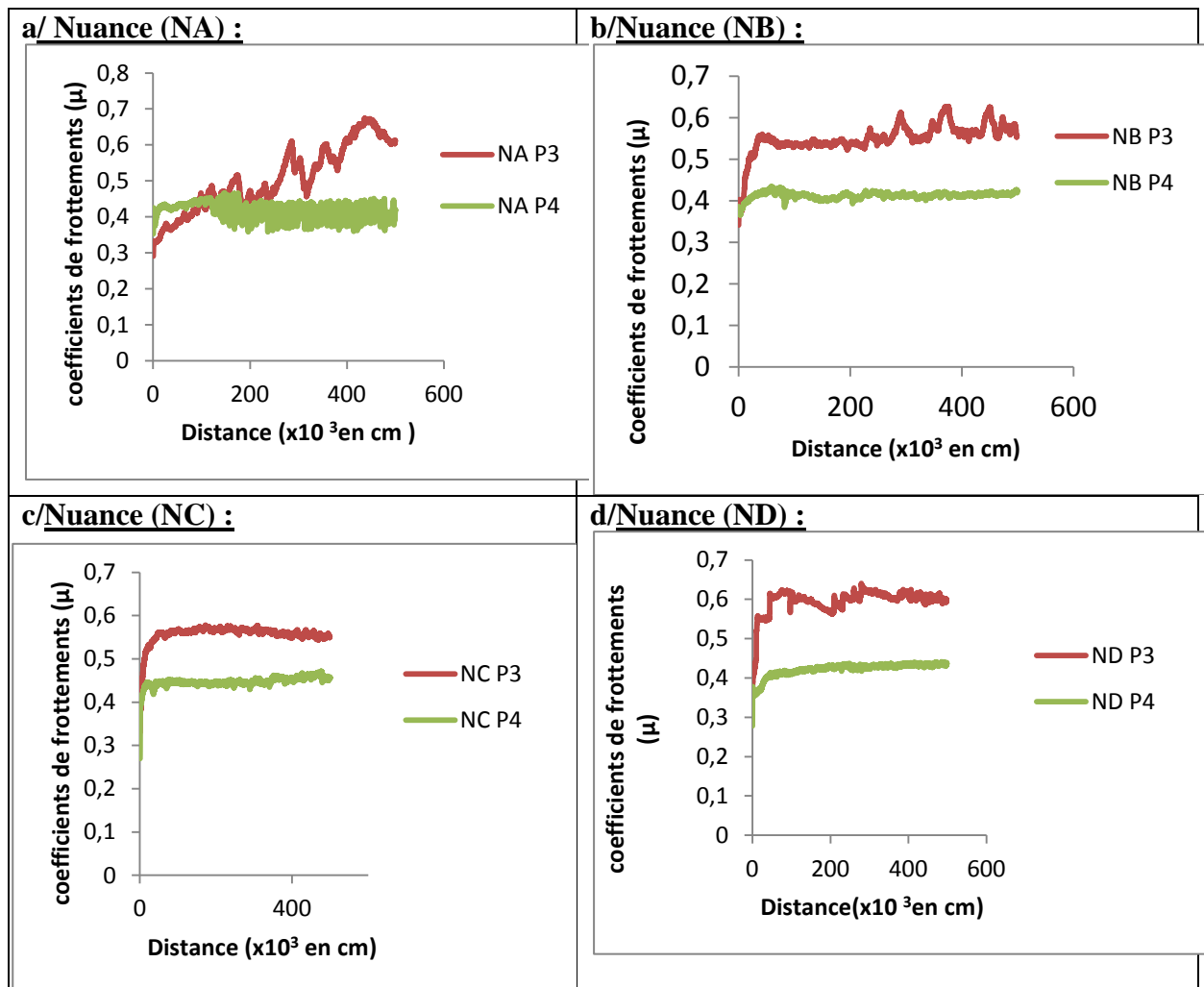


Figure.(IV-1-1): Comparaisons des coefficients de frottements des différents nuances en fonction des deux températures (450°C et 650°C) des paramètres (P3)et(P4).

- La comparaison du résultat de l'évolution du coefficient de frottement Fig.(IV-1-1), de la nuance (NA) sans TiC en fonction des deux différentes températures. montre que le CF pour la T= 450°C (P 3) n'est pas stable et ne cesse de progresser sur toute la distance ce qui présente un frottement qui varie entre (0.29 et 0.67) avec une valeur moyenne de 0.51.Un coefficient de frottement instable de valeur moyenne  $\mu = 0.42$  pour la T= 650°C (P 4), avec des micro oscillations à partir de 1500m jusqu'à la fin du test. Ces résultats montrent l'influence de la différence de la température de contact sur le coefficient de frottement causant un accroissement et des oscillations de celui-ci

le long du test.

- La comparaison du résultat de l'évolution du coefficient de frottement **Fig.(IV-1-1)**, de la nuance (NB) 5% TiC en fonction des deux différentes températures, indique un coefficient de frottement pour  $T=450^{\circ}$  (P 3) est relativement plus stable à partir de 330m, de valeur moyenne de 0.55 marquant des petites oscillations faibles à partir de 2300m jusqu'à la fin du test. Un coefficient de frottement pour  $T=650^{\circ}\text{C}$  (P4) indique un frottement relativement stable et plus faible avec une valeur moyenne  $\mu= 0.41$  sur toute la distance du test. Ces résultats indiquent des valeurs du coefficient de frottement acceptables, en particulier l'évolution de la nuance (NB) pour (P4) qui présente un frottement plus faible par rapport au paramètre (P3) pendant le long du test ce qui montre l'influence de la température de contact sur la variation du coefficient de frottement. .
- La comparaison du résultat de l'évolution du coefficient de frottement **Fig.(IV-1-1)**, de la nuance (NC)10% de TiC en fonction des deux différentes températures, indique pour  $T=450^{\circ}\text{C}$  (P 3) que le coefficient de frottement est relativement stable à partir du point 574 m, avec une valeur moyenne de frottement  $\mu=0.56$ . Le coefficient de frottement de  $T=650^{\circ}\text{C}$  (P 4),indique une nette stabilité du coefficient de frottement relativement sur toute la distance, de valeur moyenne de frottement  $\mu=0.45$ .Ces résultats de la nuance (NC) montrent l'influence de la différence de température sur la stabilité et la valeur du coefficient de frottement, et que l'augmentation de la température de contact  $650^{\circ}\text{C}$  (P4) indique un meilleur coefficient de frottement en valeur et stabilité.
- La comparaison du résultat de la nuance (ND) 15% TiC en fonctions des deux différentes températures indique une évolution de coefficient de frottement pour  $T=450^{\circ}\text{C}$  (P 3), par une montée plus rapide au début de l'essai jusqu'à 440 mètres. Puis des oscillations faibles le long du test, qui marque une valeur moyenne de coefficient de frottement de  $\mu=0.60$ . Le coefficient de frottement pour la  $T=650^{\circ}\text{C}$  (P 4),présente une nette stabilité relativement sur toute la distance du test avec une valeur moyenne de frottement  $\mu=0.42$ . Ces résultats de la nuance (ND) montrent, aussi l'influence de la différence de la température sur la stabilité du coefficient de frottement, indiquant une valeur acceptable du frottement pour les paramètres (P 4).

IV-1-3 Résultats et analyse de la comparaisons du coefficients de frottements de chaque paramètres en fonction les différentes nuances :

La Figure (IV-1-2) montre la comparaison du frottement des différents nuances en fonction des paramètres (P2),(P3) et (P4).

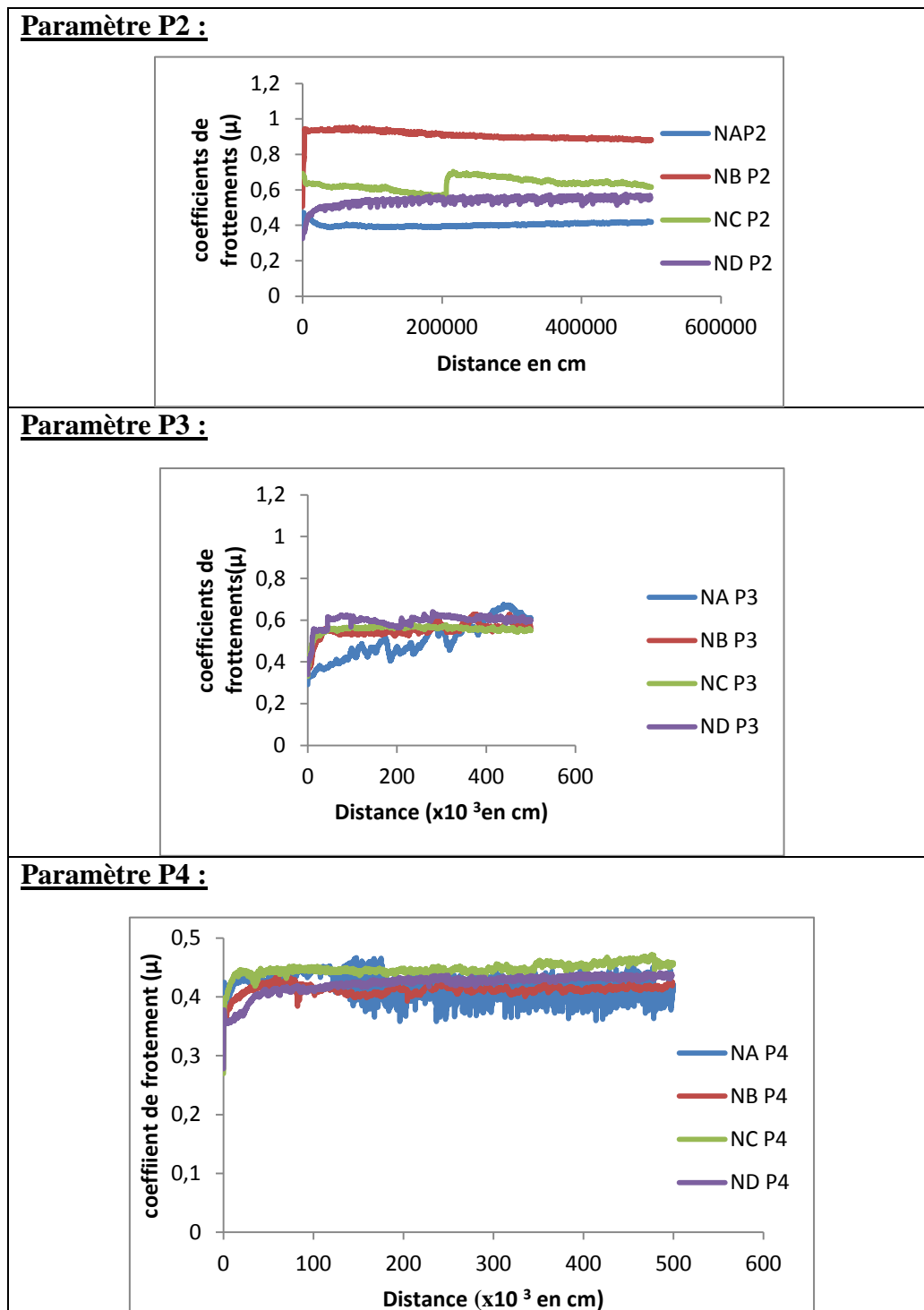


Figure.(IV-1-2) :Evolution des coefficients de frottements pour des différentes nuances en fonctions des paramètres (P2), (P3) et (P4)

- La Comparaison des résultats de l'évolution du coefficient de frottement des différentes nuances des paramètres (P 2) **Fig.(IV-1-2)**, indique une évolution de coefficient de frottement vers une valeur moyenne et stable après un temps très court du test pour les nuances (NA) et (ND) Ces résultats des nuances (NA) et (ND) indiquent un coefficient de frottement moyen de valeur  $\mu=0.40$  et  $\mu=0.54$  respectivement. Nous remarquons aussi que l'évolution du coefficient de frottement de la nuance (NB), présente un accroissement brusque du coefficient de frottement au début du test puis une stabilité marquée par une valeur moyenne du frottement  $\mu=0.91$ . Enfin la nuance (NC) présente des micro pics le long du test qui marque une valeur moyenne de frottement  $\mu=0.56$ .
- La Comparaison des résultats de l'évolutions du coefficient de frottement des différentes nuances en fonction des paramètres (P 3) **Fig.(IV-1-2)**, indique une évolution de coefficient de frottement vers une valeur moyenne et stable après un temps très court du test pour les nuances (NB),(NC) et (ND). Cette tendance marque un coefficient de frottement moyen de valeur  $\mu=0.57$  et de valeur maximum  $\mu=0.63$ , pour les trois nuances. Nous remarquons aussi que l'évolution du coefficient de frottement de la nuance référence (NA) n'arrête pas d'augmenter avec des pics, sur toute la distance du test de valeur moyenne  $\mu=0.51$  et de valeur maximum de frottement  $\mu=0.67$ . Nous constatons aussi que l'évolution du coefficient de frottement de la nuance (NC) est relativement la plus stable sur toute la distance par rapport aux nuances (NB),(ND). Ces résultats indiquent que la présence du TiC dans les nuances pour les paramètres (P 3), donne une amélioration de la stabilité et de la valeur du coefficient de frottement.
- La Comparaison des résultats de l'évolution du coefficient de frottement des différentes nuances en fonction des paramètres (P 4) **Fig.(IV-1-2)**, indique une évolution faible et plus stable du coefficient de frottement pour les nuances (NB),(NC) et (ND) pour les paramètres (P 3) après un temps très court. Ces résultats sont identiques pour les trois nuances qui marquent un frottement moyen  $\mu=0.42$  et de valeur maximum  $\mu=0.47$ . La nuance référence (NA) indique une évolution instable avec une présence de nombreux pics durant toute la durée du test avec un coefficient de frottement moyen  $\mu=0.44$  et avec une valeur maximum de frottement  $\mu=0.48$ . Nous constatons aussi que le coefficient de frottement de la nuance (ND) est relativement le plus stable le long du test ce qui montre l'influence de la teneur de 15% du TiC dans la nuance. Ces résultats confirment que la présence

du TiC améliore la stabilité du coefficient de frottement (résistance au frottement) en particulier pour les paramètres (P 4).

IV-1-4 **Résultat et analyse de comparaison de l'évolution de coefficient de frottement des deux vitesses de glissement pour les paramètres (P2) et (P3) des deux nuances (NC) et (ND) :**

La Figure (IV-1-3) montre la comparaison de l'évolution du coefficient de frottements des nuances (NC) et (ND) en fonction des paramètres (P2) et (P3).

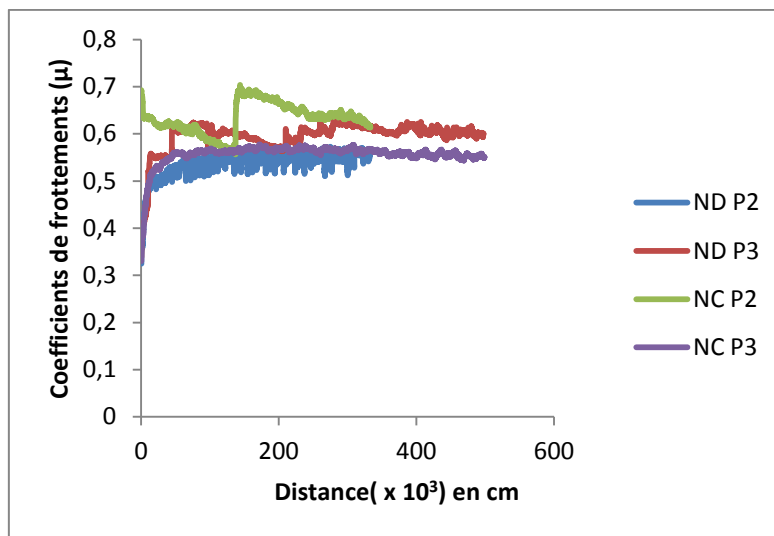


Figure.(IV-1-3): Evolution du coefficient de frottement pour les deux vitesses des paramètres (P2) et (P3) des nuances (NC) et (ND)

La Comparaison des résultats de l'évolution du coefficient de frottement des deux vitesses de glissements des paramètres (P2) et (P3) pour les deux nuances (NC) et (ND) Fig.(IV-1-3). indique une nette stabilité du coefficient de frottement de la nuance (NC) pour la vitesse  $V = 0.5\text{m/s}$  (P3). L'évolution du coefficient de frottement pour la nuance(ND) pour la vitesse  $V = 0.5\text{m/s}$  (P3) relativement stable, marquant un accroissement au début de l'essai, puis des perturbations jusqu'à la fin de l'essai. L'influence de la vitesse de glissement  $V = 0.75\text{m/s}$  enregistre un coefficient de frottement pour les deux nuances (ND) et (NC) par un saut brutal au début du test suivi par des micro-pics le long du test. Ces comparaisons des résultats montrent l'influence de la vitesses de glissement sur l'intensité et la stabilité du coefficient de frottement .

IV-1-5 Analyses de l'évolutions des coefficients de frottements des différents nuances en fonctions des paramètres (P2),(P3)et(P4) :

La Figure(IV-1-4) montre une comparaisons de l'évolutions du coefficients de frottements des nuances (NA),(NB),(NC) et (ND) en fonction des paramètres (P3) et (P4).

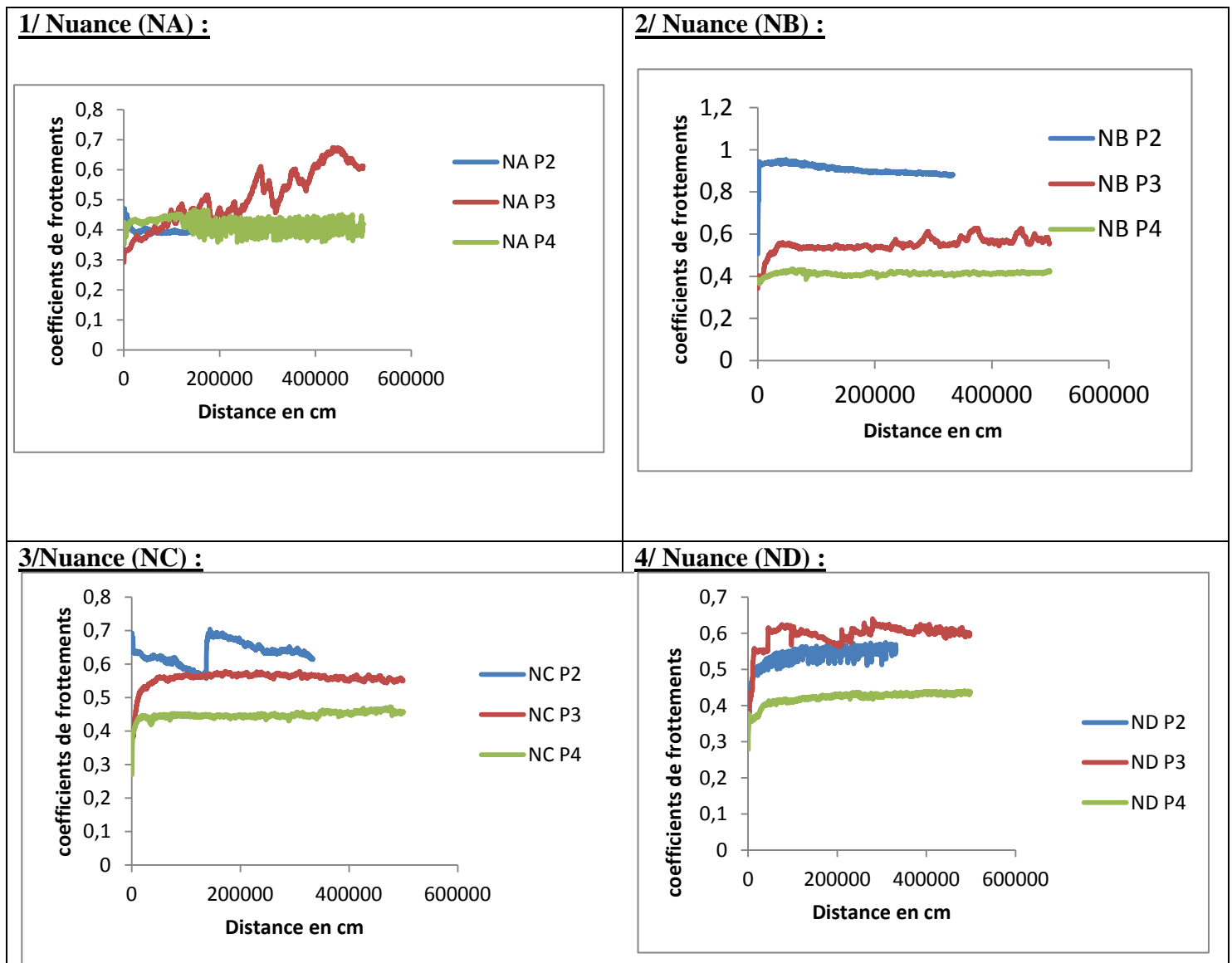


Figure.(IV-1-4): Résultats de la Comparaisons de l'évolutions des coefficients de frottements des différents nuances en fonction des paramètres (P2),(P3) et (P4).

- La comparaison des résultats de la nuance référence (NA) sans TiC indique que le coefficient de frottement des paramètres (P2) est relativement le plus stable sur toute la distance avec une valeurs moyenne de frottement  $\mu = 0.4$ . Un coefficient de frottement pour les paramètres (P3) n'est pas stable et ne cesse de progresser sur

toute la distance avec une variation de frottement entre (0.29 et 0.67) de valeur moyenne  $\mu=0.51$ . Pour les paramètres (P4) nous donne des résultats de COF relativement stable de valeurs moyenne  $\mu= 0.42$  avec des oscillations à partir de 1500 m, ces résultats sont identiques pour (P2) et (P4). Nous constatons que la nuance (NA) pour les paramètres (P4) présente des oscillations, ce qui explique une présence d'une oxydation intensive dans la piste d'usure. Enfin pour les paramètres (P3) de la nuance (NA) indique un coefficient de frottement le plus élevé par rapport aux autres nuances.

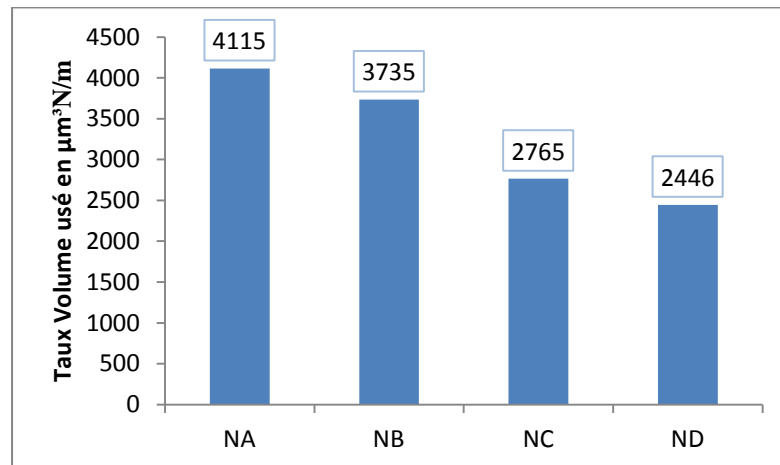
- Pour la comparaison de la nuance (NB) présente un coefficient de frottement pour (P3) et (P4) relativement plus stable sur toute la distance avec marquant une valeur moyenne de frottement  $\mu= 0.63$  et  $\mu= 0.43$  respectivement. Les paramètres (P2) indique un coefficient de frottement important de valeurs moyenne  $\mu= 0.95$  ce qui explique l'influence de l'augmentation de la vitesse de glissement.
- Pour la comparaison de la nuance (NC) présente un coefficient de frottement pour (P3) et (P4) relativement plus stable sur toute la distance avec une valeur moyenne de frottement  $\mu= 0.58$  et  $\mu= 0.47$  respectivement. Un COF pour les paramètres (P2) indique une valeur moins importante par rapport à la nuance (NB) qui est  $\mu= 0.7$  ce qui explique l'influence de l'augmentation de la teneur de TiC.
- Pour la comparaison de la nuance (ND) indique un coefficient de frottement marquant par des micro pics sur toute la distance du test. Un coefficient de frottement pour les paramètres (P4) relativement plus stable sur toute la distance du test avec une valeur moyenne de frottement  $\mu= 0.57$  ce qui explique aussi l'influence de l'augmentation de la teneur de TiC (15%).



IV-1-6 **Résultats et analyses des taux des volumes usées :**

IV-1-6-1 **Résultats et analyses du taux usé des différents nuances en fonction du paramètre (P4) :**

La figure (IV-1-5) montre le résultat de la comparaisons du taux des volumes usées des différentes nuances en fonction du paramètre (P 4) .

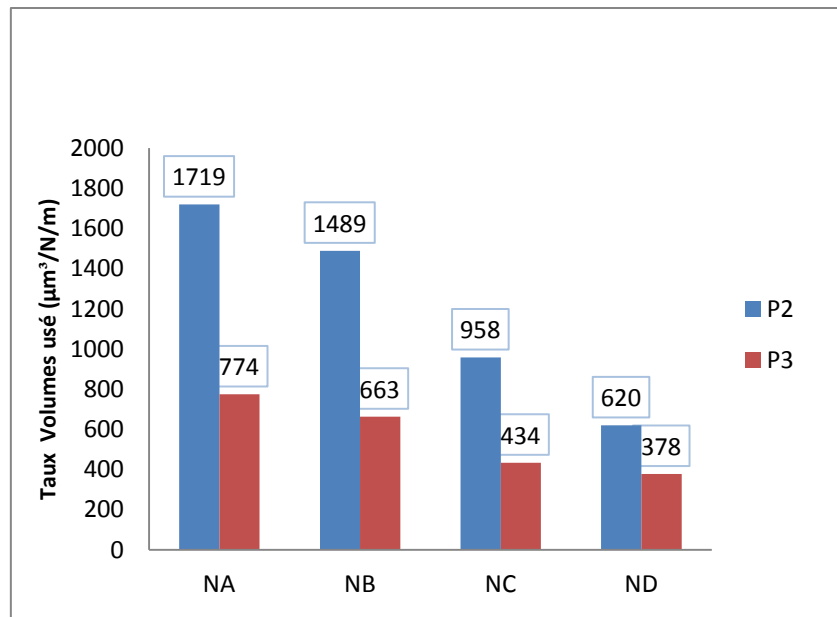


*Figure.(IV-1-5 ):Evolution des Taux des volumes usées des différentes nuances en fonction du paramètre (P4)*

L'analyse des résultats du taux des volumes usées des différentes nuances ,en fonction du paramètre (P4) **Fig.(IV-1-5)**. montrent l'influence de la teneur du TiC des nuances (NB),(NC) et (ND), ce qui confirme la valeur du coefficient de frottement moyen qui est de valeur  $\mu=0.42$  pour les trois nuances. Ces nuances indiquent un taux de volume usé en décroissance par rapport à la teneur du TiC, par rapport à la nuance référence (NA) qui indique un taux le plus important. Cette analyse des résultats indique aussi, que la nuance (ND) présente le taux le plus faible qui est quantifié par une valeur de volume usé ( $K=2446 \mu\text{m}^3\text{N/m}$ ). Ces résultats d'analyse montrent et confirment l'influence de la teneur de TiC, sur le taux des volumes usés par rapport au taux de la nuance référence (NA) sans TiC.

IV-1-6-2 **Résultat du taux de volume usé des différents nuances en fonction des deux paramètres (P2) et (P3) :**

La figure (IV-1-6) montre un résultat de la comparaison des taux des volumes usées des différentes nuances en fonction des deux vitesses de paramètres (P2) et (P 3).

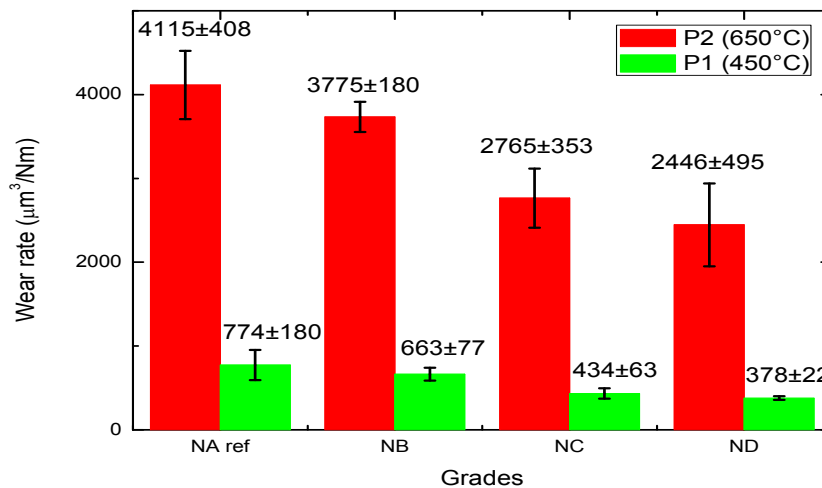


*Figure.(IV-1-6): Comparaison du taux des volumes usées des différentes nuances en fonctions des deux vitesses de glissements (0.75m/s et 0,5m/s) des paramètres (P2) et (P3).*

L'analyse des résultats de la comparaison du taux des volumes usées des différentes nuances, en fonction des deux paramètres (P2) et (P3) des deux vitesses de glissements respectivement ( $V = 0.75\text{m/s}$ ,  $V = 0.5\text{m/s}$ ), montrent clairement que la variation de la vitesse de glissement des deux paramètres, a une influence sur le taux du volume usé pour les différentes nuances **Fig.(IV-1-6)**. Ces résultats du taux des volumes usées est progressivement en décroissance, avec l'augmentation de la teneur en TiC. Nous remarquons aussi que le volume usé de la nuance référence (NA) est le plus important, ce qui indique une différence de volume usé entre les deux paramètres (P2) et (P3), qui sont quantifiés respectivement ( $K=1719 \mu\text{m}^3/\text{N/m}$ ), ( $K=774 \mu\text{m}^3/\text{N/m}$ ). Cette analyse indique un taux du volume usé faible pour la nuance (ND) par rapport aux nuances (NA, NB, NC) pour les paramètres (P2) et (P3) quantifier respectivement ( $K=620 \mu\text{m}^3/\text{N/m}$ ), ( $K=378 \mu\text{m}^3/\text{N/m}$ ). Nous constatons aussi que ces résultats d'analyses montrent l'influence de la teneur du TiC et de la variation de la vitesse de glissement, sur le taux des volumes usées.

**IV-1-7 Résultats de comparaison du taux des volumes usés des différentes nuances en fonctions des deux paramètres (P3) et (P4):**

La figure (IV-1-7) montre le résultat de la comparaisons du taux des volumes usés des différentes nuances en fonction des deux température de paramètres (P3) et (P 4).



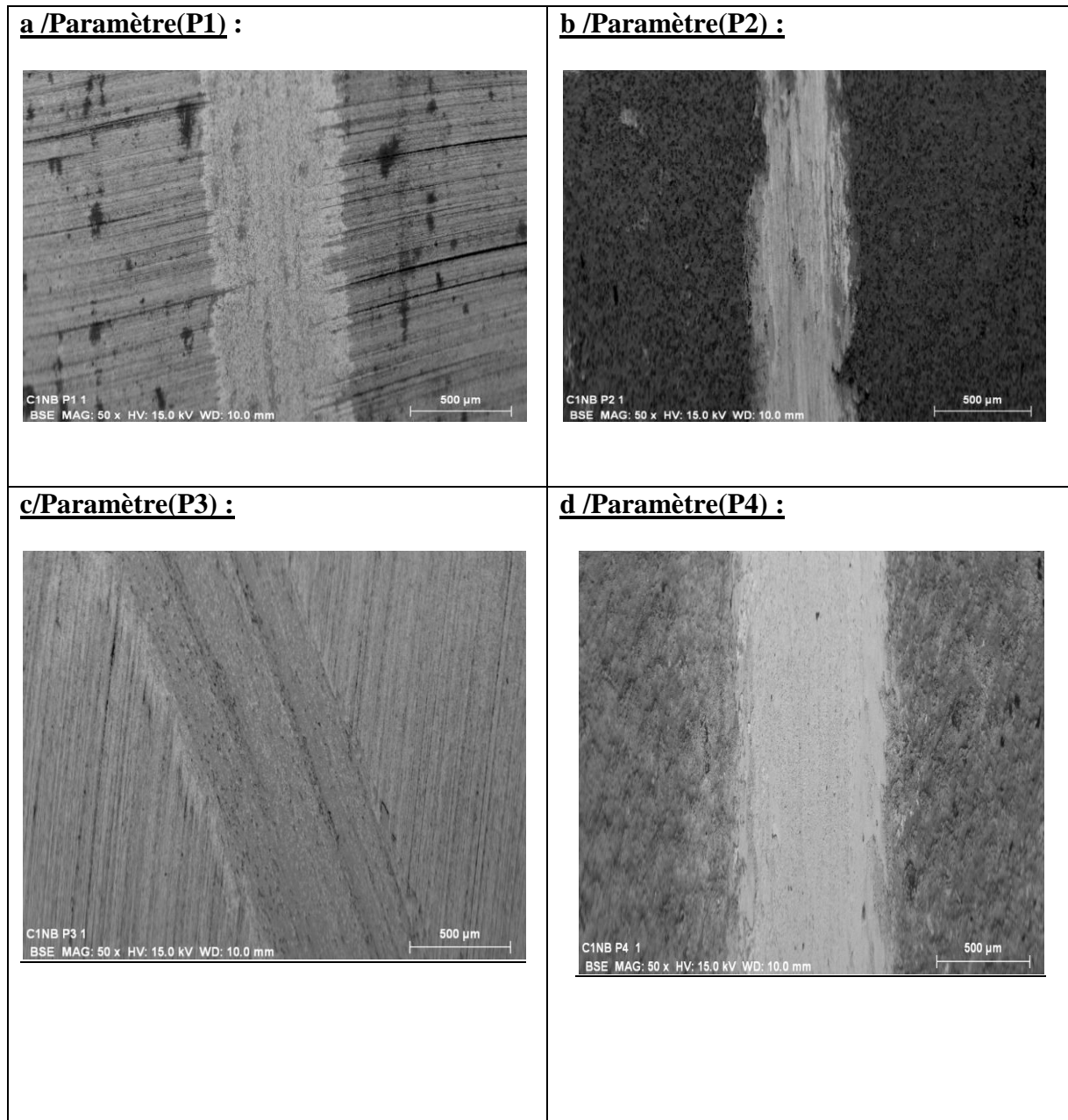
*Figure.( IV-1-7): Résultats de la comparaison du taux de volume usé de différentes nuances en fonction des deux températures des paramètres (P3)et (P4)*

L'analyse des résultats du taux d'usure des différentes nuances en fonction des deux températures des paramètres (P3) et (P4) **Fig.(IV-1-7)**. nous montrons une augmentation de 20% du taux des volumes usés entre les nuances et relativement en décroissance pour les deux paramètres (P3) et (P4). Cependant, ce taux d'usure des nuances diminue avec l'augmentation de la teneur en TiC. L'effet important de l'augmentation de la température de 450°C à 650°C sur le taux des volumes usés, est observé qui produit une augmentation de 350% du volume d'usure totale pour les paramètres (P3) et (P4). Le taux d'usure le plus bas est observé pour la teneur en TiC de 15% (ND), donnant des valeurs respectivement ( $K = 378 \mu\text{m}^3 / \text{Nm}$ ,  $K = 2446 \mu\text{m}^3 / \text{Nm}$ ) pour (P3) et (P4). La nuance de référence (NA) indique le taux d'usure le plus important, donnant des valeurs le volume usés pour les paramètres (P3) et (P4) ( $K = 774 \mu\text{m}^3 / \text{Nm}$ ,  $K = 4115 \mu\text{m}^3 / \text{Nm}$ ) respectivement. Ces nuances présentent une augmentation rapide du volume d'usure, indiquant un régime d'usure plus sévère.

## IV-2 Résultats de la Microstructure

### IV-2-1 Résultats de l'analyse de la microstructure de la piste d'usure par MEB :

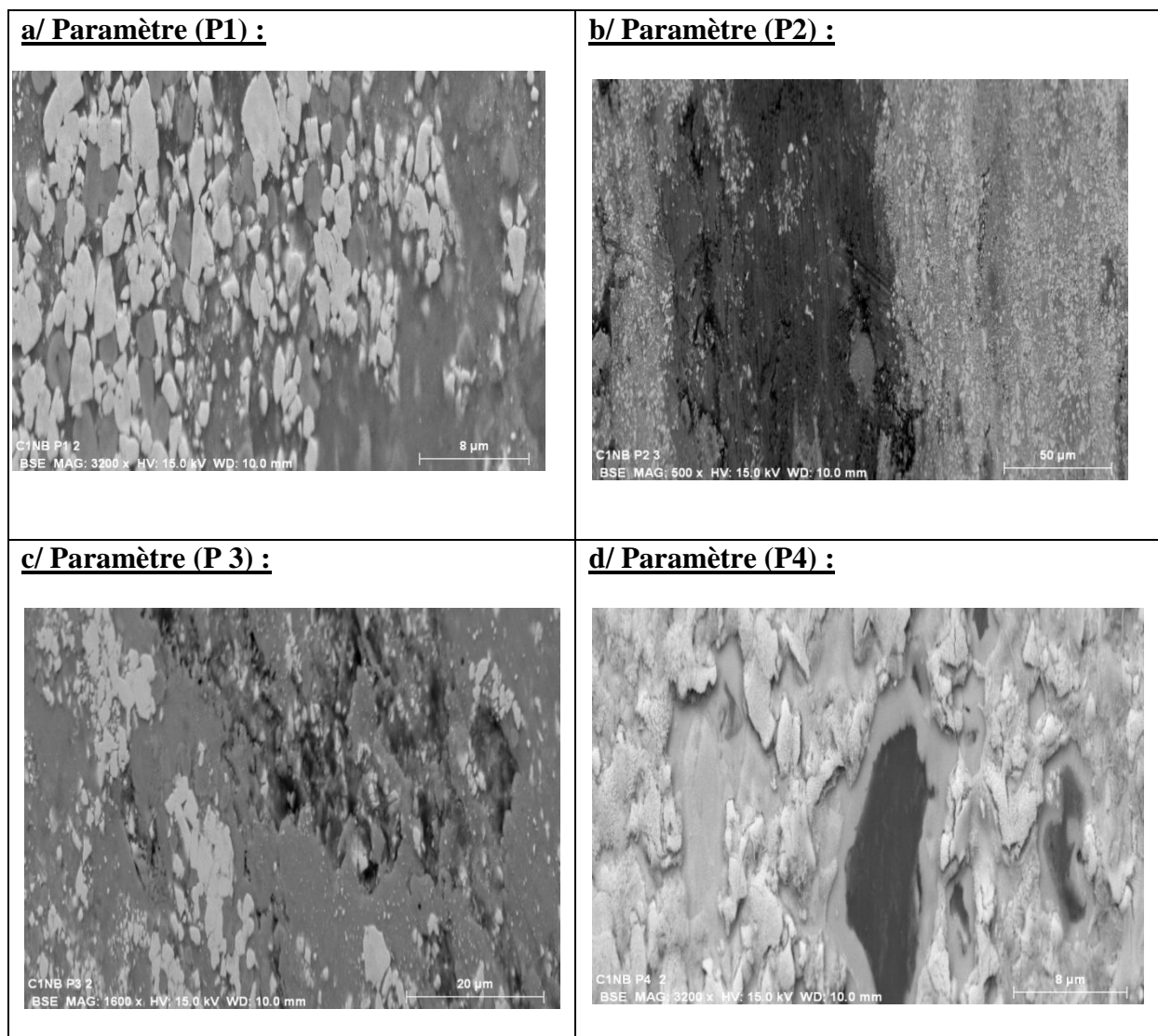
Les analyses de la microstructure des pistes usées par microscope électronique à balayage (MEB) après les tests d'usure, ont pour objectif de connaître le caractère de la dégradation. Ces analyses montrent des pistes d'usure prédominants sur les différentes figures présentés.



*Figure.(IV-2-1): Images de la microstructures MEB avec un grossissement (500  $\mu\text{m}$ ) des différentes pistes usées en fonction des paramètres (P1(a), P2(b),P3(c),P4(d) de la nuance (NB) 5% TiC après les tests de frottement.*

L'analyse de la microstructure de la piste usé par MEB pour les différents paramètres **Fig.(IV-2-1)**, montre les résultats suivants :

- L'analyse de la piste usée avec les paramètres (P1) et (P2) montre une piste usée et la microstructure pour les paramètres (P3) montre une piste usée générée principalement par des débris et des zones oxydées.
- L'analyse de la microstructure avec les paramètres (P4) montre une piste générée par des débris oxydés ce qui explique l'influence de la température, avec une présence d'une couche oxydée qui se génère. La naissance de cette couche donne une confirmation par la valeur et la stabilité du coefficient de frottement obtenus . Cette couche d'une morphologie (en forme de plaque), susceptible d'être le résultat d'une adhésion successive et d'un transfert de débris.



**Figure.( IV-2-2 ):** Images de la microstructures par MEB avec un grossissement ( 8, 20, 50 μm )des différentes pistes usées en fonction des paramètres (P1(a), P2(b),P3(c),P4(d) de la nuance (NB) 5% TiC après les tests de frottement

Les analyses de la microstructure des pistes usées par MEB **Fig.(IV-2-2)** par les différents paramètres montrent des mécanismes d'usure dominants par des différences significatives.

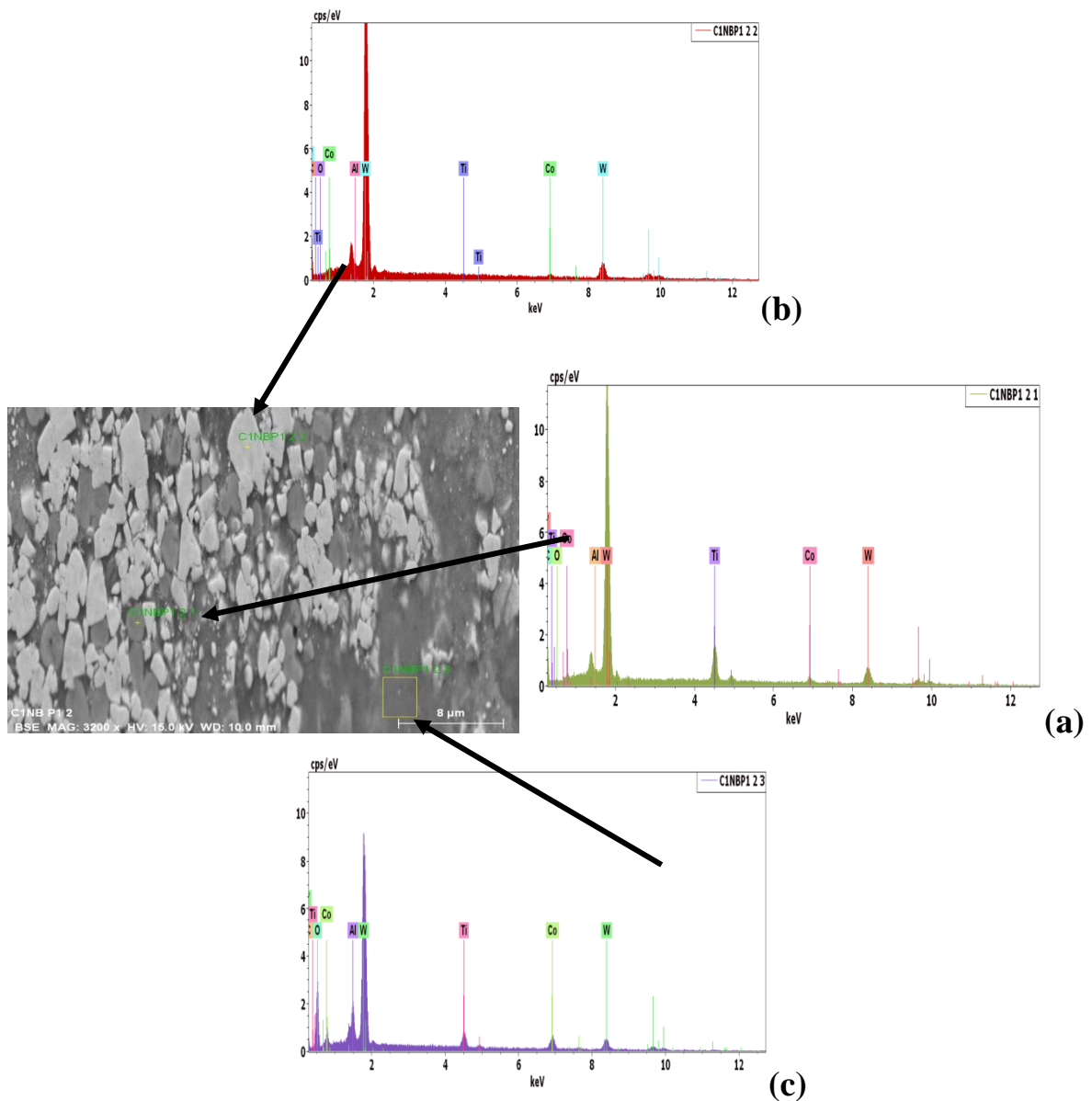
- **La figure (IV-2-2(a))** de la piste usée de paramètre (P1) montre une piste se compose de débris riches en tungstène avec certain oxyde résiduel, le phénomène d'oxydation contribue clairement a une résistance de l'usure du matériau (cermet).
- **La figure (IV-2-2(b))** de la piste usée de paramètre (P2) avec une vitesse de glissement de 0,75m/s, montre un processus de débris d'usure broyés sur la piste pour former de nouvelles couches de débris marqué par une augmentation du coefficient de frottement.
- **La figure(IV-2-2(c))** de la piste usée de paramètre (P3) montre une piste usée générée principalement par des débris de tungstène, carbone, cobalt et des zones oxydées.
- **La figure(IV-2-2(d))** de la piste usée de paramètre (P4) une augmentation de la température montre une piste générée par des débris oxydés. Ces débris oxydés formes une couche de morphologie en forme de plaque générée dans la piste usée capable d'être résistante à l'usure à haute température.

### IV-2-2 **Résultats et Analyse de la microstructure de la piste d'usure par EDX:**

Ces analyses de la microstructure des pistes usées par microscope électronique à diffraction de rayon x (EDX) après les tests d'usures, ont pour but d'analyser le comportement de dégradation (usure) de la nuance(NB). Ces analyses de la microstructure pour différents paramètres montrent des éléments dans différents points de la piste usée confirmés par les images (EDX) qui sont:

- **Analyse par EDX de la piste usée des paramètres (P1) :**

L'analyse par EDX de la piste usée pour les paramètres (P1) **Fig.(IV-2-3)**. montre trois spectres de la piste usée de différentes teneurs formé par les éléments (C, O, Al, Ti, CO ,W )**Tab.(IV-2-1)**. Ces éléments confirme une piste usée formé par des éléments de la bille O et Al et du matériau. Ces analyses montrent aussi des pics intenses de tungstène dans la zone de la piste prouve donc qu'ils ont en quantité très importante. Les spectres EDX montrent un processus de transfert du matériau (cermet) et de la bille d'alumine au niveau de la piste, cette observation indique la formation d'oxyde sur la piste du (cermet).



Figures.(IV-2-3 ): (a) ,(b),(c) : Image par MEB/EDX de la microstructure de la piste de frottement de la nuance (NB) en fonction des paramètres (P1).

Tableau.(IV-2-1): Différents pourcentages d'éléments de la microstructure MEB/ EDX de la piste usée

Elements	C	O	Al	Ti	Co	W	Total
Spectre (a)	15.49433	0.657932	0.275997	11.26916	3.5626	68.73998	100%
Spectre(b)	19.12071	0.64452	0.225339	0.199252	2.367314	77.44286	100%
Spectre (c)	5.703834	18.17575	3.871424	5.994113	11.85899	54.39589	100%

• **Analyse par EDX de la piste usée des paramètres (P2) :**

L'analyse par EDX de la piste usée **Fig.(IV-2-4)** pour les paramètres (P1) montre des mêmes observations les mêmes que (P1) formée de trois spectres de la couche de la piste usée de différents teneurs composés des éléments (C, O, Al, Ti, CO, W) **Tab.(IV-2-2)**. Ces analyses confirment que la piste usée formée par les éléments provenant de la bille (O et Al), et le pics intense dans la zone usée celle du tungstène prouve donc qu'il en quantité très importante.

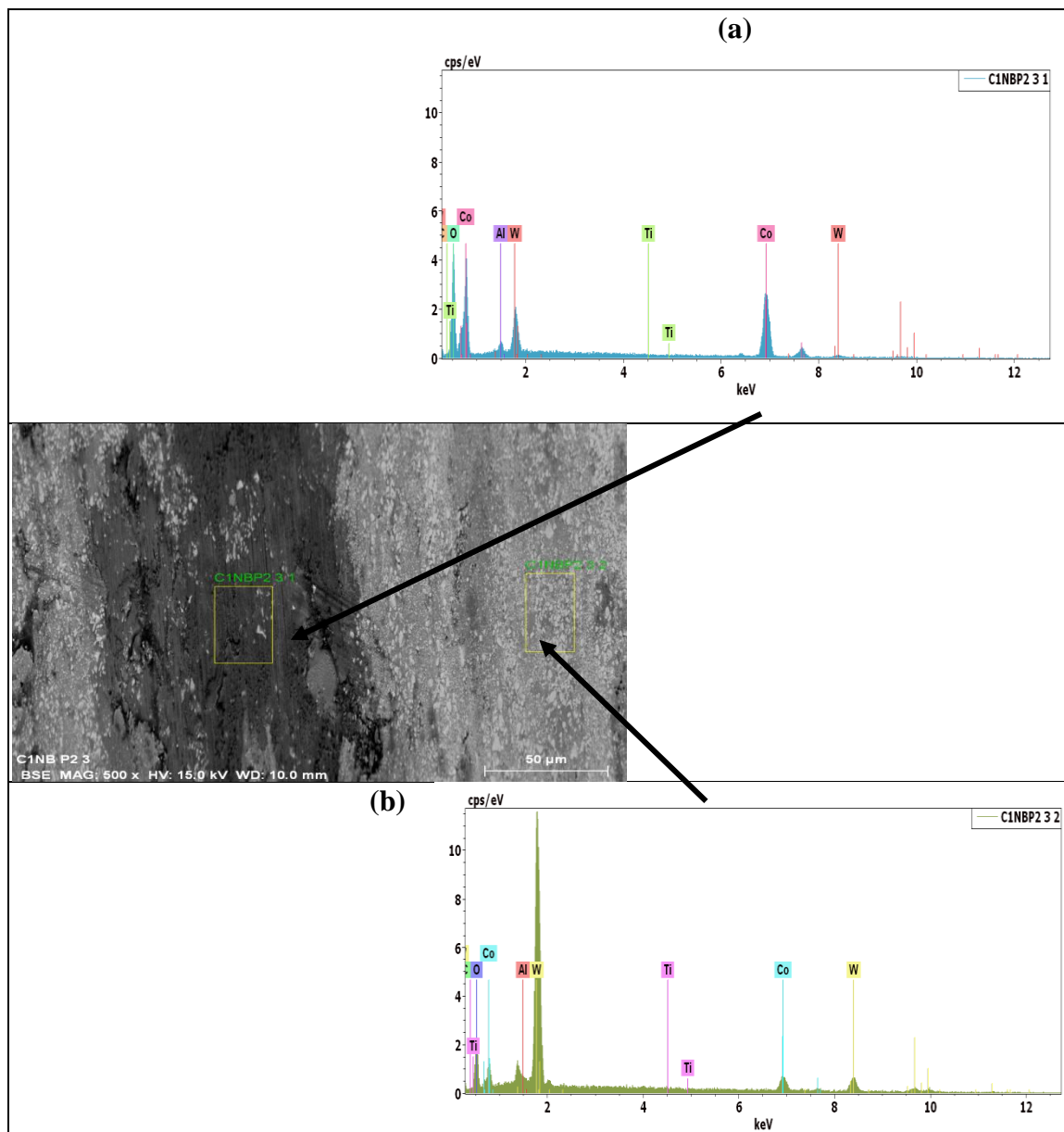


Figure.(IV-2-4) (a), (b): Image par MEB/EDX de la microstructure de la piste de frottement de la nuance (NB) en fonction des paramètres (P2).



Tableau.(IV-2-2):Différents pourcentages d'éléments de la microstructure de la piste usée MEB/ EDX

Elements	C	O	Al	Ti	Co	W	Total
Spectre (a)	4.076539	19.2764	1.305432	0.00	64.36485	10.97678	100%
Spectre(b)	3.802365	14.14427	0.639474	0.539563	13.11692	67.7574	100%

- **Analyse de la piste usée des paramètres (P3) :**

L'analyse de la piste usée par EDX pour le paramètre (P3) (**Fig.(IV-2-5)**) montre des spectres de différent pics contenant des éléments (C, O, Al, Ti, Co, W) **Tab.(IV-2-3)**. Cette analyse indique une homogénéité des plus petits débris d'usure formés dans la piste d'usure et des points d'oxydes de tungstène aux différents points de la piste. L'existence de ces débris d'usure est confirmée par les éléments de la bille (O, Al) trouvés dans la piste. Ces analyses indiquent également que la présence de TiC dans la nuance (NB) pour la température (450°C) a relativement retardé l'oxydation ce qui conduit à une amélioration de la résistance à l'usure, au frottement et à l'oxydation.

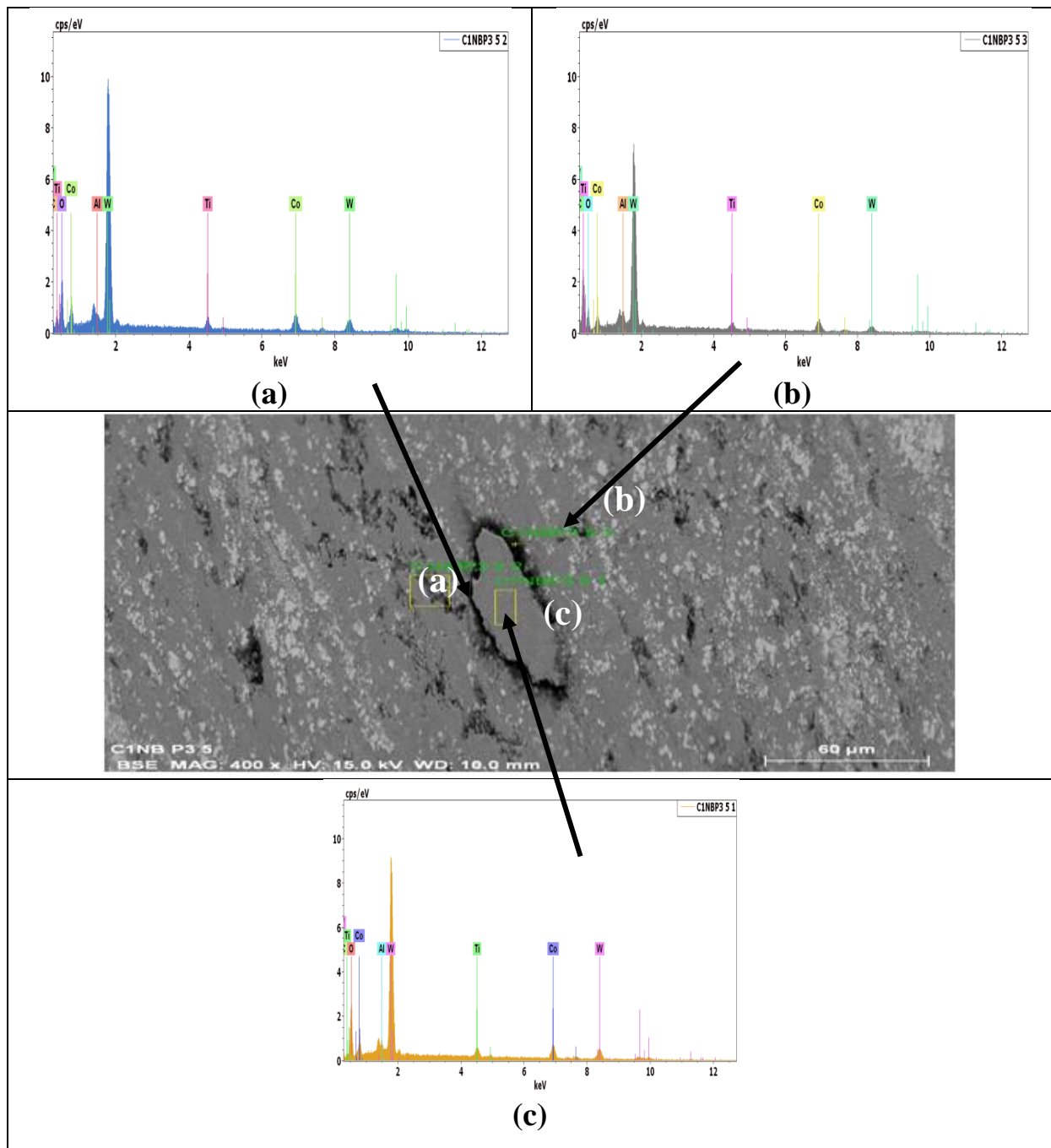


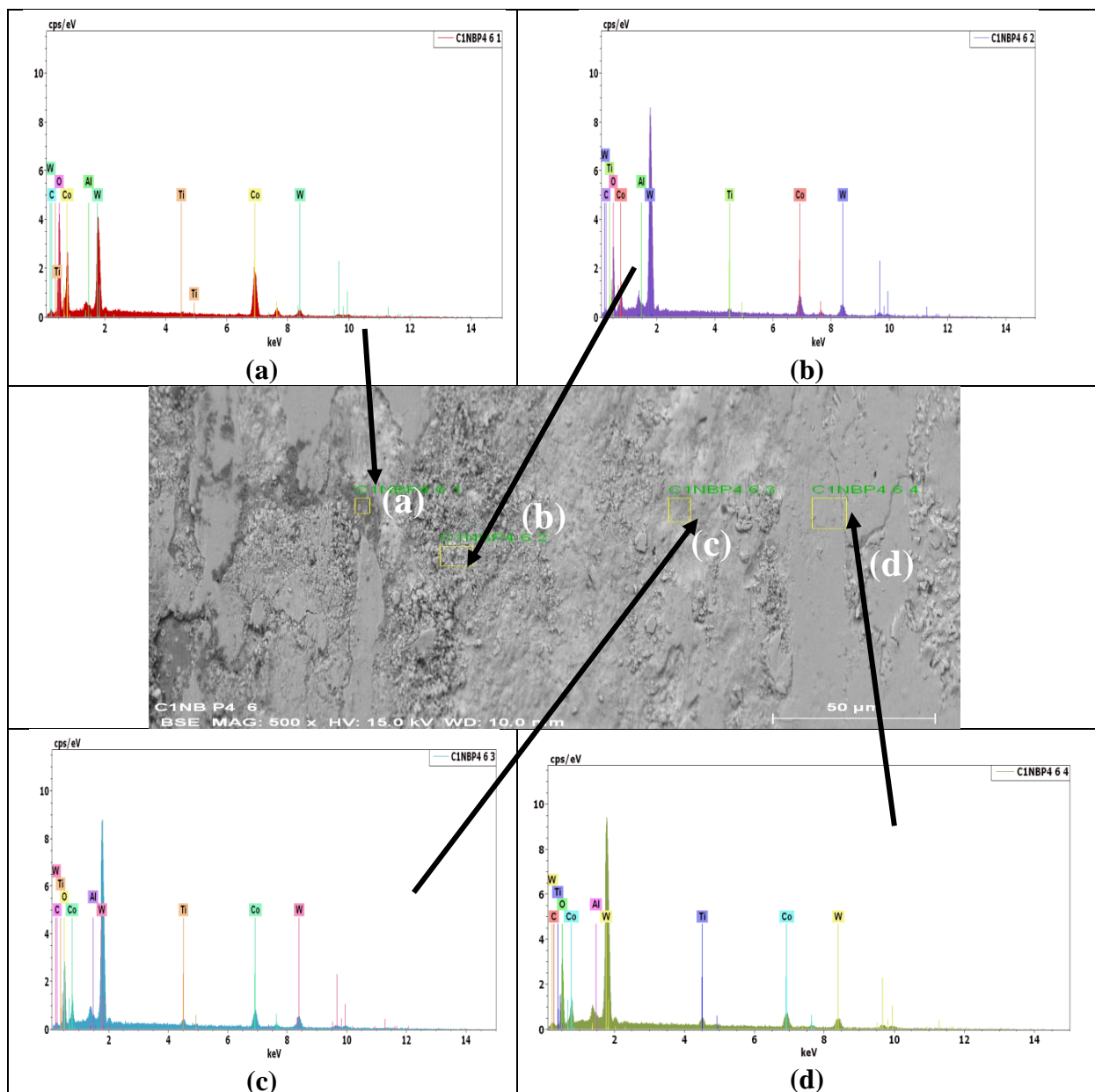
Figure.(IV-2-5) (a),(b),(c) : Image par MEB/EDX de la microstructure de la piste de frottement de la nuance (NB) en fonction des paramètres (P3).

Tableau.(IV-2-3) : Différents pourcentages d'éléments de la microstructure MEB/EDX de la piste usée en fonction (P3).

Elements	C	O	Al	Ti	Co	W	Total
Spectre (a)	4.462546	16.71093	1.074495	3.98432	14.15275	59.61496	100%
Spectre(b)	4.699013	13.98472	0.692324	3.110177	15.38206	62.1317	100%
Spectre (c)	11.14747	8.063785	1.807032	3.929418	18.09596	56.95634	100%

• **Analyse de la piste usée utilisons les paramètres (P4) :**

L'analyse de la piste usée pour les paramètres (P4) par EDX de la microstructure aux différents points **Fig.(IV-2-6)** montre la formation d'une couche oxydée (tribofilm) formant principalement par un oxyde riche en tungstène (W) aux points (b), (c), (d) et un oxyde riche en Cobalt (Co) au point (a) **Tab.(IV-2-4)**. Cette analyse indique également que l'oxyde formé est compacté réparti sur toute la piste d'usure (formation d'un film d'oxyde) ce qui améliore la résistance à l'usure à haute température. Le spectre EDX des traces d'usures montre qu'il y a un processus de transfert dans la piste ce qui indique le mécanisme d'usure .



*Figure.( IV-2-6) (a),(b),(c),(d): Image par MEB/EDX de la microstructure de la piste usée de la nuance (NB) en fonction des paramètres (P4).*

*Tableau.(IV-2-4): Différents pourcentages d'éléments de la microstructure MEB/ EDX de la piste usée après test de frottement en fonction des paramètre (P4).*

Elements	C	O	Al	Ti	Co	W	Total
Spectre (a)	1.71275	21.71036	0.482545	0.309294	47.63304	28.152	100%
Spectre (b)	2.623737	17.85586	0.378818	1.314193	19.72604	58.10135	100%
Spectre (c)	2.012118	18.3842	0.585716	2.241436	17.24254	59.53399	100%
Spectre (d)	2.018057	19.57532	0.790104	3.33697	16.54762	57.73193	100%

**IV-2-3 Analyse du mécanisme de dégradation tribologique et la résistance à l'usure à haute température des cermets:**

Les mécanismes de dégradations tribologiques sont plus complexes pour les matériaux de hautes duretés (cermets) tels que ceux utilisés dans notre étude(WC-Co-TiC). Sur la base des tests de frottements, taux d'usure et sur les résultats de l'analyses de la microstructure, le mécanisme de dégradation qui se produit dans les cermets montre des modes d'usures adhésifs ou tribo-chimiques. Ce mécanisme a commencé par frotter de minuscules particules de fragment (WC) qui sont ensuite incorporées dans le mélange de liant extrudé (Co) avec (O), qui forme une tribo-couche (couche d'oxyde), ceci constitue une indication pour une résistance à l'usure à haute température (650°C).

Ce processus permet la formation d'une couche qui est résistante au frottement ce qui donne une confirmation de la diminution du coefficient de frottement à haute température. Le processus aussi continu de se former favorisant la naissance, d'une zone en tri-couche formé par des débris d'usure donne naissance à un troisième corps dans la piste (formation d'une couche résistante à l'usure). Ce processus prend de petits fragments de TiC et des particules de WC qui sont ensuite incorporées alors dans le mélange de liant extrudé (Co), qui devient une partie du tribo-couche. Cette analyse confirme également que l'oxygène forme un composant chimique majeur au sein du tri-couche, susceptible d'être sous forme d'oxydes associés au Ti provient du (TiC), et de traces de W et de Co. Quelques petites particules de TiC sont précipitées à l'interface du métal dur à haute température, ce qui peut empêcher la croissance des particules de WC et améliorer la résistance à l'usure. Les analyses par MEB/EDX montre la présence tribo-couche confirmé par les éléments trouvant dans la piste qui est en train d'être affinée (particules plus petites avec une plus grande surface).

### IV-2-4 **Conclusion** :

Au terme de ce chapitre, nous avons présenté et analysé des résultats expérimentaux des coefficients de frottements, taux des volumes usés et la microstructure des pistes usées par MEB et EDX pour une composition (WC-Co-TiC), de quatre nuances (5% ,10%,15%) TiC , et une nuance sans TiC comme référence. Les résultats obtenus pour ces tests de frottements, montrent les indications suivantes :

- Un coefficient de frottement pour la température  $T= 650^{\circ}\text{C}$  (P 4) pour la nuance (ND), présente une nette stabilité relativement sur le long du test avec une valeur moyenne de frottement  $\mu=0.42$ . Cette indication montre nettement l'influence de la teneur en TiC(15%) en fonction des paramètres thermomécaniques sévères.
- La nuance référence (NA) sans TiC indique une évolution instable avec la présence de nombreux pics durant toute la durée du test.
- La comparaison des résultats de l'évolutions du coefficient de frottement entre les deux vitesses, indique une stabilité du coefficient de frottement, pour les nuances qui contient une teneur en TiC.
- Les résultats de la comparaison des taux des volumes usés des différentes nuances, montrent que le volume usé est en nette décroissance en fonction de l'augmentation de la teneur du TiC dans les différentes nuances.

Les résultats de la microstructure des pistes usées par MEB et EDX après les tests d'usure, nos donne des indications suivantes :

- Les tests à hautes températures ( $450^{\circ}\text{C}$ )et ( $650^{\circ}\text{C}$ ), du matériau (cermet) a retardé l'oxydation ce qui conduit à une amélioration de la résistance à l'usure, au frottement et à la résistance à l'oxydation suite à la présence du TiC dans le cermet.
- La présence de TiC donne une morphologie (en forme de plaque tribo couche), ce qui favorise la formation d'une couche de bonne résistance à l'oxydation et l'usure ce qui améliore le comportement de dégradation (usure).
- Les analyses indique que l'oxyde formé est compacte, et réparti sur toute la piste d'usure (formation d'un film d'oxyde) ce qui améliore la résistance à l'usure à haute température.
- L'analyse de la piste usée par EDX montre des spectres de différents pics contenant des éléments (C, O, Al, Ti, Co, W) qui font parties de la couche résistante à l'usure.

**Conclusion Générale**

### Conclusion Générale :

Le processus d'usure thermomécanique est l'un des mécanismes de dégradation des surfaces des matériaux. Parmi les éléments et les installations machines affectés par ce processus de dégradation de surface des matériaux (pastilles des outils de coupes, galets de laminage à chaud, filières de forages, matrice d'estampage et forgeage, équipements aérospatiales.....).

Le travail de recherche réalisé vise à apporter une amélioration significative aux comportements tribologiques des cermets (WC-Co), dans les conditions thermomécaniques sévères par l'incorporation du carbure de titane (TiC). Le TiC est une voie prometteuse, pour améliorer le comportement tribologique, une bonne résistance au frottement et garantie à l'usure, une bonne performance dans des conditions thermomécaniques avec une stabilité chimique.

La stratégie de recherche qui a été développée dans ce travail est la comparaison des tests expérimentaux de frottement et des taux d'usure des cermets avec différents rapports WC/TiC-Co (5%, 10%, 15%) de TiC, et une nuance de référence sans TiC (WC-Co). Une gamme de tests expérimentaux de frottement sec entre les différentes nuances (cermets), en contact avec une bille en alumine sur un tribomètre à haute température, en utilisant des paramètres sévères (distance parcourue, vitesses de glissement, températures de contact). Ce travail de recherche présente aussi une méthodologie, de simulation de l'usure par l'introduction du modèle d'Archard modifié selon un code commercial.

Au terme des recherches menées dans cette thèse, nous tirons les conclusions et observations suivantes :

- Nous pouvons dégager quelques remarques, quant à la préparation des échantillons (cermets) à partir de la poudre jusqu'à la caractérisation. Tout d'abord l'élaboration des cermets par la métallurgie des poudres et leurs frittage est très délicate, vue le nombre de paramètres à considérer pour garantir les conditions recherchés soient :
  - Caractéristiques des grains de la poudre (humidité,...) et leur géométrie.
  - Broyage optimal pour une bonne homogénéité ( temps, vitesse du broyeur).
  - Compactage maximal(densité).
  - Frittage optimal(température, temps d'échauffement et refroidissement).

Pour la caractérisation de nos échantillons (cermets), ils sont adaptés aux norme (SI), concernant la dureté superficielle et la micro-dureté, des différents nuances. La microstructure des nuances indique une homogénéité acceptable, ce qui rend ces échantillons aptes a des tests de frottement fiables.

Nous avons tiré des remarques de la procédure du protocole expérimentale, de la manière suivante :

- Une description des caractéristiques du tribomètre à chaud et des différents paramètres capables d'être utilisés dans notre étude et permet de nous donner des résultats scientifiques de qualités.
- Une campagne d'essais de frottements a permis de tester différentes nuances, en appliquant divers paramètres thermomécaniques sévères.
- L'originalité de la démarche des tests de frottements consiste en l'utilisation d'un long cycle.
- Une analyse des pistes usées permet de suivre une démarche permettant de calculer le volume usé, sur la base du fractionnement de la piste en quatre profils espacés de  $90^\circ$  entre eux. Une méthode de discrétisation par Excel des quatre profils de chaque piste, nous a donné des résultats des volumes usés de valeur scientifiquement acceptable.

Au terme de cette recherche nous tirons des observations des résultats expérimentaux des coefficients de frottement et des taux des volumes usés pour la composition (WC-Co-TiC) (cermets), de quatre nuances (5% ,10%,15%) TiC , et une nuance sans TiC comme référence. Les résultats obtenus pour les tests de frottement des différentes cermets en contact avec une bille en alumine en fonction des différents paramètres thermomécaniques, montrent ce qui suit:

- Un COF pour la température  $T= 650^\circ\text{C}$  (P 4) pour la nuance (ND), présente une relative stabilité le long du test avec une valeur moyenne de frottement  $\mu=0.42$ . Cette indication montre nettement l'influence de la teneur en TiC (15%) en fonction des paramètres thermomécaniques sévères.
- La nuance référence (NA) sans TiC indique une évolution instable avec présence de nombreux pics durant toute la durée du test.
- La comparaison des résultats de l'évolutions du coefficient de frottement avec les deux vitesses, indique une stabilité de ce paramètre, pour les nuances qui contenant le TiC.



- Les résultats de la comparaison des taux des volumes usées des différentes nuances, montrent que le volume usé est en nette décroissance en fonction de l'augmentation de la teneur du TiC.

Au terme des résultats et analyses de la microstructure des pistes usées par MEB et EDX après les tests d'usures, nous tirons les conclusions suivantes :

- Les tests à hautes températures (450°C) et (650°C), du matériau (cermet) ont montré que la présence du TiC dans le cermet a retardé l'oxydation ce qui conduit à une amélioration de la résistance à l'usure, au frottement et à l'oxydation.
- La présence de TiC présente une morphologie (en forme de plaque tribo couche), ce qui favorise la formation d'une couche résistante à l'oxydation et améliore le comportement de dégradation (usure).
- Les analyses indiquent que l'oxyde formé est compact adhérent, et réparti sur toute la piste d'usure sous forme d'un film d'oxyde ce qui améliore la résistance à l'usure à haute température.
- L'analyse par EDX de la piste usée montre des spectres de différents pics contenant des éléments (C, O, Al, Ti, Co, W).

L'étude réalisée dans ce travail de recherche confirme que les cermets de (WC-Co-TiC) présentent des caractéristiques tribologiques prometteuses dans des conditions thermomécaniques sévères.

Ces résultats expérimentaux peuvent être considérés comme une base sérieuse pour la confection d'une gamme de fabrication d'outils qui travaillent à haute température (laminage à chaud, estampage ....).

Ces cermets avec TiC qui travaillent dans des conditions thermomécaniques très sévères ont une perspective d'applications dans plusieurs domaines industriels:

- Les industries stratégiques (aéronautique, automobile, ferroviaire, nucléaire, armement,...) font largement appel aux produits de la métallurgie des poudres cela avec une maîtrise du processus d'élaboration jusqu'au frittage cela permet d'avoir des propriétés mécaniques intéressantes.
- Les pièces (cermets) travaillant à l'usure représentent une application récente et prometteuse en construction mécanique qui suscite le développement de nuances renforcées par le (TiC).

- La simulation numériques par un code de calcul (Ansys, Abaqus, Comsol) est une solution envisageable , pour un pronostic le l'usure (volume) en temps réel.

**Références Bibliographiques**

## Références Bibliographiques :

- [1] **D. Duman, H. Gökçe, and H. Çimenoglu**, “Synthesis, microstructure, and mechanical properties of WC–TiC–Co ceramic composites,” *Journal of the European Ceramic Society*, 32 (2012) 1427-1433.
- [2] **Y. Li, N. Liua, X. Zhang, and C. Rong**, “Effect of WC content on the microstructure and mechanical properties of (Ti, W)(C, N)–Co cermets,” *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 26 (2008) 33–40.
- [3] **P. Ettmayer, H. Kolaska, W. Lengauer, and K.Dreyer**, “Ti (C,N) cermets-metallurgy and properties,” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater* 13 (1995) 343–351.
- [4] **Y.J. Zhao, Y. Zheng, W. Zhou, X.P. Lv**, Characterization of functionally gradient Ti (C,N)-based cermets fabricated by vacuum liquid phase sintering and nitriding treatment during cooling, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 46 (2014) 20–23.
- [5] **Junbo Liu<sup>a</sup>, Ji Xiong<sup>a,\*</sup>, Zhixing Guo<sup>a</sup>, Tian'en Yang<sup>a</sup>, Weicai Wan<sup>b</sup>, Liming Zhou<sup>a</sup>, Junliu Ye<sup>a</sup> Tijun Li<sup>a</sup>, Shenhou Li<sup>a</sup>**. Effect of graphite size on the tribological behavior of Ti (C, N)-based cermets self-mated wear *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 64 (2017) 83–89.
- [6] **S. Kang**, Stability of Ni in Ti (C, N) solid solutions for cermets applications, *Powder Metall.* 40 (1997) 139–142.
- [7] **Y. Zheng, W.J. Liu, Q. Yuan, L. Wen, W.H. Xiong**, Effect of grain inhibitor on microstructure and mechanical properties of Ti (C,N)-based cermet, *Key Eng. Mater.* 280–283 (2005) 1413–1416.
- [8] **Yijie Zhao<sup>a</sup>, Yong Zheng<sup>a,\*</sup>, Yi Li<sup>a</sup>, Wei Zhou<sup>a</sup>, Guotao Zhang<sup>a</sup>, Jiajie Zhang<sup>a</sup>, Weihao Xiong<sup>b</sup>** Microstructure and performance of graded Ti(C, N)-based cermets modified by nitriding treatment during different sintering stages *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 62(2017) 1-8.
- [9] **J. Pirso, M. Viljus, S. Letunovits**, Friction and dry sliding wear behavior of cermets, *Wear* 260 (2006) 815–824.
- [10] **E.B. Clark, and B. Roebuck**, “Extending the application areas for titanium carbonitride cermets,” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 11(1992), pp. 23–33.

- [11] **Q.Q. Yang, W.H. Xiong, S.Q. Li, Z.H. Yao, and X. Chen**, “Early high temperature oxidation behaviour of Ti(C, N)-based cermets in air,” *Corros. Sci.* 52 (2010) 3205–3211.
- [12] **J.X. Deng, F.F. Wu, J.L. Zhao**, Wear mechanisms of gradient ceramic nozzles in abrasive air-jet machining, *Int. J. Mach. Tool. Manuf.* 47(2007) 2031 –2039.
- [13] **M.C. Vera, J. Ramirez-Rico, J. Martinez-Fernandez, M. Singh**, Sliding wear resistance of sintered SiC-fiber bonded ceramics, *Int. J. Refract. Met. Hard. Mater.* 49 (2015) 232–239.
- [14] **Zengbin Yin<sup>a,\*</sup>, Juntang Yuan<sup>a</sup>, Chuanzhen Huang<sup>b</sup>, Zhenhua Wang<sup>a</sup>, Lei Huang<sup>a</sup>, Yu Cheng<sup>a</sup>**, Friction and wear behaviors of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC micro-nano-composite ceramic sliding against metals and hard materials *Ceramics International* 42 (2016) 1982 –1989.
- [15] **S. Ekemar, L. Lindholm, and T. Hartzell**, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 1 (1982) 37–40.
- [16] **J.R. Davis**, “**Materials for Metalworking**,” ASM Specialty handbook: Tools Materials, ASM International, (1995) 192.
- [17] **M. Aristizabal, L.C. Ardila, F.Veiga, M.Arizmendi, J.Fernandez, and J.M. Sánchez**, “Comparison of the friction and wear behaviour of WC–Ni–Co–Cr and WC–Co hardmetals in contact with steel at high temperatures,” *Wear* 280– 281 (2012) 15–21.
- [18] **A. Karimi, and Ch. Verdon**, “Hydroabrasive wear behaviour of high velocity oxyfuel thermally sprayed WC–M coatings,” *Surf. Coat. Technol.* 62 (1993) 493.
- [19] **X. Wang, Z. Zou, M. Zhang, and S.Qu**, “Microstructure and wear properties of WC–TiC–Co/CuZnNi composite surface coating,” *Journal of Materials Processing Technology* 172 (2006) 188–194.
- [20] **M. Humenik, N. Parikh**, Cermets, 1. Fundamental concepts related to micro-structure and physical properties of cermet systems, *J. Am. Ceram. Soc.* 39 (1956) 60–63.
- [21] **Tyler L. Stewart, Kevin P. Plucknett<sup>\*</sup>**, The sliding wear of TiC and Ti(C,N) cermets prepared with a stoichiometric Ni<sub>3</sub>Al binder, *Wear* 318 (2014) 153– 167.

- [22] **Y. Li, N. Liu, Z. Zhang, and C. Rong**, “Effect of WC content on the microstructure and mechanical properties of (Ti, W)(C, N)–Co cermets,” *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 26 (2008) 33–40.
- [23] **C. J. Li, A. Ohmori, and Y. Harada**, “Effect of Powder Structure on the structure of thermally sprayed WC-Co coatings,” *Journal of Materials Science* 31 (1996) 785-794.
- [24] **T. L. Stewart, and K.P. Plucknett**, “The sliding wear of TiC and Ti(C,N) cermets prepared with a stoichiometric Ni<sub>3</sub>Al binder,” *Wear* 318 (2014) 153– 167.
- [25] **R. J. Talib, A. M. Zaharah, M. A. Selamat, A. A. Mahaidin, and M. F. Fazira**, “Friction and Wear characteristics of WC and TiCN-coated Insert in Turning Carbon Steel Workpiece,” *Procedia Engineering* 68 (2013) 716–722.
- [26] **Li, C. J., Ohmori, A., Harada, Y.**, Effect of Powder Structure on the structure of thermally sprayed WC-Co coatings, *Journal of Materials Science* 31(1996) 785-794.
- [27] **T. Kagnaya, C. Boher, L. Lambert, M. Lazard, and T. Cutard**, “Wear mechanisms of WC–Co cutting tools from high-speed tribological tests,” *Wear* 267 (2009) 890–897.
- [28] **K. Bonny, P. De Baets, Y. Perez, J. Vleugels, and B. Lauwers**, “Friction and wear characteristics of WC–Co cemented carbides in dry reciprocating sliding contact,” *Wear* 268 (2010) 1504–1517.
- [29] **H. Engqvist, H. Högberg, G.A. Botton, S. Ederyd, and N. Axén**, “Tribofilm formation on cemented carbides in dry sliding conformal contact,” *Wear* 239 (2000) 219–228.
- [30] **J. Pirso, M. Viljus, K. Juhani, and S. Letunovits** “Two-body dry abrasive wear of cermets,” *Wear* 266 (2009) 21– 29.
- [31] **M. Komac, and S. Novak**, “Mechanical and wear behaviour of TiC cemented carbide,” *Int. J. Refract. Hard Mater* 4 (1985) 21–26.
- [32] **I. Hussainova**, “Effect of microstructure on the erosive wear of titanium carbide-based cermets,” *Wear* 255 (2003) 121–128.

- [33] **C. C. Onuoha, C. Jin, Z. N. Farhat, G. J. Kipouros, and K. P. Plucknett**, “The effects of TiC grain size and steel binder content on the reciprocating wear behaviour of TiC-316L stainless steel cermets,” *Wear* 350-351 (2016) 116–129.
- [34] **S. Kang**, “Cermets, in: V.K. Sarin (Ed.) *Comprehensive Hard Materials*,” vol. 1(2014), Elsevier Ltd., New York,(2014) pp. 139 –181.
- [35] **N. Durlu**, “Titanium carbide based composites for high temperature applications,” *J.Eur. Ceram. Soc.* 19 (1999) 2415–2419.
- [36] **H. Klaasen, L. Kollo, and J. Kuebarsepp**, “Mechanical properties and wear performance of compression sintered TiC based cermets,” *Powder Metall.* 50 (2007) 132 –136.
- [37] **H. Klaasen, J. Kuebarsepp, and F. Sergejev**, “Strength and failure of TiC based cermets,” *Powder Metall.* 52 (2009) 111–115.
- [38] **C. Jin, and K. P. Plucknett**, “Microstructure instability in TiC-316L stainless steel cermets,” *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 58 (2016) 74–83.
- [39] **M. Humenik, and N.M. Parikh**, “Cermets: I, fundamental concepts related to microstructure and physical properties of cermets systems,” *J Am Ceram Soc.* 39 (1956) 60–63.
- [40] **D. Duman**, “Production of Titanium Carbide Powder From Titanium Scrap and Its Utilization in Hard Metal Production, MSc. Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul (2010).
- [41] **K. Bonny, P. De Baets, Y. Perez, J. Vleugels, and B. Lauwers**, “Friction and wear characteristics of WC–Co cemented carbides in dry reciprocating sliding contact,” *Wear* 268 (2010) 1504–1517.
- [42] **E. Isakov**, “Cutting data for turning of steel,” New York: Industrial Press Inc, (2009).
- [43] **R. Vander Merwe, and N. Sacks**, “Effect of TaC and TiC on the friction and dry sliding wear of WC–6 wt.%Co cemented carbides against steel counterfaces,” *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 41 (2013) 94–102.
- [44] **E. Pagounis, and V. K. Lindroos**, “Processing and particulate reinforced steel matrix composites,” *Mater. Sci. Eng. A* 246 (1998) 221–234.

- [45] **O.N. Dogan, J.A . Hawk, J.H. Tylczak, R.D. Wilson, R.D. Govier**, Wear of titanium carbide reinforced metal matrix composites, *Wear* 225 (1999) 758 –769.
- [46] **F. Akhtar, S.J. Guo**, Mechanical and fretting wear properties of TiC– stainless steel composites, *Mater. Charact.* 59 (2008) 84– 94.
- [47] **Chukwuma C. Onuoha<sup>1,2</sup>, Chenxin Jin<sup>1</sup>, Zoheir N. Farhat, Georges J. Kipouros<sup>3</sup>, Kevin P. Plucknett<sup>\*</sup>** The effects of TiC grain size and steel binder content on the reciprocating wear behaviour of TiC-316L stainless steel cermets, *Wear* 350-351 (2016) 116– 129.
- [48] **H. Reshetnyak, and J. Kubarsepp**, “Mechanical properties of hard metals and their erosive wear resistance,” *Wear* (1994) 177 – 185.
- [49] **I. Hussainova, and J. Kubarsepp**, “The effect of impact angle on the erosion of cermets,” *Wear* 250 (2003) 818– 825.
- [50] **Hamilton G.M., Goodman L.E.**, The stress field createsby a circular sliding contact, *Appl.Mech.* 33(1966) p. 371-376.
- [51] **Hamilton G.M.**, Explicit equations for the stresses beneath a sliding spherical contact, *Proc.Inst. Mech. Ing., Vol. 197c*, (1983), p. 53-59.
- [52] **Hills D. A., Nowell D. & A. S.** Mechanics of elastic contacts. Butterworth-Heinemann Ltd, OXFORD(1993).
- [53] **Hills, D. A., & Nowell, D.** Mechanics of fretting fatigue. *Solid mechanics and its applications*, 30, (1994) p.236.
- [54] **Johnson K. L.** Contact mechanics. Cambridge University press, Cambridge (1985).
- [55] **Berthier Y.**, Mécanisme et tribologie, Thèse d'état es-sciences, INSA Lyon, (1988).
- [56] **Berthier Y.**, Experimental evidence for friction and wear modelling, *Wear*, 139, 77-92, (1990).
- [57] **Berthier Y.**, Background on friction and wear, *J. Handbook of Materials Bahaviour models*, USA Academic press, San Diego, 677-697, (2001).
- [58] **Wodydt, M.** Application des données tribologiques des matériaux techniques d'ingénieur BM 7 006 (2004).



- [59] **Descartes S., Berthier Y.**, Rheology and flows of solid third body: background and application to an MoS<sub>1.6</sub> coating, *Wear* 252 (2002) 546-556.
- [60] **Amirat M.**, Etude thermomécanique et caractérisation du comportement tribologique de couples de matériaux ferromagnétique/ ferromagnétique et diamagnétique/ferromagnétique soumis à un champ magnétique dans une atmosphère contrôlée, Thèse, Université de Poitiers,(2008).
- [61] **Amirat M., Zaïdi H., Frêne J.**, A study of contact temperature and tribological behaviour of magnetized sliding brass-steel couple in different gas environments, *Proc. IMechPart J : J. Engineering tribology*, 222, 279-290, (2008).
- [62] **Schwam, D., J. Wallace, and S. Birceanu**, Effect of Design Factors on Thermal Fatigue Cracking of Die Casting Dies. 2004, DE-FC07-00ID138486(USA) , Case Western Reserve University/Dept of Materials Science and Engineering (2004).
- [63] **Graham, R. and J. Wallace**, Thermal Processing, Structure and Thermal Fatigue Relations for Dies Steel, in Die Casting Research Foundation, Inc., Die Casting Research Foundation of American Die Casting Institute, Inc (1974).
- [64] **Nieh, C.Y. and J.F. Wallace**, Thermal Fatigue Behavior of H-13 Die Steel for Aluminium Die Casting with Various Ion Sputtered Coatings, N.C. Report, Editor., National Aeronautics and Space Administration. p. 50 p July (1981).
- [65] **Medjedoub, F.**, Détermination des paramètres influant sur le phénomène d'endommagement par fatigue thermique des moules en fonderie sous pression d'aluminium. Thèse de Doctorat à l'Ecole des Mines de Paris,(2004).
- [66] **Medjedoub, F., et al.**, Experimental conditions and environment effects on thermal fatigue damage accumulation and life of die-casting steel X38CrMoV5 (AISI H11). *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, (2008). p. 336-349.
- [67] **Ebner, R., et al.**, Thermal fatigue behaviour of hot-work tool steels heat check nucleation and growth. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, (2008). 3(2): p. 182-194.
- [68] **Rousseau, D.**, et al. Fatigue Thermique des Aciers à Outils Pour travail à Chaud. au 2ème Colloque International sur les Aciers à Outils pour Travail à Chaud, St-Etienne, (1977).

- [69] **AKAMATSU** Influence de l'état de surface sur les propriétés de fatigue des matériaux métalliques : étude bibliographique. Note EDF HT-A4/96/022/A(1997).
- [70] **Colin G.**, Les mécanismes de l'usure et du frottement, Trait. Thermique, 208, 79-86, (1987).
- [71] **Stempfle P.**, Tribologie des matériaux carbonés : études des mécanismes contrôlant la formation et la stabilité du troisième corps en frottement sec, Thèse, Université de haute alsace, (2001).
- [72] **Buckley D.H.**, Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication, Elsevier,(1981).
- [73] **M'Evan E.** Stresses in elastic cylinders in contact along a generatrix. Phil. Mag., (1949). 40, 454-459.
- [74] **Horst Czichos**, Tribology, Tribology series n°1 Elsevier, (1978).
- [75] **Ayel J.**, Les lubrifiants moteur pertes par frottement et usure, Journée d'étude institut français du pétrole, Technip, (1979).
- [76] **Stempfle P.**, Tribologie des matériaux carbonés : études des mécanismes contrôlant la formation et la stabilité du troisième corps en frottement sec, Thèse, Université de haute alsace, (2001).
- [77] **Meng, H. C., & Ludema, K.C.**Wear models and predictive equations : their form and content. Wear, (1995) 181-183, 443-457.
- [78] **Archard J.F.**, Contact and rubbing of flat surfaces, Journal of Applied Physics, 24, 981-983, (1953).
- [79] **J.F.ARCHARD**, Contact and rubbing of flat surfaces, Journal of Applied Physics, volume 24, Issue 8, (1953), pp.981-988.
- [80] **M.CARTIE**, Guide d'emploi des traitements de surface appliqués aux problèmes de frottement, Edition Tec & Doc, (2000).
- [81] **Féchant L.**, Le contact électrique, phénomène physique et matériaux, Hermes, Paris, (1995).
- [82] **Zhu M.H., Zhou Z.R., Kapsa P., Vincent L.**, An experimental investigation on composite fretting mode, Tribology International, 34,733.

- [83] **Berthier Y.**, Colombié C., Godet M., Lofficial G., Vincent L., l'usure par petits débattements, EUROTRIB, section 5.5.1, 1-8, (1985).
- [84] **Fouvry S.**, Etude quantitative des dégradations en fretting, Thèse, Ecole centrale de Lyon, (1997).
- [85] **Yantio Njankeu Sabeya G.R.**, Paris J. Y., Denape J., Fretting wear of coated titanium alloy under free displacement, *Wear*, 264, 166-176, (2008).
- [86] **Hager Jr. C.H.**, Sanders J.H., Sharma S., Effect of temperature on the characterisation of fretting wear [87] **Berthier Y.**, Colombié C., Godet M., Lofficial G., Vincent L., l'usure par petits débattements, EUROTRIB, section 5.5.1, 1-8, (1985).
- [88] **Fouvry S.**, Kapsa P., Vincent L.; Quantification of fretting damage, *Wear*, 200, 186-205, (1996).
- [89] **Chen G.X.**, Zhou Z.R., Study on transition between fretting and reciprocating sliding wear, *Wear*, 250, 665- 672, (2001).regimes at Ti6Al4V interfaces, *Wear*, 260, 493-508, (2006).
- [90] **Fouvry S.**, Paulin C., Liskiewicz T., Application of an energy wear approach to quantify fretting contact durability : introduction of a wear energy capacity concept, *Tribology international*, 40, 1428-1440, (2007).
- [91] **Mary C.**, Fouvry S., Numerical prediction of fretting contact durability using energy wear approach optimisation of finite-element model, *Wear*, 263, 440-450, (2007).
- [92] **Michel Eudier** Métallurgie des poudres, Techniques de l'ingénieur- M864, Paris.
- [93] **Didier Bouvard**, Métallurgie des poudres. Hermès Science – Lavoisier Paris,(2002).
- [94] Les référenciel du Nord Rubrique des matériaux industeriels.
- [95] **H. Pierson**, Handbook of Refractory Carbides and Nitrides- Properties,Characteristics, Processing and Applications. Noyes Publications,Westwood,New Jersey USA – 1996.

- [96] **S.Y. Zhang**, “Titanium carbonitride-based cermets: processed and properties,” *Mater.Sci. Eng. A* 163 (1993) 141–148.
- [97] **S. Bolognini, G. Feusier, D. Mari, T. Viatte, and W. Benoit**, “TiMoCN-based cermets: high temperature deformation,” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater* 21 (2003) 19–29.
- [98] **A. Chavanes, E. Pauty, and M. Woydt**, “Titanium-molybdenum carbonitride as lightweight and wear resistant monolithic material,” *Wear* 256 (2004) 647–656.
- [99] **G. Ostberg, K. Buss, M. Christenesen, S. Norgren, H.O. Andren, D. Mari, G. Wahnström, and I. Reineck**, “Mechanism of plastic deformation of WC–Co and Ti(C, N)–WC–Co,” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater* 24 (2006) 135–144.
- [100] **Q.Q. Yang, W.H. Xiong, S.Q. Li, H.X. Dai, and J. Li**, “Characterization of oxide scales to evaluate high temperature oxidation of Ti(C, N)-based cermets in static air,” *J. Alloys Compd* 506 (2010) 461–467.
- [101] **German, R.M.** Sintering theory and practice. Wiley-interscience publication, ed. John Wiley et sons. (1996).
- [102] **Bernache-Assolant**, Les mécanismes de densification en phase solide, in *chimie-physique du frittage*. 1993, Hermès :Paris, (1993)p. 165-222.
- [103] **Damien Gendron**, Etude numérique et expérimentale du frittage à l'échelle du grain, thèse doctorat, université Bordeaux1, septembre(2001), p.9.
- [104] **J.F. Archard**, Contact and rubbing of flat surfaces, *J Appl. Phys.* Vol. 24 (1953) 981–988.
- [105] **S.C. Lim and M.F. Ashby**, Wear-mechanism maps, *Acta metall*, Vol. 35 (1987) 1–24.
- [106] **A. Cantizano, A. Carnicero, G. Zavarise**, Numerical simulation of wear-mechanism maps, *Computational Materials Science* Vol. 25 (2002) 54–60.
- [107] **R. Holm**, *Electric Contacts*, Almqvist & Wiksells Boktryckeri, Uppsala, (1946).
- [108] **G.K. Sfantos, M.H. Aliabadi**, Wear simulation using an incremental sliding boundary element method, *Wear* Vol. 260 (2006) 1119–1128.
- [109] **L. Schmitz, J. E. Action, D. L. Burris, J. C. Ziegert, & W. G. Sawyer**, Wear-Rate Uncertainty Analysis, *ASME Journal of Tribology*, Vol. 126 (2004) 802–808.

- [110] **Archard, J.F.** Wear theory and mechanisms. In: M.B. Peterson, W.O. Winer (eds.). *Wear Control Handbook*. (1980) ASME.
- [111] **J. J. Madge, S. B. Leen and P. H. Shipway:** *Wear*, 2007, 263, 542–551.
- [112] **Andersson, S.** Partial EHD theory and initial wear of gears. Doctoral thesis, Department of Machine Elements, KTH, Stockholm, Sweden(1975).
- [113] **M. Öqvist,** Numerical simulations of mild wear using updated geometry with different step size approaches, *Wear* Vol. 249 (2001) 6–11.
- [114] **I.R. McColl, J.Ding, S.B. Leen,** Finite element simulation and experimental validation of fretting wear, *Wear* Vol. 256 (2004) 1114–1127.
- [115] **G.K. Sfantos, M.H. Aliabadi,** Wear simulation using an incremental sliding boundary element method, *Wear* Vol. 260 (2006) 1119–1128.
- [116] **Olofsson, U.** (1997) Characterisation of wear in boundary lubricated spherical roller thrust bearings, *Wear*, 208, (1997) pp. 194–203.
- [117] **W. G. Sawyer,** Surface shape and contact pressure evolution in two component surfaces: application to copper chemical-mechanical-polishing, *Tribology Letters*, Vol. 17 (2004) 139–145.
- [118] **O.Barrau** THESE ‘étude de frottement et de l’usure d’acier a outils de travail a chaud ‘Institut National Polytechnique de Toulouse soutenue (2004) P 177.
- [119] **Hugnell, A., Björklund, S. and Andersson, S.** Simulation of the mild wear in a cam-follower contact with follower rotation. *Wear*, 199, (1996) pp. 202-210.
- [120] **Podra, P.** FE wear simulation of sliding contacts. Doctoral thesis, Dept. of Machine Design, KTH(1997).
- [121] **J.C.G. Milan, M.A. Carvalho, R.R. Xavier, S.D. Franco, and J.D.B. De Mello,** “Effect of temperature, normal load and pre-oxidation on the sliding wear of multi-component ferrous alloys,” *Wear* 259 (2005) 412–423.
- [122] **M. Pellizzari, D. Cescato, and M.G. De Flora,** “Hot friction and wear behaviour of high speed steel and high chromium iron for rolls,” *Wear* 267 (2009) 467–475.

[123] **N. Hashemi, A. Mertens, H.M. Montrieux, J.T. Tchuindjang, O. Dedry, R. Carrus, and J. Lecomte-Beckers**, “Oxidative wear behaviour of laser clad high speed steel thick deposits: influence of sliding speed, carbide type and morphology,” *Surface and Coatings Technology* 315 (2017) 519- 529.

[124] **J.K. Lancaster**, “The influence of substrate hardness on the formation and endurance of molybdenum disulphide films,” *Wear* 10 (1967) 103 –107.

[125] **H. Czichos, S. Becker, and J. Lexow**, “International multi-laboratory sliding wear tests with ceramics and steel,” *Wear* 135 (1989) 171–191.